

Arthur Theodoro Marinho

**CALIBRAÇÃO DE MODELOS DE CONSUMO DE  
COMBUSTÍVEL PARA MICROSSIMULAÇÃO DE  
TRÁFEGO COM DADOS COLETADOS VIA OBD**

Dissertação submetida ao Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia de  
Automação e Sistemas para a obten-  
ção do Grau de Mestre em Engenharia  
de Automação e Sistemas.

Orientador: Prof. Rodrigo Castelan  
Carlson, Dr.

Coorientador: Prof. Werner Kraus Ju-  
nior, Dr.

Florianópolis

2016

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

Marinho, Arthur Theodoro

Calibração de modelos de consumo de combustível para  
microsimulação de tráfego com dados coletados via OBD /  
Arthur Theodoro Marinho ; orientador, Rodrigo Castelan  
Carlson ; coorientador, Werner Kraus Junior. -  
Florianópolis, SC, 2016.  
167 p.

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

Inclui referências

1. Engenharia de Automação e Sistemas. 2. OBD. 3.  
Modelagem. 4. Consumo de combustível. 5. Microsimulação de  
tráfego. I. Carlson, Rodrigo Castelan. II. Kraus Junior,  
Werner . III. Universidade Federal de Santa Catarina.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e  
Sistemas. IV. Título.

Arthur Theodoro Marinho

**CALIBRAÇÃO DE MODELOS DE CONSUMO DE  
COMBUSTÍVEL PARA MICROSIMULAÇÃO DE  
TRÁFEGO COM DADOS COLETADOS VIA OBD**

Esta Dissertação foi julgada aprovada para a obtenção do Título de “Mestre em Engenharia de Automação e Sistemas”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas.

Florianópolis, 28 de novembro 2016.

---

Prof. Daniel Ferreira Coutinho, Dr.  
Coordenador

---

Prof. Rodrigo Castelan Carlson, Dr.  
Orientador

---

Prof. Werner Kraus Junior, Dr.  
Coorientador

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Rodrigo Castelan Carlson, Dr.  
Presidente

---

Prof. Lauro Cesar Nicolazzi, Dr. Eng.  
UFSC – EMC

---

Prof. Ubirajara Franco Moreno, Dr.  
UFSC – DAS

---

Prof. Daniel Ferreira Coutinho, Dr.  
UFSC – DAS

Aos meus mestres da vida, pai Aristeu e  
mãe Sandra.



## AGRADECIMENTOS

"Aqueles que passam por nós, não vão sós, não nos deixam sós. Deixam um pouco de si, levam um pouco de nós." (Antoine de Saint-Exupéry)

Estes anos de trabalho que resultaram nesta dissertação foram uma árdua jornada de desafios e amadurecimento. Nessa jornada, pessoas maravilhosas cruzaram meu caminho me ajudando e apoiando. À elas, dedico esta conquista e rogo a Deus que as abençoe e as guarde.

Primeiramente, agradeço a Deus, porque é a luz, fortaleza, proteção e sabedoria que dá sentido à minha vida. Obrigado por diariamente manifestar-se em minha vida, me abençoando com saúde e paz.

Agradeço em especial àqueles que estiveram sempre presentes: minha amada família Aristeu, Sandra e Mariana. Agora que o mestrado chegou ao fim, prometo ser mais de vocês. Seguramente são com eles que quero compartilhar essa incomensurável alegria.

Manifesto aqui minha gratidão ao meu orientador, o professor Rodrigo Castelan Carlson, exemplo de pessoa e competência. Em especial, agradeço por sua paciência e respeito ao longo desse mestrado. Para mim, é uma imensa honra tê-lo como orientador. Lembrarei sempre dos seus inestimáveis ensinamentos. MUITÍSSIMO OBRIGADO!

Agradeço ao meu coorientador, o professor Werner Kraus Junior, por ter sido a pessoa que me ajudou a encontrar o que eu estava procurando no momento apropriado, e por despertar em mim a vontade de continuar quando pensei em desistir.

Agradeço afetosamente aos amigos e companheiros de jornada: Lucas Zimmermann, Eduardo Müller, Diego Paradedá, Jéssica Chaves, Renan Eccel, Vinícius Oliveira e Mônica Spínola. Devo dizer-lhes que sou muito grato pelo companheirismo enriquecedor de vocês.

Meus respeitosos agradecimentos pela participação e contribuição dos membros da banca examinadora da defesa.

Gostaria de agradecer ainda à UFSC e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas, por abrirem as portas para que eu pudesse realizar este sonho que era o meu mestrado.

Finalmente, agradeço à CAPES pelo apoio financeiro.

Ninguém vence sozinho. Obrigado, de coração, a todos vocês!





*"Foi o tempo que dedicaste à tua rosa que  
a fez tão importante."  
(Antoine de Saint-Exupéry)*



## RESUMO

Com a preocupação da sustentabilidade, avaliar em simulação o desempenho de sistemas de tráfego apenas em termos de fluidez não atende mais as expectativas de gestores e da sociedade. Há também a necessidade de medidas confiáveis de aspectos ambientais, como o consumo de combustíveis e a emissão de poluentes. Assim, é importante que simuladores incorporem modelos de consumo de combustível e de emissões que reflitam condições realísticas do tráfego. Neste trabalho, dois modelos de consumo de combustível foram calibrados e validados. O primeiro modelo é implementado no simulador de tráfego AIMSUN. O segundo é um modelo baseado em potência, implementado no simulador de tráfego SIDRA *Trip*. Os dados de vários sensores de diferentes tipos de veículos foram coletados via diagnóstico de bordo (*on-board diagnostics* - OBD). A partir desses dados, tem-se as informações operacionais dos veículos para a calibração dos modelos - velocidade e consumo de combustível instantâneos. A calibração do primeiro modelo foi realizada de quatro maneiras diferentes, em que foram aplicadas técnicas de regressão linear, fórmulas e orientações do manual do simulador AIMSUN. A calibração do segundo modelo foi realizada por meio de um processo iterativo sugerido no manual do simulador SIDRA *Trip*. Para validar a calibração dos modelos, o consumo de combustível medido e o estimado foram comparados utilizando ciclos de condução em áreas urbanas. Os resultados sugerem que a calibração dos modelos de consumo de combustível para simulação de tráfego com dados obtidos via OBD é satisfatória independente da técnica utilizada.

