



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

MAURÍCIO PEREIRA MAGALHÃES DE NOVAES SANTOS

**A IMPORTÂNCIA DO MOTOR NA SIMULAÇÃO DE CARROS E MOTOS EM
SITUAÇÃO DE TRÁFEGO**

Recife
2019

MAURÍCIO PEREIRA MAGALHÃES DE NOVAES SANTOS

**A IMPORTÂNCIA DO MOTOR NA SIMULAÇÃO DE CARROS E MOTOS EM
SITUAÇÃO DE TRÁFEGO**

Dissertação submetida ao programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Processos e Sistemas Térmicos

Orientador: Prof. Dr. Fábio Santana Magnani

Recife

2019

Catálogo na fonte
Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

S234i Santos, Maurício Pereira Magalhães de Novaes.
A importância do motor na simulação de carros e motos em situação de tráfego /
Maurício Pereira Magalhães de Novaes Santos. – 2019.
124f., il., figs., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Santana Magnani.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2019.
Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Mecânica. 2. Tráfego. 3. Modelo contínuo. 4.
Modelo discreto. 5. Motor. 6. Emissão. I. Magnani, Fábio Santana
(Orientador). II. Título.

621 CDD (22.ed)

UFPE/BCTG-2019/ 112

Maurício Pereira Magalhães de Novaes Santos

**A IMPORTÂNCIA DO MOTOR NA SIMULAÇÃO DE CARROS E MOTOS EM
SITUAÇÃO DE TRÁFEGO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 19/02/2019

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Ramiro Brito Willmersdorf (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

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

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente minha família por todo suporte e apoio que recebo em todas etapas da minha vida, especialmente minha mãe Maria Letícia, meu pai Mauro Roberto, meu irmão Gabriel, minha prima Marisa, minha namorada Maria Clara e PW.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Fabio Magnani, pelos conselhos, incentivos, ajudas e toda disponibilidade que recebo desde meu Trabalho de Conclusão de Curso.

Agradeço também aos meus colegas do LOST-UFPE (Fernando, Guilherme, Marcela e Alcides) por toda ajuda e conselhos.

P. O senhor não considera a sua declaração como desleal?

R. Não, senhor. A verdade científica está além da lealdade e deslealdade.

P. O senhor tem certeza de que sua declaração o representa a verdade científica?

(ASIMOV, 2009, p. 35)

RESUMO

O sistema de transporte é parte essencial para o funcionamento de uma cidade. No Brasil o tráfego é composto em sua maior parte por carros, motos e ônibus. A grande quantidade de veículos juntamente com uma infraestrutura inadequada intensifica problemas de natureza social e ambiental associados ao congestionamento. Pode-se listar como problemas ligados ao congestionamento: perda tempo, estresse, desperdício de combustível, maior emissão de poluentes e gases efeito estufa. Nesta pesquisa é proposto um modelo principal, microscópico contínuo no espaço, aplicado à simulação do tráfego de carros e motos. Esse modelo consiste na integração de três submodelos: tráfego, veículo e consumo. No submodelo do veículo o motor é considerado explicitamente e poderá influenciar na aceleração do veículo. Essa é uma característica não explorada em outros modelos de tráfego, nos quais usualmente o motor é considerado indiretamente pela limitação da aceleração máxima. O objetivo principal é investigar a importância do motor para análise energética e fluxo de veículos. Carros e motos são colocados aleatoriamente em faixas diferentes e apenas as motos podem mudar de faixa. Os parâmetros de entrada são baseados nos manuais dos veículos e estudos anteriores. Outros três modelos, mais simples e usados no estudo do tráfego, são utilizados para comparar o fluxo (veículos/h) e economia de combustível (km/l). Dois desses modelos são discretos no espaço e o terceiro utiliza o mesmo submodelo de tráfego do modelo principal, porém esses três modelos não consideram o motor para o deslocamento. Os resultados indicaram que os modelos que não consideram o motor para acelerar possuem acelerações irreais que não podem ser ignoradas devido à magnitude e número de ocorrências. O modelo contínuo utilizado para comparação resultou em fluxo semelhante ao obtido no modelo principal e em menor distância percorrida por litro de gasolina consumida. No entanto, essas diferenças podem ser reduzidas com mudanças nos parâmetros de entrada. Os modelos discretos resultaram em maiores diferenças relativas, principalmente em economia de combustível.

Palavras-chave: Tráfego. Modelo contínuo. Modelo discreto. Motor. Emissão.

ABSTRACT

It is essential for a city that the transportation system works properly. In Brazil, traffic is majorly composed of cars, motorcycles and buses. Large numbers of vehicles coupled with inadequate infrastructure intensify social and environmental problems associated with traffic congestion. Waste of time, stress, fuel waste, higher emission of pollutants and greenhouses gases are examples of problems related to traffic congestion. In this research is proposed a main model, that is microscopic and continuous in the space, to be applied in computational traffic simulation of cars and motorcycles. This model consists of the integration of three submodel: traffic, vehicle, and consumption. In vehicle submodel the engine is explicitly taking into account and may influence the acceleration of the vehicle. This is a feature not exploited in other traffic models, in which the engine is usually considered indirectly by restringing the maximum acceleration. The main goal of this research is to investigate the importance of the engine for energy analysis and flow of vehicles. Cars and motorcycles are randomly placed on different tracks and only motorcycles are allowed to change lanes. Input parameters are based on vehicle manuals and previous studies. Three other models, simpler and commonly used in the study of traffic, are used to compare the traffic flow (vehicles/h) and fuel economy (km/l). Two of these models are discrete in space and the third uses the same submodel of traffic of the main model. The results indicated that the models used for comparison have unreal accelerations that cannot be ignored due to the magnitude and number of occurrences. The continuous model used for comparison resulted in a flow similar to that obtained in the main model and in a smaller distance traveled per liter of gasoline consumed. However, these differences can be reduced with changes in the input parameters. Discrete models resulted in greater relative differences, mainly in fuel economy.

Keywords: Traffic modelling. Continuous model. Discrete model. Engine. Emission.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Cilindro e pistão de um motor	24
Figura 2 - Curvas características do motor: Potência máxima e torque máximo por rotação	26
Figura 3 - Mapa de desempenho de um motor de ignição por centelha	26
Figura 4 - Forças agindo em um veículo	27
Figura 5 - Potência disponível por marcha	28
Figura 6 - Escoamento sob um veículo em teste de túnel de vento	31
Figura 7 - Relação fundamental de Greenshields a) Velocidade-Densidade e b) Fluxo-Densidade	33
Figura 8 - Relação fundamental de Daganzo	34
Figura 9 - Diagrama espaço-tempo	35
Figura 10 - Exemplos das três frases do tráfego. a) Via de Acesso (VA) da pista, b) diagrama espaço-tempo e c) impacto das fases do tráfego na velocidade média	36
Figura 11 - Exemplo de aplicação do modelo de Gipps em situação de tráfego	40
Figura 12 - Modelo proposto por Meng <i>et al.</i> (2007)	41
Figura 13 - Ciclos de condução FTP -75	44
Figura 14 - Ciclos de condução HWFET	44
Figura 15 - Reprodução do estudo de Sugiyama <i>et al.</i> (2008) utilizando um simulador online	47
Figura 16 - Dados de vídeo do NGSIM referentes a I-80 (Emeryville, CA)	48
Figura 17 - Efeito da condição de tráfego na a) velocidade e b) consumo de combustível	49
Figura 18 - Módulos do modelo CMEM	52
Figura 19 - Pista de simulação	54
Figura 20 - Fluxograma da integração entre submodelos em Δt	55
Figura 21 - Atualização da velocidade nos modelos em Δt	56
Figura 22 - Parâmetros para garantir troca de faixa sem colisão para AMV e AMC	57
Figura 23 - Parâmetros para garantir troca de faixa sem colisão para AD1 e AD2	58
Figura 24 - Aceleração máxima para os carros segundo diferentes modelos	67
Figura 25 - Aceleração máxima para as motos segundo diferentes modelos	68

Figura 26 - Diferença da atualização da velocidade entre os submodelos.....	69
Figura 27 - Fluxo médio por número repetições em $\rho_m=13,33$ e $\rho_c=20$ para velocidade máxima de 135 km/h para carros e 54 km/h para motos no modelo de Meng et al.(2007).....	73
Figura 28 - Fluxo médio por número de repetições para AD2 em $\rho_m=13,33$ e $\rho_c=20$ para velocidade máxima de 108 km/h para carros e motos.....	73
Figura 29 - Fluxo médio por número de repetições para AMV em $\rho_m=13,33$ e $\rho_c=20$	74
Figura 30 - Fluxo médio por número de repetições para AMC em $\rho_m=13,33$ e $\rho_c=20$	75
Figura 31 - Fluxo médio por número de repetições para AD1 em $\rho_m=93,33$ e $\rho_c=40$	75
Figura 32 - Fluxo médio por número de repetições para AMV em $\rho_m=13,33$ e $\rho_c=20$ para inicialização semelhante ao modelo AD2.	76
Figura 33 - Aceleração máxima dos carros por velocidade, fator de massa e limitação de aceleração máxima de 2,0 m/s ² pelos pilotos.....	77
Figura 34 - Aceleração máxima das motos por velocidade, fator de massa e limitação de aceleração máxima de 3,0 m/s ² pelos pilotos.....	77
Figura 35 - Diagrama espaço-tempo em 100 m da pista durante 60 s para $\rho_c = 50,0$ e $\rho_m = 0,0$	79
Figura 36 - Diagrama espaço-tempo em 100 m da pista durante 5 s para $\rho_c = 10$ e $\rho_m = 13,33$	80
Figura 37 - Fluxo total da pista em função da densidade total	81
Figura 38 - Fluxo a) de carros e b) de motos em função da densidade de carros	81
Figura 39 - Fluxo de motos em função da densidade de motos para $\rho_c = 0$	82
Figura 40 - Velocidade média a) dos carros e b) das motos em função da densidade de carros.....	83
Figura 41 - Desvio padrão da velocidade a) de carro e b) de moto	84
Figura 42 - a) Percentual de motos que mudam de faixa e b) Percentual da frota de motos nas faixas em que os carros trafegam	85
Figura 43 - Economia de combustível a) dos carros e b) das motos.....	86
Figura 44 - Consumo energético e emissão de CO ₂ na pista.....	86
Figura 45 - Percentual de aceleração irreal no AMC para a) carros e b) motos.....	87

Figura 46 - Percentual de aceleração irreal para carros no a) AD1 e b) AD2	88
Figura 47 - Percentual de aceleração irreal para motos a) AD1 e b) AD2.....	89
Figura 48 - Diferença relativa média da economia de a) carros e de b) motos entre AMC e AMV por densidade de carro e moto	91
Figura 49 - Diferença relativa média da economia entre AD1 e AMV para a) carros e b) motos.....	92
Figura 50 - Comparação entre AD1, AD2 e AD3 para a) número de motos na faixa em que os carros trafegam e b) percentual de aceleração irreal $\rho_m = 186,66$	95
Figura 51 - Ciclo de condução para um veículo em tráfego livre ($\rho_c=0$ e $\rho_m=13,33$)	97
Figura 52 - Consumo energético médio e emissão média de CO ₂ para os carros na pista.....	98
Figura 53 - Consumo energético médio e emissão média de CO ₂ para as motos na pista	98
Figura 54 - a) aceleração média positiva e b) desaceleração dos carros por den- sidade de veículos.....	100
Figura 55 - a) aceleração média positiva e b) desaceleração das motos por den- sidade de veículos.....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estudo do tráfego por escala de tempo	20
Tabela 2 - Características principais dos modelos	56
Tabela 3 - Parâmetros definidos e justificativas	66
Tabela 4 - Comparação entre a integração analítica da equação do movimento com potência e velocidade constantes nas resistências com o método Diferenças Finitas (DF) e Runge-Kutta de quarta ordem (RK4)	72
Tabela 5 - Diferença relativa média da economia dos carros e das motos por den- sidade de moto em relação ao AMV	90
Tabela 6 - Diferença relativa média do fluxo dos carros e das motos por densidade de moto em relação ao AMV	93
Tabela 7 - Diferença relativa média do fluxo dos carros e das motos por densidade de moto de AD2 em relação aos modelos AD1 e AD3	94
Tabela 8 - Diferença relativa média por densidade de moto entre AMC e AMV para aceleração máxima das motos de $1,5 \text{ m/s}^2$	95
Tabela 9 - Valores de desempenho para FIAT PALIO 1.0	96
Tabela 10 - Consumo do carro por eficiência máxima do motor	96
Tabela 11 - Diferenças entre os ciclos de condução	99

LISTA DE SÍMBOLOS

P_m	Potência do motor
T_m	Torque do motor
ω	Rotação do motor
m	Massa
F_t	Força de tração
F_a	Força aerodinâmica
F_r	Força de rolagem
$F_{g,x}$	Força gravitacional
α	Percentual da potência disponível no motor
j	Marcha
R_f	Relação final de transmissão
r	Raio da engrenagem
R	Raio efetivo do pneu
η_{trans}	Eficiência mecânica de transmissão
γ_m	Fator de massa
m_{pv}	Massa do conjunto piloto-veículo
I_r	Momento de inércia das rodas
I	Momento de inércia das partes rotativas (exceto as rodas)
μ	Coeficiente de atrito do pneu
β	Percentual de uso do freio
θ	Inclinação angular da pista
C_r	Coeficiente de rolagem
g	Aceleração de gravidade
ρ_{ar}	Densidade do ar
W	Velocidade do vento
A	Área frontal do veículo
C_a	Coeficiente de Arrasto
K_a	Fator de arrasto
Q	Fluxo de veículos
N	Número de veículos na pista
ρ	Densidade de veículos

Δx	Extensão da pista analisada
Δt_a	Intervalo de tempo de análise
V_{max}	Velocidade desejada
v	Velocidade do veículo
a_{max}	Aceleração máxima que o motorista deseja alcançar
v_{livre}	Velocidade em tráfego livre (Modelo de Gipps)
τ	Tempo de reação (Modelo de Gipps)
$v_{segurança}$	Velocidade máxima para não colisão (Modelo de Gipps)
b	Desaceleração máxima do veículo seguidor
b^+	Desaceleração máxima do veículo líder
x	Posição da parte frontal do veículo seguidor (Modelo de Gipps)
x^+	Posição da parte frontal do veículo Líder (Modelo de Gipps)
S	Comprimento do veículo (Modelo de Gipps)
v_{of}^+	Velocidade do veículo líder na outra faixa
v^+	Velocidade do veículo líder na mesma faixa
gap_{of}^+	Distância para o carro da frente na outra faixa
gap_{of}^-	Distância para o carro de trás na outra faixa
gap^+	Distância para o carro da frente na mesma faixa
gap^-	Distância para o carro de trás na mesma faixa
a_{des}	Aceleração desejada
η	Eficiência térmica (ou rendimento térmico)
f	Faixa
C	Consumo de combustível
Δt	Tempo de reação e tempo de atualização do sistema
P_{usada}	Potência Usada
a	Aceleração realizada
b_{of}^-	Desaceleração requerida para não colisão para o veículo seguidor na outra faixa
b_{of}	Desaceleração recuada para não colisão na outra faixa
ΔV_{lim}	Variação de velocidade para troca de faixa
b	Desaceleração máxima
V_{seg}	Velocidade de segurança

$V_{seg,of}$	Velocidade de segurança na outra faixa
Δx_c	Comprimento de célula
V_{des}	Velocidade desejada
d_{min}	Distância mínima entre os veículos
V	Velocidade do veículo seguidor
V^+	Velocidade do veículo líder
a_{max}	Aceleração máxima desejada pelo condutor
a_d	Aceleração discreta
a_1	Aceleração máxima para não colisão para AMC
a_2	Aceleração máxima para não colisão para AD1
ω_p	Rotação da potência máxima
ω_t	Rotação do Torque máximo
η_{max}	Eficiência térmica máxima do motor
$P_{m,usada}$	Potência Usada do motor
$P_{d,m}$	Potência disponível no motor
P_{fre}	Potência disponível para frenagem
C_{idle}	Consumo de combustível com o veículo parado
$\rho_{C_xH_yO_z}$	Densidade do combustível
PCI	Poder Calorífico Inferior
L	Comprimento da pista
t_o	Tempo de estabilização
$\rho_{C_8H_{18}}$	Densidade do octano puro
ρ_m	Densidade de motos
ρ_c	Densidade de carros
$\bar{\sigma}$	Valor médio do desvio Padrão da Velocidade
$\bar{V}$	Velocidade media
$\bar{C}$	Consumo médio de combustível
T	Tempo de análise
$\bar{Q}$	Fluxo médio de veículos
E_{pista}	Consumo energético médio por comprimento da pista
$E_{percorrida}$	Consumo enérgico médio por distância percorrida

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS	22
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	23
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
2.1	MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA (A PISTÃO).....	24
2.2	DESLOCAMENTO DO VEÍCULO.....	27
2.3	ANÁLISE DE TRÁFEGO	31
2.4	MODELOS DE TRÁFEGO	38
2.5	CICLOS DE CONDUÇÃO	43
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	45
4	METODOLOGIA	54
4.1	DESCRIÇÃO DOS MODELOS.....	54
4.1.1	Submodelo de tráfego.....	57
4.1.1.1	Mudança de faixa	57
4.1.1.2	Movimento em linha reta	59
4.1.2	Submodelo do veículo	61
4.1.2.1	Submodelo do motor	61
4.1.2.2	Submodelo do movimento do veículo	62
4.1.3	Submodelo de consumo	64
4.2	PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO E DIFERENÇAS ENTRE MODELOS	65
4.3	PARÂMETROS DE SAÍDA DA SIMULAÇÃO E DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS A PARTIR DE DADOS DE SAÍDA DA SIMULAÇÃO	69
4.4	MÉTODO PARA DETERMINAR ACELERAÇÃO DO VEICULO	70
4.5	NÚMERO DE REPETIÇÕES DO SISTEMA.....	72
4.6	INFLUÊNCIA DO FATOR DE MASSA	76
5	RESULTADOS.....	79
5.1	MODELO DE ACELERAÇÃO MÁXIMA VARIADA (AMV).....	80
5.2	MODELO DE ACELERAÇÃO MÁXIMA CONSTANTE (AMC) E MODELO DE ACELERAÇÃO DISCRETA (AD)	87

5.3	COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS: ANÁLISE MACROSCÓPICA	89
5.4	ANÁLISE DA PERFORMANCE DE CARROS E MOTOS	96
6	CONCLUSÃO	102
	REFERÊNCIAS	105
	APÊNDICE A: RESULTADOS DO MODELO DE ACELERAÇÃO MÁXIMA CONSTANTE (AMC)	111
	APÊNDICE B: RESULTADOS DO MODELO DE ACELERAÇÃO DISCRETA 1 (AD1)	116
	APÊNDICE C: RESULTADOS DO MODELO DE ACELERAÇÃO DISCRETA 2 (AD2)	121

1 INTRODUÇÃO

Meios de transportes motorizados constituem forma imprescindível de locomoção na sociedade atual. A popularização dos automóveis foi viabilizada pelos preços mais acessíveis proporcionados pela fabricação em massa. O uso de carros, motos e ônibus permite viver em cidades em que diversos serviços não sejam fornecidos de forma localizada, isto é, escolas, hospitais, locais de comércio, lazer e trabalho podem estar localizados em regiões diferentes.

O elevado número de veículos em grandes cidades em conjunto com um planejamento urbano não adequado resultam em congestionamentos. Perda de tempo, estresse, maior consumo de combustível, maior emissão de gases poluentes e gases intensificadores de efeito estufa são alguns dos problemas associados a esse problema. Os gases emitidos pelos veículos com motores de combustão interna podem provocar danos à saúde da população, pois podem resultar em problemas respiratórios, intensificar asma e doenças pulmonares. Além disso, os gases também podem afetar o meio ambiente com a formação de chuva ácida.

O CO₂, um dos gases intensificadores do efeito estufa, tem sua maior emissão no setor de energia associado ao setor transporte desde de 1990 segundo dados do IEMA (2015), Instituto de Energia e Meio Ambiente. Esses dados mostram que em 2013 o setor de transporte foi responsável por 47% das emissões e os carros e as motos emitiram 28% e 6,9% do total desse setor, respectivamente.

No Brasil existem programas de controle de emissão veicular. Em 1986 o Programa de Controle de Poluição de Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) foi criado devido à preocupação em reduzir o nível de emissão de veículos leves, como: óxido de carbono (CO), óxido de nitrogênio (NO_x), material particulado (MP), óxido de enxofre (SO_x) e dióxido de carbono (CO₂). O crescimento da frota de motocicletas resultou no surgimento de programa similar, Programa de Controle de Poluição de Ar por Motocicletas e Veículos Similares (PROMOT), em 2002. Desde o surgimento do programa até os dias atuais os limites de emissão para CO reduziram em 90% para os carros (BRASIL, 2013a) e em 70% para as motos (BRASIL, 2013b).

Além disso, acidentes de trânsito são uma das principais causas de morte no mundo, principalmente em países de renda baixa e média (OMS, 2018). O Brasil possui uma série de medidas asseguradas por lei que tentam preservar a integridade física dos motoristas e reduzir o número de acidentes, como a obrigatoriedade de uso de

capacetes para motocicletas e uso de cinto para passageiros de carros, proibição de consumo de álcool e aplicação de padrões de segurança para os veículos. Contudo, o país tem elevada taxa de mortalidade (mortes por acidente no tráfego por cem mil habitantes). Segundo dados de 2018 da Organização Mundial de Saúde (OMS), no Brasil a taxa de mortalidade é estimada em 19,7 mortes por cem mil habitantes. Para comparação, países desenvolvidos como Japão, Canadá e Estados Unidos têm valores menores: 4,1, 5,8 e 12,4, respectivamente. Já países em desenvolvimento também têm taxa de mortalidade elevadas, como Rússia (18), China (18,2) e Índia (22,6). Existem outras medidas que podem ser eficazes, como a redução da velocidade máxima. A chance de sobrevivência de um pedestre atingido por um carro é de 90% se a velocidade for inferior a 30 km/h, porém reduz para 50% com 45 km/h e é praticamente nula com 80 km/h (OMS, 2004).

Ainda que veículos motorizados representem uma forma popular de locomoção, a composição da frota de veículos no tráfego não é igual em todos os lugares do mundo. Em 2016, nos Estados Unidos, conforme dados da FHWA (*Federal Highway Administration*) os estados da Califórnia, Nova Iorque, Illinois, Michigan e Texas possuíam menos de 4% da sua frota composta por motos. Na Ásia existem locais onde a porcentagem de motos é bastante elevada. Vietnã, Índia, Indonésia, Tailândia, China, Camboja e Paquistão tinham mais de 60% da sua frota formada por motocicletas, conforme dados da primeira década do século XXI (KAMAKATÉ; GORDON, 2009).

O perfil atual do tráfego brasileiro consiste em um fluxo misto, onde principalmente carros e motocicletas coexistem. Segundo dados do Denatran (2018), Departamento Nacional de Trânsito, o número de automóveis, motocicletas e motonetas representam mais de 80% da frota de veículos brasileiros em 2018. No período citado haviam 53.885.695 automóveis (54% da frota) e 26.279.025 veículos de duas rodas (26,5% da frota). Deve-se também diferenciar a frota de veículos entre cidades grandes e pequenas no Brasil. Dados do DETRAN-PE (2018), Departamento Estadual de Trânsito de Pernambuco, informam que existem 2,6 carros para cada moto em Recife. Na maioria das cidades de Pernambuco existem uma proporção maior de motos em relação ao número de carros, como em: Salgueiro (1,6 motos para cada carro), Serra Talhada (1,7 motos para cada carro), Floresta (2,0 motos para cada carro) e Triunfo (2,4 motos para cada carro).

Os meios de transportes individuais são mais bem avaliados pela população brasileira devido a diversos fatores. O transporte público é visto com desconfiança por

causa do baixo conforto, superlotação, horários não confiáveis e falta de segurança. Os carros são o meio de transporte preferencial, pois os problemas citados anteriormente são inexistentes pelo senso comum. As motos também possuem as mesmas vantagens, mas grande parte da população enxerga as motocicletas como um meio de transporte causador de acidentes. No entanto, as motos são meios de transportes mais baratos, em aquisição e manutenção, e possibilitam um tráfego mais ágil em cidades que sofrem muito com os congestionamentos. Além disso, as motos também são uma boa alternativa para as cidades interioranas que muitas vezes têm um sistema de transporte público que não atende todas as regiões e não contam com uma infraestrutura de estradas (SILVA; ALVES DA SILVA, 2013).

Mesmo assim o transporte coletivo tem papel significativo na locomoção de pessoas no Brasil. O número de viagens de ônibus constitui 24 % do total, enquanto carros e motos equivalem a 25% e 4%, respectivamente (ANTP, 2018). Em cidades pequenas, com população entre 60 mil e 100 mil habitantes, o transporte coletivo representa apenas 19% das viagens e o transporte não motorizado representa 51% (ANTP, 2018).

Atualmente empresas como Google, Tesla e Uber estão desenvolvendo veículos totalmente autônomos, isto é, veículos que não precisam de um motorista. Essa tecnologia tem potencial de melhorar a fluidez do tráfego e diminuir a emissão de poluentes (STERN *et al.*, 2019). Os veículos autônomos também podem reduzir o número de acidentes no tráfego, pois cerca de 90% dos acidentes ocorrem devido a erro humano (distração, tempo de reação lento e hábitos ruins na direção) (SOUSA; ALMEIDA; NATIVIDADE-JESUS, 2017). A incorporação de veículos totalmente autônomos na frota, além do desenvolvimento tecnológico, também depende de aspectos legais e morais associado ao seu uso. No campo legal uma questão que deve ser avaliada é quem responsabilizar no caso de um acidente (dono do veículo, montadora ou desenvolvedor do software). A tomada de decisão do veículo é um processo que também deve ser considerado no campo moral, pois em situação de emergência deve ser definido quem proteger (dono, outros passageiros ou pedestre).

O estudo de tráfego permite entender quais são os mecanismos que levam a formação de congestionamentos e o que pode ser feito para diminuir sua ocorrência. Isso pode ser feito por observações realizadas com auxílio de vídeo, sensores instalados na pista ou com pessoas no local. Contudo, a simulação computacional é uma

técnica complementar que permite contemplar diversas condições da pista e contabilizar os poluentes. No Brasil, a medição de emissão e consumo de combustível são realizadas a partir de testes em laboratório segundo normas especificados pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). No entanto, nesses testes os veículos variam de velocidade conforme valores padronizados que não necessariamente representam o comportamento real em condição de tráfego.

A engenharia de tráfego é um ramo da engenharia de transporte que aborda tópicos como planejamento, projeto e operação de ruas e rodovias. O estudo de tráfego pode ser abordado em várias escalas de tempo, como pode ser visto na Tabela 1. A modelagem do fluxo e o planejamento de transporte são ramos da modelagem do tráfego, que se diferenciam na forma que abordam um problema. Para quem modela o fluxo de tráfego, a redução do congestionamento pode ser alcançada regulando a velocidade, instalando semáforos para controlar a entrada de veículos em uma via ou proibir veículos pesados de trafegar. Já o campo de planejamento de transporte pode indicar o mesmo efeito a partir de construção, modificação ou remoção de infraestrutura, como também por criação de incentivos para outros meios de transporte (TREIBER; KESTING, 2013).

Tabela 1 - Estudo do tráfego por escala de tempo

Escala de tempo	Campo de estudo	Aspecto do tráfego
0,1 segundo	Dinâmica veicular	Controle do motor e do freio
1 a 10 segundos	Dinâmica do fluxo de veículos	Tempo de reação, aceleração e desaceleração
1 minuto		Tempos do semáforo
10 minutos		Propagação de congestionamento
1 hora a 1 dia	Planejamento de transporte	Demanda diária no horário de pico
1 ano		Construção e mudança de infraestrutura
5 anos a 50 anos		Estrutura socioeconômica e mudança demográfica

Fonte: Adaptado de Treiber e Kesting (2013).

O uso de modelos em conjunto com ferramentas computacionais possibilita simular várias condições de tráfego e estudar as correlações de parâmetros como velocidade, fluxo, consumo, emissão com a quantidade de veículos na pista. O grupo de pesquisa LOST (Laboratório de Otimização de Sistemas Térmicos e de Estudos Sobre Bicicletas e Motocicletas) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) utiliza modelagem computacional de tráfego para estudar diversas métricas como velocidade, custo e emissão de dióxido de carbono.

O uso de modelos para caracterizar o tráfego ocorre desde 1950. Esses modelos foram desenvolvidos a partir de dados empíricos em que foi verificada correlação entre a quantidade de veículos na pista e velocidade média. Esses modelos são classificados em três principais categorias: microscópicos, macroscópico e mesoscópico. Nos modelos microscópicos os veículos são contabilizados individualmente. Nos modelos macroscópicos, o tráfego é representado como um único sistema, tal qual um fluido em um duto. Na literatura os modelos mesoscópicos são comumente definidos como um modelo intermediário entre a abordagem microscópica e macroscópica. Nos modelos mesoscópicos é considerado o comportamento de cada veículo, mas o tráfego é descrito de forma agregada, como em distribuição de probabilidades (VAN WAGENINGEN-KESSELS *et al.*, 2015). Neste trabalho foram utilizados modelos microscópicos de tráfego para o estudo da dinâmica de fluxo de veículos.

A aceleração de um veículo depende do piloto, fatores de segurança, condição da pista, legislação, motor e outras características do veículo, como massa e aerodinâmica. Geralmente na simulação computacional de tráfego esses fatores são considerados de forma indireta por meio de parâmetros de entrada (aceleração, velocidade máxima e desaceleração) que são ajustados a partir de dados reais. A determinação do consumo de combustível, emissão de gases poluentes e intensificadores do efeito estufa pode ser realizada a partir de dados disponibilizados pelo modelo de tráfego em conjunto com um modelo de emissão para diversas categorias de veículos (carro de passeio, caminhão de serviço leve, caminhão de serviço pesado, ônibus e motocicleta). Os dados utilizados nos modelos de emissão correspondem à frota de veículos estrangeiros e são resultantes de testes realizados para representar cada categoria.

O presente trabalho consiste na implementação de um modelo que integra três submodelos: tráfego, veículo e consumo. O submodelo de tráfego será utilizado para representar o comportamento dos veículos no tráfego. Já o submodelo do veículo contabilizará os efeitos do motor, sistema de transmissão, massa, aerodinâmica e

contato pneu com o solo para o deslocamento do veículo. Por fim, o modelo de consumo determinará o consumo de combustível e emissão de dióxido de carbono. A simulação será realizada contemplando diversas condições de tráfego, variando a quantidade de carros e motos na pista.

O modelo proposto tem como diferencial a modelagem explícita do motor e a consideração de características do veículo (massa, aerodinâmica e sistema de transmissão), o que permite realizar facilmente análise de tráfego, consumo de combustível e emissão de dióxido de carbono com diferentes veículos. Além disso, o modelo proposto é uma ferramenta que propicia a realização de estudos de tráfego focados no ponto de vista da sociedade e dos proprietários dos veículos, pois possibilita tanto avaliar parâmetros como fluidez do tráfego e emissão de CO₂ quanto verificar o consumo de combustível e perda de tempo nos congestionamentos.

1.1 OBJETIVOS

Esta dissertação tem como objetivo analisar a influência do motor na simulação de carros e motos em situação de tráfego. A integração de submodelos de tráfego, veículo e consumo resultará no modelo principal. A influência do motor será avaliada por comparação com três outros modelos, modelos secundários, que desprezam o efeito do motor e características do veículo para a aceleração. Os modelos secundários representam a forma que o estudo de tráfego normalmente é realizado.

Neste trabalho não foi executado um processo de calibração. Os parâmetros dos modelos foram definidos e arbitrados segundo a literatura, pois o objetivo principal é entender a importância da modelagem do motor na simulação de veículos no tráfego a partir da comparação entre o modelo principal e os modelos secundários.

Dessa maneira, quatro modelos serão utilizados. O modelo principal é microscópico contínuo no espaço e o submodelo de tráfego é baseado no modelo de Gipps (1981), o qual é muito utilizado no estudo de tráfego. Um dos modelos secundários utiliza esse mesmo submodelo de tráfego, apenas diferenciando do modelo principal por não contabilizar o motor para acelerar. Os demais modelos secundários são microscópicos discretos no espaço e foram baseados no modelo de MENG *et al.* (2007). Um desses modelos foi implementando neste trabalho e o outro corresponde à reprodução realizada pelo grupo de pesquisa LOST da UFPE e utilizado em duas dissertações anteriores (ARAÚJO, 2017; GARCIA NETO, 2014).

Os objetivos específicos desse trabalho podem ser listados da seguinte maneira:

- Desenvolver um modelo principal em que o motor e as características dos veículos influenciam no movimento;
- Desenvolver outros dois modelos, um discreto e outro contínuo no espaço, para representar modelos comumente utilizados na análise de tráfego; e
- Analisar a importância do motor na análise de fluxo e consumo de combustível a partir da comparação entre os modelos.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em seis capítulos. No primeiro capítulo é realizada a introdução com a contextualização, motivação e objetivos. No segundo capítulo, fundamentação teórica, são expostos conceitos importantes para o entendimento do trabalho. Em seguida, no capítulo 3, a revisão bibliográfica é apresentada com estudos anteriores sobre a modelagem de tráfego e integração com modelos de dinâmica veicular e consumo. O quarto capítulo é dedicado a explicar a metodologia usada para obtenção dos resultados. No capítulo 5, os resultados são apresentados e discutidos. O sexto e último capítulo contém a conclusão e sugestões para trabalhos futuros. Este trabalho também inclui apêndices. Nos apêndices estão expostos todos os resultados dos modelos secundários que foram utilizados para realizar comparações com o modelo principal.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

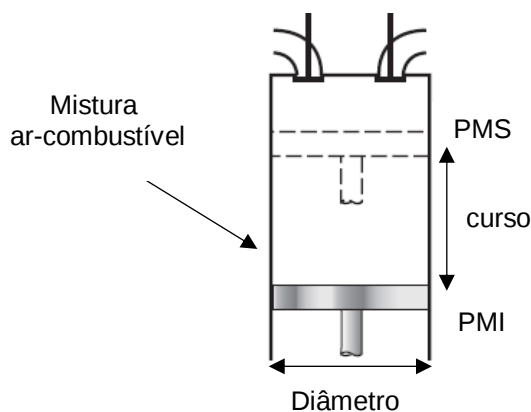
Este trabalho consiste na integração de vários submodelos para representação de veículos no tráfego. Esses submodelos são responsáveis por contabilizar os efeitos do tráfego, motor e dinâmica do movimento. Nesta seção serão apresentados os conceitos necessários para compreender a metodologia e resultados.

2.1 MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA (A PISTÃO)

Um motor de combustão interna (a pistão) é uma máquina térmica que transforma energia liberada no processo de combustão em energia mecânica. Trata-se de uma importante invenção do século XIX que teve grande impacto na vida das pessoas, principalmente por seu uso em sistemas de transporte (carros, motos, locomotivas, navios, aviões). Até hoje os motores de combustão interna a pistão são a principal fonte de energia para o sistema rodoviário, embora outras tecnologias as tenham ultrapassado em outras aplicações, como as turbinas na aviação, motores nucleares para submarinos e motores elétricos para trens (MARTINS, 2013).

De forma simplificada o motor é constituído por cilindros em que dentro de cada um desliza um pistão. O movimento linear do pistão é convertido em movimento rotativo através das bielas e do eixo de manivelas. A conversão de energia química em energia mecânica é realizada em um ciclo termodinâmico em que ocorre a admissão do combustível e ar na câmara e combustão, ignição, expansão e por fim exaustão dos gases de combustão. O volume varrido pelo pistão corresponde à área da superfície do pistão vezes o comprimento contido entre o Ponto Morto Inferior (PMI) e Ponto Morto Superior (PMS), chamado de curso, Figura 1. Para os carros esse valor é dado em litros e para as motos em cilindradas (cm^3).

Figura 1 - Cilindro e pistão de um motor



Fonte: Adaptado de Moran *et al.* (2010).

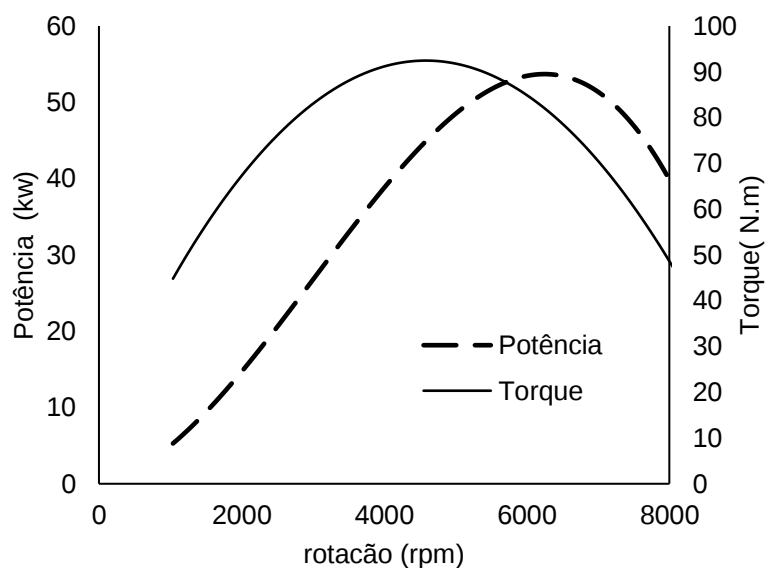
Durante o ciclo termodinâmico grande parte da energia química é perdida na conversão para energia mecânica no eixo da manivela, principalmente por atrito e dissipação de calor. O termo potência indicada se refere a potência desenvolvida pelos gases de combustão sobre o pistão, ou seja, já contabiliza as perdas térmicas do processo de combustão. A eficiência térmica (ou rendimento térmico) está entre 25% e 30% para os motores reais de combustão interna de ignição por centelha (ciclo Otto), classificação que compreende veículos a gasolina (CENGEL, YUNUS A.; BOLES, 2005). A potência efetiva (ou útil) é medida na saída do motor e corresponde à potência indicada menos o atrito mecânico. As perdas mecânicas no motor dependem da velocidade e seu valor pode variar de 10% de 1800 a 2400 rpm, como alcançar 25% na mais alta velocidade (HEYWOOD, 1988).

Os motores veiculares podem utilizar uma mistura de álcool e gasolina como combustível desde que sejam fabricados para esse propósito. A proporção entre os combustíveis é expressa pela letra E com a indicação da proporção de etanol na mistura. Dessa forma, E0 indica a gasolina pura, enquanto E22 se refere a um combustível com 22% de etanol.

As propriedades de um motor podem ser avaliadas por meio de curvas características. Essas curvas estabelecem, por ensaio e geralmente com a borboleta (válvula restritora de entrada de ar) totalmente aberta, relação direta entre potência, torque e consumo de combustível com a velocidade do motor, Figura 2. As curvas características podem ser determinadas experimentalmente por meio de dinamômetros de freio ou inerciais, os quais são equipamentos utilizados para medir forças atuando no sistema. Nos dinamômetros de freio a medição de torque em dada rotação é dada pela aplicação de um momento externo de igual valor produzido pelo motor (BRUNETTI, 2012). O torque na saída no eixo de manivelas (virabrequim) pode ser medido em um dinamômetro de bancada, o qual pode ser levado ao equilíbrio de maneira hidráulica, eletromagnética ou por atrito (HEYWOOD, 1988). A potência do motor (P_m) pode ser calculada a partir do conhecimento do torque (T_m) velocidade angular (ω), conforme Equação (1).

$$P_m = \omega T_m \quad (1)$$

Figura 2 - Curvas características do motor: Potência máxima e torque máximo por rotação

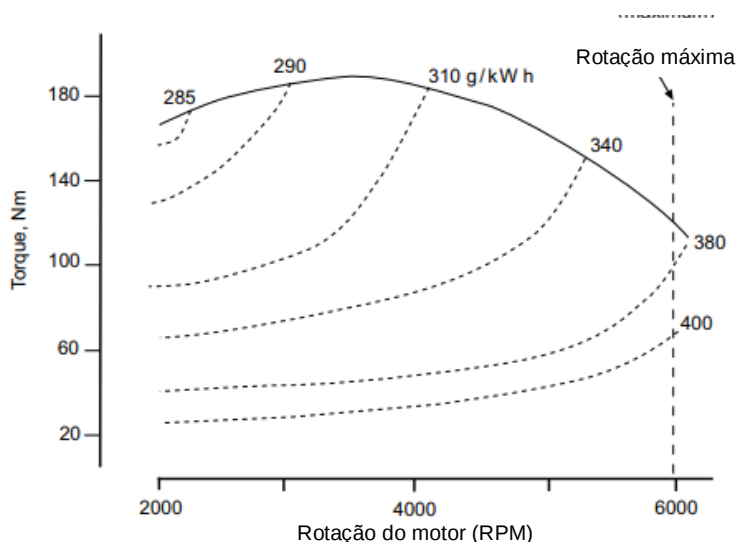


Fonte: O autor (2019).

Nos diâmetros inerciais o torque e a potência são medidos indiretamente a partir da aceleração de um sistema de massas que simula a inércia do veículo. O motor pode estar diretamente acoplado no dinamômetro ou as rodas motrizes podem estar diretamente sobre o sistema de massa (rolos) (MARTINS, 2013).

