



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS FLORIANÓPOLIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO E  
SISTEMAS

Luiz Felipe Curtarelli

**Análise do consumo de combustível e da capacidade viária para a condução  
ecológica em microssimulação de tráfego**

Florianópolis/SC  
2021

Luiz Felipe Curtarelli

**Análise do consumo de combustível e da capacidade viária para a condução ecológica em microssimulação de tráfego**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de mestre em engenharia de automação e sistemas.

Orientador: Prof. Werner Kraus Jr., Dr.

Coorientador: Prof. Rodrigo Castelan Carlson, Dr.

Florianópolis/SC

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Curtarelli, Luiz Felipe

Análise do consumo de combustível e da capacidade viária  
para a condução ecológica em microssimulação de tráfego /  
Luiz Felipe Curtarelli ; orientador, Werner Kraus Jr.,  
coorientador, Rodrigo Castelan Carlson, 2022.

72 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Automação e Sistemas, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia de Automação e Sistemas. I. Kraus Jr.,  
Werner. II. Carlson, Rodrigo Castelan. III. Universidade  
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Automação e Sistemas. IV. Título.

Luiz Felipe Curtarelli

**Análise do consumo de combustível e da capacidade viária para a condução ecológica em microssimulação de tráfego**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.(a) Bruno Vieira Bertoncini, Dr(a).

UFC - DET

Prof.(a) Lauro Nicolazzi, Dr(a).

UFSC - EMC

Prof.(a) Vinicius Berdsen Peccin , Dr(a).

IFSC

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em engenharia de automação e sistemas.

---

Coordenação do Programa de  
Pós-Graduação

---

Prof. Werner Kraus Jr., Dr.  
Orientador

Florianópolis/SC, 2021.

Este trabalho à minha família.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço à Deus pela dádiva da vida, pela saúde, pelo trabalho e pelo pão de cada dia. Também agradeço a minha companheira e esposa Priscila Waltrick por todo apoio prestado durante a jornada. Agradeço a empresa Doutor-IE em especial Valter Ravagnani pela oportunidade de trabalho, desenvolvimento pessoal e profissional. Agradeço aos meus pais Alvize Curtarelli e Jane Aparecida Lós por todo apoio e incentivo. Agradeço o Eduardo Rauh Müller por toda a ajuda prestada no trabalho. Por fim agradeço meus orientadores Werner Kraus Jr, Rodrigo Castelan Carlson pela paciência e pelo incentivo durante toda a pesquisa realizada.

*"O sucesso é a soma de pequenos esforços  
- repetidos dia sim, e no outro dia também."  
(COLLIER)*

## RESUMO

A condução ecológica em veículos de passeio caracteriza-se pela aplicação de acelerações baixas em relação à condução normal visando à redução do consumo de combustível. Considerando que diversos modelos macroscópicos de fluxo apresentam dependência direta da capacidade com acelerações no nível microscópico, supõe-se que a condução ecológica diminua a capacidade viária e que, portanto, possa gerar cenários de congestionamentos mais severos se comparados a cenários similares com condução normal. Em decorrência, avalia-se a hipótese de a condução ecológica resultar em maior consumo agregado do tráfego em condições saturadas. Para a avaliação da hipótese, foram coletados dados em ciclos de condução com um veículo dotado do sistema de apoio à condução ecológica na cidade de Florianópolis-SC. Os dados foram utilizados para definir as acelerações dos modos de condução utilizadas como parâmetros do modelo de Gipps em microsimulação de tráfego, bem como para a calibração do modelo de consumo de combustível utilizado. Os resultados em condução experimental demonstraram que o modo de condução ecológica possui benefícios em termos de consumo de combustível quando comparado ao modo de condução normal. Esse efeito é observado também através dos resultados em simulação microscópica obtidos com o simulador Aimsun Next para um segmento viário hipotético semaforizado, confirmando a hipótese, indicando o excesso de pare-e-anda e o consumo em marcha lenta como responsáveis pelo o aumento de consumo de combustível do tráfego agregado. Conclui-se também a relevância de sistemas de desligamento/acionamento automático dos motores para redução da parcela de consumo em marcha lenta em qualquer regime de tráfego.

**Palavras-chave:** Condução ecológica. Consumo de combustível. Capacidade viária.



## ABSTRACT

Eco-driving in passengers car is applied by applying accelerations compared to using normal power for characterizing consumption. Considering the different macroscopic dependencies of direct flow of capacity with the microscopic level, it is assumed that driving reduces road capacity and, therefore, can generate more severe congestion scenarios compared to similar scenarios with normal driving. As a result, the hypothesis of ecological driving that results in aggregated traffic under higher consumption conditions is evaluated. For the evaluation of the hypothesis, the system was given in driving cycles with a vehicle equipped with eco-driving. The data were used to define the accelerations of the usage modes used as the Gipps model in traffic microsimulation, as well as to adjust the consumption of the fuel model used. The ecological consumption results have the driving mode benefits in terms of fuel consumption when compared to the normal driving mode. This effect is also observed through the results in a microscopic simulation created with the Aimsun Next simulator for a hypothetical traffic light segment, confirming a hypothesis, indicating the excess of comparison and consumption at idle as the increase in fuel consumption of the aggregate traffic. It is also concluded to all systems of shutdown/start of the engines to reduce the amount of consumption in march in any traffic regime.

**Keywords:** Eco-driving. Fuel consumption. Road capacity.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Relação velocidade x densidade . . . . .	23
Figura 2 – Diagrama fundamental do tráfego . . . . .	24
Figura 3 – Modos de condução . . . . .	30
Figura 4 – Sistema de aquisição de dados . . . . .	32
Figura 5 – Dados OBD . . . . .	33
Figura 6 – Dados UDS . . . . .	34
Figura 7 – Percurso do ciclo de condução em Florianópolis/SC. . . . .	38
Figura 8 – Dados retirados via OBD do modo de condução ecológica ao longo do ciclo de condução em Florianópolis/SC, sendo (a) velocidade, (b) aceleração, (c) fluxo de massa de ar, (d) pressão de ar, (e) A/F; e (d) STFT. . . . .	40
Figura 9 – Dados retirados via OBD do modo de condução normal ao longo do ciclo de condução em Florianópolis/SC, sendo (a) velocidade, (b) aceleração, (c) fluxo de massa de ar, (d) pressão de ar, (e) A/F; e (d) STFT. . . . .	41
Figura 10 – Consumo do perfil de condução ecológica e normal ao longo do ciclo de condução em Florianópolis/SC. . . . .	42
Figura 11 – Trecho viário semaforizado modelado para uso nas simulações . . . . .	45
Figura 12 – Relação entre aceleração máxima, agressividade do <i>headway</i> e fluxo de saturação . . . . .	46
Figura 13 – Relação entre a proporção de veículos em condução ecológica e o fluxo de saturação . . . . .	47
Figura 14 – Fila média de acordo com a demanda e a proporção de veículos ecológicos . . . . .	48
Figura 15 – (a) Validação do modelo de consumo de energia; (b) Validação do modelo de consumo de combustível do simulador Aimsun . . . . .	51
Figura 16 – Gráficos de distância × tempo e velocidade × tempo . . . . .	52
Figura 17 – Comparação entre o modelo de consumo de combustível do Aimsun × o modelo de consumo baseado em energia . . . . .	52
Figura 18 – Parcela de consumo durante o regime de aceleração pelo modelo do Aimsun . . . . .	53
Figura 19 – Diagramas espaço × tempo para ciclo de 120 s com 60 s de verde, considerando (a) 20 veículos em condução normal; (b) 20 veículos em condução ecológica; (c) 25 veículos em condução normal; e (d) 25 veículos em condução ecológica. . . . .	55
Figura 20 – Consumo estimado: normal x eco . . . . .	56
Figura 21 – Consumo estimado em marcha lenta: normal x eco . . . . .	56

Figura 22 – Diagramas tempo × tempo para ciclo de 120 s com 60 s de verde, considerando (a) 5 veículos em condução normal; (b) 5 veículos em condução ecológica; (c) 10 veículos em condução normal; e (d) 10 veículos em condução ecológica. . . . .	57
Figura 23 – Somatório das acelerações ecológicas e normais . . . . .	58
Figura 24 – Diagramas velocidade × tempo para ciclo de 120 s com 60 s de verde, considerando (a) 20 veículos em condução normal; (b) 20 veículos em condução ecológica; (c) 25 veículos em condução normal; e (d) 25 veículos em condução ecológica. . . . .	59
Figura 25 – Consumo para condução normal e ecológica controlando o grau de saturação . . . . .	60
Figura 26 – Diagramas espaço × tempo para o tempo de ciclo variável, considerando (a) experimento 1: 41 s de verde efetivo; (b) experimento 1: 44 s de verde efetivo; (c) experimento 2: 30 s de verde efetivo; e (d) experimento 2: 33 s de verde efetivo. . . . .	61
Figura 27 – Consumo de combustível para a proporção de veículos em condução ecológica . . . . .	62
Figura 28 – Consumo e comprimento de fila de acordo com a demanda a proporção de veículos ecológicos, considerando (a) fila média; (b) quantidade de veículos em simulação; e (c) consumo de combustível . . .	64
Figura 29 – Diagrama de espaço × tempo para o experimento com demanda variável, considerando (a) condutores normais; e (b) condutores ecológicos . . . . .	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de $a$ e $v$ que determinam o modo de condução . . . . .	30
Tabela 2 – PID's utilizados . . . . .	33
Tabela 3 – Parâmetros de simulação. . . . .	44
Tabela 4 – Parâmetros calibrados do modelo de consumo baseado em energia.	50
Tabela 5 – Parâmetros calibrados do modelo de consumo do simulador Aimsun.	50

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/F	Relação ar/combustível, do inglês <i>Air/Fuel</i>
EECU	Unidade de controle eletrônica do motor, do inglês <i>Engine Eletronic Control Unit</i>
FS	Fluxo de Saturação
MAF	Fluxo de massa de ar, do inglês <i>Mass Air Flow</i>
MAP	Pressão de ar, do inglês <i>Mass Air Pressure</i>
OBD	Diagnóstico de bordo, do inglês <i>On-Board Diagnostic</i>
PID	Identificador de parâmetro, do inglês <i>Parameter IDentifier</i>
RPM	Rotações Por Minuto
STFT	Ajuste de combustível de curto prazo, do inglês <i>Short Term Fuel Trim</i>
UDS	Unificação dos Serviços de Diagnóstico, do inglês <i>Unified Diagnos-tic Services</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha_0$	Sensibilidade do motorista nas reações de acelerações
$\ddot{x}(t)$	Aceleração no instante de tempo $t$ para o modelo de seguimento veicular (m/s <sup>2</sup> )
$\dot{x}(t)$	Velocidade no instante de tempo $t$ para o modelo de seguimento veicular (m/s)
$x(t)$	Distância no instante de tempo $t$ para o modelo de seguimento veicular (m)
$T$	Tempo de reação do motorista para o modelo de seguimento veicular
$q$	Fluxo do tráfego veicular (veíc/h)
$k$	Densidade do tráfego veicular (veíc/km)
$k_j$	Densidade máxima (veíc/km)
$q_m$	Fluxo máximo , (veíc/h)
$k_{cr}$	Densidade crítica (veíc/km)
$\gamma$	Coeficiente de aceitação do limite de velocidade do veículo para o modelo de Gipps
$V_{max}$	Velocidade máxima em que um veículo consegue acelerar em um instante de tempo para o modelo de Gipps (m/s)
$V^*$	Velocidade desejada para o modelo de Gipps (m/s)
$a$	Aceleração do veículo para o modelo de Gipps e o modelo de consumo (m/s <sup>2</sup> )
$V_a$	Velocidade imposta pela aceleração para o modelo de Gipps (m/s)
$V_b$	Velocidade imposta pela desaceleração para o modelo de Gipps (m/s)
$\Delta x_{min}$	Distância de segurança mínima entre dois veículos para o modelo de Gipps (m)
$x$	Posição de um veículo para o modelo de Gipps (m)
$l$	Comprimento de um veículo para o modelo de Gipps (m)
$v$	Velocidade do veículo para o modelo de Gipps e o modelo de consumo (m/s)
$d$	Desaceleração máxima de um veículo para o modelo de Gipps (m/s <sup>2</sup> )
$h_a$	Agressividade do <i>headway</i> para o modelo modificado de Gipps
$Clr$	Distância entre dois veículos para o modelo modificado de Gipps (m)
$f_i$	Consumo de combustível durante o regime de marcha lenta no modelo de consumo do AIMSUN
$F$	Taxa de consumo de combustível para o regime de velocidade constante no modelo de consumo do AIMSUN (mL/s)
$v_m$	Velocidade mínima de consumo por unidade de distância no modelo do AIMSUN (km/h)

$k_1$	Parâmetro a ser calibrado para o regime de velocidade constante no modelo de consumo do simulador AIMSUN (mL/s)
$k_2$	Taxa de consumo referente à resistência do ar para o regime de velocidade constante no modelo de consumo do simulador AIMSUN (mL h/km s))
$F_a$	Taxa de consumo de combustível para o regime de aceleração no modelo de consumo do AIMSUN (mL/s)
$c_1$	Parâmetro a ser calibrado para o regime de aceleração no modelo de consumo do simulador AIMSUN (mL/s)
$c_2$	Consumo de combustível durante a inércia do veículo
$F_d$	Taxa de consumo de combustível para o regime de desaceleração no modelo de consumo do AIMSUN (mL/s)
$f_t$	Taxa de consumo de combustível (mL/s)
$B_1$	Eficiência entre o consumo de combustível e à potência total fornecida pelo motor (mL/kJ)
$B_2$	Eficiência entre o consumo de combustível durante a aceleração do veículo (mL/(kJ.m/s <sup>2</sup> ))
$P_T$	Potência de tração (kW)
$P_C$	Potência de cruzeiro (kW)
$P_I$	Potência inercial (kW)
$P_G$	Potência gravitacional (kW)
$G$	Grau de inclinação da via (%)
$\lambda_{esteq}$	Razão estequiométrica para combustíveis
$\dot{m}_a$	Fluxo de massa de ar que entra no motor (g/s)
$\dot{m}_f$	Fluxo da massa de combustível (g/s)
$\dot{f}_f$	Fluxo de combustível (mL/s)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	18
<b>1.1.1</b>	<b>Condução ecológica, capacidade viária e consumo de combustível</b>	<b>19</b>
1.2	OBJETIVOS E ETAPAS DO MÉTODO	20
1.3	ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO	21
1.4	PUBLICAÇÃO DOS RESULTADOS	21
<b>2</b>	<b>RELAÇÃO ENTRE ACELERAÇÃO VEICULAR E CAPACIDADE VIÁRIA</b>	<b>22</b>
2.1	MODELOS CLÁSSICOS DE SEGUIMENTO VEICULAR	22
2.2	O MODELO DE GIPPS E O SIMULADOR AIMSUN	24
<b>3</b>	<b>MODELO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL</b>	<b>27</b>
3.1	MODELO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL DO SIMULADOR AIMSUN	27
3.2	MODELO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL BASEADO EM ENERGIA	28
3.3	APLICAÇÃO DO MODELO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL	29
<b>4</b>	<b>MÉTODO DE AQUISIÇÃO DE DADOS</b>	<b>31</b>
4.1	VEÍCULO E SISTEMA DE APOIO À CONDUÇÃO ECOLÓGICA	31
4.2	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	32
4.3	VELOCIDADE, ACELERAÇÃO E CONSUMO DE COMBUSTÍVEL	35
<b>5</b>	<b>AQUISIÇÃO DE DADOS EM CICLOS DE CONDUÇÃO</b>	<b>37</b>
5.1	TRECHO VIÁRIO E CICLOS DE CONDUÇÃO	37
5.2	CONSUMO DE COMBUSTÍVEL DURANTE A CONDUÇÃO EXPERIMENTAL	38
<b>6</b>	<b>CAPACIDADE VIÁRIA SOB DIFERENTES MODOS DE CONDUÇÃO</b>	<b>43</b>
6.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MODOS DE CONDUÇÃO	44
6.2	TRECHO VIÁRIO MODELADO	44
6.3	RELAÇÃO ENTRE ACELERAÇÃO MÁXIMA, AGRESSIVIDADE DO <i>HEADWAY</i> E CAPACIDADE VIÁRIA	45
6.4	RELAÇÃO ENTRE CAPACIDADE VIÁRIA E A PROPORÇÃO DE VEÍCULOS EM CONDUÇÃO ECOLÓGICA	46
6.5	RELAÇÃO ENTRE O TAMANHO DE FILA E A PROPORÇÃO DE VEÍCULOS EM CONDUÇÃO ECOLÓGICA	47
<b>7</b>	<b>CONSUMO DE COMBUSTÍVEL SOB DIFERENTES MODOS DE CONDUÇÃO</b>	<b>49</b>
7.1	CALIBRAÇÃO DOS MODELOS DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL	50



7.2	ANÁLISE E APLICAÇÃO DO MODELO DE CONSUMO DO AIMSUN E DO MODELO DE CONSUMO BASEADO EM ENERGIA . . . . .	51
7.3	CONSUMO EM CONDUÇÃO NORMAL E EM CONDUÇÃO ECOLÓ- GICA . . . . .	54
7.4	CONSUMO EM CONDUÇÃO NORMAL E EM CONDUÇÃO ECOLÓ- GICA COM AJUSTES SEMAFÓRICOS . . . . .	59
7.5	CONSUMO PARA A PROPORÇÃO DE VEÍCULOS EM CONDUÇÃO ECOLÓGICA . . . . .	61
7.6	CONSUMO PARA A PROPORÇÃO DE VEÍCULOS EM CONDUÇÃO ECOLÓGICA COM DEMANDA VARIÁVEL . . . . .	63
<b>8</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>66</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>69</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O modo de condução ecológica, conhecido em inglês por *eco-driving*, caracteriza-se pelo comportamento do motorista em manter a velocidade do veículo constante, evitando acelerações e desacelerações bruscas (COLOMA; GARCÍA; WANG, Y., 2018). O principal benefício da condução ecológica é a possibilidade de redução do consumo de combustível quando comparada com a condução “normal”, na qual não há atenção do motorista a regimes de aceleração, desaceleração e manutenção de velocidade. Portanto, pode-se esperar ganhos econômicos diretos para o condutor do veículo, pela economia de combustível, e para a sociedade, pela redução da emissão de gases poluentes na atmosfera. Com base nesse conceito, surgiram veículos dotados de sistema de apoio à condução ecológica. Esses sistemas têm o potencial de servir ao propósito de redução do consumo de combustível e da emissão de poluentes interagindo com o condutor do veículo por meio de pontuações e relatórios de cada viagem realizada (JAMSON; HIBBERD; MERAT, 2015). Contudo não é necessário que o veículo contenha um sistema de apoio ao motorista para que se adote o modo de condução ecológica.

Todavia, por ser empregada individualmente a um veículo, ao propor acelerações suaves, o modo de condução ecológica pode ter o efeito de reduzir a capacidade viária. Este efeito pode ser verificado analiticamente por meio de estudos que obtêm os modelos agregados de tráfego a partir do comportamento individual do motorista de acordo com modelos de tráfego baseados em seguimento veicular (ROTHERY, 2002).

Portanto, deve-se examinar a hipótese de que a capacidade menor, ao prolongar a duração de regimes saturados de tráfego, provoque aumento do consumo dos veículos sob condução ecológica, resultando na perda da vantagem de economia de combustível caso ocorram congestionamentos. Para o estudo dessa hipótese, são realizados experimentos com um automóvel dotado do sistema de apoio à condução ecológica com o objetivo de coletar dados via OBD (Diagnóstico de Bordo, do inglês *On-Board Diagnostic*) para calibrar o modelo de consumo de combustível utilizado neste trabalho, e também para definir as acelerações a serem utilizadas como parâmetros para os modos de condução no simulador de tráfego AIMSUN (2020). Após isso simulações microscópicas de tráfegos são realizadas para estimar os efeitos das acelerações na capacidade viária e também para avaliar o consumo de combustível do tráfego agregado. A simulação é realizada em um trecho viário hipotético com os parâmetros de simulação de acordo com as dimensões do veículo e os dados coletados via OBD. Os resultados demonstraram que a condução ecológica em níveis de tráfego congestionado, contribui significativamente para o aumento do consumo de combustível do tráfego agregado, devido aos congestionamentos ocasionados pelas baixas acelerações.

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A condução ecológica consiste em estratégias de decisões por iniciativa do motorista que podem auxiliar na redução do consumo de combustível bem como na emissão de gases poluentes. Existem várias definições para o termo condução ecológica. Por exemplo para Sivak e Schoettle (2012) o comportamento do motorista, a escolha da rota são fatores que contribuem positivamente para a redução do consumo de combustível bem como a manutenção do veículo, pois os defeitos no sistema de injeção eletrônica faz com que o veículo tenha um aumento no consumo de combustível. Várias investigações relataram que um aumento de 15-40% na economia de combustível pode ser alcançada dependendo das condições de tráfego, ou seja, em regimes de tráfego congestionados há um maior consumo de combustível (SIVAK; SCHOETTLE, 2012). Com o avanço da tecnologia surgiram sistemas com o propósito de auxiliar o motorista na escolha da melhor rota. Alguns desses sistemas são aplicativos de GPS outros são integrados junto a um sistema de apoio a condução ecológica (ALAM; MCNABOLA, 2014).