**Palavras-chave:** OBD. Modelagem. Consumo de combustível. Microssimulação



## ABSTRACT

Due to the increased concern with sustainability, the performance of traffic systems in simulation on the basis of throughput does not meet managers and the society requirements anymore. Reliable measures of environmental aspects are also needed, such as fuel consumption and emissions. Therefore, traffic simulators are required to incorporate corresponding models that reflect realistic traffic conditions. In this work, two fuel consumption models were calibrated and validated. The first model is implemented in the AIMSUN traffic simulator. The second is a power-based model, implemented in the SIDRA *Trip* traffic simulator. Data from several sensors of different vehicle types were collected via on-board diagnostics (OBD). From these data, the vehicle operational information is available for the calibration – instantaneous speed and fuel consumption. The calibration of the first model was performed in four different ways, in which linear regression techniques, formulas and guidelines from the AIMSUN simulator’s manual were applied. The calibration of the second model was performed with an iterative process suggested in the SIDRA *Trip* simulator’s manual. For the validation of the calibration, measured and estimated fuel consumption were compared using driving cycles in urban areas. The results suggest that the calibration of fuel consumption models for traffic simulation with OBD data is adequate independent of calibration approach.

**Keywords:** OBD. Modelling. Fuel consumption. Microsimulation.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Perfil de velocidade de um veículo na vizinhança de uma interseção semaforizada: os quatro modos de condução. Fonte: Adaptado de Akcelik, Smit e Besley (2014).....	38
Figura 2	Localização do conector OBD no painel de um veículo Honda Civic ano 2013.....	49
Figura 3	Arquitetura do sistema de aquisição de dados.....	52
Figura 4	FTP-75. Fonte: Barlow (2009).....	56
Figura 5	EPA New York City Cycle (NYCC). Fonte: Barlow (2009).....	56
Figura 6	Japan JP 10-15-Mode. Fonte: Barlow (2009).....	56
Figura 7	Representação esquemática de uma instalação de ensaio de emissões com dinamômetro de chassi em ambiente de laboratório. Fonte: Adaptado de Franco et al. (2013).....	57
Figura 8	Consumo de combustível em marcha lenta.....	63
Figura 9	Calibração do modelo de consumo de combustível para velocidades constantes, segundo Akcelik (1983).....	66
Figura 10	Calibração do modelo de consumo instantâneo de combustível para velocidades constantes, segundo o manual do simulador AIMSUN TSS (2015).....	66
Figura 11	Validação do modelo proposto por Akcelik (1983) com coeficientes calibrados.....	67
Figura 12	Validação do modelo apresentado no manual do simulador TSS (2015) com coeficientes calibrados.....	68
Figura 13	Validação do modelo apresentado no manual do simulador TSS (2015) com coeficientes calculados.....	68
Figura 14	Calibração do modelo de consumo de combustível do AIMSUN para acelerações constantes.....	69
Figura 15	Consumo de combustível e variação do $\lambda$ durante uma desaceleração.....	70
Figura 16	Percurso do ciclo de condução na Av. Beira-mar Norte em Florianópolis/SC.....	72
Figura 17	Exemplo da exposição dos dados dos sensores do veículo e do GPS no Google Earth obtido via aplicativo <i>Torque</i> .....	73
Figura 18	Velocidade, aceleração e consumo de combustível.....	73

Figura 19 Calibração do modelo para velocidades constantes com dados do ciclo de condução.....	75
Figura 20 Validação do modelo para velocidades constantes apresentado no manual TSS (2015) com dados do ciclo de condução...	76
Figura 21 Calibração do modelo para acelerações com dados do ciclo de condução.....	76
Figura 22 Calibração do modelo baseado em potência para velocidades constantes.....	77
Figura 23 Validação do modelo baseado em potência com dados de consumo de testes de regime permanente para velocidades constantes.....	78
Figura 24 Perfil de velocidades e consumos de combustível ao longo do ciclo de condução na Av. Beira-mar Norte em Florianópolis/SC para o caso com pouco tráfego.....	86
Figura 25 Perfil de velocidades e consumos de combustível ao longo do ciclo de condução na Av. Beira-mar Norte em Florianópolis/SC para o caso com tráfego intenso.....	87
Figura 26 Parte do perfil temporal dos valores de consumo de combustível instantâneo medido e estimados para o caso com pouco tráfego.....	90
Figura 27 Parte do perfil temporal dos valores de consumo de combustível instantâneo medido e estimados para o caso com tráfego intenso.....	90
Figura 28 Sensores de fluxo de massa de ar. Fonte: Gomes (2016)	104
Figura 29 Caminho da mistura ar/combustível em um motor de ignição por centelha. Fonte: Adaptado de Gomes (2016).....	105
Figura 30 Efeito da razão ar-combustível no desempenho do motor. Fonte: Adaptado de Ulsoy, Peng e Çakmaci (2012).....	108
Figura 31 Eficiência de conversão de um conversor catalítico. Fonte: Adaptado de Ulsoy, Peng e Çakmaci (2012).....	108
Figura 32 (a) Velocidade, (b) consumo e (c) rotações por minuto (RPM) para um veículo equipado com a tecnologia <i>start-stop</i> e (d) velocidade, (e) consumo e (f) RPM para um veículo sem <i>Stop/Start</i> na vizinhança de uma interseção semaforizada.....	113
Figura 33 Veículos utilizados na coleta de dados.....	117
Figura 34 Percorso do ciclo de condução na Av. Linha Verde em Curitiba/PR.....	120



Figura 35 Calibração do modelo (2.3) para velocidades constantes segundo Akcelik (1983) - dados de regime - veículo 2 .....	121
Figura 36 Calibração do modelo (2.3) para velocidades constantes segundo Akcelik (1983) - dados de regime - veículo 3 .....	121
Figura 37 Calibração do modelo (2.3) para velocidades constantes segundo Akcelik (1983) - dados de regime - veículo 4 .....	122
Figura 38 Calibração do modelo (2.9) para velocidades constantes, segundo o manual do simulador AIMSUN TSS (2015) - dados de regime - veículo 2 .....	122
Figura 39 Calibração do modelo (2.9) para velocidades constantes, segundo o manual do simulador AIMSUN TSS (2015) - dados de regime - veículo 3 .....	123
Figura 40 Calibração do modelo (2.9) para velocidades constantes, segundo o manual do simulador AIMSUN TSS (2015) - dados de regime - veículo 4 .....	123
Figura 41 Calibração do modelo de consumo de combustível do AIMSUN para acelerações constantes (2.10) - dados de regime - veículo 2 .....	124
Figura 42 Calibração do modelo de consumo de combustível do AIMSUN para acelerações constantes (2.10) - dados de regime - veículo 3 .....	124
Figura 43 Calibração do modelo de consumo de combustível do AIMSUN para acelerações constantes (2.10) - dados de regime - veículo 4 .....	125
Figura 44 Calibração do modelo (2.9) para velocidades constantes com dados de consumo do próprio ciclo - veículo 2 .....	125
Figura 45 Calibração do modelo (2.9) para velocidades constantes com dados de consumo do próprio ciclo - veículo 3 .....	126
Figura 46 Calibração do modelo (2.9) para velocidades constantes com dados de consumo do próprio ciclo - veículo 4 .....	126
Figura 47 Calibração do modelo (2.10) para acelerações com dados de consumo do próprio ciclo - veículo 2 .....	127
Figura 48 Calibração do modelo (2.10) para acelerações com dados de consumo do próprio ciclo - veículo 3 .....	127
Figura 49 Calibração do modelo (2.10) para acelerações com dados de consumo do próprio ciclo - veículo 4 .....	128
Figura 50 Calibração do modelo baseado em potência (3.6) para velocidades constantes - veículo 2 .....	128

