

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

FERNANDO WESLEY CAVALCANTI DE ARAÚJO

Análise do Tráfego Misto de Motocicletas e Automóveis
Considerando uma Variedade de Métricas, Escalas e
Pontos de Vista

RECIFE

2017

FERNANDO WESLEY CAVALCANTI DE ARAÚJO

Análise do Tráfego Misto de Motocicletas e Automóveis Considerando
uma Variedade de Métricas, Escalas e Pontos de Vista

Dissertação submetida ao programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, para obtenção do título de Mestre. Área de concentração: Processos e Sistemas Térmicos.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Santana Magnani

RECIFE

2017

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

A663a	Araújo, Fernando Wesley Cavalcanti de. Análise do tráfego misto de motocicletas e automóveis considerando uma variedade de métricas, escalas e pontos de vista / Fernando Wesley Cavalcanti de Araújo. - 2017. 108 folhas, il. Orientador: Prof. Dr. Fábio Santana Magnani. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2017. Inclui Referências. 1. Engenharia Mecânica. 2. Carros. 3. Métricas. 4. Motocicletas. 5. Tráfego misto. I. Magnani, Fábio Santana (Orientador). II. Título. UFPE 621 CDD (22. ed.) BCTG/2017-126
-------	--

15 de fevereiro de 2017

“ANÁLISE DO TRÁFEGO MISTO DE MOTOCICLETAS E AUTOMÓVEIS
CONSIDERANDO UMA VARIEDADE DE MÉTRICAS, ESCALAS E PONTOS DE
VISTA”

FERNANDO WESLEY CAVALCANTI DE ARAÚJO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO
DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROCESSOS E SISTEMAS TÉRMICOS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

Prof. Dr. FÁBIO SANTANA MAGNANI
ORIENTADOR/PRESIDENTE

Prof. Dr. CEZAR HENRIQUE GONZALEZ
COORDENADOR DO PROGRAMA

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. FÁBIO SANTANA MAGNANI (UFPE)

Prof. Dr. DARLAN KARLO ELISÁRIO DE CARVALHO (UFPE)

Prof. Dr. LEONARDO HERSZON MEIRA (UFPE)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me concedido todas as ferramentas e capacidades necessárias para desenvolver esse trabalho. A Deus seja a Glória!

Agradeço à minha esposa, Milly Lilian, pelo apoio e carinho durante todas as etapas de nossa nova vida. Acredito na frase *“O que Deus uniu o homem não pode separar”* e assim desejo. Agradeço à minha família (minha mãe Fernanda, meu pai Jurandir, meu irmão Marcos e minha vó Valdemira) por todo suporte e amor desde meu nascimento. Também agradeço à família de minha esposa (meu sogro Deijardins, minha sogra Hulda e meu cunhado Lucas) por todo apoio e incentivo à realização de meus sonhos. Minhas vitórias são frutos de seus esforços.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Fábio Magnani, pelo incentivo, conselhos e toda disponibilidade para me auxiliar em todas as atividades. Expresso aqui a mais sincera gratidão.

Agradeço a todo o apoio recebido em meu local de trabalho, o Departamento de Nutrição da UFPE, onde fui muito bem recebido e incentivado a me desenvolver. Agradeço às Professoras Raquel, Edigleide, Goretti, assim como à Isinete pela companhia que tornam nossos almoços os melhores da UFPE. Agradeço aos Professores Raul e Rubem por todo suporte no dia-a-dia, sempre fornecendo as ferramentas adequadas para o nosso trabalho. Agradeço também aos doutorandos Regina, Rafael e Suênia e todos do laboratório pela ajuda e pela amizade construída.

Agradeço aos meus amigos de infância (Cláudio e Thiago) e aos colegas do LOST-UFPE (Alcides, Guilherme, Stevie e Saulo) por todo o incentivo.

Por fim agradeço a todos os professores que durante o curso se disponibilizaram a compartilhar seu conhecimento de maneira altruísta. Seu retorno à sociedade é imensurável. Muito obrigado!

“Quidquid latine dictum sit, altum videtur”

Provérbio em latim

RESUMO

Em países em desenvolvimento econômico é comum a existência de tráfego misto entre carros e motos. Esse tipo de tráfego tem suas vantagens, como possibilitar o maior fluxo de pessoas em uma via, mas também tem desvantagens como o aumento no número de acidentes. A avaliação do tráfego depende da métrica selecionada (e.g., fluxo de veículos, emissão de CO₂, consumo de combustível, custos mensais) e do ponto de vista (e.g., motorista, piloto, sociedade). Nesse trabalho, o tráfego misto com carros e motos é estudado em três escalas: Motor, Veículo e Tráfego. O motor foi modelado por correlações empíricas de potência e eficiência energética; o veículo foi modelado usando um balanço das forças propulsivas e resistivas; e o tráfego foi modelado através de um modelo autômato celular. Foram avaliados o fluxo de veículos, o desvio padrão da velocidade, o consumo médio de energia, emissão de CO₂ da via e custos mensais para os donos dos veículos em uma situação padrão ($v_{\text{máx}}$ carro = 135km/h e $v_{\text{máx}}$ moto = 54 km/h), comparando os resultados com os presentes na literatura. Posteriormente, foi realizada uma análise das métricas para 16 situações de velocidade máximas de carros e motos ($v_{\text{máx}}$ = 54, 81, 108 e 135 km/h). Verificou-se que em comparação com a situação padrão estudada por Meng *et al.* (2007) e Garcia Neto (2014), que a alteração da velocidade máxima dos veículos pode aumentar o fluxo de carros e motos e também minimizar o consumo energético dos mesmos. Além disso, qualquer alteração da velocidade do carro e/ou da motocicleta (dentro as velocidades estudadas) reduz os custos mensais para os donos de ambos os veículos, assim como também reduz a emissão de CO₂ emitida na via.

Palavras-chave: Carros. Métricas. Motocicletas. Tráfego misto.

ABSTRACT

In countries in economic development it is usual that cars and motorcycles exist in mixed traffic. This type of traffic has advantages, as increasing the flow of people in a road, but has also disadvantages as increasing the number of accidents. The evaluation of traffic depends on the chosen metric (i.e., vehicle flow, CO₂ emission, fuel consumption, monthly cost) and on the point of view (i.e., driver, rider, society). In this work, the mixed traffic with motorcycles and cars is evaluated in three scales: Engine, Vehicle and Traffic. The engine was modeled by empirical correlations of power and energetic efficiency; a balance by the propulsive and resistive forces modeled the vehicle; and the traffic was modeled from a cellular automata model. The vehicle flow, the car and motor speed standard deviation, the average energy consumption, CO₂ emission in the track and monthly cost for the vehicle owners were evaluated in a standard situation ($v_{\text{máx}}$ car = 135km/h and $v_{\text{máx}}$ mot = 54km/h), comparing them with the results present in the literature. After, an analysis of the metrics for 16 cases of maximum speeds for cars and motorcycles ($v_{\text{máx}}$ = 54, 81, 108 e 135 km/h) were done. It was found, comparing the results with those from Meng et al (2007) and Garcia Neto (2014) that altering the maximum speed of the vehicles can increase the car and motorcycle flow, as it can also decrease the average energetic consumption. Furthermore, any alteration of the maximum speed of car or the motorcycle decreases the monthly cost for the owners of both vehicles and also decreases the CO₂ emission in the road.

Keywords: Cars. Metrics. Motorcycles. Mixed traffic.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Imagem simplificada da transmissão em motores de moto.....	29
Figura 2 - Exemplo de curva de potência em motos.....	31
Figura 3 - Ilustração das forças atuantes sobre o veículo.....	32
Figura 4 - Ilustração das forças envolvidas na equação	33
Figura 5 - Fluxo de automóveis em função da densidade de automóveis.	39
Figura 6 - Fluxo total de veículos em função da densidade total	40
Figura 7 - Velocidade média dos automóveis em função da densidade de carros	41
Figura 8 - Ilustração da pista modelada	42
Figura 9 - Ilustração das células contidas na pista.....	43
Figura 10 - Ilustração da condição de contorno.....	43
Figura 11 - Ilustração troca de pista para os veículos	46
Figura 12 - Ilustração de condições para aceleração	47
Figura 13 - Ilustração para desaceleração do veículo	48
Figura 14 - Ilustração do movimento dos veículos	49
Figura 15 - Ilustração de relacionamento entre as malhas.....	50
Figura 16 - Ilustração de relacionamento entre as malhas.....	53
Figura 17 - Ilustração da integração ideal entre os modelos estudados	54
Figura 18 - Ilustração do comportamento da velocidade	55
Figura 19 - Ilustração da velocidade de corte.....	56
Figura 20 - Ilustração do tempo de simulação considerado	59
Figura 21 - Tempo necessário para alcançar a velocidades de corte para o automóvel	65
Figura 22 – Fluxo de carros em função da densidade de carros.....	69
Figura 23 – Fluxo total em função da densidade total	70
Figura 24 – Velocidade média dos automóveis em função da densidade total.....	71
Figura 25 – Desvio Padrão da velocidade dos carros.....	72
Figura 26 – Desvio padrão da velocidade das motos	72
Figura 27 - Consumo energético dos carros	74
Figura 28 - Consumo de energia para motocicletas	74
Figura 29 - Consumo de energia total - Parte A.....	75
Figura 30 - Consumo de energia total - Parte B.....	76
Figura 31 - Custo mensal do proprietário de carro	77
Figura 32 - Custo mensal do proprietário de motos	78
Figura 33 – Fluxo total para diferentes velocidades máximas de carro e moto	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Lista de parâmetros de modelo do Meng	44
Tabela 2 - Lista de variáveis do modelo de Meng et al (2007)	44
Tabela 3 - Dados financeiros utilizados no modelo	62
Tabela 4 - Velocidades máximas estudadas	63
Tabela 5 - Consumo acumulado de combustível em litros para diversas situações de aceleração do automóvel com diferentes valores de iterações por segundo	64
Tabela 6 - Consumo acumulado (litros) em função da marcha inicial e velocidade inicial (automóvel em aceleração)	65
Tabela 7 - Consumo total e consumo em um segundo para o automóvel em aceleração	66
Tabela 8 - Comparação entre consumos totais para situação de aceleração do automóvel: Estudo atual, estudo de Garcia Neto (2014) e combustível consumido por balanço energético	67
Tabela 9 - Consumo total e consumo em um segundo da motocicleta em aceleração	67
Tabela 10 - Comparação entre o consumo da motocicleta durante aceleração: Estudo atual, estudo de Garcia Neto (2014) e combustível consumido por balanço energético	68
Tabela 11 - Consumo de automóveis e motocicletas em velocidade constante por um segundo	68
Tabela 12 – Compilação de resultados para $\rho^{(m)}=93,3$, $\rho^{(c)}=15$	78
Tabela 13 – Variação das métricas na condição de fluxo máximo para as diversas velocidades máximas	82
Tabela 14 - Variação das métricas na condição de fluxo máximo para diversas velocidades máximas	83
Tabela 15 - Variação das métricas em relação ao caso padrão	83

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área frontal do veículo
C_d	Coeficiente de arrasto
C_r	Coeficiente de resistência ao rolamento
d	Número de espaços a frente do veículo que são visíveis
$d^{(c)}_n$	Posição da n -ésimo automóvel
$d^{(m)}_n$	Posição da n -ésima motocicleta na pista 1 ou na 2
e	Consumo energético
$E^{(c)}$	Energia média consumida por carro por distância (MJ/carro.km)
$E^{(m)}$	Energia média consumida por moto por distância (MJ/moto.km)
F_A	Força de resistência aerodinâmica
F_e	Força de atrito
F_G	Força de resistência gravitacional
F_P	Força de propulsão
F_R	Força de resistência ao rolamento
g	Aceleração da gravidade
gap- pista	Espaços atrás de uma motocicleta na pista de destino ao trocar de pista
gap. ^(mc)	Espaços entre a n -ésima motocicleta na pista 1 e o automóvel mais próximo dela
gap+ pista	Espaços à frente de uma motocicleta na pista de destino ao trocar de pista
H_m	Horas trabalhadas mensais
i	Taxa de juros
K_A	Fator de arrasto
L	Consumo de combustível em litros
L_m	Distância percorrida mensalmente
m	Massa do veículo

$\dot{m}$	Vazão de combustível
N	Número de veículos
n	Número de meses
nt	número de iterações por segundo
$o^{(m,c)}$	Taxa de ocupação do veículo
p	Períodos de tempo (como semestres, anos)
$p^{(c)}$	Probabilidade de desaceleração do automóvel
$p^{(m)}$	Probabilidade de desaceleração da motocicleta
PCI	Poder calorífico do combustível
P_{des}	Potência desejada
P_e	Potência máxima do motor na rotação estudada
P_i	Potência instantânea do motor na rotação estudada
$P_{m\acute{a}x}$	Potência máxima nominal do motor
Q	Fluxo de veículos
S_m	Salário mensal
V	Velocidade
$v^{(c)}_{m\acute{a}x}$	Velocidade máxima do automóvel
$v^{(c)}_n$	Velocidade da enésimo automóvel
$v^{(m)}_{m\acute{a}x}$	Velocidade máxima da motocicleta
$v^{(m)}_n$	Velocidade da enésima motocicleta na pista 1 ou na 2
V_{9n}	Velocidade de corte
VF	Valor futuro
V_f	Velocidade desejada para o veículo
V_{pista1}	Velocidade do automóvel ou da motocicleta na faixa da esquerda
V_{pista2}	Velocidade da motocicleta na faixa da direita
V_i	Velocidade inicial do veículo
VP	Valor presente

V_p	Valor de compra do veículo
V_s	Valor de revenda do veículo
W	Velocidade do ar em sentido contrário ao movimento
$x^{(c)}_n$	Posição da enésimo automóvel
$x^{(m)}_n$	Posição da enésima motocicleta na pista 1 ou na 2

LISTA DE SÍMBOLOS (Alfabeto grego)

α	Aceleração do veículo
Γ	Torque do motor
$\Gamma_{\max}$	Torque máximo do motor
ε	Custo extra com taxas, manutenção e estacionamento
η	Eficiência do motor
η_{trans}	Rendimento da transmissão
η_0	Pico de eficiência do motor
μ_{FRC}	Fator de recuperação de capital
μ_n	Coeficiente modal de rotação do motor
μ_p	Coeficiente do grau de utilização de potência do motor
μ_{RD}	Fator de atrito entre o pneu e a pista
ρ	Densidade do ar
$\rho^{(c)}$	Densidade de automóveis
$\rho^{(m)}$	Densidade de motocicletas
$\mathcal{E}$	Energia total consumida por tempo e espaço (MJ/ km.h)
σ^2	Variância da velocidade
ω	Rotação do motor
ω_p	Rotação do motor para potência máxima
ω_t	Rotação do motor no ponto de torque máximo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	UMA BREVE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DO MODELO AUTÔMATO CELULAR EM ANÁLISE DE TRÁFEGO	19
1.2	OBJETIVOS	23
1.3	ESCOPO DO TRABALHO.....	23
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	27
2.1	MOTOR	27
2.1.1	Motores de combustão interna.....	27
2.1.2	Modelo do motor.....	29
2.2	VEÍCULO.....	31
2.2.1	Força de propulsão.....	34
2.2.2	Força de frenagem.....	34
2.2.3	Resistência à rolagem	34
2.2.4	Resistência aerodinâmica.....	35
2.2.5	Força resistiva ao subir inclinações	36
2.3	TRÁFEGO	37
2.3.1	Modelo de tráfego de Meng	42
2.3.2	Regras do tráfego.....	44
2.3.3	Malhas temporais e espaciais	49
2.4	MATEMÁTICA FINANCEIRA	50
3	METODOLOGIA	52
3.1	MODELO DO VEÍCULO/MOTOR.....	54
3.1.1	Velocidade de corte	56
3.1.2	Estudo da malha temporal do modelo do veículo.....	57
3.1.3	Marcha inicial.....	58
3.1.4	Consumo energético.....	58
3.2	MODELO DO TRÁFEGO	58
3.3	MODELO DE ANÁLISE GLOBAL.....	59
3.4	ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE MÁXIMA DOS VEÍCULOS.....	63
4	RESULTADOS.....	64
4.1	INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS NUMÉRICOS NO CONSUMO DO VEÍCULO.....	64
4.2	VETOR DE CONSUMO ENERGÉTICO.....	66
4.3	INFLUÊNCIA DAS DENSIDADES NAS DIVERSAS MÉTRICAS.....	69

4.4	INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE MÁXIMA NAS DIVERSAS MÉTRICAS ..	78
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	86
	REFERÊNCIAS.....	89
	APÊNDICE	93
	APÊNDICE A1: Fluxo total de veículos em função da densidade total para velocidades máximas de motocicletas de 04 e 06 células por passo de tempo.....	94
	APÊNDICE A2: Fluxo total de veículos em função da densidade total para velocidades máximas de motocicletas de 08 e 10 células por passo de tempo.....	95
	APÊNDICE A3: Fluxo total de veículos em função da densidade total para velocidades máximas de carros de 04 e 06 células por passo de tempo.....	96
	APÊNDICE A4: Fluxo total de veículos em função da densidade total para velocidades máximas de carros de 08 e 10 células por passo de tempo.....	97
	APÊNDICE B: Fluxo total de veículos versus densidade de automóveis	98
	APÊNDICE C: Fluxo de automóveis versus densidade de carros.....	99
	APÊNDICE D: Fluxo de motos versus densidade de carros	100
	APÊNDICE E: Velocidade média dos carros versus densidade de carros.....	101
	APÊNDICE F: Velocidade média das motos versus densidade de carros	102
	APÊNDICE G: Desvio padrão da velocidade dos carros x densidade dos carros...	103
	APÊNDICE H: Desvio padrão da velocidade das motos x densidade dos carros ...	104
	APÊNDICE I: Consumo de energia do carro por km versus densidade de carro....	105
	APÊNDICE J: Consumo de energia da moto por km versus densidade de carro ...	106
	APÊNDICE K: Custo mensal do automóvel versus densidade de carros	107
	APÊNDICE L: Custo mensal da motocicleta versus densidade de carros	108

1 INTRODUÇÃO

Uma quantidade significativa da área urbana é utilizada para a movimentação de pessoas e produtos entre diferentes localizações. Esse sistema de transporte composto por ampla variedade de veículos é essencial para manutenção da saúde econômica da região e da qualidade de vida de seus habitantes, possibilitando o acesso a diversos destinos, ao mesmo tempo em que é responsável pela existência de problemas como poluição, alto índice de acidentes e congestionamentos. (PATRIKSSON, 2015; VASCONCELLOS, 2012).

Para a movimentação das pessoas, podem ser utilizados o transporte público ou o individual. Essa decisão não afeta apenas o bem-estar da pessoa. Por exemplo, mais pessoas usando transporte individual geram mais poluição e congestionamentos (VUGT *et al.*, 1996). Devemos lembrar por outro lado que o veículo individual não é usado apenas como um meio de transporte, mas também pelo fato que o mesmo propicia uma sensação de liberdade, conveniência, *status* de superioridade e diversão, a qual não pode ser atribuída ao transporte público em várias situações (STEG, 2005; CHEN; CHEN, 2011).

As maiores cidades brasileiras, assim como grandes cidades de países em desenvolvimento, foram adaptadas para o uso eficiente do automóvel associado ao interesse das classes médias em ascensão. Financiamento e incentivo mercadológico promoveram ampliação da frota de automóveis e mais recentemente de motocicletas, nesse caso para um público jovem que está em ascensão social e econômica. Em paralelo, o sistema de transporte público foi negligenciado e mesmo com investimentos, permaneceu com baixa qualidade e crises financeiras, além de deficiências na gestão e operação. Sua confiança, eficiência e confiabilidade junto ao público estão em declínio e são usados principalmente por aqueles que não dispõem de carros e motos (VASCONCELLOS, 2012).

O conjunto dos veículos individuais e/ou coletivos forma o tráfego misto. Esses veículos podem variar de velocidades de 10 km/h para ciclistas e veículos de propulsão animal até velocidades maiores do que 100 km/h no caso de carros e motos. Todos os modais são importantes para o transporte efetivo de pessoas e bens em uma sociedade (CHANDRA; MEHAR; VELMURUGAN, 2015; FINDLEY *et al.*, 2016). Países em desenvolvimento como Brasil, Malásia, Taiwan, Tailândia,

Colômbia, Filipinas e Nigéria têm frotas com tráfego misto com proporção mista de carros e motocicletas (OMS, 2015; LAN; CHANG, 2005). Nos extremos, países mais ricos em geral têm uma grande proporção de carros, enquanto países pobres têm muitas motocicletas (OMS, 2015).

No Brasil, cerca de 56 milhões de veículos de quatro rodas e 24 milhões de veículos de duas rodas estão habilitados para transitar. No Nordeste a proporção de motocicletas é maior do que a média nacional. No levantamento realizado em outubro de 2016, a região contava com cerca de 6 milhões de automóveis e 6 milhões de motocicletas, sendo que nas cidades do interior proporcionalmente encontram-se mais motos do que carros. Considerando todas as cidades do Nordeste sem as capitais, temos aproximadamente 4,5 milhões de motos para 4 milhões de carros. Nesse mesmo levantamento mensal é possível verificar a quantidade de ônibus e micro-ônibus presentes na região Nordeste. Combinados, são cerca de 200 mil veículos em toda a região (DENATRAN, 2016).

Nem todos os veículos presentes na frota veicular são utilizados diariamente, mas esses valores fornecem uma base para compreender a proporção entre carros e motos na sociedade brasileira. Esses dados também podem ser utilizados para compreensão da situação de transporte individual e coletivo regional.

O uso de motos é motivado pela baixa qualidade do transporte público, congestionamentos e o aparente vantajoso (pois não contabiliza os acidentes) custo de aquisição e operação quando comparado aos carros. Apesar de melhorar bastante a mobilidade no caso de tráfego congestionado, os acidentes com motocicletas representam um forte impacto econômico, social e psicológico. No Brasil, cerca de 10 mil motociclistas morrem por ano em acidentes, o que é uma das maiores tragédias sociais da nação. Em índice por habitante, esse valor é entre 4 a 6 vezes superior aos dos países desenvolvidos (VASCONCELLOS, 2013; SEERIG *et al.*, 2016).

O uso de motos também é incentivado pelo reconhecido menor consumo de combustível para percorrer uma mesma distância quando comparado a um carro. Esse menor consumo relativo de combustível das motocicletas não representa, a princípio, menor emissão de poluentes quando comparado aos automóveis. O PROMOT (Programa de Controle da Poluição do Ar por Motocicletas e Veículos Similares) através do CONAMA 297/2002 limita o controle de emissões de veículos

dessa categoria. Desde 2002 existem limites de emissão para ciclomotores, motocicletas e similares. Estima-se que no ano 2000 uma motocicleta nova emitia 16 vezes mais monóxido de carbono (CO) do que um automóvel. Em 2016 o PROMOT entrou na parte 2 da fase 4, com metas para reduzir de maneira gradual a emissão de CO, HC, NO_x e NO_x.

A utilização de carros também é motivada pela baixa qualidade do transporte público. Em grandes cidades, no horário de pico, uma viagem com o carro pode demorar menos da metade do tempo do que a espera e viagem com o transporte coletivo quando não há corredores exclusivos de ônibus ou metrô, por exemplo. Desde 1956, no governo JK, com a introdução da indústria automobilística, os esforços por construção de estradas e priorização da economia baseada na venda transporte individual se mantém como características do governo em relação à mobilidade urbana (JOAQUIM, 2008; VASCONCELLOS, 2012).

Nesse trabalho, analisamos o tráfego misto composto por carros e motos. As vantagens e desvantagens na escolha do veículo são dependentes da métrica escolhida, que pode ser individual, focando o usuário do carro ou da motocicleta (e.g. tempo gasto no percurso, custo direto de operação do veículo e conforto pessoal); ou social, focando todos os usuários do sistema de transporte (e.g. fluxo total de veículos e/ou de pessoas, emissão de poluentes, quantidade de acidentes) (VASCONCELLOS *et al.*, 2015; TRANTER, 2012). A sociedade, nesse trabalho, indica todos os usuários de veículos individuais, pois não é estudada a influência do transporte coletivo.

O tráfego depende de várias condições, como a densidade de veículos e a proporção de cada tipo desses veículos (ZHANG *et al.*, 2016). Vários autores estudaram sobre as características do tráfego, como quando é composto por apenas carros (ZHANG *et al.*, 2016), apenas motocicletas (MANAN, 2014), tráfego misto com carros e motos (BORREGO *et al.*, 2007), com carros e bicicletas (VASIC; RUSKIN, 2012) e outras combinações (FONT; FULLER, 2016). O foco nesse trabalho é para o tráfego misto de carros e motos.

Meng *et al.* (2007) estudaram como o tráfego misto de automóveis e motocicletas se comporta com a presença de diversas densidades de carros e motos, além de mudança de faixa entre as motos, seguindo uma lógica do modelo automata celular. Garcia Neto (2014) estudou o modelo do Meng *et al.* (2007)

propondo uma adição às informações já conhecidas. Em especial, foram analisados a dinâmica do motor e do veículo, realizando uma comunicação entre as ações realizadas no motor e considerando as forças que atuam sobre o veículo durante seu deslocamento.

Nesse trabalho analisamos os pontos levantados por Garcia Neto (2014), que considerou informações do motor do veículo (curva de potência, mapa de eficiência, torque máximo etc), informações sobre as forças que atuam no veículo (força de arrasto aerodinâmico, força de rolagem dos pneus, forças de propulsão etc) e como funciona a comunicação entre essas informações com as obtidas através da lógica do trânsito (se o veículo deve acelerar, frear, mudar de faixa), variando para isso a quantidade de motos e carros presentes na via (sua densidade). Os resultados esperados são o fluxo máximo de veículos na via, que também é o número de pessoas (pois cada veículo nesse trabalho transporta apenas uma pessoa), a velocidade média dos veículos na via, o desvio padrão da velocidade média, o consumo de combustível dos veículos e emissão de CO₂, além do custo mensal esperado para o dono do veículo. Essas situações também foram estudadas no trabalho do Garcia Neto (2014), e os resultados comparados em partes do texto.

Além dos resultados descritos acima, o trabalho também avalia de forma breve o comportamento de todas as variáveis descritas anteriormente quando há mudança da velocidade máxima da via, individualmente para carros e motos.

1.1 UMA BREVE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DO MODELO AUTÔMATO CELULAR EM ANÁLISE DE TRÁFEGO

Os modelos autômatos celulares (*cellular automata* em inglês ou CA) podem ser considerados como modelos microscópicos que usam uma lógica simples que pode permitir ao computador a realização de milhares (ou milhões) de operações em um segundo, sendo utilizado em diversas áreas do conhecimento para obtenção de resultados confiáveis em curto espaço de tempo. Mesmo sendo relativamente simples, esse modelo pode ser usado para simular o tráfego em uma grande cidade, a reprodução de microrganismos em um meio competitivo ou a cinética de uma reação química, por exemplo. Na análise do tráfego, uma das vantagens do modelo

CA é a simplicidade para obter resultados aceitáveis do ponto de vista macroscópico, enquanto uma de suas desvantagens é a falta da análise detalhada do motor e do modelo do veículo (*i.e.*, das forças que atuam sobre o veículo) (BHAM, 2002). Lembramos que esse trabalho tem como objetivo integrar esses modelos.

O primeiro registro do uso do modelo CA para análise de tráfego foi em 1992. Nagel e Schreckember propuseram analisar o tráfego usando um modelo de autômatos celulares conhecido atualmente como modelo NaSch. Esse modelo considera os principais aspectos do tráfego e reproduz alguns dos fenômenos que ocorrem no trânsito, como a aceleração do veículo quando não há outro em uma célula em sua frente, ou a necessidade de frenagem quando há um veículo na frente com velocidade inferior à do veículo estudado. O modelo NaSch considera apenas o fluxo de automóveis e apenas uma faixa no trânsito (SOUZA & VILAR, 2009).

Vilar & Souza (1994) revisaram o modelo do NaSch, estudando de forma específica o que ocorria com o comportamento dos veículos para resultados em densidades intermediárias de automóveis. É interessante verificar que essa região é a mais comum, pois o tráfego se comporta de forma heterogênea em função do espaço (local da pista estudada) e do tempo. Vilar e Souza (1994) também estudaram o tempo mínimo de simulação e o comprimento mínimo da pista para a obtenção de resultados de forma que os mesmos não possuíssem variação entre si, quando analisado sob as mesmas condições iniciais.

Emmerich e Rank (2015) ampliaram os conhecimentos na área verificando o comportamento do tráfego quando existem obstáculos na pista. Dessa forma, puderam verificar no diagrama fundamental (gráfico do fluxo de veículos em função da densidade de veículos) o comportamento das curvas de fluxo de veículos quando o trânsito está ocorrendo de forma livre e/ou congestionada. Aycin & Benekohal (1998) compararam os resultados obtidos em suas simulações com testes simulados em campo e no final obtiveram alta correlação entre os resultados.

Até esse ponto, as análises realizadas eram de fluxo de automóveis e velocidade média. É possível notar que a presença de outros veículos não era considerada nesse modelo. Lan e Chang (2005), percebendo esse aspecto, decidiram considerar a existência de motos e carros em um percurso com a

motivação de que o fluxo misto é comum em vários países em desenvolvimento na Ásia.

No mesmo ano, os indianos Arazan e Koshy (2005) baseando-se em situações de tráfego misto com alta heterogeneidade de veículos, verificaram que menores veículos tem a tendência de se deslocar com maior velocidade média, pois aproveitam os espaços disponíveis da pista, enquanto que os veículos maiores terão menor velocidade média devido à falta de espaço.

Em 2007, Meng *et al.* (2007) escreveram o artigo usado como base nesse trabalho. Em seu artigo “*Cellular automaton model for mixed traffic flow with motorcycles*” estudaram o comportamento do tráfego misto, composto por automóveis e motocicletas com diferentes velocidades máximas entre si. Os carros têm velocidade máxima limitada a 10 células por segundo (i.e., 135 km/h) e as motos podem ter velocidade no máximo de 4 células por segundo (i.e., 54 km/h), representando o que ocorre no trânsito chinês. Em seu trabalho, obtiveram dados como fluxo de motos e automóveis para diversas densidades de automóveis e o percentual de troca de faixa entre os veículos.

Também estudando tráfego misto entre carros e motos, Lan *et al.* (2010), estudaram de forma específica o comportamento das motos nos corredores de veículos. Essa situação é comum no trânsito das cidades asiáticas em expansão e também no caso brasileiro. Em sua análise foi criada uma malha mais refinada e a consideração de que as motos, em velocidade quase nula, podem atravessar os carros de forma perpendicular à direção da pista.

Também em situações heterogêneas de tráfego, Vasic e Ruskin (2012) consideraram o comportamento do tráfego misto incluindo bicicletas no trânsito, estudando como se comportam os veículos (automóveis e bicicletas) em situações com interseções. Nesses estudos é considerado que não haverá acidentes nesses eventos, e os motoristas, assim como os ciclistas sempre seguem as leis e respeitam o próximo.

Além do fluxo de veículos e velocidade média, Mendes *et al.* (2015) estudam o comportamento do consumo específico de combustível em motocicletas em Portugal. Apenas 3% da frota de veículos portuguesa é composta por motocicletas, mas os resultados reconhecem que o consumo específico das motos é menor do

que o dos carros, informando que a inserção de motos pode ser vista como importante alternativa para redução do consumo específico de combustível de um país.

Aggarwal e Jain (2016) estudaram a demanda de energia (consumo específico do veículo) e da emissão de CO₂ para cinco diferentes cenários. Na discussão dos resultados, a diferença entre os casos extremos podem gerar até 48% de redução da emissão de poluentes. Lembramos que esse trabalho relaciona o consumo de combustível com a emissão de CO₂, mas essa análise é realizada de forma simples, e a análise mais precisa e correta da emissão de gases poluentes e de efeito estufa (como NO_x, SO_x, CO e hidrocarbonetos) necessitarão de análise mais profunda. Além disso, como visto na introdução, as motos não possuem o mesmo padrão de emissão do que os automóveis, e proporcionalmente as motocicletas podem emitir mais poluentes quando comparados a um automóvel, Essa análise mais complexa não será realizada em mais detalhes nesse texto.