A caracterização da condução pelo comportamento do motorista define os estilos de direção: modo de condução normal e ecológica. O modo de condução normal é caracterizado pela não utilização de acelerações e desacelerações suaves. Esses comportamentos resultam em taxas de emissões mais altas em comparação com um estilo de condução mais gradual e suave de um mesmo veículo. O modo de condução ecológica, quando comparado ao modo de condução normal, demonstra uma maior economia de combustível (MARTIN; CHAN; SHAHEEN, 2012). Numerosas investigações relataram que ao conduzir ecologicamente um veículo o consumo de combustível é reduzido em 5–30% (SIVAK; SCHOETTLE, 2012). Com bases nesses conceitos surgiram sistemas de apoio a condução ecológica que podem desempenhar um papel significativo na redução do consumo de combustível e conseqüentemente na redução de gases poluentes na atmosfera (JAMSON; HIBBERD; MERAT, 2015).

Com base nas evidências científicas apresentadas nos parágrafos anteriores, muitos governos nacionais como o governo dos EUA, do Japão, da China e de alguns países Europeus, adotaram políticas para incentivar a utilização do modo de condução ecológica com o intuito de reduzir os gases poluentes causadores do efeito estufa (ALAM; MCNABOLA, 2014). É, portanto, claro que a condução ecológica é uma iniciativa que tem visto uma ampla adoção na última década. No entanto, como discutido nas seções a seguir, algumas limitações podem existir para os benefícios alegados decorrentes de investigações anteriores da condução ecológica.

### 1.1.1 Condução ecológica, capacidade viária e consumo de combustível

A possível desvantagem da adoção ampla da condução ecológica foi abordada na revisão da literatura apresentada por Alam e McNabola (2014). Entretanto, não foram encontrados trabalhos com tratamento similar ao usado nesta pesquisa, com enfoque específico na relação entre capacidade viária e regimes de aceleração. Também, não se obteve relatos de pesquisas com quantificações das parcelas de consumo em movimento e em marcha lenta que permitissem identificar mitigações de possíveis efeitos adversos das baixas acelerações.

Uma investigação sobre os impactos da condução ecológica foi realizada no simulador de tráfego Aimsun, utilizando microssimulação e uma malha viária composta por uma interseção sinalizada. Foi descoberto que o modo de condução ecológica com base em aceleração moderada e suave pode causar impactos ambientais negativos com maiores emissões totais (QIAN; CHUNG, 2011). M Wang *et al.* (2012) propuseram um algoritmo para o controle de velocidade de cruzeiro adaptativo, e através de microssimulação de tráfego, compararam os efeitos do modo de condução ecológica com a estratégia de direção eficiente (composta pelos veículos que são dotados do controle de velocidade de cruzeiro). Os resultados demonstram que o modo de condução ecológica resulta em uma velocidade mais baixa e um fluxo mais baixo em condições de tráfego livre, mas em uma maior velocidade e um maior fluxo em condições moderadas de congestionamento em comparação com a estratégia de direção eficiente. Em relação ao consumo de combustível, o modo de condução ecológica em viagens de longa distância (rodovia) e na ausência de congestionamentos de tráfego, pode alcançar os benefícios reivindicados (ALAM; MCNABOLA, 2014). Garcia-Castro *et al.* (2017) demonstraram que em cenários com baixo ou médio nível de demanda e crescente número de condutores ecológicos, os efeitos são positivos em termos de emissões. Por outro lado, com alto percentual de condutores ecológicos inseridos na via e alta demanda de tráfego, as emissões aumentam. Qian e Chung (2013) avaliou os efeitos da direção ecológica no fluxo de tráfego utilizando simulação microscópica de tráfego no simulador Aimsun. Foi utilizado um trecho viário simples composto por três interseções semaforizadas e uma faixa de rolamento. Os resultados indicaram impactos potencialmente negativos, o que destacou que as condições de tráfego tem um impacto significativo no desempenho do modo de condução ecológica.

Alguns autores estudaram os efeitos da condução ecológica em microssimulação de tráfego utilizando dados coletados em ciclos de condução através do OBD. Adamidis *et al.* (2019), por exemplo, avaliaram o impacto da condição ecológica no fluxo de tráfego, confirmando que a condução ecológica possui pontos positivos em relação à condução normal em condições de tráfego não saturadas. Também observaram que em regimes saturados as baixas acelerações prejudicam o tráfego agregado.

Vários trabalhos consideram o ajuste da operação do tráfego para adaptação à

condução ecológica. Yang, Almutairi e Rakha (2021), por exemplo, propõem sistema de coordenação entre semáforos em corredores favorável à condução ecológica, porém sem menção a questões de capacidade. Wu *et al.* (2020) propõem um método de análise de consumo de combustível para ser adotado às intersecções sinalizadas saturadas. Fafoutellis, Mantouka e Vlahogianni (2020) apresentam uma visão geral da literatura referente à direção ecológica e aos modelos desenvolvidos para calcular o consumo de combustível, bem como os fatores mais importante que os afetam. Du *et al.* (2021) quantificam os efeitos da redução da demanda do tráfego no período de pandemia COVID-19, demonstrando que a redução da demanda de tráfego contribui para reduzir atrasos e emissões, o qual tem uma relação direta com os resultados do presente trabalho que podem ser visto no Seção 4.3, onde foi observado que os dados coletados em baixo nível de tráfego (devido a pandemia), demonstraram que o consumo de combustível do modo de condução ecológica é menor quando comparada ao consumo de combustível do modo de condução normal.

## 1.2 OBJETIVOS E ETAPAS DO MÉTODO

Considerando a hipótese de que a condução ecológica pode aumentar o consumo agregado de combustível, formula-se o objetivo geral e as etapas do método utilizado na pesquisa.

Objetivo geral:

- Determinar a validade da hipótese, ou as condições para que se verifique.

Etapas do método:

- Definir os métodos da literatura que serão utilizados como base e comparados;
- Revisar o modelo de consumo de combustível baseado em energia;
- Realizar a coleta de dados em vias urbanas com um veículo equipado com um sistema de apoio à condução ecológica para a calibração e validação do modelo de consumo de combustível baseado em energia, e também para definir as acelerações de cada estilo de condução;
- Confirmar que a condução ecológica através de um automóvel dotado do sistema de apoio de condução ao motorista, resulta na economia de combustível em condições de fluxo livre de tráfego;
- Calibrar e validar o modelo de consumo de combustível com a finalidade de posteriormente estudar os efeitos da direção ecológica na capacidade viária;
- Definir a malha viária a ser utilizada em microssimulação de tráfego;
- Realizar experimentos em microssimulação de tráfego para a verificação da hipótese.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

A presente dissertação está organizada da seguinte maneira:

- O Capítulo 2 apresenta a relação teórica entre aceleração e capacidade viária.
- O Capítulo 3 apresenta os modelos de consumo de combustível;
- O Capítulo 4 demonstra o método de aquisição de dados utilizado para a caracterização dos modos de condução, bem como para a calibração do modelo de consumo de combustível;
- No Capítulo 5 são apresentados os dados brutos dos experimentos sob o modo de condução normal e ecológica utilizando o veículo Duster Oroch;
- No Capítulo 6 são apresentados os resultados da análise em microssimulação de tráfego do consumo de combustível com conclusões no Capítulo 7.

### 1.4 PUBLICAÇÃO DOS RESULTADOS

Resultados deste trabalho foram publicados no artigo de congresso seguinte:

- CURTARELLI, L. et al. Condução ecológica, capacidade viária e consumo de combustível. **35º Congresso da Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes**, 2021.

## 2 RELAÇÃO ENTRE ACELERAÇÃO VEICULAR E CAPACIDADE VIÁRIA

Como ponto de partida de análise da hipótese de maior consumo sob condução ecológica do que sob condução normal, estabelece-se neste capítulo a dependência direta entre aceleração dos veículos e a capacidade viária resultante. Mostra-se que, em certos casos, a dependência pode ser obtida analiticamente, indicando que acelerações menores implicam em menor capacidade viária. Nos capítulos posteriores, esse fato permite avaliar o efeito, no consumo dos veículos, dos congestionamentos maiores sob condução ecológica. O capítulo é composto pelas seguintes sessões:

- A Seção 2.1 apresenta o modelo clássico de seguimento veículo, bem como a relação entre aceleração e capacidade viária;
- Já a Seção 2.2 apresenta o modelo de seguimento veicular de Gipps, que é utilizado para a verificação da hipótese da pesquisa.

### 2.1 MODELOS CLÁSSICOS DE SEGUIMENTO VEICULAR

Modelos microscópicos de tráfego representam, por meio de equações matemáticas, o comportamento individual dos veículos com base no estado do tráfego no qual estão inseridos, tipicamente denominados de “modelos de seguimento veicular”. Os modelos de seguimento veicular desenvolvidos até a década de 1960 baseavam-se na obtenção de expressões de aceleração do veículo seguidor em função de seu estado e o do veículo à sua frente, também denominado de “líder”. Rothery (2002) apresenta uma síntese de vários desses modelos em uma expressão geral dada por:

$$\ddot{x}_{n+1}(t+T) = \alpha_0 \left\{ \frac{\dot{x}_{n+1}^m(t+T)}{[x_n(t) - x_{n+1}(t)]^l} \right\} [\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)], \quad (1)$$

em que  $\alpha_0$ ,  $l$  e  $m$  são constantes do modelo,  $\ddot{x}(t)$ ,  $\dot{x}(t)$ , e  $x(t)$  são, respectivamente, a aceleração, a velocidade e a posição do veículo no instante  $t$ ,  $T$  é o tempo de reação do motorista,  $n$  indica o veículo líder e  $n+1$  o veículo seguidor. Como se observa,  $\alpha_0$  faz o papel de “ganho de aceleração”, representando a intensidade da resposta (aceleração ou frenagem) do motorista ao estímulo recebido.

Para diversos casos de  $l$  e  $m$ , a Equação (1) pode ser integrada analiticamente para produzir a relação macroscópica entre fluxo e densidade em regime estacionário. Por exemplo, no caso de  $l = 1$  e  $m = 0$ , a equação que define a relação fluxo/densidade é dada por:

$$q = \alpha_0 k \ln \left( \frac{k_j}{k} \right), \quad (2)$$

na qual  $q$  é o fluxo,  $k$  é a densidade e  $k_j$  é a densidade máxima, que ocorre no congestionamento com parada total do tráfego.

Considerando que:

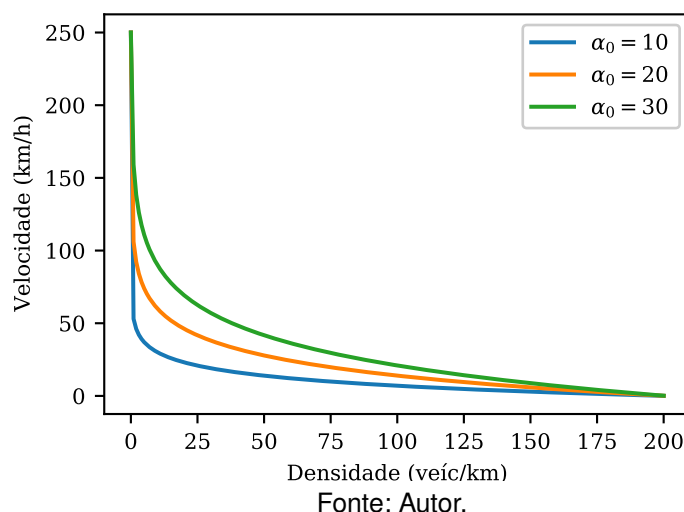
$$q = kv, \quad (3)$$

a Equação (2) implica em:

$$v = \alpha_0 \ln \left( \frac{k_j}{k} \right). \quad (4)$$

Isto é, a Equação (4) produz uma relação velocidade/densidade inválida para para regimes esparsos (com  $k \rightarrow 0$ ), pois conforme a Figura 1 a velocidade tende a valores elevados, que não são observados em condições reais de tráfego.

Figura 1 – Relação velocidade x densidade



Contudo a relação fluxo/densidade, descreve adequadamente várias condições de tráfego, tendo sido usada originalmente por Greenberg em 1959 para ajuste bem-sucedido de diagrama fundamental demonstrado pela Figura 2 (ROTHERY, 2002). Portanto tem validade e interesse em regiões usuais de densidades de tráfego onde  $k \rightarrow 0$  e  $k \rightarrow k_j$ .

A partir da Equação (2) pode-se analisar que as condições físicas do diagrama fundamental são satisfeitas quando  $k \rightarrow 0$  e  $k \rightarrow k_j$ , ou seja, nesses dois casos o fluxo é 0 veic/h. Observa-se no diagrama fundamental do tráfego que o fluxo máximo da via  $q_m$  é dado quando não há variação do fluxo pela densidade ( $\frac{dq}{dk} = 0$ ), então para maiores valores de  $k_{cr}$  começam-se a formar os congestionamentos. Assim o fluxo máximo  $q_m$  é obtido na concentração  $k_{cr}$ , que é dada por:

$$k_{cr} = e^{-1} k_j, \quad (5)$$

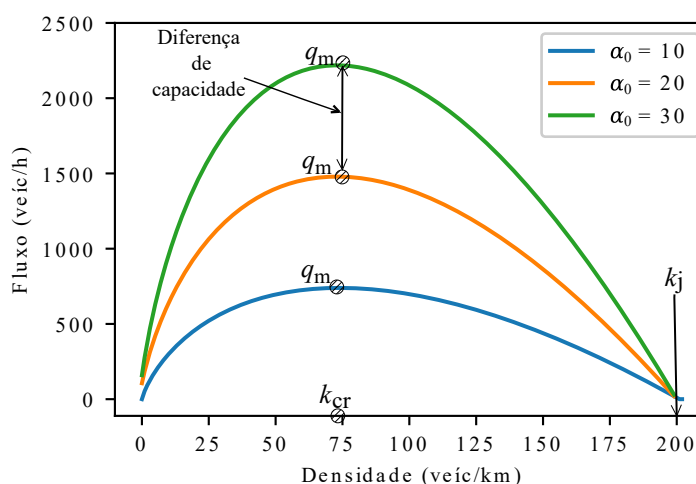


logo o fluxo máximo ( $q_m$ ) é dado por:

$$q_m = \alpha_0 e^{-1} k_j, \quad (6)$$

a qual reforça o papel do ganho  $\alpha_0$  na capacidade viária e, portanto, estabelece a relação direta entre magnitude das acelerações e a capacidade viária, pois quanto maior o valor de  $\alpha_0$ , maior será a capacidade nominal da via.

Figura 2 – Diagrama fundamental do tráfego



Fonte: Autor.

Neste trabalho o modelo de seguimento veicular utilizado é o modelo de Gipps que é integrado no simulador Aimsun. A sua escolha é em função da praticidade em que o simulador microscópico de tráfego oferece para parametrizar as variáveis necessárias na avaliação da hipótese. Outro fator que contribui para escolha do modelo é a pesquisa realizada por Müller (2013), que demonstra os efeitos da aceleração na capacidade viária para o modelo de Gipps de duas faixas.

## 2.2 O MODELO DE GIPPS E O SIMULADOR AIMSUN

A partir dos anos 1980, com a difusão de computadores capazes de processamento numérico de maior complexidade em relação às gerações anteriores, modelos de seguimento veicular passaram a refletir mais diretamente os comportamentos dos motoristas nas equações dinâmicas de velocidade. Destacam-se, neste particular, os modelos usados em simuladores comerciais largamente empregados, tais como o modelo de Gipps (1981), usado no simulador Aimsun, e o modelo de Wiedemann (OLSTAM; TAPANI, 2004), usado no simulador VISSIM.

Neste trabalho, usa-se o simulador Aimsun para estudo do consumo sob diferentes modos de condução. Assim, emprega-se o modelo de seguimento veicular de

Gipps (1981) para obtenção de trajetórias de veículos em condições variadas de fluxo viário. O modelo comportamental de Gipps consiste, essencialmente, no cálculo da velocidade do veículo seguidor com base em:

$$V^* = \min(V_a, V_b\gamma), \quad (7)$$

em que  $V^*$  é o limite de velocidade que o veículo está sujeito, e  $\gamma$  é o coeficiente de aceitação do limite de velocidade do veículo. A velocidade máxima  $V_{\max}$  que um veículo  $n$  consegue acelerar em um intervalo de tempo  $[t, t + T)$ , em que  $T$  é o tempo de reação do motorista, é determinada pela sua velocidade  $V(n, t)$ , sua velocidade desejada  $V^*(n)$ , sua aceleração máxima  $a(n)$  e o tempo de reação  $T$ , é dada por:

$$V_a(n, t) = V(n, t) + a(n)T2,5 \left(1 - \frac{V(n, t)}{V^*(n)}\right) \sqrt{0,025 + \frac{V(n, t)}{V^*(n)}}. \quad (8)$$

A Equação (8) descreve o comportamento de um veículo acelerando com a velocidade baixa. Quando a velocidade atual for igual à velocidade desejada, o termo entre parênteses se torna igual a zero, assim tem-se  $V_a = V(n, t)$ .

Por outro lado existe a velocidade  $V_b$  que o veículo  $n$  pode atingir no intervalo de tempo  $[t, t + T)$ , com a necessidade de manter uma distância de segurança mínima  $\Delta x_{\min}$  do veículo líder ( $n - 1$ ). Como a posição dos veículos é medida através do para-choque dianteiro, a diferença entre as posições do veículo líder  $x(n - 1, t)$  e do seguidor  $x(n, t)$  precisa ser igual à distância mínima  $\Delta x_{\min}$  somada ao comprimento do veículo  $l(n - 1)$ . Para determinar  $V_b$ , considera-se o caso em que o veículo  $n - 1$  á uma velocidade inicial  $v(n - 1, t)$  e posição  $x(n - 1, t)$ , pode desacelerar com taxa  $d(n - 1)$ ; e que o veículo  $n$  inicialmente com uma velocidade  $v(n, t)$  e posição  $x(n, t)$  pode desacelerar com taxa  $d(n)$  e que a distância entre os veículos no instante  $t + T$  deve ser pelo menos igual á  $\Delta x_{\min}$ . Então aplica-se as equações do movimento retilíneo uniforme variado e obtém-se a velocidade máxima  $V_b$ , sendo dada por:

$$V_b(n, t + T) = d(n)T + \sqrt{d(n)^2 T^2 - d(n) \left[2\Delta x(n, t) - V(n, t)T - \frac{V(n - 1, t)^2}{d(n - 1)}\right]}, \quad (9)$$

onde os termos referente as distâncias estão agrupados em:

$$\Delta x = x(n - 1, t) - l(n - 1) - \Delta x_{\min} - x(n, t). \quad (10)$$

Levando em consideração as velocidades impostas por  $V_a$  e pela  $V_b$ , a velocidade do veículo  $v(n, t + T)$  no instante de tempo  $(t + T)$  é dada por:

$$v_n(t + T) = \min \{v_a(n, t + T), v_b(n, t + T)\}, \quad (11)$$

na qual as velocidades possíveis no passo de simulação seguinte,  $v_a(n, t + T)$  e  $v_b(n, t + T)$ , são, respectivamente, a velocidade máxima quando não há veículo líder próximo

o suficiente e a maior velocidade de segurança na condição de seguimento do líder. Portanto, o modelo de Gipps não calcula acelerações diretamente.

Não é possível integrar analiticamente o modelo dado pela Equação (11) para que se possa obter relação de dependência entre acelerações e capacidades viárias. Entretanto, essa dependência foi demonstrada em simulação para o tráfego em rodovias no Aimsun por Müller, Carlson e Kraus Jr. (2012). Adicionalmente, resultados de simulação mostrados adiante corroboram essa dependência para o contexto de tráfego urbano pela análise do efeito da aceleração no fluxo de saturação e, por consequência, na capacidade.

Apesar da precisão do simulador em modelar o seguimento veicular (PANWAI; DIA, 2005), o modelo de Gipps não representa fenômenos transitórios em regimes congestionados de tráfego (CHEN *et al.*, 2012). Para obter comportamento mais realista em situações de para-e-anda (*stop-and-go*), AIMSUN (2020) propõe a modificação do modelo de Gipps para ajustar a dependência da velocidade em função da densidade com a introdução de um *fator de agressividade* ( $h_a$ ), o qual acrescenta um parâmetro que facilita a calibração dos comportamentos em regimes de densidades altas (maiores do que  $k_{cr}$ ). A equação de Gipps para a distância entre o veículo  $n - 1$  e o veículo  $n$  é dada por:

$$Clr(t) = (x((n-1),t) - x(n,t) - s(n-1)) = \frac{V(n-1,t)^2}{2d(n-1)} - \frac{V(n,t)^2}{2d(n)} + (0,5V(n,t) + V(n,t+T))T, \quad (12)$$

e é modificada para:

$$\begin{aligned} Clr(t) &= \frac{V(n-1,t)^2}{2d(n-1)} - \frac{V(n,t)^2}{2d(n)} \\ &= (1 - h_a)((0,5V(n,t) + V(n,t+T))T) + h_a((0,5V(n,t) + V(n,t+T)))\sqrt{\frac{V(n,t)}{V_{des}}}T, \end{aligned} \quad (13)$$

onde  $h_a$  é a agressividade do *headway*. O parâmetro  $h_a$  assume valores entre  $[-1,1]$  e quanto menor for  $h_a$  maior será a distância entre os veículos ( $Clr(t)$ ). Para a utilização do modelo modificado de Gipps no simulador Aimsun, deve-se utilizar o parâmetro *pare* e siga juntamente com a agressividade do *headway*. O parâmetro *pare* e siga permite ajustar o valor de  $h_a$ , onde  $+h_a$  é usado durante a desaceleração e  $-h_a$  é usado durante a aceleração (AIMSUN, 2020).