Figura 51 Calibração do modelo baseado em potência (3.6) para velocidades constantes - veículo 3.....	129
Figura 52 Calibração do modelo baseado em potência (3.6) para velocidades constantes - veículo 4.....	129
Figura 53 Perfil de velocidades e consumos de combustível ao longo do ciclo de condução na Av. Linha Verde em Curitiba/PR - veículo 2.....	133
Figura 54 Perfil de velocidades e consumos de combustível ao longo do ciclo de condução na Av. Linha Verde em Curitiba/PR - veículo 3.....	134
Figura 55 Perfil de velocidades e consumos de combustível ao longo do ciclo de condução na Av. Linha Verde em Curitiba/PR - veículo 4.....	135
Figura 56 Parte do perfil temporal dos valores de consumo de combustível medido e estimados - veículo 2.....	136
Figura 57 Parte do perfil temporal dos valores de consumo de combustível medido e estimados - veículo 3.....	136
Figura 58 Parte do perfil temporal dos valores de consumo de combustível medido e estimados - veículo 4.....	137
Figura 59 Ciclo 1 - Perfil de velocidades e consumos de combustível ao longo do ciclo de condução para o caso com pouco tráfego.....	144
Figura 60 Ciclo 2 - Perfil de velocidades e consumos de combustível ao longo do ciclo de condução para o caso com pouco tráfego.....	145
Figura 61 Ciclo 4 - Perfil de velocidades e consumos de combustível ao longo do ciclo de condução para o caso com pouco tráfego.....	146
Figura 62 Ciclo 5 - Perfil de velocidades e consumos de combustível ao longo do ciclo de condução para o caso com pouco tráfego.....	147
Figura 63 Ciclo 6 - Perfil de velocidades e consumos de combustível ao longo do ciclo de condução para o caso com tráfego intenso.....	148
Figura 64 Ciclo 7 - Perfil de velocidades e consumos de combustível ao longo do ciclo de condução para o caso com tráfego intenso.....	149
Figura 65 Ciclo 9 - Perfil de velocidades e consumos de combustível ao longo do ciclo de condução para o caso com tráfego intenso.....	150
Figura 66 Ciclo 10 - Perfil de velocidades e consumos de combustível ao longo do ciclo de condução para o caso com tráfego intenso.....	151
Figura 67 Ciclo 1 - Parte do perfil temporal dos valores de consumo de combustível instantâneo medido e estimados para o caso	

de pouco tráfego .....	152
Figura 68 Ciclo 2 - Parte do perfil temporal dos valores de consumo de combustível instantâneo medido e estimados para o caso de pouco tráfego .....	152
Figura 69 Ciclo 4 - Parte do perfil temporal dos valores de consumo de combustível instantâneo medido e estimados para o caso de pouco tráfego .....	153
Figura 70 Ciclo 5 - Parte do perfil temporal dos valores de consumo de combustível instantâneo medido e estimados para o caso de pouco tráfego .....	153
Figura 71 Ciclo 6 - Parte do perfil temporal dos valores de consumo de combustível instantâneo medido e estimados para o caso de tráfego intenso .....	154
Figura 72 Ciclo 7 - Parte do perfil temporal dos valores de consumo de combustível instantâneo medido e estimados para o caso de tráfego intenso .....	154
Figura 73 Ciclo 9 - Parte do perfil temporal dos valores de consumo de combustível instantâneo medido e estimados para o caso de tráfego intenso .....	155
Figura 74 Ciclo 10 - Parte do perfil temporal dos valores de consumo de combustível instantâneo medido e estimados para o caso de tráfego intenso .....	155
Figura 75 Exemplo de ciclo de condução de longa duração (30 km de extensão) .....	165
Figura 76 Exemplo de ciclo de condução de longa duração (300 km de extensão) .....	167



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Fórmulas para cálculo do consumo de combustível em um passo de simulação de duração $\Delta t$ (s) para cada modo de condução. Fonte: Manual do usuário AIMSUN (TSS, 2015).....	44
Tabela 2	Valores de $a$ e $v$ determinantes dos quatro modos básicos de condução.....	44
Tabela 3	Modos de operação OBD/SAE J1979.....	48
Tabela 4	Parâmetros do modelo de consumo de combustível baseado em potência para um veículo Toyota Corolla <i>Ascent</i> ano 2004. Fonte: Akcelik et al. (2012).....	62
Tabela 5	Coefficientes da calibração dos modelos de consumo de combustível para o veículo Honda Civic 1.8 l.....	79
Tabela 6	Resultados da validação.....	85
Tabela 7	Cenário com pouco tráfego - Consumo de combustível, raiz da média quadrática dos erros e tempo para cada modo de condução.....	88
Tabela 8	Cenário com pouco tráfego - Consumo de combustível, coeficiente de determinação e raiz da média quadrática dos erros para o ciclo completo.....	88
Tabela 9	Cenário com tráfego intenso - Consumo de combustível, raiz da média quadrática dos erros e tempo para cada modo de condução.....	89
Tabela 10	Cenário com tráfego intenso - Consumo de combustível, coeficiente de determinação e raiz da média quadrática dos erros para o ciclo completo.....	89
Tabela 11	Coefficientes da calibração dos modelos de consumo de combustível para o veículo 2 - Ford Fusion 2.4 l.....	130
Tabela 12	Coefficientes da calibração dos modelos de consumo de combustível para o veículo 3 - Ford Fiesta 1.0 l.....	131
Tabela 13	Coefficientes da calibração dos modelos de consumo de combustível para o veículo 4 - VW Saveiro 1.6 l.....	132
Tabela 14	Consumo de combustível, raiz da média quadrática dos erros e tempo para cada modo de condução - veículo 2.....	138
Tabela 15	Consumo de combustível, coeficiente de determinação e raiz da média quadrática dos erros para o ciclo completo - veículo 2.....	138

Tabela 16 Consumo de combustível, raiz da média quadrática dos erros e tempo para cada modo de condução - veículo 3.....	139
Tabela 17 Consumo de combustível, coeficiente de determinação e raiz da média quadrática dos erros para o ciclo completo - veículo 3.....	139
Tabela 18 Consumo de combustível, raiz da média quadrática dos erros e tempo para cada modo de condução - veículo 4.....	140
Tabela 19 Consumo de combustível, coeficiente de determinação e raiz da média quadrática dos erros para o ciclo completo - veículo 4.....	140