O agrupamento dos resultados do ensaio de consumo para diferentes rotações do motor e posição da borboleta é chamado de mapa (ou digrama) de desempenho do motor (BRUNETTI, 2012; MARTINS, 2013). A Figura 3 mostra um exemplo de mapa do motor a gasolina em que o consumo de combustível está em função do torque e rotação.

Figura 3 - Mapa de desempenho de um motor de ignição por centelha



Fonte: Adaptado de Hoag (2006) .

2.2 DESLOCAMENTO DO VEÍCULO

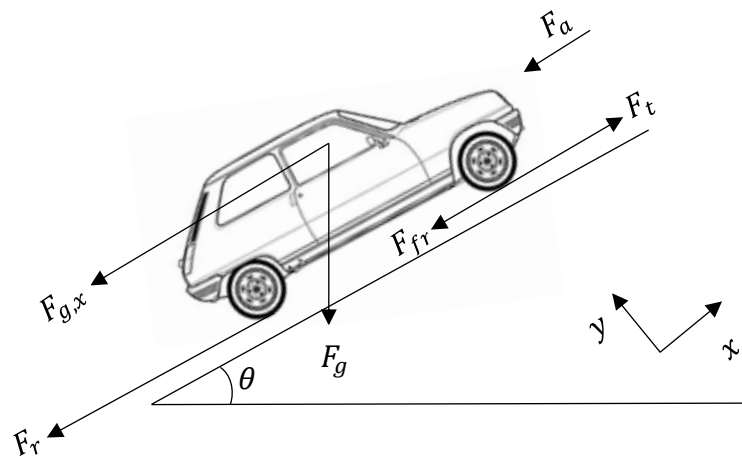
A aceleração e desaceleração são ações que dependem das características do veículo. O movimento de um veículo depende de fatores como massa (m), aerodinâmica, pneus, sistema de transmissão e motor, Equação (2).

$$m \frac{dV}{dt} = F_t - F_a - F_r - F_{g,x} - F_{fr} \quad (2)$$

A expressão acima representa a equação do movimento segundo as leis de Newton, onde V é a velocidade do veículo e F_t é a força de tração que depende da potência disponibilizada do motor. Também existem forças que agem contra o movimento, como as forças: aerodinâmica (F_a), de rolagem (F_r), gravitacional ($F_{g,x}$) e de frenagem (F_{fr}).

Nessa abordagem é assumido que a massa do veículo está toda concentrada em um ponto, pois o local em que cada força age não será considerado, Figura 4. Neste trabalho essa simplificação será utilizada pois não serão estudados fenômenos como perda de adesão ou de contato de um pneu com o solo, como pode ocorrer durante aceleração ou frenagem em motocicleta (MAGNANI; CUNHA, 2017). Essa forma simplificada é útil para avaliar a aceleração máxima de um veículo.

Figura 4 - Forças agindo em um veículo

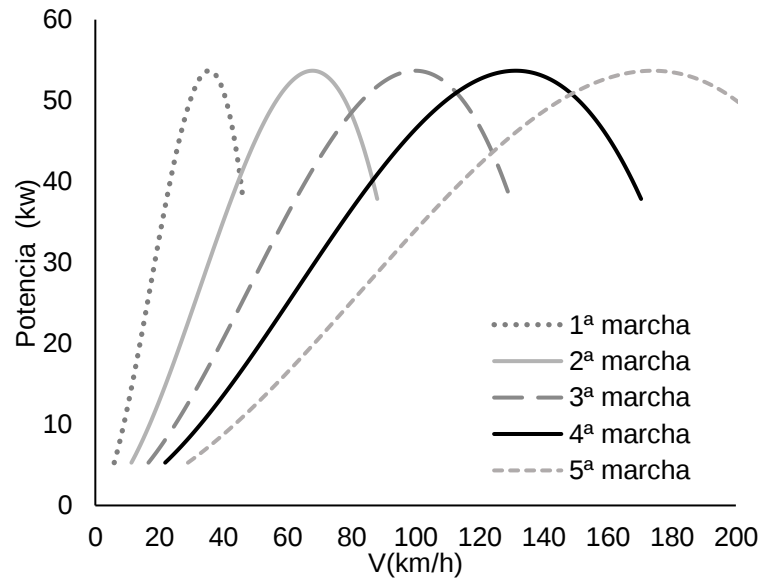


Fonte: O autor (2019).

Durante a aceleração ou manutenção de velocidade o veículo, de massa m_{pv} (esse valor contabiliza a massa do piloto e do veículo), utiliza um percentual da potência disponível no motor (α), que pode variar de 0 a 1. A potência disponível no motor ($P_{d,m}$) depende da rotação. Nesse contexto o sistema de transmissão é de grande

importância, pois possibilita transladar a curva de potência do motor para atender outras faixas de velocidade, Figura 5.

Figura 5 - Potência disponível por marcha



Fonte: O autor (2019).

Se não existisse troca de marcha (j) o motor estaria suscetível a operações com elevadas rotações em velocidades mais altas. Em elevada rotação existe maior perda mecânica e vibração, já em baixa rotação existe uma maior perda de energia por dissipação de calor durante o curso do pistão.

Carros e motos possuem sistemas de transmissão diferentes. Nos carros o sistema é constituído por embreagem, caixa de marcha e diferencial. Já nas motos existem a relação primária, caixa de marcha e relação final. A relação final de transmissão é dada pela multiplicação das relações de transmissão entre engrenagem movida e motora de todos os elementos do sistema de transmissão, o que pode ser feito pelo raio das engrenagens (r), Equação (3).

$$R_f(j) = \prod \frac{r_{movida}}{r_{motora}} \quad (3)$$

A rotação do motor (ω) depende da velocidade do veículo, relação final de transmissão (R_f), marcha seleccionada (j) e raio efetivo do pneu (R), conforme Equação (4).

$$\omega = \frac{30VR_f(j)}{\pi R} \quad (4)$$

Na transmissão de potência do motor até a roda existem perdas mecânicas que são contabilizadas pela eficiência mecânica (η_{trans}). Em transmissão indireta seu valor pode ser considerado 95% e em transmissão direta 98% (WONG, 2001). Matematicamente a força de tração pode ser expressa conforme mostrado na Equação (5).

$$F_t = \frac{\alpha P_{d,m}}{V} \eta_{trans} \quad (5)$$

Além disso, é importante salientar que o deslocamento de um veículo está diretamente associado ao movimento de partes rotativas que possibilitam que uma potência seja transmitida até as rodas. Essas partes rotativas possuem uma inércia que não pode ser desconsiderada e que podem ser contabilizadas por meio de um fator de massa (γ_m). Quanto menor a marcha mais significativo é esse fator para o movimento do veículo (GILLESPIE, 1992). Entretanto, para determinar o fator de massa é necessário conhecer o momento de inércia de cada componente, informação que não é disponibilizada pelos fabricantes de veículos. A massa (m) da Equação (2) é calculada conhecendo γ_m e massa do conjunto piloto-veículo (m_{pv}) (WONG, 2001), Equação (6). Também existe uma formula empírica apresentada por Taborek (1957) que pode ser aplicado em fase inicial de projeto, porém somente é aplicável para carros.

$$m = \gamma_m m_{pv} = 1 + \left(\sum \frac{I_r}{R m_v} + \sum \frac{I R_f^2}{R m_v} \right) \quad (6)$$

Onde:

I_r =momento de inércia da roda.

I = momento de inércia das partes rotativas, como: virabrequim, engrenagens e eixos.

A força máxima de frenagem depende do coeficiente de atrito entre o pneu (μ) e da força normal. A força normal é representada pelo componente do peso total do veículo na direção perpendicular ao solo, calculada com aceleração da gravidade g e inclinação da pista θ . Deve-se considerar na força de frenagem o percentual de uso de freio (β), como na Equação (7).

$$F_{fr} = \beta \mu m_{pv} g \cos \theta \quad (7)$$

A resistência gravitacional apenas interfere no movimento quando o veículo trafega em uma pista com inclinação, Equação (8). Na Figura 4 essa força é um componente do peso que age contra o deslocamento, porém quando o carro está descendo uma rampa essa força ajuda no movimento.

$$F_{g,x} = m_{pv}g \sin \theta \quad (8)$$

A resistência a rolamento existe porque corpos rígidos perfeitos não existem. Isto é, o pneu e a pista estão sujeitos a deformação devido ao contato de ambos. A resistência a rolagem é causada pela dissipação de energia devido à deformação durante o contato pneu e solo (GENTA, 1997). Essa força poder ser calculada da seguinte maneira:

$$F_f = C_r m_{pv}g \cos \theta \quad (9)$$

O coeficiente de rolagem (C_r) é determinado de forma experimental e depende de parâmetros como: velocidade, pressão do pneu, condição da pista, material do pneu e temperatura. Neste trabalho será considerado um valor constante para todas as velocidades.

A resistência aerodinâmica (ou força de arrasto) está diretamente relacionada a forma do veículo e densidade do ar (ρ_{ar}). Essa força resistiva atua sob o veículo imerso no ar devido ao escoamento do fluido em sua superfície. A força de arrasto é produzida pela viscosidade do ar e pressão de escoamento sob a carroceria. O efeito do vento, com velocidade W , contrário ao movimento também deve ser considerado. A força de arrasto é calculada pela Equação (10), em que a forma do veículo é contabilizada pela área frontal (A) e coeficiente de arrasto (C_a). Esse coeficiente é adimensional e indica a eficiência do projeto aerodinâmico (BRUNETTI, 2012). Outra maneira de representar a força aerodinâmica é pelo fator de arrasto (K_a) que representa o produto de $\frac{1}{2} \rho_{ar} C_a$. As condições atmosféricas afetam essa análise, pois está associado a ρ_{ar} . Um aumento de 0°C a 38°C resulta em uma queda de 14% na resistência aerodinâmica (WONG, 2001).

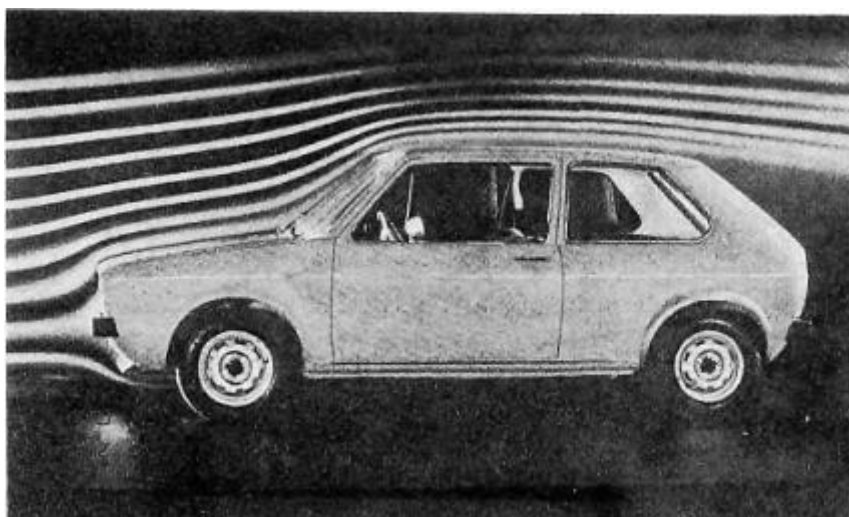
$$F_a = \frac{1}{2} \rho_{ar} C_a A (V - W)^2 = K_a (V - W)^2 \quad (10)$$

Deve-se salientar que a Equação (10) não é válida para o caso em que $(V - W) < 0$, pois nessa condição o C_a seria diferente. O coeficiente de arrasto pode ser obtido através de teste em túnel de vento em que o fluxo ar incide na parte da frente do veículo (Figura 6) ou através do ensaio *coast down* que é utilizado para mediar as forças resistivas no deslocamento desconsiderando o vento. Além dos métodos experimentais, simulações utilizando dinâmica dos fluidos computacional (ou

Computational Fluid Dynamics – CFD) podem ser realizadas para estimar esse coeficiente.

A forma do veículo é um importante parâmetro de projeto, pois está diretamente ligado ao valor $C_a A$. Nas motocicletas, a existência de carenagem frontal, lateral e traseira podem reduzir esse valor em 0,245 m². Adicionalmente, a posição do piloto também é um fator importante nessa análise, pois pode representar uma redução de até 20 % nesse valor (COSSALTER, 2006). Para comparação, carros pequenos podem ser representados por $C_a A$ de 0,9 e ônibus por 4,2 (BRUNETTI, 2012).

Figura 6 - Escoamento sob um veículo em teste de túnel de vento



Fonte: Genta (1997).

2.3 ANÁLISE DE TRÁFEGO

A modelagem computacional do tráfego é uma ferramenta que vem sendo utilizada para estudar o fluxo de veículos em diferentes escalas. A escala de tempo usada é importante para análise do tráfego. O planejamento de transporte necessita de dados referentes a horas ou dias para realizar estudo de demanda fluxo e mudanças demográficas, por exemplo. Neste trabalho a análise será feita em segundos, escala que de acordo Treiber e Kesting (2013) corresponde ao campo da *dinâmica de fluxo*. Segundos e poucas horas possibilitam o estudo dos ciclos temporais de sinais de trânsito, consumo de combustível, emissão de CO₂, formação de ondas de congestionamento, tempo de reação do condutor para acelerar e desacelerar.

Para análise de tráfego existem alguns conceitos importantes que serão apresentados a seguir, como fluxo, densidade, relação fundamental e diagrama espaço-

tempo. Densidade e fluxo são grandezas sempre presentes no estudo de tráfego que podem ser definidas da seguinte maneira:

- Fluxo - $Q(\Delta x, \Delta t_a)$: Número de veículos (N) que trafegam em determinada extensão da pista (Δx) em um intervalo de tempo definido (Δt_a).

$$Q(\Delta x, \Delta t_a) = \frac{N(\Delta x, \Delta t_a)}{\Delta t_a} \quad (11)$$

- Densidade - $\rho(\Delta x, \Delta t_a)$: Numero de veículos (N) que trafegam em uma determinada extensão da via em (Δx) determinado intervalo de tempo (Δt_a).

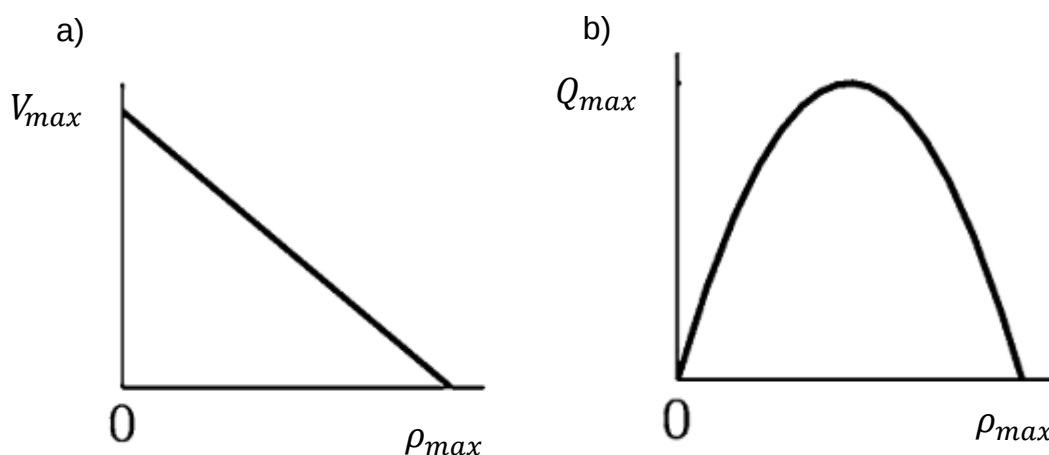
$$\rho(\Delta x, \Delta t_a) = \frac{N(\Delta x, \Delta t_a)}{\Delta x} \quad (12)$$

O fluxo, densidade e número de veículos são grandezas que dependem do intervalo do tempo e dimensão da pista, Equações (11) e (12). Esses dados de tráfego podem ser obtidos por câmeras posicionadas na pista ou sensores instalados. As equações anteriores se referem a dados obtidos para determinada área da pista (Δx), como imagens obtidos por um helicóptero. Entretanto, sensores ou câmeras podem apenas capturar o que ocorre em determinada posição (x). Assim o fluxo e densidade também podem ser definidos em relação a quantidade de veículos que cruzam x .

Pode-se dizer que o diagrama fundamental é o ancestral comum dos modelos de tráfego. Em 1934, Greenshields identificou que existia uma relação entre densidade e quantidade de veículos, conhecida como relação fundamental (VAN WAGENINGEN-KESSELS *et al.*, 2015). A mesma relação pode ser estendida para densidade e fluxo, de maneira que a relação fundamental representa a dependência entre fluxo, velocidade e densidade.

A relação fundamental proposta por Greenshields consiste em uma função linear para velocidade-densidade e parabólica para fluxo-densidade, Figura 7. Observa-se na relação fundamental que quando a densidade é próxima de zero o mesmo ocorre com o fluxo, pois a pista está praticamente vazia. Um alto valor de densidade também significa fluxo baixo, pois não há espaço para trafegar. Além disso, existe um ponto máximo de fluxo (ponto de saturação ou ponto crítico), em que qualquer aumento na quantidade de veículos causa uma queda de fluxo. Isso ocorre pela diminuição da velocidade em que os veículos trafegam devido à existência de menos espaço.

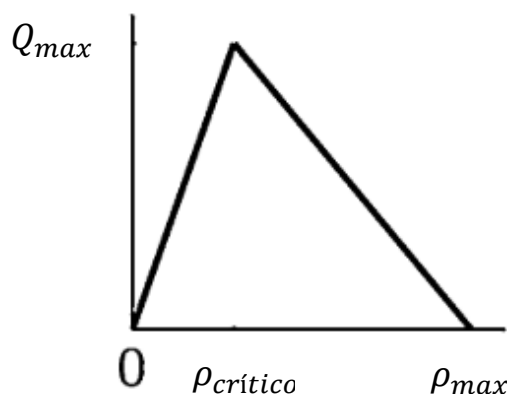
Figura 7 - Relação fundamental de Greenshields a) Velocidade-Densidade e b) Fluxo-Densidade



Fonte: Adaptado de Van Wageningen-kessels *et al.* (2015).

Contudo, existem outros modelos de relações fundamentais propostos ao longo do tempo. O modelo de Greenshields ainda é utilizado por sua simplicidade e fins pedagógicos. Entretanto, comparações com dados obtidos em campo demonstram que o modelo falha, pois dados reais não descrevem um comportamento simétrico (SILVA, 2007). Outros modelos sugeridos posteriormente também demonstram limitações, como é o caso do modelo de Greenberg, que considera um comportamento com uma suave concavidade segundo uma relação logarítmica entre velocidade e densidade. Apesar de mostrar bons resultados para fluxo em congestionamento, possui baixa concordância a baixa densidade. De forma oposta se comporta o modelo de Underwood que propôs uma relação exponencial negativa entre velocidade e densidade. Esse modelo apresenta concordância em baixas densidades, mas possui resultado inconsistente para regiões de congestionamento (NETO LEÃO, 2011). Provavelmente a relação fundamental mais difundida consiste na forma triangular, desenvolvido por Daganzo em 1994 (VAN WAGENINGEN-KESSELS *et al.*, 2015), Figura 8.

Figura 8 - Relação fundamental de Daganzo



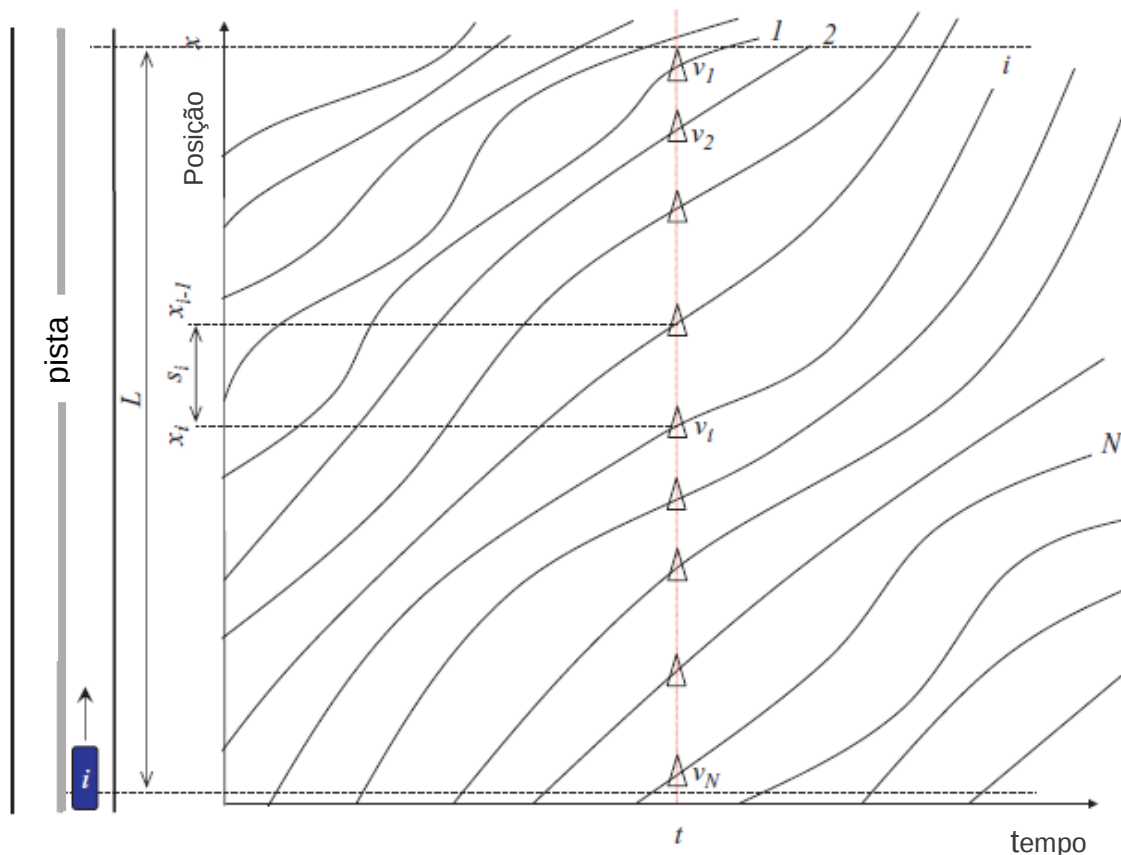
Fonte: Adaptado de Van Wageningen-Kessels *et al.* (2015).

A relação fundamental é chamada de diagrama fundamental quando descreve um fluxo de veículos em regime permanente em tráfego homogêneo. Em situação não estacionária e fluxo heterogêneo é chamado de relação fluxo-densidade (TREIBER; KESTING, 2013).

Também existe o diagrama espaço-tempo que representa a trajetória dos veículos em relação ao tempo. Seu uso possibilita obter diversos dados para análise de tráfego, Figura 9. Nesse diagrama o deslocamento de cada veículo é traçado em relação ao tempo, permitindo a visualização da formação de congestionamento. Além disso os seguintes parâmetros também podem ser obtidos, como:

- Espaçamento (*distance headway*): distância entre a parte dianteira de dois veículos. Na Figura 9 está representado por S_i .
- Afastamento temporal (*headway*): intervalo temporal entre a parte frontal de dois veículos. Informa o tempo em que os dois veículos estão separados.
- Afastamento (*gap*): Distância entre dois veículos, representado a distância entre a parte traseira do veículo líder e parte dianteira do veículo seguidor.
- Velocidade local ou velocidade instantânea: velocidade da parte dianteira do veículo, pode ser obtido pela derivada da trajetória.

Figura 9 - Diagrama espaço-tempo



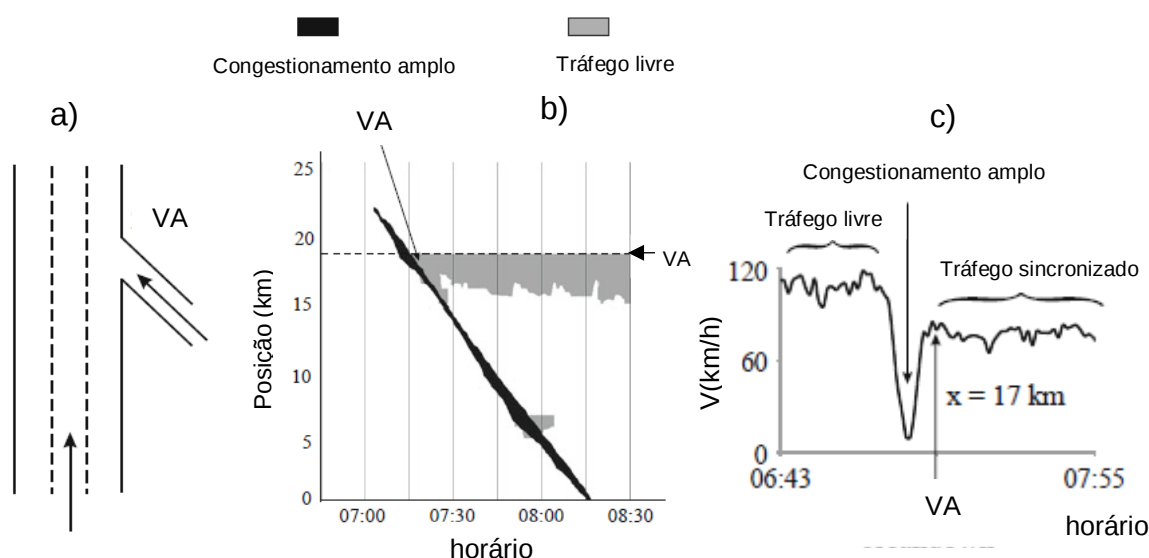
Fonte: Adaptado de Ni (2015).

No diagrama espaço-tempo a densidade é a quantidade de linhas de trajetória que cruzam uma linha vertical (linha vermelha) em dado tempo e o fluxo é o número de linhas da trajetória que cruzam uma linha horizontal (preta e pontilhada) em determinada posição.

Nos gráficos da relação fluxo-densidade apresentados existem duas fases claras: tráfego livre e congestionado. O tráfego livre ocorre até o ponto crítico (fluxo máximo). Contudo, entre 1996 e 2000, Boris Kerner desenvolveu a teoria de três fases do tráfego (KERNER, 2004). Nesta nova abordagem ele considerou a fase de congestionamento com dois comportamentos distintos. Ele notou a existência de trânsito intenso, mas com velocidade constante e a ocorrência de ondas de congestionamento, isto é, propagação de zonas mais lentas no sentido contrário ao fluxo. Segundo essa teoria as três fases do tráfego são: tráfego livre, tráfego sincronizado e congestionamento amplo. A fase de tráfego livre representa situações em que o aumento de densidade é acompanhado pelo aumento de fluxo. Já no tráfego sincronizado o congestionamento acontece de forma localizada e não ocorre sua propagação. A veloci-

dade decresce consideravelmente, porém é acompanhado pelo aumento de densidade, o que resulta em um fluxo semelhante (PARK, 2012). Nota-se tal comportamento em rampas de acesso, onde duas ou mais vias diminuem de ritmo para velocidades semelhantes enquanto comportam mais veículos. Por fim, a fase de congestionamento amplo é caracterizada pelo decréscimo de fluxo e velocidade, acompanhando de movimento em bloco dos veículos. As três fases podem ser visualizadas na Figura 10. A Figura 10b consiste no diagrama espaço-tempo, porém apenas está destacado as seções da pista ao longo do tempo em que se caracteriza a fase de tráfego livre (cor cinza) e congestionamento amplo (cor preta).

Figura 10 - Exemplos das três frases do tráfego. a) Via de Acesso (VA) da pista, b) diagrama espaço-tempo e c) impacto das fases do tráfego na velocidade média



Fonte: Adaptado de Kerner (2017).

A descrição do tráfego pode ser feita por modelos macroscópicos, mesoscópico e microscópicos. Nos modelos macroscópicos o comportamento do tráfego é visto como o agregado de veículos. Pode-se comparar com o modelo dos meios contínuos, isto é, o tráfego é descrito como um todo, como um fluido em um duto. Já nos modelos microscópicos o movimento de cada veículo é descrito. O tráfego é formado pelas interações dos veículos. O modelo mesoscópico corresponde a uma descrição que fica entre as duas anteriores, como na abordagem que considerada a formação, deslocamento e dispersão de pelotões de veículos. Nessa abordagem é considerado características individuais como o tipo de veículo e o condutor, mas o movimento é analisado em grupos.

Modelos microscópicos, categoria dos modelos que serão usados nesta dissertação, podem ser classificados de diversas maneiras. Podem ser chamados de contínuos ou discretos, em referência a atualização da posição e/ou tempo. Esses modelos também podem ser categorizados em modelo de distâncias segura (*safe-distance*) e modelo de estímulo-resposta (*stimulus-response*) e autômato celular (VAN WAGENINGEN-KESSELS *et al.*, 2015). Esses modelos têm em comum a característica do conjunto motorista-veículo ajustar sua velocidade de acordo com o veículo líder. Os seguintes modelos são exemplos de modelos microscópicos contínuos no espaço: Gipps, Krauss, IDM, Newell e OVM. Também existem vários modelos discretos no espaço, como: NaSch, Barlovic e KKW (TREIBER; KESTING, 2013).

O HCM (*Highway Capacity Manual*) é um manual americano que contém metodologias para estimar a capacidade e nível de serviço nas rodovias. A capacidade é o fluxo máximo medido em um ponto, seção, faixa ou na rodovia sob condições predominantes da via e do tráfego. O nível serviço foi um conceito criado para avaliar a utilização da via pelo usuário desde o fluxo nulo até totalmente congestionamento completo. O nível de serviço possui seis classificações que são representadas pelas primeiras letras do alfabeto. O nível A corresponde à condição de maior liberdade para trafegar e o nível F corresponde à condição com maior congestionamento.

No HCM (TRB, 2010) o fluxo é definido como a quantidade equivalente de veículos que passa em um ponto, seção ou pista em uma hora calculada em um intervalo menor que uma hora, usualmente 15 minutos. Os dados utilizados como base pelos procedimentos do HCM foram coletados nos Estados Unidos, como a revisão realizada no HCM de 1997 baseada nas descobertas realizadas pelo projeto 3-45 da NCHRP (*National Cooperative Highway Research Program*) em que foi utilizado um banco de dados com 415 amostras de 15 minutos referentes a 56 locais dos Estados Unidos.

O manual contém valores de referência para a capacidade de vários tipos de pista (autoestrada, rodovias com várias faixas, rodovias com duas faixas e dois sentidos de tráfego (mão dupla), intersecção com sinalização) registrada em unidade de carro de passeio (ucp) por hora. No HCM (TRB, 2000) o termo carro de passeio é descrito como uma categoria que não inclui veículos pesados (com mais de quatro rodas em contato com solo). Além disso, a unidade de carro de passeio é utilizada no estudo de tráfego por permitir a comparação do fluxo de lugares com diferentes frotas de veículos.

No HCM de 1950 ficou definido que o valor base da capacidade em uma faixa é 2,000 ucp/h para uma rodovia de duas faixas, porem esse valor só é alcançado quando não existe fluxo contrário ao movimento na faixa ao lado (ROESS; PRASSAS, 2014) . No HCM 2010 (TRB, 2010b) a capacidade em uma rodovia com duas faixas e duas direções é 1,700 ucp/h/f (unidade carro de passeio por hora e por faixa) em uma direção e 3,200 ucp/h nas duas direções. No Quadro 1 estão expostas as capacidades por faixa, tipo de pista e Velocidade de Fluxo Livre (VFL). VFL é a velocidade média dos veículos em determinada pista para situação em que os motoristas têm liberdade para trafegar com a velocidade desejada e não existe restrição na velocidade devido à existência de outros veículos e regulamentação de trânsito (TRB, 2010a).

Quadro 1 - Valores base de capacidade no HCM 2010

Tipo de pista	Capacidade
Autoestrada: VFL: 112 km/h	2400 ucp/h/f
104 km/h	2350 ucp/h/f
96 km/h	2300 ucp/h/f
88 km/h	2250 ucp/h/f
Rodovias com várias faixas: VFL: 96 km/h	2200 ucp/h/f
88 km/h	2100 ucp/h/f
80 km/h	2000 ucp/h/f
72 km/h	2000 ucp/h/f
Rodovias com duas faixas e dois sentidos	1700 ucp/h/f em uma direção

Fonte: Adaptado de Roess e Prassas (2014).

2.4 MODELOS DE TRÁFEGO

O modelo de Gipps (1981) é um modelo muito utilizado no estudo de tráfego, presente em softwares de simulação como: Aimsun e DRACULA (CIUFFO; PUNZO; MONTANINO, 2012). Trata-se de um modelo microscópico contínuo no espaço e discreto no tempo. Nesse trabalho o submodelo de tráfego contínuo será baseado no modelo de Gipps (1981). Esse modelo foi idealizado objetivando conseguir reproduzir o comportamento real de veículos no tráfego a partir de parâmetros que representassem características reais do veículo e condutor sem necessitar de um processo sofis-

ticado de calibração. Os limites impostos pelo motor e dinâmica veicular não são modelados explicitamente, apenas contabilizados na determinação de parâmetros de entrada. No modelo de Gipps a velocidade é determinada a partir de três limitações:

1. O motorista não irá trafegar com a velocidade maior que a velocidade desejada (V_{max}) e a aceleração primeiramente aumenta com a velocidade, em situações de tráfego livre. À medida que se aproxima da velocidade desejada a aceleração decresce até zero, Equação (13). Essa expressão determina a velocidade em tráfego livre (v_{livre}) e foi obtida por um ajuste de curva da aceleração em relação a velocidade de um carro em tráfego moderado (GIPPS, 1981).

$$v_{livre} = v(t) + 2,5a_{max}\tau(1 - v(t)/V_{max})(0,025 + v(t)/V_{max})^{1/2} \quad (13)$$

Onde:

$v(t)$ = velocidade do veículo em t (m/s).

a_{max} = aceleração máxima que o motorista deseja alcançar (m/s²).

τ = tempo aparente de reação (s).

2. A velocidade máxima para não colisão, $v_{seguranca}$, é calculada considerando a distância que os veículos percorreriam até parar. Nesse cálculo é assumido que a desaceleração ocorre com o valor máximo desejado pelos condutores, Equação (14). Na expressão apresentada existe a adição de um parâmetro que representa o tempo de atraso para reagir a mudança do veículo da frente. Esse tempo possibilita que o veículo desacelere mais cedo e diminua seu valor gradualmente até parar, pois sem ele o veículo iria manter a velocidade desejada por um maior tempo até começar desacelerar bruscamente (GIPPS, 1981). Na expressão esse termo está presente em $v(t)\tau$.

$$v_{seguranca} = b\tau + \sqrt{b^2\tau^2 - b \left[2[x^+(t) - S - x(t)] - v(t)\tau - \frac{(v^+(t))^2}{b^+} \right]} \quad (14)$$

Onde:

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

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

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

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

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

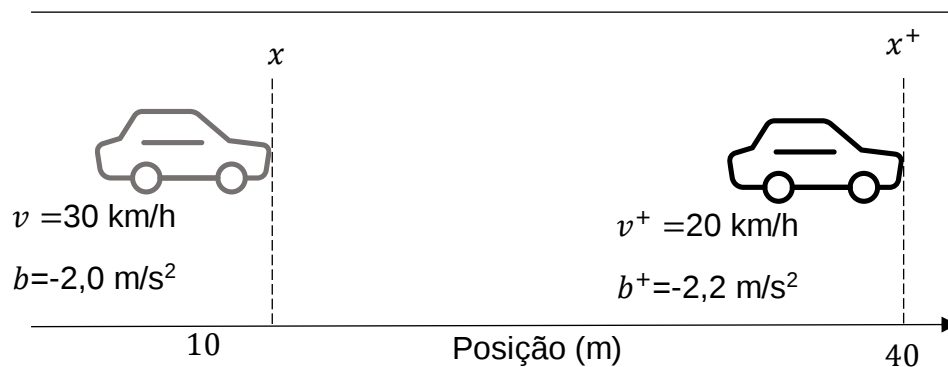
S = comprimento do veículo mais um pequeno acréscimo para representar a distância mínima que o veículo seguidor quer permanecer em relação ao líder quando parado (m).

Nesse modelo a velocidade do veículo será o mínimo entre a velocidade em tráfego livre e velocidade de segurança, Equação (15). Os valores da desaceleração do veículo seguidor e veículo líder são a base da estabilidade desse modelo, a qual é garantida se $b \geq b^+$ (CIUFFO; PUNZO; MONTANINO, 2012).

$$v(t + \tau) = \min(v_{\text{livre}}, v_{\text{segurança}}) \quad (15)$$

Se dois veículos de 5 metros de comprimento estiverem distantes em 25 metros, como na situação mostrada na Figura 11, a velocidade máxima para não ocorrer colisão segundo o modelo de Gipps seria 25,7 km/h. Dessa maneira o veículo seguidor (cor cinza) deveria desacelerar em $1,18 \text{ m/s}^2$.

Figura 11 - Exemplo de aplicação do modelo de Gipps em situação de tráfego



Fonte: O autor (2019).

Em adição, existe o modelo de Krauss (1998), o qual corresponde a uma variação ao modelo de Gipps para introduzir aleatoriedade no sistema. Nesse modelo, a velocidade determinada do modelo de Gipps será subtraído em até b , de forma aleatória.

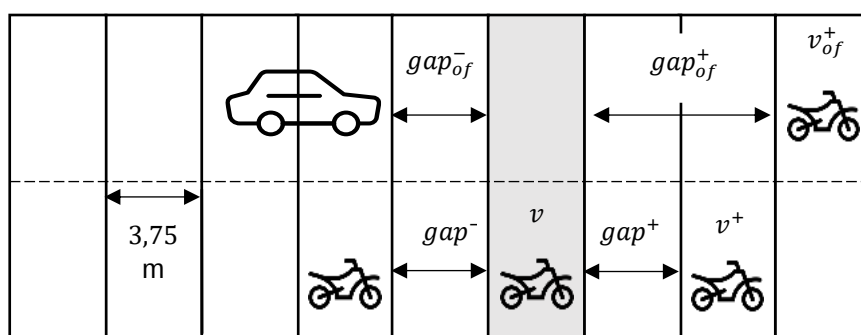
Na classe dos modelos discretos no tempo e espaço, os modelos autômatos celulares (AC) são bastantes utilizados para estudo de tráfego. Esses modelos são mais simples e mais rápidos para simulações computacionais. Nos modelos AC o espaço é dividido em células, que representam áreas da pista de comprimento fixo, e o

tempo em intervalos. No tráfego existe dois estados em que a célula pode apresentar: vazia ou ocupada.

Nagel e Schreckenberg (1992) propuseram um modelo de tráfego dessa classe considerando elementos estocásticos, chamado de modelo NaSch. Nesse modelo as células possuem 7,5 m e os veículos podem percorrer distâncias que correspondem a múltiplos desse valor em um segundo. Dessa maneira, a velocidade pode assumir qualquer valor múltiplo de 7,5 m/s. Contudo, as acelerações só podem ocorrer com 7,5 m/s². Nesse tipo de modelo a aceleração ocorre de forma instantânea e realizada de maneira que o veículo seguidor nunca trafegue com velocidade maior que a distância entre os veículos. Essas condições garantem a não colisão de veículos no sistema. Além disso, existe probabilidade p do veículo reduzir a velocidade em 7,5 m/s². Esse modelo permite que o veículo desacelere da velocidade máxima para zero instantaneamente, pois a desaceleração pode assumir qualquer valor múltiplo de 7,5 m/s². Além disso, não considera que o veículo líder irá se mover, podendo resultar que o veículo trafegue com velocidades mais baixas que o necessário para não colisão.

MENG *et al.* (2007) propuseram um modelo baseado no modelo de NaSch para estudar o tráfego de carros e motos na China, onde a faixa da direita é preferencial para as motos. Somente na faixa da esquerda existe tráfego de motos e carros. Nesses modelos as células têm 3,75 m, as motos ocupam uma célula e os carros duas, Figura 12.

Figura 12 - Modelo proposto por Meng *et al.* (2007)



Fonte: O autor (2019).

Esse espaço foi definido considerando o comprimento dos veículos e a distância mínima de segurança em relação ao veículo posterior a anterior. O sistema está sob condições periódicas de contorno, pois a pista funciona tal qual circuito fechado.

Os veículos ao alcançarem o final da pista de 7,5 km retornam para o seu início. Este trabalho utiliza a mesma pista como cenário de simulação e o modelo proposto Meng *et al.* (2007) foi utilizado para representar um submodelo de tráfego AC.

Nesse modelo, além da frenagem aleatória, também é modelado a troca de faixa das motos. Para garantir a não colisão as motocicletas sempre consideram que o veículo anterior estará trafegando com a velocidade máxima (v_{max}). As motos ao atrapalharem o tráfego de carros devem retornar a faixa exclusiva de motos. As seguintes regras são usadas para definir o movimento de um veículo:

1. Primeiro passo: Mudança de faixa (apenas para as motocicletas)

- Da faixa da direita para faixa da esquerda:

Se $v \leq gap^+$ e $gap^- \geq v_{max}$ e $v(t) \geq v^+$ e $v_{of}^+ \geq v^+$, então a motocicleta trocará de faixa.