Para o cidadão comum, entretanto, a emissão de gases de efeito estufa, ou o fluxo de veículos na via, não é uma métrica tão importante quanto o conforto ou o quanto ele deverá gastar durante o mês com a aquisição, manutenção e operação do veículo, e não é um fator crucial para a compra do veículo.

Além de não considerar o custo de emissão de poluentes, o custo de acidentes, em geral, não é levado em consideração quando se escolhe um veículo. Tsai *et al.* (2015) estuda o custo envolvido para automóveis e motocicletas em tráfego misto informando que é inserida uma variável para simular a possibilidade e o custo de acidentes, dos quais os motociclistas estão mais propensos. Esse trabalho também não considera o custo dos acidentes, mas é extremamente necessário lembrar a alta quantidade de acidentes que ocorrem no país, e que poucas ações efetivas são realizadas para efetivamente minimizar a quantidade de acidentes ocorridos.

Garcia Neto (2014) em sua dissertação estudou o comportamento do tráfego misto quando se integra motor, veículo e tráfego, realizando dessa forma uma análise multiescala e multifenômeno. Foi estudado em seu trabalho o fluxo de veículos, velocidade média, consumo de combustível, emissão de dióxido de carbono e custos associados ao transporte. O trabalho do Garcia Neto (2014) é

utilizado como base para esse trabalho, em conjunto com o artigo de Meng *et al.* (2007).

1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é estudar o tráfego misto de motocicletas e automóveis, analisando o fluxo de veículos, consumo energético, emissão de CO₂ e custos. A metodologia é fortemente baseada em Garcia Neto (2014), que por sua vez usou o modelo do tráfego de Meng *et al.* (2007). A metodologia considera a análise em três escalas (motor, veículo, tráfego) e no fim é realizado uma análise global. São simuladas diversas condições, variando a densidade de automóveis e motocicletas e suas velocidades máximas.

Para tanto, foram buscados os seguintes objetivos específicos:

- Determinação dos critérios de parada [escala do veículo];
- Simulação de um maior número de densidades [escala do tráfego];
- Simulação de diferentes velocidades máximas [escala do tráfego];
- Aprimoramento do cálculo do consumo energético, emissão de CO₂ e custos mensais [análise global];
- Discussão dos resultados;

1.3 ESCOPO DO TRABALHO

O presente trabalho contém diversas variáveis, métricas e escalas. Por isso, é importante delimitar o que deve ser estudado. É importante frisar que decidimos trabalhar com as características mais próximas do tráfego brasileiro, usando para isso um modelo autômato celular com tráfego misto de carros e motos. Não incluímos outros veículos como ônibus, caminhões e bicicletas. As simulações refletem de forma aproximada a realidade, mas apenas para um modelo de carro e

moto. Também não houve a validação dos resultados, em especial, pela falta de *know-how* e equipamentos apropriados.

O modelo autômato celular selecionado (modelo de Meng *et al.*, 2007) se baseia no tráfego chinês, onde os veículos mais rápidos *devem* andar na faixa da esquerda, enquanto que se estiverem em menor velocidade *devem* trafegar na faixa da direita igualando-se às velocidades das bicicletas que transitam nessa faixa. Na China, essa lei é seguida. No Brasil isso pode não acontecer devido às características peculiares da cultura nacional e de sua legislação. Além disso, nesse modelo estudamos apenas duas faixas para o tráfego do veículo, o que também é uma limitação, visto que diversas ruas e avenidas possuem três ou mais faixas.

Escolhas importantes foram feitas no modelo de veículo. Para representar a média da população consideramos o Fiat Palio 1.0 e a Honda CG 125. Um dos motivos dessa escolha é porque eles foram os veículos mais vendidos do Brasil em 2014, e também foram estudados no trabalho do Garcia Neto (2014). Dessa forma os resultados seriam possíveis de serem comparados. Não levamos em consideração nas análises a influência de veículos mais antigos e/ou mais pesados, ou veículos com maior potência.

Foi necessário modelar o motor de ambos os veículos, mas não possuíamos as configurações reais de desempenho, pois em geral essas informações são confidenciais. Usamos uma curva empírica fornecida por BEN-CHAIM *et al.*, (2013) que abrange de maneira satisfatória veículos com diferentes potências. Os motores do carro e da moto foram modelados dessa forma.

Na modelagem do veículo (das forças que atuam sobre o mesmo) consideramos que todo o percurso é realizado em uma estrada sem inclinação, que há ausência de vento em qualquer direção do veículo durante todo o percurso, e que variáveis como coeficiente de arrasto, fator de atrito e coeficiente de rolagem são constantes durante todo o percurso.

Em relação ao tráfego, utilizamos o modelo de Meng *et al.* (2007), autômato celular, que modela sua pista como uma reta com 7,5 km de comprimento (2.000 células de 3,75m) sem interseções, bifurcações ou paradas. Os veículos se movem nessas células em velocidades discretas, e a movimentação do veículo é realizada sem a “pergunta” se realmente o movimento é possível (na vida real) de ser

executado no tempo solicitado. Na situação com altas velocidades, o resultado difere bastante da realidade caso não exista uma correção dos resultados.

Na parte da análise econômica, foram consideradas as taxas de juros, cotação do dólar, e valores de venda e compra dos veículos como os valores reais (obtidos de fontes *online*: BOVESPA, Tabela FIPE) referentes às datas e prazos estudados.

No estudo da emissão é avaliada apenas a emissão de CO₂, relativo à conversão direta do consumo do combustível (gasolina) com eficiência de 100%. Não considerando os outros poluentes gerados SO_x, NO_x, hidrocarbonetos e fuligem restante. O combustível é composto apenas por iso-octano (C₈H₁₈) e não há proporção de álcool na mistura.

Não é avaliado o comportamento da quantidade de acidentes, principalmente para os motociclistas, em função da variação da proporção dos veículos (carros/motos) e/ou da velocidade máxima de cada veículo. O estudo desse tema é muito importante, mas não foi abordado nesse trabalho.

O deslocamento através de veículos provoca diversas alterações na área urbana, como a existência de acidentes, poluição sonora e auditiva, congestionamentos, mas também é responsável pela melhoria de qualidade de vida e organização da sociedade, possibilitando meio de transporte entre residência, trabalho, escola e locais de lazer. Enfatizamos, assim, que o importante não é que a via possua maior fluxo de veículos (carros e/ou motos) como muitas vezes pode parecer implícito nesse trabalho. O fluxo de pessoas é a variável mais importante e deve ser o centro das atenções quando estudando, modelando ou alterando o sistema de transporte em uma cidade. Nesse trabalho, carros e motos transportam apenas uma pessoa, e dessa forma, os resultados para uma via podem ser obtidos de maneira proporcional caso se deseje calcular com um valor médio de pessoas em cada tipo de veículo.

A melhoria no fluxo de pessoas e do sistema de transporte de uma cidade será possível apenas se forem feitos esforços para desenvolver e incentivar o uso do transporte público, o qual possibilita o transporte de maior quantidade de pessoas.

Neste primeiro capítulo, apresentamos a introdução, uma breve revisão bibliográfica do modelo de tráfego utilizado, os objetivos do trabalho e seu escopo. No Capítulo 2, veremos a fundamentação teórica, com ênfase nas equações empíricas usadas no modelo do motor, nas forças atuantes sobre o veículo e principalmente no modelo de tráfego (MENG *et al.*, 2007). O Capítulo 3 desenvolve a metodologia, tanto o que já havia sido exposto em Garcia Neto (2014) quanto à parte desenvolvida na presente dissertação. Os resultados são apresentados e discutidos no Capítulo 4. Nas Conclusões, há um breve resumo do trabalho e dos resultados mais importantes. O trabalho termina com vários Apêndices detalhando os resultados das simulações para outras velocidades máximas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O trabalho utiliza um modelo geral que pode ser separado em quatro modelos menores: modelo do motor, modelo do veículo, modelo de tráfego e modelo de análise global. Por se tratar de um trabalho multidisciplinar (*i.e.*, envolvendo o estudo de motores, veículos, tráfego, com análise técnica, financeira e ambiental) e por usar modelos propostos por outros autores (*e.g.*, Meng *et al.* (2007), Garcia Neto (2014) e Cunha (2016)), faremos neste capítulo uma breve fundamentação teórica, que posteriormente será aprofundada na metodologia.

2.1 MOTOR

O motor é o responsável por converter a energia armazenada (*e.g.*, energia química dos combustíveis, baterias ou alimentos) em energia mecânica. Pode ser um motor de combustão interna, motor elétrico ou o corpo humano. Neste trabalho iremos considerar apenas os motores de combustão interna, por serem mais comuns na atualidade, muito embora a modelagem aqui utilizada sirva para qualquer tipo de motor. O que é necessário na presente modelagem, independentemente do tipo de motor, é conhecer como a potência e o rendimento variam com a rotação e com a carga.

2.1.1 Motores de combustão interna

O motor de combustão faz parte do grupo das máquinas térmicas, que convertem energia térmica em energia mecânica e calor. A energia térmica é proveniente da combustão de uma mistura de combustível e comburente. Os combustíveis principais são a gasolina, etanol ou diesel, e o comburente é o ar, cujo oxigênio presente é elemento fundamental para reação.

Os motores de combustão interna são utilizados em automóveis, motos, caminhões, aviões, e demais veículos que transportam produtos e/ou pessoas. Esses motores também podem ser usados para a produção de eletricidade ou

serviços diversos como bombeamento de água, produção de ar comprimido, trituração entre outros (MARTINS, 2013).

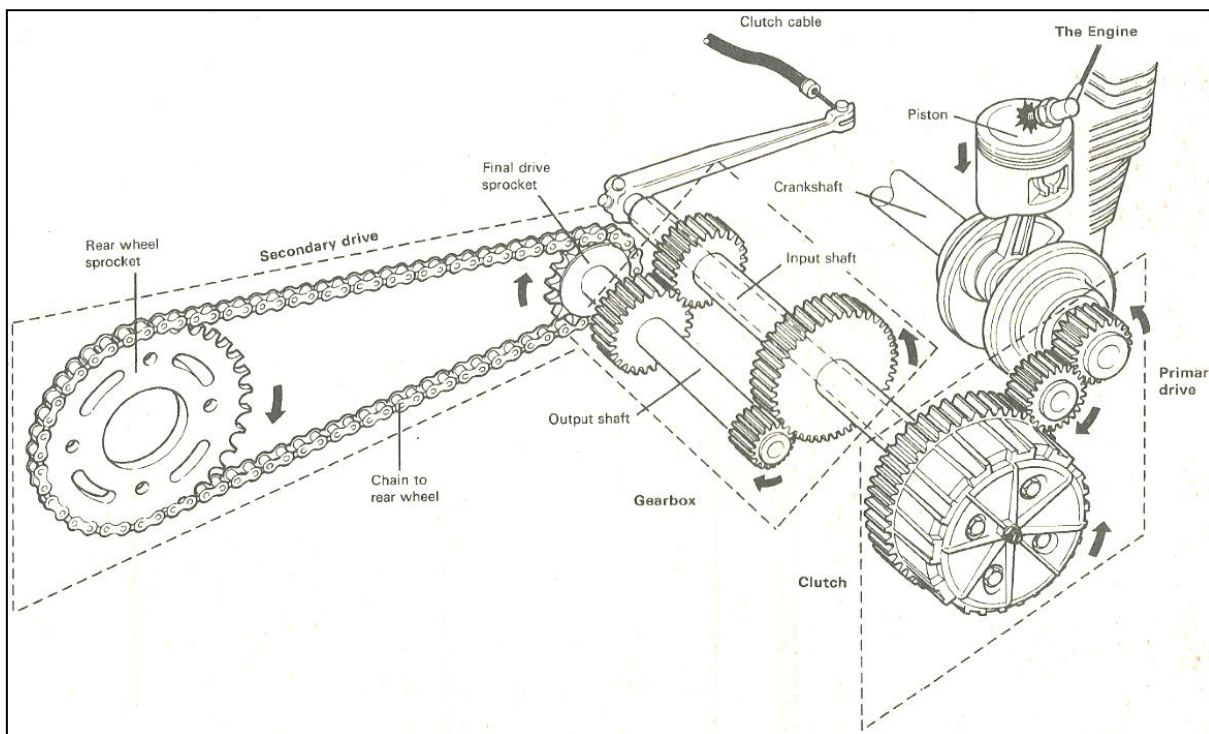
Criado na segunda metade do século XIX, o motor de combustão interna é considerado uma das invenções mais importantes da humanidade. No início do século XX, a criação de um motor era totalmente empírica. Atualmente, métodos computacionais avançados, sistemas de garantia de qualidade e técnicas de medição são usados para projetar e desenvolver motores com maior rendimento e economia (FERGUSON; KIRKPATRICK, 2016). A grande vantagem do motor de combustão interna é o seu combustível, fácil de abastecer e com alta densidade energética. Alguns pontos negativos relacionados ao motor de combustão interna são a poluição atmosférica, baixo rendimento do motor, peso, complexidade e custo.

A poluição atmosférica é frequentemente associada aos produtos da reação de combustão, na forma de óxidos de carbono, enxofre e nitrogênio, sendo considerada como um dos pontos negativos de todo o processo (MARTINS, 2013). A emissão de poluentes é um dos principais fatores avaliados na fabricação de um veículo. Estima-se que a emissão diminuiu para aproximadamente 5% do valor emitido pelos motores fabricados há 40 anos (FERGUSON; KIRKPATRICK, 2016). Os poluentes são um problema local (doenças e deterioração de equipamentos) e o CO₂ é um problema global (associado às mudanças climáticas).

O rendimento máximo de um motor de combustão que utiliza gasolina está entre 30% a 36%, e o motor diesel (quatro tempos) tem rendimento máximo de 40% (BEN-CHAIM *et al.*, 2013; GENTA *et al.*, 2014). Isto é, de toda a energia disponível no combustível, mais de 60% é perdida na forma de gases aquecidos, no sistema de resfriamento e através de radiação e convecção (GENTA *et al.*, 2014). Motores elétricos, por exemplo, podem trabalhar com valores de eficiência acima dos 90% (LARMINIE; LOWRY, 2012; LEITMAN; BRANT, 2009).

Quando se considera tanto as perdas no motor quanto as perdas no veículo (aerodinâmica, transmissão e resistência à rolagem), a eficiência do veículo é bastante pequena, aproximadamente 0,5% para automóveis, 2% para motos e 10% para bicicletas (MAGNANI, 2016).

Figura 1 - Imagem simplificada da transmissão em motores de moto



FONTE (COOMBS, 2002)

Na Figura 1 é possível visualizar, de maneira simplificada, como funciona o motor e o sistema de transmissão nas motocicletas. A energia do combustível é usada para aumentar a pressão no cilindro, que empurra o pistão (*piston*) para baixo, movendo a biela, girando o virabrequim (*crankshaft*), e depois sendo transmitida à roda traseira (*rearwheel*). Um detalhe interessante é a caixa de marchas (*gearbox*), que permite mudar a relação de transmissão.

2.1.2 Modelo do motor

No trabalho proposto, o modelo do motor tem como objetivo principal informar o consumo de combustível em função do tempo, baseando-se na curva de potência, torque e mapa de eficiência do motor do veículo.

Há diversas formas de obter a curva da potência do motor de combustão interna: experimental, empírica e computacional. No caso experimental, o motor é analisado em um dinamômetro (é a forma mais precisa, embora seja cara, demorada, específica para um caso e necessite do motor já montado). Os modelos empíricos representam valores médios históricos de vários motores (são fáceis de

usar, mas são apenas aproximações e tratam de tecnologias existentes). Finalmente, os modelos computacionais permitem o estudo de novos projetos e de um grande número de configurações, mas carecem de uma cuidadosa validação.

No nosso caso, por falta de aparato experimental, preferimos usar um modelo empírico (NI; HENCLEWOOD, 2008) para descrever o motor (escolha feita na dissertação de Garcia Neto, 2014). Trata-se de um modelo cúbico que descreve a curva de potência do motor em função de sua rotação, para carros com diferentes faixas de desempenho.

Em geral os fabricantes não detalham a curva de potência de seus veículos, informando apenas dados gerais como potência máxima ($P_{\text{máx}}$), rotação na qual a potência máxima ocorre, torque máximo, rotação no qual o torque máximo ocorre, volume dos cilindros, taxa de compressão, número de cilindros, entre outros. A partir desses dados, Ni e Henclewood (2008) modelaram a curva de potência (P), equação 1, como função da rotação (ω), rotação do motor no torque máximo (ω_t) e rotação do motor na potência máxima (ω_p).

$$P = \frac{P_{\text{máx}}}{2 \omega_p^2} (3\omega_p - \omega_t)\omega + \frac{-P_{\text{máx}}}{2 \omega_p^2 (\omega_p - \omega_t)} (\omega - \omega_t)^2 \omega \quad (1)$$

Neste trabalho (seguindo GARCIA NETO, 2014), modificamos a equação 1 considerando dois limites, um inferior quando a rotação é mínima, na qual a potência é considerada constante (modelando assim a embreagem quando em situações de largada de veículo), e um limite superior, que é o caso no qual a potência é considerada nula (pois há o corte do motor).

Para o rendimento, escolhemos o modelo empírico de Ben-Chaim *et al.* (2013), que consideram que o rendimento do motor, η , é função da carga (μ_p) e da rotação do motor (μ_n), dado na equação 2.

$$\eta(P, \omega) = \eta_0 \mu_p \mu_n \quad (2)$$

Onde o termo η_0 é uma constante que representa o rendimento máximo do motor, μ_p indica o desempenho do motor em relação à carga (relação entre a potência instantânea em relação à potência máxima para aquela rotação), e o termo μ_n leva em consideração a rotação do motor. As correções relacionadas à carga e à rotação

são cúbicas, dadas nas equações 3 e 4, onde P_i representa a potência instantânea do motor e $P_{m\acute{a}x}$ representa a potência máxima (BEN-CHAIM *et al.*, 2013).

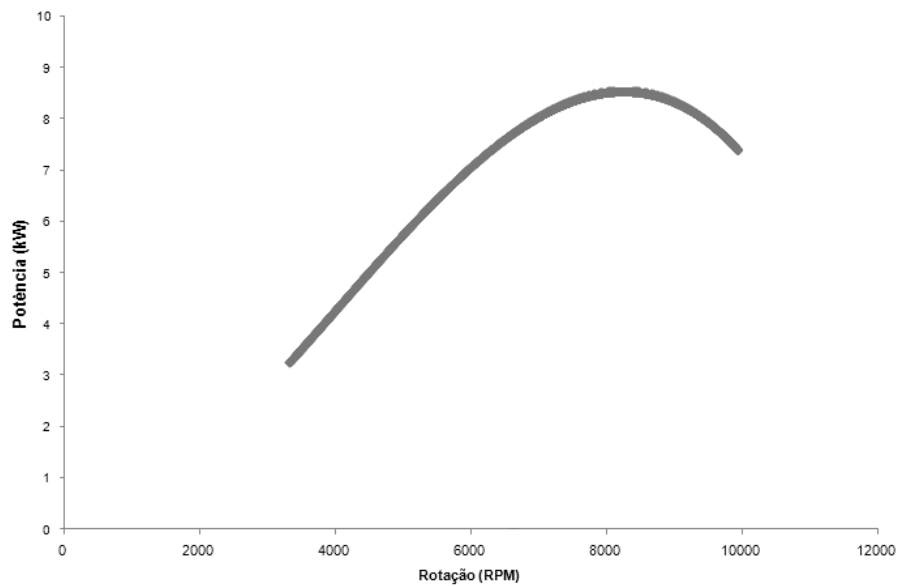
$$\mu_p = 0,234 + 1,0592 \left(\frac{P_i}{P_{m\acute{a}x}} \right) + 0,8149 \left(\frac{P_i}{P_{m\acute{a}x}} \right)^2 - 1,2121 \left(\frac{P_i}{P_{m\acute{a}x}} \right)^3 \quad (3)$$

$$\mu_n = 0,7101 + 0,9963 \left(\frac{P_i}{P_{m\acute{a}x}} \right) + 1,0582 \left(\frac{P_i}{P_{m\acute{a}x}} \right)^2 + 0,3124 \left(\frac{P_i}{P_{m\acute{a}x}} \right)^3 \quad (4)$$

Em situações de baixa rotação do motor, o rendimento e o torque diminuem devido à perda térmica por curso do pistão. Nos casos de alta rotação, o rendimento diminui devido ao maior atrito mecânico.

A curva da potência para uma marcha específica se comporta como na Figura 2.

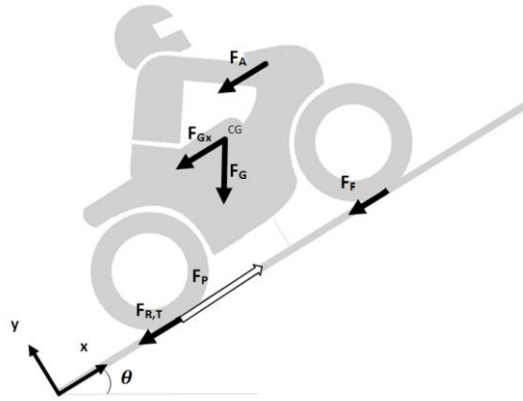
Figura 2 - Exemplo de curva de potência em motos



2.2 VEÍCULO

O modelo do veículo descreve o balanço de forças sobre o qual o veículo está submetido, permitindo a determinação do seu movimento. A Figura 3 ilustra como as forças atuam sobre o veículo durante seu movimento.

Figura 3 - Ilustração das forças atuantes sobre o veículo



Fonte: Adaptado de CUNHA (2016)

Para obtenção da força (F) na qual o veículo está submetido é necessário somar todas as forças envolvidas individualmente. A equação 5 contém os termos envolvidos em sua forma simplificada, e a equação 6 mostra as forças em sua forma diferencial.

$$F = F_P + F_F + F_A + F_R + F_G \quad (5)$$

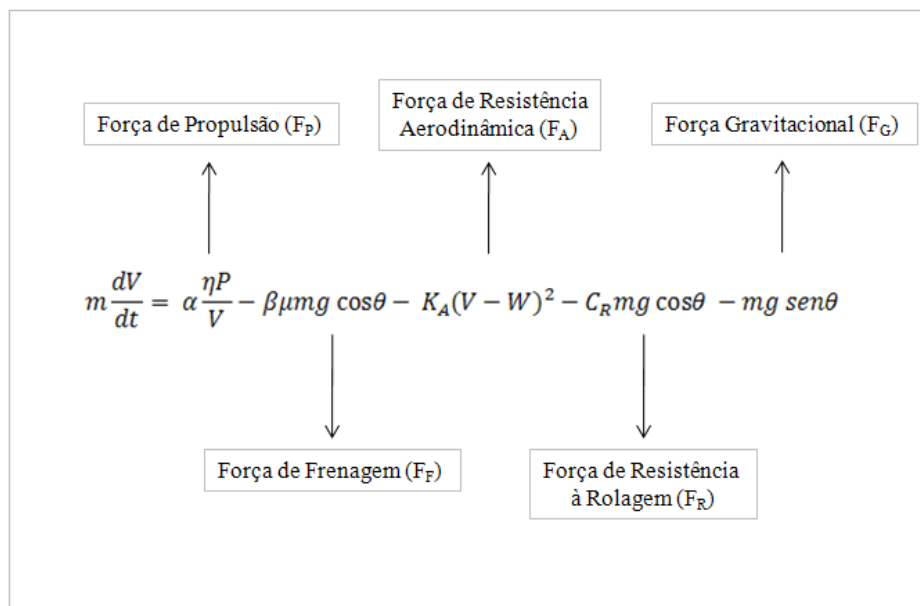
Onde:

- F : Força resultante
- F_P : Força de propulsão
- F_F : Força de frenagem
- F_A : Força de resistência aerodinâmica
- F_R : Força de resistência à rolagem
- F_G : Força de resistência gravitacional devido à inclinação θ

$$m \frac{dV}{dt} = \alpha \frac{\eta_{trans} P}{V} - \beta \mu_{RD} mg \cos \theta - K_A (V - W)^2 - C_R mg \cos \theta - mg \sin \theta \quad (6)$$

A Figura 4 relaciona os termos de força detalhados na Equação 6 com os da Equação 5.

Figura 4 - Ilustração das forças envolvidas na equação



É importante ressaltar que neste trabalho consideramos o veículo como um ponto material, não fazendo diferença em que posição a força está sendo aplicada. O correto posicionamento das forças é importante para o estudo de fenômenos indesejáveis, como *stoppie*, *wheelie*, travamento das rodas e perda de adesão, mas não é necessário para o cálculo do consumo energético. Para um tratamento mais completo, que considera as forças aplicadas em diferentes pontos (centro de gravidade, centro de pressão, roda dianteira e roda traseira), consultar Cunha (2016).

Percebe-se na equação 6 que para que o veículo acelere, é necessário que o termo positivo relacionado à potência do motor seja maior do que todos os demais termos negativos presentes. Os termos negativos indicam forças agindo no sentido contrário ao do movimento do veículo e são chamadas de forças resistivas, enquanto que o termo positivo é chamado de força de propulsão. Há casos especiais (descida, vento em popa) em que as chamadas forças resistivas ajudam o movimento, mas nas explicações a seguir iremos sempre considerar os casos em que essas forças dificultam o movimento.

2.2.1 Força de propulsão

Das forças estudadas na equação 6, F_P é a única que se apresenta com sinal positivo. Contém o termo da potência máxima possível do motor no instante estudado (P), a eficiência da transmissão do sistema (η_{trans}), um termo de aceleração do veículo (α) entre 0 e 1 no qual 0 é a situação sem aceleração e 1 com total aceleração, e a velocidade do veículo (V).

$$F_P = \alpha \frac{\eta_{trans} P}{V} \quad (7)$$

2.2.2 Força de frenagem

A força da frenagem contém em sua composição um termo β que considera o uso do freio pelo motorista/piloto, entre 0 e 1, o coeficiente de atrito entre o pneu do veículo e a pista (μ_{RD}) e a componente do peso do veículo.

$$F_F = \beta \mu_{RD} mg \cos\theta \quad (8)$$

2.2.3 Resistência à rolagem

A resistência à rolagem ocorre principalmente pela deformação do pneu e do piso (no caso de areia). Outros fatores em geral menos importantes que contribuem para essa resistência são o atrito interno e o amortecimento. Neste trabalho consideraremos a resistência à rolagem constante, sendo proporcional ao seu peso. Os fatores que mais influenciam o coeficiente de rolagem são o tipo e a pressão do pneu, bem como o piso (COSSALTER, 2006). Uma forma simples de encontrar o valor do C_r (Coeficiente de Rolagem) de um veículo é empurrando-o para obtenção da força necessária para movê-lo em velocidade muito baixa, aproximadamente 2

km/h, de forma constante (LARMINIE; LOWRY, 2012; MORCHIN; OMAN, 2006). A partir de todos os dados, temos que a força de resistência à rolagem (ou rolamento) é determinada pela equação 9:

$$F_R = C_r m g \cos \theta \quad (9)$$

Valores típicos para o coeficiente de resistência à rolagem em automóveis e motos são na faixa de 0,02, enquanto que em bicicletas os mesmos estão por volta de 0,01.

2.2.4 Resistência aerodinâmica

A força de arrasto aerodinâmico ocorre quando um corpo se move através do ar. É função da área frontal do conjunto moto/piloto e da área frontal do automóvel. Considera seu formato e protuberâncias (espelhos, dutos, passagens de ar e outros fatores). Durante o movimento em estrada, se houver vento, o mesmo pode agir em três direções do veículo: longitudinal, lateral e verticalmente. Apenas a longitudinal (vento frontal) é considerada neste trabalho.

A força de arrasto (F_A) influenciará principalmente a velocidade máxima do veículo, assim como seu desempenho durante a aceleração. A mesma é dada na equação 10.

$$F_A = \frac{1}{2} \rho C_d A (V - W)^2 \quad (10)$$

Onde:

C_d : Coeficiente de arrasto: adimensional. Exemplos de valores de coeficiente são 0,1 para corpos aerodinâmicos, 0,3 para um carro de passeio, 0,6 para uma motocicleta esportiva, 0,8 para um ciclista em bicicleta recumbente e 1,0 para ciclista e motocicletas em posição normal.

ρ : Densidade do ar: massa de fluido por unidade de volume: para o ar, tem valor de 1,204kg/m³ à temperatura de 20°C à pressão de 1 atm. Varia de acordo com a altitude e temperatura do local estudado.

V : Velocidade do veículo (m/s).

W: Velocidade do vento (m/s) considerada como negativa caso o vento esteja na direção oposta do movimento do veículo, e positiva na direção do veículo, ajudando no movimento do mesmo.

A: Área frontal do veículo (m²).

A potência de arrasto aerodinâmico durante a viagem pode ser encontrada na equação 11.

$$P_A = F_A V \quad (11)$$

Na equação 12, o termo K_A pode ser usado para resumir a equação, composto por termos da equação da força de arrasto que podem ser constantes para situações determinadas.

$$K_A = \frac{1}{2} \rho C_d A \quad (12)$$

A área A é a área frontal do conjunto piloto/veículo ou do automóvel, e é influenciada pelo design do mesmo. Veículos da mesma categoria podem apresentar área frontal diferente.

A área do piloto de bicicleta ou motocicleta é afetada pela posição da condução. Quando o piloto está agachado haverá uma redução na área frontal e na força de arrasto ao qual está submetido, quando comparado à situação onde o piloto se encontra em pé ou sentado. Dessa forma, com mesma potência da motocicleta, serão obtidos diferentes valores de velocidade final dependendo da posição de condução do veículo (COCCO, 2004).

2.2.5 Força resistiva ao subir inclinações

A força resistiva que atua nas inclinações é simplesmente o componente do peso do veículo que age na direção da inclinação. Partindo da equação de forças, temos que para uma inclinação (θ), a força é dada na equação 13.

$$F_G = mg \sen\theta \quad (13)$$

Onde: m = massa (kg).

g : aceleração da gravidade (m/s^2).

$\sen(\theta)$: seno do ângulo de inclinação do plano.

Devemos lembrar que a força é considerada contrária quando o veículo está em movimento ascendente, enquanto que se o mesmo estiver em movimento descendente na rampa, haverá auxílio para o corpo que ganhará velocidade com o decorrer do movimento.

De acordo com o DNIT, a inclinação (tangente) máxima em estradas é definida pelas Normas de Projeto de Estrada de Rodagem (DNIT, 1973). Em estradas de classe especial, com maior circulação horária de veículos, a inclinação máxima deve ser de 3% em regiões planas e 5% em regiões montanhosas. As inclinações podem chegar até no máximo de 8% em situações especiais da norma.

Na modelagem, consideramos que o carro e a motocicleta foram comprados novos e revendidos após 4 anos. O automóvel selecionado foi o Fiat Palio (1.0 ELX 1.0 Flex 8V 2p) e a moto foi a Honda CG (125 Cargo ES) (GARCIA NETO, 2014). Foram escolhidos esses veículos porque fizeram parte do trabalho do Garcia Neto, tornando possível uma comparação entre os resultados. O Fiat Palio e a Honda CG 125 foram os veículos mais vendidos em sua categoria no ano de 2014 (184 mil Fiat Palio e 162 mil CG 125).

2.3 TRÁFEGO

O tráfego é bastante complexo. Por exemplo, um simples buraco em uma via de 10 km pode diminuir seriamente o fluxo de veículos. Ainda, a descrição de um simples veículo pode ser bastante rica, com reacelerações, mudanças de pista etc. Em geral, estamos interessados em valores médios, e não nessas características individuais. Em outras palavras, precisamos simular o comportamento individual, mas queremos apenas o comportamento médio.