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

OBD	Diagnóstico de bordo (do inglês, <i>on board diagnostics</i> )..	28
PEMS	Analisadores de emissões portáteis (do inglês, <i>portable emissions measurements systems</i> ) .....	32
SAE	SAE Internacional .....	47
EECU	Unidade de controle eletrônico do motor (do inglês, <i>engine electronic control unit</i> ) .....	47
USB	<i>Universal serial bus</i> .....	48
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente.....	49
CAN	<i>Controller area network</i> .....	50
IHM	Interface homem máquina.....	50
CNP	Conselho Nacional do Petróleo .....	54
FTP-75	Procedimento federal de testes 75 (do inglês, <i>federal test procedure 75</i> ) .....	55
PBVE	Programa brasileiro de etiquetagem veicular.....	57
LAR	Técnica de regressão linear robusta dos mínimos residuais absolutos (do inglês, <i>least absolute residual</i> ) .....	58
GPS	<i>Global positioning system</i> .....	71
RMSE	Raiz da média quadrática dos erros (do inglês, <i>root mean square error</i> ).....	82
EGR	Recirculação dos gases de escape (do inglês <i>engine gas recirculation</i> ).....	101
ABS	Sistema de frenagem anti bloqueio (do inglês, <i>anti-lock braking system</i> ) .....	101
MAF	Sensor de fluxo de massa de ar (do inglês, <i>mass air flow</i> )	103
MAP	Sensor de pressão absoluta no coletor de admissão (do inglês, <i>manifold absolute pressure</i> ).....	103
PI	Controlador proporcional integral .....	106
BSFC	Consumo específico de frenagem (do inglês, <i>brake specific fuel consumption</i> ) .....	107
HC	Hidrocarbonetos .....	107
CO	Monóxido de carbono .....	107
NO <sub>x</sub>	Óxido de nitrogênio.....	107
RPM	Rotações por minuto.....	111





## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	27
1.1	MOTIVAÇÃO .....	28
<b>1.1.1</b>	<b>Delimitação do estudo</b> .....	30
1.2	OBJETIVOS .....	30
1.3	METODOLOGIA .....	32
1.4	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	34
<b>2</b>	<b>MODELOS DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL</b>	37
2.1	MODELO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL PROPOSTO POR AKCELIK (1983).....	37
2.2	MODELO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL DO SIMULADOR DE TRÁFEGO AIMSUN .....	39
<b>2.2.1</b>	<b>Consumo de combustível em marcha lenta (<i>idle</i>)</b> ..	40
<b>2.2.2</b>	<b>Consumo de combustível em velocidades constantes</b>	41
<b>2.2.3</b>	<b>Consumo de combustível durante a aceleração</b> ....	42
<b>2.2.4</b>	<b>Consumo de combustível durante a desaceleração</b> .	43
2.3	APLICAÇÃO DO MODELO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL DO AIMSUN .....	43
2.4	MODELO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL BASEADO EM POTÊNCIA PROPOSTO POR AKCELIK (2012)	45
<b>3</b>	<b>MÉTODOS DE AQUISIÇÃO DE DADOS E DE CALIBRAÇÃO DOS MODELOS</b> .....	47
3.1	AQUISIÇÃO DE DADOS .....	47
<b>3.1.1</b>	<b>Diagnóstico de bordo (OBD)</b> .....	47
<b>3.1.2</b>	<b>Regulamentação brasileira de normas de consumo de combustível e emissões para veículos leves de passageiros</b> .....	49
3.2	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS .....	50
3.3	VELOCIDADE, ACELERAÇÃO E CONSUMO DE COMBUSTÍVEL .....	53
3.4	COMBUSTÍVEIS E FLUXO DE COMBUSTÍVEL .....	54
3.5	COLETA DE DADOS .....	54
<b>3.5.1</b>	<b>Coleta de dados em regime permanente</b> .....	55
<b>3.5.2</b>	<b>Coleta de dados em ciclos de condução</b> .....	55
3.6	MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO DOS MODELOS DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL .....	58
<b>3.6.1</b>	<b>Calibração em marcha lenta</b> .....	58
<b>3.6.2</b>	<b>Calibração em velocidades constantes</b> .....	59

3.6.3	Calibração em aceleração e desaceleração .....	59
3.6.4	Modelo com representação em potência .....	60
4	<b>RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO .....</b>	<b>63</b>
4.1	RESULTADOS COM DADOS DE REGIME PERMANENTE .....	63
4.1.1	Marcha lenta .....	63
4.1.2	Velocidade constante .....	64
4.1.3	Aceleração .....	69
4.1.4	Desaceleração .....	69
4.2	RESULTADOS COM DADOS DO CICLO DE CONDUÇÃO .....	71
4.3	RESULTADOS DO MODELO BASEADO EM POTÊNCIA .....	77
4.4	RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO .....	78
5	<b>IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM CICLOS DE CONDUÇÃO .....</b>	<b>81</b>
6	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>91</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>93</b>
	APÊNDICE A – Sistemas de controle e sensores automotivos .....	101
	APÊNDICE B – Sistemas <i>Stop/Start</i> .....	111
	APÊNDICE C – Calibração e validação dos modelos de consumo de combustível para outros tipos de veículos .....	117
	APÊNDICE D – Perfis de velocidade e consumo de combustível - Ciclos de condução não apresentados no Capítulo 5 .....	143
	APÊNDICE E – Método de regressão linear robusta ( <i>Least Absolute Residual - LAR</i> ) .....	159
	APÊNDICE F – Aquisição de dados em ciclos de condução de longa duração para calibração dos modelos de consumo de combustível .....	163

# 1 INTRODUÇÃO

Níveis elevados de poluição do ar nas grandes áreas urbanas, como Londres e Los Angeles, na primeira metade do século passado levaram os cientistas atmosféricos a identificar as emissões dos veículos a motor de combustão como um importante contribuinte. Normas de emissões mais rigorosas foram adotadas à medida que a compreensão da ciência da poluição do ar e dos efeitos da poluição sobre o ambiente, melhorou ao longo do tempo (KODJAK, 2015). Com isso, evidenciou-se a necessidade de modelos de emissões e consumo de combustível que reflitam, em micro-escala, as variações de consumo e emissões de um veículo no tráfego urbano. De fato, há uma forte interdependência entre as tecnologias de controle de emissões e da qualidade do combustível utilizado nos veículos.

Modelos de simulação de tráfego representam o comportamento do tráfego para produção de indicadores de desempenho do sistema analisado. Dentre esses indicadores, o consumo de combustível e as correspondentes emissões de gases do efeito estufa têm sido objeto de crescente interesse de pesquisadores e dos gestores de áreas urbanas. Esses indicadores permitem avaliar o resultado de operações de transportes em termos do impacto ambiental, fornecendo elementos novos de avaliação além das medidas de desempenho tradicionais. Em particular, o consumo de combustível afeta diretamente a produção de CO<sub>2</sub> pelo veículo (AN; EARLEY; GREEN-WEISKEL, 2011), principal agente causador do efeito estufa.