- Da faixa da esquerda pra faixa da direita:

Se $v(t) \leq gap^+$ e $gap^- \geq v_{max}$ e [$v_{of}^+ \geq v^+$ ou $v_{of}^+ \geq v^+$ ou (o veículo traseiro é carro com $gap^- = 0$)].

2. Aceleração:

- $v \rightarrow \min(v + 3,75, v_{max})$.

3. Desaceleração:

- $v \rightarrow \min(v, gap^+)$.

4. Aleatoriedade (redução de velocidade):

- $v \rightarrow \max(v - 3,75, 0)$ com uma probabilidade (p) para desacelerar.

5. Movimento dos veículos:

- $x \rightarrow x + v$.

Também existem modelos de troca faixa para modelos de tráfego contínuos no espaço, como o proposto por (GIPPS, 1986) para ser utilizado em conjunto com o modelo de tráfego de Gipps (1981). Nesse modelo o ganho em velocidade e a segurança são avaliados pela Equação (14). Kesting, Treiber e Helbing (2007) também propuseram um modelo de troca de faixa que pode ser usado com outros modelos de tráfego microscópico, pois a mudança de faixa ocorre de acordo com os valores de aceleração na pista. Esse modelo está implementado no software de código aberto chamado MovSim que permite a utilização de vários modelos de tráfego microscópico. Nesse

modelo é considerada a educação do motorista no tráfego por meio de um parâmetro E que pode ser 0 ou 1. Se nulo representa comportamento egoísta e 1 representa um condutor altruísta. Isso é feito avaliando o impacto da mudança na aceleração dos veículos imediatamente depois e antes nas duas faixas.

2.5 CICLOS DE CONDUÇÃO

Ciclos de condução são modelos usados em procedimentos para determinação da emissão dos veículos em que é definido como ocorre a variação da velocidade no tempo. Esses procedimentos objetivam representar a condução real de um veículo e também são utilizados para analisar o consumo de combustível. Deve-se destacar que os procedimentos resultam em valores que divergem em relação a condições reais de condução, devido a diversos fatores operacionais, comportamento do motorista e fatores externos (FONTARAS; ZACHAROF; CIUFFO, 2017).

Existem vários ciclos de testes empregados no mundo, como:

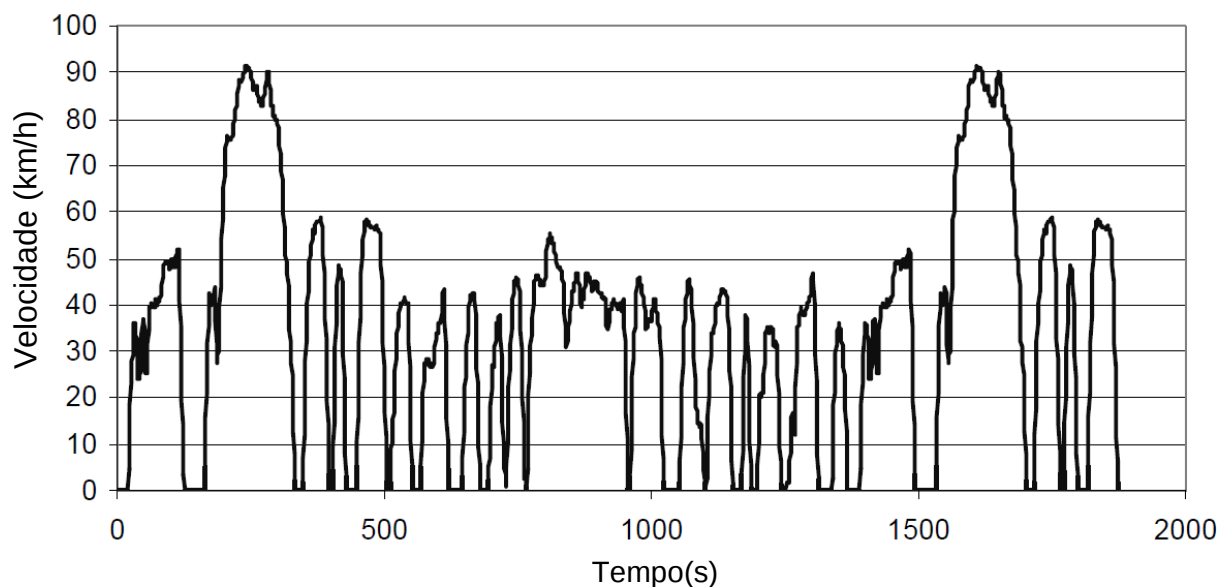
- o americano chamado de FTP-75 (*Federal Test Procedure 75*);
- o japonês denominado JC-08;
- o europeu: existe o NEDC (*New European Drive Cycle*) de 1996 e

WLTP (*World-Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure*) que entrou em vigor em 2017 para uma representação mais real de condução (FONTARAS; ZACHAROF; CIUFFO, 2017).

O procedimento brasileiro consiste no uso de dois ciclos para as motos. O ciclo WMTC (*Worldwide Motorcycle Test Cycle*) é utilizado para determinação de gases de escapamento (BRASIL, 2011) e segundo Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2002) o Ciclo FTP-75 para a determinação do consumo de combustível.

O ciclo FTP-75 foi criado pela agência americana EPA (*Environmental Protection Agency*) para representar um ciclo de condução com uma etapa de condução urbana que inclui paradas frequentes. É importante destacar que quando esse ciclo foi adotado no início da década de 1970 os dinamômetros de chassi possuíam limitações técnicas que resultaram na necessidade de pequenas acelerações e velocidades inferiores a velocidades em estrada (FAIZ; WEAVER; WALSH, 1996). No Brasil, a NBR 7024 (ABNT, 2002) é utilizada para medição de consumo de combustível e a NBR 6601 (ABNT, 2012) para emissão de poluentes e gases de efeito estufa no escapamento. No consumo de combustível é considerado o ciclo urbano (FTP-75) e estrada (HWFET), Figura 13 e Figura 14.

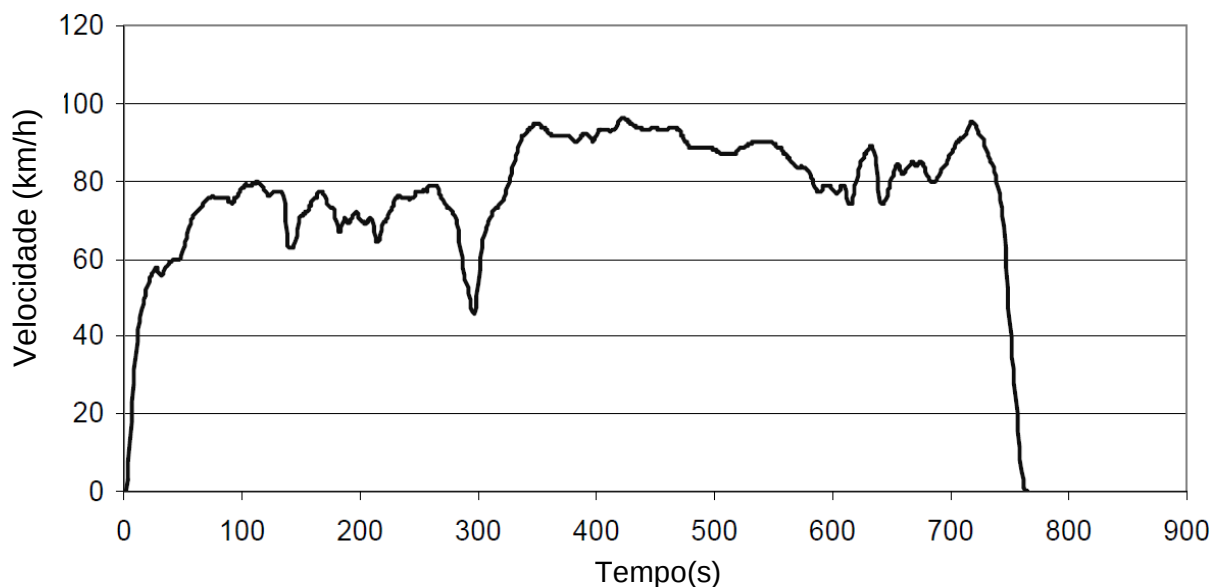
Figura 13 - Ciclos de condução FTP -75



Fonte: Barlow (2009).

O Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) disponibiliza tabelas aprovadas do Programa Brasileira de Etiquetagem Veicular que contêm valores de economia, emissão de CO₂ e consumo energético para os carros do mercado brasileiro. Os valores de economia são calculados com E22 e E100 no ciclo estrada e urbano conforme a Portaria 10, de 10 de janeiro de 2012 do INMETRO. Já o consumo energético é calculado seguindo a Portaria 285, de 19 de junho de 2015 do INMETRO.

Figura 14 - Ciclos de condução HWFET



Fonte: Barlow (2009).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção será apresentada uma revisão da literatura relativa a modelos de tráfego e sua integração com modelos do motor e consumo. Estudos relacionados a modelos de tráfego serão mostrados em maior quantidade, pois o autor também pesquisou sobre o tópico em seu trabalho de conclusão de curso.

Os modelos de tráfego são utilizados desde meados do século XX e a integração entre submodelos também não é algo novo. Entretanto, normalmente a integração ocorre entre submodelos de tráfego e consumo ou entre submodelos de veículo e consumo. A integração entre submodelo de veículo na simulação de tráfego não é comumente explorada.

O estudo de tráfego não é uma tarefa fácil e que necessita de tempo. A representação de uma grande variedade de condições e composição do tráfego não é possível devido a limitações práticas (ARASAN; KOSHY, 2005). O uso de ferramentas computacionais auxilia no estudo, permitindo analisar o impacto socioeconômico e ambiental.

Diversos artigos já foram publicados onde são realizadas comparações entre modelos calibrados microscópicos com dados reais. A calibração é uma etapa importante para que os modelos de tráfego representem de forma adequada o comportamento médio dos veículos. Existem erros presentes nos modelos calibrados que provavelmente não podem ser mitigados devido à estocasticidade do tráfego (BROCKFELD; KÜHNE; WAGNER, 2004).

Ranjitkar, Nakatsuji e Asano (2004) compararam seis modelos microscópicos: Krauss, Gipps, Bando, Newell, Castello e ECS. Esses modelos foram calibrados de duas formas, usando dados de velocidade e espaçamento obtidos em uma pista de teste no Japão. O ajuste dos modelos a partir de dados de velocidade resultou em erros de velocidade da mesma magnitude, entre 3,87% e 4,71%. No ajuste com espaçamento, o modelo de Gipps, Krauss e Newell tiveram uma melhor performance com erros entre 12,0% e 12,9 %. Além disso, os autores também concluíram que as diferenças entre os modelos são insignificantes se comparadas com as diferenças de velocidade dos veículos no mesmo modelo.

Mathew e Ravishankar (2011) utilizaram oito modelos para estudar o comportamento dos veículos em tráfego na Índia entre carros, ônibus e Tuk Tuks. Eles observaram que os menores veículos representaram melhor os dados obtidos por GPS

e que os modelos de Gipps e Krauss estimaram melhor o comportamento dos veículos. Além disso, os modelos conseguiram capturar comportamento distinto entre cada combinação de veículo.

Dados reais de uma rodovia na Califórnia foram utilizados para calibração e validação dos modelos de Gipps, Newell, OVM e NaSch por Zheng, Suzuki e Fujita (2012). O modelo de NaSch foi o único que reproduziu satisfatoriamente o tráfego sob condições diferentes da calibração. O modelo de Gipps e OVM quando em situações diferentes da calibração resultaram em colisão. Porém, o modelo de Gipps foi o que melhor reproduziu a situação de calibração.

Kanagaraj *et al.* (2013) compararam o modelo de Gipps, IDM e Krauss utilizando dados de tráfego misto de uma pista com quatro faixas na Índia. O modelo de Gipps resultou em menor erro de velocidade para as motos e o modelo de Krauss apresentou menor erro de velocidade para os carros. O menor erro em escala macroscópica foi alcançado com o modelo de Gipps.

Asaithambi *et al.* (2018) usou os mesmos modelos para estudar as características de fluxo de tráfego sob condições de tráfego misto utilizando dados obtidos na Índia por meio de uma câmera de vídeo. Os modelos de Gipps e Krauss resultaram nos menores erro em velocidade. Os resultados também indicaram que a exclusão de Tuk Tuk e veículos pesados tem o potencial de melhorar o tráfego em horário de pico, pois resulta em um maior valor de velocidade.

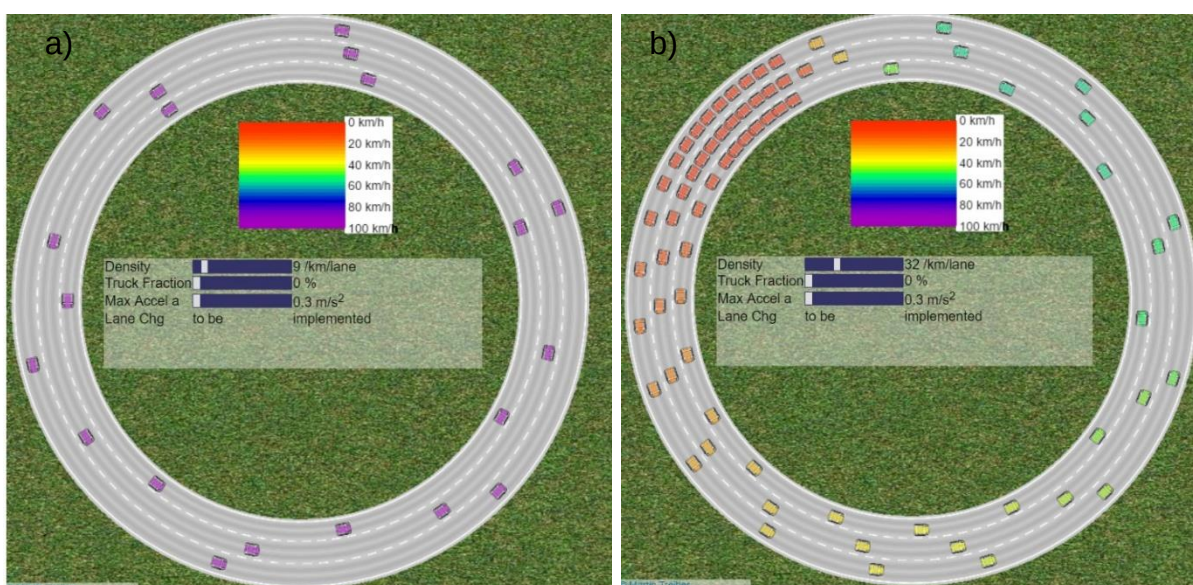
A utilização de modelos discretos também permite estudar o comportamento dos veículos em tráfego misto. Meng *et al.* (2007) utilizaram um modelo autômato celular baseado no modelo de NaSch para estudar qualitativamente o tráfego na China. Em seu estudo apenas as motos podem trocar de faixa, porém a faixa da esquerda é preferencial para carros. Esse estudo permitiu uma análise qualitativa da influência da troca de faixa das motos em escala macroscópica. Os autores concluíram que a regra de prioridade de carros na faixa da esquerda não impacta no fluxo de carros sob condições periódicas de contorno.

Um novo modelo AC foi desenvolvido por Luo *et al.* (2015) para estudar o fluxo entre carros e bicicletas. Para este modelo o carro ocupa mais espaço lateralmente com o aumento da velocidade. Essa nova consideração resultou na preferência das bicicletas em trafegar ao lado de carros lentos ou parados. Além disso, foi verificado que modelos AC que não consideram esse comportamento superestimam o fluxo de carros sob mesmas condições de tráfego.

Um análise experimental foi conduzida por Sugiyama *et al.* (2008) para entender os mecanismos que resultam em congestionamento sem a presença de efeitos de gargalo (*bootleneck*). Esse efeito, que resulta na queda de velocidade média na via, pode ser causado por acidentes, obras e redução de números de faixas. O estudo foi conduzido em uma pista circular de única faixa onde fotos foram registrada em 360 graus. O estudo mostrou que se a densidade média da pista exceder o valor crítico a condição de tráfego livre se torna instável. Uma mínima perturbação na pista causa uma mudança para um estado de congestionamento.

O efeito estudado anteriormente também poderia ser verificado com uso de uma ferramenta computacional, como o simulador disponível em <http://www.traffic-simulation.de> que foi desenvolvido por Martin Treiber. Esse simulador permite a mudança de parâmetros, como densidade por faixa, aceleração máxima e máxima velocidade. Também é possível definir o cenário entre pista circular, seção da pista interrompida por obra e rodovia com pista de acesso e saída. A Figura 15 mostra o simulador disponível *online* com uma pista semelhante a utilizada por Sugiyama *et al.* (2008), onde a velocidade desejada é 108 km/h (cor roxa). Verifica-se que na Figura 15a os veículos estão em condição de tráfego livre. Contudo, o aumento de densidade na pista irá resultar em zonas paradas, veículo em vermelho na Figura 15b. Dessa maneira também é verificado a ocorrência de congestionamento sem nenhum efeito de gargalo.

Figura 15 - Reprodução do estudo de Sugiyama *et al.* (2008) utilizando um simulador online



Fonte: Santos (2017).

Dados de tráfego, sejam eles obtidos por simulação ou observação real, permitem conhecer como a velocidade dos veículos varia no tempo. Esses dados em conjunto com características do veículo (massa, aerodinâmica, sistema de transmissão e motor) permitem calcular o consumo de combustível e emissão de poluentes e gases de efeito estufa. Existem vários *softwares* disponíveis para simulação de tráfego como Aimsun, Vissim, SUMO e MovSim. No livro *Fundamentals of Traffic Simulation* de Jaume Barceló esses e outros softwares são apresentados e caracterizados. Além disso, existem os dados coletados para o *Next Generation Simulation* (NGSIM) que corresponde a um projeto da *Federal Highway Administration* (FHWA) dos Estados Unidos. Esses dados estão disponíveis no site *ops.fhwa.dot.gov*, como os dados referentes a rodovia interestadual I-80 em Emeryville (CA), Figura 16.

Figura 16 - Dados de vídeo do NGSIM referentes a I-80 (Emeryville, CA)



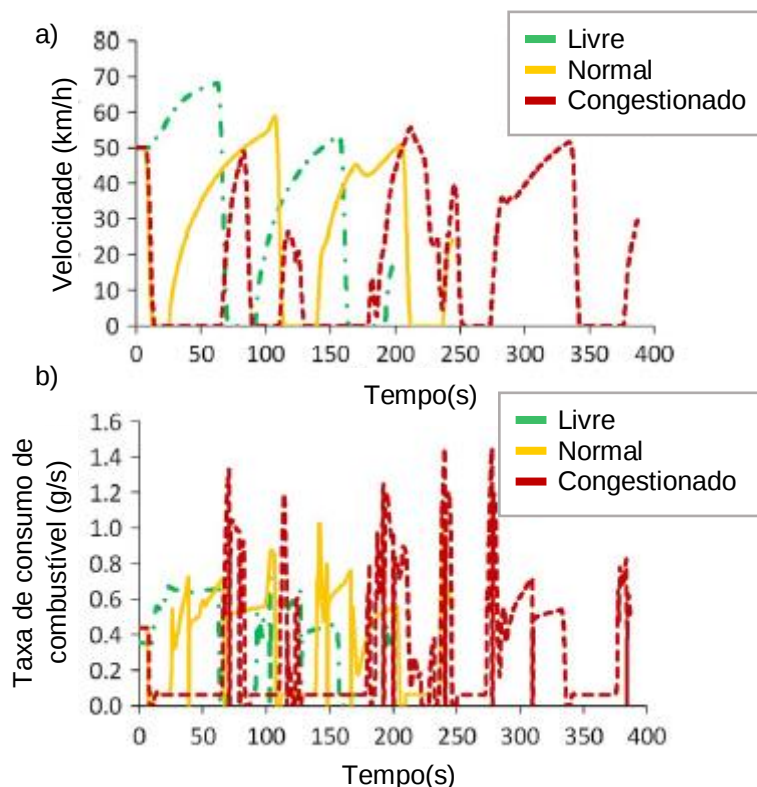
Fonte: U.S. Department of Transportation (2016).

Existem vários fatores que impactam no consumo de combustível e emissão de gases de efeito estufa e poluentes, como: motor, veículo, condição de tráfego, agressividade do motorista em relação a aceleração e características da pista (curvas e inclinação). Esses fatores podem ser analisados através da integração de modelos do tráfego, motor e consumo.

Alguns pesquisadores já fizeram essa integração. Garcia Neto (2014) implementou o modelo CA proposto por Meng *et al.* (2007) integrado com o modelo de dinâmica do veículo e motor para calcular o consumo de combustível. Essa integração permitiu estudar a relação entre densidade de veículos em fluxo máximo, consumo de combustível e emissão de dióxido de carbono. Araújo (2017) utilizou o mesmo modelo para analisar o tráfego em diversas métricas e pontos de vista. A velocidade média, custos mensais e emissão de poluentes foram os parâmetros analisados do ponto de vista do condutor e da sociedade.

Samaras *et al.* (2017) realizaram a integração entre modelos microscópicos (contínuo no espaço e discreto no tempo) usando Aimsum em conjunto com um modelo instantâneo de emissão para estudar a influência de congestionamento no consumo de combustível e emissão de CO₂. Além da redução da velocidade, o congestionamento resultou no aumento do consumo, Figura 17.

Figura 17 - Efeito da condição de tráfego na a) velocidade e b) consumo de combustível



Fonte: Adaptado de Samaras *et al.* (2017).

Satiennam *et al.* (2017) utilizaram os dados de trajetória dos veículos obtidos por simulação usando VISSIM. O modelo de tráfego foi calibrado com dados relativos à Tailândia para avaliar a influência de áreas exclusivas para motos antes de semáforos. Essas áreas resultaram em um decréscimo de 15% do tempo total de viagem e em 14% no consumo de combustível. Em outro estudo que também ocorreu na Tailândia foi realizada a coleta de dados através de sensores instalados em motocicletas. No total 112 horas de dados foram coletados em uma pista congestionada com muitos semáforos e foi observado que o tempo parado no tráfego é o parâmetro que mais influencia a emissão de CO₂ e consumo de combustível (SEEDAM *et al.*, 2017).

Xu *et al.* (2016) integraram o software VISSIM com o modelo de emissão MOVES para estimar a emissão de poluentes e gases de efeito estufa. O autor concluiu que a integração entre os modelos representa uma ferramenta adequada a nível de projeto para estudar a emissão veicular desde que os parâmetros de entrada sejam definidos adequadamente.

Pan *et al.* (2018) utilizaram um modelo CA (discreto no espaço e tempo) para estudar o impacto da velocidade máxima e ocupação da pista no consumo de combustível e emissão de poluentes considerando a energia necessária para vencer as resistências e a velocidade do motor. O veículo gasta mais combustível em pista com alto limite de velocidade em condição de tráfego livre. A influência do limite de velocidade no consumo de combustível diminui com a maior ocupação da pista. Entretanto, na fase de congestionamento um menor valor de velocidade máxima resulta em menor emissão material particulado (PM).

Treiber, Kesting e Thiemann (2008) utilizaram dados do NGSIM para estudar a influência do congestionamento no consumo de combustível e emissão de CO₂. O congestionamento representou um aumento de aproximadamente 25% no consumo por quilômetro em relação a condição de tráfego livre.

O motor, características do veículo e condutor são considerados nos modelos microscópicos e representam restrição ao movimento. A aceleração realizada por um veículo é resultado de um conjunto de decisões tomadas ao se dirigir, baseado em segurança, conforto, vontade e percepção que só irá ocorrer se as características dinâmicas do veículo permitirem.

Os modelos microscópicos de tráfego existentes não consideram o motor explicitamente, como no modelo de Gipps (1981), de Krauss (1998), IDM (TREIBER; HENNECKE; HELBING, 2000), NaSch (NAGEL; SCHRECKENBERG, 1992) e de MENG *et al.* (2007). Contudo, são capazes de capturar características macroscópicas do tráfego, como a relação fundamental entre fluxo, velocidade e densidade. A forma que esses modelos consideram o motor indiretamente é limitando a aceleração para um valor constante. Independentemente se o modelo microscópico é contínuo ou discreto no tempo ele consegue representar adequadamente o comportamento médio dos veículos, mesmo que em nível microscópico os veículos realizem acelerações irreais.

Existem modelos que consideram explicitamente as características do veículo e o motor para determinar a aceleração de um veículo isolado na pista. Uma das formas para calcular aceleração máxima é considerar as forças resistivas ao movimento e a força de tração nas rodas sem representar a troca de marcha e curvas do motor. No entanto, a força de tração nas rodas depende da potência disponível no motor e sistema de transmissão. INTEGRATION é um software de simulação de tráfego em que a aceleração máxima do veículo é limitada pelas resistências (aerodinâmica, rolagem e gravitacional), massa e potência máxima (constante) (RAKHA, 2015a, 2015b). Magnani, de Andrade e Willmersdorf (2018) estudaram a influência de parâmetros do motor, como eficiência térmica e características do veículo (massa, aerodinâmica e relação de transmissão) na performance de uma motocicleta. Os resultados mostram que as ineficiências do motor (atrito e transferência de calor) têm um papel importante na economia de combustível, assim como a massa, inclinação da pista e aerodinâmica. Além disso, os estudos realizados mostram que reacelerações podem aumentar o consumo em 31%.

A modelagem do motor permite a obtenção de performance de carros de acordo com dados reais e pode ser integrada com modelos microscópicos de tráfego (NI; HENCLEWOOD, 2008; RAKHA *et al.*, 2012). So *et al.* (2018) utilizaram o Aimsum para discutir o impacto de curvas e inclinações de uma pista na performance de um veículo. O Aimsum foi integrado com o pacote comercial de dinâmica veicular chamado de CARSIM e modelo de emissão PHEM. A integração com o modelo de dinâmica veicular resultou em menores velocidades nas curvas e em uma maior emissão de poluentes nas inclinações.

Assim como os modelos de tráfego, os modelos de emissão podem ser classificados como microscópico ou macroscópico. Na Europa, o modelo microscópico PHEM (*Passenger Car and Heavy-duty Emission Model*) é utilizado. Nesse modelo o consumo de combustível e emissão de gases são determinados pela variação de velocidade no percurso e por mapas de emissão do motor. A potência utilizada pelo veículo é calculada considerando a inércia, perdas no sistema de transmissão e resistências (aerodinâmica, rolagem e gravitacional). O modelo PHEM permite calcular o consumo e emissão de várias classes de veículos definidas por categoria (carro de passeio, caminhão, ônibus e moto), tipo de combustível, limites de emissão e sistema de controle de emissão (PARK *et al.*, 2016). O modelo CMEM (*Comprehensive Modal Emission Model*) é um modelo microscópico em que determina o consumo e emissão

categoria de veículo (veículo passageiro, ônibus, caminhão e moto), tipo da via e condição de tráfego (VIGOLO, 2013).

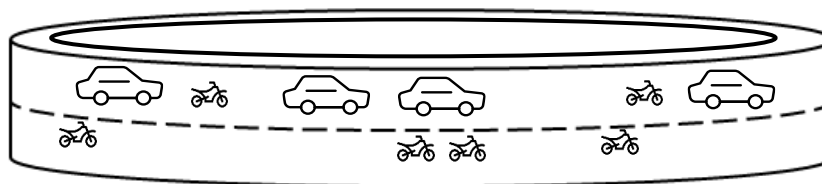
A emissão de gases e consumo de combustível de veículos são regulados no mundo por meio dos resultados dos ensaios de medição que utilizam um determinado ciclo de condução. Em 2017, a União Europeia a definiu um novo ciclo de condução para medição para melhor refletir melhor condições reais de tráfego. Essa mudança foi realizada, pois a anterior, chamada NEDC, não representava o comportamento real em tráfego (TSOKOLIS *et al.*, 2016) .

Existem diversos fatores que resultam em diferenças entre os valores medidos no ciclo de condução e o tráfego real, como: condições da pista (inclinação, estado da superfície e ocorrência de chuva), congestionamento, agressividade do condutor para acelerar e desacelerar e combustível usado. Fontaras, Zacharof e Ciuffo (2017) realizaram uma extensa revisão da literatura e indicaram que o congestionamento pode aumentar o consumo em 40% e um estilo de condução agressivo pode representar acréscimo de 25% no consumo de combustível. Em adição, o uso de E85 aumenta o consumo de combustível em 30-35% e reduz a emissão de CO₂ de 5-7%.

4 METODOLOGIA

Nesta seção serão descritos os modelos utilizados, apresentados os parâmetros usados e ressaltando as diferenças entre os modelos que serão comparados. Esses modelos foram usados para estudar o tráfego de carros e motos em uma pista de 7,5 km com duas faixas. A pista funciona como um sistema fechado, pois o seu fim está conectado com o começo, Figura 19. Os carros apenas podem trafegar na faixa da esquerda e as motocicletas podem mudar de faixa. A simulação será realizada para várias combinações de densidades de carros e de motos. Assim, várias condições de tráfego serão representadas. Esse cenário é o mesmo usado por Meng *et al.* (2007) em seu estudo de tráfego misto (entre carros e motos) por um modelo AC.

Figura 19 - Pista de simulação

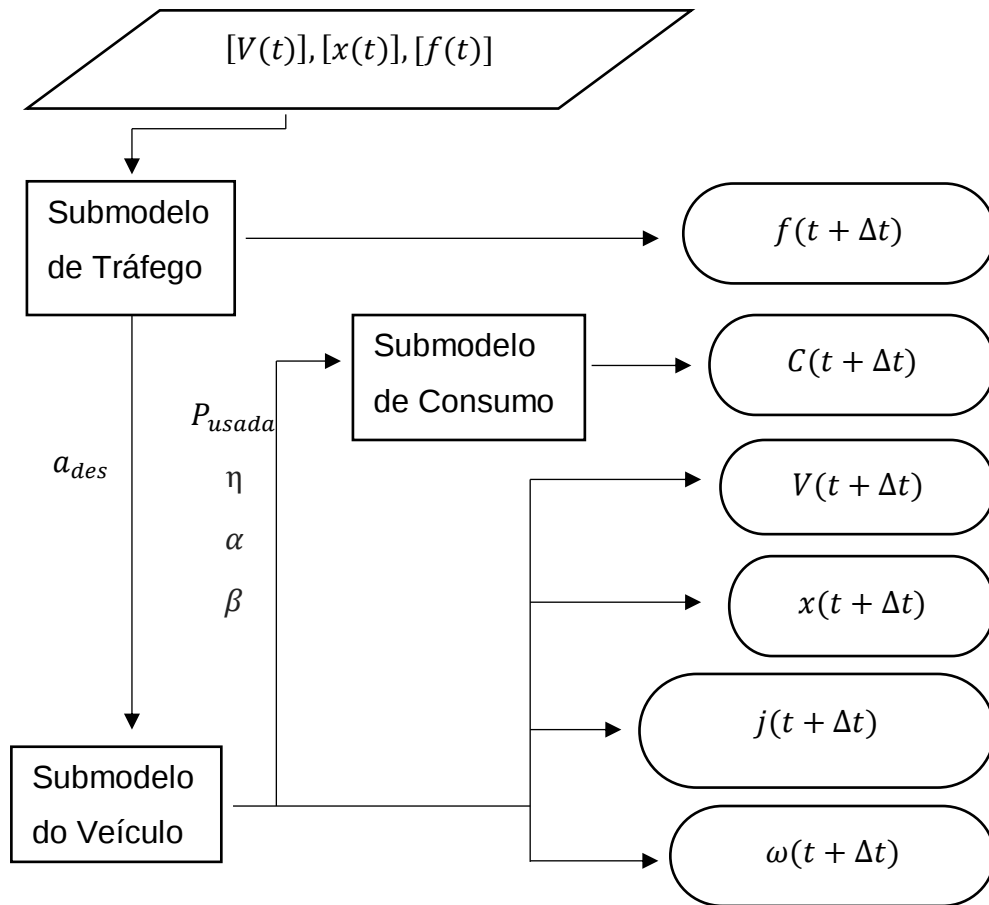


Fonte: O autor (2019).

A calibração é uma etapa importante na modelagem de tráfego, pois possibilita reproduzir resultados próximos da realidade. No entanto, nesta dissertação a calibração não será realizada, pois o objetivo principal não é representar o fluxo de veículos em uma pista específica, mas avaliar a importância da modelagem do motor.

4.1 DESCRIÇÃO DOS MODELOS

Os modelos utilizados consistem na integração de submodelos de tráfego, submodelo do veículo e consumo, os quais foram implementados em C++. Todos eles seguem a mesma sequência de operações, conforme Figura 20. O submodelo de tráfego determina a nova faixa (f) e a aceleração desejada (a_{des}). Primeiramente no submodelo de veículo a aceleração realizada (a) é definida. Posteriormente a velocidade (V), posição (x), marcha (j) e rotação do motor (ω) são atualizadas. O submodelo do veículo também fornece ao submodelo do consumo a potência usada (P_{usada}), a eficiência térmica do motor (η), o percentual de uso do motor (α) e o percentual de uso do freio (β). Por fim, o submodelo do consumo determina o consumo em litros (C).

Figura 20 - Fluxograma da integração entre submodelos em Δt 

Fonte: O autor (2019).

Neste estudo quatro modelos foram usados. O modelo de Aceleração Máxima Variada (AMV) é o modelo proposto onde o motor poderá influenciar no movimento do veículo. Em adição, três outros modelos que não consideram o motor explicitamente para acelerar também serão utilizados para representar os modelos normalmente utilizados para estudar o tráfego.

Os outros modelos usados com finalidade de comparação são: modelo de Aceleração Máxima Constante (AMC) e modelo de Aceleração Discreta (AD). Uma das diferenças entre os modelos é que AMV e AMC são modelos contínuos no espaço e AD é discreto no espaço. O modelo AD será representado de duas formas, AD1 e AD2. O primeiro corresponde a uma adaptação do AMC para se tornar discreto no espaço e o segundo corresponde ao modelo proposto por Meng *et al.* (2007), com modificações de alguns parâmetros de entrada.

AD1 consiste no modelo contínuo no espaço AMC modificado para funcionar tal qual um modelo discreto. Em AD1 a velocidade de segurança não é obrigatoriamente um múltiplo inteiro de um valor definido. Contudo na atualização da velocidade

a aceleração somente pode assumir um único valor. Dessa maneira, o modelo AD1 opera como um modelo autômato celular, pois os veículos sempre se deslocam em distâncias que correspondem a valores múltiplos de um número inteiro não negativo (células). AD2 é o modelo autômato celular proposto por Meng *et al.* (2007), o qual foi descrito na seção 2.4, com outro limite de velocidade e diferente tamanho de célula. As principais diferenças entre os modelos estão apresentadas na Tabela 2.

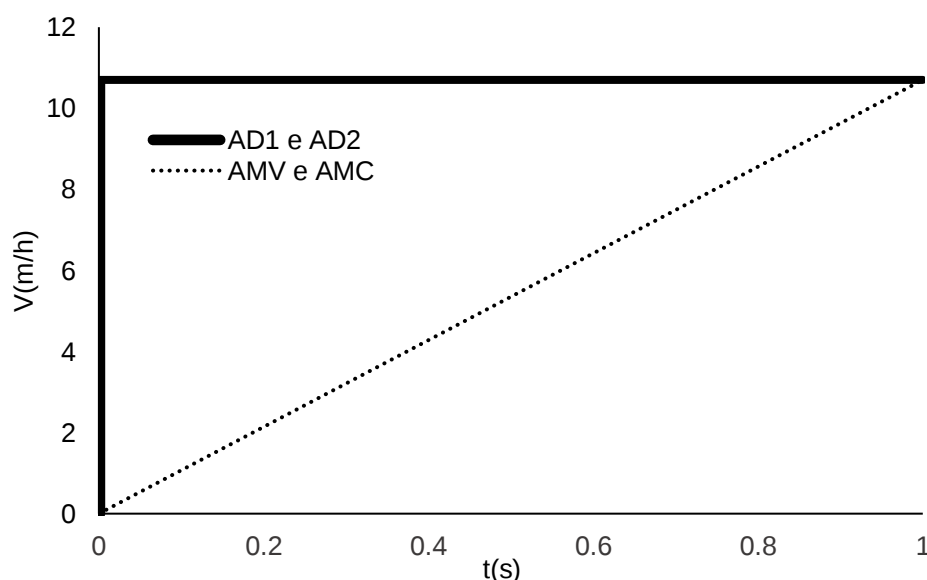
Tabela 2 - Características principais dos modelos

Modelo	Modelo microscópico de tráfego	Limitação de aceleração pelo motor	Aceleração instantânea
AMV	Contínuo no espaço	Sim	Não
AMC	Contínuo no espaço	Não	Não
AD1	Discreto no espaço	Não	Sim
AD2	Discreto no espaço	Não	Sim

Fonte: O autor (2019).

Todos os modelos utilizados são discretos no tempo ($\Delta t = 1s$). Em AD1 e AD2 o deslocamento ocorre com a atualização instantânea da velocidade e em AMV e AMC a velocidade só é alcançada depois do intervalo Δt , Figura 21.

Figura 21 - Atualização da velocidade nos modelos em Δt



Fonte: O autor (2019).

O objetivo principal é investigar a influência do modelo do motor tanto no tráfego quanto no consumo energético. Apenas o AMV considera o motor explicitamente para realizar a aceleração. Cada veículo é modelado em cada instante de tempo e o uso do submodelo de tráfego permite determinar a aceleração desejada que o conjunto

veículo-condutor quer exercer. Quando o motor não for considerado, o veículo irá realizar a aceleração desejada e será contabilizada a potência necessária para realizar esse movimento (AMC e AD). No caso do AMV, o motor pode restringir a aceleração caso a potência requerida seja superior a potência disponível do motor.

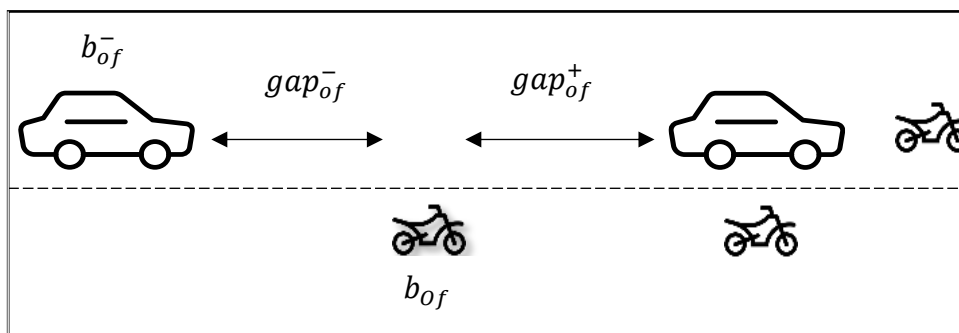
4.1.1 Submodelo de tráfego

O submodelo de tráfego consiste em duas etapas. Primeiramente é avaliado se os veículos trocam de faixa e posteriormente é determinada a aceleração desejada para cada veículo considerando a velocidade máxima que o condutor quer alcançar e segurança (não colisão).

4.1.1.1 Mudança de faixa

A troca de faixa só ocorre para as motos. O AMV e AMC possuem o mesmo modelo de mudança de faixa. A troca ocorre se condições em dois níveis forem satisfeitas: segurança e vantagem. Todos os veículos na outra faixa estão indicados com subscrito *of*. Para segurança primeiramente é verificado se as distâncias entre veículos da frente (gap_{of}^+) e de trás (gap_{of}^-) da faixa ao lado são maiores que zero. Posteriormente é verificado qual seria a desaceleração requerida para não colisão para o veículo seguidor na outra faixa (b_{of}^-) e veículo atual (b_{of}) se mudasse de faixa, Figura 22. A desaceleração é calculada de maneira parecida com o modelo proposto por Gipps (1981), Equação (14), porém considerando que $b = b^+$ e sem adição do tempo de atraso para reagir. A mudança é segura se a desaceleração requerida for maior que a desaceleração máxima desejada pelo condutor (b), considerando o valor negativo.

Figura 22 - Parâmetros para garantir troca de faixa sem colisão para AMV e AMC



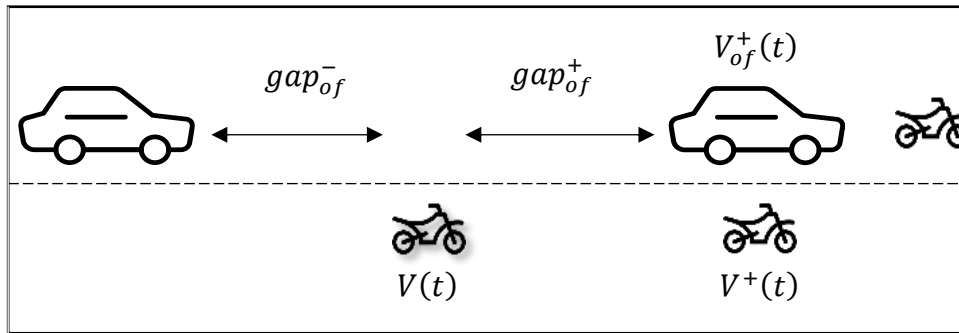
Fonte: O autor (2019).