Existem softwares capazes de extrair informações da posição e tempo da trajetória de veículos a partir de um vídeo ou de fotografias, e as informações resultam em um conjunto de dados de trajetória dos veículos. De forma geral, a obtenção de dados é onerosa, devido a obtenção e instalação da câmera, ou do próprio software para extração dos dados. Outra forma que pode ser utilizada é chamada de “float”, em tradução livre “flutuar”. Alguns veículos são seguidos através de sua localização, por GPS, e a partir de suas distâncias e tempo decorrido obtém-se os Dados de Carro Flutuante (FCD – *Floating Car Data*), com um gráfico da distância percorrida em função do tempo. A partir dos gráficos gerados, informações como a localização, fluxo de veículos, densidade de tráfego e a velocidade média do tráfego podem ser obtidas de forma simples (TREIBER; KESTING, 2013). Em qualquer um dos casos, os dados obtidos individualmente são agrupados em períodos fixos de tempo Δt . A partir dos dados em função do tempo, temos as principais variáveis analisadas.

Fluxo de veículos $Q(x,t)$: O fluxo de veículos é definido como o número de veículos ΔN que passa uma seção transversal (x dentro de um intervalo de tempo Δt . A unidade de tempo é veículos/hora ou proporcional, em casos específicos. A equação 14 apresenta a definição de fluxo dada por Treiber e Kesting (2013), representando uma leitura local. No nosso, como veremos adiante, o fluxo será uma média em toda a pista. Treiber e Kesting (2013) discutem como passar do fluxo local para o médio espacial usando a média harmônica.

$$Q(x, t) = \frac{\Delta N}{\Delta t} \quad (14)$$

Velocidade média aritmética $V(x,t)$: A velocidade aritmética média (V) é a velocidade média ($v_n^{(m,c)}$) de ΔN veículos que passam na seção transversal durante o intervalo de tempo estudado, sendo também chamada de velocidade média temporal. Os sobrescritos c e m são utilizados para indicar carros e motocicletas, respectivamente.

$$V(x, t) = \frac{1}{\Delta N} \sum_{\alpha=\alpha_0}^{\alpha_0 + \Delta N + 1} v_n^{(c,m)} \quad (15)$$

Densidade do tráfego $\rho(x,t)$: A densidade do tráfego pode ser estimada a partir da relação hidrodinâmica.

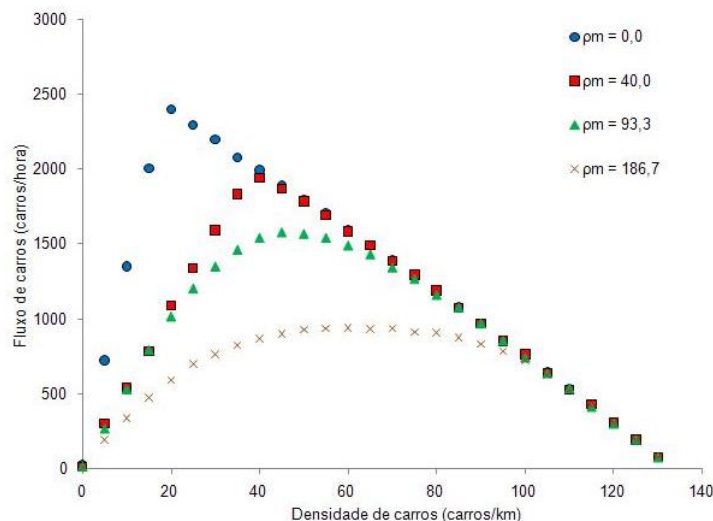
$$\rho^{(c,m)}(x,t) = \frac{Q(x,t)}{V(x,t)} \quad (16)$$

Após a coleta de dados, a visualização em gráficos possibilita a melhor compreensão do tráfego. Os dados são agregados em séries temporais de fluxo, velocidade e densidade, permitindo a compreensão do comportamento médio no segmento observado. Dentre os gráficos possíveis, o que contém o fluxo de veículos em função da densidade é chamado de diagrama fundamental do fluxo de veículos, contendo diversas informações sobre a dinâmica do local e situações estudadas.

Neste trabalho o eixo das abscissas sempre exibirá a densidade. Essa densidade pode ser: a) de automóveis, que é a unidade comum para quase todos os gráficos; b) de motocicletas, que não é utilizada nesse trabalho; e c) total, que apresenta a soma da densidade de automóveis e motos no sistema, usada especialmente quando trata a soma de todos os veículos presentes na via.

Na Figura 5 exibimos o fluxo de automóveis em função da densidade de automóveis em uma pista que contém carros e motos. Cada curva exibida no gráfico representa uma densidade de motos. São exibidas quatro curvas, para as densidades de motos de $\rho_m = 0,0$; 40,0; 93,3 e 186,7. Quanto maior a densidade, maior o percentual de motos na via.

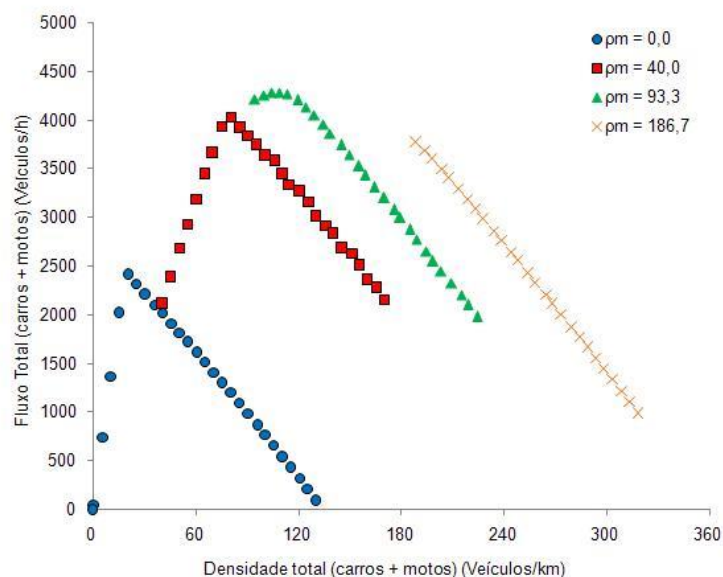
Figura 5 - Fluxo de automóveis em função da densidade de automóveis.



Quando se analisa a curva da Figura 5 para o caso sem motos ($\rho_m = 0,0$), percebe-se que para o fluxo de carros, a tendência inicial é que com o aumento da densidade de carros aumente o fluxo de automóveis, até um valor máximo ($Q \sim 2500$ carros e $\rho_c = 20,0$), após o qual há uma redução linear até o fluxo de carros zerar ($\rho_c = 130,0$). Isso ocorre porque na região ascendente da curva, um carro não atrapalha o outro, mas depois de alcançar a densidade no qual o fluxo é máximo, ocorre o congestionamento. Comparando com as outras três curvas ($\rho_m = 40,0, 93,3$ e $186,7$), vemos que quanto maior a densidade de motos, menor é o fluxo de carros quando comparados à situação sem motos ($\rho_m = 0,0$), porque as motos atrapalham os carros.

A Figura 5 mostra o fluxo do ponto de vista dos automóveis. Já a Figura 6 exhibe o que ocorre com o fluxo total de veículos na via (automóveis e motocicletas) em função da densidade total de veículos (automóveis e motocicletas), considerando as mesmas densidades de moto da Figura 5.

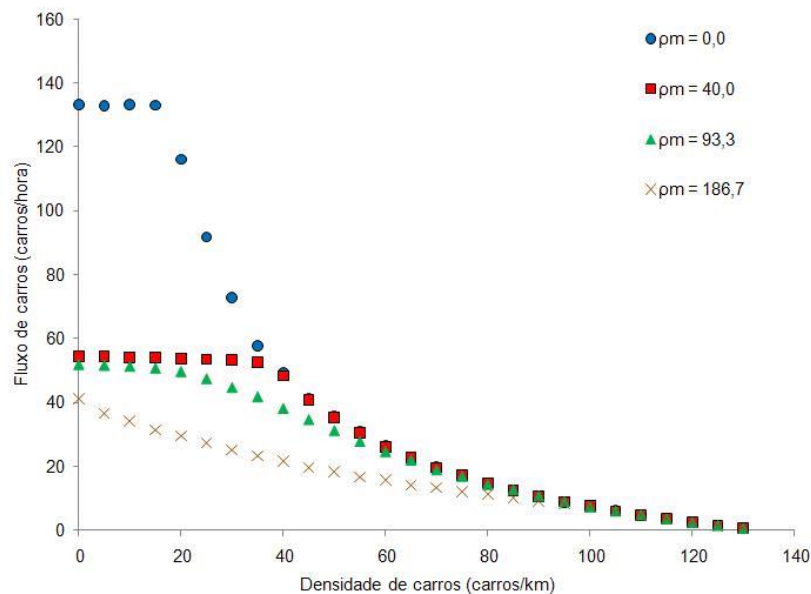
Figura 6 - Fluxo total de veículos em função da densidade total



Na Figura 6, a tendência é que na medida em que a quantidade de motos aumenta, também aumente o fluxo total de veículos (carros + motos na via) até um ponto máximo (curva $\rho_m = 93,3$). Isto é, o aumento da densidade de motos, em algumas situações, contribui para a elevação da quantidade total de pessoas que transitam na via, embora diminua particularmente o fluxo de carros (Figura 5). Em uma

densidade elevada de motos ($\rho_m = 186,7$ motos/km) verificamos que há diminuição do fluxo total. Comparando a Figura 5 e a Figura 6, vemos que uma determinada ação (e.g., aumentar o número de motos) pode ser vista como ruim de um ponto de vista (dos automóveis) e como boa de outro ponto de vista (da sociedade), pois mais pessoas podem transitar a via no mesmo período de tempo.

Figura 7 - Velocidade média dos automóveis em função da densidade de carros



A velocidade máxima do carro é 10 células por segundo e da motocicleta é 4 células por segundo, com diferentes densidades de moto ($\rho_m = 0,0, 40,0, 93,3$ e $186,7$)

Outra informação relevante pode ser vista no gráfico da velocidade média em função da densidade de carros, que também é considerado como um diagrama fundamental. Na Figura 7 é possível verificar as regiões nas quais os carros não são atrapalhados pelos outros veículos ($0 < \rho_m < 20$) em que a velocidade permanece constante. O aumento da densidade de automóveis e também da densidade de motos influencia a velocidade média dos carros no sistema.

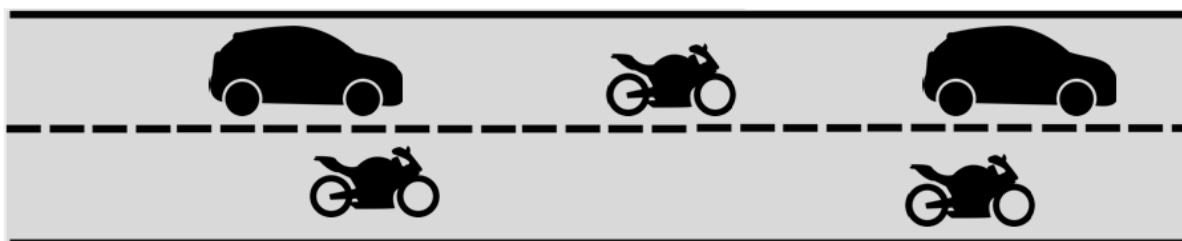
2.3.1 Modelo de tráfego de Meng

A pista do presente trabalho foi baseada na desenvolvida por Meng *et al.* (2007). A escolha por este modelo (feita por Garcia Neto, 2014) se deu pela característica do tráfego misto entre motocicletas e carros, situação comum do trânsito brasileiro. O modelo de Meng *et al.* (2007), por sua vez, é baseado no artigo de Nagel & Schreckenberg (1992). Este último tem apenas uma faixa e apenas um tipo de veículo.

Meng *et al.* (2007) modelam o trânsito chinês, Figura 8, onde por lei as motocicletas devem preferencialmente ocupar o lado direito da rua, havendo tráfego misto na pista da esquerda. No caso brasileiro não há essa lei, mas podemos fazer uma analogia, já que é comum as motos andarem ao lado dos carros (em geral na esquerda).

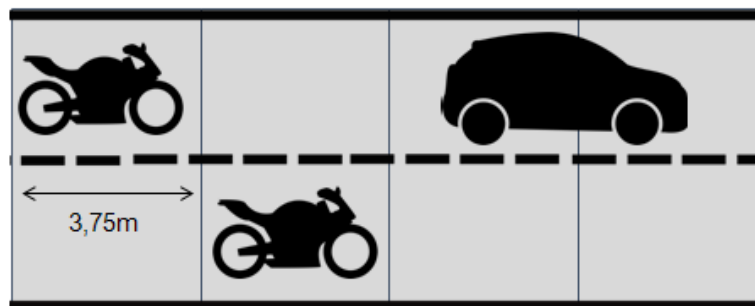
Como o objetivo principal deste trabalho (continuando o de Garcia Neto, 2014) é a integração dos modelos nas várias escalas, e não o desenvolvimento de um modelo de tráfego específico, usamos como critério de escolha um modelo de tráfego (1) que fosse misto e (2) que pudesse ser reproduzido pelo nosso grupo. No entanto, a metodologia geral pode ser facilmente adaptada a outros modelos de tráfego.

Figura 8 - Ilustração da pista modelada



Para Meng *et al.* (2007) a motocicleta ocupa um comprimento de 3,75 m, isto é, o seu comprimento mais um espaço reservado para manobras. Considerando que a motocicleta tem cerca de 2 metros de comprimento (e.g.: Honda CG 125 estudada tem 1,98m) o espaço livre à frente e atrás é de 1,75m (Figura 9).

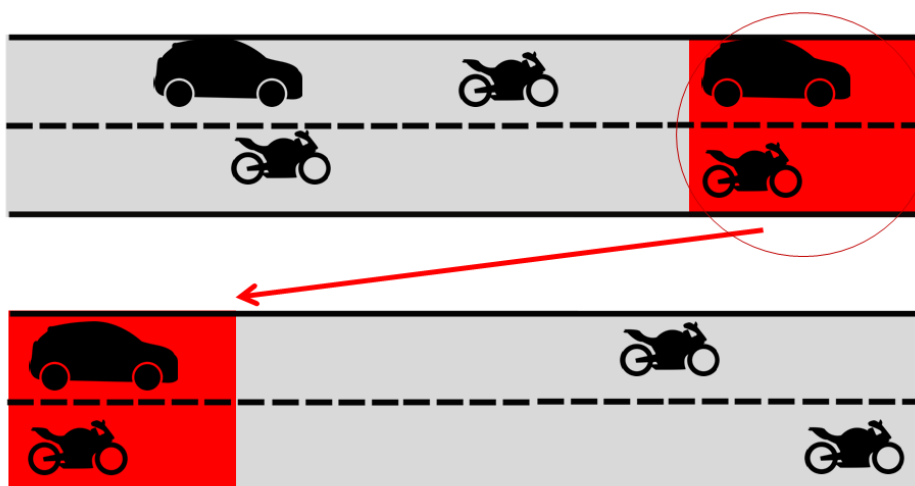
Figura 9 - Ilustração das células contidas na pista



Definiu-se que a moto ocupa uma célula e o carro ocupa duas células adjacentes, com comprimento total de 7,50 m. Em comparação, o comprimento do FIAT Palio 2011 é de 3,88m e de um carro sedan como o Honda Civic 2016 é 4,52m.

A pista modelada tem 2000 células, representando uma extensão de 7500m. Ao usarmos uma condição periódica de contorno, estamos retirando a influência da alimentação da pista (GARCIA NETO, 2014). Com essa condição, os veículos que chegam ao final da pista são colocados no início da pista na próxima iteração, ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Ilustração da condição de contorno



O passo de tempo da iteração é de um segundo. Então, como o tamanho das células é uniforme, os veículos podem ter apenas velocidades discretas múltiplas do tamanho da célula. A velocidade máxima para o carro no caso padrão, Meng *et al.* (2007), é $v_{\text{máx}}^{(c)} = 10$ células/passo de tempo (i.e. 135 km/h), e para motos $v_{\text{máx}}^{(m)} = 4$

células/passo de tempo (i.e. 54 km/h). A velocidade dos veículos varia em degraus de 13,5 km/h.

2.3.2 Regras do tráfego

Na pista, os veículos seguem a lógica informada por Meng *et al.* (2007). Para determinar o movimento realizado pelo veículo cinco passos são executados. A Tabela 1 e a Tabela 2 apresentam as variáveis e as parâmetros definidos por Meng *et al.* (2007), que também já haviam sido explicadas por Garcia Neto (2014). A seguir, apresentaremos essas regras de forma qualitativa apenas. Um ponto importante para destacar é que a faixa que Meng *et al.* (2007) chamam de ‘faixa do meio’ (VMSL: *virtual middle sub-lane*) será aqui chamada de ‘faixa da esquerda/pista1’, enquanto manteremos o nome da ‘faixa da direita/pista2’ (VRSL: *virtual right sub-lane*)

Tabela 1 - Lista de parâmetros de modelo do Meng

Parâmetro	Descrição
$v_{max}^{(m)}$	Velocidade máxima da motocicleta
$v_{max}^{(c)}$	Velocidade máxima do carro
$p^{(c)}$	Probabilidade de desaceleração para o automóvel
$p^{(m)}$	Probabilidade de desaceleração para a motocicleta
d	Número de espaços à frente do veículo que são visíveis

Fonte: Meng *et al.* (2007)

Tabela 2 - Lista de variáveis do modelo de Meng *et al.* (2007)

Variável	Descrição
$x_n^{(m)}$	Posição da n -ésima motocicleta na pista 1 ou na pista 2
$x_n^{(c)}$	Posição do n -ésimo automóvel
$v_n^{(m)}$	Velocidade da n -ésima motocicleta na pista 1 ou na pista 2
$v_n^{(c)}$	Velocidade do n -ésimo automóvel
gap_+	Espaços à frente de uma motocicleta na pista de destino ao trocar de pista
gap_-	Espaços atrás de uma motocicleta na pista de destino ao trocar de pista
$d_n^{(c)}$	Espaços entre o n -ésimo automóvel e o automóvel ou motocicleta à sua frente
$d_n^{(m)}$	Espaços entre a n -ésima motocicleta e o automóvel ou motocicleta à sua frente na pista 1 ou 2
$gap_-^{(mc)}$	Espaços entre a n -ésima motocicleta e o automóvel mais próximo atrás dela
v_{pista1}	Velocidade do automóvel ou da motocicleta na faixa da esquerda dada a visibilidade d
v_{pista2}	Velocidade da motocicleta na faixa da direita dada a visibilidade d

Fonte: Meng *et al.* (2007)

As regras para o trânsito que estão no artigo de Meng *et al.* (2007) são as seguintes:

- Passo 1: Trocas de faixa para as motocicletas

- Trocar da faixa da direita para a faixa da esquerda (apenas motocicletas)

Se $v_n^{(m)} \leq \text{gap}_+$ e $\text{gap}_- \geq v_{(m\acute{a}x)}^{(c)}$ e $v_{\text{pista2}} \leq v_n^{(m)}$ e $v_{\text{pista2}} \leq v_{\text{pista1}}$, então a motocicleta trocará de pista.

- Trocar da faixa da esquerda para a faixa da direita (apenas motocicletas)

Se $v_n^{(m)} \leq \text{gap}_+$ e $\text{gap}_- \geq v_{(m\acute{a}x)}^{(m)}$ e $\text{gap}_-^{(mc)} = 0$ ou $v_{\text{pista2}} \geq v_n^{(m)}$ ou $v_{\text{pista2}} \geq v_{\text{pista1}}$, então a motocicleta trocará de pista.

- Passo 2: Aceleração dos veículos (todos os veículos tentam atingir a velocidade máxima)

- Para os automóveis:

$$v_n^{(c)} \rightarrow \min(v_n^{(c)} + 1, v_{m\acute{a}x}^{(c)})$$

- Para as motos:

$$v_n^{(m)} \rightarrow \min(v_n^{(m)} + 1, v_{m\acute{a}x}^{(m)})$$

- Passo 3: Desaceleração dos veículos

- Para os automóveis:

$$v_n^{(c)} \rightarrow \min(v_n^{(c)}, d_n^{(c)})$$

- Para as motos:

$$v_n^{(m)} \rightarrow \min(v_n^{(m)}, d_n^{(m)})$$

- Passo 4: Aleatoriedade (redução aleatória da velocidade de alguns veículos)

- Para os automóveis:

$$v_n^{(c)} \rightarrow \max(v_n^{(c)} - 1, 0), \text{ com probabilidade } p^{(c)}.$$

- Para as motos:

$$v_n^{(m)} \rightarrow \max(v_n^{(m)} - 1, 0), \text{ com probabilidade } p^{(m)}.$$

- Passo 5: Movimento dos veículos.

- Para os automóveis:

$$x_n^{(c)} \rightarrow x_n^{(c)} + v_n^{(c)}$$

- Para as motos:

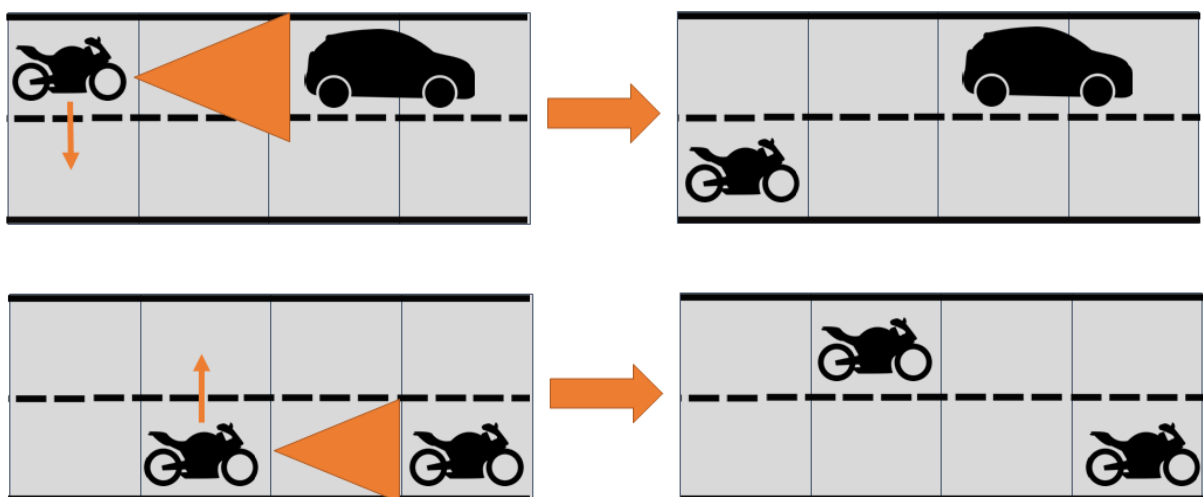
$$x^{(m)}_n \rightarrow x^{(m)}_n + v^{(m)}_n$$

Para ajudar na compreensão das regras do tráfego, descrevemos com breve explicação cada um dos passos vistos anteriormente.

- Passo 1: trocas de faixa para as motocicletas

Nessa etapa, as motocicletas decidem se preferem mudar de faixa. Caso assim decidam, elas se movimentam lateralmente, sem qualquer movimento para a frente. Esse movimento apenas lateral é fisicamente impossível, mas, na lógica utilizada os veículos só percorrerão a distância no final de todos os passos. Existe uma pequena diferença entre as motos da esquerda e da direita. Para uma moto decidir se quer mudar da direita para a esquerda, é preciso a) que ela tenha espaço à frente na pista da esquerda, b) que não venha um carro por trás na pista da esquerda, c) que ela esteja mais rápida que a moto à sua frente (na sua própria faixa da direita) e d) que o veículo à frente na pista da esquerda seja mais rápido que o veículo à frente na pista da direita. Já a moto que está na faixa da esquerda irá para a pista da direita seguindo as mesmas regras, com uma adicional, que é a propensão a mudar para a pista da direita se houver um carro atrás dela. A Figura 11 mostra alguns exemplos desses movimentos laterais ocasionados porque a outra faixa estava livre.

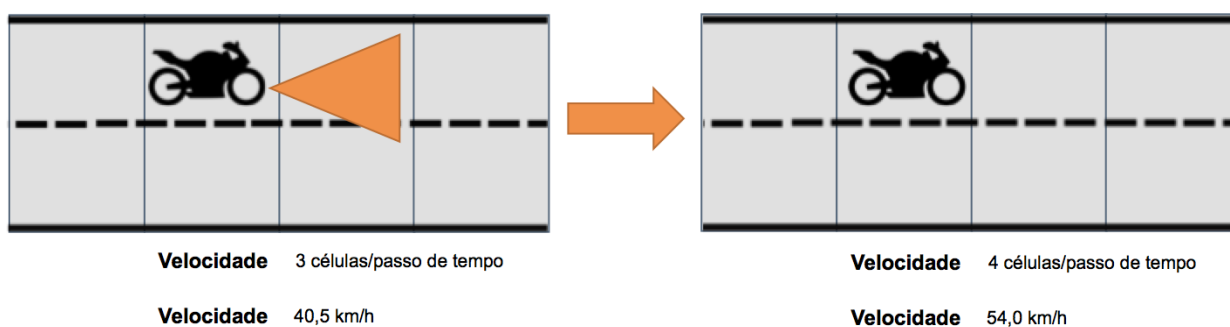
Figura 11 - Ilustração troca de pista para os veículos



- Passo 2: aceleração dos veículos (todos os veículos tentam atingir a velocidade máxima)

Neste passo, todos os veículos aceleram para a próxima velocidade possível (e.g., 37,5 km/h -> 54 km/h), até atingirem o máximo para o determinado veículo (motos 54 km/h e carros 135 km/h). O modelo, dessa forma, simula condutores que sempre desejam a máxima velocidade possível, o que nem sempre é verdade no trânsito real. A Figura 12 mostra que, neste passo, o condutor apenas decide que quer uma velocidade maior, mas o movimento ainda não é realizado.

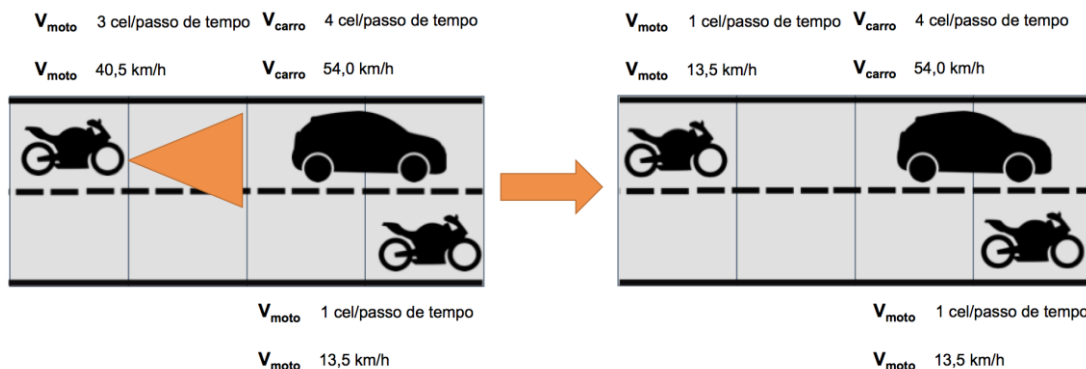
Figura 12 - Ilustração de condições para aceleração



- Passo 3: desaceleração dos veículos

No terceiro passo, os veículos, observando o veículo mais próximo à sua frente, desaceleram baseados na distância, evitando assim colisões. Importante ressaltar que eles não levam em conta a velocidade do veículo, como se “imaginassem” que o veículo à frente pode parar a qualquer momento. Essa regra faz com que a distância para o veículo à frente seja maior do que no trânsito real, no qual o condutor em geral pensa que o veículo à sua frente vai continuar em movimento. Na Figura 13 vemos o exemplo de uma motocicleta que reduz sua velocidade para não bater no carro à frente. Nessa etapa ainda não há o movimento dos veículos. Os condutores continuam apenas a decidir que velocidade que querem ter.

Figura 13 - Ilustração para desaceleração do veículo



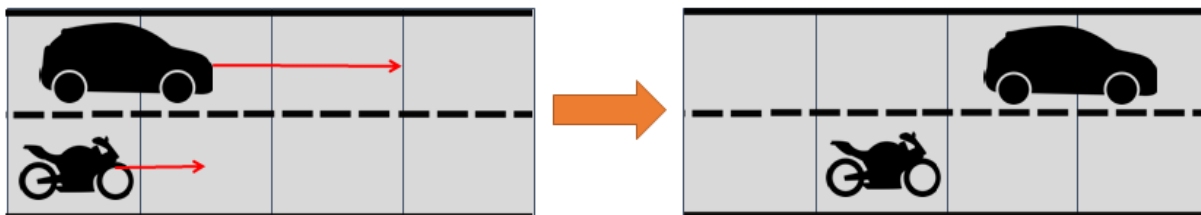
- Passo 4: Aleatoriedade (redução aleatória da velocidade de alguns veículos)

Para evitar que todos os veículos após determinado tempo andem com a mesma velocidade (como se fossem vagões de trem), inserimos um fator de aleatoriedade (0,001), que provoca uma pequena frenagem de tempos em tempos. O objetivo é simular o comportamento do trânsito real, no qual o condutor pode ter se distraído ou apenas reduzido a velocidade por vontade própria. Sem a randomização, os veículos chegariam rapidamente a um padrão estacionário (NAGEL; SCHRECKENBERG, 1992).

- Passo 5: movimento dos veículos

Uma vez decidida se haverá mudança de pista e a velocidade desejada pelo piloto (baseado nos outros veículos), finalmente o movimento é realizado. Todos os veículos se movem de maneira simultânea para a próxima localização (Figura 14). Um ponto muito importante para enfatizar é que neste modelo a nova velocidade é alcançada independente se o motor e o freio do veículo têm a potência necessária. Lembremos que a nossa metodologia permitiria que este modelo do tráfego “perguntasse” ao modelo do veículo qual seria o movimento real. O problema é que assim procedendo perderíamos a referência dos resultados do tráfego de Meng *et al.* (2007).

Figura 14 - Ilustração do movimento dos veículos

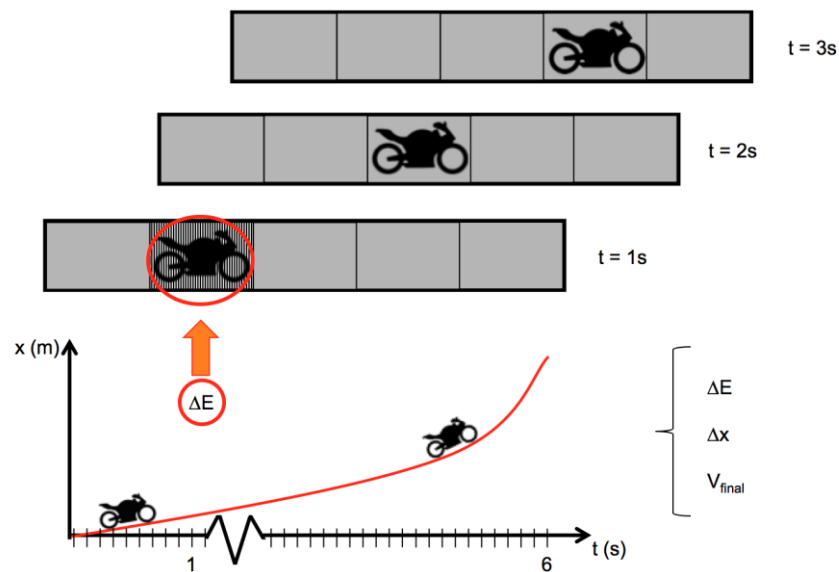


2.3.3 Malhas temporais e espaciais

Existem dois conjuntos de malhas espaciais e temporais nesse trabalho, uma para modelagem do veículo e outra para o tráfego. No modelo do veículo, discretizamos o tempo em passos uniformes, calculando a sua posição em cada instante (modelagem lagrangeana; observamos o veículo). No modelo do tráfego, a pista é discretizada com duas faixas paralelas com 2000 células cada uma (modelagem euleriana; observamos a pista). A Figura 15 mostra as duas malhas utilizadas. No presente trabalho, apenas o gasto energético do modelo do veículo é informado ao modelo do tráfego, embora tenhamos outras informações, como a posição final e a velocidade final. Essas duas informações não podem ser usadas pelo esquema de autômato celular, que demanda posições e velocidades discretas. Em outros trabalhos realizados pelo LOST (Laboratório de Otimização em Sistemas Térmicos e Estudos em Duas Rodas), há ainda uma terceira malha, que discretiza a operação interna do motor, mas não está sendo utilizada aqui. Ainda, estamos desenvolvendo um modelo do tráfego que utiliza corretamente a posição e a velocidade determinada pelo modelo do veículo.