### 3 MODELO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

O consumo de combustível de um automóvel depende de fatores que não podem ser capturados por um único modelo matemático. Alguns desses fatores são: projeto do motor, idade do veículo, a topografia da estrada, as propriedades do combustível, as forças resistivas no veículo, a tecnologia da ignição, o atrito do motor, o comportamento do condutor e outros fatores (RAKHA *et al.*, 2011). Os modelos de consumo de combustível podem ser categorizados em microscópicos e macroscópicos, sendo que os modelos macroscópicos estimam o consumo de combustível baseado na velocidade e aceleração média de um trecho da via, e os modelos microscópicos fundamentam-se na velocidade e aceleração instantânea de veículos individuais. Portanto, os modelos microscópicos de consumo de combustível são considerados mais precisos (NANDURI, 2013). Nesta sessão é apresentado o modelo de consumo baseado em energia (BIGGS; AKÇELIK, R., 1986) e o modelo de consumo do simulador microscópico de tráfego AIMSUN (2020). O capítulo está dividido nas seguintes sessões:

- A Seção 3.1 apresenta o modelo de consumo do simulador microscópico de tráfego Aimsun;
- A Seção 3.2 apresenta o modelo de consumo baseado em energia;
- A Seção 3.3 apresenta as condições de aplicação para cada regime de condução dos modelos de combustíveis demonstrados no presente capítulo.

#### 3.1 MODELO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL DO SIMULADOR AIMSUN

O modelo de consumo de combustível do simulador Aimsun é considerado um modelo modal, onde calcula-se o consumo de combustível para o veículo quando encontra-se em marcha lenta, velocidade constante e nos regimes de aceleração e desaceleração (AIMSUN, 2020).

O Aimsun considera o modelo de consumo em marcha lenta,  $f_l$  (mL/s), como uma constante. O consumo de combustível em marcha lenta depende da velocidade em RPM do motor, do ponto de ignição e da eficiência da combustão (PULKRABEK, 2004). Já a equação que define o modelo de consumo de combustível em velocidade constante é dada por (AIMSUN, 2020):

$$f = \frac{dF}{dt} = k_1 \left( 1 + \frac{v^3}{2v_m^3} \right) + k_2 v, \quad (14)$$

em que  $f$  (mL/s) é a taxa de consumo de combustível,  $F$  (mL) é o consumo de combustível,  $t$  (s) é o tempo,  $v_m$  (km/h) é a velocidade mínima de consumo por unidade de distância,  $v$  (km/h) é a velocidade instantânea,  $k_1$  (mL/s) é um parâmetro livre a ser calibrado e  $k_2$  (mL h/km s), é a taxa de consumo referente à resistência do ar. Para o

modelo apresentado pela Equação (14), pequenas variações de velocidades podem ser toleradas com base em uma aceleração de tolerância ( $a_t$ ), ou seja, o veículo se mantém no modo de velocidade constante enquanto a aceleração ou a desaceleração não excederem a aceleração de tolerância, isto é, enquanto:  $-a_t \leq a \leq a_t$  m/s<sup>2</sup> e  $v > 0$  km/h.

O consumo de combustível durante a aceleração de um automóvel no Aimsun, é dado por (AIMSUN, 2020):

$$F_a = c_1 + c_2 av, \quad (15)$$

em que  $F_a$  (mL/s) é o consumo de combustível durante a aceleração,  $c_1$  (mL/s) e  $c_2$  (mL s<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>) são constantes do modelo,  $a$  (m/s<sup>2</sup>) e  $v$  (m/s) são respectivamente a aceleração e a velocidade instantânea do automóvel. Segundo Hickman *et al.* (1999) o produto  $av$  representa a demanda da potência do motor requerida, e o produto  $c_2 av$  representa a inércia do veículo. O consumo de combustível durante a desaceleração é um valor constante dado por  $F_d$  (mL/s).

### 3.2 MODELO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL BASEADO EM ENERGIA

O modelo de consumo de combustível baseado em energia também é considerado um modelo modal e estima a taxa de consumo de combustível em intervalos de, tipicamente, um segundo. Nesse modelo, a taxa de consumo de combustível  $f_t$  (mL/s) é calculada como:

$$f_t = \begin{cases} \alpha + B_1 P_T + [B_2 a P_T]_{a>0}, & \text{para } P_T > 0, \\ \alpha, & \text{para } P_T \leq 0, \end{cases} \quad (16)$$

em que  $\alpha$  (ml/s) é uma constante referente à taxa de consumo de combustível em marcha lenta,  $B_1$  (ml/kJ) é um parâmetro de eficiência que relaciona o consumo de combustível à potência total fornecida pelo motor,  $B_2$  (mL/(kJ·m/s<sup>2</sup>)) é um parâmetro de eficiência que relaciona o consumo de combustível durante aceleração positiva ao produto da energia inercial e da aceleração.  $a$  (m/s<sup>2</sup>) é a taxa de aceleração instantânea para acelerações e desacelerações.  $P_T$  é a potência de tração e pode ser decomposta em  $P_C$  (potência de cruzeiro), em  $P_I$  (potência inercial) e em  $P_G$  (potência gravitacional), isto é:

$$P_T = \min(P_{\max}, P_C + P_I + P_G). \quad (17)$$

Isso propicia uma representação instantânea detalhada dos fatores que influenciam no consumo de combustível onde  $P_{\max}$  (kW) é a potência máxima do veículo, e a componente de cruzeiro da potência total  $P_C$  (kW), é dada por:

$$P_C = b_1 v + b_2 v^3, \quad (18)$$

em que  $v$  (m/s) é a velocidade do veículo,  $b_1$  (kN) é o parâmetro referente à força de resistência de rolamento,  $b_2$  (kN/(m/s<sup>2</sup>)) é o parâmetro da força de resistência aerodinâmica,

Já a potência inercial,  $P_I$  (kW), é dada por:

$$P_I = \left( \frac{Mav}{1000} \right), \quad (19)$$

onde  $M$  (kg) é a massa do veículo.

A potência gravitacional  $P_G$  (kW) possui o parâmetro  $G$  (%) que é referente ao grau de inclinação da via.  $P_G$  é dada por:

$$P_G = \left( \frac{9,81 M_v \left( \frac{G}{100} \right) v}{1000} \right). \quad (20)$$

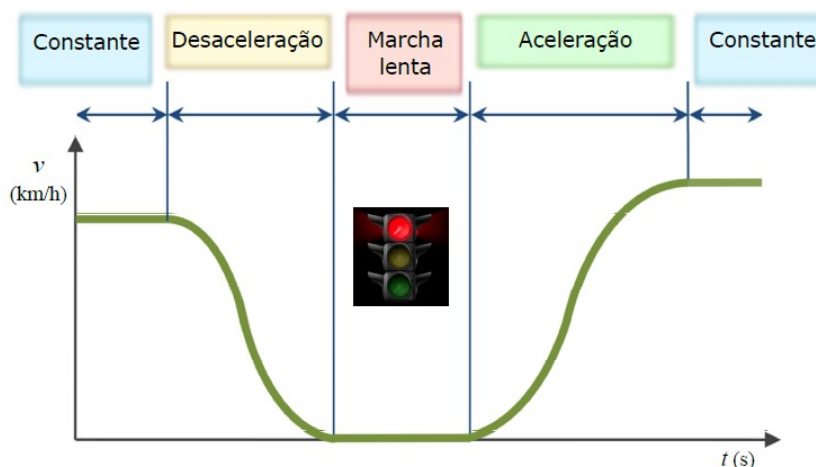
Assumindo  $G = 0$  pois os experimentos em microsimulação de tráfego foram realizados em uma malha viária hipotética sem inclinação, a potência de tração ( $P_T$ ) em uma via plana é calculada como:

$$P_T = \min(P_{\max}, P_C + P_I). \quad (21)$$

### 3.3 APLICAÇÃO DO MODELO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

A premissa básica de um modelo elementar microscópico para consumo de combustível é a independência das quantidades de combustível consumidas durante quatro modos de condução fundamentais, denominados marcha lenta (idle), velocidade constante, desaceleração e aceleração. Assume-se nesses modelos, chamados de modais, que o consumo total pode ser obtido pela adição dos consumos associados a cada um dos modos independentemente da ordem em que ocorrem. A Figura 3 ilustra os quatro modos básicos de condução em uma situação típica de movimento veicular em uma via semaforizada. Observa-se através da figura que o veículo está em velocidade constante, e ao receber a indicação de vermelho no semáforo desacelera até atingir  $v = 0$  (km/h), então permanece parado em marcha lenta até receber a indicação de verde no semáforo, após isso acelera até atingir a velocidade constante.

Figura 3 – Modos de condução



Fonte: (MARINHO *et al.*, 2018)

Para estimar o consumo de combustível do tráfego agregado, os dados de velocidade e aceleração de cada veículo em simulação foram extraídos através de uma API no Aimsun. Os dados extraídos via API foram utilizados em conjunto com um algoritmo desenvolvido em Python que contém o modelo de consumo descrito na Seção 3.2, com os coeficientes do modelo calibrados demonstrados pela Tabela 4. O algoritmo verifica a aceleração e a velocidade instantânea de cada veículo para fornecer o modo de condução desejado e então calcula o consumo de combustível através das definições apresentadas pela Tabela 1 e pela Figura 3.

Tabela 1 – Valores de  $a$  e  $v$  que determinam o modo de condução

Modo de condução	Definição
Marcha lenta	$a = 0 \text{ m/s}^2$ e $v = 0 \text{ km/h}$
Constante	$-a_t \leq a \leq a_t \text{ m/s}^2$ e $v > 0 \text{ km/h}$
Aceleração	$a > a_t \text{ m/s}^2$ e $v > 0 \text{ m/s}$
Desaceleração	$a < -a_t \text{ m/s}^2$ e $v > 0 \text{ m/s}$

A tolerância de aceleração de velocidades de cruzeiro é o parâmetro de entrada que define os modos de condução do veículo. Neste trabalho a tolerância utilizada ( $a_t$ ) foi sugerida por Marinho *et al.* (2018) que é de  $0,278 \text{ m/s}^2$  ou  $(1 \text{ km/h/s})$  e o valor de  $\Delta_t$  foi de  $1 \text{ s}$ .

## 4 MÉTODO DE AQUISIÇÃO DE DADOS

A partir do modelo apresentado na Seção 3.2, constata-se que três dados são necessários para a calibração do modelo de combustível, bem como para a definição dos modos de condução abordados nesse trabalho. Dentre esses dados, a velocidade e a aceleração são variáveis dos modelos de consumo de combustível, e também são necessárias para determinar o modo de condução do veículo apresentados pela Tabela 3 (normal ou ecológico). O fluxo de massa de ar é outro dado necessário para a calibração do modelo de consumo de combustível. Os dados foram coletados em ciclos de condução, sendo um ciclo para a condução normal e outro ciclo para a condução ecológica no trecho viário é demonstrado pela Figura 7 que tem cerca de 6,7 km de extensão.

A seguir apresentam-se as seções deste capítulo:

- Na Seção 4.1 é apresentado o veículo utilizado em condução experimental bem como o sistema de apoio à condução ecológica;
- A Seção 4.2 apresenta-se o método de aquisição de dados utilizado em condução experimental;
- A Seção 4.3 apresenta-se as equações que relacionam velocidade, aceleração e consumo de combustível.

### 4.1 VEÍCULO E SISTEMA DE APOIO À CONDUÇÃO ECOLÓGICA

Neste trabalho utilizamos o veículo Duster Oroch 1.6, com  $M = 1296$  kg e câmbio manual da Renault. Esse veículo é dotado do sistema de apoio à condução ecológica *Driving-Eco*<sup>2</sup>. Não foi possível obter acesso ao algoritmo do sistema *Driving-eco*<sup>2</sup>. Porém através de análises intuitivas na coleta de dados, observa-se que o sistema compara o estilo de condução do motorista a simulações computadorizadas pré-determinadas que buscam os pontos de melhor desempenho do motor no quesito consumo. São levados em conta o combustível utilizado, as variações de posição do pedal do acelerador, a maneira que o veículo ganha ou perde velocidade, a carga do motor aplicada a cada momento, além da interpretação das características do terreno, com base no torque do motor (RENAULT, 2020).

O condutor recebe uma pontuação nos parâmetros antecipação, troca de marcha e aceleração. O sistema é capaz de interpretar o estilo de condução do motorista, adaptando a demanda de trocas de marchas à posição do acelerador e rotação do motor. A antecipação busca evitar acelerações e frenagens bruscas, permanecendo em velocidades constantes, além de mais seguro, fornece ganhos importantes para o consumo. O quesito antecipação fornece orientações para que o motorista se antecipe a situações de trânsito, como quando um sinal fecha à sua frente (RENAULT, 2020).



## 4.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

O método de aquisição de dados utilizados foi demonstrado por Marinho *et al.* (2018) e pode ser visto na Figura 4. O método consiste na utilização do conector OBD do veículo, de um *data logger Vgate Scan ELM 327*, que comunica-se via *Bluetooth* com o aplicativo *Torque Pro v.1.8.154* que é utilizado para decodificar as mensagens transmitidas pelo *data logger*. O aplicativo manda requerimentos de dados para a central do motor a EECU (da sigla para o inglês *Engine Eletronic Control Unit*), e a EECU responde com o valor do dado requisitado.

Os dados gravados são transmitidos via *Wi-Fi* em formato *csv (comma separated value)*. Foi utilizado o Excel para realizar o tratamento dos dados, e o *MATLAB 2016* para o processo de calibração e validação dos modelos. A coleta de dados foi realizada em ciclos de condução e todos os dados foram coletados com taxa de 1 Hz (1 amostra por segundo), ou seja,  $\Delta t = 1$  s.

Figura 4 – Sistema de aquisição de dados



Fonte: (MARINHO *et al.*, 2018)

Há diferentes normas que definem qual é o protocolo de comunicação utilizado em nível lógico, como por exemplo a norma SAE J1939 que especifica os 10 serviços OBD bem como os PIDs do serviço 1. Nesse trabalho utilizamos a norma OBD onde o *scanner* faz um requerimento para a EECU. O requerimento é composto por um *byte* que define o serviço da norma OBD e outro *byte* que define o PID (*Parameter Identifier*). A Tabela 2 demonstra o *byte* que define o serviço de leitura, bem como o *byte* que define cada dado requisitado.

Tabela 2 – PID's utilizados

Parâmetro	Serviço	PID
Velocidade	0x01	0x0D
MAF	0x01	0x10
$\lambda_{com}$	0x01	0x68

Outra norma que pode ser utilizada é a norma UDS (*Unified Diagnostic Services*, ISO 14229-1). Essa norma segue os padrões proprietários do protocolo em nível lógico, ou seja, diferentemente da norma OBD, cada montadora pode definir quais PID's são utilizados de acordo com os sensores e atuadores presente no veículo. Essa norma pode ser útil para realizar o processo de engenharia reversa quando não há um PID definido pela norma OBD. Como por exemplo, quando o veículo não possui o sensor MAF, mas a central calcula a quantia do fluxo de massa de ar que entra no coletor de admissão, a partir da pressão do coletor de admissão medida pelo sensor MAP. Nesse caso pode não ser possível obter tal dado pelo padrão OBD, logo é necessário uma análise utilizando a norma UDS. A Figura 5 demonstra os dados brutos coletados do veículo e também a conversão de hexadecimal para o valor físico. Onde 0x7df é o endereço funcional em que o *scanner* utiliza para enviar um requerimento para todas as centrais, e 0x7e8 é a resposta da central do motor para o *scanner*. Observa-se que o requerimento de um PID, como por exemplo o PID do RPM é dado por 0x01 (*byte* que define o serviço), 0x0c o PID. Já a resposta é dada por 0x01 (0x01 + 0x40), 0x0c representando o PID do RPM e 0xF0 sendo o *byte* da resposta, onde o fator de conversão é 0,25 RPM por *bit*.

Figura 5 – Dados OBD

Timestamp	Bus	Address	Service	Request Data	Response Data	Physical Value
10.012246	CAN 1	7DF	(PID \$0C) Engine RPM Read current::req	01 0C	01 0C F0	828 rpm
10.022488	CAN 1	7E8	(PID \$0C) Engine RPM Read current::pos			
10.782246	CAN 1	7DF	(PID \$0D) Vehicle Speed Sensor Read current::req	01 0D	01 0D	18 km/h
10.792488	CAN 1	7E8	(PID \$0D) Vehicle Speed Sensor Read current::pos			

Fonte: Autor.

O método para descobrir PID's especificados pela norma UDS, consiste em

coletar os dados de um veículo, utilizando um *scanner*, um *hardware* com *data logger* e um software para gerenciamento do *hardware*. Após a coleta de dados é possível simular a central do veículo em bancada utilizando o *software* e o *hardware*, assim comunicando o *scanner* com a simulação é possível descobrir todos os PID's proprietários. A Figura 6 demonstra o *log* de dados da Duster Oroch pelo padrão da norma UDS, onde 0x22 é o serviço que especifica a leitura de dados em tempo real, 0x240B é o PID que define a leitura da pressão de ar que entra no coletor de admissão dada pelo sensor MAP (do inglês *Mass Air Pressure*) e o PID 0x2224 são os bytes que especificam a leitura do sensor MAF. Observa-se que 0x7e0 é o endereço físico do *scanner* e 0x7e8 é o endereço da central do motor.

Para converter os *bytes* de hexadecimal para a unidade física é necessário saber o fator de conversão por *bit*. No caso da leitura do fluxo de massa de ar tem-se 4,80 g/s formados pela mensagem: 0x62,0x22,0x24,0x01 e 0xe4. Onde 0x62 é a resposta ao serviço 0x22 (em definição pela norma sempre soma-se 0x40). 0x22 e 0x24 são os *bytes* que definem o PID do sensor MAF, já 0x01 e 0xe4 são os *bytes* que definem a resposta do PID. Esse valor em decimal corresponde à 484, logo para descobrir o fator de correção por *bit* basta fazer: 4,80/484. Ou seja, a variação de um bit corresponde à 0,009917 g/s.

Figura 6 – Dados UDS

Physical Address	Service	PID	Data Bytes
33.11... 7E0	MAP::req	22 24 0B	
33.11... 7E8	MAP::pos	62 24 0B 00 22	
	Basic diagnostics device		
	SID_PR	0x62	62
	recordCommonIdentifier	240B	24 0B
	MAP	34.000000	00 22
0000:		62 24 0B 00 22	b\$. "
34.21... 7E0	MAF::req	22 22 24	
34.21... 7E8	MAF::pos	62 22 24 01 E4	
	Basic diagnostics device		
	SID_PR	0x62	62
	recordCommonIdentifier	2224	22 24
	MAF	4.840000	01 E4
0000:		62 22 24 01 E4	b*\$.

Fonte: Autor.

### 4.3 VELOCIDADE, ACELERAÇÃO E CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

Para estimar o consumo de combustível é necessário obter os seguintes dados do veículo: velocidade do veículo, a razão ar/combustível comandada e o fluxo de massa de ar que entra no coletor de admissão do veículo. Ambos os dados são obtidos através de requerimentos em que o *scanner* faz para a central do motor utilizando os bytes demonstrados na Tabela 2.

A aceleração não é um dado obtido diretamente através do OBD, pois a norma não especifica nenhum PID para aceleração, mas pode ser estimada conhecendo-se a frequência de aquisição de dados e dois valores sucessivos de velocidade. O consumo de combustível não é fornecido diretamente pela norma OBD e no caso da Duster Oroch, a Renault não disponibilizou um PID proprietário para o consumo de combustível, portanto precisa ser estimado, logo é necessário entender a razão de ar/combustível que entra no motor.

O consumo de combustível de um veículo, depende da razão de ar/combustível, cuja essa razão é controlada pela central de injeção eletrônica do motor. Ou seja, quando o motorista aciona o pedal do acelerador, uma quantidade de massa de ar entra no coletor de admissão do motor que é estimada pelo sensor MAF. A partir da medida do fluxo de massa de ar obtida o sistema de controle embarcado na central determina a quantidade de combustível a ser injetada, bem como a razão ar/combustível. A razão estequiométrica para gasolina é  $\lambda_{esteq} = 14,7$  enquanto que para etanol é  $\lambda_{esteq} = 9,1$ .