Posteriormente é calculada a velocidade máxima que não causa colisão se o veículo permanecer na mesma faixa (V_{seg}) ou mudar de faixa ($V_{seg,of}$). A velocidade de segurança também é calculada semelhantemente a Equação (14), porém sem o tempo de atraso para reagir e assumindo que $b = b^+$. A troca de faixa ocorre se a velocidade de segurança na faixa ao lado for superior a velocidade de segurança na mesma faixa por um valor limite pré-definido (ΔV_{lim}), assumido com o valor de 0,2 neste trabalho. Matematicamente essas condições podem ser apresentadas pela Equação (16).

$$\begin{aligned} gap_{of}^+ > 0 \text{ e } gap_{of}^- > 0 \text{ e } b_{of} \geq b \text{ e} \\ b_{of}^- \geq b \text{ e } (V_{seg,of} - V_{seg}) \geq \Delta V_{lim} \end{aligned} \quad (16)$$

No AD1 e AD2 a troca de faixa ocorre de maneira semelhante. Nesses modelos é considerado que o veículo da frente está sempre parado e o veículo anterior da outra faixa está trafegando com velocidade máxima desejada. Para garantir a não colisão, a troca de faixa só irá ocorrer se a distância para o carro de trás for maior ou igual a velocidade máxima e se a velocidade for menor ou igual à distância do carro da frente, Figura 23.

Figura 23 - Parâmetros para garantir troca de faixa sem colisão para AD1 e AD2



Fonte: O autor (2019).

Além disso, para troca de faixa em AD1 é necessário que o veículo posterior da outra faixa seja mais rápido que o veículo posterior da mesma faixa e que o veículo esteja mais rápido que o veículo da frente na mesma faixa, Equação (17).

$$\begin{aligned} gap_{of}^- \geq V_{max} \text{ e } V(t) \leq gap_{of}^+ \text{ e} \\ V(t) > V^+(t) \text{ e } V_{of}^+(t) > V^+(t) \end{aligned} \quad (17)$$

Em AD2 a troca de faixa também ocorre para as condições em que os valores comparados de velocidade tenham o mesmo valor, Equação (18).

$$\begin{aligned} gap_{of}^- &\geq V_{max} \text{ e } V(t) \leq gap_{of}^+ \text{ e } \\ V(t) &\geq V^+(t) \text{ e } V_{of}^+(t) \geq V^+(t) \end{aligned} \quad (18)$$

4.1.1.2 Movimento em linha reta

O submodelo de tráfego microscópico contínuo usado no AMV e AMC foi baseado no modelo de Gipps (1981). A ideia desse modelo é usar parâmetros como a velocidade máxima desejada, a distância em relação ao veículo da frente (entre para-choque dianteiro e traseiro), a desaceleração máxima e o tempo de reação para calcular a velocidade desejada. A velocidade desejada representa o valor máximo para não haver colisão considerando a velocidade máxima desejada pelo condutor, Equação (19a). Diferentemente do modelo de Gipps (1981), no submodelo de tráfego de AMV e AMC não existe a adição de um tempo de atraso para reagir e é assumido que $b = b^+$. Além disso, a expressão que corresponde ao fluxo livre não é utilizada. A velocidade real usada pelo veículo para trafegar pode ser limitada pela aceleração máxima (parâmetro de entrada que representa a vontade do condutor) e motor no submodelo do veículo (apenas para AMV).

Os submodelos de tráfego discreto utilizados em AD1 e AD2 são baseados no modelo autômato celular proposto por Meng *et al.* (2007). Nesses modelos, veículos ocupam uma ou mais células (espaço de comprimento fixo) e sua velocidade corresponde à quantidade de células percorridas por unidade de tempo. O veículo muda de velocidade instantaneamente com valor único (comprimento da célula (Δx_c)), que corresponde à aceleração única. A velocidade desejada é calculada assumindo que o veículo da frente está sempre parado, a aceleração apenas pode ocorrer com o valor igual ao comprimento da célula e a desaceleração pode assumir qualquer múltiplo inteiro desse valor. Dessa maneira se assegura que não irá ocorrer colisão.

Enquanto o AD1 é uma adaptação do AMC, Equação (19b), AD2 corresponde à implementação do modelo autômato celular proposto por Meng *et al.* (2007), descrito na fundamentação teórica (seção 2.4). Em AD2 a velocidade é atualizada em duas etapas. Primeiramente todas as velocidades são acrescidas em uma célula (Δx_c), se a velocidade não for a máxima, e posteriormente essa velocidade pode ser reduzida para o valor que corresponde a gap^+ .

$$V_{des,AMV}(t + \Delta t) = V_{des,AMC}(t + \Delta t) = \min(V_{max}, b \frac{\Delta t}{2} + \sqrt{K_{V1} + K_{V2}}) \quad (19a)$$

$$V_{des,AD1}(t + \Delta t) = \min(V_{max}, gap^+ - d_{min}) \quad (19b)$$

Onde:

$$K_{V1} = \left(-b \frac{\Delta t}{2}\right)^2.$$

$$K_{V2} = V(t)^2 - b[2(gap^+ - d_{min}) - V(t)\Delta t].$$

a_{des} = aceleração desejada (m/s²).

b = desaceleração máxima dos veículos (m/s²).

Δt = tempo de reação (s).

d_{min} = distância mínima entre veículos (m).

gap^+ = distância em relação ao veículo da frente (m).

$V(t)$ = velocidade do veículo seguidor(m/s).

$V^+(t)$ = velocidade do veículo líder (m/s).

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

Em todos os modelos foram representados a aleatoriedade e imperfeições na condução dos veículos. Nos modelos contínuos cada veículo possui uma probabilidade de sua velocidade desejada ser decrescida em até b . Nos modelos discretos essa probabilidade resulta em decréscimo sempre de b .

Antes de outro submodelo ser utilizado, a aceleração desejada é determinada de modo a representar a vontade do condutor, Equações (20a) e (20b). O AD1 corresponde a uma adaptação do AMC para se tornar discreto, Equação (20b).

$$a_{des,AMV} = a_{des,AMC} = \begin{cases} \min(a_1, a_{max}), & \text{para } a_1 \geq 0 \\ \max(a_1, b), & \text{para } a_1 < 0 \end{cases} \quad (20a)$$

$$a_{des,AD1} = \begin{cases} 0, & \text{para } 0 < a_2 < a_d \\ a_d, & \text{para } a_2 \geq a_d \\ \min\left(-a, \left\lfloor \frac{a_2}{\Delta x_c} \right\rfloor a\right), & \text{para } a_2 < 0 \end{cases} \quad (20b)$$

Onde:

a_{max} = aceleração máxima desejada pelo condutor (m/s²).

$a_1 = [V_{des,AMV}(t + \Delta t) - V(t)]/\Delta t$ (m/s²).

a_d = aceleração discreta que corresponde a Δx_c (m/s²).

$a_2 = [V_{des,AD1}(t + \Delta t) - V(t)]/\Delta t$ (m/s²).

$\left\lfloor \frac{a_2}{\Delta x_c} \right\rfloor = \max \left\{ n \in \mathbb{Z} \mid n \leq \frac{a_2}{\Delta x_c} \right\}$.

4.1.2 Submodelo do veículo

O submodelo do veículo tem como função principal modelar o movimento dos veículos. Também é determinada a potência usada para acelerar ou desacelerar, assim como a eficiência térmica do motor. No AMV o movimento do veículo pode ser limitado pelo desempenho do motor. Para os demais modelos, o motor não limita a aceleração.

4.1.2.1 Submodelo do motor

O modelo do motor corresponde às curvas de potência e rendimento. A curva de potência representa a potência máxima disponível do motor para dada rotação. Será considerado que a curva do motor corresponde ao resultado de dinamômetro de bancada montado no virabrequim (ABNT,1996), imediatamente após as perdas térmicas e mecânicas nos pistões.

A curva potência do motor, $P_{d,m}(\omega_m)$, Equação (21), é obtida pelo modelo simples e de boa aproximação desenvolvido por Ni e Henclewood (2008). Esse modelo corresponde a uma relação cúbica que depende da rotação do motor (ω_m) e informações facilmente obtidas em manuais do veículo, como: potência máxima (P_{max}), rotação de potência máxima (ω_p) e rotação de torque máximo (ω_t).

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

A potência disponível do motor é resultante do processo de combustão. Porém, apenas parte da energia liberada na combustão é usada realizar trabalhos útil (uma grande parte é dissipada na forma de calor). A eficiência térmica do motor (η) representa a porcentagem dessa potência liberada que pode ser usada para acelerar o veículo. No ciclo Otto esses valores estão entre 20 a 40% (MARTYR; PLINT, 2007)

Nesse modelo a eficiência térmica é função de ω_m e do percentual de uso de potência disponível no motor (α) como proposto por Ben-Chaim, Shmerling e Kuperman, (2013), Equação (22) para condição $\alpha \leq 1$. Essa Equação foi desenvolvida

apenas contabilizando a aceleração e manutenção de velocidade de carros. A outra condição (eficiência máxima para $\alpha > 1$) foi assumida para analisar os casos em que o motor não influencia no movimento (AMC e AD). A eficiência térmica máxima e a potência do motor usada são representadas por η_{max} e $P_{m,usada}$, respectivamente.

$$\eta(\omega_m, \alpha) = \begin{cases} \eta_{max} \mu_p \mu_n, & \text{para } \alpha \leq 1 \\ \eta_{max}, & \text{para } \alpha > 1 \end{cases} \quad (22)$$

Onde:

$$\alpha = \frac{P_{m,usada}}{P_{d,m}(\omega_m)}.$$

$$\mu_p = 0,234 + 1,0592\alpha + 0,8149\alpha^2 - 1,2121\alpha^3.$$

$$\mu_n = 0,701 + 0,996\left(\frac{\omega_m}{\omega_p}\right) - 1,058\left(\frac{\omega_m}{\omega_p}\right)^2 + 0,312\left(\frac{\omega_m}{\omega_p}\right)^3.$$

Como pode ser visto nas expressões anteriores a rotação do motor é um parâmetro importante. Por isso se deve contabilizar o sistema de transmissão para determinar a rotação correspondente para cada velocidade nas rodas. No modelo, a marcha é selecionada pelo condutor de maneira a sempre ficar com o maior torque possível (menor consumo).

4.1.2.2 Submodelo do movimento do veículo

Para o veículo acelerar ou se manter em velocidade constante é necessário que seja fornecida força pela roda suficiente para vencer as forças de rolagem, aerodinâmica, gravitacional e inercial. Os veículos possuem partes que rotacionam que estão diretamente ligadas ao movimento longitudinal, como: eixos, virabrequim, embreagem e engrenagens. A contabilização da inercias dessas partes rotativas é feita por um fator de massa (γ_m), associado a massa do veículo (m) (TABOREK, 1957).

Para o AMV é necessário calcular a potência desejada na roda (P_{des}) para realizar a aceleração desejada, Equação (23). Essa expressão é resultante da integração da equação do movimento usando a segunda lei de Newton assumindo a potência desejada na roda e resistências constantes durante a integração. Essas simplificações foram realizadas, pois a potência desejada nas rodas e a resistência aerodinâmica são funções não lineares em V e o tempo de integração (Δt) corresponderá a apenas 1 segundo.

$$P_{des} = \left(\frac{V_{(t+\Delta t)}^2 - V_{(t)}^2}{2\Delta t} \right) m\gamma_m + V(t)F_{res} \quad (23)$$

Onde:

$$F_{res} = [K_a(W + V(t))^2 + (C_r \cos \theta + \sin \theta)mg].$$

K_a = fator de arrasto (kg/m).

W = velocidade do vento (m/s).

C_r = coeficiente de rolagem.

θ = ângulo de inclinação da pista (rad).

g = aceleração da gravidade (m/s²).

Uma vez que no AMV a potência na roda para realizar o movimento desejado é calculada, esse valor, se não nulo, é comparado com a potência disponível do motor. A potência de tração usada na roda é determinada pelo percentual de uso da potência disponível no motor (α) e contabilizando as perdas no sistema de transmissão (η_{trans}). Caso contrário é comparado com o percentual de uso da potência de frenagem disponível na roda (P_{fre}). No AMV a potência utilizada pelo motor para acelerar, P_{usada} , é dada pela Equação (24a), enquanto que para AMC e AD a potência usada, Equação (24b), é a potência considerando que o movimento será realizado, independentemente se o motor é capaz de fazê-lo. Esse dado será utilizado no submodelo do consumo.

$$P_{usada,AMV} = \begin{cases} \min(1, \alpha) P_{d,m}(\omega_m)\eta_{trans}, & \text{para } P_{des} \geq 0 \\ \min(1, \beta) P_{fre}, & \text{para } P_{des} < 0 \end{cases} \quad (24a)$$

$$P_{usada,AMC} = P_{usada,AD} = P_{des} \quad (24b)$$

Onde:

$$P_{fre} = -m\mu \cos \theta gV(t).$$

μ = coeficiente de atrito.

β = percentual de uso da potência de frenagem disponível.

Os veículos aceleram de forma diferente nos modelos. No AMV a potência tem influência no movimento do veículo, Equação (25), pois α é no máximo é 1.

$$a_{AMV} = \frac{\sqrt{V_{(t)}^2 + \frac{2\Delta t(P_{usada,AMV} - V(t)F_{res})}{m\gamma_m}} - V(t)}{\Delta t} \quad (25)$$

No AMV a nova velocidade é dada pela Equação (26a), enquanto que para AMC e AMD a aceleração desejada é sempre utilizada, Equações (26b) e (26c).

$$V_{AMV}(t + \Delta t) = V(t) + a_{des,AMV}\Delta t \quad (26a)$$

$$V_{AMC}(t + \Delta t) = V(t) + a_{des,AMC}\Delta t \quad (26b)$$

$$V_{AD}(t + \Delta t) = V(t) + a_{des,AD}\Delta t \quad (26c)$$

Para atualizar a posição os modelos também possuem diferenças. No AMV e AMC a nova velocidade é alcançada depois de um intervalo de tempo, Equações (27a) e (27b), e no AD a atualização da velocidade é feita de forma instantânea, Equação (27c).

$$x_{AMV}(t + \Delta t) = \left(\frac{V_{AMV}(t + \Delta t) + V(t)}{2} \right) \Delta t \quad (27a)$$

$$x_{AMC}(t + \Delta t) = \left(\frac{V_{AMC}(t + \Delta t) + V(t)}{2} \right) \Delta t \quad (27b)$$

$$x_{AD}(t + \Delta t) = V_{AD}(t + \Delta t)\Delta t \quad (27c)$$

4.1.3 Submodelo de consumo

O consumo em litros por segundo (C) é calculado utilizando a potência instantânea no motor, que corresponde à potência de tração da roda (P_{usada}) mais as perdas mecânicas resultantes dos componentes do sistema de transmissão (η_{transm}). Posteriormente são contabilizadas as perdas térmicas (η) decorrentes do processo de combustão e o consumo é determinado considerando o poder calorífico do combustível (PCI) e a densidade do combustível (ρ_{CxHyOz}). Foi considerado que quando o veículo está parado o consumo é dado por um valor constante, que corresponde a um parâmetro de entrada, C_{idle} . Nesse modelo, o consumo é nulo durante a desaceleração, Equação (28).

$$C_{AMV} = C_{AMC} = C_{AD} = \begin{cases} 0, & \text{para } \beta > 0 \\ \frac{P_{usada}}{\eta_{transm}\eta PCI \rho_{CxHyOz}}, & \text{para } \alpha > 0 \\ C_{idle}, & \text{para } \alpha = 0 \text{ e } \beta = 0 \end{cases} \quad (28)$$

Todos os modelos possuem o mesmo modelo de consumo. No AMV a potência usada corresponde a no máximo a potência disponível no motor para dada rotação.

O AMC e AD não têm o movimento dos veículos restringidos pelo motor e, por isso, podem ter potência usada com valor superior a disponível no motor. Embora AD tenha aceleração instantânea para atualização da posição e velocidade, a abordagem para o cálculo do consumo é feita de forma diferente. A potência usada corresponde ao valor calculado conforme os outros modelos, isto é, aceleração constante durante Δt .

4.2 PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO E DIFERENÇAS ENTRE MODELOS

O cenário de simulação é baseado em Meng *et al.* (2007), que corresponde a uma pista circular com duas faixas de 7,5 km de comprimento (L). A simulação é realizada durante 11.000 segundos, mas 10.000 segundos são considerados como período para estabilização (t_o). O tráfego apenas é analisado nos últimos 1.000 segundos (T). Na simulação, carros e motos são colocados inicialmente em pistas distintas, porém somente as motos podem mudar de faixa. Além disso, os veículos têm 10% de probabilidade de desacelerar durante a simulação. Devido à aleatoriedade, a simulação é repetida 3 vezes para AMV, AMC e AD1 e 30 vezes para AD2 objetivando valores estáveis de fluxo de carro e motocicletas como realizado por Garcia Neto (2014).

Na simulação, Δt de 1 segundo foi utilizado, o que corresponde ao tempo de reação no modelo de tráfego e tempo de atualização. No fim da simulação são registradas a velocidade média (km/h), consumo médio (l/s), desvio padrão da velocidade (km/h), percentual de aceleração irreal, percentual de troca de faixa e percentual da frota de motos na faixa em que os carros trafegam. Para AMC e AD 1 também são registrados a média do percentual de uso da potência disponível no motor e percentual de ocorrência de $\alpha > 1$. Para o AMV, aceleração positiva média, desaceleração média e ciclo de condução de um carro e de um moto para cada combinação de densidades são registrados. A partir desses dados é possível calcular outras informações, como fluxo médio de veículos (veic/h), economia média dos veículos (km/l), consumo energético médio por comprimento da pista (MJ/km.h), emissão média de CO₂ por comprimento da pista (kg de CO₂/km.h), consumo médio por distância percorrida (MJ/km) e emissão média CO₂ por distância percorrida (kg de CO₂/km). Para o cálculo energético foi considerado combustão completa do octano líquido (E0) com poder calorífico inferior (PCI) de 44 MJ/kg e densidade ($\rho_{C_8H_{18}}$) de 0,735 kg/l.

O fluxo de veículos é uma grandeza que permite analisar o tráfego de forma global, significando a quantidade de veículos que passam em uma seção de compri-

mento definido por unidade de tempo. Os fluxos que serão apresentados correspondem a todos os veículos na pista simulada para intervalo de uma hora. Os cenários simulados serão semelhantes a Meng *et al.* (2007): densidade de motos (ρ_m) de 0, 13,33, 40, 93,33 e 186,66 motos/km em conjunto com densidades de carros (ρ_c) de 0 a 160 carros/km, em intervalos de 10 carros/km na pista. Para as motos, os valores de densidade correspondem a 0, 100, 300, 699 e 1399 motos na pista, respectivamente. Já para os carros, 10 carros/km corresponde a 75 carros na pista. Essas combinações de densidades de carros e motos representam diversas situações de tráfego, isto é, desde tráfego livre (poucos veículos na pista) até totalmente congestionado (muitos veículos na pista).

Os carros e motos simulados representam veículos comumente encontrados no Brasil, como FIAT PALIO 1.0 e HONDA CG 125cc. Os manuais desses veículos foram utilizados para extrair parâmetros para o submodelo do motor e do veículo. Contudo, alguns dados foram arbitrados conforme a literatura, Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros definidos e justificativas

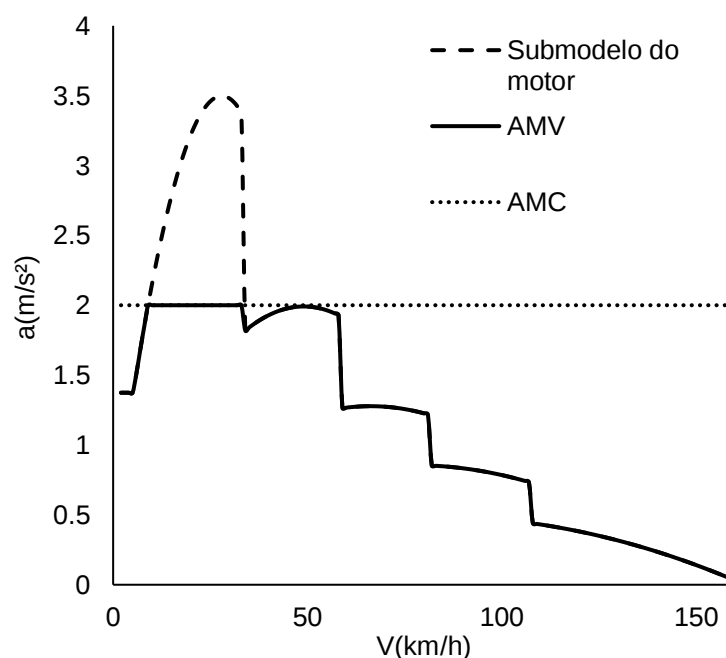
Parâmetro	Valor	Justificativa
K_A^{carro} (kg/m)	0,45	Kühlwein (2016)
K_A^{moto} (kg/m)	0,25	Está de acordo com Hucho (2005) e Cossalter (2006). Também permite que a moto consiga alcançar a velocidade máxima de 110 km/h.
C_r	0,02	Garcia Neto (2014)
γ_m	1,3	Corresponde à média do fator de massa dos carros usando a fórmula empírica $\gamma_m = 1.04 + 0.0025(R_f(j))^2$ (WONG, 2001)
$C_{idle,carro}$ (l/h)	0,65	Richard Van Basshuysen (2002) e Sharma <i>et al.</i> (2018)
$C_{idle,moto}$ (l/h)	0,15	Sharma <i>et al.</i> (2018)
$\eta_{max,carro}$	0,45	Valor assumido para resultar no consumo energético (MJ/km) parecido com o valor registrado pelo INMETRO (2013)
$\eta_{max,moto}$	0,40	Valor assumido para resultar em economia próxima a 40 km/l em situação de tráfego livre na simulação
b (m/s ²)	-3,0	Desaceleração confortável para a maioria dos motoristas em situações de sinal amarelo (PANDE; WOLSHON, 2016)
V_{max} (km/h)	108	Tráfego em rodovia

Fonte: O autor (2019).

O comprimento dos carros foi definido em 4 m e das motos 2 m no AMV, AMC e AD1, os quais devem manter uma distância mínima (d_{min}) de 2 m e 1m em relação ao veículo da frente, respectivamente. Para representar a mesma ocupação, o AD2 é representado por células de 3m – carros ocupam duas células e motos uma. Dessa maneira, os carros e motos podem acelerar unicamente com valor de 3m/s^2 em AD1 e AD2. Nos modelos contínuos no espaço, AMV e AMC, a aceleração máxima dos carros é $2,0\text{ m/s}^2$ e das motos $3,0\text{ m/s}^2$. O valor de $2,0\text{ m/s}^2$ corresponde à aceleração máxima observada para carros partindo do repouso (LONG, 2000). A aceleração máxima das motos foi assumida maior que a dos carros para representar maior agilidade no tráfego.

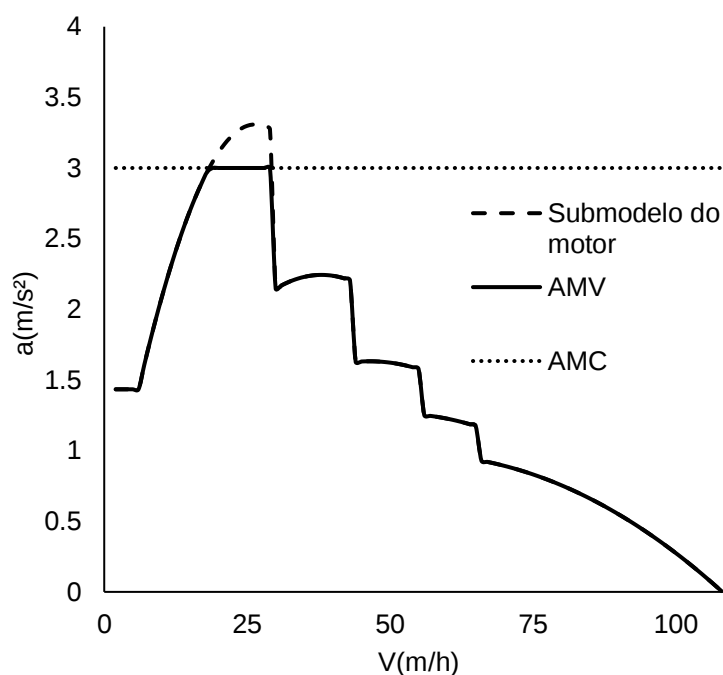
A limitação da aceleração máxima e desaceleração máxima é uma forma de representar o condutor, pois caso contrário em velocidade baixas os motoristas poderiam ter um comportamento muito agressivo, Figura 24 e Figura 25. Embora, essas acelerações só possam ser alcançadas por um curto intervalo de velocidades. Isso significa que, no AMV, os condutores podem usar a potência máxima disponível no motor e ainda não alcançar os valores máximos de acelerações.

Figura 24 - Aceleração máxima para os carros segundo diferentes modelos



Fonte: O autor (2019).

Figura 25 - Aceleração máxima para as motos segundo diferentes modelos

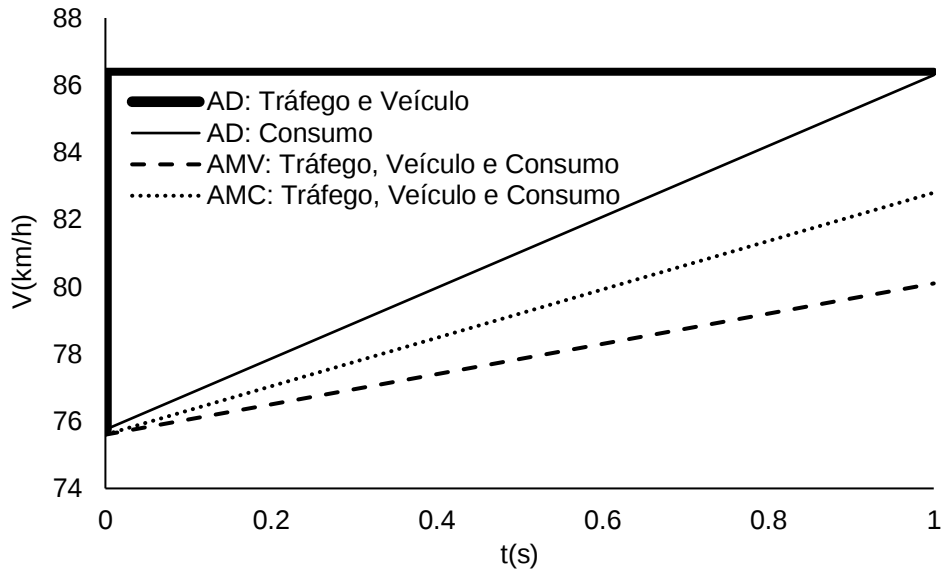


Fonte: O autor (2019).

Apesar dos modelos possuírem os mesmos parâmetros de entrada, seu funcionamento é diferente. No modelo AMV e AMC esses valores correspondem a um valor limite que o condutor exerce durante o funcionamento do modelo. No AD, carros e motos, podem sempre acelerar em $3 m/s^2$ e desacelerar com qualquer valor múltiplo desse valor de forma instantânea.

A velocidade máxima foi definida em 108 km/h. Valor que corresponde a tráfego em rodovia. Esse valor alto foi escolhido ao ser verificado que a aceleração máxima dos veículos é mais afetada em velocidades elevadas, Figura 24 e Figura 25. As diferenças entre os modelos podem ser vistas na Figura 26. O AMV possui a menor aceleração, pois o motor está restringindo seu movimento. No AMC o veículo pode acelerar com $2 m/s^2$ durante Δt , já no AD a velocidade é atualizada instantaneamente para um valor que corresponde a $3 m/s^2$ no submodelo do tráfego e do veículo. Em AD, o submodelo do consumo funciona como os modelos anteriores, usa a potência para acelerar linearmente em Δt .

Figura 26 - Diferença da atualização da velocidade entre os submodelos



Fonte: O autor (2019).

4.3 PARÂMETROS DE SAÍDA DA SIMULAÇÃO E DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS A PARTIR DE DADOS DE SAÍDA DA SIMULAÇÃO

Durante a simulação são calculadas a velocidade média ($\bar{V}$), o valor médio do desvio padrão da velocidade ($\bar{\sigma}$) e consumo de combustível médio ($\bar{C}$) para cada tipo de veículo, considerando o tamanho da frota de cada tipo de veículo (N) e tempo de análise (T), Equações (29), (30) e (31).

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \sum_{t=t_0+1}^{t_0+T} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i(t) \right) \quad (29)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{T} \sum_{t=t_0+1}^{t_0+T} \left(\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(V_i(t) - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N V_j(t) \right)^2} \right) \quad (30)$$

$$\bar{C} = \frac{1}{T} \sum_{t=t_0+1}^{t_0+T} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i(t) \right) \quad (31)$$

Para cada repetição existirá uma velocidade média, desvio padrão da velocidade e consumo médio, de maneira que o valor apresentado nesse trabalho será a média todas as repetições da simulação. Esses parâmetros possibilitam calcular o fluxo médio ($\bar{Q}$), economia média, consumo energético médio por comprimento da

pista (E_{pista}) e consumo energético médio por distância percorrida ($E_{percorrida}$), como mostrado nas Equações (32), (33), (34) e (35).

$$\bar{Q} = \rho \bar{V} \quad (32)$$

$$Economia = \frac{\bar{V}}{3600\bar{C}} \quad (33)$$

$$E_{pista} = \frac{3600\bar{C} \times PCI \times \rho_{C_8H_{18}}}{L} \quad (34)$$

$$E_{percorrida} = \frac{3600\bar{C} \times PCI \times \rho_{C_8H_{18}}}{\bar{V}} \quad (35)$$

Para determinar a emissão de CO₂ por comprimento da pista e por distância percorrida foi considerado a combustão estequiométrica do octano puro. Assim, foi determinado que é emitido 0,07 Kg de CO₂ por MJ liberado pelo combustível.

Em adição, em todos os modelos é calculado o percentual médio de troca de faixa e o percentual médio da frota de motos na faixa em que os carros trafegam durante a simulação.

O percentual de uso da potência disponível no motor foi registrado para avaliar a potência do motor usada em AMC e AD1 para cada tipo de veículo, correspondendo ao valor médio de α em toda simulação.

Em AMC o percentual de aceleração irreal corresponde ao número de vezes que $\alpha > 1$ em relação a frota, no tempo de análise e número de repetições. Para AD1 e AD2 corresponde à mesma relação considerando número de vezes em que o carro acelerou.

Para AMV também são calculados a aceleração média positiva e desaceleração média por tipo de veículo, considerando o tempo de análise e número repetições. Somente são considerados valores acima de 0,1 m/s² e menores que -0,1 m/s² para a média de aceleração positiva e desaceleração, respectivamente.

4.4 MÉTODO PARA DETERMINAR ACELERAÇÃO DO VEICULO

Para a determinação da aceleração do veículo a partir do conhecimento das forças envolvidas no movimento a equação do movimento, a Equação (2) foi integrada analiticamente considerando a potência e a velocidade nas resistências constantes durante o período de integração, 1s. Outros métodos poderiam ser utilizados como o Método das Diferenças Finitas na sua forma progressiva, Equações (36a), (36b), (36c)

e (36d), usado para a mesma aplicação por Garcia Neto (2014), ou o método numérico de Runge-Kutta (RK).

No método das diferenças finitas o valor aproximado da derivada é determinado com base no próprio conceito de derivada, Equação (36a). O método de Euler foi utilizado para determinar a derivada da velocidade, Equação (36b). A expansão em série de Taylor, Equação (36c) indica que a solução do método de Euler tem um erro de truncamento que é função do intervalo de análise, $O(\Delta t)$. Quanto menor o intervalo de análise, menor será esse erro. O método das diferenças finitas será utilizado e avaliado com intervalos de 1 s e 0,0001s, Equação (36d).

$$\frac{dV(t)}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{V(t + \Delta t) - V(t)}{\Delta t} \cong \frac{V(t + \Delta t) - V(t)}{\Delta t} \quad (36a)$$

$$V(t + \Delta t) = V(t) + \Delta t \frac{dV(t)}{dt} \quad (36b)$$

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{V(t + \Delta t) - V(t)}{\Delta t} + O(\Delta t) \quad (36c)$$

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{P_{usada,AMV}[V(t)]^{-1} - F_{res}}{m\gamma_m} \quad (36d)$$

A Tabela 4 apresenta as diferenças relativas das velocidades finais obtidas por métodos numéricos diferentes em relação a integração analítica com a potência e velocidade constante nas resistências, Equação(25), onde o número entre parêntese representa o intervalo utilizado para determinação de velocidade após um segundo.

O método escolhido se comporta de forma melhor em baixas velocidades e de forma semelhante em altas velocidades em comparação com os outros métodos numéricos. Contudo, de 1 km/h a 10 km/h subestima a aceleração em relação a DF e RK para intervalo de 0,0001s. É preciso destacar que pode existir mudança de marcha para as análises em 1s com intervalos de 0,0001s. Além disso, o uso de 0,0001s não é apropriado para este trabalho por questões práticas, pois quanto menor o intervalo de simulação maior o tempo será necessário para a simulação.

Tabela 4 - Comparação entre a integração analítica da equação do movimento com potência e velocidade constantes nas resistências com o método Diferenças Finitas (DF) e Runge-Kutta de quarta ordem (RK4)

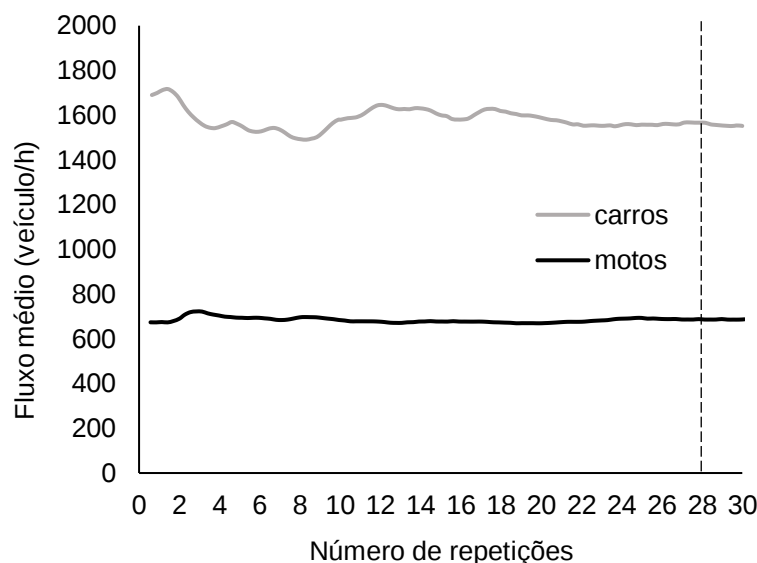
Integração		RK4(0,0001s)	RK4(1s)	D.F(0,00001s)	D.F(1 s)
V(t) km/h	V(t+1) Km/h	$\Delta V(\%)$			
0	8,14	571	-1.8E+24	1067	1.13E+08
0.1	8,13	19	462	19	3970
0.2	8,13	19	-459	19	1933
0.3	8,13	19	861	19	1255
0.4	8,12	20	376	20	918
0.5	8,12	20	242	20	716
0.6	8,12	20	174	20	581
0.7	8,12	20	131	20	485
0.8	8,13	20	102	20	413
0.9	8,13	21	81	21	357
1	8,14	21	65	21	313
2	8,25	25	10	25	118
3	8,49	31	0	31	59
4	8,83	41	-1	41	33
5	9,26	53	-1	53	20
6	10,86	49	-1	49	18
7	12,55	44	-0	44	18
8	14,20	40	-0.8	40	17
9	15,80	36	-0.7	36	16
10	17,37	33	-0.6	33	16
20	31,39	9	-0.4	9	10
30	42,37	-8	-0.3	-8	6
40	46,80	1	-0.2	1	1
50	57,05	1	-0.1	1	1
60	64,46	0	-0.1	0	0
70	74,50	0	-0.1	0	0
80	84,34	-1	-0.1	-1	0
90	92,93	0	0.0	0	0
100	102,76	0	0.0	0	0
110	111,49	0	0.0	0	0

Fonte: O autor (2019).

4.5 NÚMERO DE REPETIÇÕES DO SISTEMA

Garcia Neto (2014) implementou o modelo proposto Meng *et al.* (2007) e verificou a necessidade de trinta repetições para garantir estabilidade dos valores de fluxos de carros e motos em todas as densidades de veículos, Figura 27 . A implementação de Garcia Neto (2014) é o AD2 utilizado neste trabalho, porém com outro tamanho de célula e velocidades máximas. Ele utilizou a mesma pista deste trabalho, células de 3,75 metros de comprimento, velocidade máxima de 135 km/h para carros e velocidade máxima de 54 km/h para motos.

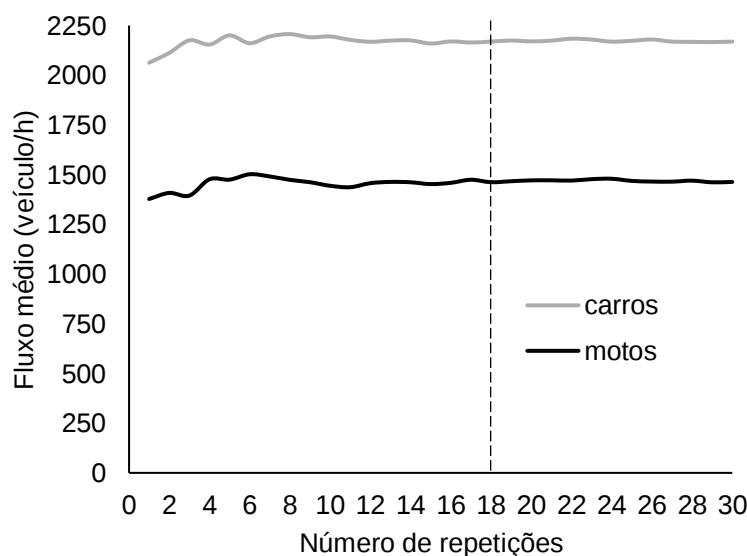
Figura 27 - Fluxo médio por número repetições em $\rho_m=13,33$ e $\rho_c=20$ para velocidade máxima de 135 km/h para carros e 54 km/h para motos no modelo de Meng et al.(2007)



Fonte: Adaptado de Garcia Neto (2014).

O modelo AD2 corresponde ao modelo utilizado por Garcia Neto (2014) com células de 3,00 metros de comprimento e velocidade máxima de 108 km/h para carros e motos. Para esses parâmetros os resultados mostraram que o fluxo de carros e motos estabilizam com um número menor de repetições para a mesma combinação de densidade utilizada por Garcia Neto (2014), Figura 28. Dessa forma, 30 repetições também garantem a estabilidade do fluxo de veículos para AD2.

Figura 28 - Fluxo médio por número de repetições para AD2 em $\rho_m=13,33$ e $\rho_c=20$ para velocidade máxima de 108 km/h para carros e motos



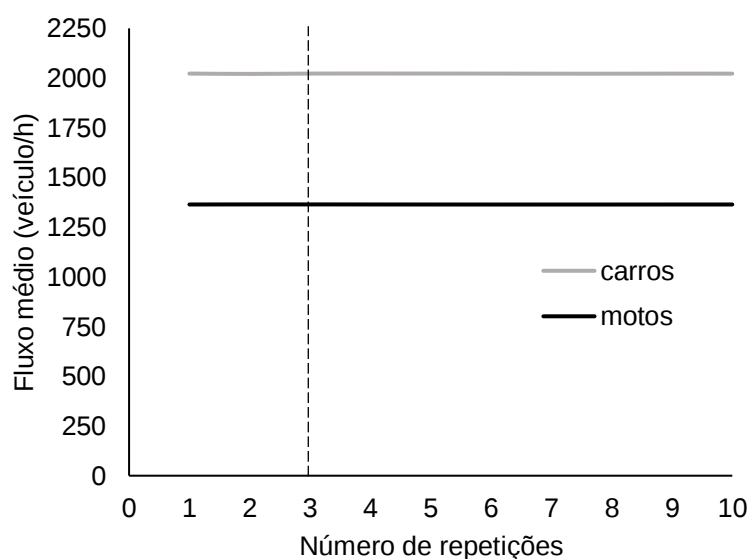
Fonte: O autor (2019).

O mesmo estudo foi realizado para AMV, AMC e AD1 para as seguintes combinações de densidade:

- $\rho_m = 13,33$ com $\rho_c = 20,40$ e 60
- $\rho_m = 93,33$ com $\rho_c = 20,40$ e 60
- $\rho_m = 186,66$ com $\rho_c = 20,40$ e 60

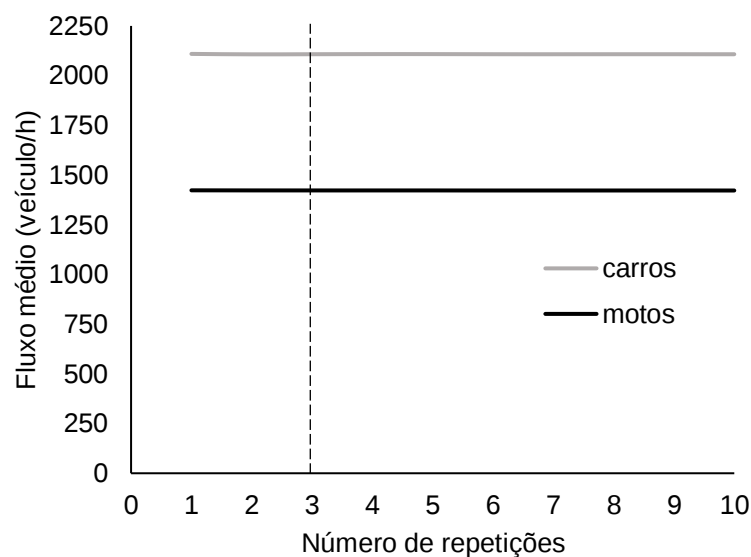
Essas combinações foram selecionadas com base no estudo de Garcia Neto (2014) e para representar combinações com elevado desvio padrão da velocidade. Para todos esses modelos três repetições representam um valor apropriado para garantir convergência dos valores de fluxo, Figura 29, Figura 30 e Figura 31. Para AMV e AMC apenas foram mostrados os resultados para $\rho_m = 13,33$ com $\rho_c = 20$, pois as outras combinações têm comportamento semelhante e corresponde à combinação verificada por Garcia Neto (2014) que necessita de mais repetições. Para AD1 foi mostrado os resultados para $\rho_m = 93,33$ com $\rho_c = 40$, uma vez que representa uma das combinações de densidade que a influência do número de repetições é mais visível.