Para se ter uma ordem das grandezas, em um exemplo específico, cada passo de tempo na malha do motor é de $16,66 \times 10^{-6} \text{ s}$ (3600 rpm, 1000 divisões por rotação), na malha do veículo é $1 \times 10^{-3} \text{ s}$ (1s em 1000 divisões), e na malha de tráfego é de 1s. Essa grande diferença de tempos relevantes para os fenômenos nas diferentes escalas facilita bastante o desacoplamento desses. Para não ter que recalcular as escalas inferiores o tempo todo (evitando repetições desnecessárias), os valores de cada modelo são integrados, armazenados em um vetor ou em uma função ajustada, e então servidos ao modelo superior conforme demandado.

Figura 15 - Ilustração de relacionamento entre as malhas



2.4 MATEMÁTICA FINANCEIRA

O sucesso de um projeto depende de vários fatores: técnicos, sociais, econômicos e ambientais. No nosso caso, como alguns exemplos, poderíamos citar o fluxo de veículos, segurança no trânsito, gasto com combustível e emissão de CO_2 . No caso financeiro, devemos estimar receitas e gastos futuros para identificar se a atividade planejada é financeiramente viável. Um resultado indesejável nessa análise pode anular o projeto. Mesmo olhando para um único aspecto, o financeiro, há vários pontos de vista. Por exemplo, o custo com combustível é o mais importante para o cidadão, enquanto os custos com construção das vias é o mais importante para o estado (GOSSLING; CHOI, 2015).

Neste trabalho será feita uma análise financeira simples, apenas somando custos operacionais (combustível, manutenção) com custos iniciais (aquisição do veículo). Mesmo um modelo simples assim traz algumas dificuldades, como a de comparar o dinheiro no tempo presente com o tempo futuro (BEJAN; MORAN; TSATSARONIS, 1996; MANKIW, 2005).

Alguns dos termos básicos são:

Juros (i): Compensação obtida pelo uso de dinheiro emprestado, geralmente informado como percentual (ex.: 7% ou 0,07). Pode ser informada como *taxa de retorno* ou *custo do dinheiro*. Pode ser mensal ou anual.

Valor Presente (VP): O valor presente de valores que serão gastos ou recebidos em tempos no futuro (VF) podem ser encontrados como, onde n é o número de períodos:

$$VP = VF \frac{1}{(1 + i)^n} \quad (17)$$

Número de Meses Corrigido, ou Fator de Recuperação de Capital (μ_{FRC}): O μ_{FRC} é a relação entre o valor que será pago mensalmente e o valor presente do somatório de todos os pagamentos mensais.

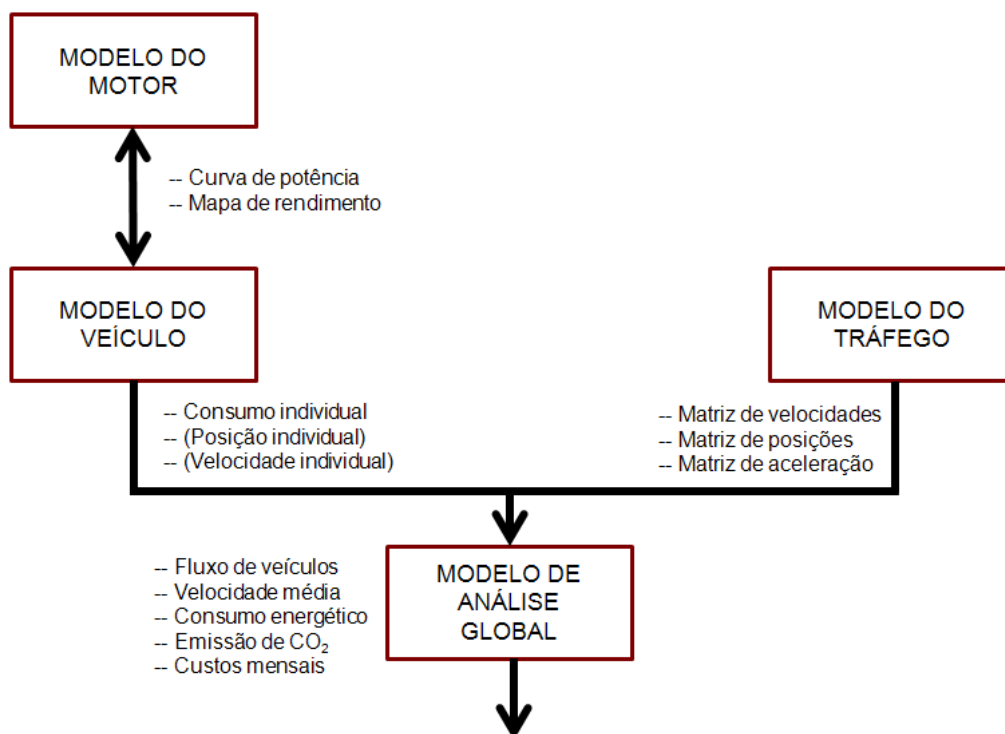
$$\mu_{FRC} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{(1 + i)^k} = \frac{i(1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \quad (18)$$

3 METODOLOGIA

Este trabalho, como dito anteriormente, baseia-se fortemente na metodologia geral proposta por Garcia Neto (2014), que por sua vez baseou o modelo de tráfego em Meng *et al.* (2007). Para o presente trabalho, todas as simulações e análises foram refeitas, a implementação do modelo do veículo foi simplificada, novas métricas introduzidas, e novas velocidades consideradas. Garcia Neto (2014) estudou os modelos do motor (correlação empírica), veículo e tráfego. Neste trabalho, durante o estudo e modelagem do problema, observamos uma oportunidade de aprimoramento em algumas situações que foram abordadas por Garcia Neto (2014) em sua dissertação. Alterações em menor escala foram realizadas no modelo de motor, veículo e tráfego. O modelo de análise global está sendo apresentado nesse trabalho com objetivo de integrar os resultados obtidos nos modelos anteriores. A metodologia será dividida em três seções, relativas às operações realizadas em cada um dos modelos estudados.

A Figura 16 mostra o esquema da metodologia. O modelo do veículo é usado para calcular um vetor de consumo de combustível para todos os movimentos possíveis no modelo do tráfego, *i.e.*, percorrer 1 segundo com velocidade constante (movimento em cruzeiro) ou acelerar de uma determinada velocidade até a velocidade próxima superior, percorrendo 1 segundo nessa nova velocidade (aceleração e cruzeiro). Para tanto, o modelo do veículo trabalha em conjunto com o modelo do motor.

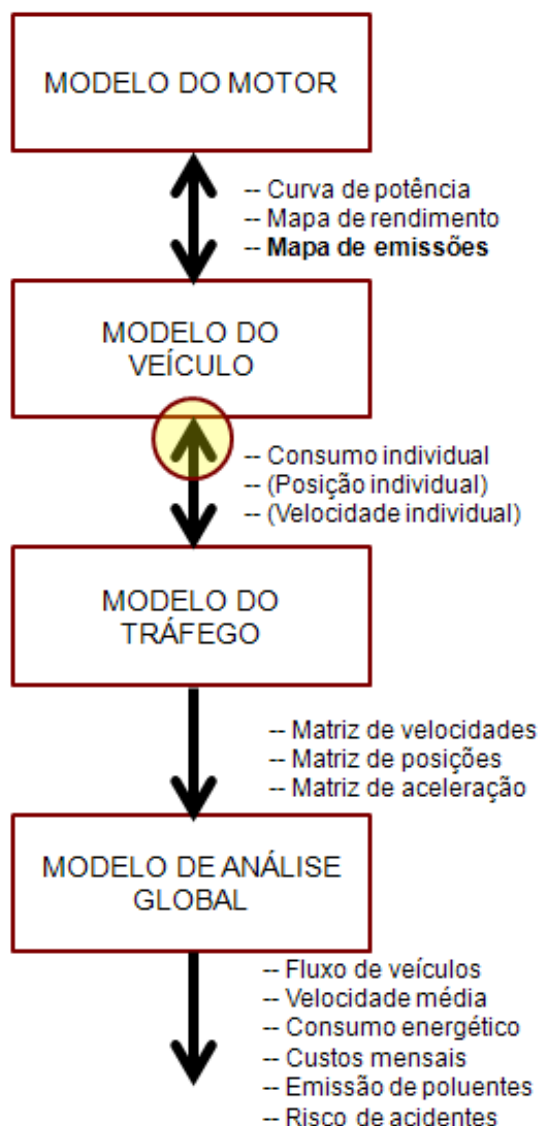
Figura 16 - Ilustração de relacionamento entre as malhas



No modelo do tráfego, uma determinada condição (densidade de carros e de motos) é simulada por um determinado tempo (11.000 segundos no nosso caso), gerando uma matriz tridimensional (2 faixas, 2.000 células, 11.000 segundos) com as informações de posição, velocidade e aceleração de cada veículo. O modelo de análise global calcula então valores médios do fluxo de cada tipo de veículo, fluxo total, velocidade média, desvio padrão da velocidade, consumo de combustível (usando para isso o vetor de consumo do modelo do veículo), emissão de CO₂ e custos.

Para registro, como dito anteriormente, o desejável seria que o modelo do tráfego “perguntasse” ao modelo do veículo se tal movimento desejado é possível, gerando o esquema da Figura 17, que vem sendo desenvolvido pelo LOST (Laboratório de Otimização em Sistemas Térmicos e Estudos em Duas Rodas).

Figura 17 - Ilustração da integração ideal entre os modelos estudados

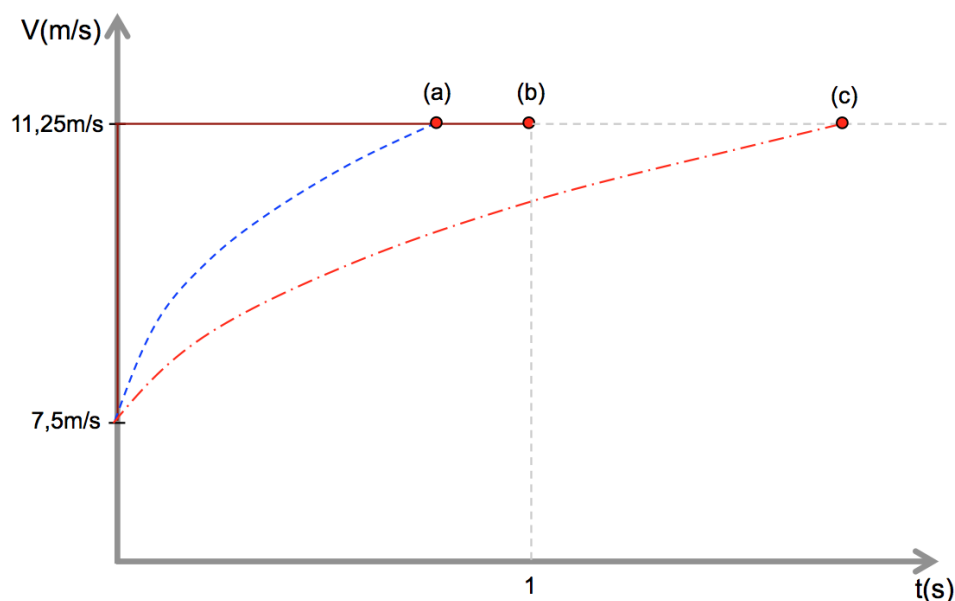


3.1. MODELO DO VEÍCULO/MOTOR

Os modelos do motor e do veículo utilizados foram fortemente baseados no de Garcia Neto (2014). Na Figura 16, verifica-se que eles estão em constante integração, e durante a simulação há uma constante comunicação entre o modelo do motor e do veículo, e uma constante alimentação dos modelos do veículo e do tráfego no modelo de análise global. Garcia Neto (2014) focou em sua dissertação em definir diversos parâmetros para o funcionamento dos modelos, na avaliação dos resultados obtidos e comparação com os resultados do modelo de Meng *et al.*

(2007). Nesse tópico serão abordadas as principais variáveis e aspectos que foram modificados em relação ao trabalho base.

Figura 18 - Ilustração do comportamento da velocidade



Uma limitação na integração dos modelos é que, enquanto o modelo do veículo permite posições e velocidades “contínuas” (dentro da precisão numérica possível), o modelo do tráfego (baseado nos autômatos celulares) permite apenas velocidades discretas. Por exemplo, na Figura 18 o modelo do tráfego considera uma aceleração (de $7,5$ a $11,25 \text{ m/s}$; ou 2 a 3 células/passos de tempo) de maneira instantânea. Para calcular a energia consumida em um passo de 1 segundo, calculamos a evolução real do veículo. Caso ele não alcance a velocidade desejada ao final de 1 segundo (ponto c), calculamos a energia que seria consumida para alcançar a velocidade desejada, mesmo que maior que 1 segundo (limitado a 6 segundos). Caso alcance a velocidade desejada em menos de 1 segundo (ponto a), consideramos a energia até 1 segundo (ponto b).

Uma outra alternativa, é calcular o consumo energético diretamente da curva degrau proposta pelo modelo do tráfego (que tem como problema exigir uma potência muito grande, indisponível pelo motor).

$$E_{traj} = E_{cruz} + \frac{1}{2}m(V_{cruz}^2 - V_{ini}^2) \quad (19)$$

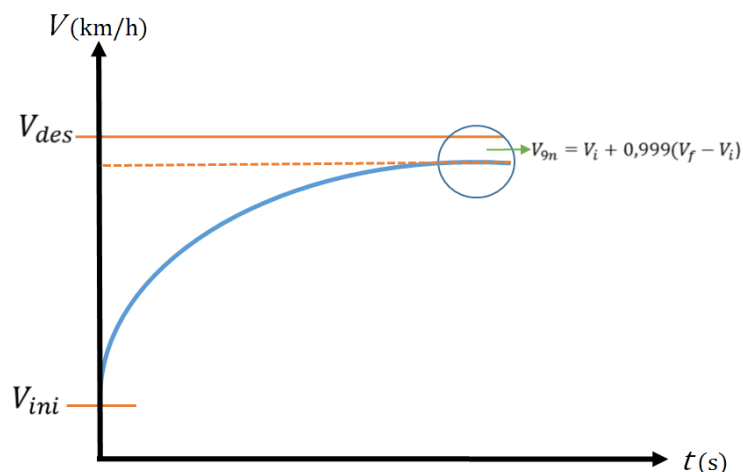
Na equação 19, E_{traj} indica a energia do trajeto, E_{cruz} a energia durante estado de cruzeiro (velocidade de cruzeiro, V_{cruz}), e da velocidade inicial V_{ini} . A seguir, há a descrição de algumas variáveis que foram estudadas, modificadas e a explicação de sua importância.

3.1.1 Velocidade de corte

Na Figura 18, discutimos que em alguns casos o veículo não atinge a velocidade desejada em 1 segundo. É necessário então definir quando alcança essa velocidade (ponto c). Para tanto, a velocidade de corte (V_{9n}) pode ser definida como a velocidade na qual o sistema considera que o veículo alcançou a velocidade desejada, parando a simulação. Em outras palavras, é o estabelecimento do critério de parada no modelo do veículo.

O objetivo é padronizar um critério de parada que atenda a todas as situações de velocidade. O nome velocidade de corte é sugerido nesse trabalho, mas o estudo dessa ideia foi realizado no trabalho de Garcia Neto (2014), com o nome de velocidade limite. Em seu trabalho foi considerado que o veículo havia atingido a velocidade desejada quando ele estava em 99% da velocidade final.

Figura 19 - Ilustração da velocidade de corte



Como dito, é importante perceber que nem sempre o veículo alcança a velocidade de corte (V_{9n}) dentro de um segundo. Isso se torna mais evidente em velocidades mais altas (porque as potências necessárias são maiores, mas limitadas pelo motor).

A padronização da velocidade de corte através da equação 20 é uma tentativa de deixar o critério de parada baseado na diferença de velocidade estudada e não dependente da velocidade inicial, como ocorria implicitamente no caso estudado por Garcia Neto (2014).

$$V_{9n} = V_I + 0,999(V_F - V_I) \quad (20)$$

A definição da V_{9n} é importante porque afeta diretamente a totalização do consumo de combustível durante o percurso. Isso influencia diretamente a percepção da economia veicular (km percorridos/litros consumidos) e o custo de operação do veículo

3.1.2 Estudo da malha temporal do modelo do veículo

O tempo padrão para simulação de cada passo no modelo do tráfego é de um segundo. Como visto, na aceleração do modelo do veículo nem sempre a velocidade desejada será alcançada nesse intervalo de tempo. Além disso, como a operação de cálculo é por método iterativo, o número de operações de cálculo que são realizadas podem afetar o resultado final do sistema.

Realizamos testes com diversos números de passos de tempo por segundo (nt) no modelo do veículo, a fim de verificar para qual valor não ocorre diferenças substanciais no resultado. De forma sequencial, selecionamos situações com nt = 50, 250, 500, 1000, 2000 e 5000 iterações por segundo. O critério de convergência escolhido foi o consumo do veículo em litros (que é proporcional à energia).

3.1.3 Marcha inicial

Outro dado que pode gerar variação nos resultados é o da marcha inicial do veículo no início da simulação. Para verificar se há influência, realizamos uma simulação para avaliar se a marcha inicial no momento de partida do veículo influencia no consumo final.

3.1.4 Consumo energético

O consumo energético (e) é calculado pelo modelo do veículo, durante o movimento de “1 segundo” (pode ser maior caso não atinja a velocidade de corte dentro de 1 segundo), é dado pela equação 21 onde α indica o grau de aceleração entre 0 e 1, $P_{\max}$ a potência máxima do motor e η seu rendimento.

$$e = \int_0^{\Delta t} \frac{\alpha P_{\max}}{\eta} dt \quad (21)$$

3.2 MODELO DO TRÁFEGO

O modelo do tráfego é responsável pela lógica dos veículos em movimentação no trânsito, e já foi exaustivamente explicado em Meng *et al.* (2007), Garcia Neto (2014) e na fundamentação teórica deste trabalho. Neste trabalho, recalculamos os todos os casos dos trabalhos anteriores. Isso foi necessário porque modificamos os vetores de consumo energético e porque introduzimos novas velocidades máximas.

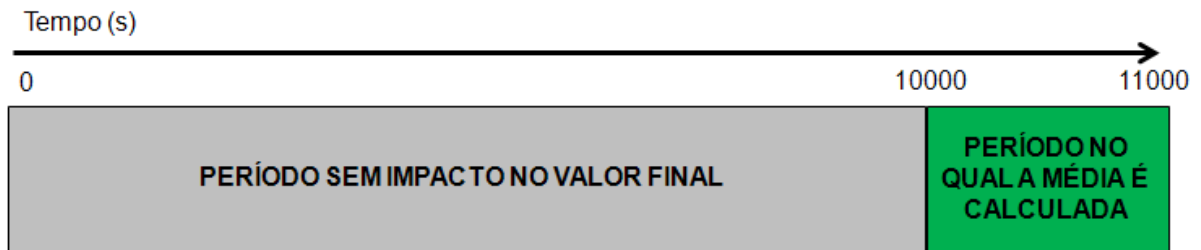
No primeiro estudo (com $v_{\max}^{(c)} = 10$ células/passos de tempo; com $v_{\max}^{(m)} = 4$ células/passos de tempo), estudamos as densidades de carro entre 0 e 130 carros/km, com intervalo de 5 carros/km; e densidades de moto de 0, 13,3, 40,0, 93,3, 133,3, 187,7 e 213,3 motos/km. Cada uma dessas 189 (=27x7) permutações, foram realizadas 30 simulações (*runs*) de 11.000 segundos cada. Em um computador *desktop* de configuração intermediária (i5, 8GB de RAM), essas

simulações levam cerca de 6 horas de processamento. No segundo estudo, foram variadas as velocidades máximas dos carros e motocicletas.

3.3 MODELO DE ANÁLISE GLOBAL

O modelo de análise global é responsável por realizar as médias dos resultados dos modelos do tráfego e do veículo. Para minimizar os efeitos da condição inicial (todos veículos parados distribuídos aleatoriamente na pista), a média de fluxo é calculada nos últimos 1000 segundos dos 11000 simulados, conforme Figura 20. Esse valor é sugerido por Vilar & Souza (1994), Meng *et al.* (2007) e Garcia Neto (2014). Para minimizar o efeito do gerador de números pseudoaleatórios (usado na distribuição inicial e nas frenagens aleatórias), Meng *et al.* (2007) sugerem que seja feita a média de 30 corridas (*runs*). Garcia Neto (2014) testou tanto a proposta dos 1000 segundos finais quanto das 30 corridas, no cálculo da média da média, encontrando resultados plenamente satisfatórios.

Figura 20 - Ilustração do tempo de simulação considerado



As equações 22, 23 e 24 mostram como se calculam as variáveis de interesse nessas simulações, onde os sobrescritos indicam se estamos calculando o valor para carro (c) ou para moto (m), N é o número de veículos e L o comprimento da pista.

Para a densidade (ρ):

$$\rho^{(m,c)} = \overline{\left(\frac{N^{(m,c)}}{L_{pista}} \right)} \quad (22)$$

Para a velocidade (V):

$$V^{(m,c)} = \overline{\left(\frac{\sum v_t^{(m,c)}}{N^{(m,c)}} \right)} \quad (23)$$

Para o fluxo (Q):

$$Q^{(m,c)} = \rho^{(m,c)} V^{(m,c)} \quad (24)$$

Na composição das forças resistivas ao movimento do veículo, é possível verificar que em baixas velocidades a maior influência no consumo de combustível é devido à necessidade de aceleração, a qual é necessária para que o veículo saia do repouso e entre em movimento. Em situações com velocidades mais altas, a força aerodinâmica passa a ser também importante. Na situação de velocidades intermediárias ocorre um fenômeno complexo, no qual há a composição dos dois efeitos anteriores. Para avaliar essas variações utilizamos o desvio padrão, definido na equação 25 para um passo de tempo. O desvio padrão (σ) é a raiz quadrada da variância.

$$\sigma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(V_i - \bar{V})^2} \quad (25)$$

Da mesma forma que com as outras variáveis, posteriormente realizamos a média dos últimos 1000 segundos de cada corrida. Podemos afirmar que, quanto maior o desvio padrão, mais valores dispersos existem em torno da média. Usamos, portanto, o desvio padrão como um indicador das acelerações. É importante ressaltar que essa correlação entre desvio padrão e aceleração não é usada nos cálculos, mas apenas na discussão dos resultados.

Uma nova métrica introduzida nesse trabalho é a energia média consumida por veículo por distância $E^{(m,c)}$ [J/veículo.km] dada na equação 26. O consumo específico para cada veículo, e_i , é calculado pela equação 21. É neste momento que o modelo do veículo se junta ao modelo do tráfego para cálculo das métricas médias no modelo de análise global.

$$E^{(m,c)} = \frac{1}{V^{(m,c)}} \left(\overline{\frac{\sum e_i^{(m,c)}}{N^{(m,c)} \Delta t}} \right) \quad (26)$$

A energia total consumida por unidade de tempo e espaço, $\mathcal{E}$ (J/m.s), é dada como a soma do consumo total das motos e carros, conforme equação 27. Essa variável se torna interessante para verificar se, por exemplo, mais carros em uma via realmente geram maior consumo de energia. Perceba que isso pode não ocorrer, pois se os carros estiverem em congestionamento, o consumo total de cada veículo será pequeno, quando comparado a uma situação com menos carros e motos em alta velocidade.

$$\mathcal{E} = E^{(m)} V^{(m)} \rho^{(m)} + E^{(c)} V^{(c)} \rho^{(c)} \quad (27)$$

Outra maneira de quantificar a energia é em litros de gasolina dada na equação 28, onde PCI é o Poder Calorífico Inferior do iso-hexano C_8H_{18} , 44 MJ/kg de C_8H_{18} , e $\rho_{C_8H_{18}}$ é sua densidade, estimada como 0,735g/l. Nessa metodologia, a gasolina foi considerada como composta completamente de iso-octano, sem presença de outros compostos hidrocarbonetos, assim como também não há presença de álcool etílico C_2H_5OH presente na gasolina.

O valor consumido em litros por segundo é dado através da fórmula.

$$L = \frac{e}{PCI \rho_{C_8H_{18}}} \quad (28)$$

Um dos objetivos deste trabalho é verificar como o custo de operação do veículo se comporta mediante as diversas situações de tráfego. Para isso são consideradas informações relativas ao cotidiano de um brasileiro (em sua média), como o valor de compra e venda de veículos populares, preço do combustível, salário médio mensal, taxa de juros, entre outras. A Tabela 3 contém informações sobre as considerações financeiras do veículo, com valores em dólar americano (\$).

Tabela 3 - Dados financeiros utilizados no modelo

Parâmetro	Carro (1000 cc)	Motos (150 cc)
L_m , distância mensal percorrida[km]	315 km	
i , taxa de juros [1/mês]	0,01	
n , número de parcelas	48	
S_m , salário mensal [\$]	580	
H_m , horas mensais de trabalho [h]	168	
V_p , valor para aquisição do veículo [\$]	8200	1600
V_s , valor de venda do veículo [\$]	5700	1200
Preço do combustível [\$/l]	0,95	
Conversão Dólar-Real [R\$/]\$]	3,90	

Com objetivo de calcular o custo mensal equivalente para o proprietário, usamos a equação 29.

$$C^{(m,c)} = \frac{V_p}{o^{(m,c)}\mu} - \frac{V_s}{o^{(m,c)}\mu(1+i)^n} + \frac{(1+\varepsilon)s_s E^{(m,c)}}{o^{(m,c)}} \frac{L_m}{V^{(m,c)}} + \frac{S_m}{H_m} \frac{L_m}{V^{(m,c)}} \quad (29)$$

- Primeiro termo à direita: Valor mensal relativo à aquisição do veículo, V_p . Para comparar os valores mensais equivalentes, usamos o termo μ_{FRC} , que é o número corrigido de meses dado na equação 18, o qual considera a taxa de juros i e o número de meses n na análise.
- O segundo termo da equação 29 representa a valor mensal corrigido relativo à venda do veículo, V_s .
- O terceiro termo calcula o custo operacional com combustível, considerando uma taxa s_s [US\$/J], a distância mensal percorrida L_m , e o fator ε , que considera custos com taxas, manutenção e estacionamento.
- O último termo considera o tempo perdido no trânsito, considerando o valor mensal do salário do ocupante, S_m , que trabalha H_m horas por mês. O tempo $o^{(m,c)}$ indica a taxa de ocupação em pessoas no veículo.

Escolhemos trazer todos os valores futuros e iniciais para um valor mensal equivalente porque é mais “palpável” para o cidadão. No entanto, lembramos que

esse valor mensal equivalente leva em conta todos os custos da vida do veículo, desde a compra até a revenda.

Nas figuras e tabelas, as unidades de exibição foram escolhidas para unidades mais comuns, para facilitar a compreensão, quando se mostrou mais compreensivo do que as unidades do SI.

Neste estudo, foi aumentado o número de densidade de carros em relação a Garcia Neto (2014) e Meng *et al.* (2007), os quais utilizaram intervalos de densidade de carro de 10 carros/km. Isso foi importante porque alguns gráficos com métricas outras que o fluxo eram difíceis de analisar com o espaçamento desses outros trabalhos.

3.4. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE MÁXIMA DOS VEÍCULOS

Um dos fatores importantes para o comportamento do tráfego é a velocidade máxima permitida para cada veículo. Para analisar essa influência, refizemos os casos estudados por Meng *et al.* (2007) e Garcia Neto (2014) agora para outras velocidades máximas. Em particular, estávamos interessados em dois fenômenos. Primeiro, de saber o impacto da redução na velocidade máxima dos veículos como está sendo realizado em São Paulo. O segundo é fazer com que, diferentemente do tráfego chinês de Meng *et al.* (2007), as motos andem mais rápido que os carros, como é comum no tráfego brasileiro. É muito importante salientar que neste modelo os carros não podem mudar de faixa, sendo essa a principal diferença entre os dois tipos de veículos notada nos resultados. Foram estudadas as combinações de velocidade máxima apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Velocidades máximas estudadas

Velocidade máxima para carros e motos				
cel/s (km/h)	04 (54)	06 (81)	08 (108)	10 (135)

4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados a) influência da malha do modelo do veículo, da velocidade de corte e da marcha inicial no consumo, b) os resultados do consumo dos veículos para cada tipo de movimento possível, c) a influência das densidades de carros e motocicletas nas diversas métricas globais, e d) a influência da velocidade máxima de cada veículo nas diversas métricas globais.

4.1. INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS NUMÉRICOS NO CONSUMO DO VEÍCULO

A Tabela 5 apresenta a variação do consumo de combustível em função da malha temporal (nt) usada no modelo do veículo, o nt indica o número de iterações por segundo. Percebe-se que a partir de 1000 passos de tempo por segundo, não há mais variações significativas. No entanto, caso o modelo do veículo fosse usado *on-line* com o modelo do tráfego, demandando um número grande de repetições, uma malha mais grosseira (e.g., 500) poderia ser usada.

Tabela 5 - Consumo acumulado de combustível em litros para diversas situações de aceleração do automóvel com diferentes valores de iterações por segundo

nt	Velocidade inicial [cel/s]								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
50	0,00269	0,00441	0,00659	0,00880	0,01158	0,01429	0,01834	0,02331	0,03187
250	0,00286	0,00462	0,00659	0,00882	0,01143	0,01426	0,01828	0,02318	0,03166
500	0,00288	0,00465	0,00659	0,00882	0,01140	0,01425	0,01826	0,02315	0,03162
1000	0,00289	0,00466	0,00659	0,00881	0,01139	0,01425	0,01825	0,02314	0,03161
2000	0,00290	0,00467	0,00660	0,00881	0,01138	0,01425	0,01824	0,02313	0,03160
5000	0,00290	0,00467	0,00659	0,00881	0,01138	0,01425	0,01824	0,02313	0,03160

Na Tabela 6 é possível verificar o comportamento do consumo em função da marcha inicial. Percebe-se uma área na qual o consumo é diferente em relação ao consumo que ocorreria caso o veículo estivesse em outra marcha, casos nos quais é possível trabalhar com mais do que uma marcha. Escolhemos, portanto, sempre a 1ª marcha, que, caso necessário, é mudada pelo modelo do veículo logo nos primeiros passos de tempo. Para evitar esse erro inicial, foi realizada uma mudança no modelo retirando da contabilidade de consumo as cinco primeiras iterações (0,005 segundos

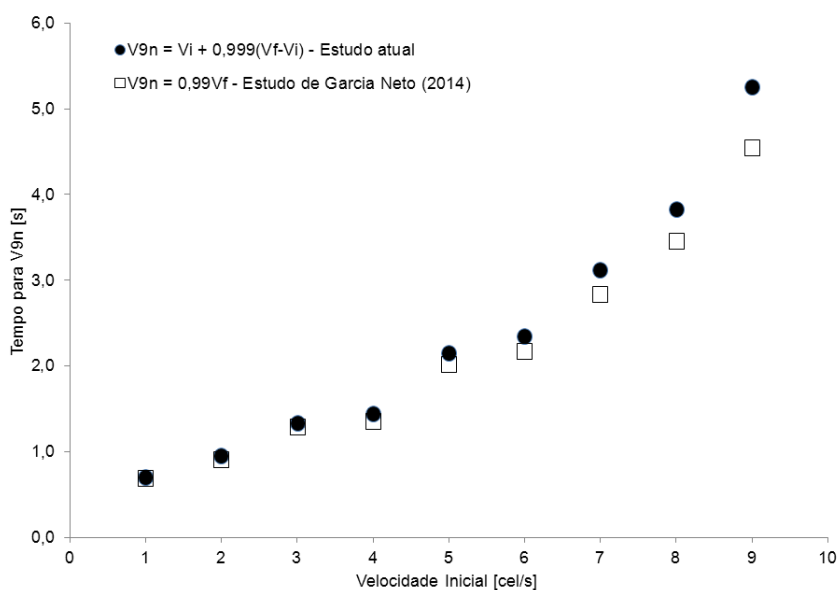
do movimento de 1 segundo). Com isso, o consumo em todos os casos só será contabilizado quando o veículo atingir a marcha ideal de trabalho.