O controle da razão ar/combustível é dada por (FONSECA; FERREIRA; FERNANDES, 2012):

$$\lambda = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f \cdot \lambda_{esteq}}, \quad (22)$$

em que  $\dot{m}_a$  (g/s) é o fluxo de massa de ar que entra no motor e  $\dot{m}_f$  (g/s) é o fluxo da massa de combustível. O fluxo de combustível instantâneo injetado no motor é dado por:

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{m}_a}{\lambda_{com} \cdot \lambda_{esteq}}. \quad (23)$$

Como a gasolina comercializada no Brasil é uma mistura de gasolina e álcool, e segundo o CNP (Conselho Nacional de Petróleo) a concentração de álcool deve estar entre 18% e 27,5%, portanto a densidade dessa gasolina (E27) é de 0,73 a 0,77 g/cm<sup>3</sup>. Logo para estimar o fluxo de combustível utilizou-se a densidade igual a 0,75 g/cm<sup>3</sup> (MARINHO *et al.*, 2018). Então a fórmula para a obtenção do fluxo de combustível ( $\dot{f}_f$ ) a partir do fluxo de massa de ar que entra no motor é definida como:

$$\dot{f}_f = \frac{\dot{m}_f}{0,75}. \quad (24)$$

Outros dados podem ser utilizadas para analisar o consumo de combustível, como a pressão do coletor de admissão e o ajuste de combustível de curto prazo. A pressão no coletor de admissão é um dado onde a sua magnitude é proporcional a magnitude do fluxo de massa de ar, pois quanto maior a pressão no coletor de admissão, maior é o fluxo de massa de ar. Em alguns veículos que o sensor MAF não é presente, e sim o sensor MAP, a EECU utiliza os dados do sensor MAP para estimar o fluxo de massa de ar. O STFT é o ajuste de combustível a curto prazo, que tem como objetivo aumentar a largura do pulso do injetor de combustível ou diminuir de acordo com o valor A/F (estimado a partir do dado do sensor de sonda lambda). O STFT varia de -100 % a + 100 %.

## 5 AQUISIÇÃO DE DADOS EM CICLOS DE CONDUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os dados obtidos em ciclos de condução ou condução experimental. Esses dados são utilizados para calibrar os modelos de consumo apresentados no Capítulo 3, bem como os parâmetros de aceleração e desaceleração utilizados no simulador Aimsun.

O capítulo está dividido nas seguintes seções:

- A Seção 5.1 apresenta o trecho viário utilizado em condução experimental (também chamada de ciclo de condução);
- Na Seção 5.2 apresentam-se os dados brutos coletados através do método apresentado na Seção 4.2. Também é realizada uma breve discussão entre a relação dos dados brutos coletados via OBD e o consumo de combustível estimado a partir das equações apresentadas na Seção 4.3.

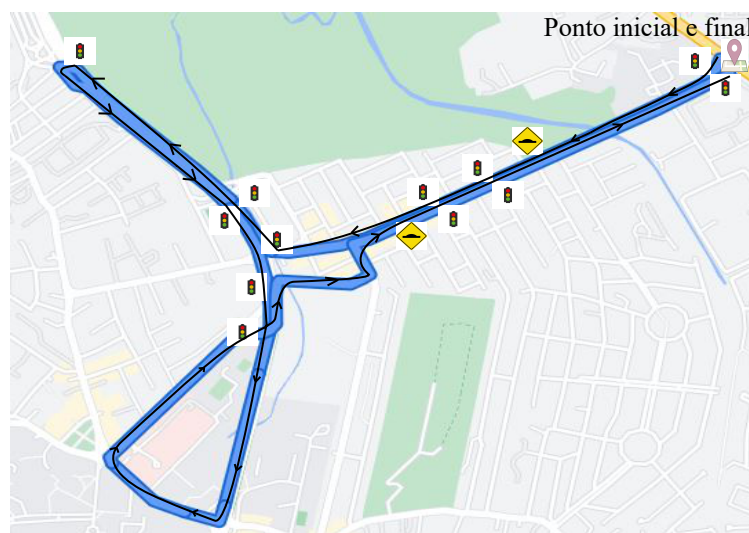
### 5.1 TRECHO VIÁRIO E CICLOS DE CONDUÇÃO

O ciclo de condução é uma sequência de regimes de operações em marcha lenta, aceleração, desaceleração e velocidade constante, com o intuito de representar um padrão típico de condução, sendo amplamente usado nos estudos de emissões. Os ciclos de condução são normalmente definidos em termos da velocidade do veículo e seleção de marchas em função do tempo. Os níveis de emissões e o consumo de combustível são dependentes de muitos parâmetros, incluindo os fatores relacionados ao veículo como o modelo, tamanho, tipo de combustível, nível de tecnologia e quilometragem, e os fatores de operação como a velocidade, aceleração, seleção de marchas e aspectos da malha viária (MARINHO *et al.*, 2018). A seleção de um ciclo de condução, projetado para representar padrões de condução do veículo em determinada região, é elemento essencial de testes de consumo e emissões, pois o trecho viário possui elementos que influenciam no consumo de combustível do veículo, como por exemplo: semáforos e lombadas. Outro fator que influencia no consumo de combustível é a demanda de tráfego.

Neste trabalho os testes de campo em ciclos de condução foram feitos em trecho urbano demonstrado pela Figura 7 de cerca de 6,3 km de extensão com condições de pouco tráfego de vido o período de pandemia, com dados obtidos via OBD (método explicado na Seção 4.2). O trecho viário é composto por 12 semáforos e 2 lombadas, o que dificulta para o condutor manter a velocidade constante. A quantia de semáforos também facilita a perda ou ganha de pontos no quesito aceleração pelo sistema *Driving-eco<sup>2</sup>* em função das retomadas de velocidades. Os experimentos de campo em ciclos de condução foram realizados no período de pandemia em condições de tráfego o que facilitou a perda de pontos no quesito de aceleração que define o modo de condução

normal e a não perde de pontos nesse quesito, que define o modo de condução ecológica. Foram realizados dois ciclos de condução, um para a condução ecológica e outro para a condução normal, a seguir apresenta-se os resultados obtidos.

Figura 7 – Percurso do ciclo de condução em Florianópolis/SC.



Fonte: Autor.

## 5.2 CONSUMO DE COMBUSTÍVEL DURANTE A CONDUÇÃO EXPERIMENTAL

Durante os experimentos em ciclos de condução, foram mantidas as máximas pontuações nos quesitos de troca de marchas e antecipação, sendo a diferença na pontuação total resultante basicamente de diferenças na intensidade da aceleração. Obteve-se pontuação de 99/100 quando definindo-se esse valor como o que caracteriza uma condução ecológica. No mesmo trecho viário, uma pontuação de 79/100 foi obtida para caracterizar a condução normal. Observou-se através do sistema *Driving-eco*<sup>2</sup> que as desacelerações são iguais para ambas as conduções, indicado pela pontuação máxima no quesito antecipação em ambos os casos.

A Figura 8 e a Figura 9 demonstram os dados sob o modo de condução normal ao longo de um ciclo de condução, onde (a) é a velocidade (km/h), (b) é a aceleração ( $m/s^2$ ), (c) é o fluxo de massa de ar (g/s), (d) é a pressão de ar no coletor de admissão (mbar), (e) é o consumo de combustível (mL/min), (f) é a relação A/F; e (g) é o ajuste de combustível de curto prazo.

É possível observar que as magnitudes de acelerações no modo de condução ecológica é menor quando comparada as magnitudes de acelerações do modo de condução normal. O fluxo de massa de ar é influenciado pelas acelerações (estímulo do motorista em acelerar o veículo) que ocasiona em um maior fluxo de ar que entra no coletor de admissão. Ou seja, quando há uma mudança brusca entre dois pontos

de velocidade há um consumo maior. Se a mudança entre dois pontos de velocidade não for brusca, o consumo será menor.

A pressão que entra no coletor de admissão também tem relação direto com o consumo de combustível. Esse dado foi coletado para cruzar informações e observar as relações diretas com os demais dados apresentados nessa sessão, contudo não é necessário para estimar o consumo de combustível através das formulas demonstradas na Seção 4.3. Observa-se que quanto maiores as magnitudes de aceleração, maior será a pressão de ar e o fluxo de massa de ar que entra no coletor de admissão, conseqüentemente maior será o consumo de combustível. Observa-se também que 1000 mbar é o ponto de total abertura da borboleta que controla a passagem de ar no coletor de admissão, nesse ponto temos o maior fluxo de ar. Quando o veículo encontra-se em marcha lenta o valor da pressão no coletor de admissão é de aproximadamente 300 mbar.

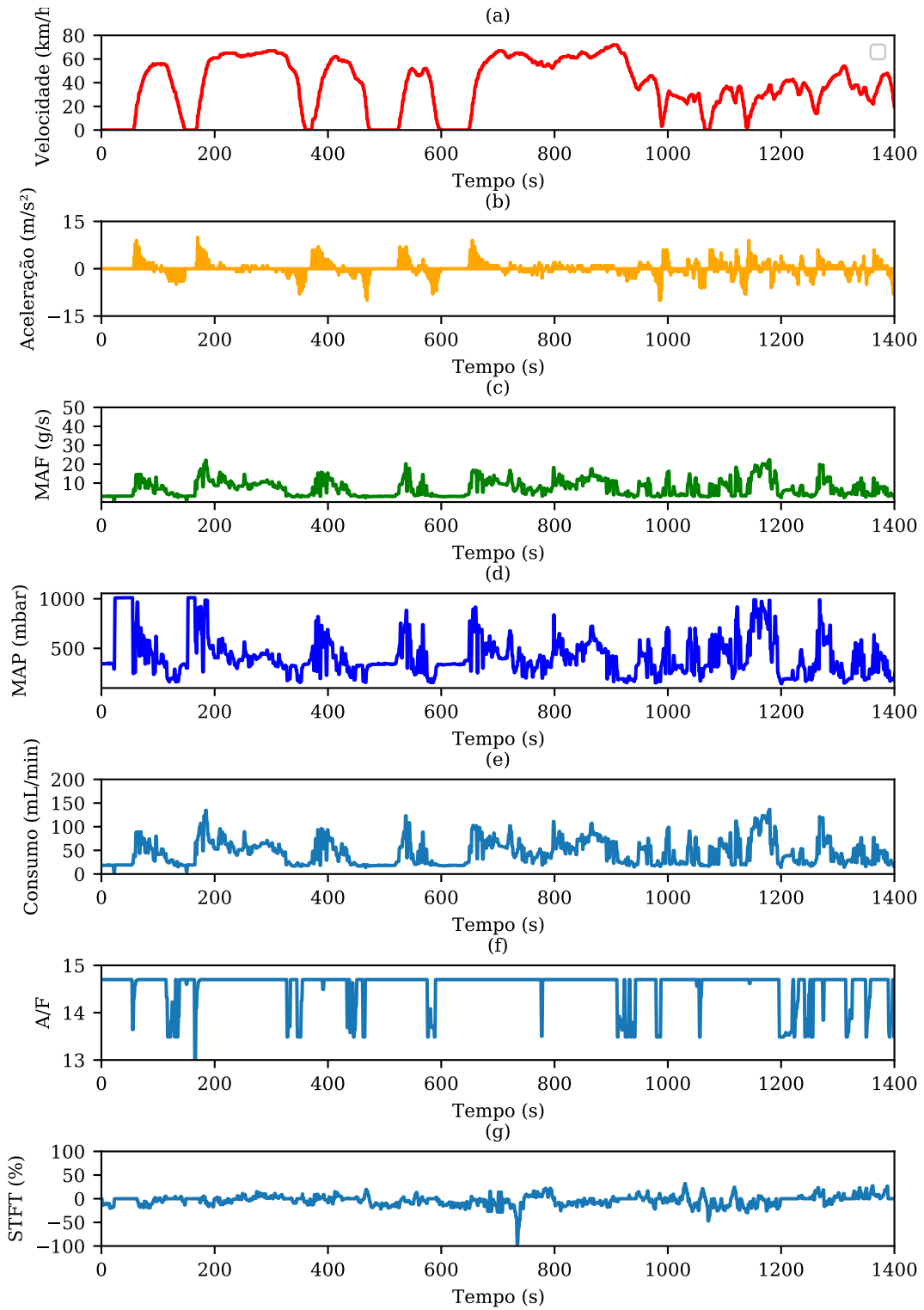
Outro dado necessário para estimar o consumo de combustível, é a relação A/F. A EECU recebe os dados de tensão do sensor de sonda lambda e a transforma para a relação A/F. O valor de referência varia de acordo com o combustível utilizado (explicado na Seção 4.3). Neste trabalho o combustível utilizado é a gasolina onde o valor estequiométrico é 14,7.

Quando o valor da relação A/F é menor do que 14,7 a mistura encontra-se pobre e portanto presume-se que o houve uma quantia maior de ar que entrou pelo coletor de admissão, ou seja, o condutor do veículo acionou o pedal do acelerador com maior intensidade. Se o valor da relação A/F for maior que 14,7 a mistura está rica, ou seja, na mistura predomina-se o combustível.

A EECU utiliza o controle da largura do pulso do injetor (STFT) para atuar no controle da mistura. Quando a mistura encontra-se rica (A/F maior que 14,7) a central diminui a largura dos pulsos dos injetores de combustível (%), por outro lado, quando a mistura encontra-se pobre (A/F abaixo de 14,7) a central aumenta a largura do pulso (%) injetando mais combustível naquele instante de tempo. Assim a EECU calcula o consumo de combustível e demonstra ao condutor do veículo no painel de instrumentos ou na interface multimídia.

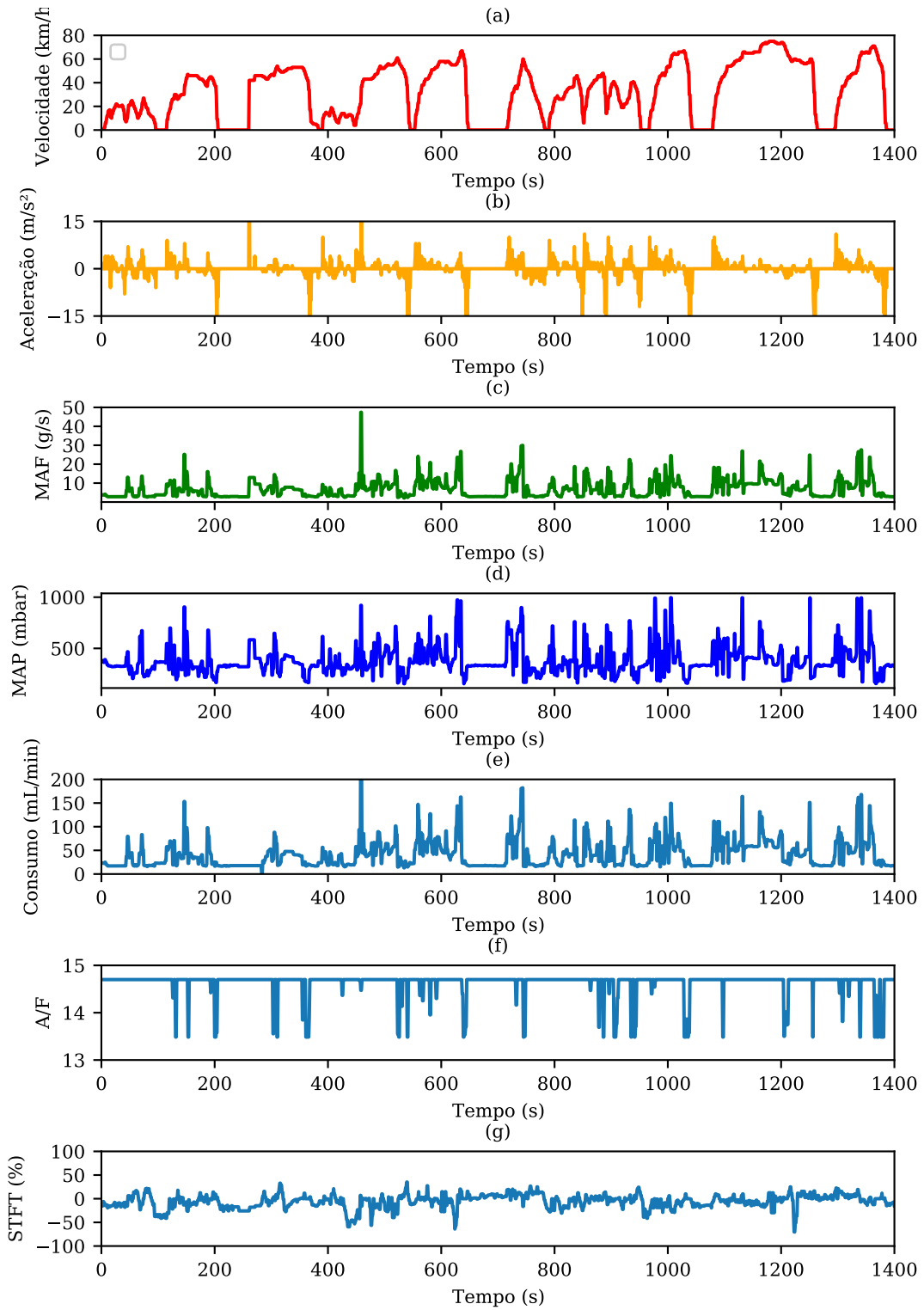


Figura 8 – Dados retirados via OBD do modo de condução ecológica ao longo do ciclo de condução em Florianópolis/SC, sendo (a) velocidade, (b) aceleração, (c) fluxo de massa de ar, (d) pressão de ar, (e) A/F; e (d) STFT.



Fonte: Autor.

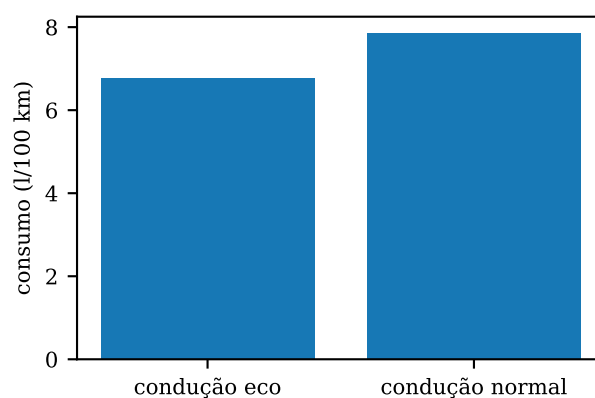
Figura 9 – Dados retirados via OBD do modo de condução normal ao longo do ciclo de condução em Florianópolis/SC, sendo (a) velocidade, (b) aceleração, (c) fluxo de massa de ar, (d) pressão de ar, (e) A/F; e (d) STFT.



Fonte: Autor.

Os resultados do consumo ao término de cada ciclo de condução foi dado pelo sistema *Driving-eco*<sup>2</sup>, e são demonstrados pela Figura 10. O consumo da condução ecológica foi de 6,8 L/100 km enquanto o consumo da condução normal foi de 8 L/100 km, confirmando a redução em regimes de menores acelerações. A Figura 10 demonstra a média do consumo de combustível durante o ciclo de condução para o modo de condução normal e também para o modo de condução ecológica. A condução ecológica caracterizada por baixas acelerações apresentou uma economia de combustível de aproximadamente 1,2 L/100 km em relação ao modo de condução normal

Figura 10 – Consumo do perfil de condução ecológica e normal ao longo do ciclo de condução em Florianópolis/SC.



Fonte: Autor.

## 6 CAPACIDADE VIÁRIA SOB DIFERENTES MODOS DE CONDUÇÃO

Neste capítulo, apresenta-se o trecho viário empregado nas análises por simulação, bem como a relação entre aceleração máxima, agressividade do *headway* e capacidade viária no simulador Aimsun. Além disso, os modos de condução normal e ecológica adotados neste trabalho são caracterizados com base nos dados brutos apresentados no Capítulo 5. Os valores de aceleração de cada modo são cotejados com os resultados do simulador, levando à determinação do efeito dos modos de condução na capacidade viária. Neste capítulo não são apresentados dados em relação ao consumo de combustível do tráfego agregado e está organizado da seguinte maneira:

- Seção 6.1 apresenta a caracterização dos modos de condução ecológica a partir dos dados brutos apresentados na Seção 5.2. Esses dados são utilizados como parâmetros no simulador microscópico de tráfego Aimsun;
- A Seção 6.2 apresenta o trecho viário modelado que é utilizado para a realização dos experimentos no simulador microscópico de tráfego (Aimsun) que avaliam a hipótese da pesquisa;
- A Seção 6.3 apresenta os experimentos e seus respectivos resultados referentes à relação entre aceleração máxima, agressividade do *headway* e capacidade viária. Com base nos resultados, observa-se que quanto menor for a aceleração menor será a capacidade viária. Esse experimento é composto apenas por tráfego homogêneo, o que motiva a investigar os efeitos do modo de condução ecológica em conjunto com o modo de condução normal;
- A Seção 6.4 apresenta a relação entre a capacidade viária e a proporção de veículos sob o modo de condução ecológica inseridos em simulação. Evidencia-se que basta uma pequena inserção de condutores ecológicos (na ordem de 10%) para diminuir bruscamente a capacidade viária. Esse experimento foi realizado com demanda constante e avalia apenas o fluxo de saturação;
- A Seção 6.5 apresenta os impactos mensurados no comprimento total de filas (veíc) sob a proporção de veículos em condução ecológica inseridos em simulação. Observa-se o crescimento do comprimento da fila em condições de fluxo saturado com a inserção de 10 % de condutores ecológicos.