A geração de indicadores e a avaliação de sistemas por meio de simulação requer a calibração dos modelos utilizados e a subsequente validação do esforço de calibração como mecanismo para aproximar os resultados obtidos da realidade. No caso dos modelos de tráfego, a calibração é o ajuste dos parâmetros do modelo para melhorar a capacidade de reproduzir o comportamento do tráfego com características do local ou região que se deseja simular. Sem a calibração, o analista de tráfego não tem nenhuma garantia de que o modelo irá prever corretamente o desempenho do tráfego, uma vez que mesmo em modelos detalhados é considerada apenas uma parte de todas as variáveis que afetam as condições de tráfego do mundo real (FHWA, 2004). O processo de calibração e validação do modelo é etapa essencial da modelagem do tráfego.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

A calibração de modelos de simulação para o consumo de combustível de veículos requer dados operacionais tais como a velocidade instantânea, o consumo instantâneo, e o regime de operação (marcha lenta, velocidade constante, aceleração e desaceleração). Obter dados para calibrações é, portanto, uma tarefa potencialmente onerosa em termos de instrumentação exigida e tipos de ensaios a realizar. Entretanto, o avanço tecnológico dos veículos automotores tem facilitado a tarefa de obtenção dos dados, sob o ponto de vista da instrumentação embarcada. Neste sentido, destaca-se a presença, nos veículos fabricados no Brasil desde 2009, de dispositivo denominado OBD (da sigla para o inglês *On Board Diagnostics* (BALTUSIS, 2004), ou diagnóstico de bordo). O OBD consiste, em nível físico, de um conector padrão localizado sob o painel de veículos. No nível lógico, o OBD fornece um protocolo de comunicação padronizado para acesso às variáveis de operação, dentre as quais aquelas associadas ao consumo de combustível.

No âmbito da calibração de modelos de consumo de combustível e emissões, os denominados ciclos de condução (*driving-cycles*) são produzidos por diferentes países e organizações para avaliar o desempenho de veículos durante um ciclo normalizado, em um dinamômetro de chassi (LAI et al., 2013). Porém, este tipo de procedimento não é representativo da real utilização em estrada de veículos, caracterizado por um perfil de velocidade mais dinâmico. A influência do estilo de direção no consumo de combustível e emissões durante a condução em um ciclo real não é negligenciável para a calibração dos modelos (ALESSANDRINI; FILIPPI; ORTENZI, 2004).

O ponto motivador desta dissertação é que existe uma lacuna entre as medições de consumo de combustível e emissões realizadas em campo e em laboratório. Testes realizados em um estudo que comparou as emissões de um veículo em gramas por quilômetro, para dois testes iguais realizados em ambientes diferentes, estabeleceu que as emissões medidas no ciclo certificado em laboratório diferem dramaticamente das emissões reais medidas no tráfego (PELKMANS; DEBAL, 2006).

Entretanto, os trabalhos relacionados calibram o modelo de consumo de combustível a partir de dados de tabelas ou banco de dados dos testes realizados em laboratório (NANDURI, 2013; RAKHA; AHN; MORAN, 2013; AKCELIK et al., 2012). Este trabalho utiliza dados adquiridos em condições reais de tráfego e disponibiliza os perfis de velocidades e consumo de combustível que são utilizados para calibrar os modelos propostos no Capítulo 2.

Outro ponto motivador está relacionado ao fato de que tem-se disponíveis veículos para realização de testes de campo e um sistema de aquisição confiável que coleta dados pertinentes para a calibração de modelos implementados em simuladores de tráfego. Por fim, os dados podem ser analisados estatisticamente para comprovar a funcionalidade dos modelos.

A utilização da variável consumo de combustível como parâmetro de avaliação do sistema simulado pode ser encontrada em estudos de controle de tráfego e otimização, custo operacional e emissões. A seguir são apresentados alguns exemplos de estudos que utilizaram o consumo de combustível como base da análise, seguidos dos correspondentes autores:

- O consumo de combustível é utilizado como base dos estudos de controle de tráfego e otimização em Osorio e Nanduri (2015). O estudo acopla modelos de tráfego e modelos de consumo de combustível a nível microscópico. O modelo de consumo de combustível instantâneo utilizado no estudo foi baseado no modelo proposto por Akcelik (1983) e o simulador de tráfego foi o AIMSUN. No estudo, estratégias de controle semaforico foram desenvolvidas a fim de prover melhoria nas métricas de tráfego, inclusive o consumo de combustível. O estudo implementa uma técnica de otimização computacionalmente eficiente que permite o uso dos modelos de forma acoplada ao simulador. Segundo os autores, o principal desafio encontrado na implementação do trabalho foi usar os modelos mais detalhados, porém ineficientes e, ao mesmo tempo, obter uma metodologia computacional eficiente. Entretanto, o trabalho deles utiliza apenas um tipo de veículo e segue a sugestão de calibração de Akcelik (1983), portanto, não dá ênfase no processo de calibração.
- A informação do custo operacional para avaliar condições de tráfego em interseções semaforizadas é útil nas propostas de operações e planejamento no gerenciamento do tráfego. O consumo de combustível também é a variável principal, utilizada no estudo de custo operacional encontrado em Akcelik e Besley (2003). O estudo utiliza um modelo para estimar o consumo de combustível. O custo operacional do veículo, em US\$/h, é obtido diretamente da estimativa do consumo de combustível e do preço do litro de combustível. Nesse mesmo estudo, os autores propõem uma abordagem para estimativa das emissões, que serão apresentadas por estudos mais recentes no próximo item.

- As Emissões de CO<sub>2</sub> podem ser obtidas a partir de uma relação direta com o consumo de combustível. Akcelik et al. (2012), Akcelik, Smit e Besley (2014), Rakha et al. (2011), Rakha, Ahn e Moran (2013), apresentam estudos de calibração de diferentes modelo de consumo de combustível considerados modernos, com representação em potência, e as consequentes emissões. A calibração do modelo ambiental de emissões é feita através do fator de emissão encontrado para cada veículo, a partir dos dados de consumo de combustível instantâneo. Estes trabalhos mostraram grande preocupação em definir um processo de calibração detalhado, para diversos tipos de veículos. O trabalho de Akcelik *et al.* publicado em 2014 foi uma recalibração de um modelo baseado em potência, com o objetivo de ajustar os parâmetros padrão do simulador utilizado.

### 1.1.1 Delimitação do estudo

Com a evidência de que o consumo de combustível é a base para vários outros estudos, neste trabalho busca-se desenvolver uma metodologia para calibrar e validar a utilização de modelos de consumo de combustível, incluindo o processo de aquisição de dados, calibração e validação. Este estudo não estende-se para a análise de emissões, custo operacional e controle de tráfego, muito embora os resultados obtidos neste estudo possam ser utilizados em outras pesquisas sobre esse tema.

Portanto, pretende-se uma concentração de esforços nas técnicas e processos para a aquisição de dados e a calibração e validação do modelo. Os estudos que motivaram o desenvolvimento desta dissertação abordam o tema para aplicações da variável consumo de combustível, mas nenhum trabalho encontrado propõe novos métodos e técnicas para calibrar os modelos de consumo de combustível com dados de campo. Todos os estudos calibram com dados de ciclos de condução realizados em laboratório ou com dados de entrada obtidos em tabelas.