Tabela 6 - Consumo acumulado (litros) em função da marcha inicial e velocidade inicial (automóvel em aceleração)

Marcha	Velocidade inicial [cel/s]								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,0029	0,0047	0,0066	0,0088	0,0114	0,0143	0,0182	0,0231	0,0316
2	0,0029	0,0047	0,0066	0,0088	0,0114	0,0143	0,0182	0,0231	0,0316
3	0,0029	0,0047	0,0066	0,0091	0,0114	0,0143	0,0182	0,0231	0,0316
4	0,0029	0,0047	0,0066	0,0091	0,0123	0,0150	0,0184	0,0231	0,0316
5	0,0029	0,0047	0,0066	0,0091	0,0123	0,0150	0,0217	0,0269	0,0311

Na Figura 21, é possível verificar que, a partir da velocidade inicial de 3 células por segundo ($V_i > 40,5$ km/h), o tempo que o carro necessita para alcançar a velocidade imediatamente superior será maior do que um segundo, pelo fato do veículo não possuir a potência necessária para realizar a aceleração desejada em um segundo.

Figura 21 - Tempo necessário para alcançar a velocidades de corte para o automóvel



Na Figura 21, são exibidos o tempo para que o veículo alcance a velocidade de corte (V_{9n}) em duas situações (*i.e.*, critérios de parada em função da velocidade final e/ou inicial). A primeira é $V_{9n} = V_i + 0,999(V_f - V_i)$, situação que propomos no presente trabalho, e com $V_{9n} = 0,99V_f$ situação proposta por Garcia Neto (2014). Verificamos que o tempo para alcançar a velocidade desejada difere entre as duas

situações. Nossa opção foi modificar esse critério da velocidade de corte para a situação com $V_{9n} = V_i + 0,999(V_f - V_i)$.

A razão dessa mudança é que pensamos ser mais razoável definir o critério de parada em função do degrau de velocidade e não da velocidade final. No entanto, é necessário determinar o impacto dessa mudança no consumo energético, que é a informação relevante neste estudo. Acima de tudo, devemos lembrar que o modelo do tráfego é tão menos refinado que o modelo do veículo, que essas modificações não são muito relevantes.

4.2 VETOR DE CONSUMO ENERGÉTICO

A Tabela 7 mostra o consumo para os possíveis movimentos demandados pelo modelo do tráfego. A primeira coluna de consumo mostra qual seria o consumo se a simulação parasse em 1 segundo (ponto b da Figura 19) e a segunda coluna de consumo mostra o valor total (ponto c da Figura 19). Este último foi o utilizado no modelo de análise global.

Tabela 7 - Consumo total e consumo em um segundo para o automóvel em aceleração

V inicial [cel/s] (km/h)	Consumo em 1 segundo [l]	Consumo total [l]	Diferença (%)
1 (13,5 → 27,0)	0,00289	0,00289	0%
2 (27,0 → 40,5)	0,00466	0,00466	0%
3 (40,5 → 54,0)	0,00471	0,00659	29%
4 (54,0 → 67,5)	0,00598	0,00881	32%
5 (67,5 → 81,0)	0,00507	0,01139	56%
6 (81,0 → 94,5)	0,00585	0,01425	59%
7 (94,5 → 108,0)	0,00636	0,01825	65%
8 (108,0 → 121,5)	0,00583	0,02314	75%
9 (121,5 → 135,0)	0,00627	0,03161	80%

Na Tabela 8, podemos comparar os resultados obtidos com os que foram exibidos por Garcia Neto (2014) e com o consumo de combustível quando se utiliza o balanço energético da Equação 19. Os critérios de parada das duas situações são diferentes. No trabalho atual, a velocidade de corte é $V_{9n} = V_i + 0,999(V_f - V_i)$, enquanto no trabalho do Garcia Neto é $V_{9n} = 0,99V_f$. Em relação ao consumo do automóvel entre o estudo atual e o de Garcia Neto (2014) há uma pequena diferença de consumo, em que para as velocidades mais altas está na ordem de 1%. A

comparação com os valores de consumo do balanço energético geram valores mais discrepantes.

Tabela 8 - Comparação entre consumos totais para situação de aceleração do automóvel: Estudo atual, estudo de Garcia Neto (2014) e combustível consumido por balanço energético

Velocidade Inicial [cel/s] (km/h)	Estudo Atual Consumo [l]	Garcia Neto (2014) Consumo [l]	Diferença (%)	Balanço energético [l]	Diferença (%)
0 (0,0 → 13,5)	0,00058	-	-	0,00244	-13%
1 (13,5 → 27,0)	0,00289	0,00267	8%	0,00600	107%
2 (27,0 → 40,5)	0,00466	0,00457	2%	0,00892	92%
3 (40,5 → 54,0)	0,00659	0,00652	1%	0,01201	82%
4 (54,0 → 67,5)	0,00881	0,00875	1%	0,01280	45%
5 (67,5 → 81,0)	0,01139	0,01126	1%	0,01464	29%
6 (81,0 → 94,5)	0,01425	0,01401	2%	0,01522	7%
7 (94,5 → 108,0)	0,01825	0,01805	1%	0,01628	-11%
8 (108,0 → 121,5)	0,02314	0,02289	1%	0,01737	-25%
9 (121,5 → 135,0)	0,03161	0,03124	1%	0,01600	-49%

A Tabela 9 exibe os resultados, para a motocicleta, das variáveis analisadas na Tabela 7, comparando o caso da simulação parar em 1 segundo (ponto b da Figura 19) e o valor total (ponto c da Figura 19) mais próximo da realidade.

Tabela 9 - Consumo total e consumo em um segundo da motocicleta em aceleração

Velocidade Inicial [cel/s] (km/h)	Consumo em 1 segundo (l)	Consumo total (l)	Diferença (%)
1 (13,5 → 27,0)	0,00051	0,00051	0%
2 (27,0 → 40,5)	0,00086	0,00086	0%
3 (40,5 → 54,0)	0,00095	0,00130	27%
4 (54,0 → 67,5)	0,00091	0,00204	55%
5 (67,5 → 81,0)	0,00096	0,00374	74%
6 (81,0 → 94,5)	0,00101	0,00586	83%
7 (94,5 → 108,0)	0,00100	0,00606	83%
8 (108,0 → 121,5)	0,00100	0,00612	84%
9 (121,5 → 135,0)	0,00090	0,00591	85%

Na Tabela 10 exibimos a comparação entre os resultados obtidos nesse trabalho com os de Garcia Neto (2014) e do consumo do balanço energético para a situação de aceleração da motocicleta. Em seu trabalho, Garcia Neto (2014) considerou que a motocicleta acelera até a velocidade de 54km/h (4 células por segundo) que é o padrão estabelecido por Meng *et al.* (2007). Dessa forma, os valores de velocidade acima desse ponto não foram comparados com os de Garcia Neto (2014), mas apenas com os do balanço energético. Mais uma vez a diferença entre o consumo

do balanço energético e o estudo atual são discrepantes, indicando que não devemos usar os valores do balanço energético no local do consumo obtido através do estudo como possíveis substitutos.

Tabela 10 - Comparação entre o consumo da motocicleta durante aceleração: Estudo atual, estudo de Garcia Neto (2014) e combustível consumido por balanço energético

Velocidade Inicial [cel/s] (km/h)	Estudo Atual Consumo [l]	Garcia Neto (2014) Consumo [l]	Diferença (%)	Balanço Energético Consumo [l]	Diferença (%)
0 (0,0 → 13,5)	0,00009	-	-	0,00041	-55%
1 (13,5 → 27,0)	0,00051	0,00047	8%	0,00097	89%
2 (27,0 → 40,5)	0,00086	0,00086	0%	0,00130	51%
3 (40,5 → 54,0)	0,00130	0,00146	12%	0,00154	19%
4 (54,0 → 67,5)	0,00204	-	-	0,00180	-12%
5 (67,5 → 81,0)	0,00374	-	-	0,00223	-40%
6 (81,0 → 94,5)	0,00586	-	-	0,00292	-50%
7 (94,5 → 108,0)	0,00606	-	-	0,00325	-46%
8 (108,0 → 121,5)	0,00612	-	-	0,00348	-43%
9 (121,5 → 135,0)	0,00591	-	-	0,00417	-29%

Na Tabela 11, apresentamos os valores do consumo de combustível na situação que o veículo se encontra na mesma velocidade durante o período de tempo sugerido pelo modelo do tráfego (1 segundo). De maneira quantitativa, percebe-se que o valor de consumo para o automóvel é sempre três a quatro vezes maiores, valor que é refletido na realidade quando se compara a economia (km/l) de ambos os veículos.

Tabela 11 - Consumo de automóveis e motocicletas em velocidade constante por um segundo

Velocidade constante [cel/s] (km/h)	Motocicleta Consumo [l]	Automóvel Consumo [l]
0 (0,0)	0,00004	0,00017
1 (13,5)	0,00006	0,00031
2 (27,0)	0,00015	0,00064
3 (41,5)	0,00026	0,00091
4 (54,0)	0,00037	0,00134
5 (67,5)	0,00051	0,00182
6 (81,0)	0,00063	0,00206
7 (94,5)	0,00101	0,00253
8 (108,0)	0,00101	0,00267
9 (121,5)	0,00090	0,00312

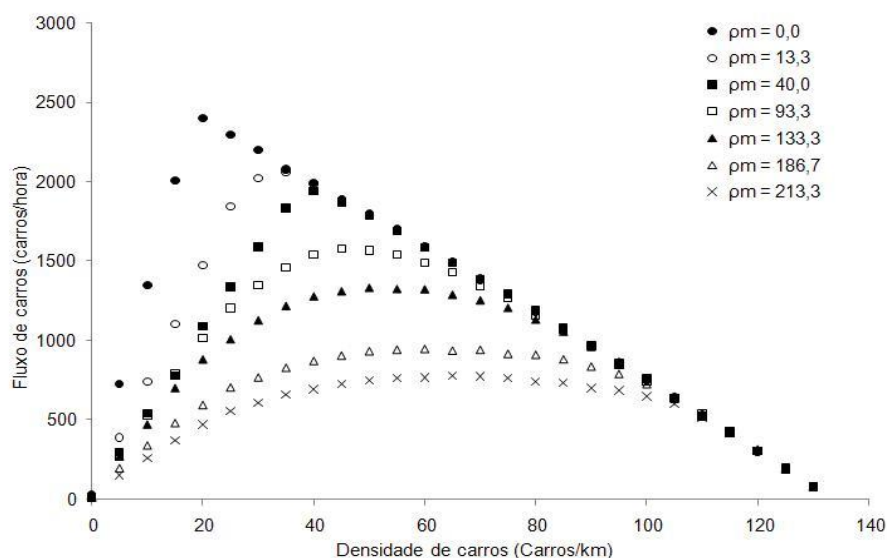
4.3. INFLUÊNCIA DAS DENSIDADES NAS DIVERSAS MÉTRICAS

Nesta seção realizaremos diversas análises das simulações considerando o caso de velocidade máxima do carro de 10 células por segundo (135 km/h) e da moto de 4 células por segundo (54 km/h). São estudados o fluxo de veículos, velocidade média, desvio padrão da velocidade, consumo energético, emissão de CO₂ e custos, quando variamos a densidade de carros e motos.

A Figura 22 mostra os resultados das nossas simulações para o fluxo de automóveis com resultados que reproduzem os de Meng *et al.* (2007). Examinando a curva para $\rho^{(m)} = 0$ (i.e., sem motocicletas), observamos que, conforme aumenta a densidade de carros, $\rho^{(c)}$, o fluxo de carros (Equação 24) inicialmente aumenta, mas depois diminui. Isso ocorre porque, para baixas densidades, os carros são relativamente livres para se moverem na velocidade desejada. Conforme aumentamos a quantidade de carros, um carro começa a atrapalhar o outro, reduzindo o fluxo. O fluxo máximo de automóveis é de cerca de 2404 veículos por hora e se dá com a presença única ($\rho^{(m)}=0$) e em baixa densidade ($\rho^{(c)}=20$) desses veículos.

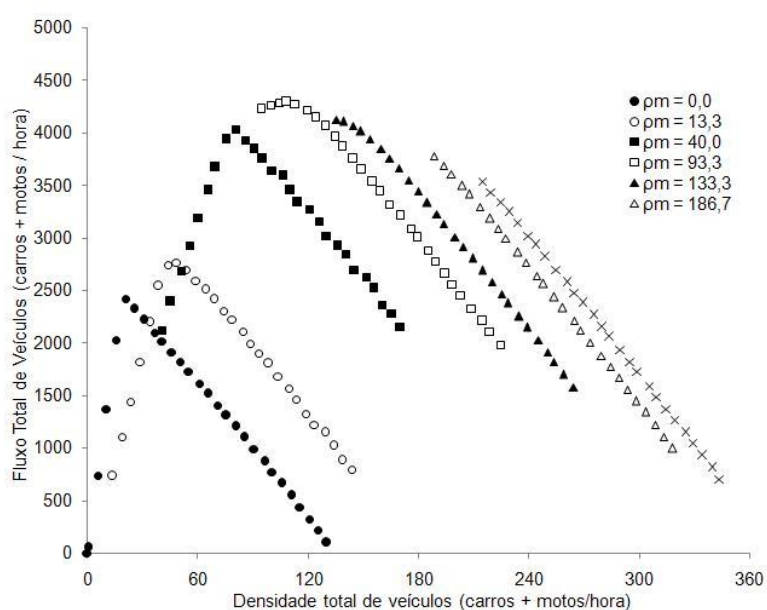
Examinando o efeito das motocicletas, percebemos que, conforme aumentamos a sua densidade, $\rho^{(m)}$, menor é o fluxo de automóveis. Isso acontece porque as motos atrapalham os carros, já que podem rodar nas duas pistas.

Figura 22 – Fluxo de carros em função da densidade de carros



Ainda reproduzindo os resultados de Meng *et al.* (2007) e Garcia Neto (2014), a Figura 23 apresenta o fluxo total de veículos em função da densidade total, que é a soma de $\rho^{(m)}$ e $\rho^{(c)}$. Quando o tráfego é visto desse ponto de vista, vemos que a presença de motocicletas tem a tendência de aumentar o fluxo total, pelo menos até a densidade de 93,3 motocicletas/km. De maneira quantitativa, a presença de motocicletas permite quase que duplicar o fluxo total horário de pessoas, de 2404 (no caso só de carros) para 4291. O comportamento global é o mesmo que o apresentado na curva para apenas automóveis, onde um aumento na densidade de veículos tende a aumentar o fluxo total até um determinado valor máximo, após o qual o fluxo diminui.

Figura 23 – Fluxo total em função da densidade total

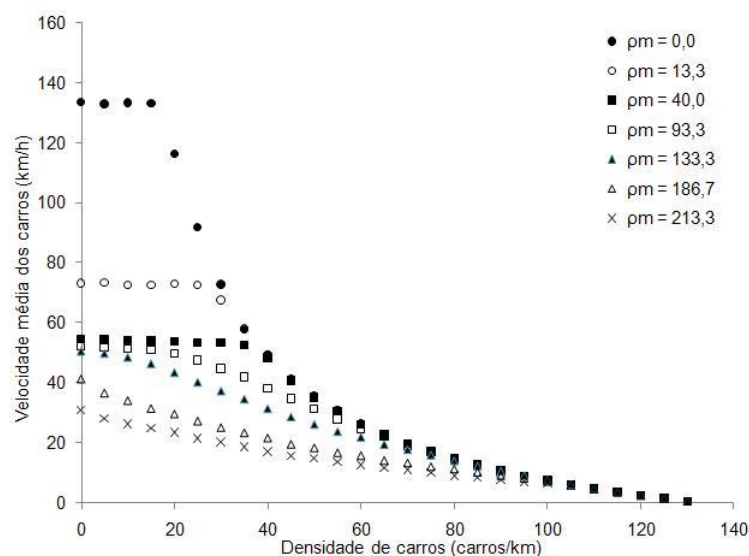


Em geral, quando a curva de fluxo tem uma inclinação positiva ela indica que os veículos estão em velocidade constante, enquanto a curva com inclinação negativa indica que a velocidade está decaindo de maneira constante. Podemos dizer que em densidades baixas a velocidade média é alta e quase constante, até chegar no fluxo máximo, após esse valor, a velocidade média diminui.

A Figura 24 mostra como se comporta a curva de velocidade média dos veículos. Na situação com apenas carros ($\rho_m = 0$) a velocidade média se mantém constante durante uma região (na Figura 5 representa o aumento do fluxo em inclinação constante). Podemos dizer que os veículos não se atrapalham. Caso

aumente a densidade de carros além do ponto de fluxo máximo, percebemos que há diminuição na velocidade média, devido à interação entre os veículos. A inclusão de motos na pista também influencia a velocidade dos carros.

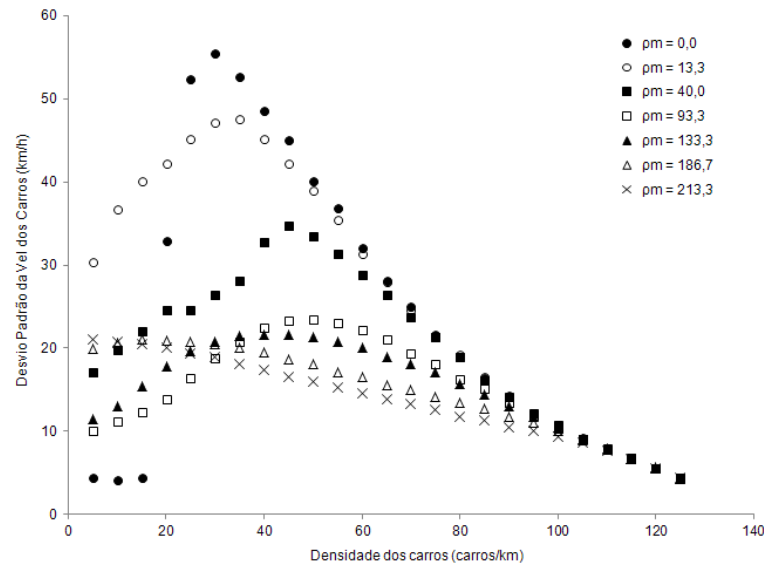
Figura 24 – Velocidade média dos automóveis em função da densidade total



Para o fluxo de veículos, os parâmetros importantes são a densidade e a velocidade média (Equações 22 e 23), mas para o consumo energético, reacelerações tem um papel principal. O desvio padrão da velocidade é usado como um meio para medir essas reacelerações.

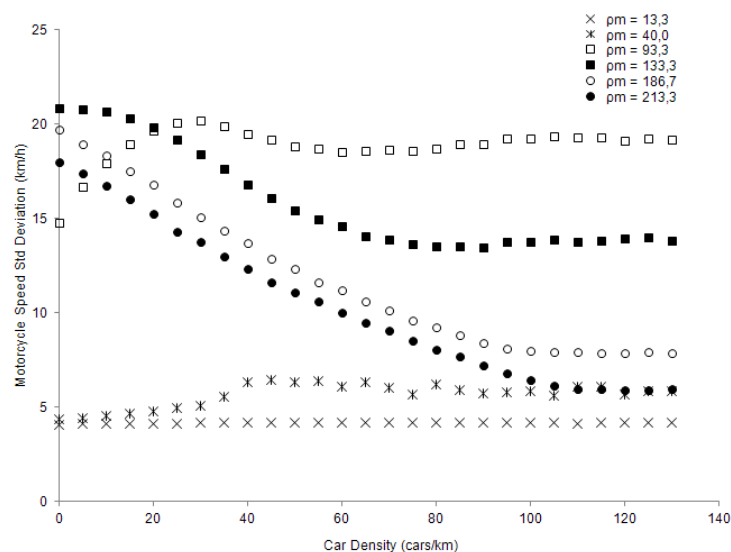
A Figura 25 mostra que para a situação com apenas carros ($p_m = 0$) o desvio padrão da velocidade é menor em baixas densidades (pois todos os carros se movem com velocidades altas) e em altas densidades (pois todos os carros se movem com baixa velocidade). Em densidades intermediárias, há um forte aumento no valor do desvio padrão da velocidade, o qual representa um aumento no consumo de combustível do veículo. Note que nesse modelo de tráfego, os motoristas/pilotos tendem a mover na maior velocidade possível, de forma agressiva, e isso influencia o comportamento da velocidade nessas densidades intermediárias. Para o efeito da presença de motos, à medida que a densidade aumenta, há um aumento no desvio padrão da velocidade dos carros, isso porque as motos tendem a diminuir a velocidade dos carros.

Figura 25 – Desvio Padrão da velocidade dos carros



A Figura 26 mostra o desvio padrão da velocidade para as motos. Para baixa densidades de motos ($\rho^{(m)}=13,3$ e $40,0$), o desvio padrão da velocidade é baixo porque as motos não são influenciadas pelos carros ou por outras motocicletas, embora a velocidade média seja alta. Para altas densidades de motos ($\rho^{(m)}=186,6$ e $213,3$), na medida que a densidade dos carros aumenta, diminui a velocidade média das motos e seu desvio padrão. Para densidades intermediárias ($\rho^{(m)}=93,3$ e $133,3$), o desvio padrão da velocidade média é função das complexidades do tráfego, onde não há um padrão claro.

Figura 26 – Desvio padrão da velocidade das motos

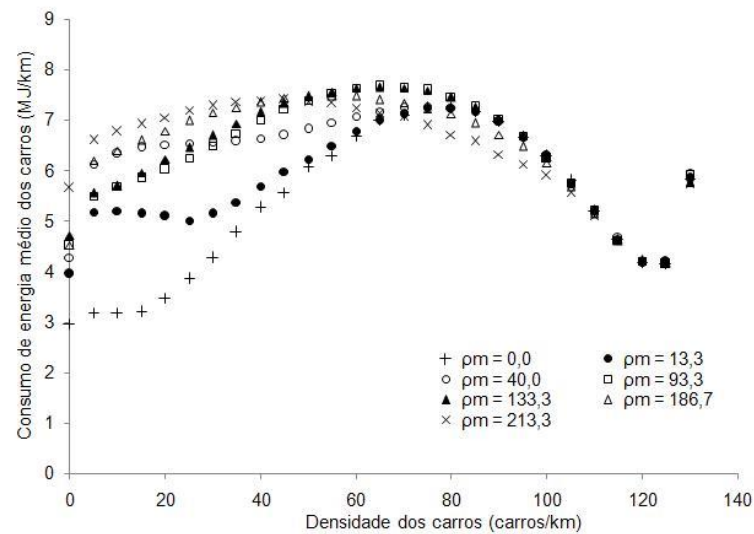


No próximo estudo é analisado o consumo energético (equações 21 e 26), calculado do modelo de tráfego utilizando vetores de consumo de energia. Realizando uma análise de escala na equação da força resultante (equação 5 e 6) é possível perceber que o consumo de energia é função, principalmente, da aceleração (em baixas velocidades) e do arrasto aerodinâmico (em altas velocidades). A gravidade também tem um papel importante, mas nesse trabalho os resultados não serão afetados devido à inclinação nula da pista.

A Figura 27 mostra o consumo energético do carro por km para diversas condições de tráfego. De forma geral, existem três tendências, de forma que devemos analisar a velocidade média e as acelerações para compreender o consumo do veículo. Na medida em que a densidade aumenta, a velocidade média diminui, diminuindo a resistência de arrasto e aumentando o tempo gasto para percorrer o mesmo espaço. Em relação às acelerações, elas são menos frequentes em baixas densidades.

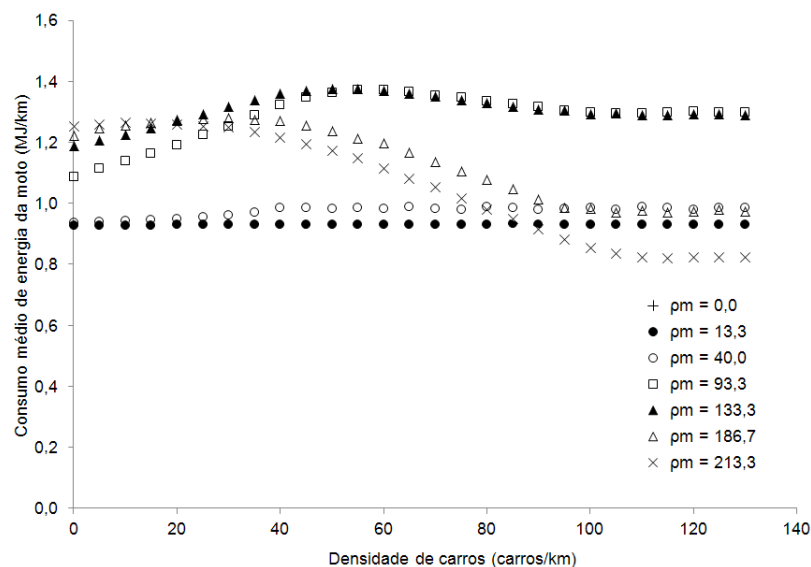
O comportamento da Figura 27 é explicado por esses dois fenômenos. O aumento no consumo até a região central é causado pelo aumento na frequência das acelerações. Após isso, há o decréscimo de consumo para altas densidades, tanto porque diminui a velocidade média como porque minimiza a frequência das reacelerações. Em densidades muito altas há um novo aumento no consumo, mas nessa vez devido ao tempo gasto parado no tráfego, que é muito grande. Na Figura 27, vemos que um aumento na densidade de motos, para a mesma densidade de carros, aumenta o consumo de combustível.

Figura 27 - Consumo energético dos carros



A Figura 28 mostra os resultados do consumo energético para motocicletas. Para baixas densidades de motos ($\rho^{(m)}=13,3$, $\rho^{(m)}=40,0$), o consumo da moto não é afetado pelos carros ou outras motocicletas presentes na via. Para médias e altas densidades de motos o consumo segue qualitativamente a frequência de reaceleração (desvio padrão da velocidade da motocicleta, Figura 26).

Figura 28 - Consumo de energia para motocicletas



A Figura 29 e a Figura 30 mostram o consumo total de energia na pista por hora por km. Separamos as curvas em duas figuras para ficarem mais compreensíveis. O consumo total da via é mais interessante para políticas públicas (especialmente se convertermos de MJ para kg de CO_2) do que os valores individuais exibidos na

Figura 27 e Figura 28. Uma das curvas ($\rho^{(m)} = 93,3$) é mostrada tanto na Figura 29 quanto na Figura 30. A flecha indica a direção na qual a densidade dos veículos aumenta.

Examinando a Figura 29 e a Figura 30 algumas tendências podem ser notadas. Primeiro, para o mesmo fluxo total, em geral, é melhor ter uma maior proporção de motos, o que é esperado devido ao fato das motos serem mais econômicas do que os carros. Em segundo, na região de alto fluxo ($\rho^{(m)}=93,3$, $0 < \rho^{(c)} < 50$), algumas variações na densidade de carros podem até triplicar o consumo energético (e consequentemente a emissão de CO_2) na via, com pouco benefício para o fluxo de veículos. Outro fato interessante é que para o $\rho^{(m)}$ menor que 93,3 (Figura 29), um aumento na densidade de carros tende primeiro a aumentar o fluxo total, e após isso diminuir. Para densidades de moto $\rho^{(m)}$ maiores ou iguais a 93,3 (Figura 30) o aumento no número de carros sempre diminui o fluxo total para a mesma densidade de motos.

Figura 29 - Consumo de energia total - Parte A

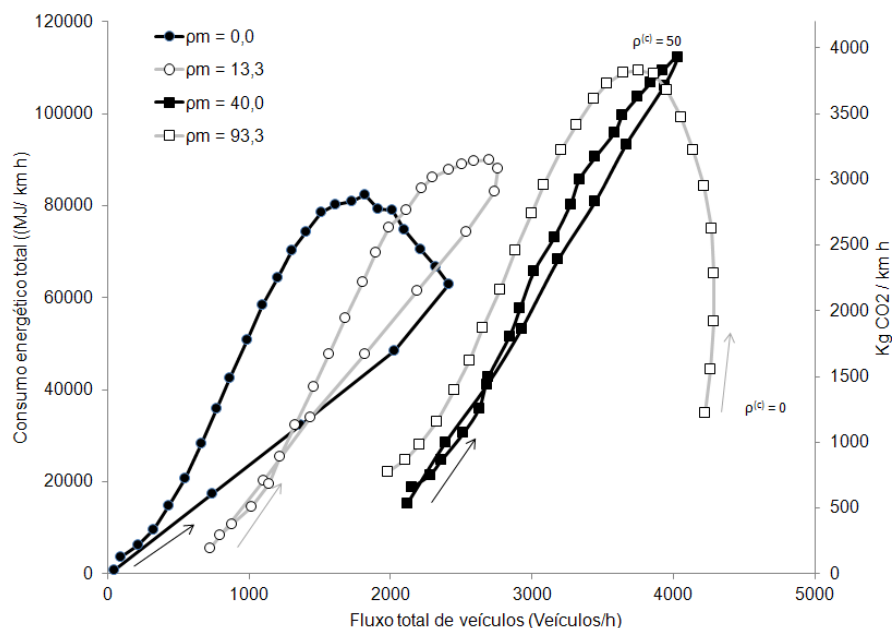
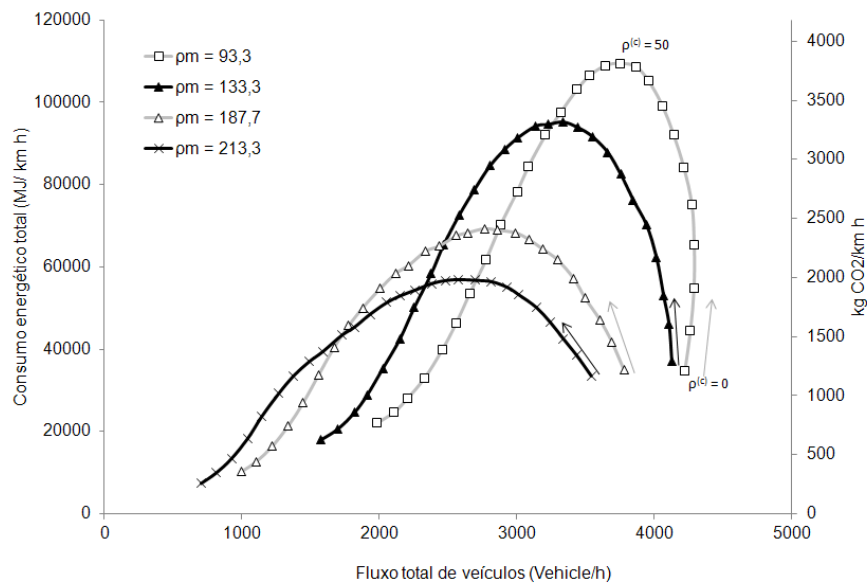


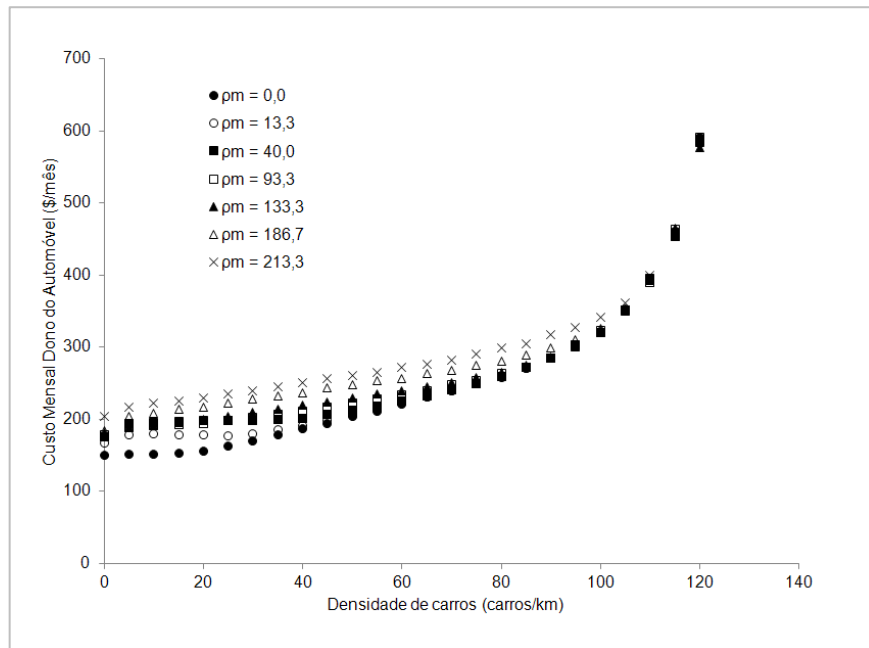
Figura 30 - Consumo de energia total - Parte B



A última métrica considerada é o custo individual, considerando a compra e venda do veículo, combustível, manutenção, taxas, estacionamento e tempo gasto no tráfego (Equação 29).