## 6.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MODOS DE CONDUÇÃO

Considerando que as acelerações e desacelerações suaves que caracterizam o modo de condução ecológica correspondem à potencial redução de consumo, fabricantes de veículos fornecem sistemas de apoio à condução ecológica em certos modelos (JAMSON; HIBBERD; MERAT, 2015). Esses sistemas geram pontuações e relatórios para o condutor, com o objetivo de auxiliar na redução do consumo de combustível.

Para determinar as acelerações de cada modo de condução, foi utilizado os dados de velocidade e aceleração demonstrado pela Figura 9 (b) para o modo de condução normal, e pela Figura 8 (b) para o modo de condução ecológica. Foi observado a máxima aceleração até a velocidade de aproximadamente 60 km/h, onde a aceleração para o modo de condução normal foi de 1,1 m/s<sup>2</sup>, e para o modo de condução normal foi de 1,1 m/s<sup>2</sup>. Como a pontuação no quesito de antecipação demonstrada ao término do ciclo de condução, foram iguais para o modo de condução normal e para o modo de condução ecológica, a desaceleração foi estimada através do ponto em que o veículo encontra-se na velocidade de 60 km/h até parar, onde observou-se desaceleração de 0,5 m/s<sup>2</sup>.

Não há a calibração do modelo de Gipps nesse trabalho, os parâmetros de aceleração, desaceleração e velocidade constante foram inseridos conforme os dados obtidos em ciclo de condução. A Tabela 3 sintetiza os parâmetros adotados para cada tipo de veículo especificado no simulador conforme o modo de condução desejado: normal ou ecológico. Valores padrão do simulador Aimsun são mantidos para os parâmetros não listados. A velocidade máxima para ambos os modos de condução é de 55 km/h bem como a agressividade do *headway* utilizada foi de 0,25. O tamanho dos veículos em simulação seguem as dimensões da Duster Oroch com extensão de 4,70 m e largura de 1,80 m.

Tabela 3 – Parâmetros de simulação.

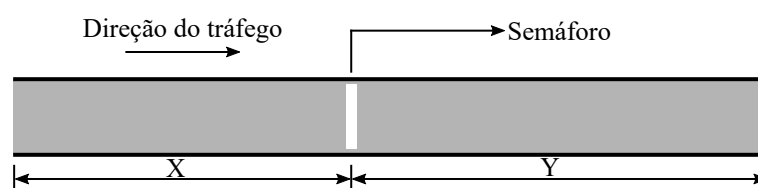
Modo de condução	Aceleração (m/s <sup>2</sup> )	Desaceleração (m/s <sup>2</sup> )
Normal	0.7	0.5
Eco	1.1	0.5

## 6.2 TRECHO VIÁRIO MODELADO

A análise da relação entre acelerações dos veículos e a capacidade viária no simulador Aimsun foi realizada com base em cenário com um trecho simples, conforme mostrado na Figura 11. O trecho é composto por uma faixa de rolamento, um semáforo, e para cada experimento realizado os valores de  $X$  (m),  $Y$  (m), o valor do tempo de ciclo e do tempo de verde efetivo podem ser diferentes. A extensão para cada experimento é escolhida de tal maneira que o segmento a montante do semáforo seja longo o suficiente para comportar filas decorrentes do sinal vermelho. O segmento a

justante, por sua vez, deve ser longo o suficiente para os veículos atingirem a velocidade máxima da via para os diferentes casos analisados. A malha viária simulada não tem relação com o trecho urbano utilizado para a coleta de dados. Apesar do seguimento viário ser hipotético, a utilização de uma malha simples em microssimulação de tráfego, permite isolar o problema apresentado pela hipótese da pesquisa, facilitando a análise dos dados necessário para estimar a capacidade viária e o consumo de combustível do tráfego agregado.

Figura 11 – Trecho viário semaforizado modelado para uso nas simulações



Fonte: Autor.

A implementação realizada no Aimsun permite que um conjunto de valores não determinísticos seja usado para parâmetros dos veículos, reproduzindo a variabilidade do tráfego. Cada veículo gerado pelo simulador tem seus parâmetros de aceleração e desaceleração, velocidade amostrados aleatoriamente de distribuições de probabilidade configuráveis pelo usuário (MÜLLER, 2013). Foram extraídos os dados de velocidade, aceleração e *headway* por intermédio da API (*Application Programming Interface*) do simulador com a linguagem de programação Python. Esses dados, por sua vez, foram usados para obter o fluxo de saturação pelo método do HCM 2010 (TRB, 2010) e o consumo de combustível pelo modelo apresentado na Seção 3.2.

### 6.3 RELAÇÃO ENTRE ACELERAÇÃO MÁXIMA, AGRESSIVIDADE DO *HEADWAY* E CAPACIDADE VIÁRIA

A partir das equações demonstradas na Seção 2.1 é possível observar na Figura 2 o quanto a aceleração interfere na capacidade viária, o que motivou a investigar os efeitos das acelerações na capacidade viária utilizando o modelo de Gipps (descrito na Seção 2.2). Portanto nessa seção são demonstrados os resultados obtidos do experimento que consiste avaliar a relação entre aceleração e capacidade viária utilizando o simulador microscópico de tráfego que contém o modelo de Gipps. Para estimar a capacidade em função da aceleração máxima e da agressividade do *headway* ( $h_a$ ), esses parâmetros foram variados em simulações com demanda constante de 1800 veíc/h. A seguir apresenta-se o tempo de ciclo e as dimensões da malha viária para esse experimento:

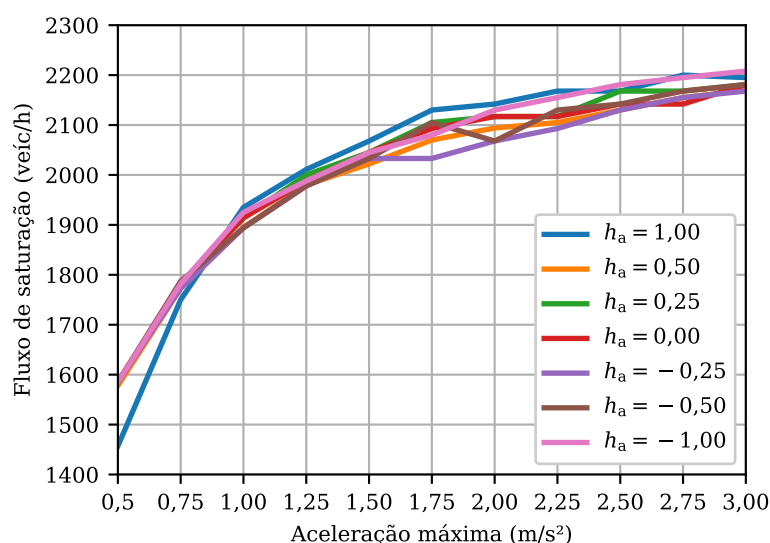
- Tempo de ciclo de 90 s, sendo 45 s de verde para o movimento analisado;

- A malha viária demonstrada pela Figura 11 possui um tamanho de 1800 m, sendo  $X = 800$  m e  $Y = 1000$  m.

Os resultados das simulações apresentados correspondem à média dos 20 ciclos semafóricos da simulação. Observe-se que a capacidade de um trecho semaforizado caracteriza-se pelo fluxo de saturação da via e dos parâmetros semafóricos. Entretanto, como estes são considerados fixos, usam-se os termos capacidade e fluxo de saturação como sinônimos, exceto quando destacado.

A Figura 12 apresenta o fluxo de saturação (FS) da aproximação ao semáforo deste caso em função da aceleração máxima definida e para diferentes valores de agressividade do *headway*. O parâmetro de agressividade do *headway* assume valores no intervalo  $[-1, 1]$ . Os resultados mostram que o fluxo de saturação não é substancialmente afetado por variações nos valores de agressividade do *headway*. Isto se deve ao trecho viário simulado, cujas filas são descarregadas sem interferências a jusante, portanto sem gerar fenômenos do tipo para-e-anda. Por outro lado, a figura mostra que a capacidade depende da aceleração máxima de forma pronunciada, em linha com a discussão da Seção 2.1.

Figura 12 – Relação entre aceleração máxima, agressividade do *headway* e fluxo de saturação



Fonte: Autor.

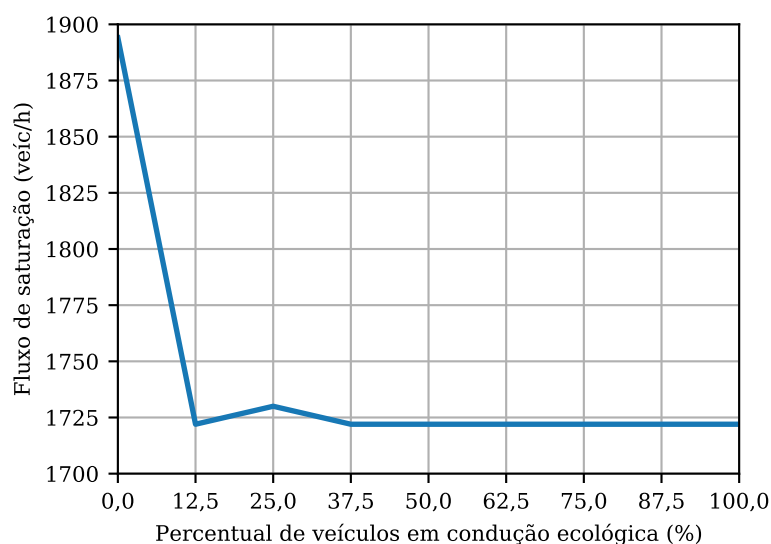
#### 6.4 RELAÇÃO ENTRE CAPACIDADE VIÁRIA E A PROPORÇÃO DE VEÍCULOS EM CONDUÇÃO ECOLÓGICA

Os resultados apresentados na Seção 6.3 demonstraram o quanto as baixas acelerações diminuem na capacidade viária, o que levou a realizar experimentos com o tráfego misto. Segundo Chaves *et al.* (2018), o desempenho do tráfego depende da composição do fluxo veicular em termos da mistura de veículos sob estilos diferentes

de condução. Para avaliar o efeito no tráfego da combinação de veículos em condução normal e veículos em condução ecológica, foram realizadas simulações variando a proporção de veículos em cada modo de condução. A malha viária possui as mesmas dimensões e o tempo de ciclo do experimento da Seção 6.3.

Os resultados apresentados na Figura 13 correspondem a média de 20 ciclos semaforicos e permitem concluir que, mesmo com uma pequena porção de veículos em condução ecológica (12,5%), o fluxo de saturação da via é reduzido substancialmente (cerca de 10%). Esse efeito de redução da capacidade se manteve para taxas maiores de veículos em condução ecológica, provocando aumento da fila média no semáforo; embora não apresentado na figura, a velocidade média caiu cerca de 15% nos casos de condução ecológica presente na via.

Figura 13 – Relação entre a proporção de veículos em condução ecológica e o fluxo de saturação



Fonte: Autor.

## 6.5 RELAÇÃO ENTRE O TAMANHO DE FILA E A PROPORÇÃO DE VEÍCULOS EM CONDUÇÃO ECOLÓGICA

A investigação do fluxo de tráfego revela o potencial da condução ecológica para atrasar o descarregamento da fila de veículos em uma interseção semaforizada. A fim de compreender os impactos da condução ecológica no comprimento total da fila sob forte pressão de tráfego, um experimento aumentando a demanda de tráfego em 200 veículos à cada 5 minutos foi realizado. A demanda máxima é de 1200 veic/h, e após 60 minutos de simulação a demanda é retirada, ou seja, 0 (veic/h). Com isso é garantido que ao final da simulação não há nenhum veículo na fila virtual. A proporção de veículos ecológicos inseridos em cada replicação variou de 0% (0) a 100% (1) em intervalos de 10% (0,1).

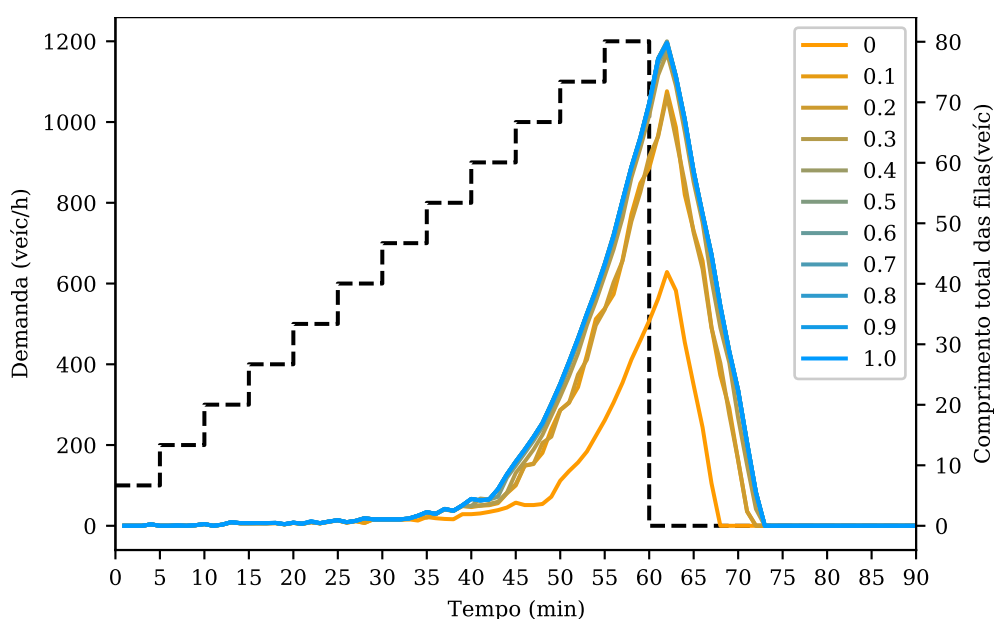


Para esse experimento o tamanho da malha viária e os tempos semafóricos foram dimensionados diferentemente dos experimentos demonstrados na e Seção 6.3 na Seção 6.4. O tamanho da malha viária foi ajustado para não haver filas virtuais e o tempo semafórico foi ajustado para não ficar sincronizado com a chegada constante de veículos. A seguir apresentam-se as dimensões da malha viária e o tempo de ciclo utilizado:

- Tempo de ciclo de 60 s, sendo 30 s de verde para o movimento analisado;
- A malha viária demonstrada pela Figura 11 possui um tamanho de 2500 m sendo,  $X = 2000$  m e  $Y = 500$  m.

O resultado demonstrado na Figura 14 descreve o comprimento total das filas durante 90 minutos de simulação. Observa-se que o comprimento das filas aumenta com o crescimento das taxas de condutores ecológicos, quando a condição de tráfego está próxima da saturação. Depois que a condição de tráfego está saturada, o número máximo de paradas foi atingido. Também nota-se que quando nenhum veículo ecológico é inserido na malha viária o comprimento da fila é aproximadamente de 40 veículos, e após a inserção de 10% de condutores ecológicos o comprimento da fila aumenta para 70 veículos, ou seja, basta uma pequena taxa de inserção de condutores ecológicos na malha viária para reduzir a capacidade nominal da via. De fato, conforme Qian e Chung (2013) o modo de condução ecológica em níveis altos de grau de saturação contribuem significativamente para o aumento do tamanho da fila em uma intersecção semaforizada.

Figura 14 – Fila média de acordo com a demanda e a proporção de veículos ecológicos



Fonte: Autor.

## 7 CONSUMO DE COMBUSTÍVEL SOB DIFERENTES MODOS DE CONDUÇÃO

Este capítulo tem o propósito de apresentar os resultados obtidos em experimentos que avaliaram o consumo de combustível sob os modos de condução normal e ecológica. Inicialmente apresenta-se a calibração dos modelos de consumo bem como a avaliação de cada modelo a partir dos dados calibrados e a escolha do modelo a ser utilizado na pesquisa a partir dos resultados obtidos. Com base no modelo escolhido, segue-se com a avaliação do consumo nos dois modos de condução sob diferentes fluxos veiculares no trecho viário, que permite concluir sobre as condições para que ocorra maior consumo no caso da condução ecológica. O capítulo está organizado como segue:

- A Seção 7.1 apresenta os parâmetros calibrados dos modelos de consumo apresentados no Capítulo 3. Esses parâmetros são utilizados nos experimentos apresentados nas demais seções deste capítulo;
- Seção 7.2 apresenta a comparação entre os modelos de consumo apresentados no Capítulo 3. Com base nos resultados apresentados nessa seção, escolhe-se o modelo de consumo utilizado para a avaliação da hipótese de pesquisa;
- A Seção 7.3 apresenta os resultados dos experimentos realizados para avaliar o consumo de combustível para o modo de condução normal e o modo de condução ecológica com a composição do tráfego homogênea. Os resultados discutidos demonstram que a condução ecológica tem um grande impacto no consumo de combustível em situações de tráfego saturadas, o que motiva realizar experimentos controlando o grau de saturação;
- A Seção 7.4 apresenta os resultados dos experimentos controlando o grau de saturação. Os resultados demonstram que independente da condição do tráfego, quando o grau de saturação é controlado, o modo de condução ecológica apresenta benefícios em termos de consumo de combustível quando comparada ao modo de condução normal. Os resultados motivam a analisar o consumo de combustível referente à proporção de veículos sob o modo de condução ecológica inseridos em simulação;
- A Seção 7.5 apresenta os resultados dos experimentos do consumo de combustível do tráfego agregado do experimento que avaliou o fluxo de saturação para a proporção de veículos sob o modo de condução ecológica descritos na Seção 6.4. Os resultados apresentados demonstram que após a inserção de 10% de condutores ecológicos no fluxo de tráfego, o consumo de combustível do tráfego agregado aumenta. Os experimentos realizados nessa seção têm demanda constante, o que motivou realizar e avaliar experimentos com

demanda variável.

- A Seção 7.6 apresenta os resultados do experimento que avaliou o efeito, em termos de consumo de combustível em relação às filas, da proporção de veículos sob condução ecológica (Seção 6.5). Com base nos resultados apresentados, observa-se que o consumo de combustível aumenta com o crescimento das filas em condições de tráfego saturado.

## 7.1 CALIBRAÇÃO DOS MODELOS DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

Os parâmetros do modelo baseado em energia foram calibrados seguindo o método proposto por Rahmi Akçelik, Smit e Besley (2012) com dados coletados (MARI-NHO *et al.*, 2018) descritos na Capítulo 4. Já os parâmetros do modelo de consumo de combustível do Aimsun foram calibrados através do método apresentado por Marinho *et al.* (2018).

O método de calibração para ambos os modelos, consiste na utilização do *curve fitting toolbox* do *software* MatLab 2016. A técnica utilizada foi a de regressão robusta de mínimos residuais absolutos (*Least Absolute Residuals* - LAR) que é similar à técnica popular de mínimos quadrados (*Least Squares* - LS). O objetivo de utilizar qualquer uma dessas técnicas é encontrar os coeficientes de uma função que se aproxima de um conjunto de dados. Os resultados da calibração dos parâmetros do modelo de consumo baseado em energia podem ser visto na Tabela 4. Já os resultados da calibração dos parâmetros do modelo de consumo do Aimsun podem ser visto na Tabela 5.

Tabela 4 – Parâmetros calibrados do modelo de consumo baseado em energia.

Parâmetro	Valor
$\alpha$ (mL/s)	0.244
$b_1$ (kN)	0.2631
$b_2$ (kN/(m/s <sup>2</sup> ))	0.01
$\beta_1$ (mL/kJ)	0.0499
$\beta_2$ (mL/(kJ·m/s <sup>2</sup> ))	0.03

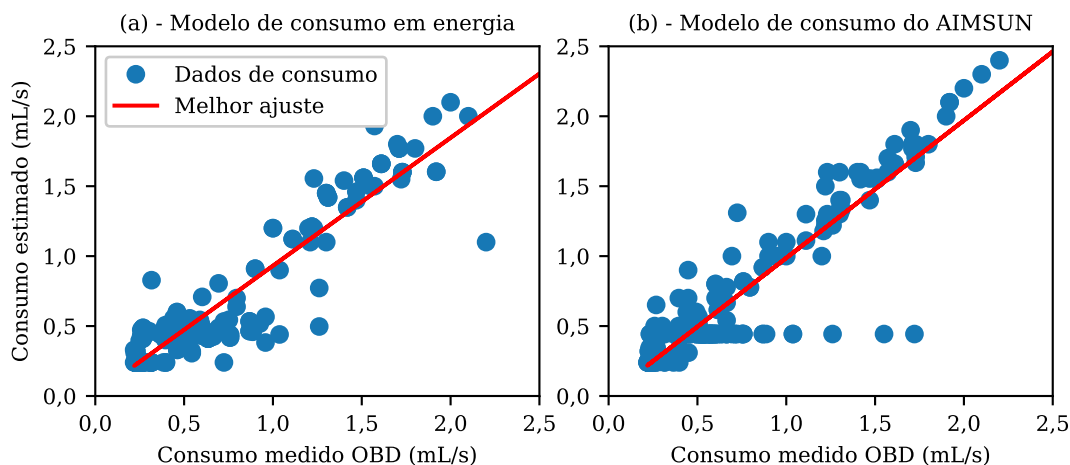
Tabela 5 – Parâmetros calibrados do modelo de consumo do simulador Aimsun.