## 1.2 OBJETIVOS

Face ao que foi exposto na motivação, o objetivo deste trabalho é calibrar e validar modelos de consumo de combustível a partir de medições de campo com diferentes veículos de passeio através de dados obtidos via OBD. O sistema OBD realiza a função de instrumentação

de medição portátil dos parâmetros do veículo, sendo usado para medir o consumo de combustível em quatro tipos de veículos modernos que possuem essa tecnologia, bem como as demais variáveis associadas ao regime de operação ao longo de ciclos de condução em áreas urbanas. O estudo aborda modelos microscópicos, isto é, que modelam individualmente o comportamento de cada veículo. Na construção do trabalho, devem ser levados em consideração aspectos de modelos matemáticos de consumo de combustível, sistemas de aquisição de dados, controle da injeção de combustível, ciclos de condução e aplicações em simulação.

A fim de cumprir o objetivo principal deste trabalho, alguns objetivos específicos são propostos:

1. Revisar os diferentes tipos de modelos de consumo de combustível implementados em simuladores de tráfego e levantar como o simulador de tráfego AIMSUN estima o consumo de combustível numa simulação.
2. Identificar nos modelos propostos as constantes que requerem calibração e as variáveis associadas ao veículo.
3. Selecionar um sistema de aquisição de dados para obter as medições em um veículo e que permita medições em um ambiente real de tráfego. É desejável que o sistema tenha fácil instrumentação no veículo e que seja de barata implementação. O sistema também deve ser capaz de gerar um relatório de dados das informações do veículo, para serem utilizados posteriormente na calibração dos modelos.
4. Projetar e executar os testes de coleta de dados de regime permanente e de ciclos em vias urbanas para calibração e validação dos modelos.
5. Carregar os dados adquiridos em um computador pessoal e organizá-los em planilhas, como forma de preparação para o processo de calibração feito no *Matlab*.
6. Calibrar os modelos propostos no Capítulo 2 utilizando diferentes técnicas, com a finalidade de verificar se as técnicas empregadas são factíveis na estimação do consumo de combustível.
7. Validar a calibração dos modelos estatisticamente, utilizando o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e a raiz média quadrática dos erros (RMSE), com os dados adquiridos nos ciclos de condução.

8. Repetir o processo de calibração e validação dos modelos para mais tipos de veículos, a fim de expandir os valores dos parâmetros dos modelos para diversos tipos de veículos com diferentes motorização e tecnologias automotivas, resultando numa calibração mais representativa dos tipos de veículo que compõem o tráfego.

Com o cumprimento dos objetivos específicos, o objetivo é conhecer a melhor técnica de calibração para o modelo de consumo de combustível implementado no AIMSUN, bem como fornecer os parâmetros obtidos da calibração do modelo para cada veículo, a serem utilizados como entrada no simulador. Também será possível saber se o modelo mais moderno realmente representa melhor o consumo de combustível do que o modelo mais antigo, em aplicações reais de tráfego.

### 1.3 METODOLOGIA

A fim de fornecer as entradas dos modelos de consumo de combustível abordados nesta dissertação, veículos de passeio específicos foram submetidos a medições em campo, nas quais refletem-se as condições de tráfego e de relevo da região estudada.

Os dados coletados via OBD foram armazenados em um dispositivo de aquisição de dados portátil e, posteriormente, foram utilizados na calibração e validação dos modelos de consumo de combustível apresentados no Capítulo 2. O sistema é capaz de acessar todas as informações do veículo disponíveis no OBD e gravar e exportar os dados. Esse dispositivo tem as vantagens de ser compacto, preciso e barato – menos de US\$ 100 para aquisição do aplicativo e do *data logger* (também é necessário um dispositivo *tablet* ou celular com GPS), e não necessita de manutenção, basta manter o aplicativo atualizado. Os analisadores de emissões denominados PEMS (*Portable Emissions Measurements Systems*) também possibilitam medições em campo, mas necessitam de calibração periódica do equipamento.

Por causa do alto custo dos PEMS e por ter a instrumentação dificultada no veículo, os estudos de grande escala se tornam infactíveis. Também deve-se elaborar campanhas para a realização dos testes projetados (coleta de dados) que reflitam as reais condições do tráfego. Como consequência, pouco se sabe sobre o impacto das condições do mundo real sobre as emissões, pois dependem do comportamento do motorista durante o período de condução (THIBAUT et al., 2016). Estudos recentes usando os PEMS destacam de maneira direta o impacto



da tecnologia do veículo em seu real fator de emissão. De fato, veículos mais modernos são mais econômicos pois aumenta-se a eficiência do uso do combustível por meio de estratégias de controle da injeção de combustível, implementadas na unidade de controle do motor.

Para estimar o consumo de combustível instantâneo a partir de dados coletados via OBD, deseja-se obter dois tipos de dados: o valor instantâneo de lambda comandado pela unidade de controle e o valor instantâneo de fluxo de massa de ar. Com essas informações é possível obter o fluxo mássico de combustível em g/s e, portanto, o fluxo de combustível em ml/s, dada a densidade do combustível.

O procedimento de calibração foi desenvolvido para dois métodos de aquisição de dados. O primeiro é a aquisição de dados de velocidade e consumo de combustível em regime permanente, em que o veículo é colocado em condições de funcionamento que representem quatro modos de condução: marcha lenta, velocidade constante, aceleração e desaceleração. O segundo tipo de aquisição de dados é feito em áreas urbanas, em que um algoritmo identifica o modo de condução do veículo através da sua velocidade e aceleração, e atribui o valor de consumo de combustível naquele instante de tempo para o modo de condução em questão, assim, o modelo é calibrado com dados de consumo do próprio ciclo.

A metodologia deste trabalho é aplicada a duas redes, na cidade de Florianópolis/SC na Av. Beira-mar Norte, e na cidade de Curitiba/PR na Av. Linha Verde. Nessas redes, o método proposto prevê o consumo de combustível com base nos parâmetros de calibração e da velocidade e aceleração de um veículo de passeio.

Os procedimentos de calibração e validação dos modelos de consumo de combustível, bem como os resultados apresentados no Capítulo 4 são referentes a um veículo Honda Civic motor 1.8 l (veículo 1). Outros três veículos equipados com motores *Flex* foram instrumentados e submetidos aos mesmos procedimentos adotados para o veículo principal, salvo a região estudada para aquisição de dados. Os outros veículos utilizados foram: Ford Fusion motor 2.4 l, Volkswagen Saveiro motor 1.6 l e Ford Fiesta motor 1.0 l. Juntos, os veículos cobrem a maior parte dos tipos de motorização comuns no mercado brasileiro de veículos de passeio.