A Figura 31 mostra o custo individual para carros em função das densidades de carros e motos. É possível verificar que quanto maior o número de carros, maior é o custo mensal. Isso ocorre devido a dois efeitos. Primeiro, para a mesma densidade de motos, na medida que a densidade de carro aumenta, diminui a velocidade média, dessa forma aumentando o tempo gasto no tráfego. O segundo efeito é o consumo de combustível. De zero a densidades intermediárias, o consumo aumenta com a densidade de carros. Para maiores densidades, o consumo diminui com a densidade de carros, mas não o suficiente para compensar o tempo perdido. Uma alta densidade de motos também aumenta o custo para os donos de carros.

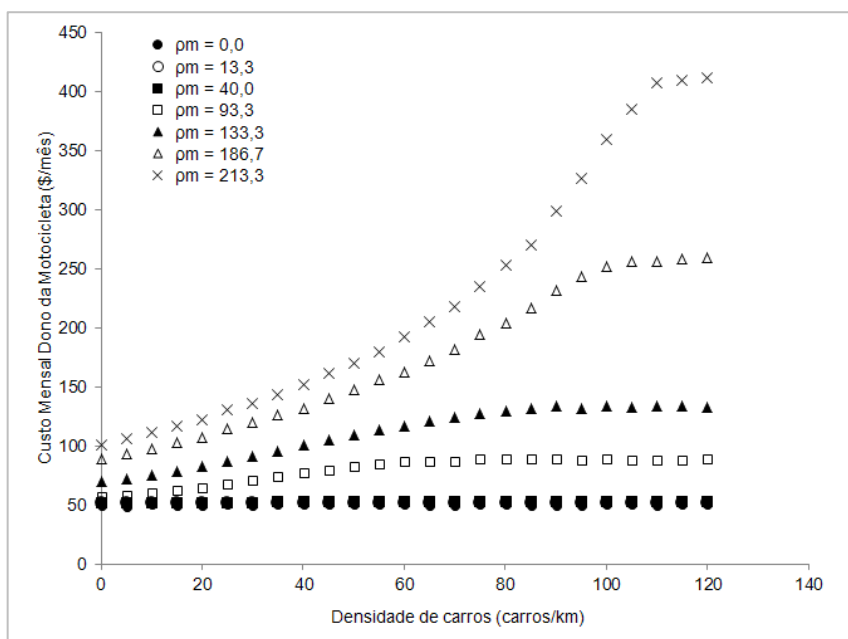
Figura 31 - Custo mensal do proprietário de carro



A Figura 32 mostra o custo individual para motos. Comparando-o com a Figura 31, é possível verificar que os custos para motos são sempre menores, pois a aquisição é mais barata e o consumo de combustível é menor. Carros não influenciam o custo das motos para densidades baixas e médias de motos.

A Tabela 12 apresenta os resultados para uma condição única de tráfego ($\rho^{(m)}=93,3$, $\rho^{(c)}=15$), que é o caso de maior fluxo total para as situações estudadas. Analisando os custos financeiros, verificamos que o alto custo de aquisição do carro (mesmo considerando a revenda) é mais do que 50% do custo mensal equivalente. No caso das motocicletas, o maior custo é o tempo gasto no tráfego, maior do que para os veículos porque nessa simulação consideramos a velocidade máxima da motocicleta (54km/h) menor do que a do automóvel (135km/h). Outro ponto importante é a emissão. Enquanto um fluxo de 3494 motocicletas por hora emitem 283 kg de CO₂ por hora por km, um fluxo de apenas 796 carros emitem 14% a mais de CO₂ do que todas as motos presentes (324 kg de CO₂ por hora por km).

Figura 32 - Custo mensal do proprietário de motos

Tabela 12 – Compilação de resultados para $\rho^{(m)}=93,3$, $\rho^{(c)}=15$

	<i>Carro</i>	<i>Motocicleta</i>	<i>Total</i>
Densidade [Veículo/km]	15,0	93,3	108,3
Número de veículos na pista [Veículos]	113	700	812
Velocidade média [km/h]	50,8	37,6	39,5
Desvio Padrão da Velocidade Média [km/h]	12,3	18,9	18,0
Fluxo [Veículo/h]	796	3494	4290
Consumo energético [MJ/Veículo.km]	5,8	1,2	
Consumo de combustível [kg _{COMB} /Veículo.h]	6,7	1,0	
Economia [km/kg Combustível]	7,6	38,1	
Economia [km/l Combustível]	5,6	28,0	
Emissão [kg _{CO2} /Veículo.km]	0,41	0,08	
Consumo energético [MJ/km.h]	4655	4059	8714
Emissão[kg _{CO2} /km.h]	324,5	283,0	607,5
Emissão [kg _{CO2} /Veículo.h]	20,7	3,0	
Custo mensal compra - venda [\$ /Veículo.mês]	123,25	21,75	
Custo mensal combustível e manutenção [\$ / Veículo.mês]	59,23	11,77	
Custo do tempo perdido mensal [\$ / Veículo.mês]	21,71	29,36	
Custo mensal [\$ / Veículo.mês]	204,18	62,88	

4.4. INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE MÁXIMA NAS DIVERSAS MÉTRICAS

Nesta seção, apresentamos os resultados das simulações considerando agora outras velocidades máximas, como apresentadas na Tabela 4. Os apêndices apresentam todos os resultados das simulações, mas aqui iremos nos deter aos resultados mais relevantes sem discussão aprofundada. Um dos objetivos desses

dados é, em análise posterior, encontrar padrões que possam ser mensurados matematicamente.

Os dados presentes no apêndice estão divididos de duas formas. Inicialmente mostramos 32 gráficos de fluxo total de veículos no Apêndice A1 até A4. Após esses dados, os resultados das demais métricas são exibidos em função da combinação de velocidades máximas e mínimas para carros e motos. Devido à grande quantidade de gráficos que podem ser gerados, a análise dos gráficos em velocidades intermediárias (6 e 8 células por segundo) não será realizada, deixamos os demais dados presentes em função das velocidades máximas e mínimas de acordo com a Tabela 4.

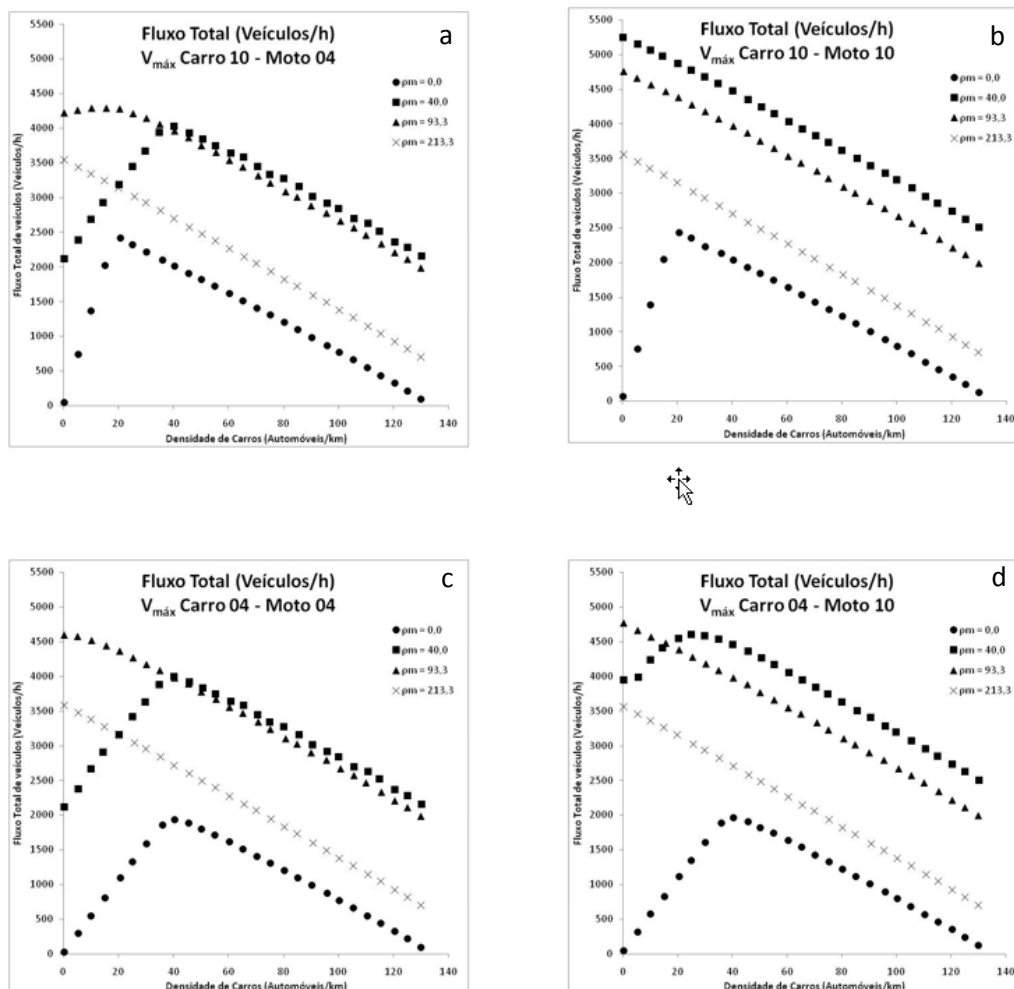
Para efeito didático serão apresentados os resultados do Apêndice A1, que foi inserido nesse texto como Figura 33. As demais informações serão apenas discutidas, sem imagens sendo exibidas no texto, mas estão à disposição do leitor nos apêndices do trabalho.

A Figura 33, presente como Apêndice A1 (a)-(d) mostra os resultados para o fluxo total em função da velocidade máxima dos carros e motos. Separamos os resultados com letras de (a) até (d) onde cada letra indica uma combinação de velocidades máximas para automóvel e motocicletas. A letra (a) indica a situação na qual a velocidade máxima de 10 células por segundo para o carro (*i.e.*, 135km/h) e 4 células por segundo para a motocicleta (*i.e.*, 54 km/h), que é o nosso caso padrão. A (b) indica quando ambos os veículos têm velocidade máxima de 10 células por segundo, (c) indica a situação em que a velocidade máxima de ambos é limitada a 4 células por segundo; e (d) indica a inversão das velocidades máximas em relação ao caso padrão, 4 células por segundo para carros e 10 células por segundo para motos. Conforme dito anteriormente, essas velocidades máximas foram selecionadas porque indicam os extremos de velocidade estudados para cada veículo nesse trabalho.

Ao compararmos as figuras (a) e (d) da Figura 33, percebemos que diminuir a velocidade dos carros não influencia muito o fluxo total de veículos. Isso provavelmente ocorre porque nessas simulações os carros não podem ultrapassar, sendo obrigados a acompanhar a velocidade do veículo à frente. Já o aumento da velocidade das motos aumenta muito o fluxo, porque as motos podem se aproveitar da sua maior mobilidade (neste caso simulado pela mudança de faixa). Um ponto

muito importante para ser lembrado é que o aumento de velocidade muito provavelmente implica em um maior número de acidentes.

Figura 33 – Fluxo total para diferentes velocidades máximas de carro e moto



Os fluxos totais de veículos podem ser visualizados para todas as situações estudadas (Apêndice A1, A2, A3 e A4). Os gráficos exibem todas as combinações de velocidades estudadas. Desse ponto em diante apenas os resultados serão discutidos, ficando a critério do leitor a verificação dos mesmos no apêndice correspondente.

O fluxo de carros diminui em aproximadamente 500 carros por hora quando se diminui a velocidade máxima dos carros de 135 km/h para 54 km/h (figuras a e c, $\rho_m = 0$ e $\rho_m = 93,3$), mas não apresenta grandes variações quando se varia a velocidade máxima da moto na via. Concluímos que a variação da velocidade máxima da motocicleta não influencia o fluxo de carros. Lembramos que as motos

podem percorrer as duas vias, enquanto que os carros em apenas uma das vias disponíveis e esse é um fator que influencia o resultado final (Apêndice C).

O fluxo de motos aumenta bastante quando se aumenta a velocidade máxima das motos (Apêndice D). Um dado interessante do Apêndice D é que quando há muitas motos na via ($\rho_m = 213,3$) a variação da velocidade máxima do carro ou da moto não influenciará o fluxo de motos. Concluímos que o fluxo de motos pode ser correlacionado com a velocidade máxima da moto na via.

Quando se estuda a velocidade média dos carros, percebemos que o aumento da velocidade máxima das motos de 54 km/h para 135 km/h contribui para o aumento da velocidade média dos carros (Apêndice E). Da mesma forma, temos que as motos também aumentam sua velocidade média nas situações em que sua velocidade máxima permitida varia de 54 km/h para 135 km/h, mas apenas mantém a velocidade média de percurso próxima da velocidade máxima possível na situação em que não há carros na pista e com baixa presença de motos (Apêndice F).

O desvio padrão da velocidade dos carros é associado, nesse trabalho, com a frequência de reacelerações do veículo. Quando se aumenta a velocidade máxima da moto de 54 km/h para 135 km/h (Apêndice G) verifica-se um incremento significativo no valor do desvio padrão da velocidade do automóvel quando a velocidade máxima do carro é de 135 km/h, fato que, associado às considerações feitas, indica que os carros também aceleram mais vezes. Quando a velocidade máxima do carro é de 54 km/h, a variação da velocidade máxima da moto influenciará de maneira contrária no desvio padrão da velocidade dos carros, gerando redução no desvio padrão da velocidade.

Para as motos (Apêndice H) temos que se as curvas de desvio padrão da velocidade das motos se comportam de forma semelhantes entre si quando a velocidade máxima do carro na via é de 135 km/h. Quando se varia a velocidade máxima das motos de 54 km/h para 135 km/h, mantendo a velocidade máxima dos carros em 135 km/h, os gráficos apresentam diferenças entre si nas menores densidades de motos. Quando a velocidade máxima de ambos os veículos é 54 km/h, as curvas se apresentam de forma diferente das demais.

O consumo de energia do carro é dado em MJ por km (Apêndice I). É possível verificar a variação no consumo energético do carro, que diminui quando

aumentamos a velocidade da moto de 54 km/h para 135 km/h nas situações de densidade intermediárias. Isso é, na situação estudada, o aumento da velocidade máxima da moto contribui para redução do consumo de energia média do veículo. De forma geral, o consumo para os carros não apresentam grandes variações quando em velocidade de 54 km/h. Para as motos (Apêndice J) percebe-se que não há grande variação do consumo de energia com as variações sugeridas.

O custo mensal do automóvel em função da densidade de carros é visto no Apêndice J. Na escala exibida não podemos ter muitas conclusões. Mas é possível perceber que na maior presença de motocicletas, há um aumento no custo dos automóveis à medida que diminui a velocidade máxima do carro e aumenta a velocidade máxima da moto. No caso do custo das motos (Apêndice L) também não podemos avaliar com precisão a influência das velocidades máximas em seu custo mensal.

Os resultados discutidos anteriormente são para a combinação de velocidades máximas e mínimas possíveis para carros e motos. Na Tabela 13 e na Tabela 14 há um resumo dos resultados de várias métricas na situação de fluxo máximo de veículos (carros + motos) em função de todas as velocidades máximas.

Tabela 13 – Variação das métricas na condição de fluxo máximo para as diversas velocidades máximas

Estudo	$V_{\text{máx}}$ Carro (Cel/s)	$V_{\text{máx}}$ Moto (Cel/s)	$Q_{\text{máx}}$ (Veículos/h)	Q_{carro} (Carros/h)	Q_{moto} (motos/h)	ρ_{carro} (carros/ km)	ρ_{moto} (motos/ km)	$V_{\text{média}}$ carro (km/h)	$V_{\text{média}}$ moto (km/h)
1	4	4	4.595	17	4.578	0,3	93,9	49,7	48,7
2	4	6	4.763	15	4.748	0,3	93,9	44,1	50,5
3	4	8	4.764	14	4.750	0,3	93,9	41,1	50,5
4	4	10	4.761	13	4.748	0,3	93,9	39,7	50,5
5	6	4	4.537	259	4.278	5,3	93,9	49,3	45,3
6	6	6	4.772	17	4.754	0,3	93,9	52,0	50,6
7	6	8	4.911	1.123	3.788	14,4	40,9	77,5	92,4
8	6	10	4.958	783	4.175	10,0	40,8	77,9	102,1
9	8	4	4.426	268	4.158	5,3	94,2	51,0	44,0
10	8	6	4.761	18	4.743	0,3	93,9	53,7	50,5
11	8	8	5.045	1.004	4.041	10,0	40,8	99,8	98,9
12	8	10	5.162	571	4.591	5,5	39,8	103,0	115,2
13	10	4	4.290	796	3.494	15,6	92,9	50,8	37,6
14	10	6	4.759	20	4.739	0,3	93,9	57,6	50,4
15	10	8	5.043	1.014	4.029	10,5	39,8	106,5	105,5
16	10	10	5.247	33	5.214	0,2	40,1	130,5	129,9

Tabela 14 - Variação das métricas na condição de fluxo máximo para diversas velocidades máximas

Estudo	V _{máx} Carro (Cel/s)	V _{máx} Moto (Cel/s)	Des. Pad. Vel Carro (km/h)	Des. Pad. Vel Moto (km/h)	Cons. Energ. Carro (MJ/km)	Cons. Energ. Moto (MJ/km)	Custo Mensal Carro (\$/mês)	Custo Mensal Moto (\$/mês)	Emissão total na pista (kg CO ₂ /h)
1	4	4	ND	9,9	3,88	1,05	172,86	35,34	2566,9
2	4	6	ND	29,7	3,38	1,11	174,91	35,39	2696,2
3	4	8	ND	38,6	3,27	1,15	178,29	35,75	2784,4
4	4	10	ND	43,3	3,27	1,16	179,94	35,92	2824,3
5	6	4	12,0	13,8	5,57	1,10	190,17	36,07	3234,7
6	6	6	ND	31,1	4,37	1,07	176,04	34,89	2586,1
7	6	8	8,5	19,6	5,23	1,52	162,56	31,98	3847,4
8	6	10	7,3	29,6	5,17	1,69	161,94	31,93	3372,2
9	8	4	10,4	15,1	5,47	1,10	188,38	36,17	3179,2
10	8	6	ND	30,9	4,94	1,11	180,06	34,97	2605,8
11	8	8	15,4	18,6	6,53	1,52	158,36	31,33	3566,5
12	8	10	10,5	24,03	6,42	1,78	156,47	31,20	2965,6
13	10	4	12,9	18,9	5,84	1,16	192,3	37,24	4556,5
14	10	6	ND	30,56	5,21	1,18	178,2	35,13	2643,8
15	10	8	ND	5,21	6,28	1,56	154,4	30,9	1768,1
16	10	10	ND	12,49	6,76	1,88	148,5	30,52	2120,4

Tabela 15 - Variação das métricas em relação ao caso padrão

Estudo	Perc. de Carros (%)	Perc. de Motos (%)	Variação no fluxo total de veículos (%)	Variação na Vel. Média dos Carros (%)	Variação na Vel. Média das Motos (%)	Variação no Cons. de Energia Médio dos Carros (%)	Variação no Cons. de Energia Médio das Motos (%)	Variação no Custo Mensal dos Carros (%)	Variação no Custo Mensal das Motos (%)	Variação na emissão total na pista (%)
1	0.4%	99.6%	7.1%	-2.2%	29.5%	-33.6%	-9.5%	-10.1%	-5.1%	-44%
2	0.3%	99.7%	11.0%	-13.2%	34.3%	-42.1%	-4.3%	-9.0%	-5.0%	-41%
3	0.3%	99.7%	11.0%	-19.1%	34.3%	-44.0%	-0.9%	-7.3%	-4.0%	-39%
4	0.3%	99.7%	11.0%	-21.9%	34.3%	-44.0%	0.0%	-6.4%	-3.5%	-38%
5	5.7%	94.3%	5.8%	-3.0%	20.5%	-4.6%	-5.2%	-1.1%	-3.1%	-29%
6	0.4%	99.6%	11.2%	2.4%	34.6%	-25.2%	-7.8%	-8.5%	-6.3%	-43%
7	22.9%	77.1%	14.5%	52.6%	145.7%	-10.4%	31.0%	-15.5%	-14.1%	-16%
8	15.8%	84.2%	15.6%	53.3%	171.5%	-11.5%	45.7%	-15.8%	-14.3%	-26%
9	6.1%	93.9%	3.2%	0.4%	17.0%	-6.3%	-5.2%	-2.0%	-2.9%	-30%
10	0.4%	99.6%	11.0%	5.7%	34.3%	-15.4%	-4.3%	-6.4%	-6.1%	-43%
11	19.9%	80.1%	17.6%	96.5%	163.0%	11.8%	31.0%	-17.6%	-15.9%	-22%
12	11.1%	88.9%	20.3%	102.8%	206.4%	9.9%	53.4%	-18.6%	-16.2%	-35%
13	18.6%	81.4%	-	-	-	-	-	-	-	-
14	0.4%	99.6%	10.9%	13.4%	34.0%	-10.8%	1.7%	-7.3%	-5.7%	-42%
15	20.1%	79.9%	17.6%	109.6%	180.6%	7.5%	34.5%	-19.7%	-17.0%	-61%
16	0.6%	99.4%	22.3%	156.9%	245.5%	15.8%	62.1%	-22.8%	-18.0%	-53%

A Tabela 15 tem como objetivo comparar os dados obtidos na Tabela 13 e na Tabela 14. As métricas, dispostas no título das colunas são comparadas com o caso padrão estudado no ponto 4.3 desse trabalho. No caso padrão (estudo 13) a velocidade máxima é de 10 células por segundo para o carro e 4 células por segundo para a moto. A variação positiva dos valores analisados na Tabela 15 indica aumento nos valores em relação ao caso padrão, e a variação negativa indica redução do valor.

Os percentuais de carros e motos, presentes na Tabela 15 tem como objetivo indicar no fluxo máximo obtido, qual foi o percentual de cada veículo em sua composição. Verificamos que, em grande parte dos casos, 10 estudos dos 16 realizados, o fluxo máximo de veículos é composto por mais de 90% de motos.

Em relação à variação do fluxo, percebemos que qualquer aumento na velocidade máxima da moto, gera um aumento no fluxo total de veículos na via, assim como se houver a redução na velocidade máxima do carro também há um incremento nesse fluxo. Isto é, o estudo 13, situação padrão, é o que apresenta o menor fluxo máximo possível de todos os estudados. O fluxo máximo, dentre todos os casos é obtido no estudo 16.

Também é estudado o comportamento da velocidade média dos carros. Percebemos que na situação ótima a velocidade média pode aumentar em até 156%, visto no estudo 16.

Quando analisamos a velocidade média da motocicleta, vemos que qualquer variação incrementa a velocidade média da mesma, pois a situação padrão (estudo 13) é a que apresenta menor velocidade média possível para a motocicleta. Nesse estudo, qualquer variação das velocidades em comparação com o caso padrão, inclusive diminuindo a velocidade máxima dos carros pode gerar um aumento na velocidade média da moto em até 17%, visto no estudo 9.

A variação do consumo médio de energia do carro revela que em 11 estudos é possível reduzir o consumo médio do veículo. As maiores reduções ocorrem nos estudos 1, 2, 3 e 4, onde a velocidade do carro é a menor possível (54 km/h). Embora a redução da velocidade máxima (e conseqüente redução da força de arrasto atuante sobre o veículo) influencie a redução do consumo, no estudo 14 também ocorre redução do consumo médio do carro, em 10,8%, isto é, o incremento

da velocidade da moto gerou, no sistema, uma oportunidade para o menor consumo do carro.

Para as motocicletas, a variação do consumo médio ocorre em 7 situações, mas sempre com valores menores do que 10%. Já em uma situação extrema, estudo 16, é possível aumentar o consumo da moto em cerca de 62%.

As três últimas colunas apresentam resultados interessantes. As duas primeiras tratam do custo médio mensal do veículo, e para todas as situações estudadas, de automóveis e motocicletas, uma variação da velocidade máxima da via para quaisquer dos demais valores estudados representa uma redução no custo para o dono, tanto do automóvel quanto da motocicleta.

Para o carro, a redução no custo é de no mínimo 2,0% no estudo 9 e varia até uma redução de 22,8% do estudo 16. Para motocicleta, a redução mínima ocorre no estudo 9, com redução de 2,8% e máximo de 18% do estudo 16.

A última métrica analisada da Tabela 15 é a emissão total na pista, e da mesma forma do que ocorreu no custo dos veículos, também há redução da emissão de CO₂ para qualquer variação. A redução da emissão pode chegar a até 61% para o estudo 15.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Após todas as análises, podemos concluir qual é o melhor cenário para cada ponto de vista. Para motoristas de carros, considerando que desejam a maior velocidade média possível, a melhor situação ocorre quando não há motocicletas na via $\rho^{(m)}=0$ e baixa densidade de carros ($\rho^{(c)}<20$). Considerando os custos individuais, os motoristas de carros preferem trafegar em uma via sem carros e sem motos ($\rho^{(c)}=0$, $\rho^{(m)}=0$). Para os donos de motocicletas, do ponto de vista de velocidade média, é interessante que haja uma baixa densidade de motos ($\rho^{(m)}<40$), pois nessas condições elas podem circular livremente em máxima velocidade em sua via exclusiva. A mesma condição é interessante financeiramente, pois para as motocicletas o custo devido ao tempo perdido é o mais relevante.

Para a sociedade, as métricas devem ser outras. Do ponto de vista do fluxo total de veículos, é interessante que poucos carros ($\rho^{(c)}=15$) e mais motos ($\rho^{(m)}=93,3$) estejam circulando na via, com fluxo total de $\rho=108,3$, como visto na Figura 23. Devemos lembrar que o mais importante é o fluxo total de pessoas na via, e não veículos. Nesse trabalho consideramos que cada veículo transporta apenas uma pessoa, embora obviamente carros e motos tenham média de pessoas transportadas por veículo maiores. Além disso, como não estudamos a influência do transporte coletivo (ônibus, BRT e metrô), sabemos que o fluxo de pessoas varia com a inserção desses meios de transporte em uma cidade.

Para a emissão de CO_2 , o estudo considerou o valor emitido como proporcional ao consumo energético, considerando para isso a conversão completa do combustível (iso-octano) em CO_2 . A Figura 29 e a Figura 30 mostram que para um fluxo fixo é importante ter uma maior proporção de motocicletas, pois elas são mais econômicas, resultando em menor emissão total de poluentes na via.

Um resultado importante é que, para o mesmo fluxo total, a densidade relativa de carros e motos pode ter impacto importante na emissão de CO_2 na via. Quanto maior a quantidade de motos, menor a emissão da via. É importante lembrarmos que, consideramos a motocicleta e o automóvel carregando apenas uma pessoa. Aumentando o valor de pessoas que transitam no automóvel, estudando por exemplo uma situação com média de três passageiros no carro, essa relação tende

a mudar. Também não foi incluído, nesse estudo, outros poluentes gerados pelo processo de combustão (CO , NO_x , SO_x , HC) que também devem ser levados em consideração em uma análise mais detalhada.

É possível concluir que, como sugerido na introdução, a melhor condição de tráfego depende da métrica selecionada (e.g., velocidade média, fluxo de veículos, custos e emissões) e do ponto de vista (e.g., social e individual). Podemos concluir que o percentual de motos e carros influencia fortemente as métricas. A metodologia proposta de trabalho entre diferentes escalas (motor, veículo e tráfego) é simples e pode ser melhorada do ponto de vista quantitativo e qualitativo.

Como sugestões e expectativas de trabalhos futuros podemos citar, inicialmente, o melhor relacionamento entre os modelos utilizados, de forma que trabalhem de maneira simultânea, como sugere a Figura 17. Dessa forma, o modelo do tráfego não seria discreto, mas teria relacionamento simultâneo entre o modelo do motor, verificando marcha, rotação do motor e consumo instantaneamente, assim como com o modelo do veículo, compreendendo a ação das forças que atuam sobre o mesmo. Dessa forma o modelo seria contínuo, gerando uma avaliação mais precisa do que ocorre na via.

De posse desse modelo, estudos podem ser realizados com objetivo de compreender novas informações, em especial:

- Emissão de CO_2 e demais poluentes (CO , NO_x , SO_x , Hidrocarbonetos não queimados totalmente e material particulado) em função do tráfego;
- Relação entre acidentes de motociclistas em função da velocidade máxima permitida na via e da relação entre a proporção entre carros e motos presentes nela;
- Comportamento das métricas na via a partir da inserção de transporte coletivo (ônibus, vans, BRTs) além de como se comportam o trânsito e as métricas com a presença de uma faixa exclusiva para os veículos coletivos;

- Comportamento das métricas quando se inserem veículos com baixo ou nenhum consumo energético (bicicletas, cinquentinhas, bicicletas elétricas) e como afetam o tráfego;
- Comportamento do consumo energético na via com inserção de veículos elétricos;
- Comportamento da via com semáforos, intersecções, mais vias (nesse trabalho as pistas têm apenas duas vias) bifurcações, entre outros;
- Extrapolação do modelo para abranger uma maior região (bairro ou cidade), analisando o comportamento geral e as métricas estudadas.

REFERÊNCIAS

- AYCIN, M. F & BENEKOHAL, R. F. Linear acceleration car-following model development and validation. **Transportation Research Record**, 1644, p.10-19, 1998.
- AGGARWAL, P.; JAIN, S. Energy demand and CO2 emissions from urban on-road transport in Delhi: current and future projections under various policy measures. **Journal Of Cleaner Production**, v. 128, p.48-61, ago. 2016. Elsevier BV.
- ARAZAN, V.T. & KOSHY, R.Z. Methodology for highly heterogeneous traffic flow. **Journal of Transportation Engineering, ASCE** v, 131, no. 7, 2005, 544-551
- BEJAN, A, MORAN, M. & TSATSARONIS, G. Thermal Design and Optimization. **John Wiley and Sons**. 1996
- BHAM, H. S. Comparison of Characteristics and Computations Performance: Car-Following versus Cellular Automata Models. **TRB Committee on Artificial Intelligence (A5008C)** 2002
- BORREGO, C. et al. Urban scale air quality modelling using detailed traffic emissions estimates. **Atmospheric Environment**, v. 131, p.341-351, abr. 2016. Elsevier BV.
- CHANDRA, S.; MEHAR, A.; VELMURUGAN, S.. Effect of traffic composition on capacity of multilane highways. **Ksce Journal Of Civil Engineering**, v. 20, n. 5, p.2033-2040, 11 dez. 2015. Springer Nature.
- CHEN, C.; CHEN, C. Speeding for fun? Exploring the speeding behavior of riders of heavy motorcycles using the theory of planned behavior and psychological flow theory. **Accident Analysis & Prevention**, v. 43, n. 3, p.983-990, maio 2011. Elsevier BV.
- COOMBS, M. Motorcycle Basics Techbook. **Haynes Publishing TECHBOOK**, 2002
- COSSALTER, V. Motorcycle Dynamics, 2nd edition. **Editora Lulu**, 2006
- CUNHA, Saulo dos Santos. **Estudo Computacional da Dinâmica das Motocicletas nas Acelerações, Frenagens e Curvas: O Efeito da Técnica do Piloto e das Condições da Estrada**. 2016. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação Engenharia Mecânica, UFPE, Recife, 2016. Cap. 5
- DENATRAN. **Frota de veículos**. 2016. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/frota.htm>>. Acesso em: 10 jan. 2017.
- DNIT. **Normas de projetos de estradas**. 1973. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/download/rodovias/operacoes-rodoviaras/faixa-de-dominio/normas-projeto-estr-rod-reeditado-1973.pdf>>. Acesso em: 13 de outubro de 2016.