Figura 29 - Fluxo médio por número de repetições para AMV em $\rho_m = 13,33$ e $\rho_c = 20$



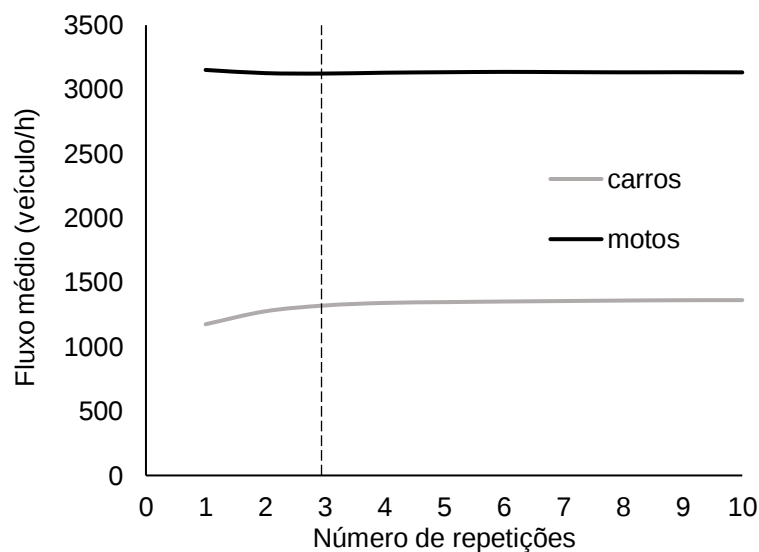
Fonte: O autor (2019).

Figura 30 - Fluxo médio por número de repetições para AMC em $\rho_m=13,33$ e $\rho_c=20$



Fonte: O autor (2019).

Figura 31 - Fluxo médio por número de repetições para AD1 em $\rho_m=93,33$ e $\rho_c=40$



Fonte: O autor (2019).

Nos modelos utilizados a aleatoriedade está presente na inicialização dos veículos na pista e na frenagem aleatória. A necessidade de um maior número de repetições para estabilização do fluxo de carros e motos em AD2 é explicado pela diferença do processo de inicialização de carros e motos em relação aos modelos AMV, AMC e AD1, os quais operam de mesma forma.

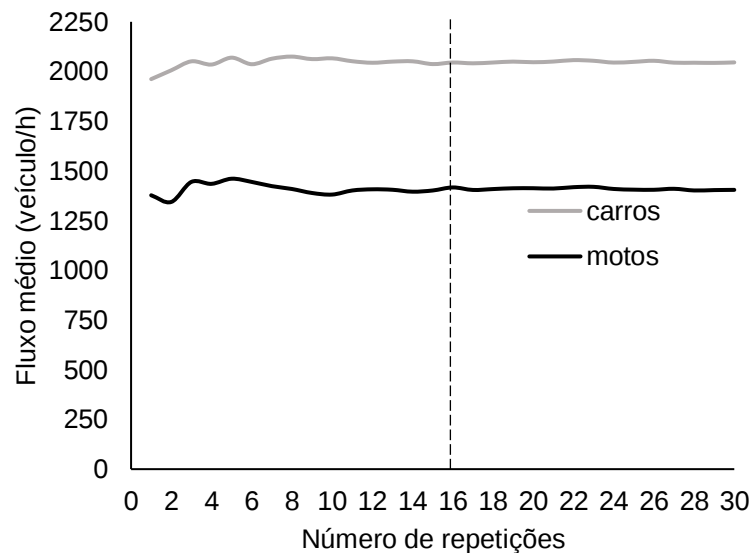
Em AMV, AMC e AD1 a densidade de carros e motos representam a quantidade exata de veículos na pista em cada repetição. Por exemplo, $\rho_m=13,33$ e $\rho_c=20$ significa que sempre existem 150 carros e 99 motos na pista. Em AD2 a densidade (ou número de veículos) pode variar em cada repetição, porém a densidade sempre fica

próxima do valor desejado. Para trinta repetições realizadas com $\rho_m=13,33$ e $\rho_c=20$ como parâmetros de entrada:

- A densidade de motos apresentou valor mínimo de 11,33 (85 motos) e valor máximo de 16,12 (121 motos).
- A densidade de carros apresentou valor mínimo de 18 (135 carros) e valor máximo de 22,53 (169 carros).

Três repetições não seriam suficientes para garantir a estabilidade dos valores de fluxo de veículos se AMV possuíisse inicialização semelhante ao AD2, Figura 32.

Figura 32 - Fluxo médio por número de repetições para AMV em $\rho_m=13,33$ e $\rho_c=20$ para inicialização semelhante ao modelo AD2.



Fonte: O autor (2019).

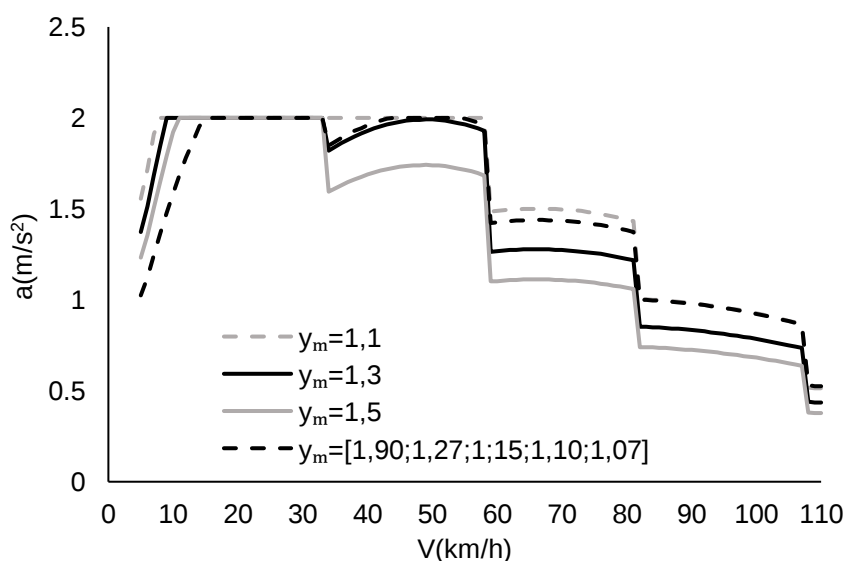
4.6 INFLUÊNCIA DO FATOR DE MASSA

A influência do fator de massa foi avaliada utilizando valores constantes e a relação empírica que determina o fator de massa a partir da relação final de transmissão, Equação (37). A expressão empírica deixa claro que quanto maior a relação de transmissão final, maior será o efeito da inércia de elementos rotativos. Assim, as menores marchas representam os maiores valores de fator de massa. Essa fórmula apenas deveria ser aplicada em carros para estudos em fase de projeto, mas nesse estudo também foi avaliada nas motos.

$$\gamma_m = 1.04 + 0.0025(R_f(j))^2 \quad (37)$$

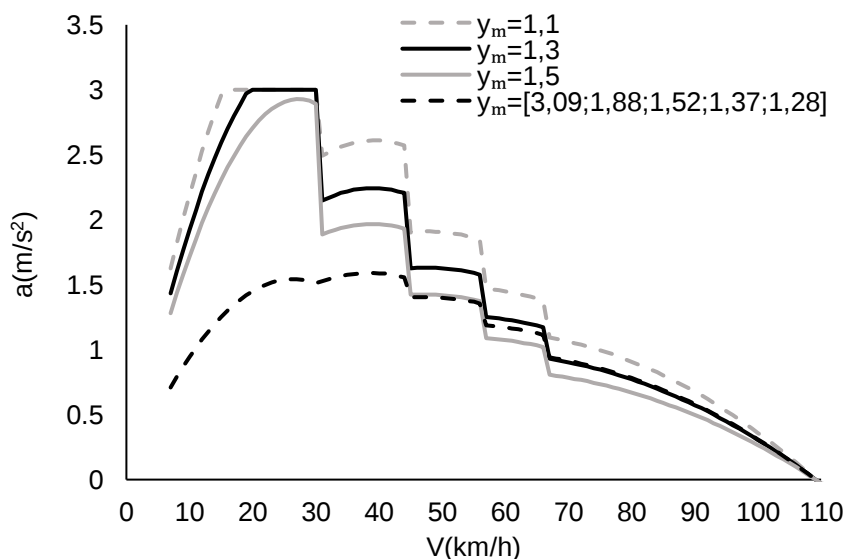
A influência do fator de massa está representada graficamente nas Figura 33 e Figura 34. A utilização da fórmula empírica está representada pela linha pontilhada preta e os valores estão registrados em ordem crescente de marcha. A relação empírica teve um efeito mais acentuado nas motocicletas, em que a inércia dos elementos rotativos triplica a inércia do veículo na primeira marcha. A limitação de aceleração de $2,0 \text{ m/s}^2$ do motorista nos carros minimizou as diferenças entre diferentes fatores de massa em velocidade baixa.

Figura 33 - Aceleração máxima dos carros por velocidade, fator de massa e limitação de aceleração máxima de $2,0 \text{ m/s}^2$ pelos pilotos



Fonte: O autor (2019).

Figura 34 - Aceleração máxima das motos por velocidade, fator de massa e limitação de aceleração máxima de $3,0 \text{ m/s}^2$ pelos pilotos



Fonte: O autor (2019).

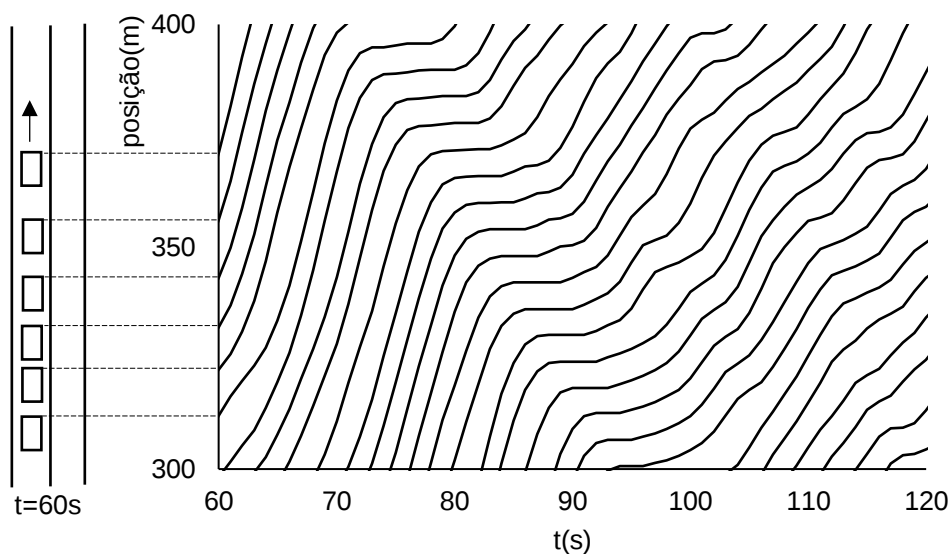
No livro sobre dinâmica de motocicleta de Cossalter (2006) existe um exemplo com uma motocicleta de corrida com fator de massa 1,12 na quarta marcha. Esse valor não é tão diferente do estimado, 1,37. No entanto, devido à falta de dados para confirmar a ordem de grandeza desse fator nas primeiras marchas essa expressão não foi utilizada. O fator de massa foi considerado 1,3 por representar um valor médio para os carros segundo a equação empírica. Esse valor contabiliza os efeitos de inércia em marcha elevada e em conjunto com a limitação da aceleração permite caracterizar bem as primeiras marchas.

5 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados do Modelo de Aceleração Variada, no qual o motor influencia no movimento do veículo. Posteriormente serão mostrados resultados referentes aos modelos em que a aceleração não depende explicitamente do motor. Comparações entre todos os modelos, utilizando o fluxo de veículos e economia de combustível, serão feitas com o objetivo de observar a relevância do motor na simulação. Para finalizar, será apresentada uma análise do comportamento individual de cada veículo em uma abordagem energética.

Cada ponto mostrado nas figuras deste capítulo corresponde a um valor médio calculado durante o tempo de análise e número de repetições para a frota de veículos. A Figura 35 mostra o que está acontecendo em uma secção de 100 metros da pista durante 1 minutos para $\rho_c=50$ e $\rho_m=0$. Cada linha representa a posição da parte frontal de um carro na pista. Assim, na figura existem 28 carros. Inicialmente os veículos estão trafegando mais rapidamente, porém em aproximadamente 70 segundos os carros começam apresentar linha de trajetória quase horizontais. Isso indica que esses veículos estão quase parados. Um carro lento na pista provoca a desaceleração dos outros veículos, como pode ser visto entre 70 e 100 segundos. Posteriormente, os veículos começam a se deslocar mais rapidamente (linhas mais inclinadas).

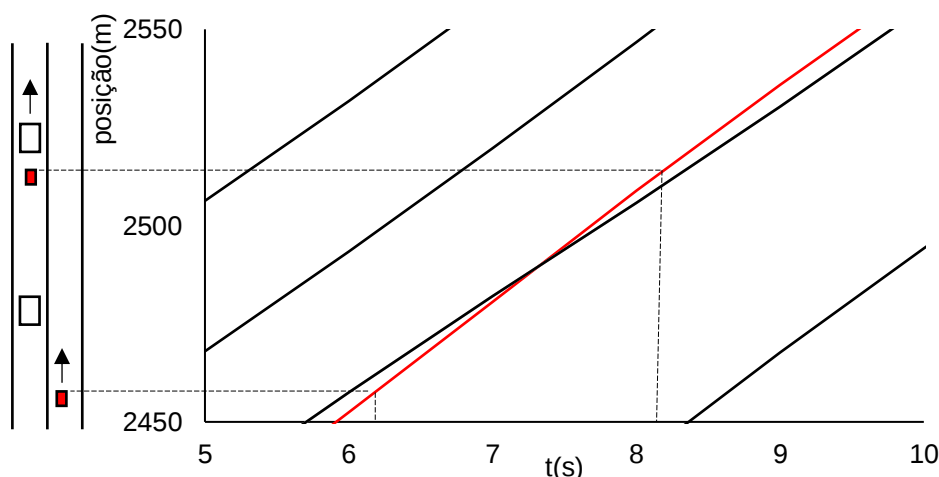
Figura 35 - Diagrama espaço-tempo em 100 m da pista durante 60 s para $\rho_c = 50,0$ e $\rho_m = 0,0$



Fonte: O autor (2019).

No diagrama espaço-tempo de uma pista com carros e motos, é possível observar dois veículos ocupando a mesma posição (linhas que se cruzam), pois as motos podem trafegar em duas faixas e os carros em apenas uma. Na Figura 36 é mostrado o deslocamento de veículos em 100 metros da pista durante 5 segundos para $\rho_c=10$ e $\rho_m=13,33$. A linha vermelha representa uma motocicleta e as linhas pretas os carros. Inicialmente, em 6 segundos, a moto está na faixa da direita, mas em 8 segundos a moto passa o carro e muda para faixa da esquerda. O cruzamento de linhas também poderia significar uma motocicleta trafegando na faixa da direita que passa na mesma posição de um veículo na faixa da esquerda e não troca de faixa.

Figura 36 - Diagrama espaço-tempo em 100 m da pista durante 5 s para $\rho_c = 10$ e $\rho_m = 13,33$



Fonte: O autor (2019).

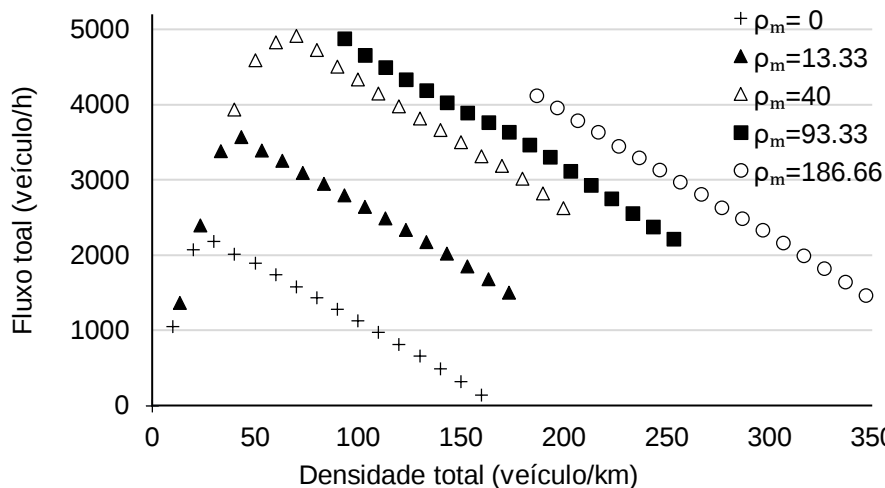
5.1 MODELO DE ACELERAÇÃO MÁXIMA VARIADA (AMV)

Nesta seção será analisado o comportamento coletivo dos veículos na pista. A análise macroscópica será realizada por uma abordagem de fluxo de veículos e consumo energético na pista.

O fluxo total da via possibilita uma análise macroscópica do tráfego. A Figura 37 corresponde ao diagrama fluxo-densidade para todos os veículos da pista. Assim, no fluxo total e densidade total são contabilizados tanto carros quanto motos. O fluxo total, composto por carros e motos, é influenciado pelas quantidades de veículos na pista. Para cada densidade de moto, representada por uma curva, existe um ponto de fluxo máximo. Tal característica é de se esperar no tráfego segundo a relação fundamental, pois inicialmente os veículos têm mais liberdade para trafegar até chegar a

um ponto de saturação. A grande quantidade de veículos na pista resulta em uma queda de velocidade média na via e, portanto, o fluxo decresce.

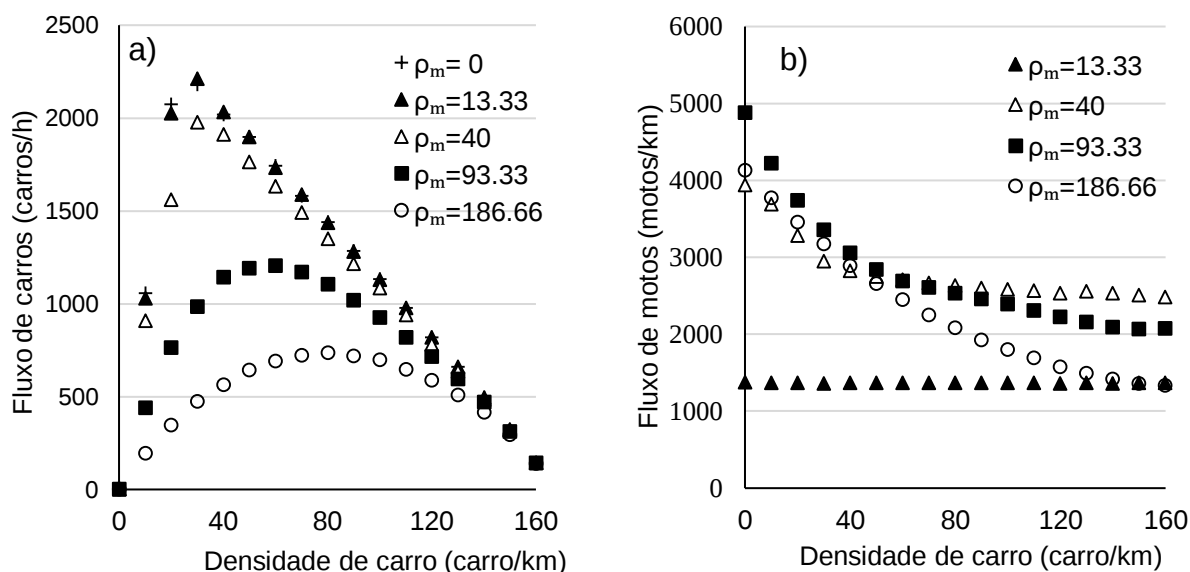
Figura 37 - Fluxo total da pista em função da densidade total



Fonte: O autor (2019).

Na Figura 38 são analisados os fluxos de carros e motos separadamente em função da densidade de carros. Carros e motos apresentaram comportamento médio distinto no tráfego, pois as motos ocupam metade do espaço e podem trafegar em duas faixas. Nota-se que o fluxo de carros, Figura 38a, segue o comportamento da relação fundamental, enquanto as motos não apresentam nenhuma fase em que o fluxo cresça com a densidade, Figura 38b. O gráfico de fluxo de motos teria formato da relação fundamental se plotado em função da densidade de motocicletas, Figura 39.

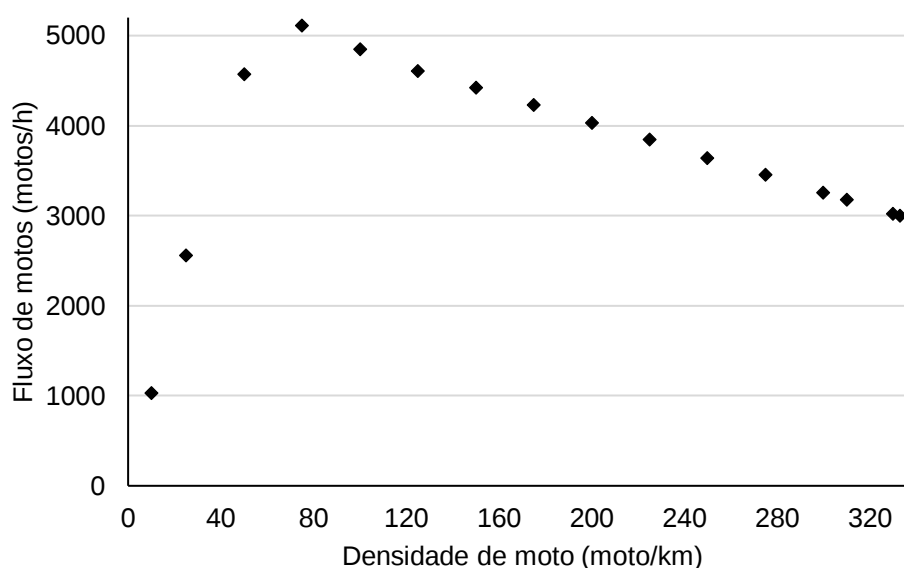
Figura 38 - Fluxo a) de carros e b) de motos em função da densidade de carros



Fonte: O autor (2019).

Os dois gráficos, Figura 38a e Figura 38b, estão de acordo com os resultados de Meng *et al.* (2007) que utilizaram a mesma pista para análise. Os resultados mostram que em baixas densidades, os carros podem trafegar com a velocidade próxima à máxima desejada, Figura 40a. Porém, a partir $\rho_c=30$, ponto de saturação, zonas de congestionamento surgem e com isso frenagens e acelerações se tornam mais recorrentes.

Figura 39 - Fluxo de motos em função da densidade de motos para $\rho_c = 0$



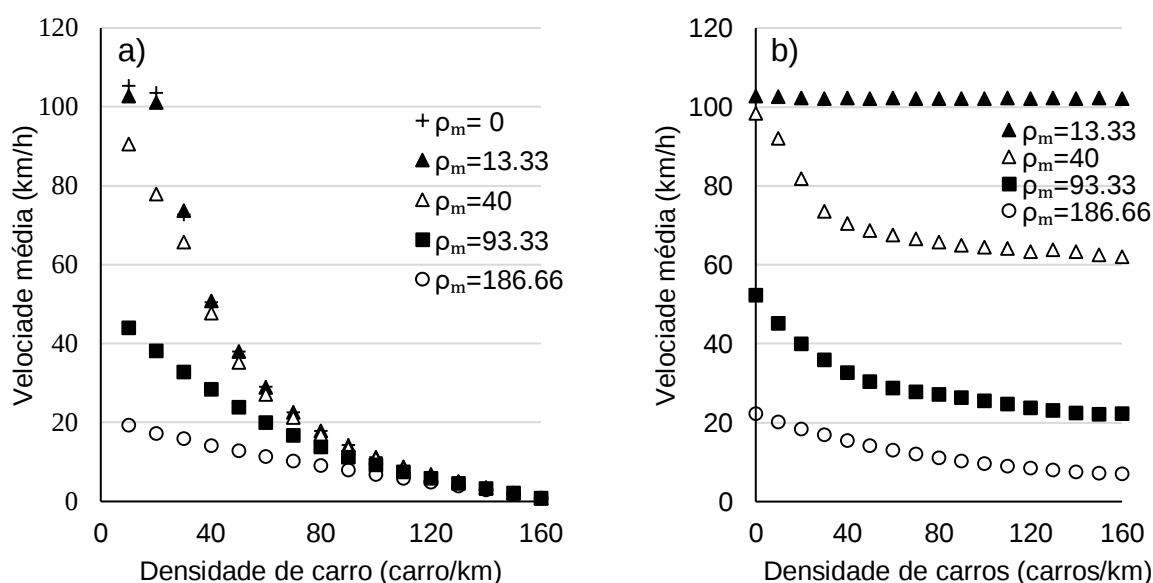
Fonte: O autor (2019).

Destaca-se que o tráfego de carros em conjunto com motos possibilita um aumento de fluxo na pista. O fluxo máximo com somente carros é de 2180 carros/km, mas com motos esse valor poder alcançar 4920 veículos/km nas duas faixas. Esses valores são superiores aos valores de capacidade indicados no HCM (TRB, 2010a), porém é importante salientar que os parâmetros de entrada utilizados apenas foram definidos a partir dos manuais dos veículos, dados baseados na literatura e não passaram por um processo de calibração. A diferença entre o valor de fluxo máximo obtido e os valores de capacidade usados como referência no HCM, como 2,000 ucp/h para uma rodovia com duas faixas de mão dupla quando não existe fluxo faixa adjacente, também ocorre porque em condições reais de tráfego existem veículos com dimensões diferentes. No modelo todos os carros e motos têm comprimento de 4 m e 2 m, respectivamente. Se na simulação fosse considerando que a dimensão de todos os carros é 5 m, o fluxo máximo com somente carros na pista seria 2065 carros/h. Além disso, no tráfego real os condutores têm estilos distintos de condução

(aceleração, desaceleração e afastamento) e reagem a mudanças no tráfego em intervalos de tempo diferentes. Na simulação a aleatoriedade e imperfeições ao se dirigir estão representada por uma probabilidade de 10% de desaceleração aleatória. O fluxo máximo com apenas carros na pista seria 1981 carros/h para uma probabilidade de 20% de desaceleração aleatória.

As motos não têm sua velocidade impactada pela quantidade de veículos em $\rho_m=13,33$, Figura 40b. Porém, para densidades superiores de motos existe uma queda de fluxo e velocidade à medida que existe um aumento de carros na pista. Isso ocorre devido à mudança de faixa das motos. As motos, ao mudarem de faixa, estarão sujeitas a ter sua velocidade limitada pelos carros por questão de segurança (não colisão). Nota-se na Figura 40a que a partir de $\rho_c=120$ as velocidades médias dos carros apresentam o mesmo valor.

Figura 40 - Velocidade média a) dos carros e b) das motos em função da densidade de carros

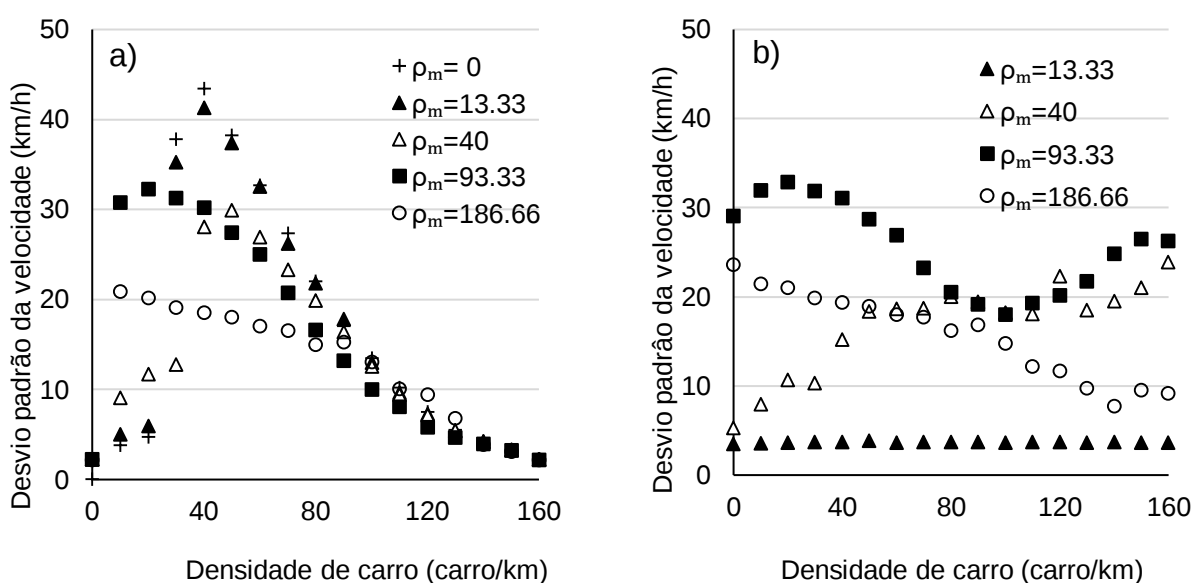


Fonte: O autor (2019).

O desvio padrão da velocidade representa o valor médio da variação da velocidade dos veículos em relação a velocidade média em cada instante de tempo. A análise para os carros é mais simples, pois todos estão na mesma faixa. Os efeitos do ponto de saturações e zonas de congestionamento podem ser visualizados para os carros utilizando esse parâmetro. Nas maiores densidades de carros, onde ocorre congestionamento, os valores são muito baixos. A grande quantidade de veículos re-

apresenta uma restrição ao movimento para os veículos na pista. Em baixas densidades os valores do desvio padrão da velocidade também são baixos, pois a menor quantidade de veículos resulta em uma maior liberdade para trafegar. Valores de desvio padrão elevados indicam que existem áreas na pista em que carros trafegam mais rapidamente que em outras partes, Figura 41a. Para as motos, a velocidade média é contabilizada nas duas faixas. Sendo assim, um elevado desvio padrão para as motocicletas podem indicar elevado número de desacelerações e acelerações, como também diferentes velocidades nas duas faixas.

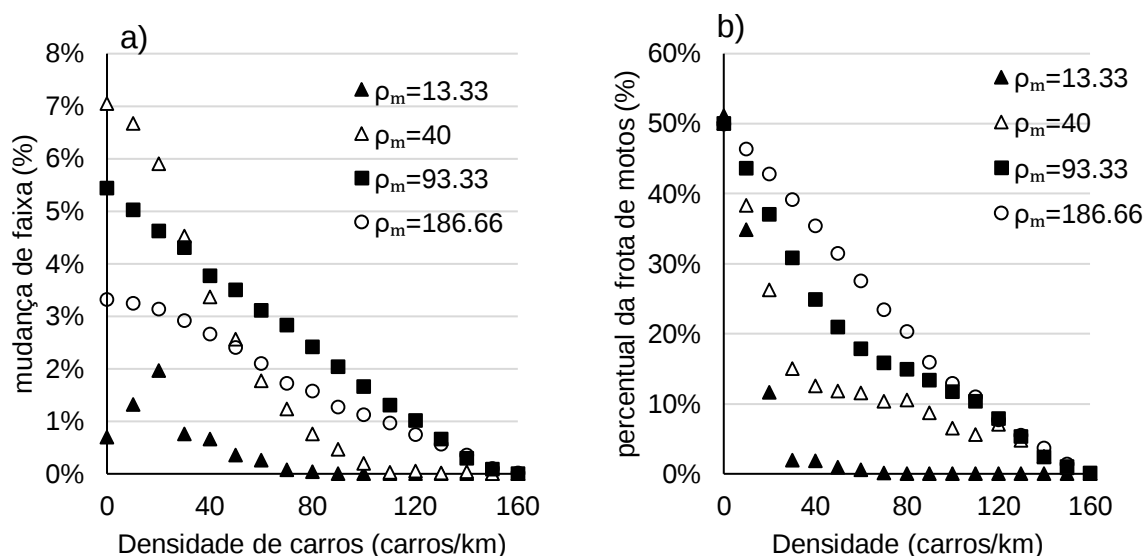
Figura 41 - Desvio padrão da velocidade a) de carro e b) de moto



Fonte: O autor (2019).

O percentual de mudança de faixa é um valor médio que representa a proporção de motos que trocaram de faixa em relação a sua frota e período de simulação. Como esperado, a quantidade de troca de faixa diminui à medida que a quantidade de carros aumenta (Figura 42a), devido aos critérios que garantem a não colisão. Em baixa densidade de carros uma grande quantidade da frota das motocicletas ocupa a faixa que os carros trafegam. Com aumento da densidade de carros há uma diminuição na quantidade de motos na faixa em que os carros trafegam, Figura 42b.

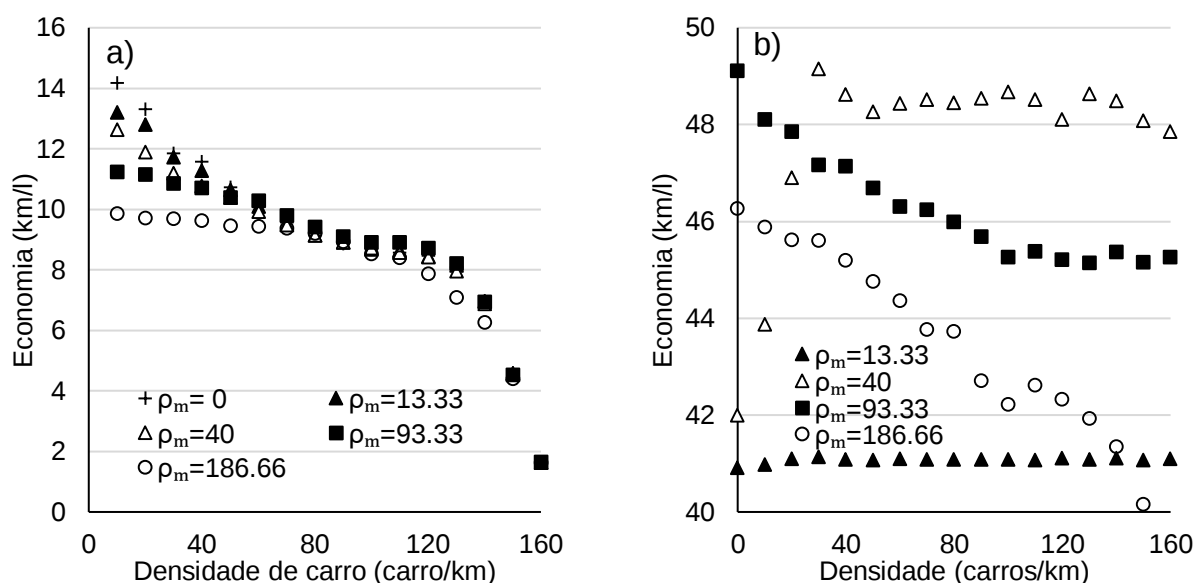
Figura 42 - a) Percentual de motos que mudam de faixa e b) Percentual da frota de motos nas faixas em que os carros trafegam



Fonte: O autor (2019).

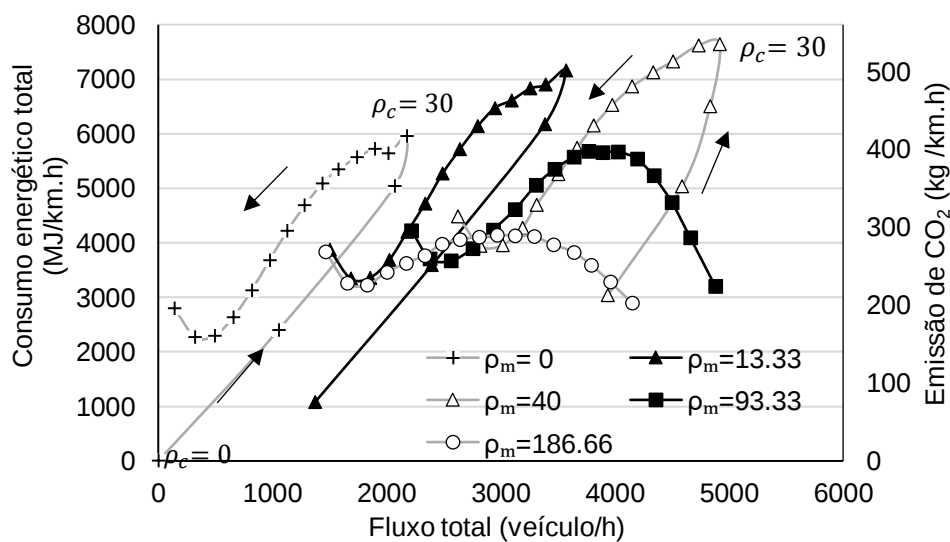
A saturação do tráfego corresponde à fase em que a quantidade de veículos e suas interações não permitem mais aumento de fluxo. Esse cenário é caracterizado por elevadas variações de velocidade. A variação de velocidade influencia na economia de cada veículo, pois quanto maior a quantidade de frenagens e acelerações, maiores serão os consumos. Em situação em que os veículos podem trafegar com velocidade média superior a 100 km/h (tráfego livre), os carros têm uma economia superior a 12 km/l, Figura 43a. A economia das motos é sempre maior que 40 km/l, contudo, os carros possuem um desempenho bastante inferior quando colocados em situações de tráfego intenso. Embora as motos também exibiam uma queda de economia com o aumento de densidade de carros, seu desempenho ainda é bom em congestionamento, como em $\rho_m=186.66$. Diferentemente dos carros, as motos apresentaram valores mais baixos de economia quando existem em menores quantidades, Figura 43b.

Figura 43 - Economia de combustível a) dos carros e b) das motos



Fonte: O autor (2019).

A Figura 44 mostra o consumo energético e emissão de CO_2 por quilômetro de pista contabilizando carros e motos. Verifica-se que à medida que a quantidade de veículos aumenta existe um aumento do consumo energético e emissão de CO_2 na pista até o ponto de saturação (fluxo máximo). A queda de fluxo ocorre à medida que mais carros são colocados na pista sendo acompanhado com uma diminuição de consumo/emissão. Na mais alta densidade simulada, $\rho_c = 160$, o consumo aumenta apesar da queda de fluxo. Os veículos passam mais tempo parados, mas não por isso deixam de consumir. Em adição, os valores mais elevados para consumo energético e emissão de dióxido de carbono ocorrem no ponto crítico do fluxo de carros.

Figura 44 - Consumo energético e emissão de CO_2 na pista

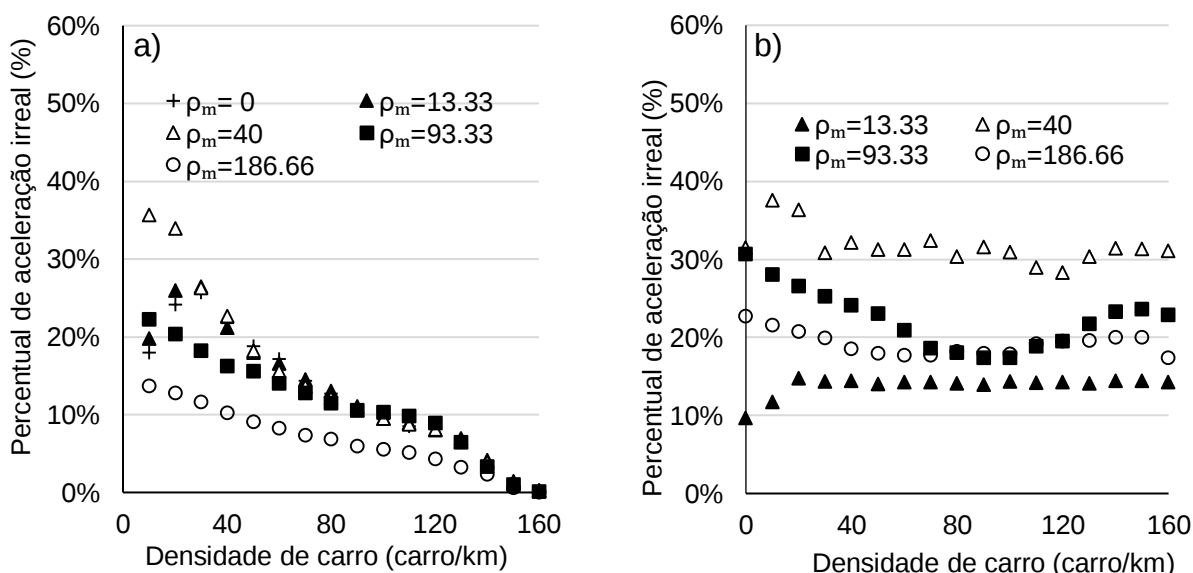
Fonte: O autor (2019).