## 1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este documento está dividido em seis capítulos principais e seis apêndices. Os apêndices são sugeridos como leitura complementar ao texto principal e são referenciados no decorrer dos capítulos. Este primeiro capítulo apresentou a motivação, objetivos e metodologia desta dissertação. Os próximos capítulos e apêndices estão organizados da seguinte forma:

- No **Capítulo 2** apresenta-se os modelos de consumo de combustível utilizados nesta dissertação. O primeiro é o modelo implementado no simulador de tráfego AIMSUN (TSS, 2015). Também apresenta-se as definições dos parâmetros e derivações do modelo de consumo de combustível, resultando em outras formas de modelos para velocidades constantes. O segundo modelo apresentado é um modelo baseado em potência, que através dos parâmetros de calibração e da potência instantânea do veículo é possível estimar o consumo de combustível instantâneo. A aplicação do primeiro modelo no simulador de tráfego AIMSUN é abordada brevemente na Seção 2.3.
- O **Capítulo 3** apresenta uma revisão sobre o *On Board Diagnostics* (OBD), aplicado ao sistema de aquisição de dados utilizado nesta dissertação. Em seguida são apresentadas as variáveis associadas ao consumo de combustível, estimado a partir do método do lambda. Essas variáveis serão coletadas via OBD no veículo em ciclos de condução, ou em testes de regime permanente. Por fim, esse capítulo apresenta os métodos adotados para a calibração dos modelos apresentados no Capítulo 2.
- O **Capítulo 4** mostra os resultados obtidos da calibração dos modelos de consumo de combustível propostos. Os resultados são apresentados por meio de gráficos e tabelas, para as diferentes técnicas de calibração.
- O **Capítulo 5** apresenta os resultados da validação. Para validar a calibração do modelo, utilizou-se o conceito de ciclos de condução em áreas urbanas, que representam condições de tráfego reais de determinada região. Os resultados da calibração aplicados aos modelos de consumo de combustível caracterizam o consumo estimado. Essas estimativas do consumo de combustível são confrontadas com o consumo medido ao longo do ciclo. Nos

Capítulos 4 e 5, os dados da calibração e validação apresentados são para o veículo Honda Civic.

- No **Capítulo 6** apresenta-se as conclusões do trabalho e propõem-se perspectivas para futuras pesquisas.
- Os apêndices fornecem: **A)** Uma breve revisão dos conceitos de sistemas de controle automotivos, com ênfase na estratégia de controle da razão ar/combustível e dos sensores de injeção eletrônica; **B)** A aplicação e benefícios de um sistema de redução de consumo de combustível encontrado em alguns veículos chamado *Stop-Start*; **C)** Os resultados da calibração e validação dos modelos de consumo de combustível para os outros veículos; **D)** Os perfis de velocidade e consumo de combustível dos ciclos de condução utilizados na validação; **E)** Apresentação da técnica de regressão linear robusta para encontrar os coeficientes dos modelos; **F)** Exemplos de aquisição de dados em ciclos de condução de longa duração.



## 2 MODELOS DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

O consumo de combustível de um veículo depende de muitos fatores que podem não ser capturados por um único modelo matemático. Alguns dos fatores incluem o projeto do motor, idade do veículo, o comportamento do condutor, a topografia da estrada, as propriedades do combustível, forças resistivas no veículo, tecnologia de ignição, o atrito no motor, temperatura, grau de umidade e muitos outros fatores (RAKHA et al., 2011).

Os modelos de consumo de combustível e emissões podem ser categorizados como macroscópicos ou microscópicos (NANDURI, 2013). Os modelos macroscópicos estimam o consumo de combustível baseado na velocidade e aceleração médias na via, isto é, de maneira agregada. Modelos microscópicos dependem da velocidade e aceleração instantâneas por exemplo, segundo a segundo, de veículos individuais para estimar o consumo de combustível e são, portanto, considerados mais precisos.

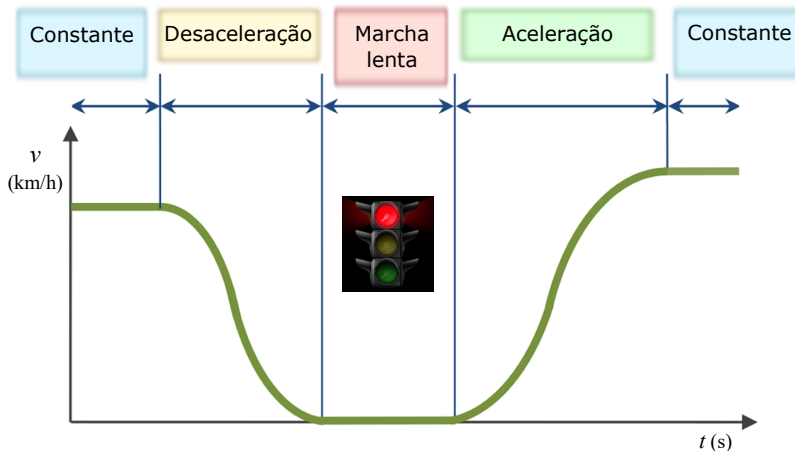
Este capítulo apresenta dois modelos de consumo de combustível microscópicos, um é o modelo implementado no simulador de tráfego AIMSUN (TSS, 2015), o outro é um modelo com representação em termos de potência instantânea, que é implementado no simulador de tráfego SIDRA *Trip* (AKCELIK et al., 2012). Os dois modelos que serão descritos nas seções a seguir foram calibrados com dados de consumo de combustível obtidos via OBD (Capítulo 3) e os resultados são apresentados no Capítulo 4.

### 2.1 MODELO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL PROPOSTO POR AKCELIK (1983)

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 1 ilustra os quatro modos básicos de condução em uma situação típica de movimento veicular em uma via semaforizada. Na figura, o veículo trafega com velocidade constante, desacelera quando recebe a

indicação vermelha no semáforo, permanece parado em marcha lenta durante o tempo de vermelho e, ao receber indicação verde, acelera até atingir nova velocidade constante.

Figura 1: Perfil de velocidade de um veículo na vizinhança de uma interseção semaforizada: os quatro modos de condução. Fonte: Adaptado de Akcelik, Smit e Besley (2014)



A abordagem modal foi proposta inicialmente por Watson (1973) para um modelo de emissão de poluentes. Tal trabalho constatou que as taxas de emissões nos gases de escapamento, bem como as taxas de consumo de combustível, podiam ser representadas com precisão em função da velocidade e aceleração. Assim, subdividiu a condução nos quatro modos e, para cada modo, o modelo previa a emissão de poluentes pela integração de uma função que expressa as emissões em termos de acelerações e velocidades instantâneas. Anos depois, Bulach (1977) obteve o modelo de taxas de consumo e emissões como uma função polinomial da velocidade e aceleração instantâneas obtidas através da derivação do modelo elementar de consumo. A vantagem deste modelo é a sua simplicidade, generalidade e clareza conceitual, bem como a relação direta com técnicas de modelagem de tráfego (AHN, 1998). A abordagem modal é amplamente utilizada para estimar o combustível consumido em simuladores de tráfego, cujo modelo é apresentado por Akcelik (1983), que referencia estudos de consumo de combustível como em Bayley (1980), Gipps e Wilson (1980) e Ferreira (1982).