EMMERICH, H., and E. RANK. Investigating Traffic Flow in the Presence of Hindrances by Cellular Automata, **Physica A**. 216(4), pp. 435-444, 1995.

FERGUSON, C.R. & KIRKPATRICK, A.T. Internal Combustion Engines: Applied Thermosciences, **Publisher: John Wiley & Sons Ltd**, 2016

FINDLEY *et al.* Highway Engineering: Planning, desing and operation. **Elsevier**, 2016.

FONT, A.; FULLER, G. W. Did policies to abate atmospheric emissions from traffic have a positive effect in London? **Environmental Pollution**, v. 218, p.463-474, nov. 2016. Elsevier BV.

GÖSSLING, S.; CHOI, A. S.. Transport transitions in Copenhagen: Comparing the cost of cars and bicycles. **Ecological Economics**, v. 113, p.106-113, maio 2015. Elsevier BV.

JOAQUIM, R. L. **Planos de metas e consequências da industrialização brasileira**. 2008. 1 v. Tese (Doutorado) - Curso de Ciências Econômicas, UFSC, 2008.

LAN, L. W.; CHANG, C. Inhomogeneous cellular automata modeling for mixed traffic with cars and motorcycles. **Journal Of Advanced Transportation**, v. 39, n. 3, p.323-349, jun. 2005. Wiley-Blackwell.

LAN, L. W. et al. Cellular automaton simulations for mixed traffic with erratic motorcycles' behaviours. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 389, n. 10, p.2077-2089, maio 2010. Elsevier BV.

MAGNANI, F.S. **Visões sobre duas rodas**. Vol 01: Uma visão técnica. 2016

MANAN, M. M. A.. Motorcycles entering from access points and merging with traffic on primary roads in Malaysia: Behavioral and road environment influence on the occurrence of traffic conflicts. **Accident Analysis & Prevention**, v. 70, p.301-313, set. 2014. Elsevier BV.

MANKIW, N.G. Introdução à Economia: Princípios de Macro e Microeconomia. **Cengage**. 2005, 3ª edição.

MARTINS, J. Motores de Combustão Interna. Quarta Edição. Porto, Portugal: Publindústria, **Edições Técnicas**, 2013.

MENDES, M.; DUARTE, G.; BAPTISTA, P. Introducing specific power to bicycles and motorcycles: Application to electric mobility. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 51, p.120-135, fev. 2015. Elsevier BV.

OMS (World Health Organization), 2015. **Global status report on road safety**. Inj. Prev. 318. Disponível em
<http://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/2015/en/>
Acesso em 20 de dezembro de 2016

PATRIKSSON, M. The Traffic assignment problem: models and methods. **Dover Publications, NY**. 2015

SEERIG, L. M. et al. Use of motorcycle in Brazil: users profile, prevalence of use and traffic accidents occurrence — a population-based study. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 21, n. 12, p.3703-3710, dez. 2016. FapUNIFESP (SciELO).

SOUZA, A. M. C.; VILAR, L. C. Q.. Traffic-flow cellular automaton: Order parameter and its conjugated field. **Physical Review e**, v. 80, n. 2, 13 ago. 2009. American Physical Society (APS).

STEG, L. Car use: lust and must. Instrumental, symbolic and affective motives for car use. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 39, n. 2-3, p.147-162, fev. 2005. Elsevier BV.

TRANTER, P. Effective Speed: Cycling Because It's "Faster," in: Pucher, J., Buehler, R. (Eds.), **City Cycling (Urban and Industrial Environments)**. **MIT Press**, p. 416.

TREIBER, M. KESTING, A. Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation. **Ed. Springer** 2013, p. 506.

TSAI, J.; CHU, C.; HU, S.. Road pricing for congestion and accident externalities for mixed traffic of motorcycles and automobiles. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 71, p.153-166, jan. 2015. Elsevier BV.

VASCONCELLOS, E. A., MENDONÇA, A., ALVIM, B.G., CARDOSO, A.C., GODOY, S., 2015. **Sistema de Informação da Mobilidade Urbana - Relatório Geral 2013**. São Paulo-SP.

VASCONCELLOS, E. A., 2012. **O transporte urbano no Brasil**. Disponível em: <<http://diplomatie.org.br/print.php?tipo=ar&id=1181>> Acesso em 15 de fevereiro de 2017

VASCONCELLOS, E. A., 2013. **Risco no Trânsito, Omissão e Calamidade: Impactos do Incentivo à Motocicleta no Brasil**.

VASIC, J.; RUSKIN, H. J.. Cellular automata simulation of traffic including cars and bicycles. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 391, n. 8, p.2720-2729, abr. 2012. Elsevier BV.

VILAR, L.C.Q.; SOUZA, A.M.C. de. Cellular automata models for general traffic conditions on a line. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 211, n. 1, p.84-92, out. 1994. Elsevier BV.

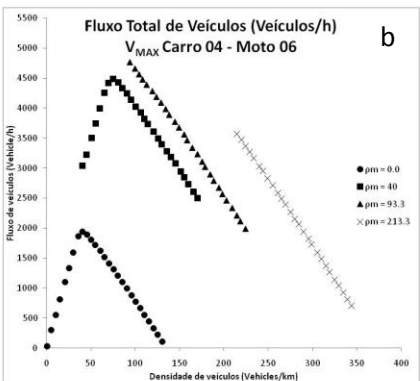
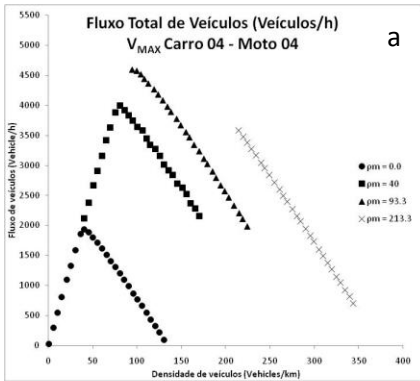
VUGT et al., Commuting by car or public transportation? A social dilemma analysis of travel mode judgements. **European Journal of Social Psychology**. v. 26, p.373-395. 1996

ZHANG, S. et al. Modeling real-world fuel consumption and carbon dioxide emissions with high resolution for light-duty passenger vehicles in a traffic populated city. **Energy**, v. 113, p.461-471, out. 2016. Elsevier BV.

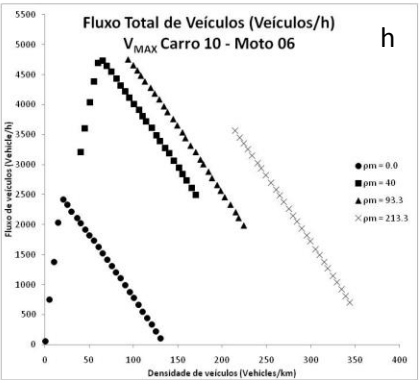
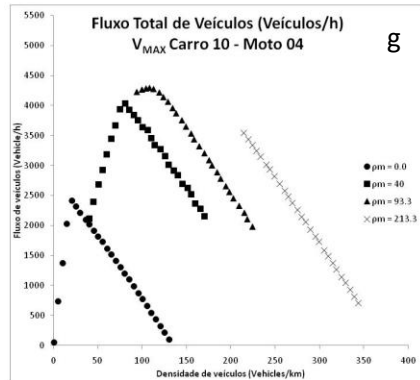
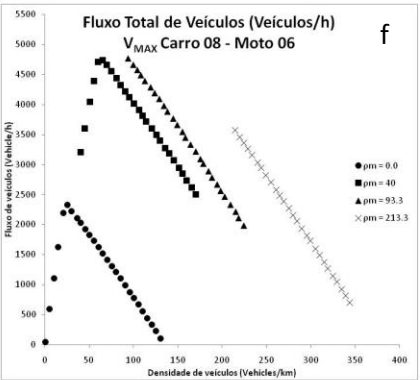
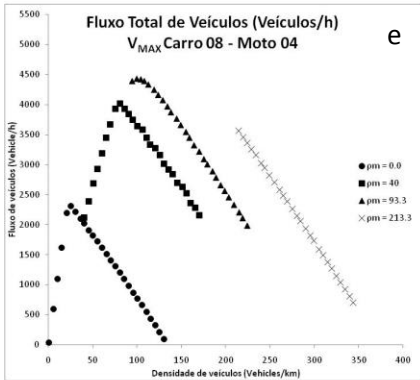
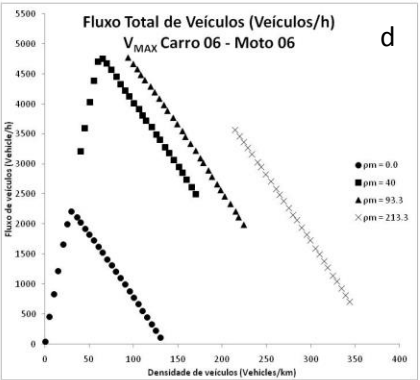
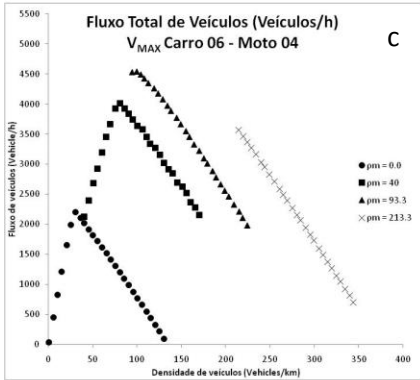
APÊNDICE

Os dados presentes no apêndice estão divididos de duas formas. Inicialmente mostramos 32 gráficos de fluxo total de veículos no Apêndice A1 até A4. Após esses dados, os resultados das demais métricas são exibidos em função da combinação de velocidades máximas e mínimas para carros e motos

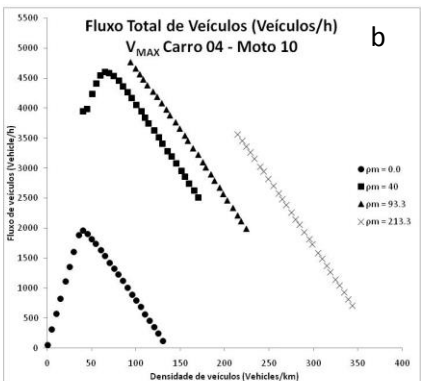
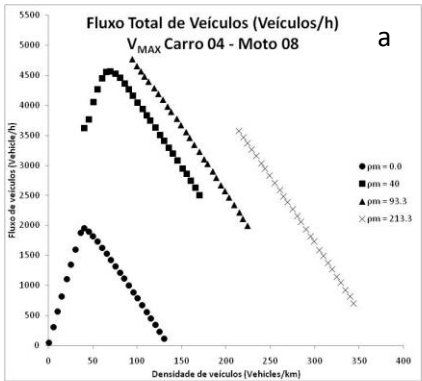
APÊNDICE A1: Fluxo total de veículos em função da densidade total para velocidades máximas de motocicletas de 04 e 06 células por passo de tempo



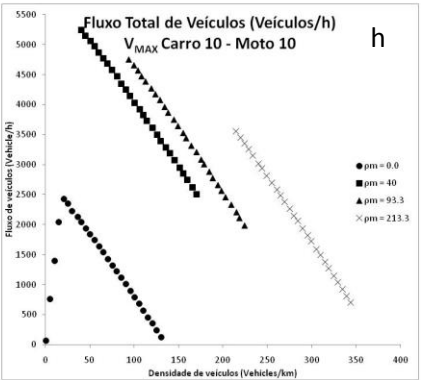
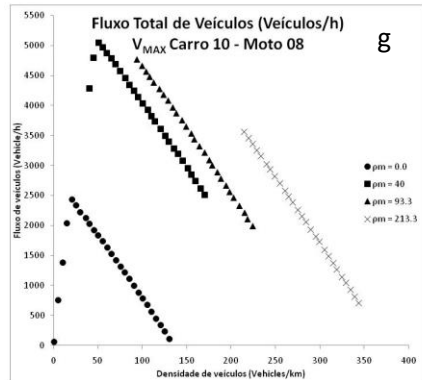
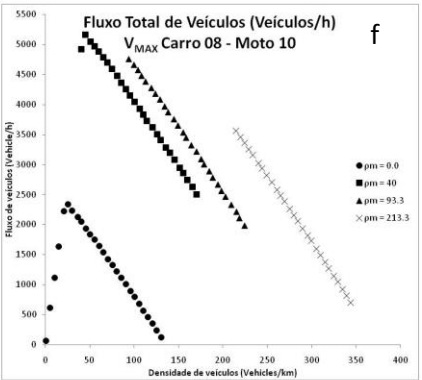
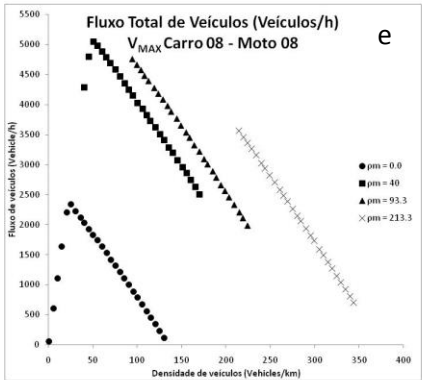
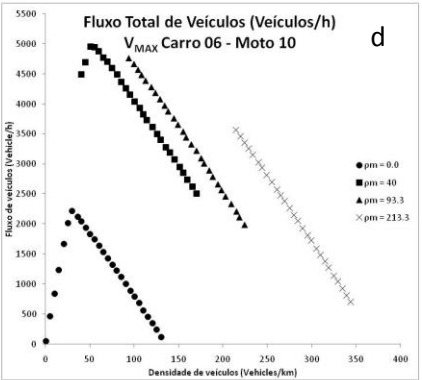
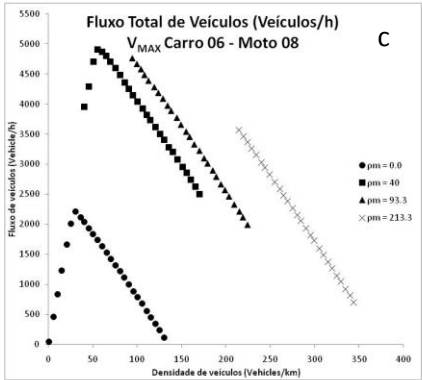
$V_{m\acute{a}x}$	Carro (cel/s)	Moto (cel/s)
a	4	4
b	4	6
c	6	4
d	6	6
e	8	4
f	8	6
g	10	4
h	10	6



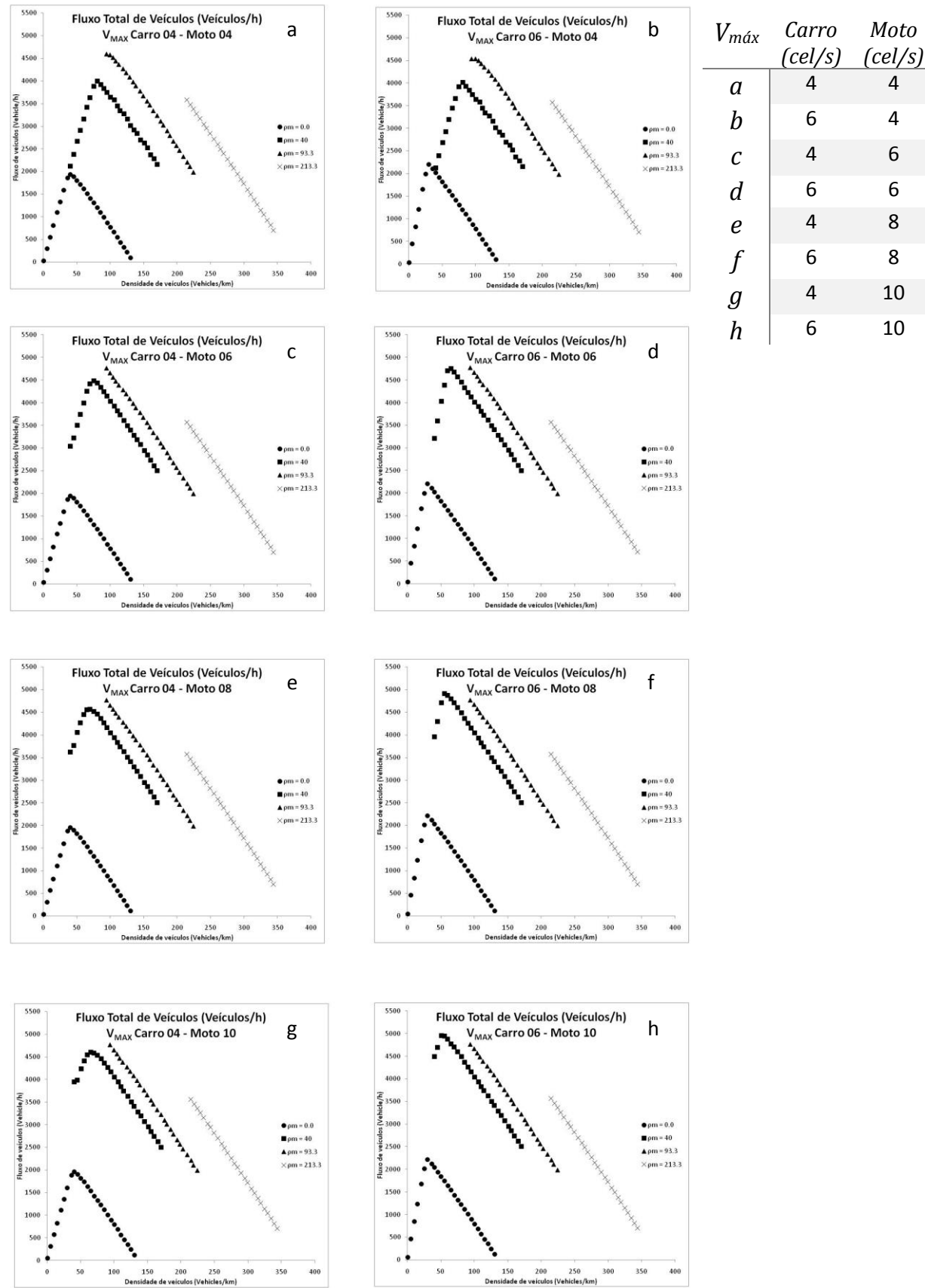
APÊNDICE A2: Fluxo total de veículos em função da densidade total para velocidades máximas de motocicletas de 08 e 10 células por passo de tempo



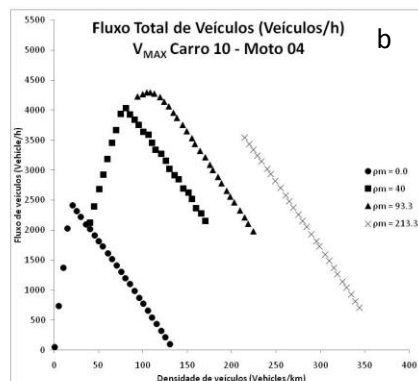
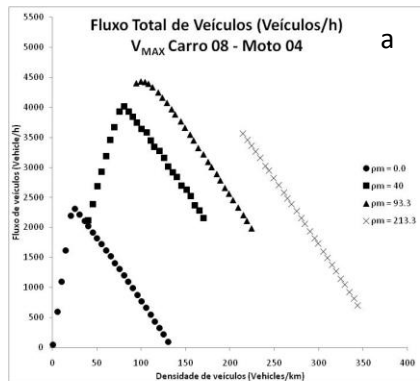
$V_{m\acute{a}x}$	Carro (cel/s)	Moto (cel/s)
a	4	8
b	4	10
c	6	8
d	6	10
e	8	8
f	8	10
g	10	8
h	10	10



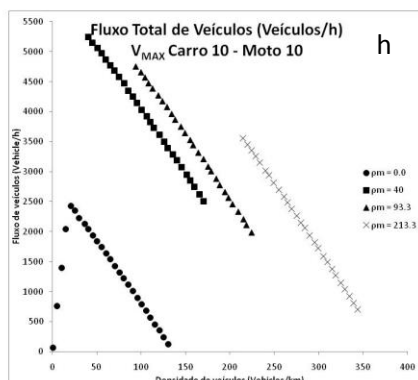
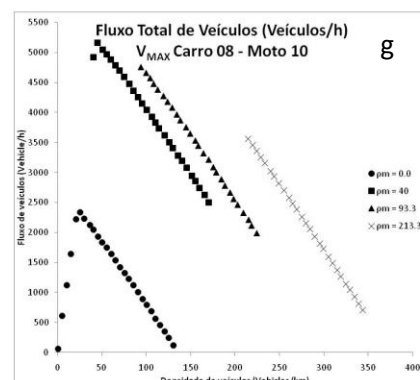
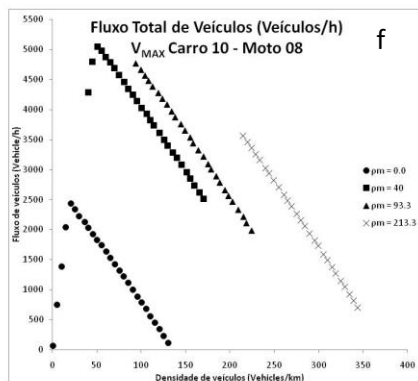
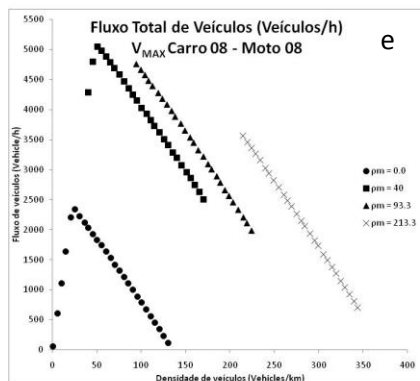
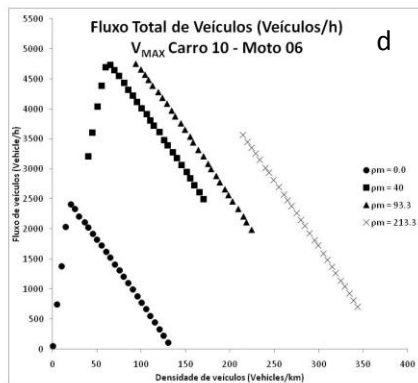
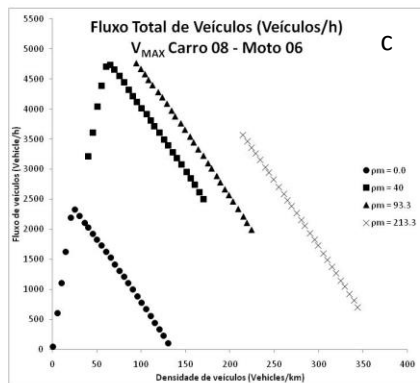
APÊNDICE A3: Fluxo total de veículos em função da densidade total para velocidades máximas de carros de 04 e 06 células por passo de tempo



APÊNDICE A4: Fluxo total de veículos em função da densidade total para velocidades máximas de carros de 08 e 10 células por passo de tempo



$V_{\text{máx}}$	Carro (cel/s)	Moto (cel/s)
a	8	4
b	10	4
c	8	6
d	10	6
e	8	8
f	10	8
g	8	10
H	10	10



APÊNDICE B: Fluxo total de veículos versus densidade de automóveis

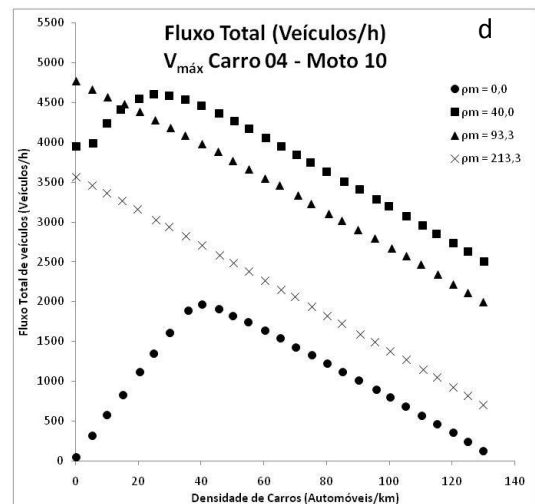
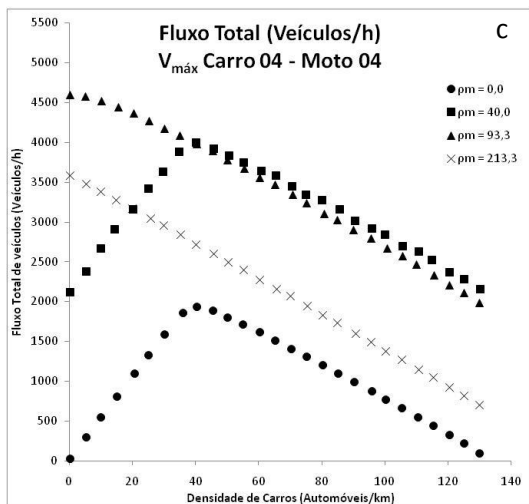
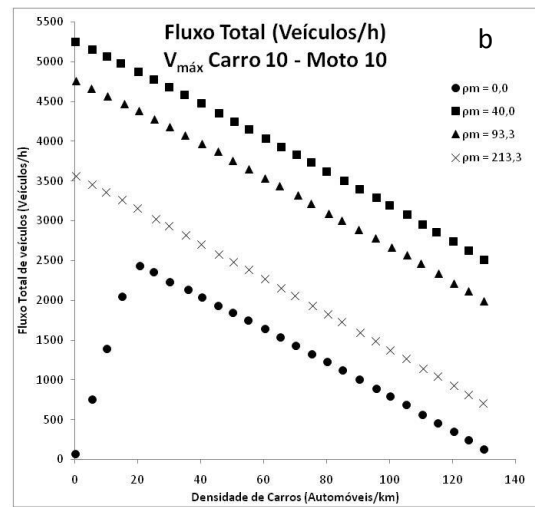
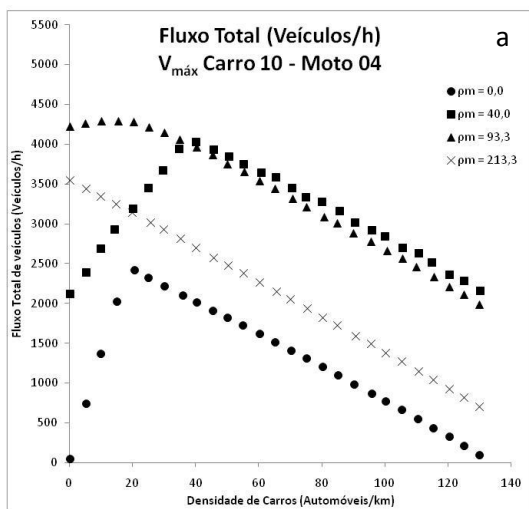
As figuras exibem os resultados para as seguintes combinações de velocidades máximas:

a - $v_{\text{máx}}^{(c)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$ e $v_{\text{máx}}^{(m)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$

b - $v_{\text{máx}}^{(c)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$ e $v_{\text{máx}}^{(m)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$

c - $v_{\text{máx}}^{(c)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$ e $v_{\text{máx}}^{(m)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$

d - $v_{\text{máx}}^{(c)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$ e $v_{\text{máx}}^{(m)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$



APÊNDICE C: Fluxo de automóveis versus densidade de carros

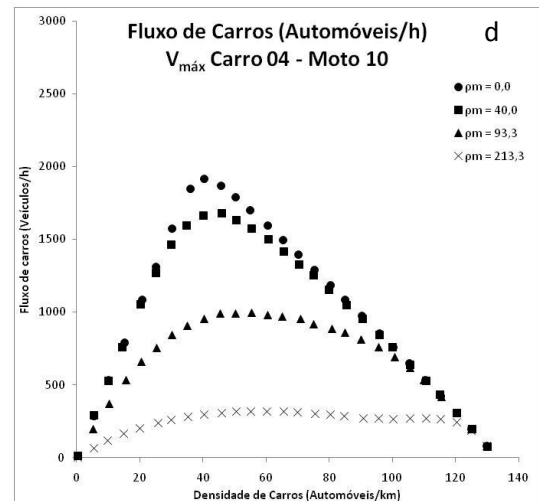
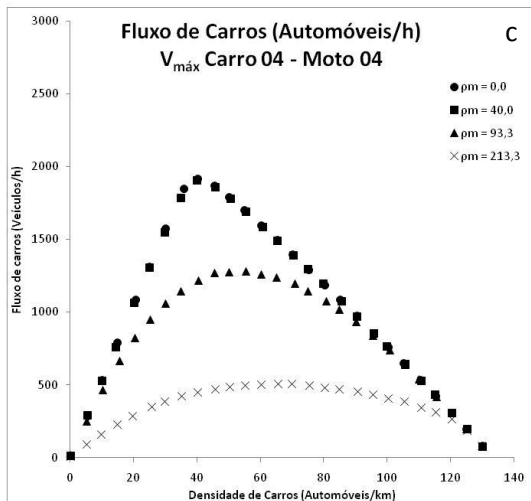
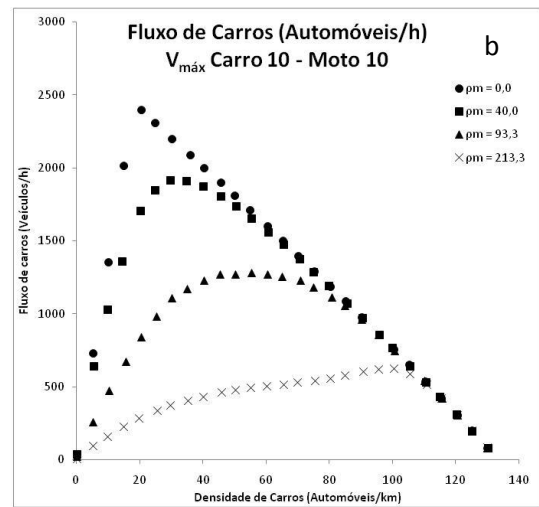
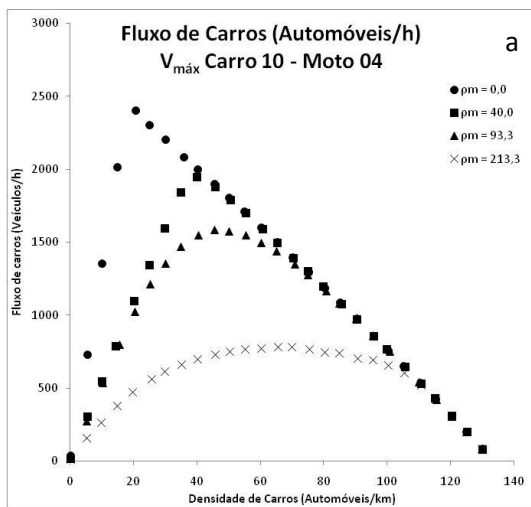
As figuras exibem os resultados para as seguintes combinações de velocidades máximas:

a - $v_{\text{máx}}^{(c)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$ e $v_{\text{máx}}^{(m)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$

b - $v_{\text{máx}}^{(c)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$ e $v_{\text{máx}}^{(m)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$

c - $v_{\text{máx}}^{(c)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$ e $v_{\text{máx}}^{(m)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$

d - $v_{\text{máx}}^{(c)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$ e $v_{\text{máx}}^{(m)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$