5.2 MODELO DE ACELERAÇÃO MÁXIMA CONSTANTE (AMC) E MODELO DE ACELERAÇÃO DISCRETA (AD)

O AMC permite que os veículos acelerem com valores que não correspondem à realidade (limitações impostas pelo motor), como pode ser visto na Figura 45. O percentual de aceleração irreal representa a fração de veículos no tempo de análise que usam uma aceleração maior que o motor permitiria ($\alpha > 1$). Esse parâmetro também significa uso de uma potência maior do que a disponibilizada no motor. Pode-se notar, para os carros, que à medida que a quantidade de veículo aumenta, a porcentagem decresce até aproximadamente zero, Figura 45a.

As motocicletas possuem valores maiores e mais estáveis, isto é, não existe uma queda acentuada para valores próximos a zero, Figura 45b. Enquanto existir instabilidade do fluxo, esse valor não será baixo, pois existirão desacelerações seguidas de acelerações que o veículo não permite. Esse comportamento pode ocorrer no fenômeno chamado ondas de congestionamento, isto é, áreas na pista em que os veículos estão parados ou em baixa velocidade, que se propagam contra o sentido do fluxo. Em condições de tráfego livre, essa porcentagem tem valores acima de 10%, devido à frenagem aleatória.

Figura 45 - Percentual de aceleração irreal no AMC para a) carros e b) motos



O AMC representaria exatamente o AMV se o motor pudesse manter a aceleração constante para todas as velocidades. No caso simulado haveria performance semelhante se os veículos possuísem mais potência ou uma combinação de velocidade máxima desejada e aceleração máxima que correspondesse a uma performance

viável pelas características dos motores utilizados, Figura 24 e Figura 25. Se as motos e carros mantivessem as mesmas características, porém com o dobro de potência conseguiram alcançar a aceleração máxima até 50 km/h e 80 km/h, respectivamente.

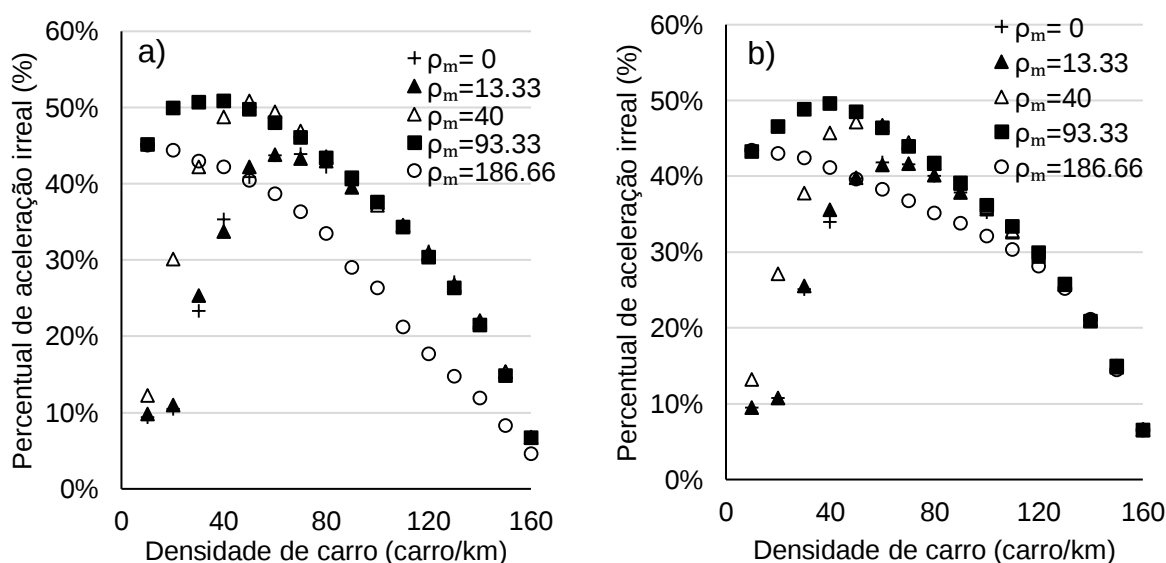
AD tem o percentual de ocorrência de aceleração irreal superior ao modelo AMC. Além de todos os veículos acelerarem com 3m/s^2 , essa aceleração ocorre de forma instantânea. Isso significa que toda aceleração que ocorre representa um deslocamento irreal. Será considerado que nos modelos discretos o percentual de aceleração irreal corresponde ao percentual de veículos que aceleram durante a simulação. Deve-se lembrar que no cálculo do consumo de combustível a aceleração não é considerada instantânea. Usando o AD1 como base, a diferença entre o percentual de ocorrência de $\alpha > 1$ e o percentual de ocorrência de aceleração é inferior a 12 % para carros e 7% para as motos. A comparação entre o percentual de ocorrência de $\alpha > 1$, Apêndice B em

Figura B16 e

Figura B17, e o percentual de aceleração irreal, Figura 46a e Figura 47b indicam que não existem diferenças significativas nas tendências das curvas.

AD1 e AD2 possuem curvas semelhantes de porcentagem de aceleração irreal na maioria das situações. Os carros em $\rho_m = 186,66$ tem valores distintos. AD1 possui uma queda mais acentuada a partir de $\rho_c = 80$ em relação ao modelo AD2, Figura 46.

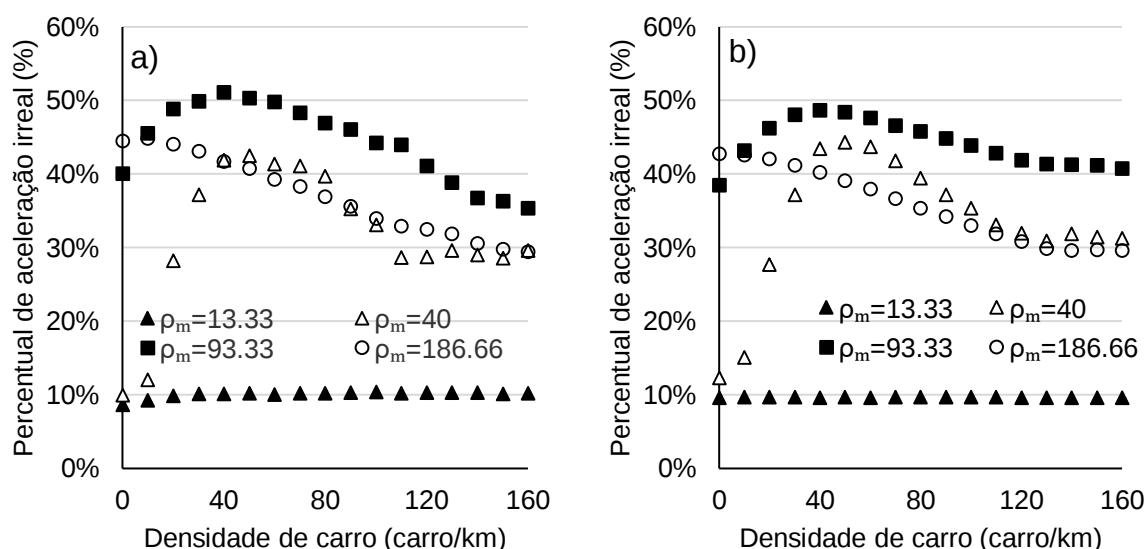
Figura 46 - Percentual de aceleração irreal para carros no a) AD1 e b) AD2



Fonte: O autor (2019).

Para as motocicletas não ocorre uma diferença tão grande em relação ao percentual de aceleração irreal entre AD1 e AD2, Figura 47. A partir de $\rho_c=120$ carros/km é possível visualizar diferenças em $\rho_m=40$ e $\rho_m=93,33$, porém as diferenças de AD2 em relação ao modelo AD1 são sempre menores que 15%.

Figura 47 - Percentual de aceleração irreal para motos a) AD1 e b) AD2



Fonte: O autor (2019).

5.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS: ANÁLISE MACROSCÓPICA

Nesta seção é realizada comparação entre os modelos através da diferença relativa média entre o modelo de comparação (AMC ou AD) e AMV em relação ao fluxo e economia de combustível por tipo de veículo. Os valores apresentados nas tabelas correspondem à média para determinada densidade de motocicletas considerando todas as densidades de carro e o respectivo desvio padrão.

O uso do AMC resultou em maiores diferenças na economia das motocicletas, contudo em valores mais baixos que os modelos discretos, Tabela 5. AD1 e AD2 apresentaram enormes diferenças na economia dos carros e motos, uma vez que a aceleração única é, na maioria dos casos, elevada para o motor dos veículos.

Tabela 5 - Diferença relativa média da economia dos carros e das motos por densidade de moto em relação ao AMV

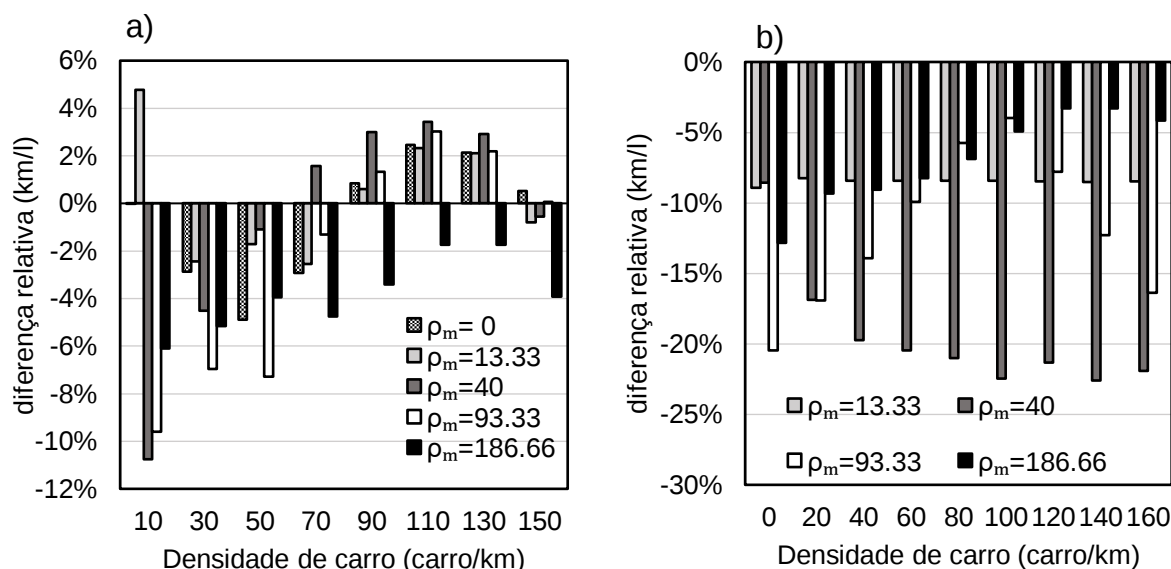
ρ_m	Tipo de veículo	$\Delta_{ECONOMIA} [\%]$		
		AMC	AD1	AD2
0,0	Carro	$-0,8 \pm 2,9$	$-30,1 \pm 14,0$	$-30,5 \pm 13,4$
13,33		$0,0 \pm 2,5$	$-29,4 \pm 15,1$	$-29,8 \pm 14,9$
40,0		$0,4 \pm 4,8$	$-35,5 \pm 12,0$	$-34,0 \pm 11,5$
93,3		$-2,0 \pm 4,6$	$-42,4 \pm 7,2$	$-40,9 \pm 5,7$
186,6		$-3,5 \pm 1,8$	$-45,8 \pm 4,4$	$-36,9 \pm 5,1$
13,33	Moto	$-8,4 \pm 0,1$	$-10,2 \pm 0,4$	$-9,9 \pm 0,1$
40,0		$-19,8 \pm 3,9$	$-33,7 \pm 8,4$	$-34,8 \pm 7,9$
93,3		$-11,5 \pm 5,0$	$-44,0 \pm 4,9$	$-43,7 \pm 1,4$
186,6		$-6,9 \pm 3,0$	$-39,7 \pm 3,8$	$-36,9 \pm 3,7$

Fonte: O autor (2019).

O impacto do motor na economia pode ser verificado no percentual de aceleração irreal e no desvio padrão da velocidade. As acelerações têm grande impacto na análise energética, pois representam um maior consumo de combustível. Quanto maior o desvio padrão da velocidade, maior a variação da velocidade na pista e, provavelmente, maior ocorrência de desaceleração e aceleração. Os modelos comparados possuem maior variação de velocidade em relação a VMA, principalmente em $\rho_m=40$ ou $\rho_m=93,33$, Apêndice A (Figura A5 e Figura A6), Apêndice B (Figura B5 e Figura B6) e Apêndice C (Figura C5 e Figura C6).

O percentual de aceleração irreal está diretamente ligado com a diferença relativa da economia, quanto maior esse percentual maior será essa diferença. Em geral, os carros têm um desempenho energético pior até 80 carros/km e melhor desempenho em densidades superiores na comparação entre AMC e AMV. A taxa de aceleração irreal para os carros sempre decresce com o aumento da quantidade de carros e, no geral, o AMC tem um pior desempenho em relação ao AMV enquanto a taxa de aceleração irreal for superior a 10%, Figura 48a.

Figura 48 - Diferença relativa média da economia de a) carros e de b) motos entre AMC e AMV por densidade de carro e moto

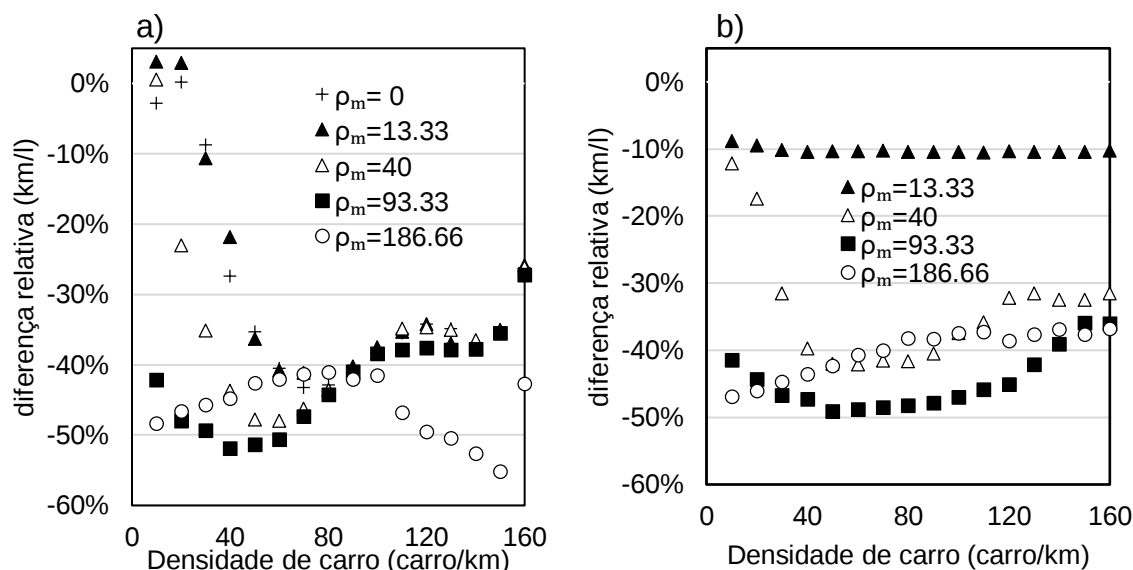


Fonte: O autor (2019).

O percentual de aceleração irreal também tem relação com a diferença relativa entre a economia das motos do AMC e AMV, porém de forma mais direta. As tendências observadas nas Figura 45b e Figura 48b para as densidade $\rho_m = 13,33$, $\rho_m = 93,33$ e $\rho_m = 186,66$ são as mesmas. Nota-se que em $\rho_m = 13,33$ a diferença relativa permanece estável e em $\rho_m = 93,33$ ou $\rho_m = 186,66$ uma queda ou aumento da diferença relativa significa um valor menor ou maior da percentual aceleração irreal.

A mesma análise pode ser realizada para os modelos discretos. As relações encontradas entre as diferenças relativas da economia (Figura 49) e o percentual de aceleração irreal para os carros não são diretas como para as motos. Observa-se que para os carros existe uma tendência de diminuição da diferença relativa da economia entre AD1 e AMV com a queda do percentual de aceleração irreal. Para as motocicletas um aumento ou decréscimo do percentual de aceleração irreal reflete diretamente na diferença relativa da economia.

Figura 49 - Diferença relativa média da economia entre AD1 e AMV para a) carros e b) motos



Fonte: O autor (2019).

Além disso, a forma que a aceleração irreal ocorre também influencia na diferença de economia entre os modelos. Na aceleração irreal as motocicletas dos modelos AMC e AD1 usam no mínimo 40% de energia a mais do que o motor dispõe, mas esse valor pode alcançar 300%, Apêndice A (Figura A15) e Apêndice B (Figura B15). Os carros usam uma potência 25% maior que a disponível no motor para densidades superiores a 80 carros/km, mas em condições de tráfego livre esse valor pode alcançar 70%, usando o AMC, Apêndice A (Figura A14). No AD1 esses valores correspondem a 45% e 290%, respectivamente, Apêndice B (Figura B14).

Macroscopicamente os modelos apresentam semelhanças nas curvas de fluxo para cada tipo de veículo, Apêndice A (Figura A1 e Figura A2), Apêndice B (Figura B1 e Figura B2) e Apêndice C (Figura C1 e Figura C2). Se gráficos de fluxo-densidade fossem colocados lado a lado, as diferenças seriam evidentes em magnitude, mas não em tendências. A diferença relativa do fluxo em relação ao AMV é no máximo 18,6%, com a maioria dos resultados sendo bem inferiores, Tabela 6. Essas diferenças estão dentro do erro mínimo de 15% a 25% que existe ao utilizar um modelo de tráfego para representar situação real (BROCKFELD; KÜHNE; WAGNER, 2004).

A aceleração também influencia a análise de tráfego, pois interfere na velocidade de cada veículo e nas mudanças de faixas das motocicletas. Foi verificado que AMC possui mais mudanças de faixa, principalmente para $\rho_m = 40$ e $\rho_m = 93,33$ de $\rho_c = 0$ até $\rho_c = 80$. A mudança de faixa ocorre menos em AD. No modelo discreto existe

uma tendência de ter menos motocicletas na faixa em que os carros trafegam a partir de $\rho_c=70$. Além disso, os modelos discretos apresentaram comportamentos distintos. Em AD1 cerca de 80 motos ocupam, em média, a faixa que os carros trafegam em $\rho_c=100$. Enquanto em AD2 existe em média 10 motocicletas para a mesma densidade de carros. Adicionalmente, AD1 possui mais motocicletas trafegando na faixa dos carros do que AD2 em $\rho_m=186,66$ a partir de $\rho_c=20$. Para essa densidade de motos existem em média 57 motocicletas a mais do que em AD2 considerando todas as densidades de carros, mas essa diferença pode chegar a 144 motocicletas em $\rho_c=120$. Essa diferença é visualizada na diferença relativa de fluxo e desvio padrão dos modelos discretos em $\rho_m=186$, Tabela 6.

Tabela 6 - Diferença relativa média do fluxo dos carros e das motos por densidade de moto em relação ao AMV

ρ_m	Tipo de veículo	$\Delta_{FLUXO} [\%]$		
		AMC	AD1	AD2
0,0	Carro	$1,8 \pm 1,2$	$6,5 \pm 6,0$	$2,7 \pm 4,6$
13,33		$1,9 \pm 1,1$	$6,7 \pm 5,6$	$2,8 \pm 5,1$
40,0		$0,3 \pm 4,6$	$10,1 \pm 7,2$	$6,4 \pm 6,6$
93,3		$3,4 \pm 2,5$	$18,6 \pm 11,2$	$15,6 \pm 11,0$
186,6		$2,2 \pm 2,5$	$0,3 \pm 14,8$	$15,7 \pm 8,4$
13,33	Moto	4.3 ± 0.1	$4,4 \pm 0,1$	$5,8 \pm 2,2$
40,0		8.9 ± 1.6	$4,1 \pm 3,9$	$-1,4 \pm 5,0$
93,3		6.2 ± 1.3	$0,8 \pm 5,3$	$-3,9 \pm 4,8$
186,6		5.2 ± 0.9	$6,1 \pm 1,6$	$-2,8 \pm 3,9$

Fonte: O autor (2019).

Os resultados da Tabela 6 evidenciam que em $\rho_m=186,66$ os modelos AD1 e AD2 tem comportamentos distintos. O modelo AD1 pode apresentar resultados semelhantes ao AD2 se utilizar as mesmas condições para mudança de faixa, isto é, considerar o sinal de igualdade na comparação entre as velocidades, Equação (18). O modelo com essa alteração nas condições de troca da faixa em AD1 será chamado de AD3. A diferença relativa máxima do fluxo de AD1 em relação ao AD2 é 46,0% para carros e 16,4% para as motos em $\rho_c=120$. Em AD3 é mesma comparação indica valores mais baixos, com erro relativo do fluxo de 13,8% e 9,9% para carros e motos, respectivamente. A diferença do valor médio de fluxo de carros do modelo AD2 em relação ao modelo AD1, que ocorre $\rho_m=186,66$, é reduzida com o modelo AD3, como mostrado na Tabela 7.

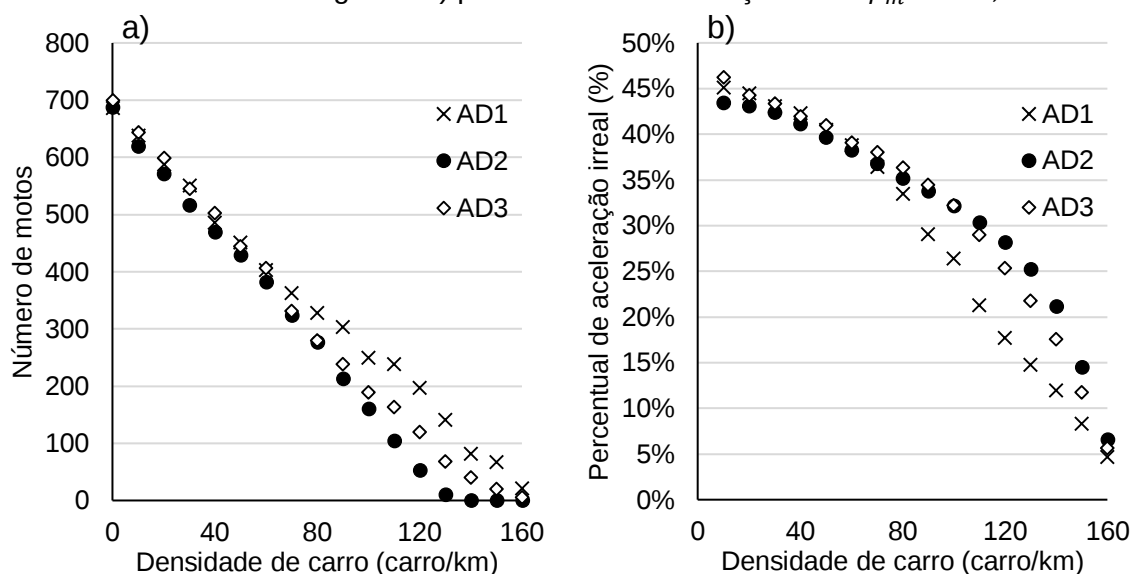
Tabela 7 - Diferença relativa média do fluxo dos carros e das motos por densidade de moto de AD2 em relação aos modelos AD1 e AD3

ρ_m	Tipo de veículo	$\Delta_{FLUXO} [\%]$	
		AD1	AD3
0,0	Carro	-3,4 $\pm$ 2,2	-3,4 $\pm$ 2,2
13,33		-3,6 $\pm$ 1,7	-3,6 $\pm$ 1,8
40,0		-3,3 $\pm$ 0,9	-3,5 $\pm$ 0,9
93,3		-2,5 $\pm$ 2,4	-3,1 $\pm$ 1,4
186,6		17,4 $\pm$ 16,9	4,5 $\pm$ 5,2
13,33	Moto	1,3 $\pm$ 2,1	1,3 $\pm$ 2,1
40,0		-5,3 $\pm$ 1,9	-4,9 $\pm$ 1,6
93,3		-4,7 $\pm$ 1,4	-4,4 $\pm$ 0,9
186,6		-8,3 $\pm$ 5,5	-5,8 $\pm$ 2,1

Fonte: O autor (2019).

A modificação nas condições de troca de faixa em AD1 resulta em menos motos trafegando, em média, na faixa em que os carros se deslocam em $\rho_m=186,66$, principalmente a partir de $\rho_c=70$ em valores que variam de 32 a 75 motos, Figura 50a. Apesar do modelo de troca de faixa de AD3 ser mais parecido com o modelo de AD2, o número de motos na faixa em que os carros trafegam ainda é mais baixo em AD2 a partir de $\rho_c=90$, Figura 50a. A menor quantidade de motos na faixa em que os carros se movimentam permite que em densidades mais elevadas, a partir de 90 carros/km, os carros tenham mais liberdade para trafegar. Isso contribui para que o percentual de aceleração irreal, que também representa o percentual de ocorrência de aceleração, sejam superiores em AD2 e AD3 se comparados com AD1, Figura 50b.

Figura 50 - Comparação entre AD1, AD2 e AD3 para a) número de motos na faixa em que os carros trafegam e b) percentual de aceleração irreal $\rho_m = 186,66$



Fonte: O autor (2019).

Também é importante destacar que simulações realizadas com o dobro de potência disponível no motor resultam em fluxo de veículos semelhantes entre AMV e AMC. Nessa situação a diferença relativa de fluxo, calculada pela média de todos os valores de densidade de carros em determinada densidade de motos, é no máximo 0,2% para os carros e 0,5% para as motos. Além disso, simulações realizadas com menor valor de aceleração máxima para as motocicletas ($1,5 \text{ m/s}^2$) resultaram em menores diferenças de fluxo entre AMV e AMC, Tabela 8.

Tabela 8 - Diferença relativa média por densidade de moto entre AMC e AMV para aceleração máxima das motos de $1,5 \text{ m/s}^2$

ρ_m	Tipo de veículo	$\Delta_{FLUXO} [\%]$	$\Delta_{ECONOMIA} [\%]$
0,0	Carro	$1,8 \pm 1,2$	$-0,8 \pm 2,9$
13,33		$1,7 \pm 1,1$	$-0,2 \pm 2,8$
40,0		$1,5 \pm 3,1$	$-1,3 \pm 4,0$
93,3		$0,8 \pm 1,3$	$-1,1 \pm 3,9$
186,6		$-0,1 \pm 0,4$	$0,2 \pm 0,5$
13,33	Moto	$3,8 \pm 0,1$	$-6,1 \pm 0,1$
40,0		$1,8 \pm 3,2$	$-7,8 \pm 1,0$
93,3		$0,4 \pm 0,5$	$-3,7 \pm 2,0$
186,6		$0,4 \pm 0,4$	$0,7 \pm 1,5$

Fonte: O autor (2019).

Os resultados obtidos evidenciam que para análise de fluxo a consideração explícita do motor não representa uma grande diferença no comportamento macroscópico dos veículos. Entretanto, o motor tem importante influência na análise energética, uma vez que está diretamente relacionado a capacidade do veículo acelerar. O valor de aceleração única em AD1 e AD2 é elevado e o motor não consegue disponibilizar energia em muitas situações (percentual de aceleração irreal). O AMC pode ter um desempenho energético semelhante a AMV desde que a aceleração máxima desejada pelo condutor tenha um valor coerentes com o veículo e velocidade máxima desejada.

5.4 ANÁLISE DA PERFORMANCE DE CARROS E MOTOS

A performance de um carro pode ser avaliada por critérios energéticos. O consumo energético em MJ/km e economia de combustível (km/l) são disponibilizados pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBE). Os valores do carro utilizado estão expostos na Tabela 9.

Tabela 9 - Valores de desempenho para FIAT PALIO 1.0

Modelo	Economia (Km/l)				Consumo Energético (MJ/km)	Emissão de CO ₂ com E22 (g/km)
	E22		E100			
	Cidade	Estrada	Cidade	Estrada		
Palio 1.0	12.2	15.4	8.0	10.01	1.65	99

Fonte: INMETRO (2013)

A eficiência máxima do motor foi definida como 0,45 para resultar em um consumo energético semelhante ao valor determinado pelo INMETRO, Tabela 10. Apesar da eficiência máxima ser elevada, durante o ciclo de condução ela é na média inferior a 25%. Deve-se destacar que, diferentemente da norma, na simulação o combustível usado é octano puro (E0) e que a troca de marcha ocorre de maneira a sempre garantir o maior torque possível.

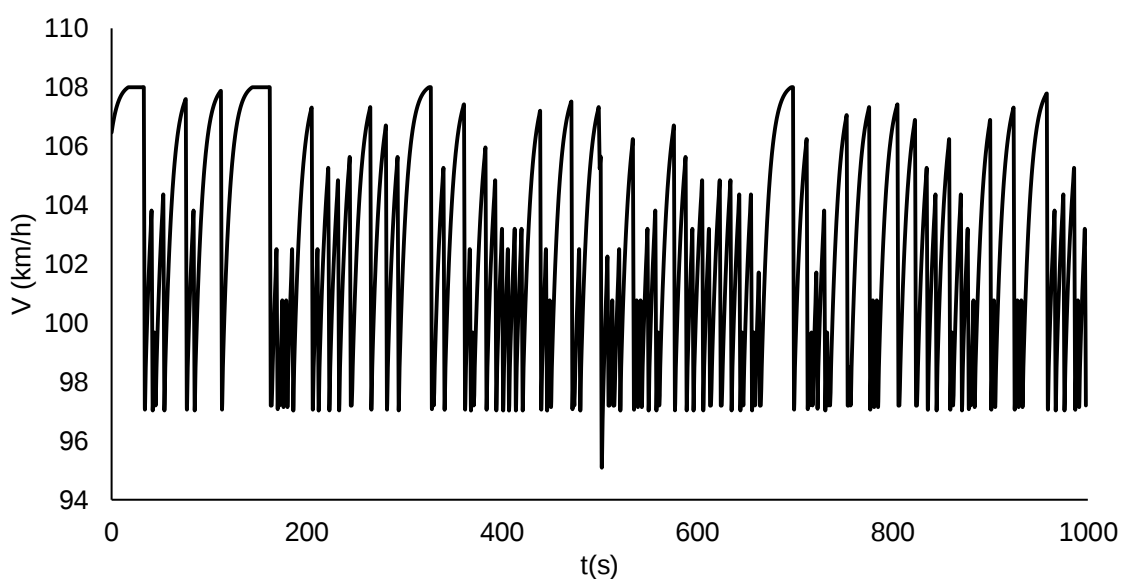
Tabela 10 - Consumo do carro por eficiência máxima do motor

η_{max}	η_{med}	Economia (Km/l)				Consumo Energético (MJ/km)
		E22		E100		
		Cidade	Estrada	Cidade	Estrada	
0,3	0,16	8,34	9,20	6,00	6,36	2,51
0,4	0,21	10,76	12,15	7,85	8,40	1,89
0.45	0.24	11.92	13.60	8.74	9.40	1.68

Fonte: O autor (2019).

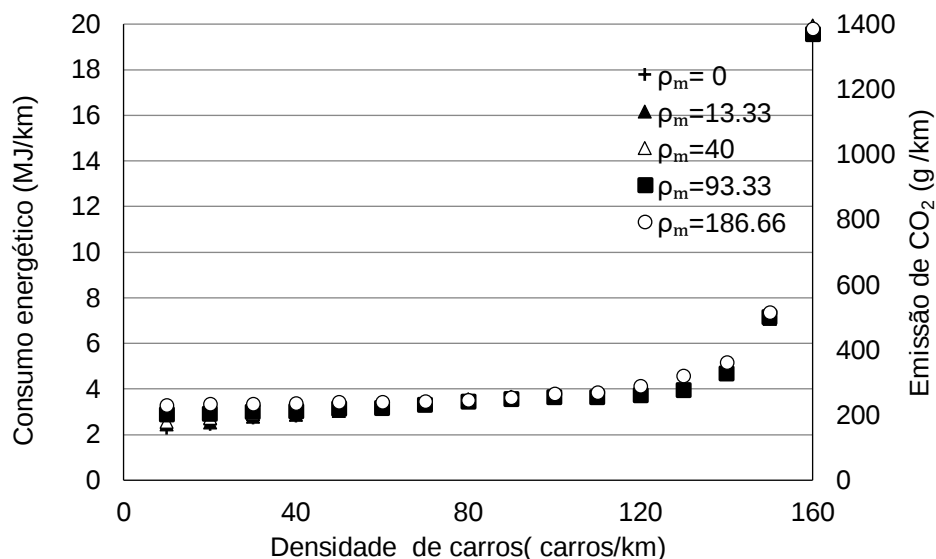
A eficiência do motor das motos foi determinada para resultar em uma economia próxima a 40 km/l em situação de tráfego livre na simulação, pois os valores para as motocicletas não são disponibilizados pelo INMETRO. Para isso foram utilizados dados de saída da simulação que correspondem à evolução da velocidade do tempo em $\rho_c=0$ e $\rho_m=13,33$, Figura 51. A eficiência máxima de 0,4 resulta em uma economia de 41,08 km/l, eficiência média de 0,32 e um consumo energético de 0,78 MJ/km.

Figura 51 - Ciclo de condução para um veículo em tráfego livre ($\rho_c=0$ e $\rho_m=13,33$)



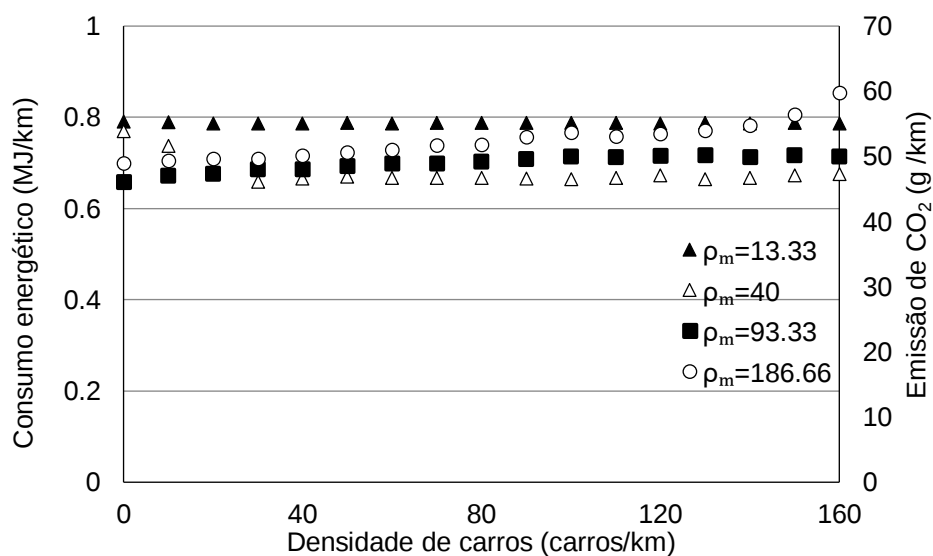
Fonte: O autor (2019).

Na Figura 52 estão expostos os valores médios dos consumos energéticos e emissões de CO₂ para os carros na pista e considerando a distância percorrida em quilômetros. Observa-se que para os carros a menor emissão de CO₂ ocorre em baixa densidade e com valor mínimo de 160 g/km, Figura 52. Em um estudo anterior, realizado com dinamômetro por Chan *et al.* (1995), foi verificado que um carro novo 1.0 de 1993 no ciclo FTP-75 emitia de 187 a 200 g/km e tinha economia de combustível entre 11 e 14 km/l. Contudo, o valor tabelado pelo PBE para emissão corresponde a 99 g/km com o uso de E22, Tabela 9.

Figura 52 - Consumo energético médio e emissão média de CO₂ para os carros na pista

Fonte: O autor (2019).

No estudo citado anteriormente também foi verificado que uma moto nova de 125 cc emitia aproximadamente 55 g/km no ciclo ECE. Nota-se que esse valor não é muito diferente dos resultados obtidos neste trabalho, Figura 53. Vasic e Weilenmann (2006) também fizeram medições em vários modelos de motocicletas a partir de um dinamômetro e verificaram que uma *scooter* de 125 cc emitia 44,0 g/km no ciclo Artemis urbano e 34,2 g/km no ciclo WMTC urbano.

Figura 53 - Consumo energético médio e emissão média de CO₂ para as motos na pista

Fonte: O autor (2019).

Os valores resultantes de emissão são coerentes com outros achados na literatura, contudo isso não significa que necessariamente está representando bem as diferentes condições de tráfego. Deve-se salientar que o combustível tem papel importante nesta análise. Os veículos neste trabalho foram simulados assumindo o uso de E0, enquanto os resultados do PBE representam a utilização de E22.

As diferenças entre os ciclos de condução citados estão na Tabela 11 e são importantes para avaliar as diferenças dos valores obtidos neste trabalho e os usados como referência. O consumo energético superior dos carros em comparação com os valores do PBE, pode ser explicado pelas acelerações do veículo. O consumo energético da Tabela 9 é uma média considerando o ciclo FTP-75 (cidade) e HWFET (estrada). Nota-se que nesses ciclos as acelerações e desacelerações média são baixas, Tabela 11.

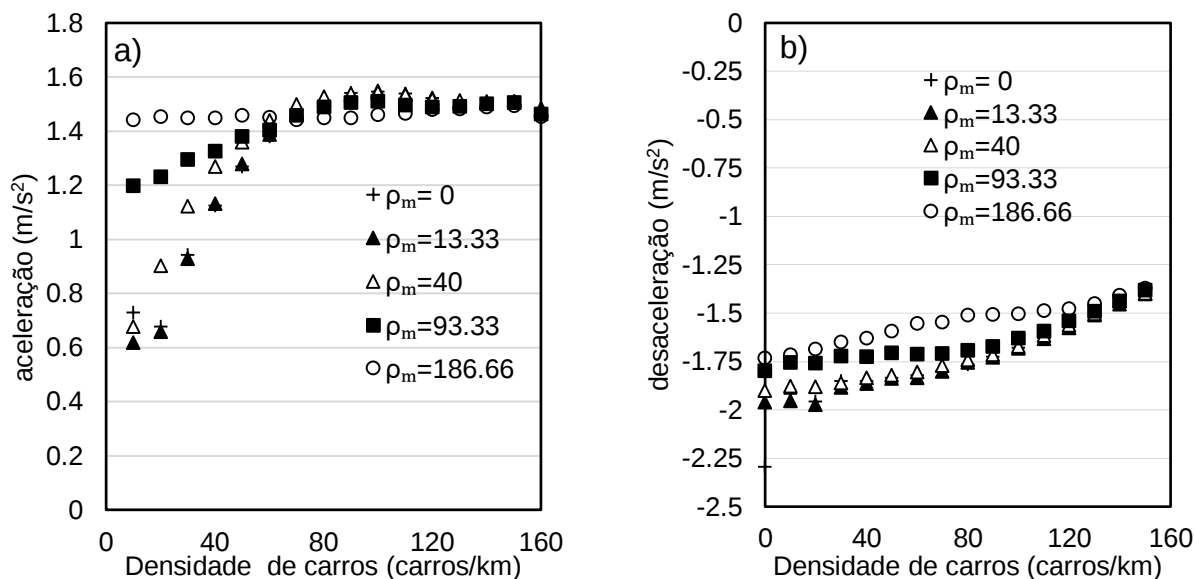
Tabela 11 - Diferenças entre os ciclos de condução

Ciclo	Velocidade Máxima (km/h)	Velocidade média (km/h)	Aceleração positiva média (m/s ²)	Desaceleração média (m/s ²)
FTP-75	91,1	34,2	0,42	-0,46
HWFET	96,3	77,7	0,16	-0,18
WMTC Urbano	60,0	24,4	0,44	-0,50
Artemis Urbano	57,3	17,6	0,52	-0,57
ECE	50,07	18,4	0,35	-0,39
Moto em tráfego livre ($\rho_c=0$ e $\rho_m=13,33$)	108,0	102,7	0,25	-0,42

Fonte: Barlow (2009)

Na simulação os carros e motos têm um comportamento mais agressivo tanto na aceleração quanto na desaceleração em relação aos ciclos de condução, Figura 54 e Figura 55. Para os carros, isso resultou em maior consumo energético por quilometro se comparado com o valor tabelado de referência. Porém, para a maioria das situações a economia de combustível está próximo aos valores disponibilizados pelo INMETRO, isto é, entre 8,6 e 14,0 km/l, Figura 43a.