Parâmetro	Valor
$f_i$ (mL/s)	0.244
$k_1$	0.2095
$k_2$ (mL h/ km s)	0.004 769
$v_m$ (km/h)	57
$c_1$ (mL/s)	0.5421
$c_2$ (mL s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	0.7062
$F_d$ (mL/s)	0.4430

Para a validação foram confrontados 300 pontos de 0 à 2,5 mL/s. A validação da calibração do modelo de consumo baseado em energia e do modelo de consumo

do Aimsun são demonstradas na Figura 15, com  $R^2 = 0.93$  para o modelo de consumo baseado em energia, e  $R^2 = 0.92$  para o modelo de consumo do Aimsun.

Figura 15 – (a) Validação do modelo de consumo de energia; (b) Validação do modelo de consumo de combustível do simulador Aimsun

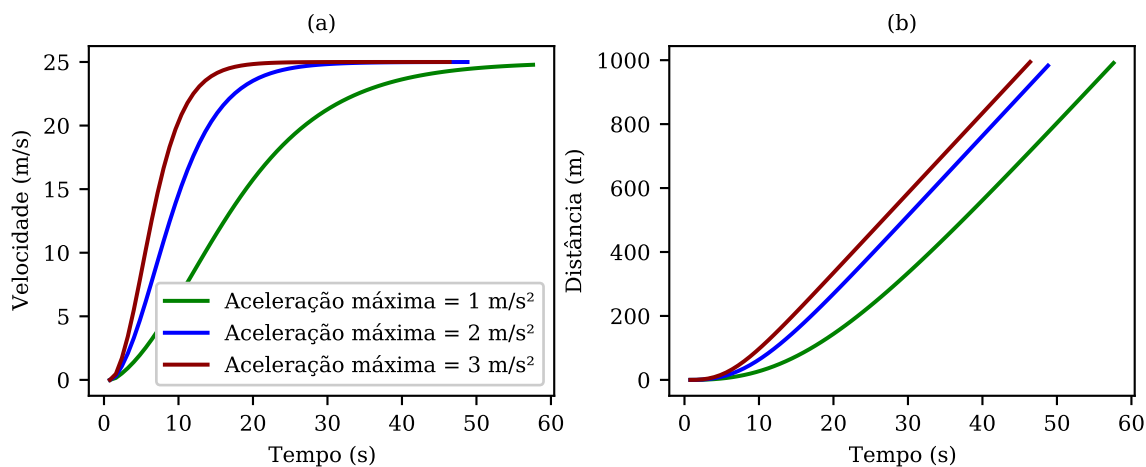


Fonte: Autor.

## 7.2 ANÁLISE E APLICAÇÃO DO MODELO DE CONSUMO DO AIMSUN E DO MODELO DE CONSUMO BASEADO EM ENERGIA

Esse experimento consiste em avaliar as acelerações e os modelos de consumo de combustível demonstrados no Capítulo 3. Os veículos foram inseridos na malha viária demonstrada pela Figura 11 com  $v = 0$  m/s. A malha viária contém as seguintes dimensões:  $X = 500$  m e  $Y = 500$  m, e não possui semáforo. Foram realizadas 3 replicações, onde foi inserido 1 veículo em cada replicação. A Figura 16 demonstra (a) o gráfico de distância e tempo de cada veículo em simulação; e (b) o gráfico de velocidade e tempo de cada veículo inserido na simulação. É esperado que menores acelerações acarretem em um menor consumo de combustível no regime de aceleração, conforme observado nas conduções experimentais realizadas na cidade de Florianópolis-SC.

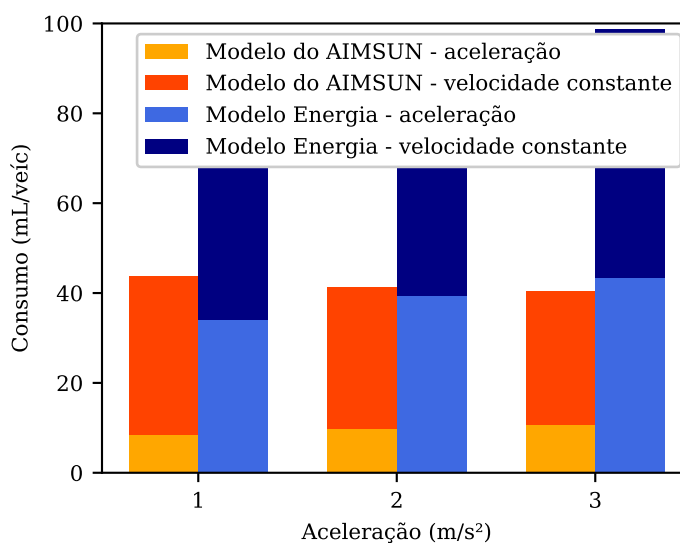
Figura 16 – Gráficos de distância × tempo e velocidade × tempo



Fonte: Autor

Os resultados demonstrados pela Figura 17 demonstraram que o modo de condução ecológica não possui benefícios em termos de consumo de combustível quando comparada ao modo de condução normal no modelo do simulador Aimsun. Essa análise não condiz com os resultados observados em campo, e também com os resultados apresentados em trabalhos anteriores que podem ser vistos em Alam e McNabola (2014).

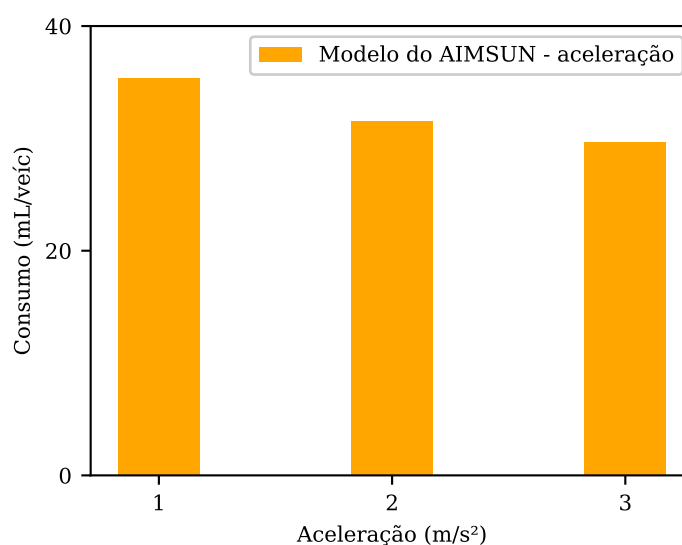
Figura 17 – Comparação entre o modelo de consumo de combustível do Aimsun × o modelo de consumo baseado em energia



Fonte: Autor

A Figura 18 demonstra que a Equação (15) não possui uma boa relação com os resultados observados em campo e encontrados na literatura, onde é esperado que menores acelerações acarretem em uma parcela de consumo de combustível menor no regime de aceleração. Portanto foi optado neste trabalho pela utilização do modelo de consumo baseado em energia. Essa análise de fato também é consistente com os parâmetros sugeridos por AIMSUN (2020) e também pelos parâmetros sugeridos por Marinho *et al.* (2018).

Figura 18 – Parcela de consumo durante o regime de aceleração pelo modelo do Aimsun



Fonte: Autor

### 7.3 CONSUMO EM CONDUÇÃO NORMAL E EM CONDUÇÃO ECOLÓGICA

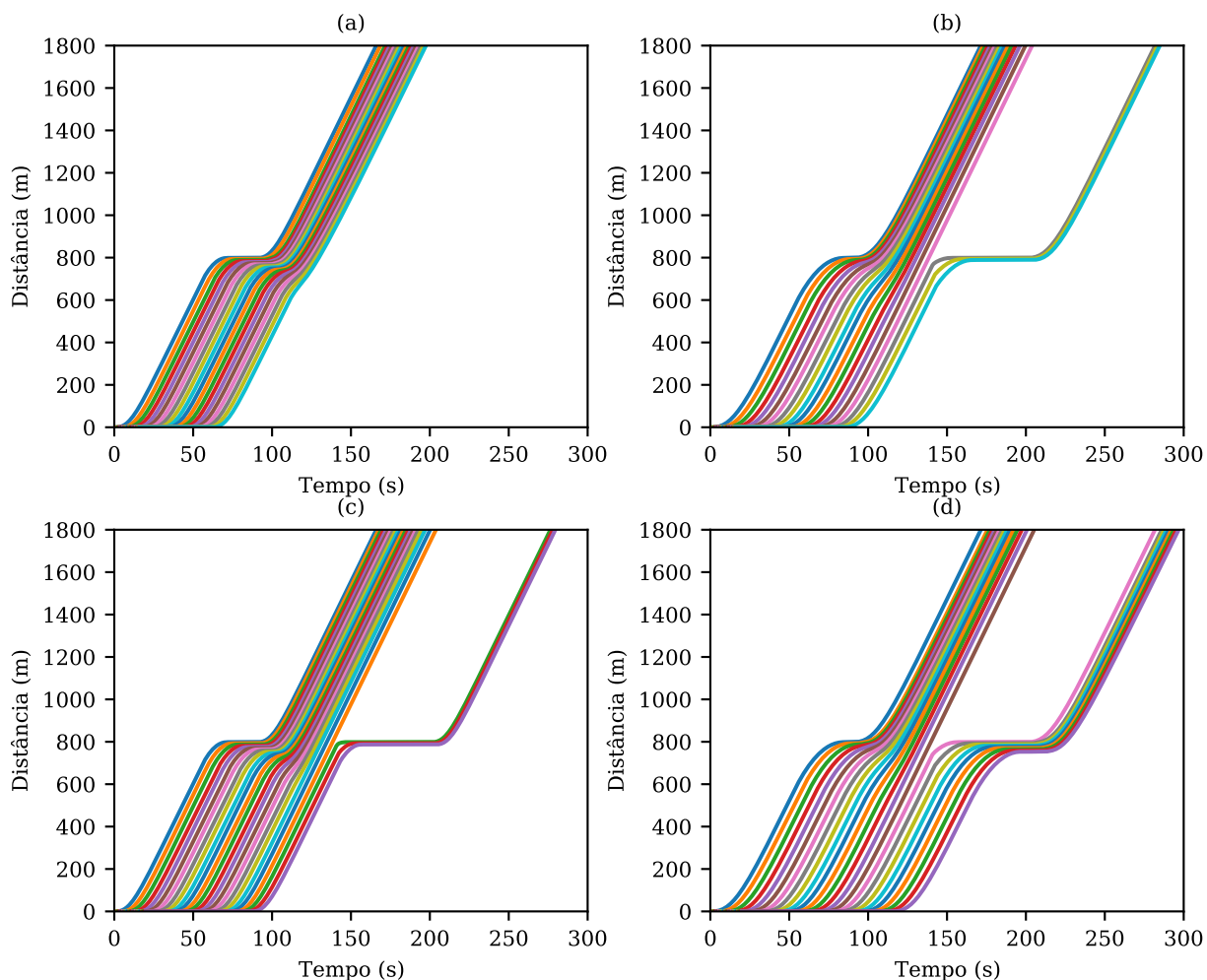
Para avaliar o consumo de combustível com tráfego caracterizado por condução normal ou por condução ecológica, foram realizados experimentos na malha viária descrita na Seção 6.2. Considerou-se situações com frota homogênea de veículos, isto é, apenas com veículos sob condução normal ou sob condução ecológica. Variou-se a quantidade de veículos inseridos na malha viária entre 1 e 30. Os veículos foram inseridos com  $v = 0$  km/h e o tempo de ciclo e as dimensões utilizadas são demonstradas abaixo:

- Tempo de ciclo de 120 s, sendo 60 s de verde para o movimento analisado;
- A malha viária possui um tamanho de 1800 m sendo,  $X = 800$  m e  $Y = 1000$  m.

Com o tempo de ciclo de 120 s, o tempo de vermelho é suficientemente alto para que todos os veículos inseridos cheguem no semáforo e parem antes da abertura deste. Os dados retirados em simulação são utilizados para estimar o consumo a partir do modelo baseado em potência, e também para analisar os diagramas de espaço, velocidade e tempo.

A Figura 19 apresenta diagramas espaço-tempo para quatro casos analisados. Evidencia-se que o maior consumo sob condução ecológica ocorre quando atinge-se regime de tráfego mais saturado: (a) 20 veículos em condução normal, (b) 20 veículos em condução ecológica, (c) 25 veículos em condução normal e (d) 25 veículos em condução ecológica. Nota-se que em (a) nenhuma fila residual é gerada, pois os veículos em condução normal possuem acelerações maiores, resultando em um fluxo de saturação maior. Por outro lado, as acelerações menores da condução ecológica geram uma fila residual de 4 veículos. Quando a inserção de veículos no experimento é aumentada para 25 veículos, há uma fila residual com 2 veículos para cenário com veículos em condução normal, enquanto que a fila para o cenário com veículos em condução ecológica possui 9 veículos.

Figura 19 – Diagramas espaço  $\times$  tempo para ciclo de 120 s com 60 s de verde, considerando (a) 20 veículos em condução normal; (b) 20 veículos em condução ecológica; (c) 25 veículos em condução normal; e (d) 25 veículos em condução ecológica.

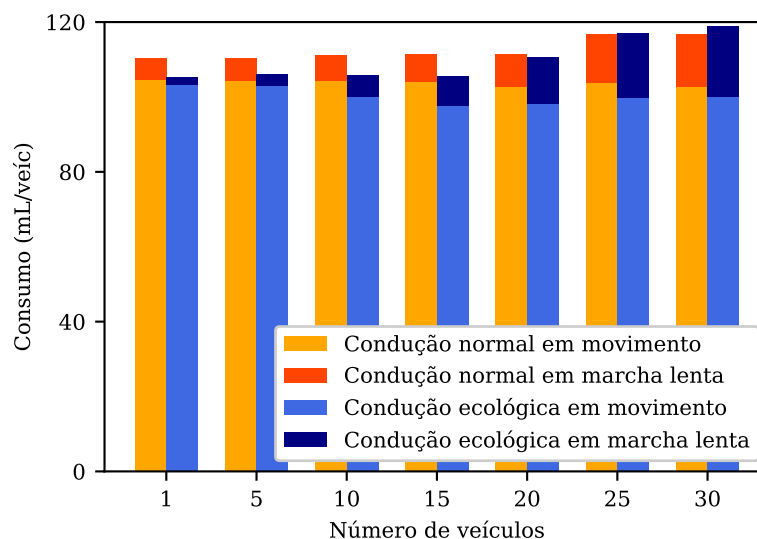


Fonte: Autor.

Observou-se que conforme o número de veículos na via cresce, o consumo de combustível de cada veículo aumenta. A Figura 20 ilustra a média do consumo de combustível para cada um desses casos. Para até 20 veículos, a condução ecológica trouxe benefícios quando comparado ao consumo dos veículos em condução normal. A partir de 25 veículos, o consumo dos veículos em condução ecológica passa a ser maior, em função do número de veículos que permanecem na fila residual, verificado na Figura 19. Esse resultado confirma a hipótese levantada de que o consumo aumenta no caso de regimes saturados com veículos sob condução ecológica em decorrência da redução da capacidade viária.



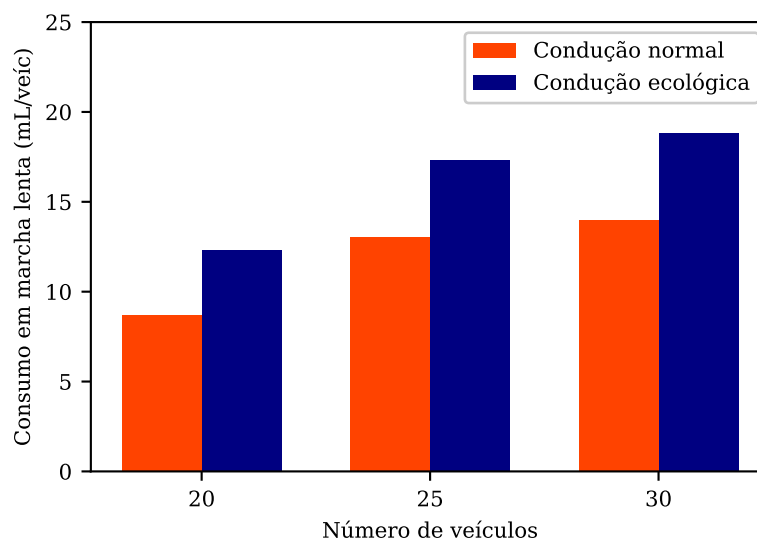
Figura 20 – Consumo estimado: normal x eco



Fonte: Autor.

A Figura 21 mostra o consumo de combustível (mL/veíc) considerando apenas o tempo em que os veículos estavam no regime de marcha lenta, caracterizado por velocidade e aceleração nulas, para os cenários com maior número de veículos. Note-se que, de fato, o maior consumo de combustível em regime saturado no caso de condução ecológica apresentado na Figura 20 deve-se ao consumo em marcha lenta.

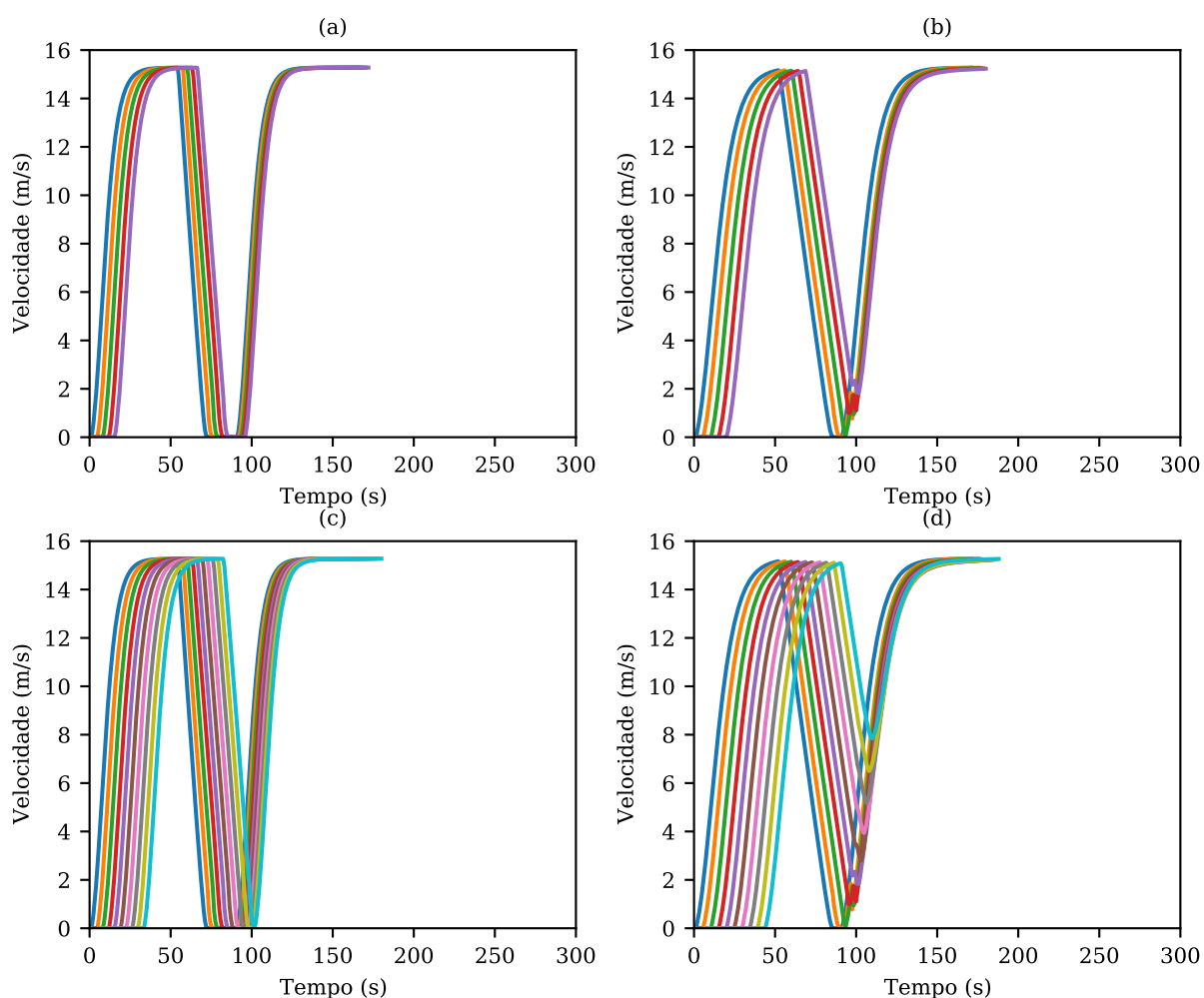
Figura 21 – Consumo estimado em marcha lenta: normal x eco



Fonte: Autor.