APÊNDICE D: Fluxo de motos versus densidade de carros

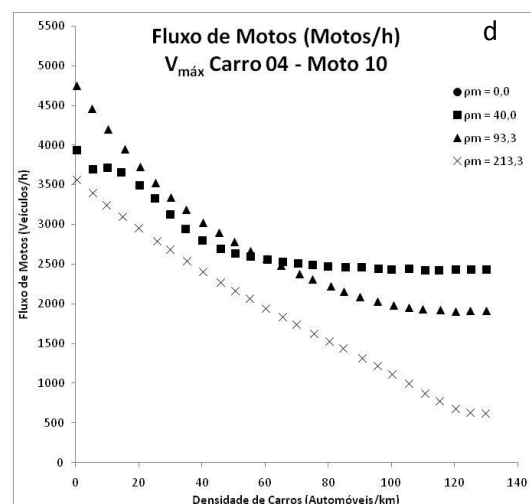
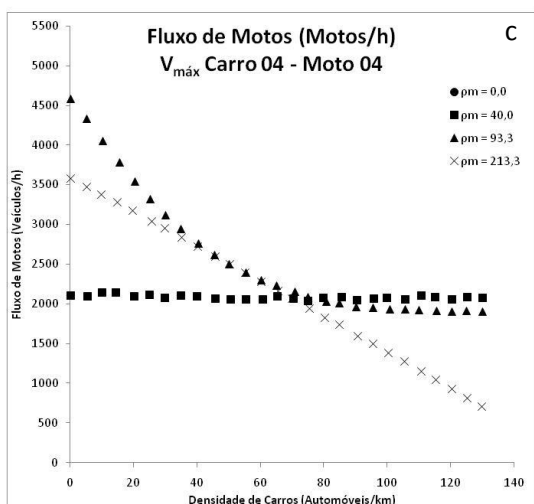
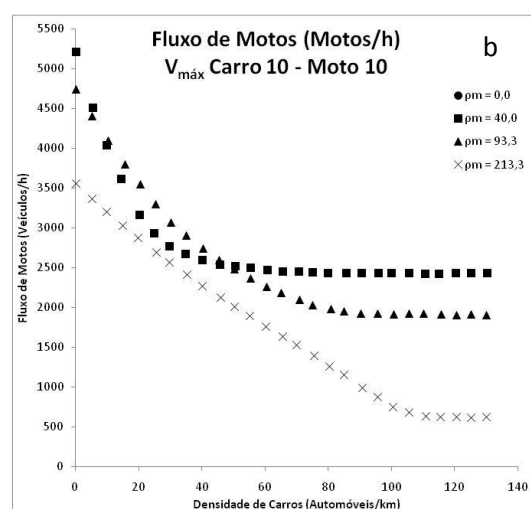
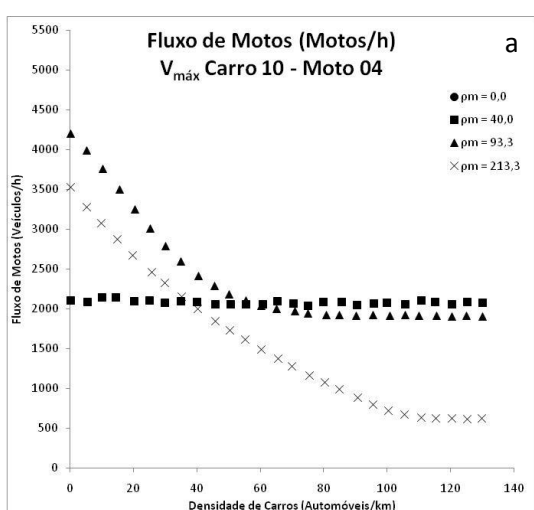
As figuras exibem os resultados para as seguintes combinações de velocidades máximas:

a - $v_{\text{máx}}^{(c)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$ e $v_{\text{máx}}^{(m)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$

b - $v_{\text{máx}}^{(c)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$ e $v_{\text{máx}}^{(m)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$

c - $v_{\text{máx}}^{(c)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$ e $v_{\text{máx}}^{(m)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$

d - $v_{\text{máx}}^{(c)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$ e $v_{\text{máx}}^{(m)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$



APÊNDICE E: Velocidade média dos carros versus densidade de carros

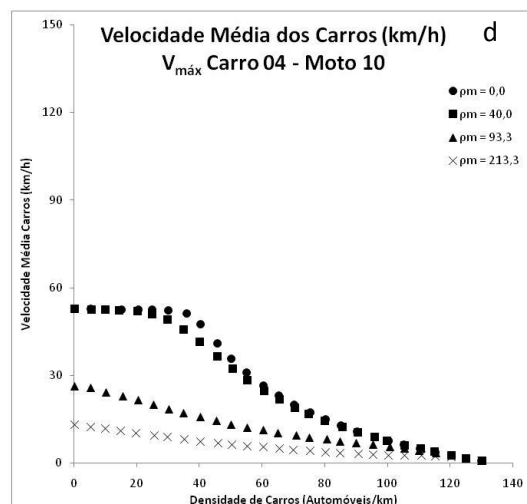
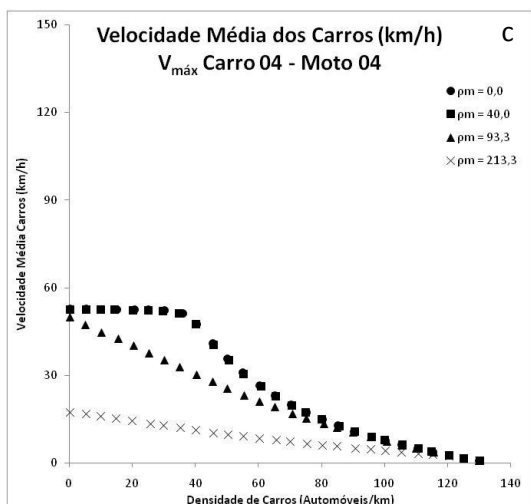
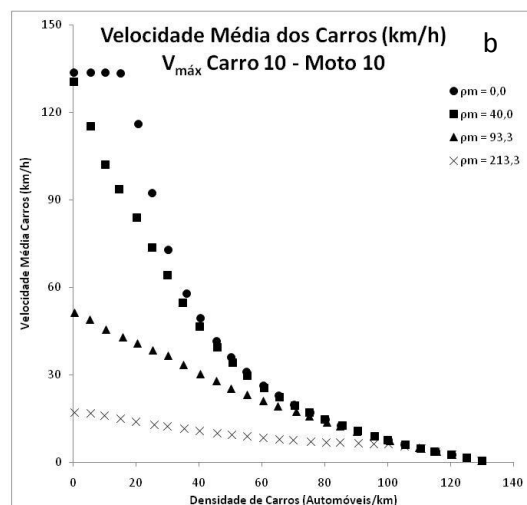
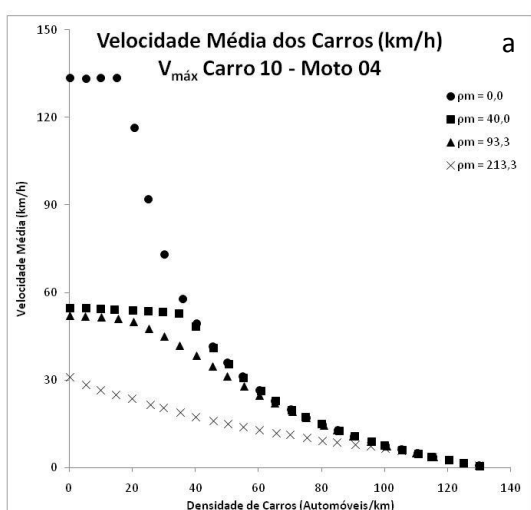
As figuras exibem os resultados para as seguintes combinações de velocidades máximas:

a - $v_{\text{máx}}^{(c)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$ e $v_{\text{máx}}^{(m)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$

b - $v_{\text{máx}}^{(c)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$ e $v_{\text{máx}}^{(m)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$

c - $v_{\text{máx}}^{(c)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$ e $v_{\text{máx}}^{(m)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$

d - $v_{\text{máx}}^{(c)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$ e $v_{\text{máx}}^{(m)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$



APÊNDICE F: Velocidade média das motos versus densidade de carros

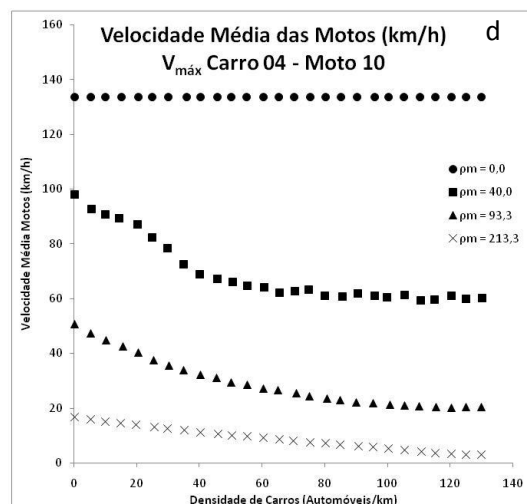
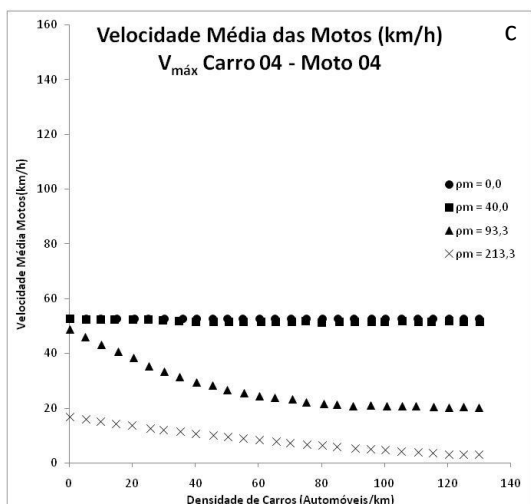
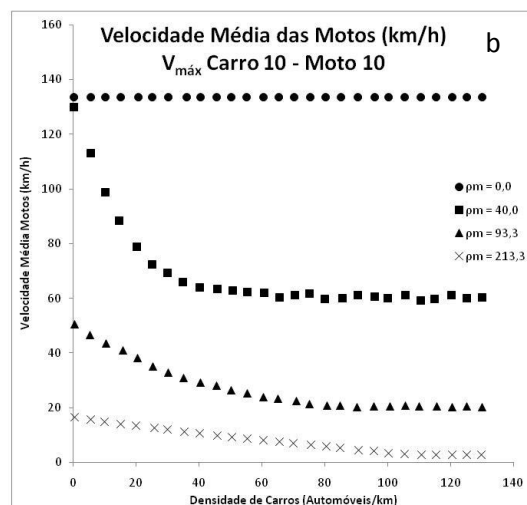
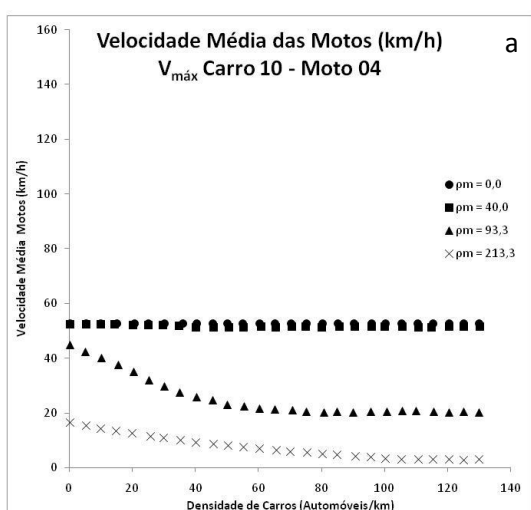
As figuras exibem os resultados para as seguintes combinações de velocidades máximas:

$$a - v_{\max}^{(c)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}} \text{ e } v_{\max}^{(m)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$$

$$b - v_{\max}^{(c)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}} \text{ e } v_{\max}^{(m)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$$

$$c - v_{\max}^{(c)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}} \text{ e } v_{\max}^{(m)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$$

$$d - v_{\max}^{(c)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}} \text{ e } v_{\max}^{(m)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$$



APÊNDICE G: Desvio padrão da velocidade dos carros x densidade dos carros

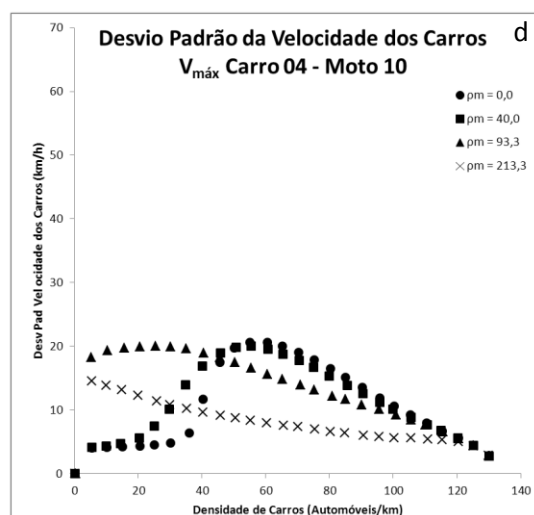
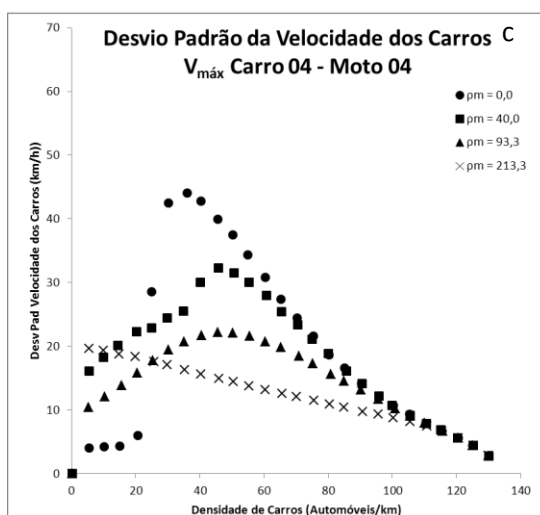
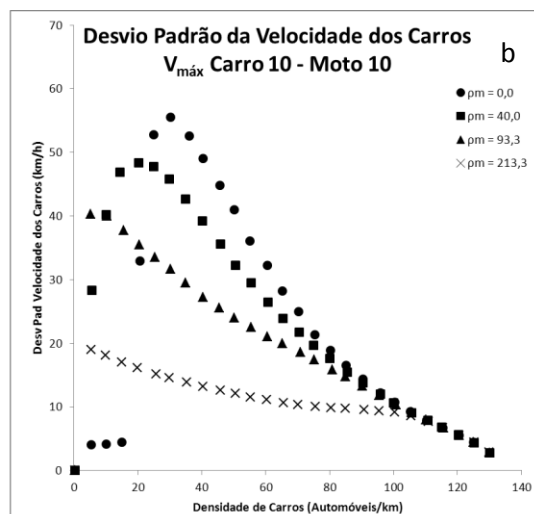
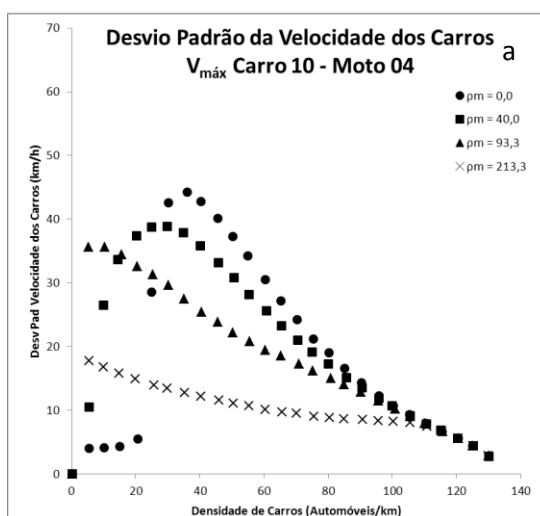
As figuras exibem os resultados para as seguintes combinações de velocidades máximas:

a - $v_{\max}^{(c)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$ e $v_{\max}^{(m)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$

b - $v_{\max}^{(c)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$ e $v_{\max}^{(m)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$

c - $v_{\max}^{(c)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$ e $v_{\max}^{(m)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$

d - $v_{\max}^{(c)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$ e $v_{\max}^{(m)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$



APÊNDICE H: Desvio padrão da velocidade das motos x densidade dos carros

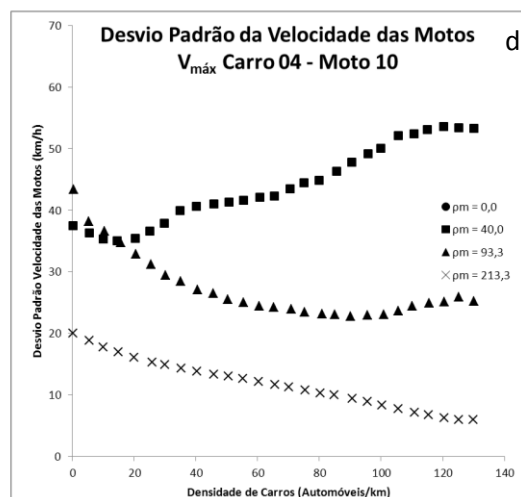
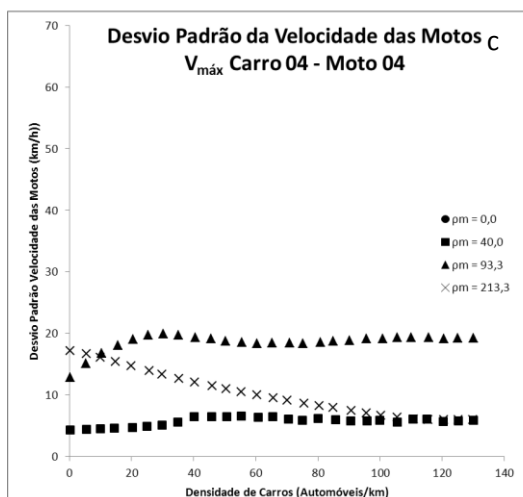
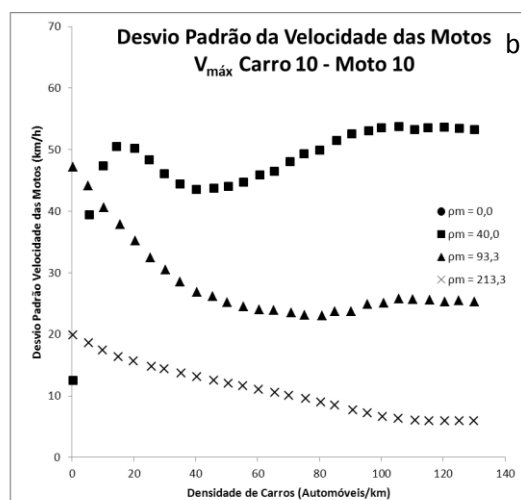
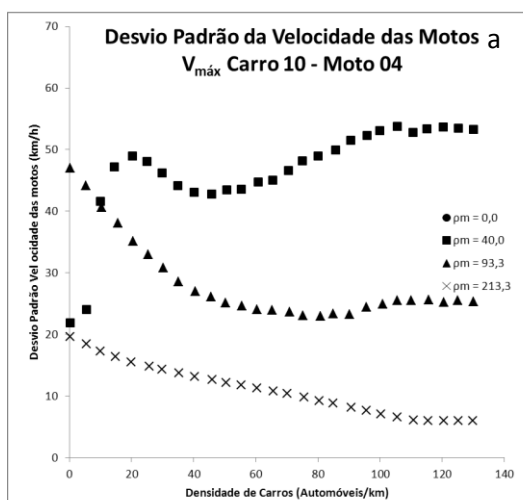
As figuras exibem os resultados para as seguintes combinações de velocidades máximas:

a - $v_{\max}^{(c)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$ e $v_{\max}^{(m)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$

b - $v_{\max}^{(c)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$ e $v_{\max}^{(m)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$

c - $v_{\max}^{(c)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$ e $v_{\max}^{(m)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$

d - $v_{\max}^{(c)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$ e $v_{\max}^{(m)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$



APÊNDICE I: Consumo de energia do carro por km versus densidade de carro

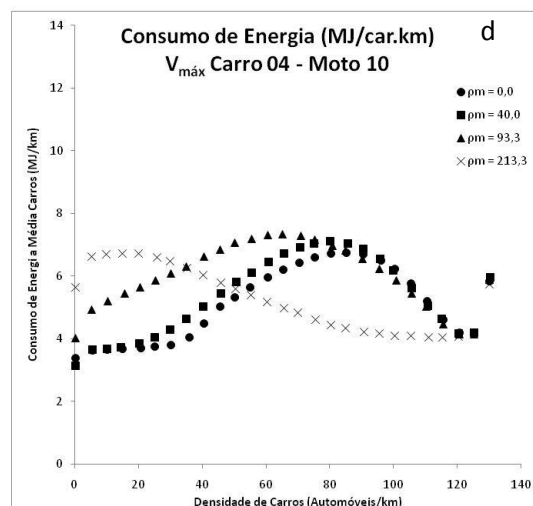
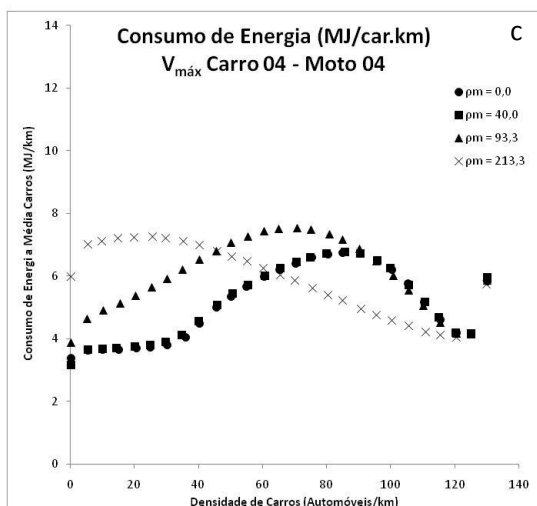
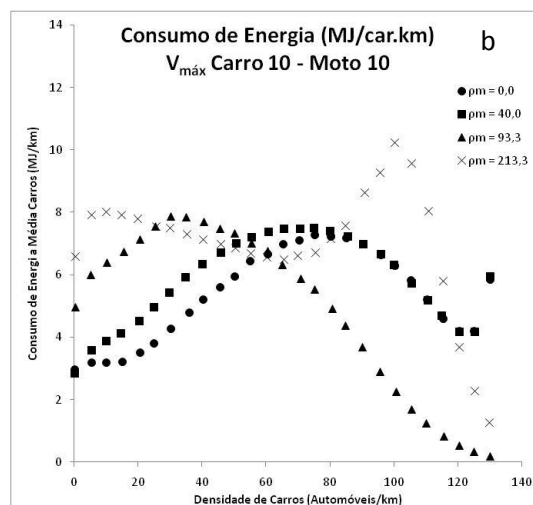
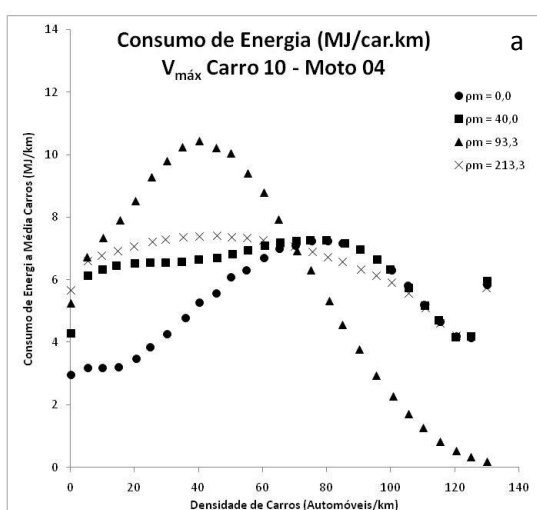
As figuras exibem os resultados para as seguintes combinações de velocidades máximas:

$$a - v_{\text{máx}}^{(c)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}} \text{ e } v_{\text{máx}}^{(m)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$$

$$b - v_{\text{máx}}^{(c)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}} \text{ e } v_{\text{máx}}^{(m)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$$

$$c - v_{\text{máx}}^{(c)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}} \text{ e } v_{\text{máx}}^{(m)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$$

$$d - v_{\text{máx}}^{(c)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}} \text{ e } v_{\text{máx}}^{(m)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$$



APÊNDICE J: Consumo de energia da moto por km versus densidade de carro

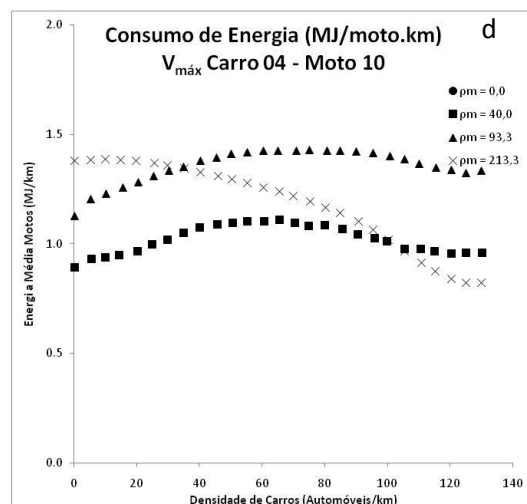
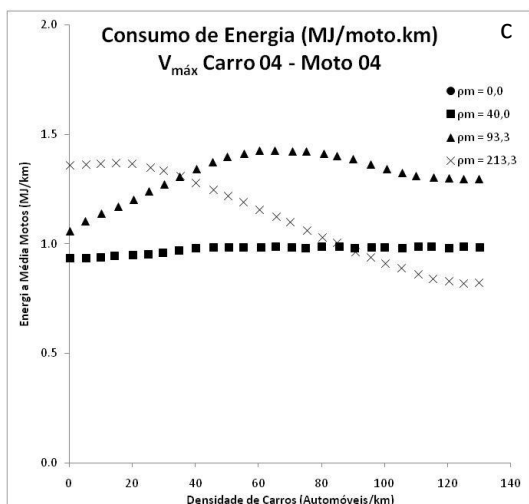
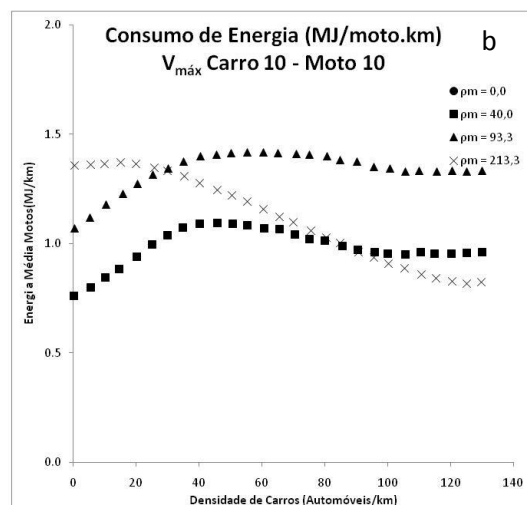
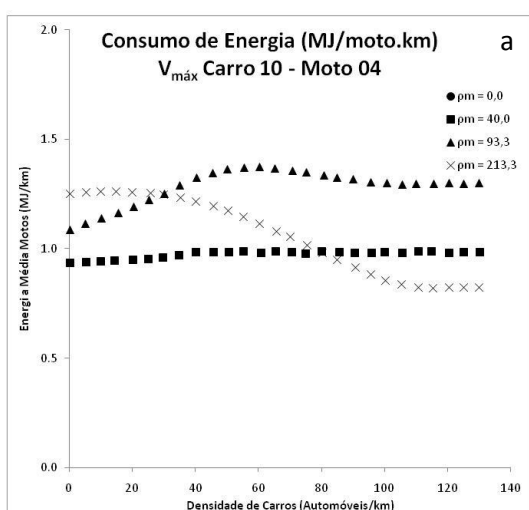
As figuras exibem os resultados para as seguintes combinações de velocidades máximas:

$$a - v_{\max}^{(c)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}} \text{ e } v_{\max}^{(m)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$$

$$b - v_{\max}^{(c)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}} \text{ e } v_{\max}^{(m)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$$

$$c - v_{\max}^{(c)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}} \text{ e } v_{\max}^{(m)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$$

$$d - v_{\max}^{(c)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}} \text{ e } v_{\max}^{(m)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$$



APÊNDICE K: Custo mensal do automóvel versus densidade de carros

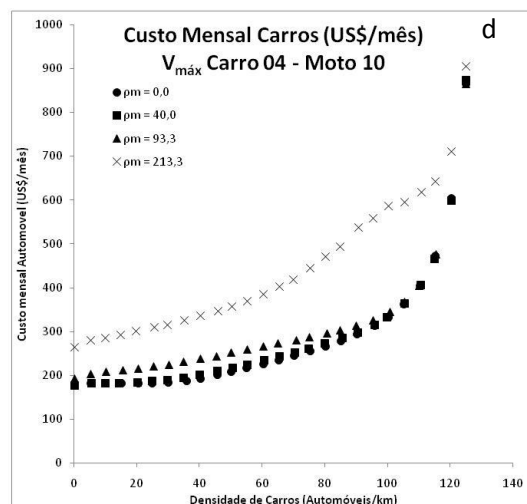
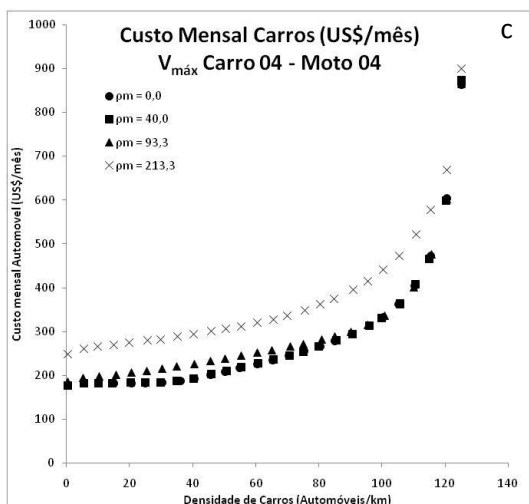
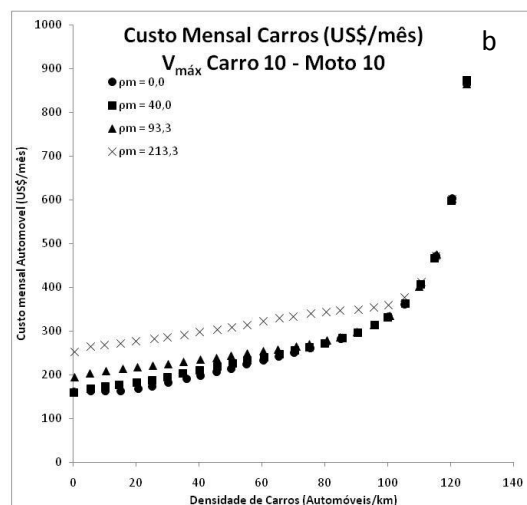
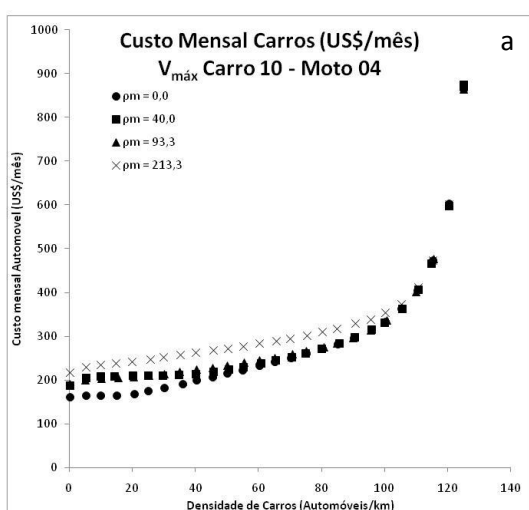
As figuras exibem os resultados para as seguintes combinações de velocidades máximas:

a - $v_{\text{máx}}^{(c)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$ e $v_{\text{máx}}^{(m)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$

b - $v_{\text{máx}}^{(c)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$ e $v_{\text{máx}}^{(m)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$

c - $v_{\text{máx}}^{(c)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$ e $v_{\text{máx}}^{(m)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$

d - $v_{\text{máx}}^{(c)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$ e $v_{\text{máx}}^{(m)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$



APÊNDICE L: Custo mensal da motocicleta versus densidade de carros

As figuras exibem os resultados para as seguintes combinações de velocidades máximas:

a - $v_{\max}^{(c)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$ e $v_{\max}^{(m)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$

b - $v_{\max}^{(c)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$ e $v_{\max}^{(m)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$

c - $v_{\max}^{(c)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$ e $v_{\max}^{(m)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$

d - $v_{\max}^{(c)} = 04 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$ e $v_{\max}^{(m)} = 10 \frac{\text{células}}{\text{passo de tempo}}$