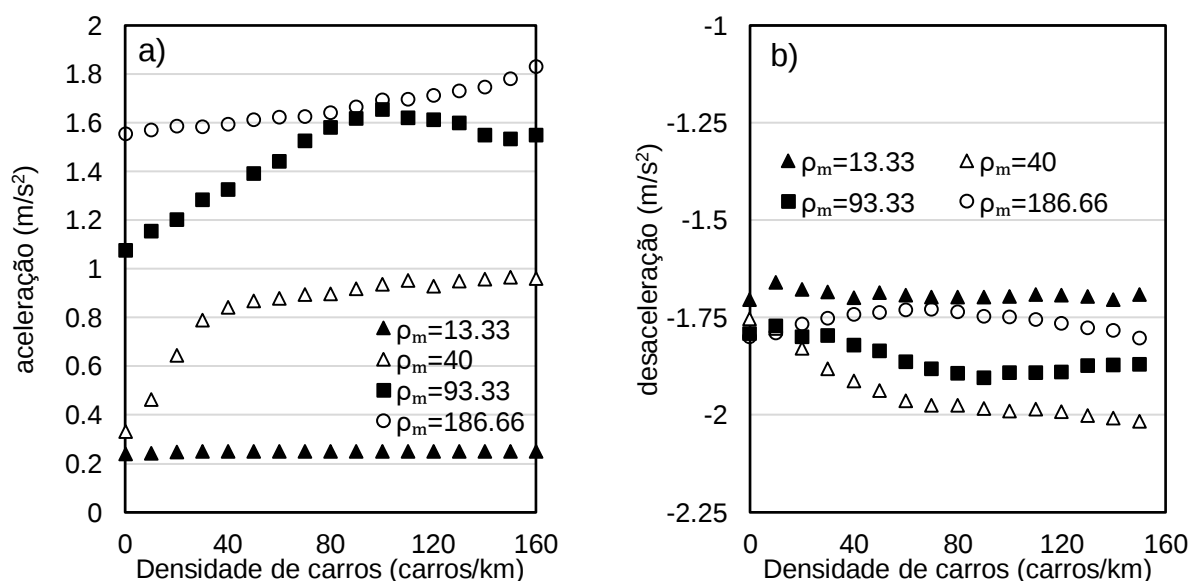
Figura 54 - a) aceleração média positiva e b) desaceleração dos carros por densidade de veículos.



Fonte: O autor (2019).

A massa do conjunto veículo-condutor dos carros corresponde a 5,7 vezes a massa da moto. Além disso o coeficiente aerodinâmico dos carros foi assumido como 1,8 vezes maior que o da moto. Assim, os carros necessitam de uma maior potência para acelerar, como também para vencer as resistências aerodinâmicas, justificando a menor economia dos carros em comparação com as motos.

Figura 55 - a) aceleração média positiva e b) desaceleração das motos por densidade de veículos



Fonte: O autor (2019).

As motocicletas apresentam pior desempenho energético nas situações de tráfego livre, $\rho_m=13,33$. Nessa densidade o valor da velocidade média das motocicletas (102 km/h) é próximo ao limite que pode ser alcançado para o modelo de motocicleta simulada (110 km/h). Em todas as outras condições de tráfego as motocicletas apresentaram velocidades médias mais baixas, acelerações mais altas e maior economia de combustível. Se os carros trafegassem com velocidade média próxima ao valor máximo possível (160 km/h) em condições com liberdade para trafegar, como em $\rho_m=0$ e $\rho_c=10$, os carros teriam valores mais baixos de economia (11,4 km/l) em comparação com o resultado obtido (14,2 km/l, Figura 43a) para a mesma combinação de densidade de veículos.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi proposto um modelo de simulação de tráfego microscópico contínuo no espaço que integra submodelo de tráfego, veículo e consumo. O modelo proposto tem como diferencial a modelagem do motor e dinâmica veicular para determinar o movimento dos veículos. Esse modelo, chamado de Modelo de Aceleração Máxima Variada (AMV), foi comparado com outros modelos em que o tráfego é normalmente simulado, sem contabilizar o motor e a dinâmica veicular explicitamente para acelerar. Os modelos usados para comparação são: Modelo de Aceleração Máxima Constante (AMC) e Modelo de Aceleração Discreta (AD). AD é discreto no espaço e foi implementado de duas maneiras, AD1 e AD2. O AMC possui o mesmo submodelo de tráfego de AMV.

O modelo AMV conseguiu capturar a relação fundamental do tráfego juntamente com valores adequados de economia. Ainda que o modelo não tenha passado por um processo de calibração, seus parâmetros foram baseados em valores encontrados na literatura. Adicionalmente, o modelo apresentou resultados de fluxo coerentes com estudos anteriores, como o estudo de Meng *et al.* (2007) que utiliza a mesma pista. Além disso, uma análise da pista do ponto de vista energético mostrou que os maiores valores de consumo energético ocorriam na densidade crítica para o fluxo de carros.

Nos modelos AMC, AD1 e AD2 foi verificado um alto percentual de aceleração irreal. Em AMC esse percentual chega a 35%, mas reduz rapidamente para valores inferiores a 10%. Em AD1 e AD2 o percentual de aceleração irreal alcança 50% e apresenta uma queda mais lenta que AMC. Todos os modelos usados para comparação apresentaram valores de percentual de aceleração irreal para motos superiores a 10%.

Os valores máximos de aceleração no modelo AMV só podem ser alcançados em uma faixa restrita de velocidade segundo as limitações impostas pelo veículo. Na comparação entre os modelos, o modelo AMC resultou em menores diferenças relativas da economia em relação ao AMV. Os carros possuíram diferenças insignificantes, inferiores a 3,5%. Para as motos os efeitos são maiores, mas as diferenças relativas médias da economia são no máximo 19,8%. Esse valor pode ser reduzido com parâmetros de entrada mais apropriados, como o aumento da potência máxima ou redução

da aceleração máxima. Os modelos discretos apresentaram diferenças mais significativas em relação ao AMV, maiores que 30%. A menor economia dos modelos discretos era esperada pois a aceleração ocorre de forma única e tem valor muito elevado, 3 m/s^2 .

O percentual de aceleração irreal tem relação com o valor da diferença relativa da economia. Para as motocicletas essa associação é mais clara, pois a maior ocorrência de aceleração irreal resulta em uma menor economia de combustível de maneira que os dois parâmetros apresentam tendências semelhantes com o aumento de densidade de carros.

As curvas de fluxo densidade dos quatro modelos são muito semelhantes, mas existem diferenças nos valores de fluxo de carros e motos. Na maioria dos casos, a diferença relativa entre os fluxos veículos em relação a AMV são inferiores a 10%. Se a aceleração máxima desejada pelo piloto das motocicletas fosse $1,5 \text{ m/s}^2$ as diferenças médias de fluxo entre AMC e AMV seriam sempre inferiores a 4%.

A modelagem do motor e dinâmica veicular representou maior relevância na análise energética do que na análise de tráfego. O modelo AMC também pode representar bem as limitações do motor desde que os parâmetros de entrada correspondam ao veículo utilizado.

A análise da performance do veículo mostrou que os modelos de carros e motos juntamente com o modelo de consumo resultaram em valores de emissão de dióxido de carbono coerentes, em ordem de grandeza, com a literatura. Além disso, os carros apresentam valores de economia de combustível que estão próximos ao PBE, entre 8 e 14 km/l para maioria das situações. Os valores de consumo de combustível para as motos foram mais elevados e com menor economia em situação de mais alta velocidade.

Tanto o AMV como AMC necessitam de um aperfeiçoamento para melhor caracterização do condutor, uma vez que na maioria dos casos ele tenta alcançar a maior velocidade desejada com a maior aceleração possível. Também é necessário melhor caracterizar o fator de massa a partir de dados reais, pois quanto menor a marcha maior sua magnitude. Maiores fatores de massa em velocidades mais baixas podem diminuir significativamente a aceleração máxima e aumentar as diferenças entre outros modelos em relação AMV. O modelo do movimento para motos também pode ser melhorado, pois não é levada em conta a perda de aderência nas rodas traseiras e dianteiras durante a aceleração e frenagem.

O aperfeiçoamento do AMV pode resultar em uma alternativa aos métodos experimentais (ciclos de condução) utilizados para avaliar a emissão de dióxido de carbono e consumo de combustível dos veículos nacionais. Destaca-se que o modelo proposto tem o diferencial de possibilitar a simulação de veículos vendidos no mercado brasileiro em tráfego (o submodelo do motor apenas depende de informações fornecidas no manual do veículo). O AMV também pode ser usado para diferentes estudos, como:

- Representação real do tráfego (simulação com calibração);
- Avaliação dos ciclos de condução utilizados para representar o tráfego do Brasil;
- Influência de semáforos, quantidade de faixas e pista com faixas de acesso e saída no fluxo e análise energética;
- Impacto de carros elétricos no consumo de combustível e emissão de CO₂;
- Análise energética e de tráfego com ônibus e faixas exclusivas para transporte coletivo;
- impacto de motos de baixa cilindrada, com 50cc, no tráfego; e
- Impacto de veículos autônomos no fluxo e consumo de combustível.

REFERÊNCIAS

- ANTP. **Sistema de Informações da Mobilidade Urbana da Associação Nacional de Transportes Público - Simob/ANTP**. p. 110, 2018.
- 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.
- ARAÚJO, F. W. C. DE. **Análise do Tráfego Misto de Motocicletas e Automóveis Considerando uma Variedade de Métricas , Escalas e Pontos de Vista**. p. 100, 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), UFPE, Recife, 2017.
- ASADI, S. et al. Autonomous vehicles: challenges , opportunities , and future implications for transportation policies. **Journal of Modern Transportation**, v. 24, n. 4, p. 284–303, 2016.
- ASAITHAMBI, G. et al. Study of traffic flow characteristics using different vehicle-following models under mixed traffic conditions. **Transportation Letters**, v. 10, n. 2, p. 92–103, 2018.
- ASIMOV, I. **Fundação**. São Paulo: Aleph, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 1585: Veículos rodoviários - Código de ensaio de motores - Potência líquida efetiva**Rio de Janeiro, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7024: Veículos rodoviários automotores leves - Medição do consumo de combustível - Método de ensaio**Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6601: Veículos rodoviários automotores leves - Determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono e material particulado no gás de escapamento**., 2012.
- BARCELÓ, J. **Fundamentals of Traffic Simulation**. Springer, 2010.
- BARLOW, T. J. **A Reference Book of Driving Cycles for Use in the Measurement of Road Vehicle Emissions**. IHS, 2009.
- BEN-CHAIM, M.; SHMERLING, E.; KUPERMAN, A. Analytic modeling of vehicle fuel consumption. **Energies**, v. 6, n. 1, p. 117–127, 2013.
- BOULTER, P. G.; MCCRAE, I. S.; BARLOW, T. J. **A review of instantaneous emission models for road vehicles**. 2007.
- BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Resolução CONAMA Nº 432, de 13 de julho de 2011**. Estabelece novas fases de controle de emissões de gases poluentes por ciclomotores, motocicletas e veículos similares novos, e dá outras providências.
- BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **PROCONVE: PROGRAMA DE CONTROLE DE POLUIÇÃO DO AR POR VEÍCULOS AUTOMOTORES**. 2013. Disponível em:

<[http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80060/Arquivos/PROCONVE_atualizado em 21nov13.pdf](http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80060/Arquivos/PROCONVE_atualizado_em_21nov13.pdf)>. Acesso em: 28 nov. 2018a.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **PROMOT - PROGRAMA DE CONTROLE DA POLUIÇÃO DO AR POR MOTOCICLOS E VEÍCULOS SIMILARES**. 2013. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/163/_arquivos/promot_163.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2018b.

BROCKFELD, E.; KÜHNE, R.; WAGNER, P. Calibration and Validation of Microscopic Traffic Flow Models. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1876, n. 1876, p. 62–70, 2004.

BRUNETTI, F. **Motores de combustão Interna - Volume 1**. p. 160, 2012.

CAPPIELLO, A. Modeling Traffic Flow Emissions. 2002. Dissertação (Mestrado em Science in Transportation), Massachusetts Institute of Technology, 2002.

CENGEL, YUNUS A.; BOLES, M. A. **Thermodynamics: An Engineering Approach**. 5. ed. McGraw-Hill Science, 2005.

CIUFFO, B.; PUNZO, V.; MONTANINO, M. Thirty Years of Gipps' Car-Following Model. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2315, n. December, p. 89–99, 2012.

COSSALTER, V. **Motorcycle dynamics**. 2. ed. LULU, 2006.

DENATRAN. **Frota de Veículos - 2018**. Disponível em: <<https://www.denatran.gov.br/estatistica/635-frota-2018>>. Acesso em: 5 set. 2018.

DETRAN-PE. **Estatísticas Atuais**. Disponível em: <http://www.detran.pe.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=36&Itemid=72>. Acesso em: 5 set. 2018.

FAIZ, A.; WEAVER, C. S.; WALSH, M. P. **Air pollution from motor vehicles**. The World Bank, 1996. v. 136

FHWA. **Table MV-1 - Highway Statistics 2016 - Policy | Federal Highway Administration**. Disponível em: <<https://www.fhwa.dot.gov/policyinformation/statistics/2016/mv1.cfm>>. Acesso em: 5 set. 2018.

FONTARAS, G.; ZACHAROF, N. G.; CIUFFO, B. Fuel consumption and CO₂ emissions from passenger cars in Europe – Laboratory versus real-world emissions. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 60, p. 97–131, 2017.

GARCIA NETO, P. D. **Estudo Computacional do Tráfego Misto de Motocicletas e Automóveis**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), UFPE, Recife, 2014.

GENTA, G. **Motor vehicle dynamics: modeling and simulation**. World Scientific, 1997.

GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. SAE, 1992.

GIPPS, P. G. A behavioural car-following model for computer simulation. **Transportation Research Part B**, v. 15, n. 2, p. 105–111, 1981.

- GIPPS, P. G. A model for the structure of lane-changing decisions. **Transportation Research Part B**, v. 20, n. 5, p. 403–414, 1986.
- HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. McGraw-Hil, 1988.
- HOAG, K. L. **Vehicular Engine Design (Powertrain)**. 1. ed. Springer, 2006.
- HUCHO, W. (ED.). **Aerodynamik des Automobils: Strömungsmechanik, Wärmetechnik, Fahrdynamik, Komfort**. 5. ed. Springer-Verlag, 2005.
- HEMA. **EVOLUÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO BRASIL (1990-2013) SETOR DE ENERGIA E PROCESSOS INDUSTRIAIS**. 2015. Disponível em: <https://s3-sa-east-1.amazonaws.com/seeg.tracersoft.com.br/wp-content/uploads/2015/08/energia_industria_2015.pdf>. Acesso em: 8 jun. 2016.
- INMETRO. **Portaria Nº 010/2012**, 2012.
- INMETRO. **Tabelas de Consumo/Eficiência Energética: Veículos Automotores Leves**. 2013. Disponível em: <www.inmetro.gov.br>. Acesso em: 30 nov. 2018.
- INMETRO. **Portaria Nº 285/2015**, 2015.
- JACONDINO, G. B. **QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSÕES VEICULARES ATRAVÉS DO USO DE SIMULADORES DE TRÁFEGO**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção), UFRGS, Porto Alegre, 2005.
- JACONDINO, G. B.; CYBIS, H. B. B. Análise do efeito da agregação das variáveis do tráfego na estimativa de emissões veiculares. in: III Semana de Engenharia de Produção e Transportes, 2003, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: UFRGS, 2003. Disponível em: <http://www.producao.ufrgs.br/arquivos/publicacoes/art_cybis18.pdf>
- KAMAKATÉ, F.; GORDON, D. **Managing Motorcycles: Opportunities to Reduce Pollution and Fuel Use from Two-and Three-Wheeled Vehicles**. 2009. Disponível em: <www.theicct.org>. Acesso em: 5 set. 2018.
- KANAGARAJ, V. et al. Evaluation of Different Vehicle Following Models Under Mixed Traffic Conditions. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 104, p. 390–401, 2013.
- KERNER, B. S. Three-phase traffic theory and highway capacity. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 333, n. 1–4, p. 379–440, fev. 2004.
- KERNER, B. S. **Breakdown in Traffic Networks: Fundamentals of Transportation Science**. Springer, 2017.
- KESTING, A.; TREIBER, M.; HELBING, D. General Lane-Changing Model MOBIL for Car-Following Models. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1999, n. 1, p. 86–94, 22 jan. 2007.
- KRAUSS, S. **Microscopic modeling of traffic flow: Investigation of collision free vehicle dynamics**. 1998.
- KÜHLWEIN, J. Driving Resistances of Light-Duty Vehicles in Europe: Present Situation, Trends and Scenarios for 2025. **The International Council on Clean Transportation (ICCT)**, 2016.
- LONG, G. Acceleration characteristics of starting vehicles. **Transportation Research**

Record, v. 1737, n. 00, p. 58–70, 2000.

LUO, Y. et al. Modeling the interactions between car and bicycle in heterogeneous traffic. **Journal of Advanced Transportation**, v. 49, n. 1, p. 29–47, jan. 2015.

MAGNANI, F. S.; CUNHA, S. DOS S. Estudo da dinâmica das motocicletas em frenagens e curvas: O efeito da técnica do piloto e da condição da estrada. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 39, n. 2, fev. 2017.

MAGNANI, F. S.; DE ANDRADE, G. M. S.; WILLMERSDORF, R. B. Influence of mathematical simplifications on the dynamic and energetic performance of an engine/motorcycle integrated model. **International Journal of Mechanical Engineering Education**, v. 46, n. 2, p. 138–157, abr. 2018.

MARTINS, J. **Motores de combustão interna**. PUBLINDÚSTRIA, 2013.

MARTYR, A. J.; PLINT, M. A. **Engine Testing**. Wiesbaden: Elsevier, 2007. v. 89

MATHEW, T.; RAVISHANKAR, K. Car-following behavior in traffic having mixed vehicle-types. **Transportation Letters**, v. 3, n. 2, p. 109–122, 2011.

MENG, J. et al. Cellular automaton model for mixed traffic flow with motorcycles. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 380, p. 470–480, 2007.

MORAN, M. J. et al. **Fundamentals of engineering thermodynamics**. 7. ed. John Wiley & Sons, 2010.

NAGEL, K.; SCHRECKENBERG, M. A cellular automaton model for freeway traffic. **Journal de Physique I**, v. 2, n. 12, p. 2221–2229, dez. 1992.

NETO LEÃO, J. P. **Coexistência de Fases Induzida por um Mecanismo de Direção Defensiva em um Modelo de Autômato Celular para Fluxo de Tráfego**. UFAL, 2011.

NI, D. **Traffic flow theory: Characteristics, experimental methods, and numerical techniques**. Butterworth-Heinemann, 2015.

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.

OMS. **World report on road traffic injury prevention**. 2004. Disponível em: <http://www.who.int/violence_injury_prevention/publications/road_traffic/world_report/en/>.

OMS. **Global status report on road safety 2018**. Disponível em: <https://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/2018/en/>.

PAN, W. et al. Impacts of traffic congestion on fuel rate, dissipation and particle emission in a single lane based on Nasch Model. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 503, p. 154–162, 2018.

PANDE, A.; WOLSHON, B. **Traffic Engineering Handbook**. John Wiley & Sons, Inc, 2016.

PARK, M. J. **Three phase traffic theory**. 2012.

PARK, S.; LEE, J.; LEE, C. State-of-the-art automobile emissions models and

applications in North America and Europe for sustainable transportation. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 20, n. 3, p. 1053–1065, 12 abr. 2016.

RAKHA, H. A. et al. Simple vehicle powertrain model for modeling intelligent vehicle applications. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 13, n. 2, p. 770–780, 2012.

RAKHA, H. A. **User's Guide – Volume I: Fundamental Model Features**. v. I, n. 613, 2015a.

RAKHA, H. A. **User's Guide-Volume II: Advanced Model Features**. v. II, n. 613, 2015b.

RANJITKAR, P.; NAKATSUJI, T.; ASANO, M. Performance Evaluation of Microscopic Traffic Flow Models with Test Track Data. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1876, p. 90–100, 2004.

RICARDO SILVA, A.; ALVES DA SILVA, T. DE A. O DESEMPREGO E O MOTOTAXISMO NO MUNICÍPIO DE MORENO-PE. p. 39–61, 2013.

RICHARD VAN BASSHUYSEN, F. S. **Internal Combustion Engine Handbook**. SAE, 2002.

ROESS, R. P.; PRASSAS, E. S. **The Highway Capacity Manual: A Conceptual Research History. Volume 1: Concepts**. Springer, 2014.

SAMARAS, C. et al. Improving fuel consumption and CO₂ emissions calculations in urban areas by coupling a dynamic micro traffic model with an instantaneous emissions model. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 65, p. 772–783, 2018.

SANTOS, M. P. M. DE N. **Análise Computacional do Fluxo de Motocicletas e Automóveis Através de um Modelo Microscópico Contínuo**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica), UFPE, Recife, 2017.

SATIENNAM, T. et al. Development of on-road exhaust emission and fuel consumption models for motorcycles and application through traffic microsimulation. **Journal of Advanced Transportation**, v. 2017, 2017.

SEEDAM, A. et al. Motorcycle on-road driving parameters influencing fuel consumption and emissions on congested signalized urban corridor. **Journal of Advanced Transportation**, v. 2017, 2017.

SHARMA, N. et al. Fuel Loss and Related Emissions Due to Idling of Motorized Vehicles at a Major Intersection in Delhi. In: SINGH, V. P.; YADAV, S.; YADAVA, R. N. (Eds.). **Environmental Pollution**. Water Science and Technology Library. Singapore: Springer Singapore, 2018. v. 77p. 233–241.

SILVA, P. C. M. **Apostila: Teoria do Fluxo**. UNB, 2007.

SO, J. (JASON) et al. Estimating emissions based on the integration of microscopic traffic simulation and vehicle dynamics model. **International Journal of Sustainable Transportation**, v. 12, n. 4, p. 286–298, 2018.

SOUSA, N.; ALMEIDA, A.; NATIVIDADE-JESUS, E. Dawn of autonomous vehicles: review and challenges ahead. **Proceedings of the ICE-Municipal Engineer**, 2017.

STERN, R. E. et al. Quantifying air quality benefits resulting from few autonomous vehicles stabilizing traffic. **Transportation Research Part D**, v. 67, p. 351–365, 2019.

SUGIYAMA, Y. et al. Traffic jams without bottlenecks-experimental evidence for the physical mechanism of the formation of a jam. **New Journal of Physics**, v. 10, 2008.

TABOREK, J. J. **Mechanics of vehicles**. 1957.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD NATIONAL RESEARCH COUNCIL (TRB). **HIGHWAY CAPACITY MANUAL**. 2000.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD NATIONAL RESEARCH COUNCIL (TRB). **Highway Capacity Manual. Vol 1: Concepts**. 2010.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD NATIONAL RESEARCH COUNCIL (TRB). **The Highway Capacity Manual. Volume 2: Uninterrupted Flow**. 2010.

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, 1 ago. 2000.

TREIBER, M.; KESTING, A. **Traffic Flow Dynamics**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.

TREIBER, M.; KESTING, A.; THIEMANN, C. How much does traffic congestion increase fuel consumption and emissions? Applying a fuel consumption model to the NGSIM trajectory data. **87th Annual Meeting of the Transportation Research Board**, 2008.

TSOKOLIS, D. et al. Fuel consumption and CO₂ emissions of passenger cars over the New Worldwide Harmonized Test Protocol. **Applied Energy**, v. 179, p. 1152–1165, 2016.

U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. **Next Generation Simulation (NGSIM) Vehicle Trajectories and Supporting Data**. Disponível em: <<https://data.transportation.gov>>. Acesso em: 10 set. 2018.

VAN WAGENINGEN-KESSELS, F. et al. Genealogy of traffic flow models. **EURO Journal on Transportation and Logistics**, v. 4, n. 4, p. 445–473, 2 dez. 2015.

VASIC, A. M.; WEILENMANN, M. Comparison of real-world emissions from two-wheelers and passenger cars. **Environmental Science and Technology**, v. 40, n. 1, p. 149–154, 2006.

VIGOLO, S. M. A. H. **Sistematização de dados de tráfego para aplicação do software HBEFA 3.1 na elaboração de um inventário local de emissões veiculares: bairro Rebouças - município de Curitiba/PR**. UFPR, 2013.

WONG, J. Y. **Theory of Ground Vehicles**. John Wiley & Sons, Inc, 2001.

XU, X. et al. Estimating Project-Level Vehicle Emissions with Vissim and MOVES-Matrix. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2570, p. 107–117, 2016.

ZHENG, J.; SUZUKI, K.; FUJITA, M. Evaluation of Car-following Models Using Trajectory Data from Real Traffic. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 43, p. 356–366, 2012.

APÊNDICE A: RESULTADOS DO MODELO DE ACELERAÇÃO MÁXIMA CONSTANTE (AMC)

Este apêndice contém todos os resultados obtidos para AMC. Primeiramente todos os resultados de tráfego são apresentados por tipo de veículo em função da densidade de carros: fluxo, velocidade média, desvio padrão da velocidade, percentual de mudança de faixa e percentual da frota de motos na faixa em que os carros trafegam. Posteriormente são expostos os resultados energéticos, como: economia para cada tipo de veículo, consumo total de combustível por quilômetro da pista, consumo de combustível por quilômetro percorrido para cada tipo de veículo e percentual de uso de potência disponível no motor para cada tipo de veículo.

Figura A1 - Fluxo de carros

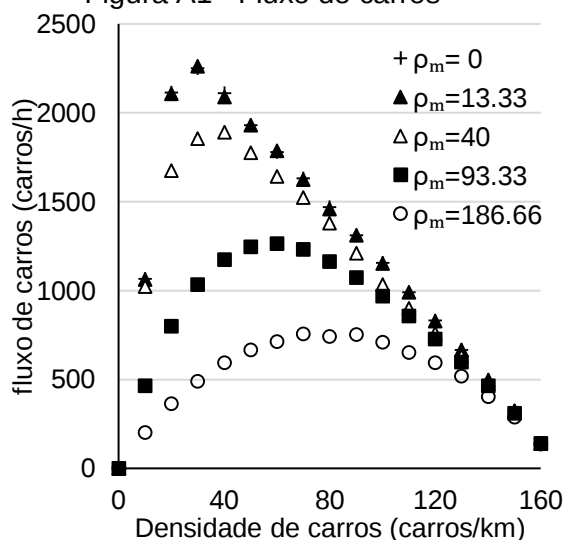


Figura A2 - Fluxo de motos

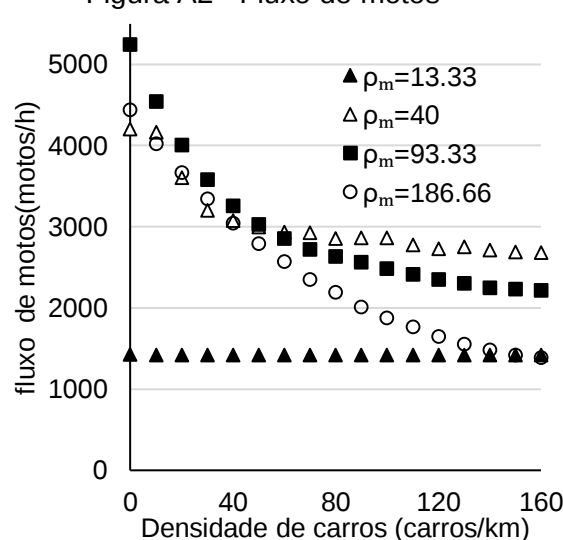


Figura A3 - Velocidade média dos carros

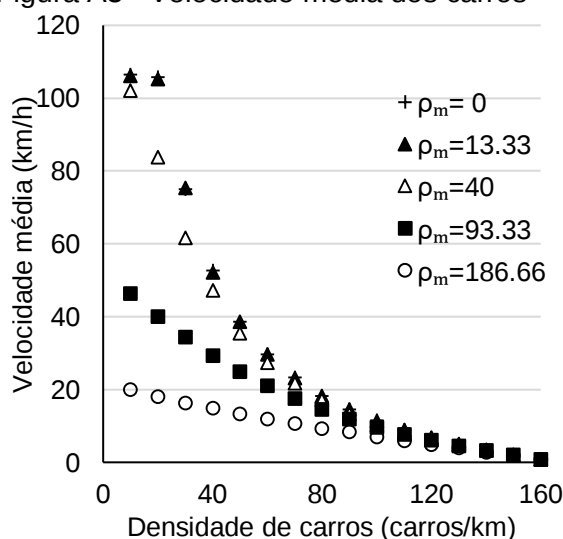


Figura A4 - Velocidade média das motos

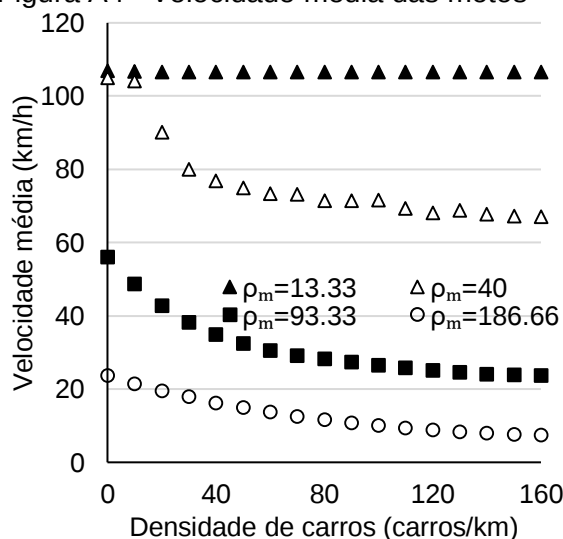
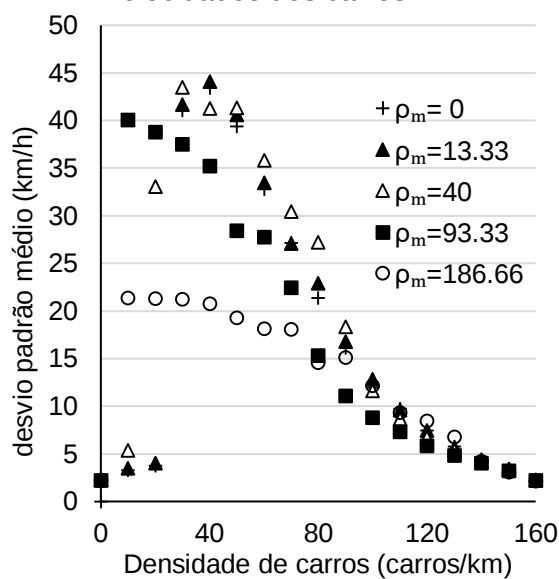
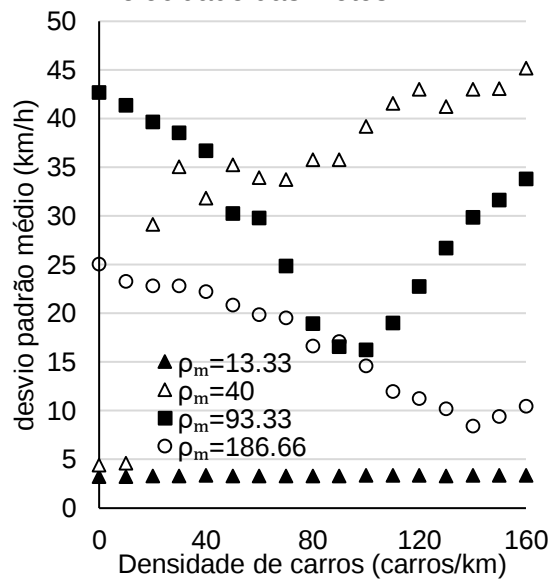


Figura A5 - Desvio padrão das velocidades dos carros



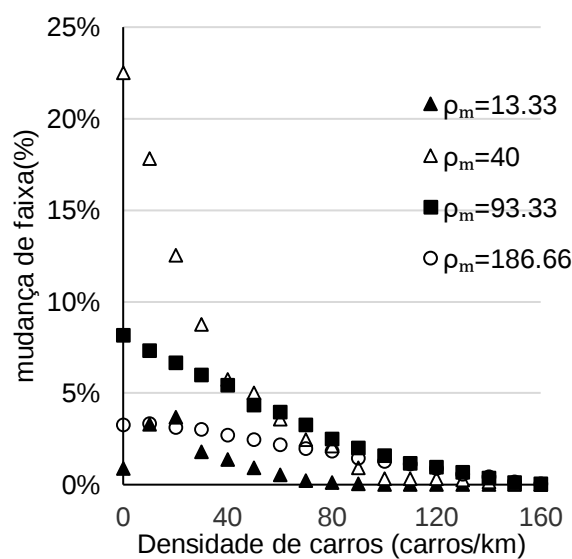
Fonte: O autor (2019).

Figura A6 - Desvio padrão da velocidade das motos



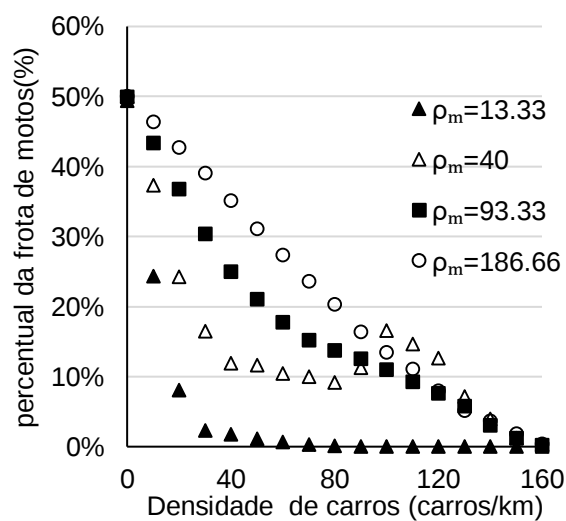
Fonte: O autor (2019).

Figura A7 - Percentual de mudança de faixa das motos



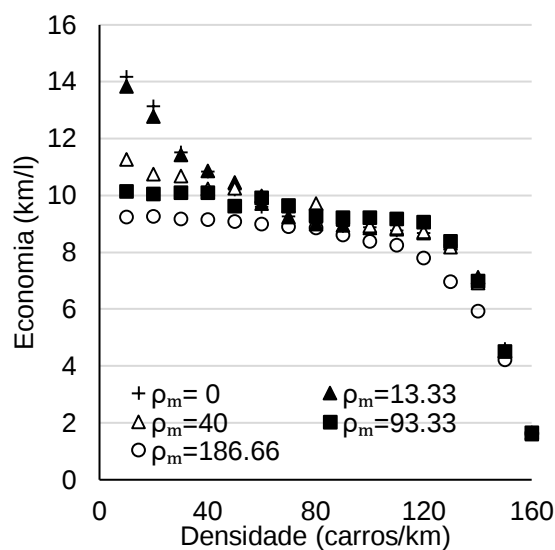
Fonte: O autor (2019).

Figura A8 - Percentual da frota de motos que trafega na faixa dos carros



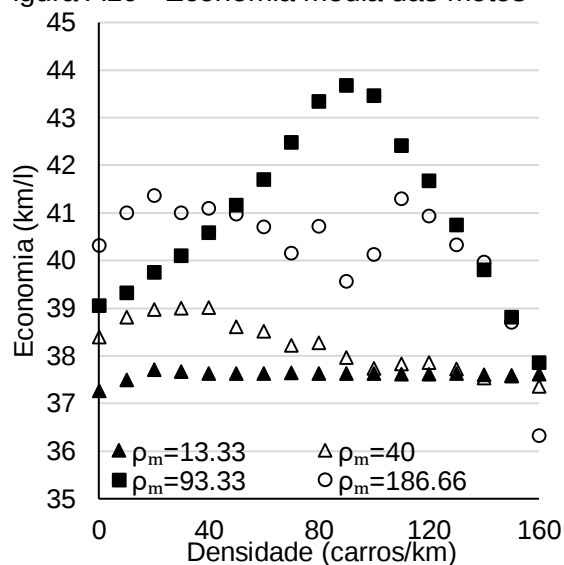
Fonte: O autor (2019).

Figura A9 - Economia média dos carros

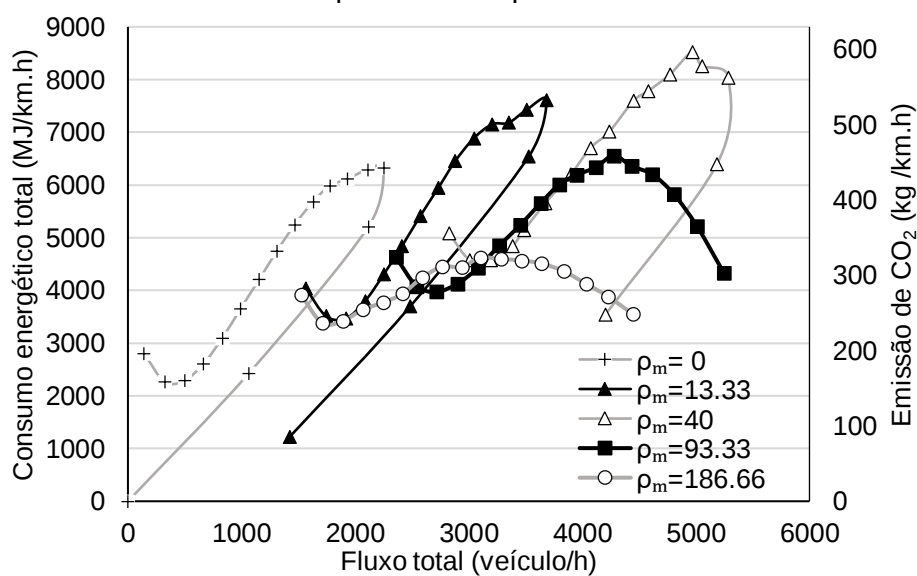


Fonte: O autor (2019).

Figura A10 - Economia média das motos



Fonte: O autor (2019).

Figura A.11 - Consumo energético total e emissão de CO₂ (carros e motos) por quilometro da pista

Fonte: O autor (2019).

Figura A.12 - Consumo energético médio e emissão média de CO₂ dos carros por quilômetro percorrido

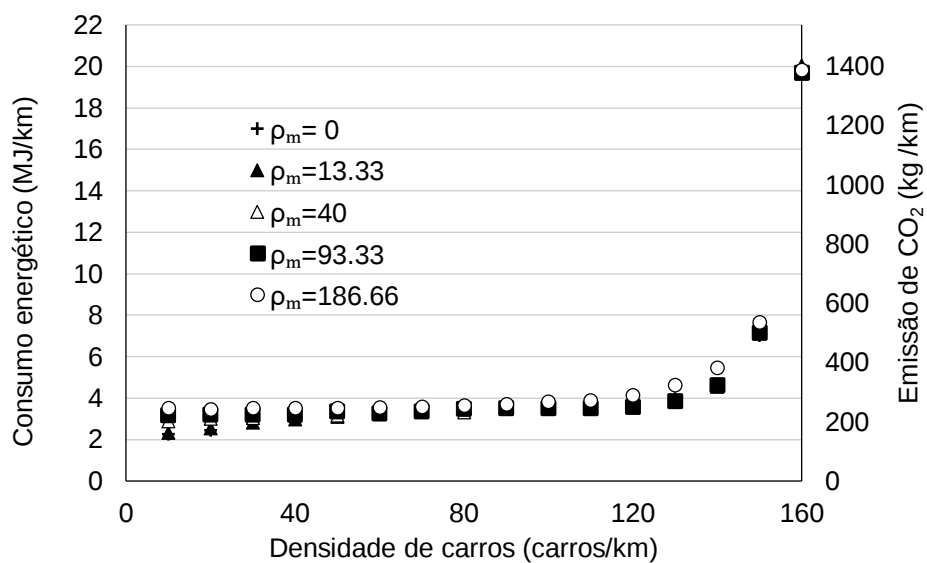


Figura A13 - Consumo energético médio e emissão média de CO₂ das motos por quilômetro percorrido

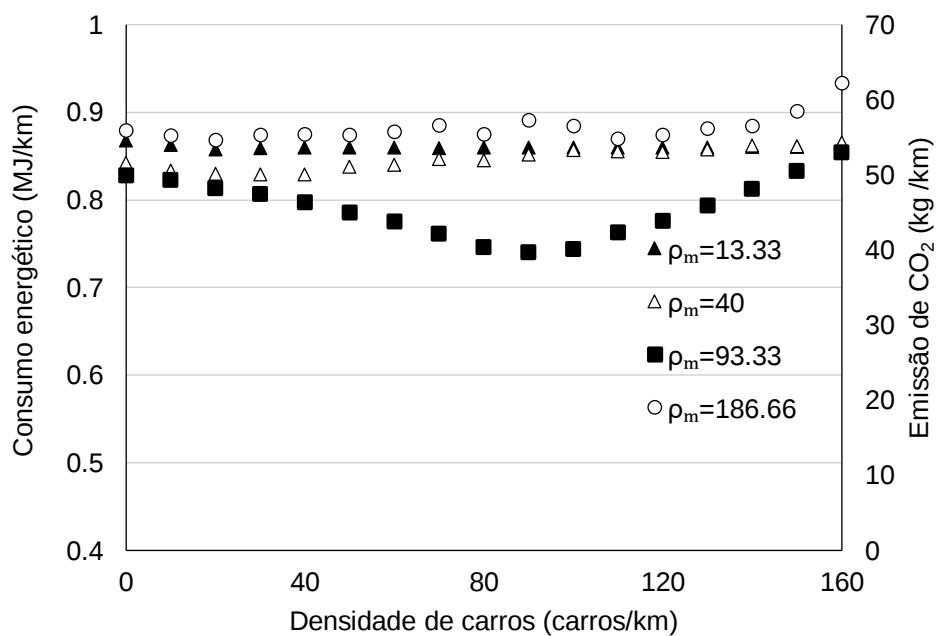
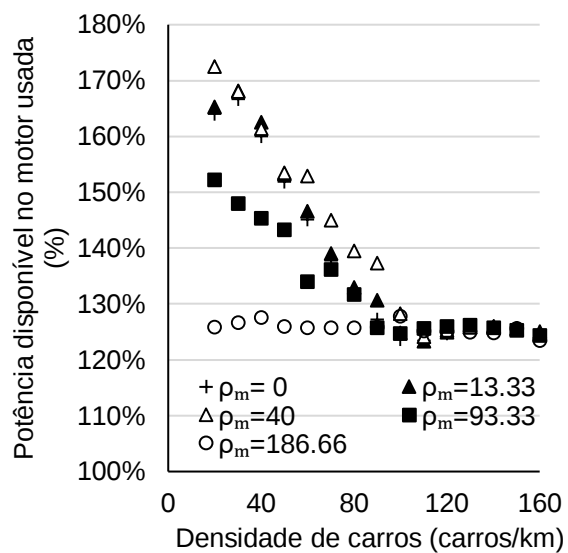
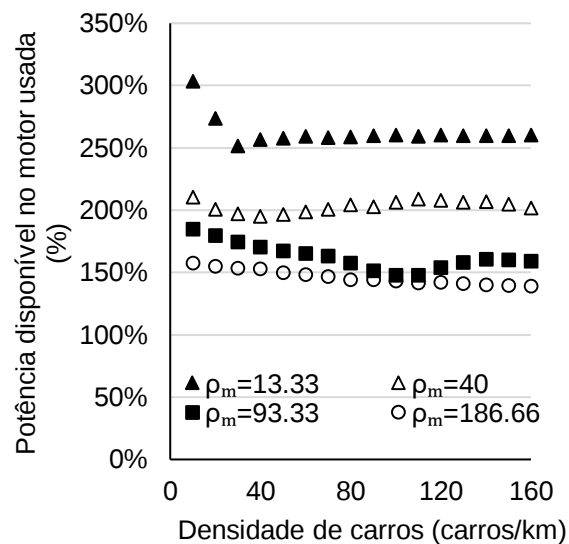


Figura A14 - Percentual de uso da potência disponível no motor dos carros



Fonte: O autor (2019).