Percebe-se que a parcela em movimento do consumo agregado de combustível diminui com o aumento da demanda. Isso acontece em função das retomadas de velocidades que podem ser vistas na Figura 22, ou seja, conforme a Figura 23, os veículos em condução ecológica possuem uma menor aceleração para retomar a velocidade após o semáforo.

Figura 22 – Diagramas tempo  $\times$  tempo para ciclo de 120 s com 60 s de verde, considerando (a) 5 veículos em condução normal; (b) 5 veículos em condução ecológica; (c) 10 veículos em condução normal; e (d) 10 veículos em condução ecológica.

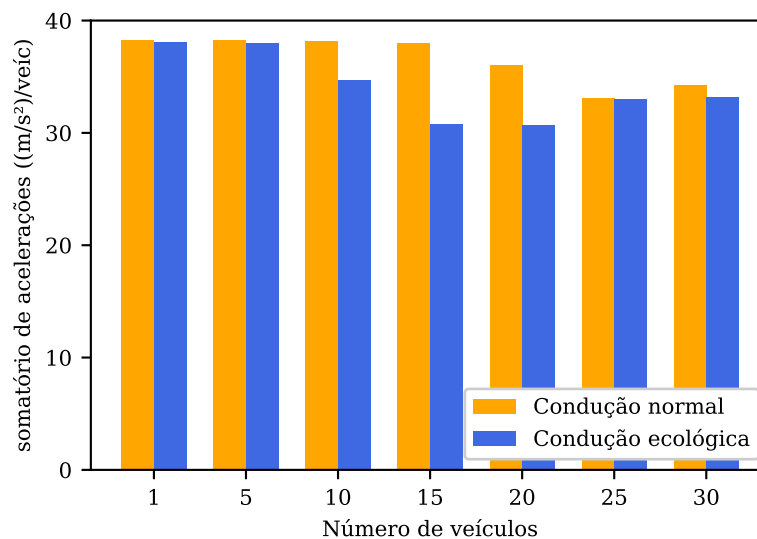


Fonte: Autor.

Nota-se na Figura 22 que no experimento com 10 veículos, todos os veículos em condução normal atingem velocidade constante e param no semáforo, contudo, o experimento com condutores ecológicos demonstra que apenas os 3 primeiros veículos atingem  $v = 0$  m/s, com isso os demais veículos não chegam a parar na fila, sendo que o último atinge  $v = 8$  m/s, ou seja, conforme a Figura 23, os veículos ecológicos aceleram menos para atingir a velocidade constante, esse efeito faz com que a parcela

de consumo de combustível em movimento seja menor.

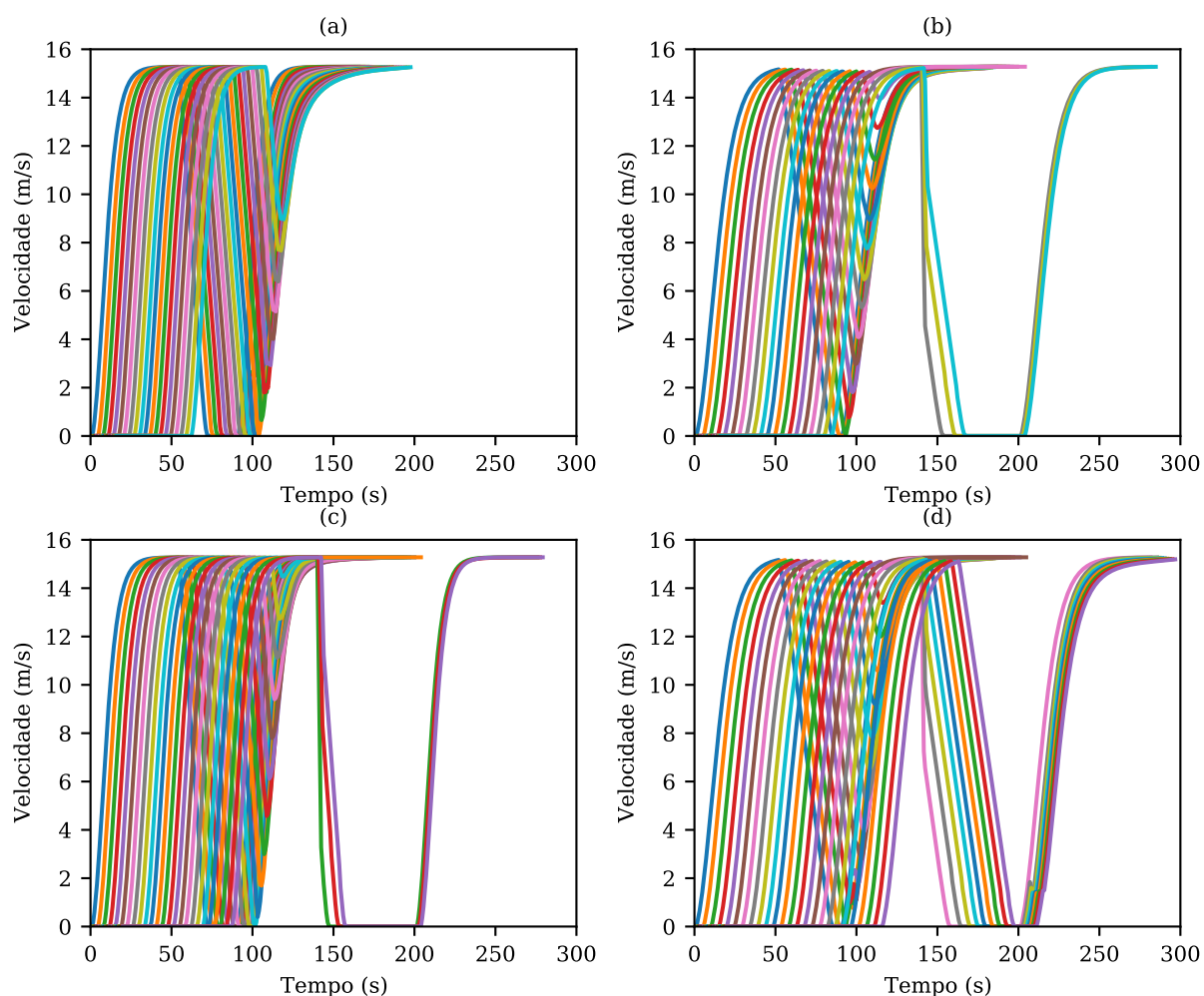
Figura 23 – Somatório das acelerações ecológicas e normais



Fonte: Autor.

A partir dos experimentos com 20 veículos nota-se um aumento no somatório das acelerações, bem como na parcela de consumo de combustível em movimento. Isso acontece pois conforme a Figura 24 há veículos na fila residual, eles pararam com  $v = 0$  m/s, isso faz com que eles tenham que acelerar novamente até a velocidade constante, com isso aumenta a parcela de consumo em movimento, e também aumenta a média do somatório de acelerações demonstradas na Figura 23.

Figura 24 – Diagramas velocidade  $\times$  tempo para ciclo de 120 s com 60 s de verde, considerando (a) 20 veículos em condução normal; (b) 20 veículos em condução ecológica; (c) 25 veículos em condução normal; e (d) 25 veículos em condução ecológica.



Fonte: Autor.

#### 7.4 CONSUMO EM CONDUÇÃO NORMAL E EM CONDUÇÃO ECOLÓGICA COM AJUSTES SEMAFÓRICOS

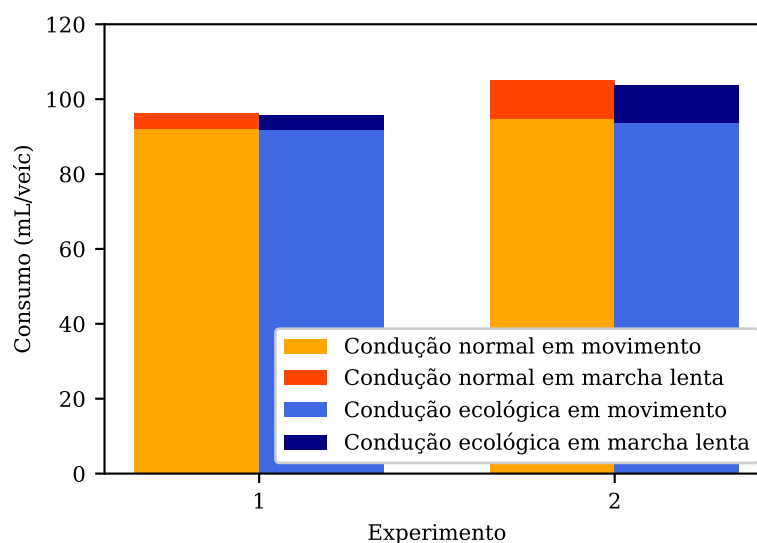
De acordo com os resultados demonstrados na Seção 7.3 a partir da inserção de 25 veículos na malha viária, o consumo em condução ecológica tende a aumentar quando comparado ao consumo em condução normal. Essa sessão demonstra os resultados utilizando a inserção de 25 veículos na malha viária demonstrada na Figura 11 com os parâmetros de simulação definidos na Tabela 3 e a dimensão da malha viária, igual a malha do experimento demonstrado na Seção 7.3. Os veículos foram inseridos com velocidade constante ( $V = 55$  km/h) e o tempo de ciclo foi ajustado de tal maneira que o número de veículos a passar no tempo de verde efetivo seja o

mesmo. Os tempos de verde efetivo utilizados em cada experimento são demonstrados a seguir:

- Experimento 1: tempo de verde efetivo parametrizado em 41 s para condução normal e 44 s para condução ecológica;
- Experimento 2: tempo de verde efetivo parametrizado em 30 s para condução normal e em 33 s para condução ecológica.

Embora o cenário utilizado esteja saturado, o tempo de verde efetivo ajustado faz com que a condução ecológica tenha mais economia de combustível quando comparada à condução normal, como pode ser visto na Figura 25. A diferença nos resultados de consumo de combustível demonstrados pela Figura 20 e pela Figura 25 é pelo fato que no experimento da Seção 7.3 os veículos são inseridos com  $v = 0$  km/h, enquanto para os experimentos da presente sessão os veículos são inseridos com  $v = 55$  km/h. O tempo de ciclo é outra variável que também influencia nos resultados obtidos.

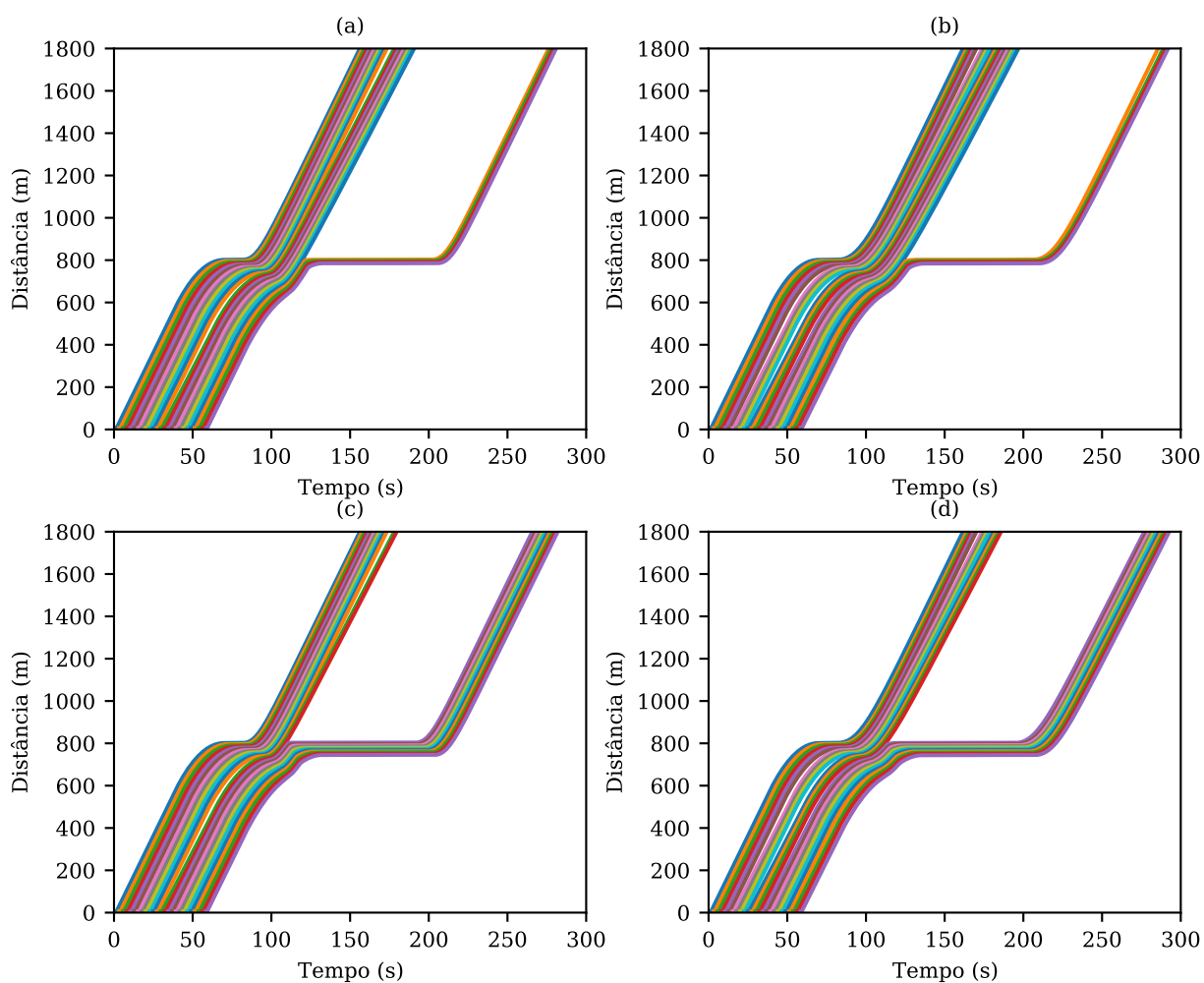
Figura 25 – Consumo para condução normal e ecológica controlando o grau de saturação



Fonte: Autor.

A Figura 26 apresenta diagramas espaço-tempo para quatro casos analisados. Evidencia-se que o número de veículos em fila residual é o mesmo: (a) experimento 1 com 3 veículos em condução normal na fila residual, (b) experimento 1 com 3 veículos em condução ecológica na fila residual, (c) experimento 2 com 9 veículos em condução normal na fila residual e (d) experimento 2 com 9 veículos em condução ecológica na fila residual. Isso garante que a parcela de combustível em marcha lenta seja a mesma, e o maior agravante para o consumo de combustível seja a parcela de consumo em movimento.

Figura 26 – Diagramas espaço  $\times$  tempo para o tempo de ciclo variável, considerando (a) experimento 1: 41 s de verde efetivo; (b) experimento 1: 44 s de verde efetivo; (c) experimento 2: 30 s de verde efetivo; e (d) experimento 2: 33 s de verde efetivo.



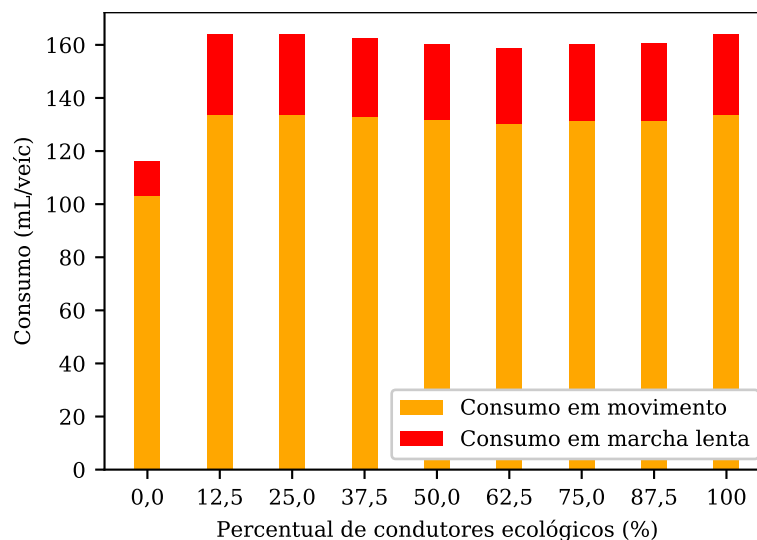
Fonte: Autor.

## 7.5 CONSUMO PARA A PROPORÇÃO DE VEÍCULOS EM CONDUÇÃO ECOLÓGICA

Esse experimento tem o objetivo de avaliar o consumo de combustível do tráfego agregado do experimento que avaliou o fluxo de saturação para a proporção de veículos ecológicos descrito na Seção 6.4. Portanto é utilizado o mesmo tempo de ciclo, o mesmo tempo de verde efetivo, bem como as mesmas dimensões da malha viária do experimento descrito na Seção 6.4. Os veículos foram inseridos na malha viária com velocidade constante ( $v = 55$  km/h). A simulação tem duração de 2 horas, onde na primeira hora a demanda foi de 1000 veíc/h, e após a primeira hora nenhum veículo é inserido mais na malha viária, ou seja, garante-se que ao final da simulação

não há a formação de filas virtuais. A Figura 27 demonstra o consumo de combustível para o experimento inserindo veículos em proporção ecológica.

Figura 27 – Consumo de combustível para a proporção de veículos em condução ecológica



Fonte: Autor.

Observou-se que após a inserção de 12,5% de condutores ecológicos na malha viária, o consumo de combustível aumenta cerca de 22,7%. Como pode ser visto na Figura 13 a partir da inserção de 12,5% de condutores ecológicos na via, o fluxo de saturação é reduzido cerca de 10%. Essa queda no fluxo de saturação gera filas e um número maior de *stop-and-go* (pare-e-anda). Com isso o consumo de combustível tende a aumentar, pois há mais veículos nas filas residuais (como demonstrado na Seção 7.3), ou seja, a parcela de consumo em marcha e o excesso de paradas e retomadas de aceleração (*stop-and-go*) nesse experimento contribuíram para o aumento do consumo de combustível do tráfego agregado.

## 7.6 CONSUMO PARA A PROPORÇÃO DE VEÍCULOS EM CONDUÇÃO ECOLÓGICA COM DEMANDA VARIÁVEL

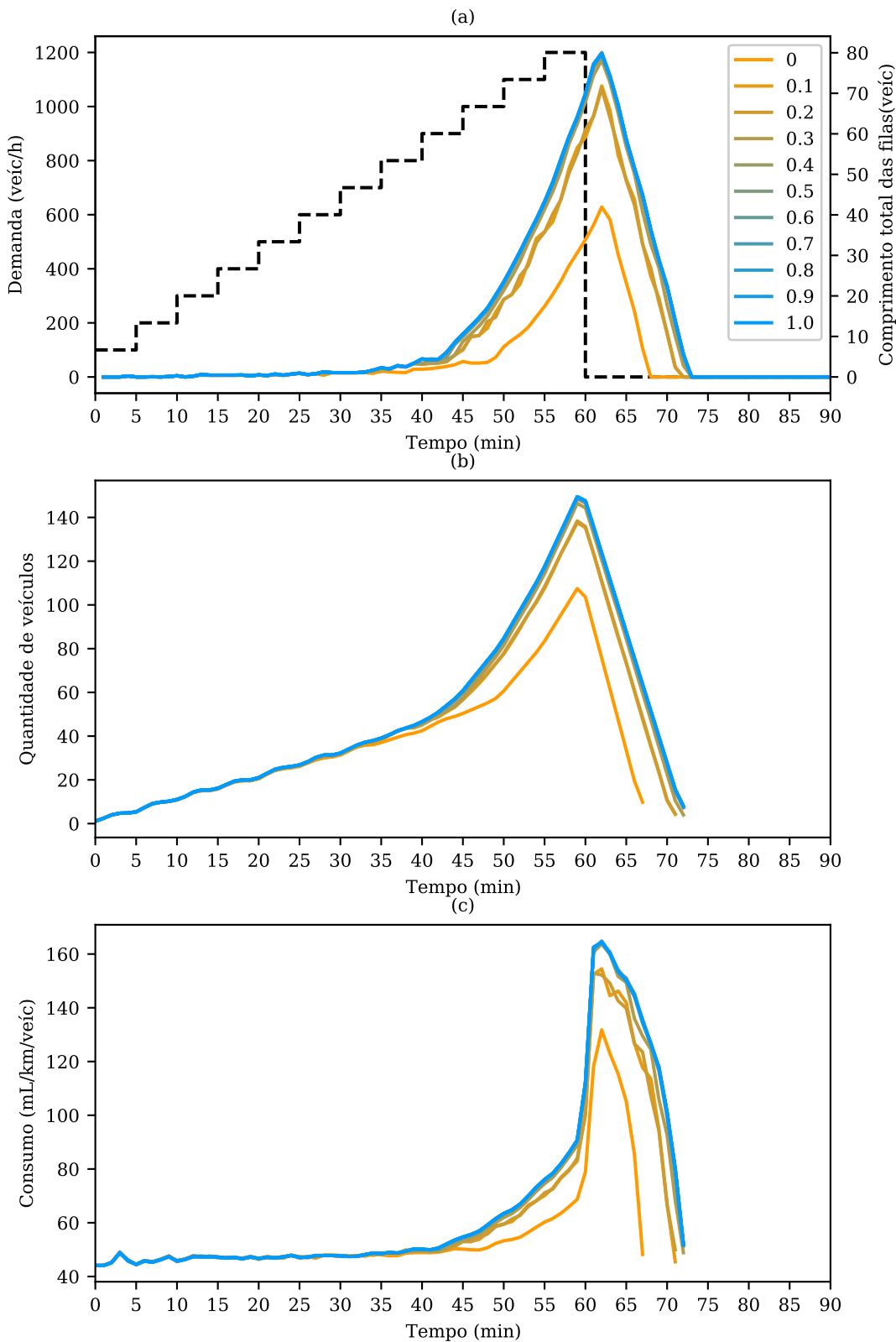
Esse experimento tem como o objetivo demonstrar o consumo de combustível do experimento que analisou o crescimento da fila de acordo com a inserção de condutores ecológicos demonstrado na Seção 6.5. Portanto utiliza-se as mesmas dimensões da malha viária demonstrada na Figura 11 e o mesmo tempo de ciclo. Diferente dos experimentos demonstrados nas sessões anteriores, a variação da proporção de veículos ecológicos é dado no intervalo de 10% (0,1) até 100% (1,0) que é representada pela curva em azul na Figura 28. A demanda utilizada varia à cada 5 minutos em 200 veículos, e o experimento tem duração de 90 minutos. A Figura 28 (a) demonstra o comprimento da fila de acordo com a demanda e a proporção de veículos ecológicos, (b) mostra a quantidade de veículos em simulação em um determinado instante de tempo; e (c) demonstra a distribuição do desempenho do consumo de combustível em relação às condições de tráfego e às taxas de penetração de condutores ecológicos.