Figura A15 - Percentual de uso da potência disponível no motor das motos

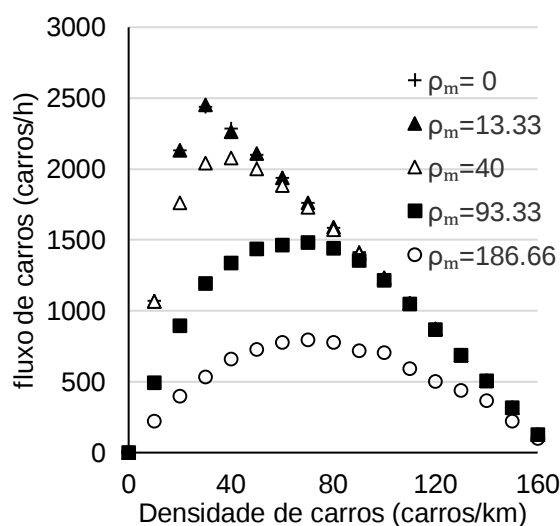


Fonte: O autor (2019).

APÊNDICE B: RESULTADOS DO MODELO DE ACELERAÇÃO DISCRETA 1 (AD1)

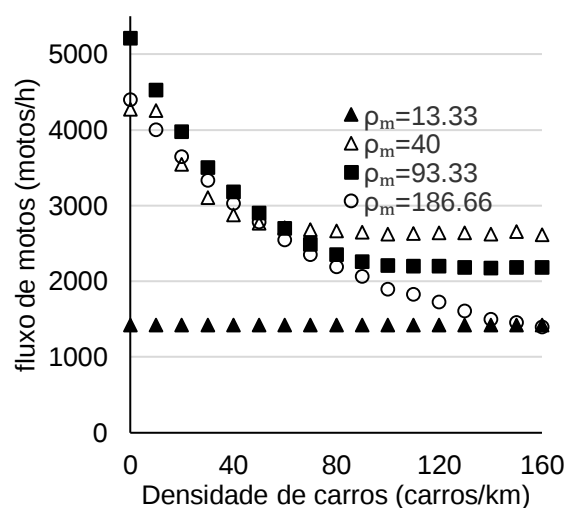
Este apêndice contém todos os resultados obtidos para AD1. Primeiramente todos os resultados de tráfego são apresentados por tipo de veículo em função da densidade de carros: fluxo, velocidade média, desvio padrão da velocidade, percentual de mudança de faixa e percentual da frota de motos na faixa em que os carros trafegam. Posteriormente são expostos os resultados energéticos, como: economia para cada tipo de veículo, consumo total de combustível por quilômetro da pista, consumo de combustível por quilômetro percorrido para cada tipo de veículo, percentual de uso de potência disponível no motor para cada tipo de veículo e percentual de ocorrência de $\alpha > 1$.

Figura B1 - Fluxo de carros



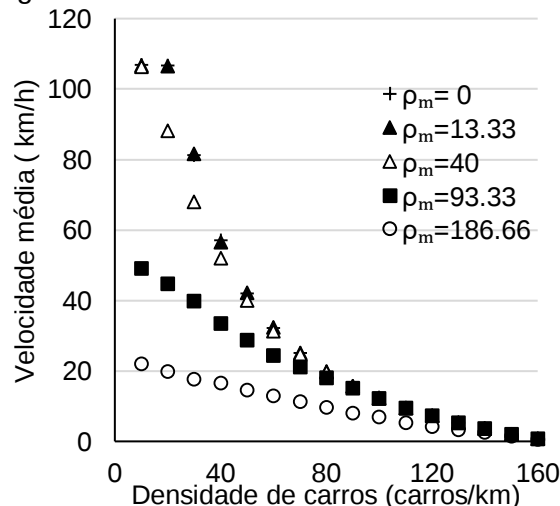
Fonte: O autor (2019).

Figura B2 - Fluxo de motos



Fonte: O autor (2019).

Figura B3 - Velocidade média dos carros



Fonte: O autor (2019).

Figura B4 - Velocidade média das motos

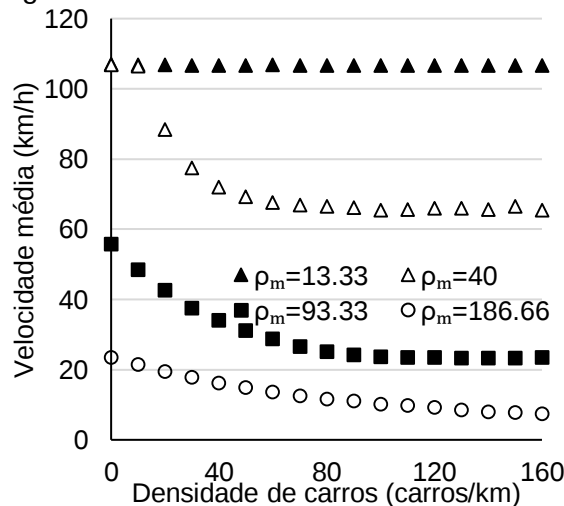
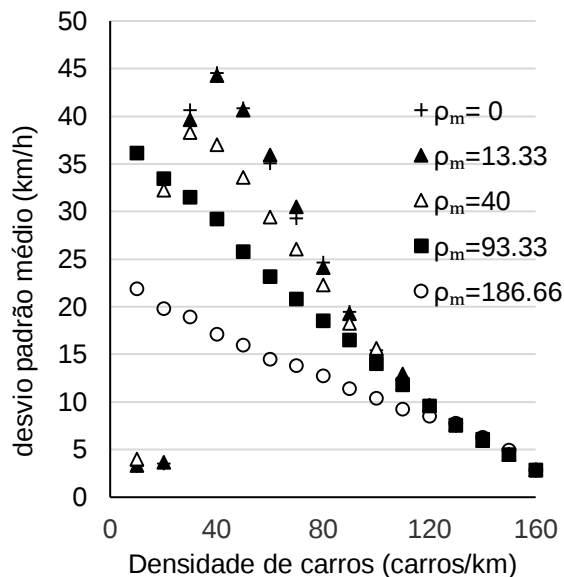
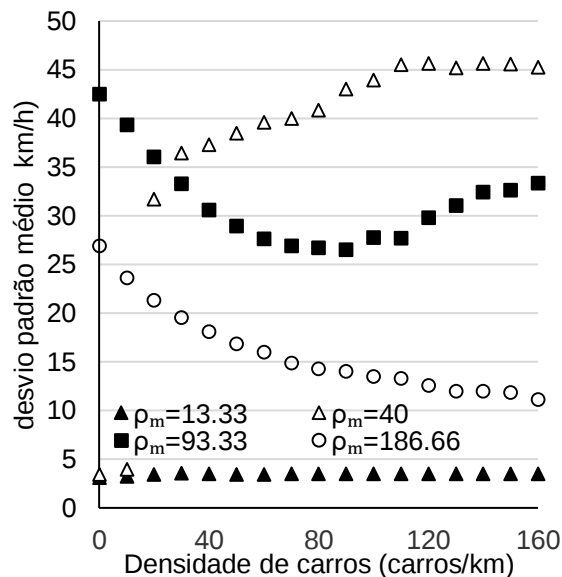


Figura B5 - Desvio padrão das velocidades dos carros



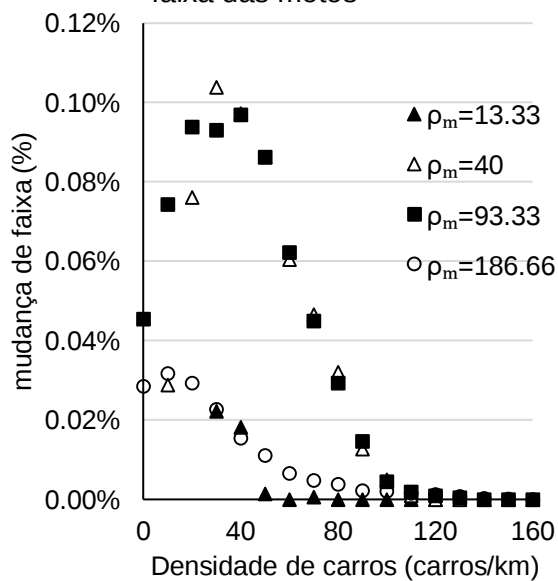
Fonte: O autor (2019).

Figura B6 - Desvio padrão da velocidade das motos



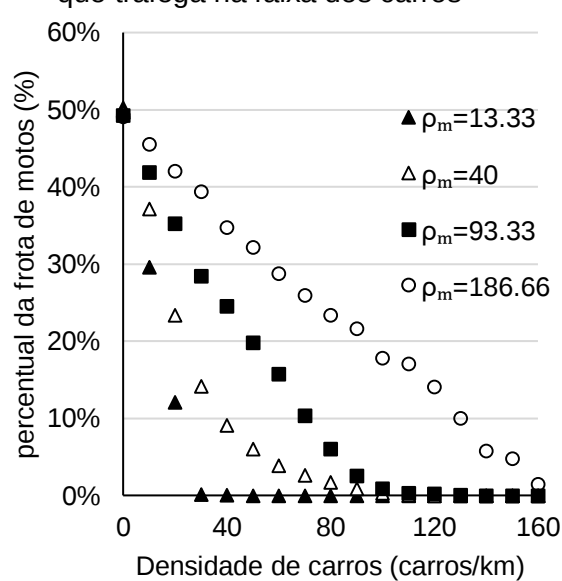
Fonte: O autor (2019).

Figura B7 - Percentual de mudança de faixa das motos



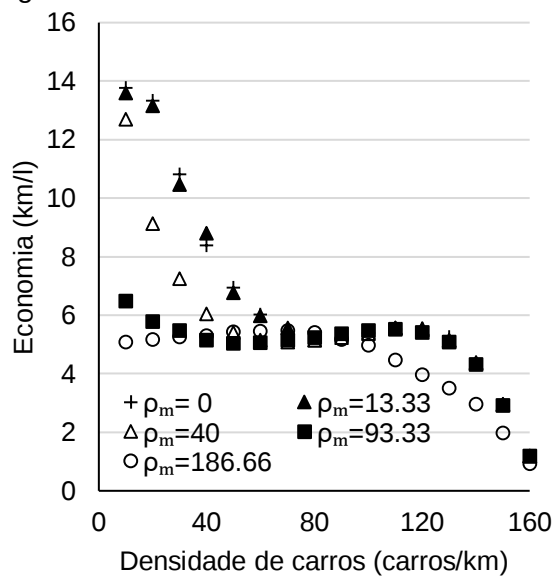
Fonte: O autor (2019).

Figura B8 - Percentual da frota de motos que trafega na faixa dos carros



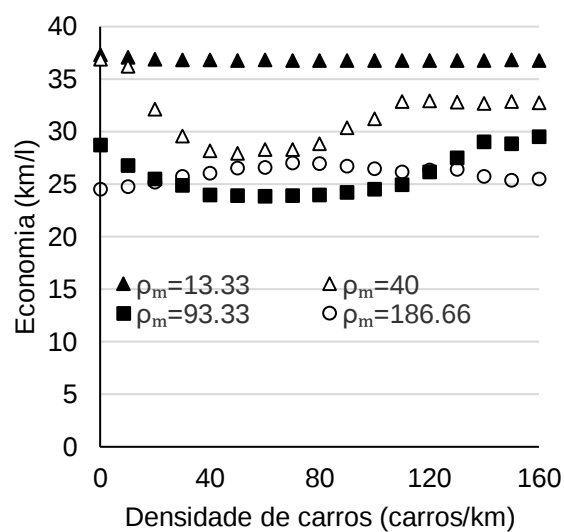
Fonte: O autor (2019).

Figura B9 - Economia média dos carros

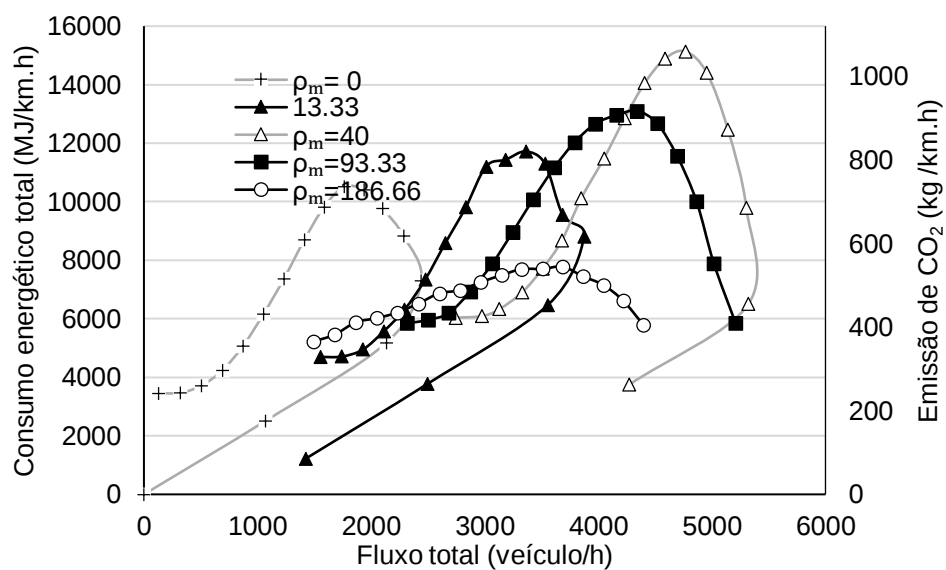


Fonte: O autor (2019).

Figura B10 - Economia média das motos

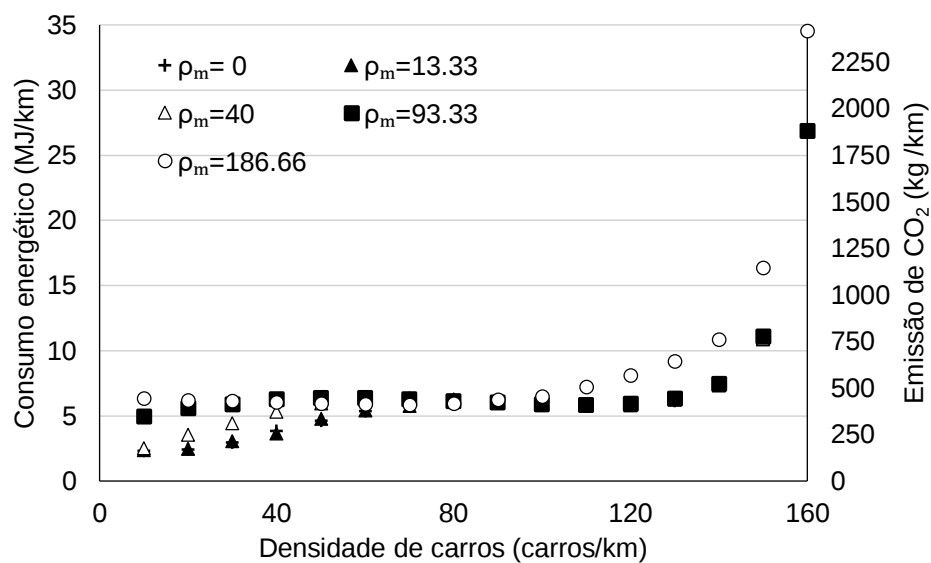


Fonte: O autor (2019).

Figura B11 - Consumo energético total e emissão de CO₂ (carros e motos) por quilômetro da pista

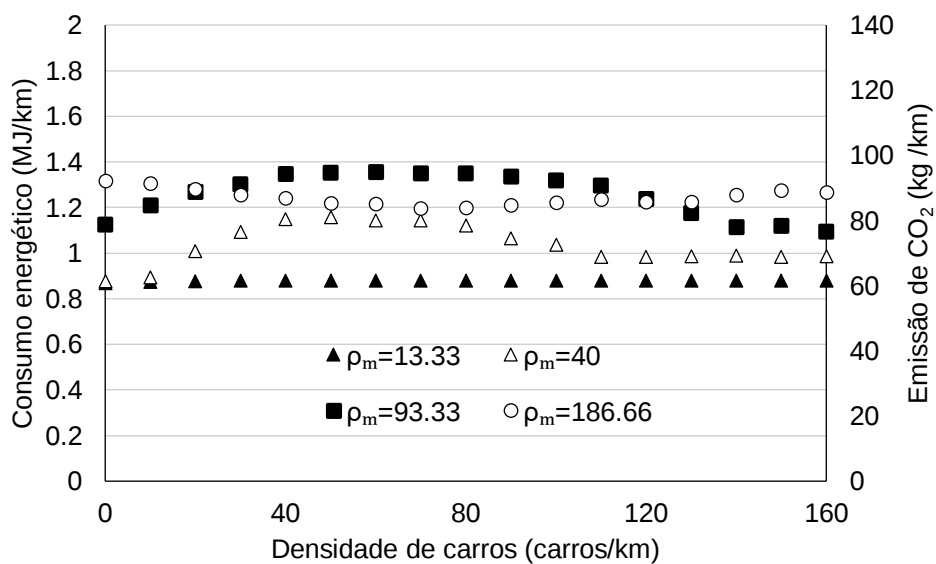
Fonte: O autor (2019).

Figura B12 - Consumo energético médio e emissão média de CO₂ dos carros por quilômetro percorrido



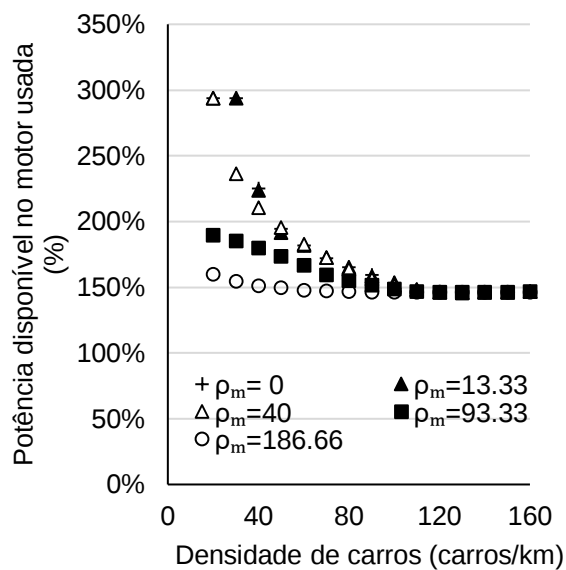
Fonte: O autor (2019).

Figura B.13 - Consumo energético médio e emissão média de CO₂ das motos por quilômetro percorrido



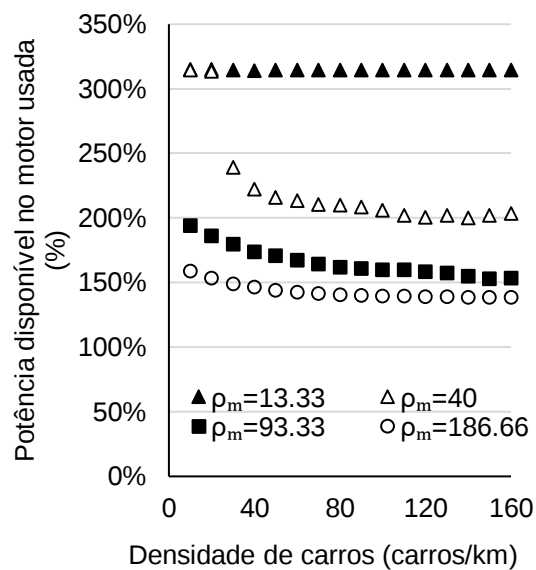
Fonte: O autor (2019).

Figura B14 - Percentual de uso da potência disponível no motor dos carros



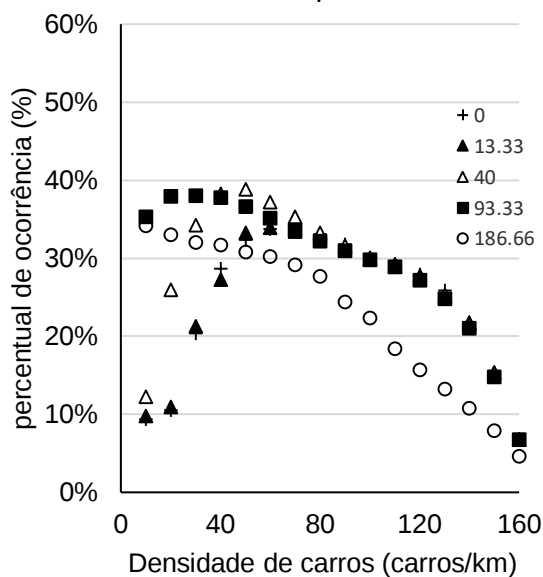
Fonte: O autor (2019).

Figura B15 - Percentual de uso da potência disponível no motor das motos



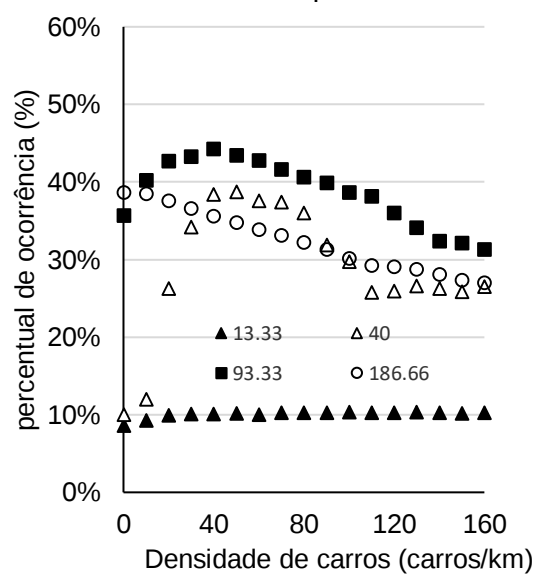
Fonte: O autor (2019).

Figura B16 - Percentual de ocorrência de $\alpha > 1$ para carros



Fonte: O autor (2019).

Figura B17 - Percentual de ocorrência de $\alpha > 1$ para motos

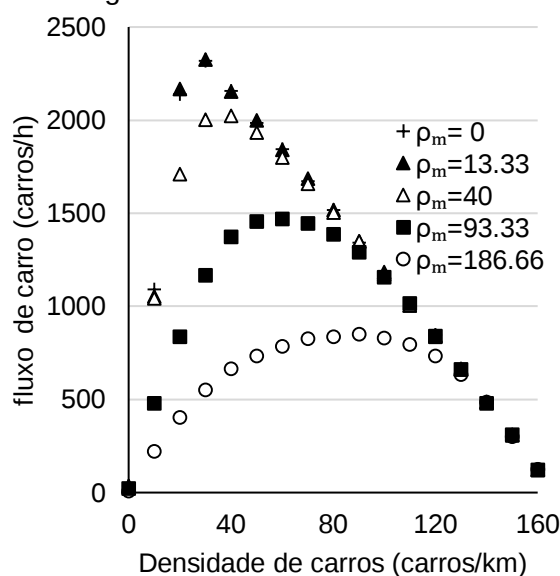


Fonte: O autor (2019).

APÊNDICE C: RESULTADOS DO MODELO DE ACELERAÇÃO DISCRETA 2 (AD2)

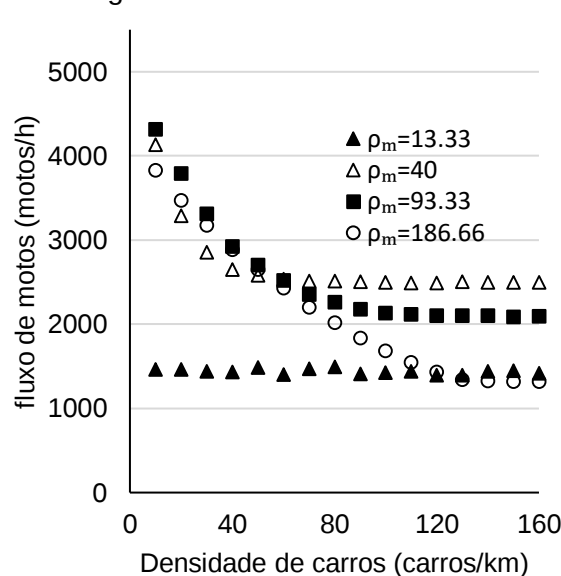
Este apêndice contém todos os resultados obtidos para AD2. Primeiramente todos os resultados de tráfego são apresentados por tipo de veículo em função da densidade de carros: fluxo, velocidade média, desvio padrão da velocidade, percentual de mudança de faixa e percentual da frota de motos na faixa em que os carros trafegam. Posteriormente são expostos os resultados energéticos, como: economia para cada tipo de veículo, consumo total de combustível por quilômetro da pista e consumo de combustível por quilômetro percorrido para cada tipo de veículo.

Figura C1 - Fluxo de carros



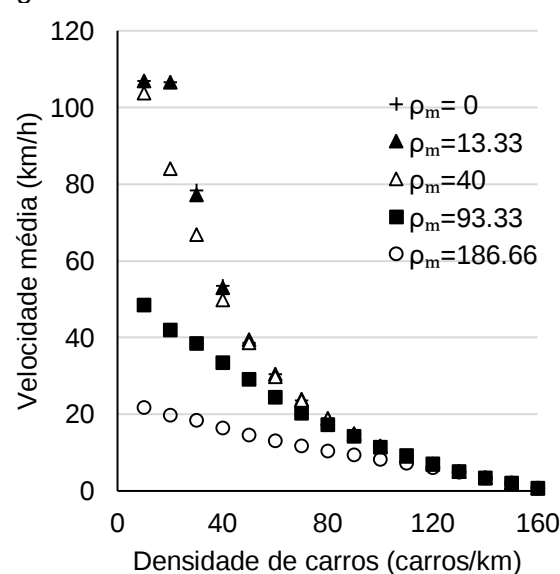
Fonte: O autor (2019).

Figura C2 - Fluxo de motos



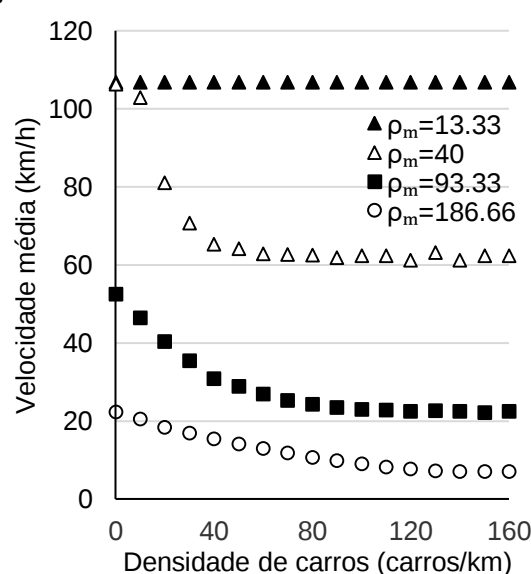
Fonte: O autor (2019).

Figura C3 - Velocidade média dos carros



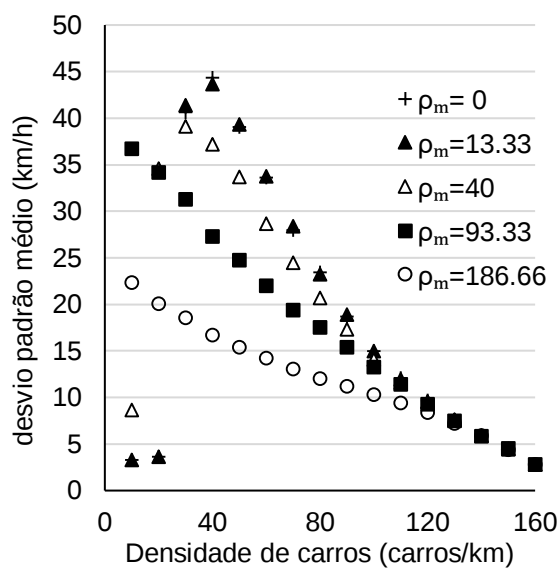
Fonte: O autor (2019).

Figura C4 - Velocidade média das motos



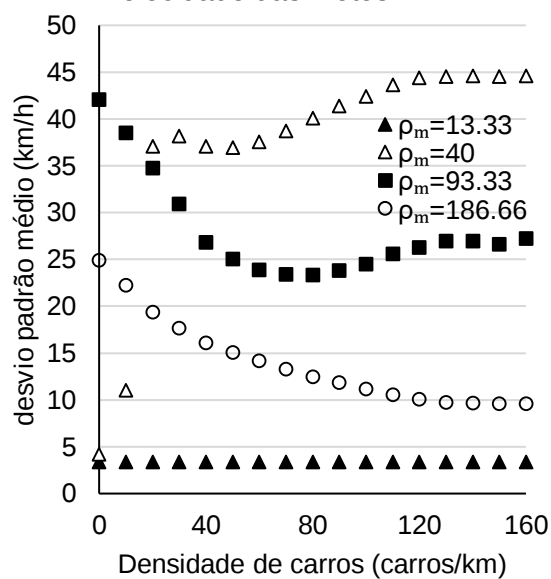
Fonte: O autor (2019).

Figura C5 - Desvio padrão das velocidades dos carros



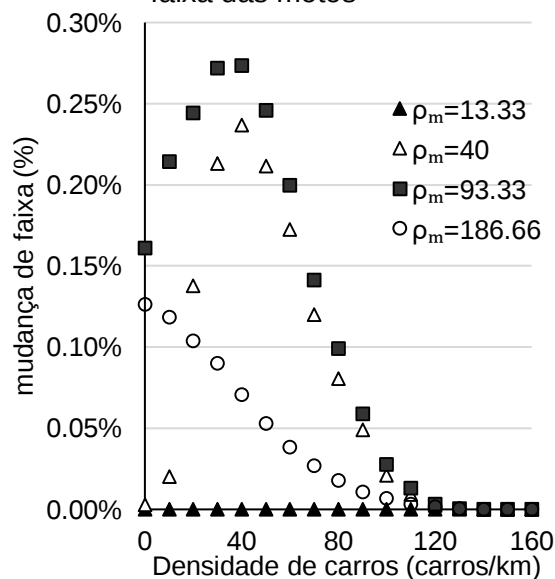
Fonte: O autor (2019).

Figura C6 - Desvio padrão da velocidade das motos



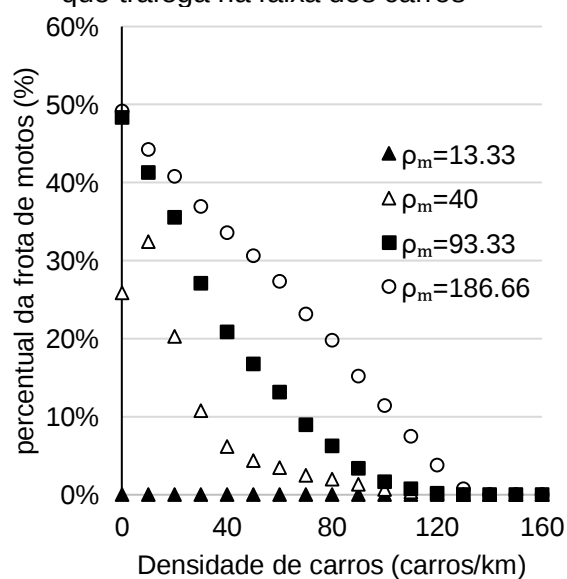
Fonte: O autor (2019).

Figura C7 - Percentual de mudança de faixa das motos



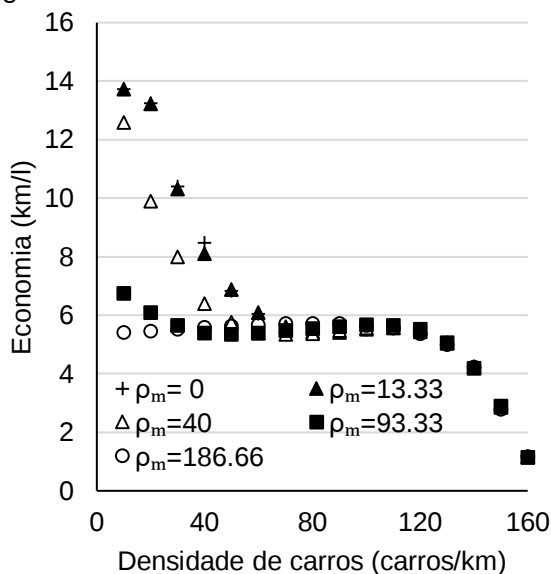
Fonte: O autor (2019).

Figura C8 - Percentual da frota de motos que trafega na faixa dos carros



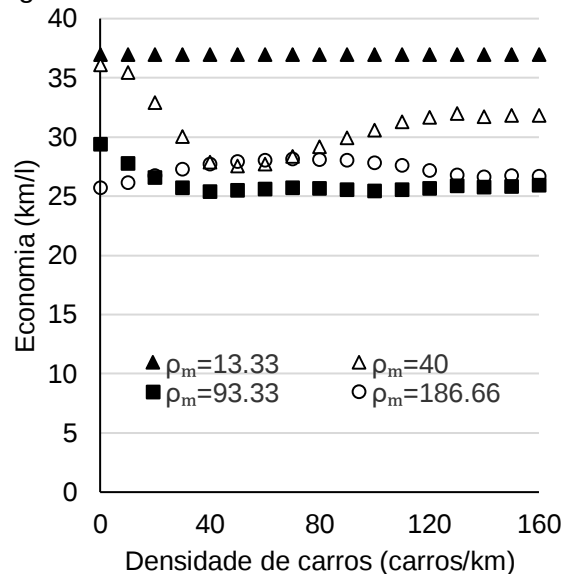
Fonte: O autor (2019).

Figura C9 - Economia média dos carros

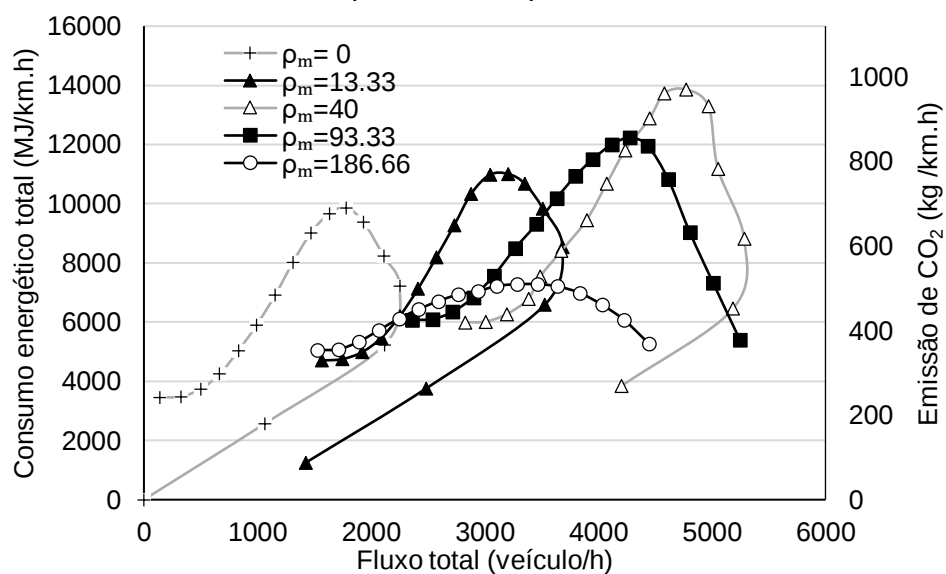


Fonte: O autor (2019).

Figura C10 - Economia média das motos

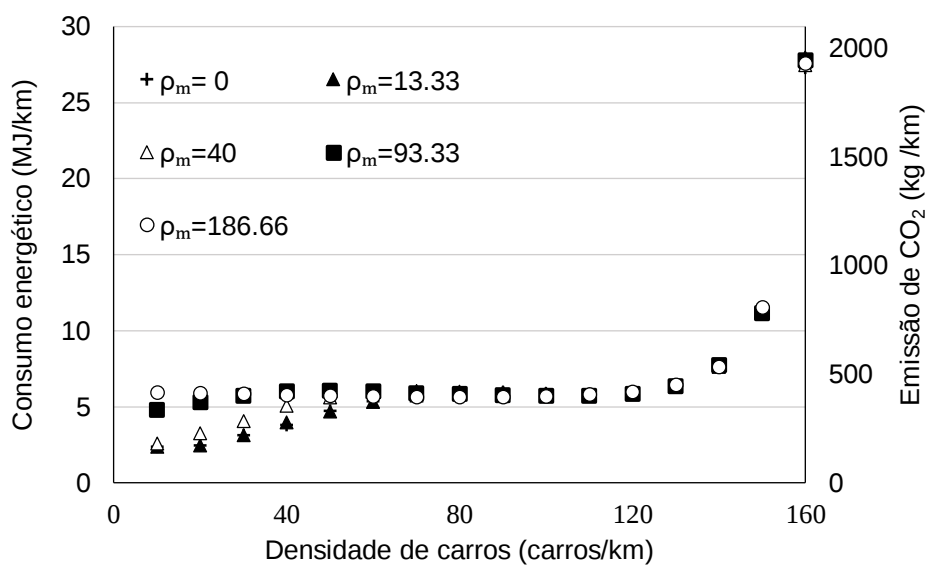


Fonte: O autor (2019).

Figura C11 - Consumo energético total e emissão de CO₂ (carros e motos) por quilômetro da pista

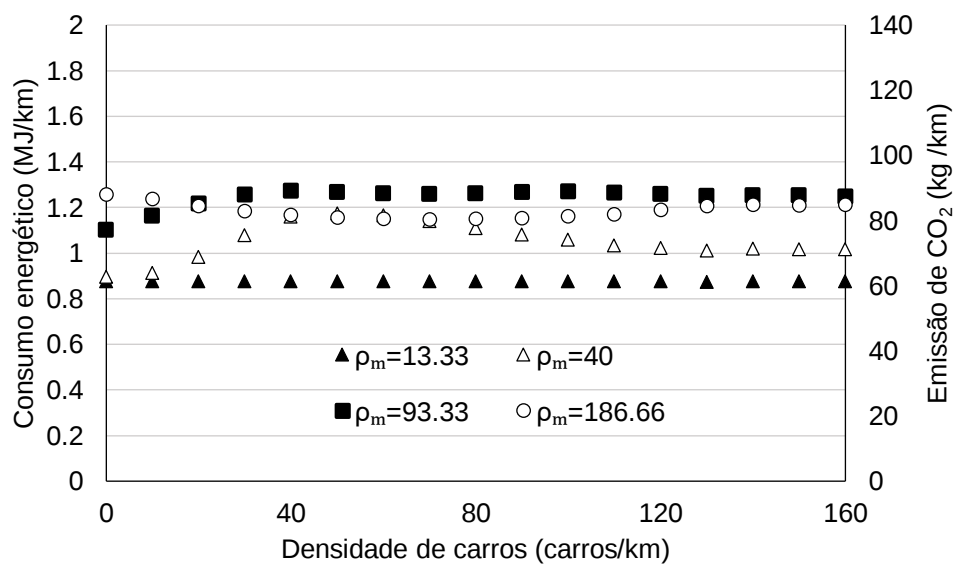
Fonte: O autor (2019).

Figura C12 - Consumo energético médio e emissão média de CO₂ dos carros por quilômetro percorrido



Fonte: O autor (2019).

Figura C13 - Consumo energético médio e emissão média de CO₂ das motos por quilômetro percorrido



Fonte: O autor (2019).