Em primeiro lugar, os resultados demonstram que o consumo de combustível aumenta à medida que a demanda cresce. Em segundo lugar, após a inserção de 10% de condutores ecológicos o consumo tende a aumentar e permanecer constante, pois conforme os resultados demonstrados no Capítulo 6 quando a condição de tráfego está supersaturada, a tendência é que o fluxo de saturação caia em torno de 10%, aumentando o número de veículos nas filas, assim, como demonstrado na Seção 7.3 e na Seção 7.6 o aumento abrupto do consumo de combustível acontece em função da parcela de combustível em marcha lenta (*idle*) e também pelo excesso de *stop-and-go* (pare-e-anda). A Figura 29 (a) representa o diagrama de espaço e tempo para 0% de condutores ecológicos, e (b) para 100% de condutores ecológicos inseridos em simulação. Para o caso de 0% de condutores ecológicos é necessário um período de tempo menor para que todos os veículos que entraram em simulação percorram todo o trecho da malha viária, quando comparado ao caso de 100% de condutores ecológicos.

Esses experimentos são menos controlado do que os experimentos descritos nas sessões anteriores, contudo é possível obter as mesmas conclusões que reforçam a hipótese de que a condução ecológica em regimes de tráfego saturado, aumenta o consumo de combustível em função das baixas acelerações que diminuem a capacidade viária.

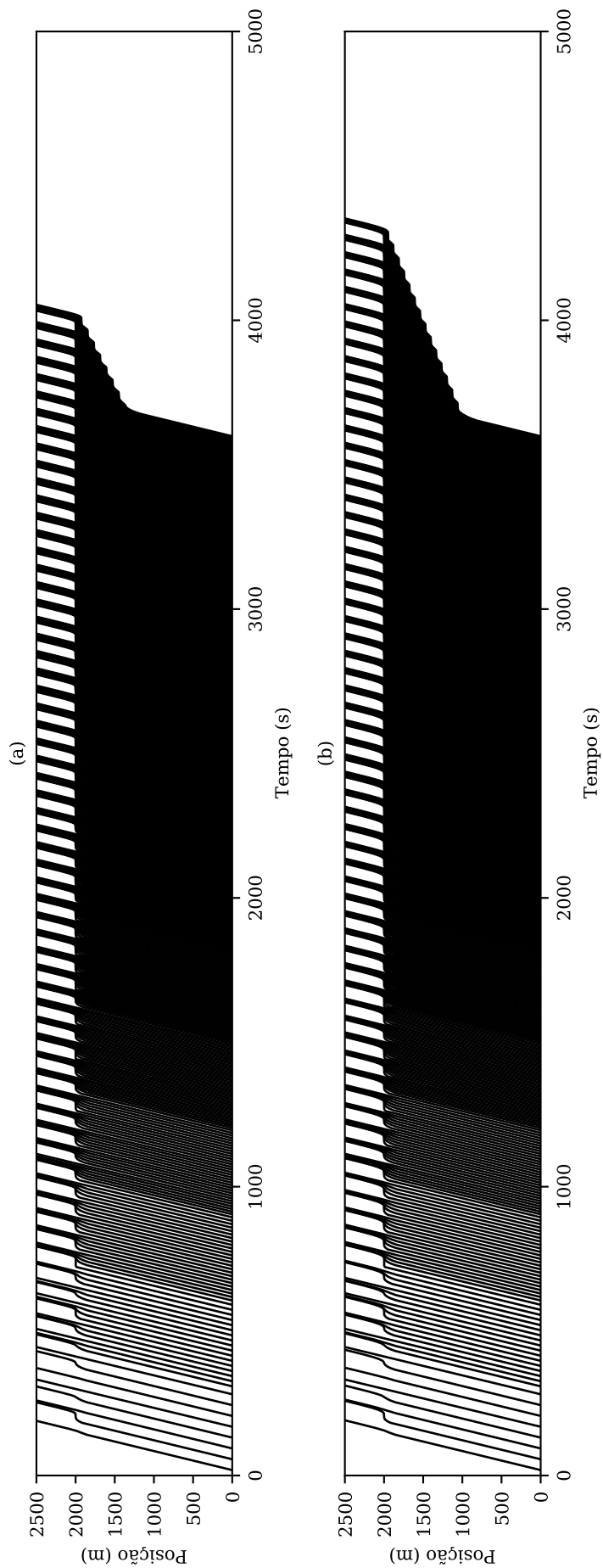


Figura 28 – Consumo e comprimento de fila de acordo com a demanda a proporção de veículos ecológicos, considerando (a) fila média; (b) quantidade de veículos em simulação; e (c) consumo de combustível



Fonte: Autor.

Figura 29 – Diagrama de espaço  $\times$  tempo para o experimento com demanda variável, considerando (a) condutores normais; e (b) condutores ecológicos



## 8 CONCLUSÃO

Este trabalho confirmou a hipótese de que a condução ecológica pode ocasionar o aumento do consumo de combustível dos veículos em relação à condução normal. Esse efeito é causado por congestionamentos maiores que resultam de capacidades viárias menores quando na presença de baixas acelerações do modo ecológico. Para a confirmação da hipótese foram coletados dados em um trecho urbano utilizando o veículo Duster Oroch da Renault, que é dotado do sistema de apoio ao condutor ecológico. Os dados coletados foram utilizados para caracterizar as acelerações e desacelerações do modo de condução normal e ecológica bem como para a calibração do modelo de consumo de combustível baseado em energia, e do modelo de consumo do simulador Aimsun. Após isso, foram realizadas simulações microscópicas de tráfego, onde os dados necessários para estimar o consumo de combustível do tráfego agregado bem como a capacidade viária foram retirados através da API do simulador Aimsun e utilizados em um script em Python. Primeiramente foram analisados os efeitos da aceleração na capacidade viária, estimando o fluxo de saturação e também o tamanho de fila. Após isso foi analisado o consumo de combustível do tráfego agregado.

A seguir apresenta-se as conclusões obtidas no trabalho:

- Ao analisar os dados brutos coletados em ciclos de condução com o veículo Duster-Oroch em um trecho viário na cidade de Florianópolis/SC com condições de fluxo livre de tráfego no período da pandemia, verificou-se que o modo de condução ecológica possui benefícios em termos de consumo de combustível quando comparado ao modo de condução normal. O trecho contém 12 semáforos e 2 lombadas, o que contribuíram para a caracterização dos modos de conduções (normal e ecológica) em função das retomadas de velocidades. O fato do modo de condução ecológica resultar em um consumo de combustível menor do que o modo de condução normal no experimento de campo, acontece porque não há formações de filas nos cruzamentos semaforizados;
- A escolha da utilização do modelo de consumo de combustível baseado em potência da-se pela ampla utilização na literatura e principalmente porque quando comparado ao modelo de consumo de combustível do simulador Aimsun, demonstrou estar condizente com os resultados observados em campo e também com os resultados já demonstrados na literatura. O modelo de consumo de combustível do Aimsun não apresenta uma boa representação para o regime em aceleração, nesse modelo foi observado que para acelerações menores o consumo de combustível é maior;
- Ao analisar os efeitos das acelerações e do fator de agressividade do *headway* na capacidade viária, em microssimulação de tráfego, observou-

se que para os casos em que a aceleração foi avaliada isoladamente, o parâmetro de agressividade do *headway* não influencia diretamente a queda de capacidade viária, por outro lado, demonstrou ser um fator relevante ao inserir uma mistura de condutores ecológicos. Observam-se reduções da capacidade mesmo com taxas pequenas de penetração de veículos sob condução ecológica, da ordem de 10%;

- Ao analisar os efeitos das acelerações no comprimento total de filas, observou-se o aumento do comprimento da fila de veículos em simulação mesmo com taxas pequenas de penetração de veículos sob condução ecológica, da ordem de 10%;
- Ao se analisar a composição do consumo nos experimentos inserindo até 30 veículos, observa-se que a parcela deste em marcha lenta cresce mais rapidamente na condução ecológica em relação à condução normal, enquanto que o consumo em movimento é sempre menor no primeiro modo. Portanto, se todos os veículos forem equipados com sistema de acionamento/desligamento automático (sistema *start-stop*), o consumo sob condução ecológica pode ser menor em condições saturadas de tráfego;
- Os experimentos que avaliaram o consumo de combustível do tráfego agregado controlando o grau de saturação, garantiram que o mesmo número de veículos em condução normal e em condução ecológica cruzassem a intersecção no sinal verde. Isso garante que a parte de consumo de combustível em marcha lenta seja a mesma, e a parcela em movimento determina o consumo de combustível. Como o modo de condução ecológica é caracterizado por baixas acelerações, a parcela de consumo em movimento é menor quando comparada a parcela do modo de condução normal. Até certo ponto, pode-se mitigar o efeitos do controle do grau de saturação por meio de ajustes nos tempos de ciclo dos semáforos. Porém, o alcance desta medida é limitado pelo ciclo máximo admissível em malhas viárias urbanas (120 s);
- Ao analisar o consumo de combustível do tráfego agregado nos experimentos menos controlados, com a inserção de condutores ecológicos e normais na mesma replicação da simulação (tráfego misto), observa-se que a parcela de consumo de marcha lenta não é mais a responsável pelo aumento do consumo de combustível do tráfego agregado. Nesses experimentos o excesso de pare-e-anda também é um fator que faz com que o consumo de combustível do tráfego agregado aumente. Também nota-se que basta uma pequena inserção de condutores ecológicos (na ordem de 10 %) para aumentar o consumo de combustível do tráfego agregado, e que o consumo do tráfego agregado cresce com o aumento do comprimento da fila de veículos

em simulação.

O alcance das conclusões apresentadas anteriormente limita-se aos métodos de simulação e aos modelos adotados. Sugestões para trabalhos futuros deverão investigar o uso de modelos alternativos de tráfego e de consumo, além de realizar experimentos de campo com veículos dotados de instrumentação específica. A calibração do modelo de Gipps, bem como a calibração do parâmetro de agressividade do *headway* podem ser temas para trabalhos futuros. Outro tema sugerido é o desenvolvimento de um sistema de apoio ao condutor ecológico que não penalize o usuário como o sistema *Driving-eco<sup>2</sup>* da Renault. Esse algoritmo pode ter o propósito de auxiliar o condutor de qualquer veículo por meio de pontuações e mensagens contendo orientações, como por exemplo, se o sistema identificar o excesso de pare-e-anda pode aumentar o limite de aceleração, ou até mesmo comunicar-se com usuários desse sistema para que ambos aumentem a magnitude de aceleração, assim aumentando a capacidade viária e diminuindo o tamanho de filas no trecho viário.

## REFERÊNCIAS

ADAMIDIS, Filippos K.; MANTOUKA, Eleni G.; BARMPOUNAKIS, Emmanouil N.; VLAHOGIANNI, Eleni I. Impacts of Eco Driving on Traffic Flow and Emissions in Large Scale Urban Networks, 2019. Number: 19-04158.

AIMSUN. **Aimsun Next 8.4 Help Online**. 2020. Disponível em:  
<https://www.aimsun.com/>.

AKÇELIK, Rahmi; SMIT, Robin; BESLEY, Mark. Calibrating Fuel Consumption and Emission Models for Modern Vehicles. *In: IPENZ Transportation Group Conference*. Rotorua, New Zealand: [s.n.], 2012. P. 13.

ALAM, Md. Saniul; MCNABOLA, Aonghus. A critical review and assessment of Eco-Driving policy & technology: Benefits & limitations. **Transport Policy**, v. 35, p. 42–49, 1 set. 2014. ISSN 0967-070X.

BIGGS, D. C.; AKÇELIK, R. An Energy-related Model of Instantaneous Fuel Consumption. **Traffic Engineering and Control**, v. 2, n. 6, p. 320–325, 1986.

CHAVES, Jéssica Aquino; CARLSON, Rodrigo Castelan; MÜLLER, Eduardo Rauh; KRAUS JR., Werner. Controle do Fluxo Principal em Autoestradas por Meio de Veículos Cooperativos Equipados com Controle Adaptativo de Cruzeiro. **TRANSPORTES**, v. 26, n. 3, p. 134–144, 2018. ISSN 2237-1346.

CHEN, Danjue; LAVAL, Jorge; ZHENG, Zuduo; AHN, Soyoung. A Behavioral Car-following Model that Captures Traffic Oscillations. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 46, n. 6, p. 744–761, 2012. ISSN 0191-2615.

COLOMA, Juan Francisco; GARCÍA, Marta; WANG, Yang. Eco-Driving Effects Depending On The Travelled Road. Correlation Between Fuel Consumption Parameters. **Transportation Research Procedia**, v. 33, p. 259–266, 1 jan. 2018. ISSN 2352-1465.

DU, Jianhe; RAKHA, Hesham A.; FILALI, Fethi; ELDARDIRY, Hoda. COVID-19 Pandemic Impacts on Traffic System Delay, Fuel Consumption and Emissions. **International Journal of Transportation Science and Technology**, v. 10, n. 2, p. 184–196, 2021. ISSN 20460430.

FAFOUTELLIS, Panagiotis; MANTOUKA, Eleni G.; VLAHOGIANNI, Eleni I. Eco-Driving and Its Impacts on Fuel Efficiency: An Overview of Technologies and Data-Driven Methods. **Sustainability**, v. 13, n. 1, p. 17, 2020. ISSN 2071-1050.

FONSECA, Henrique; FERREIRA, Carlos; FERNANDES, Telmo. NEW METHODOLOGIES TO MEASURE IN REAL TIME FUEL CONSUMPTION OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES., p. 9, 2012.

GARCIA-CASTRO, Alvaro; MONZON, Andres; VALDES, Cristina; ROMANA, Manuel. Modeling different penetration rates of eco-driving in urban areas: Impacts on traffic flow and emissions. **International Journal of Sustainable Transportation**, v. 11, n. 4, p. 282–294, 21 abr. 2017.

GIPPS, P.G. A Behavioural Car-following Model for Computer Simulation. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 15, n. 2, p. 105–111, 1981. ISSN 01912615.

HICKMAN, J.; HASSEL, D.; JOUMARD, R.; SAMARAS, Z.; SORENSON, S. Methodology for calculating transport emissions and energy consumption, 1999.

JAMSON, A. Hamish; HIBBERD, Daryl L.; MERAT, Natasha. Interface design considerations for an in-vehicle eco-driving assistance system. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 58, p. 642–656, 2015. Technologies to support green driving. ISSN 0968-090X.

MARINHO, Arthur Theodoro; ECCEL, Renan Artur Lopes; CARLSON, Rodrigo Castelan; KRAUS JUNIOR, Werner. Calibração do Modelo de Consumo de Combustível do Simulador AIMSUN com Dados Coletados via OBD. **TRANSPORTES**, v. 26, n. 2, p. 139–154, 2018. ISSN 2237-1346.

MARTIN, Elliot W.; CHAN, Nelson D.; SHAHEEN, Susan A. How Public Education on Ecodriving Can Reduce Both Fuel Use and Greenhouse Gas Emissions. **Transportation Research Record**, v. 2287, n. 1, p. 163–173, 1 jan. 2012. ISSN 0361-1981.

MÜLLER, Eduardo Rauh. **Estudo por Microssimulação do Controle de Fluxo Principal em Rodovias Através de Limite de Velocidade Variável**. 2013. Dissertação de mestrado – Programa de Pós-graduação em Engenharia de

Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.

MÜLLER, Eduardo Rauh; CARLSON, Rodrigo Castelan; KRAUS JR., Werner. Efeitos dos Parâmetros de Modelo de Seguimento Veicular do Simulador AIMSUN na capacidade de rodovias. *In: XXVI Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes*. Joinville, SC, Brasil: [s.n.], 2012. P. 1567–1578.

NANDURI, Kanchana. **Mitigating emissions and energy consumption for urban transportation networks : simulation-based signal control strategies**. 2013. Thesis – Massachusetts Institute of Technology. Accepted: 2013-12-06T20:48:17Z.

OLSTAM, Johan; TAPANI, Andreas. **Comparison of Car-following Models**. [S.l.], 2004.

PANWAI, S.; DIA, H. Comparative Evaluation of Microscopic Car-following Behavior. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 6, n. 3, p. 314–325, 2005.

PULKRABEK, Willard W. Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine, 2nd Ed. **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, v. 126, n. 1, p. 198–198, 1 jan. 2004. Publisher: American Society of Mechanical Engineers Digital Collection. ISSN 0742-4795.

QIAN, Gongbin; CHUNG, Edward. Assessing Eco-Driving Performance of a traffic platoon at urban intersections: an experimental study, p. 14, 2013.

QIAN, Gongbin; CHUNG, Edward. Evaluating effects of eco-driving at traffic intersections based on traffic micro-simulation, p. 11, 2011.

RAKHA, Hesham; AHN, KyoungHo; MORAN, Kevin; SAERENS, Bart; BULCK, Eric. Virginia Tech Comprehensive Power-Based Fuel Consumption Model: Model development and testing. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 16, p. 492–503, 1 out. 2011.

RENAULT. **Renault**. Renault. Disponível em:

<http://www.imprensa.renault.com.br/release/item/driving-eco-ajuda-a-reduzir-em-ate-20-o-consumo-de-combustivel/pt>. Acesso em: 28 fev. 2020.



ROTHERY, Richard W. Car Following Models. *In*: GARTNER, Nathan H.; MESSER, Carrol J.I.; RATHI, Ajay. **Traffic Flow Theory—A State-of-the-art report: Revised Monograph on Traffic Flow Theory**. Washington: FHWA, 2002. P. 1–33.

SIVAK, Michael; SCHOETTLE, Brandon. Eco-driving: Strategic, tactical, and operational decisions of the driver that influence vehicle fuel economy. **Transport Policy**, v. 22, p. 96–99, jul. 2012. ISSN 0967070X.

TRB. **HCM2010: Highway Capacity Manual**. Washington, DC: National Academy of Science, 2010. (Transportation Research Board, 2010). ISBN 978-0-309-16077-3.

WANG, M; DAAMEN, W; HOOGENDOORN, SP; AREM, B van. Investigating potential impacts of an optimization based Eco-ACC system on traffic and environment: 91st Annual Meeting Transportation Research Board. Edição: null s.n. null, 2012. Place: Washington DC Publisher: Transportation Research Board (TRB).

WU, Lina; CI, Yusheng; WANG, Yunpeng; CHEN, Peng. Fuel Consumption at the Oversaturated Signalized Intersection Considering Queue Effects: A Case Study in Harbin, China. **Energy**, v. 192, 2020. ISSN 03605442.

YANG, Hao; ALMUTAIRI, Fawaz; RAKHA, Hesham. Eco-Driving at Signalized Intersections: A Multiple Signal Optimization Approach. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 22, n. 5, p. 2943–2955, 2021. ISSN 1524-9050, 1558-0016.