O modelo de consumo instantâneo de combustível apresentado em Akcelik (1983) que tem a seguinte forma:

$$f = \frac{dF}{dt} = k_1 + k_2v + k_3v^3 + |k_4av + k_5a^2v|_{a>0} \quad (2.1)$$

em que  $f$  (ml/s) é a taxa de consumo de combustível,  $F$  (ml) é o consumo de combustível,  $t$  (s) é o tempo,  $v$  (km/h) é a velocidade instantânea,  $a$  (km/h/s) é a aceleração instantânea,  $k_1$  (ml/s) é a taxa de consumo de combustível em marcha lenta,  $k_2$  (ml·h/km·s) é a taxa de consumo referente à resistência de rolamento e  $k_3$  (ml·h<sup>3</sup>/km<sup>3</sup>·s) é a taxa de consumo referente à resistência do ar. Os coeficientes  $k_4$  (ml·h<sup>2</sup>/km<sup>2</sup>) e  $k_5$  (ml·h<sup>3</sup>·s/km<sup>3</sup>) são constantes relacionadas ao consumo de combustível devido à aceleração positiva. Nos automóveis, a resistência ao rolamento é devida às perdas no par pneu-pista e a resistência aerodinâmica provém de três fontes distintas: resistência de forma (devido à geometria da carroceria), resistência de atrito (perdas por atrito do ar com o veículo) e perdas por correntes de ar (ar que penetra no veículo, para refrigeração do motor e ventilação) (LEAL; ROSA; NICOLAZZI, 2012).

O modelo (2.1) representa por si só os quatro modos de condução, com a variação da velocidade e aceleração. Em Akcelik (1983), esse modelo é apresentado como resultado do progresso em modelagem do consumo de combustível para gerenciamento de tráfego urbano naquela década. Por sua simplicidade e funcionalidade, serviu como base para o modelo de consumo de combustível implementado no simulador AIMSUN para velocidades constantes.

## 2.2 MODELO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL DO SIMULADOR DE TRÁFEGO AIMSUN

O modelo de consumo de combustível do AIMSUN é classificado como um modelo elementar modal microscópico e considera que um veículo opera sempre em um dos quatro modos de condução: marcha lenta, velocidade constante, aceleração ou desaceleração. O modo de condução de cada veículo em dado instante de tempo é identificado a partir dos valores de velocidade e aceleração. Uma vez identificado o modo de condução, aplica-se uma fórmula apropriada para calcular o combustível consumido. A seguir detalha-se como é feito o cálculo de consumo de combustível em cada um dos quatro modos de operação pelo modelo do AIMSUN segundo o manual do simulador (TSS, 2015).

### 2.2.1 Consumo de combustível em marcha lenta (*idle*)

O mais simples modo do modelo de consumo ocorre quando o veículo está operando em marcha lenta (*idle*), isto é, quando o carro está com o motor ligado, mas a velocidade e a aceleração são iguais a zero, isto é,  $a = 0 \text{ m/s}^2$  e  $v = 0 \text{ m/s}$ , respectivamente<sup>1</sup>. No AIMSUN, o consumo de combustível em marcha lenta,  $F_i$  (ml/s), é considerado constante. De fato, de acordo com Ferreira (1982), para veículos em marcha lenta a taxa de consumo de combustível pode ser assumida como constante.

A estimação do consumo de combustível em marcha lenta é um dos parâmetros de simulação mais importantes do modelo. Por isso, é importante que seja estimado de forma cuidadosa pois ele representará o combustível consumido enquanto o veículo estiver parado por um elemento de controle do sistema de tráfego, como por exemplo um semáforo (AKCELIK, 1983) ou um congestionamento.

O combustível consumido enquanto em marcha lenta depende essencialmente da velocidade de rotação do motor, do ponto de ignição, da temperatura do motor e da eficiência da combustão (MARTIN, 1974). Nesse modo, deseja-se que a rotação do motor seja mínima e a mistura/combustível esteja pobre, o que resulta em baixo consumo de combustível (MILHOR, 2002).

A potência necessária para fazer funcionar os acessórios ligados ao sistema elétrico do veículo, como por exemplo, o ar condicionado, os faróis, etc., são alimentados pelo alternador quando o motor está em funcionamento. Como o alternador tira essa energia do motor, quando as cargas estão ligadas a taxa de consumo de combustível aumenta, principalmente em marcha lenta. Foram realizados testes em regime permanente, com o veículo parado e motor ligado, para verificar a influência dos acessórios ligados à rede do veículo no consumo de combustível. Essas medições mostraram que de fato o consumo de combustível é afetado com a utilização desses acessórios. As medições apresentaram um aumento de 30 a 50% no consumo de combustível em marcha lenta quando o ar-condicionado estava ligado, com relação ao consumo quando todos os acessórios estavam desligados. Por isso, considerouse os acessórios desligados durante a realização das medições, salvo os faróis que permaneceram sempre ligados em todos os testes.

---

<sup>1</sup>Atenção para o fato que para os diferentes modos, as unidades adotadas variam. Assim, aceleração e velocidade serão definidas a cada modo com as unidades adequadas.



## 2.2.2 Consumo de combustível em velocidades constantes

O modelo implementado no simulador AIMSUN baseia-se no modelo (2.1) apenas para o caso em que  $a = 0 \text{ m/s}^2$  (o modelo para acelerações é apresentado na Seção 2.2.3). Assim, o modelo para velocidades constantes é dado por:

$$f = \frac{dF}{dt} = k_1 + k_2v + k_3v^3. \quad (2.2)$$

Para um trajeto percorrido a uma determinada velocidade constante  $v_c$  (km/h), a quantidade de combustível consumido por unidade de distância  $f_c$  (ml/km) pode ser obtida a partir de (2.2) fazendo-se  $f/v$  com  $v = v_c$ . Assim:

$$f_c = b_1 + \frac{b_2}{v_c} + b_3v_c^2 \quad (2.3)$$

em que os coeficientes  $b_1$  (ml/km),  $b_2$  (ml/h) e  $b_3$  (ml·h<sup>2</sup>/km<sup>3</sup>) são relacionados aos três coeficientes de (2.3) por:

$$b_1 = 3600k_2, \quad (2.4)$$

$$b_2 = 3600k_1 \quad (2.5)$$

e

$$b_3 = 3600k_3. \quad (2.6)$$

O coeficiente  $b_3$  também pode ser calculado em função da velocidade mínima de consumo por unidade de distância,  $v_m$  (km/h) e  $b_2$ , como segue:

$$b_3 = \frac{b_2}{2v_m^3}. \quad (2.7)$$

Substituindo  $b_2$  e  $b_3$  de (2.7), pelas igualdades de (2.5) e (2.6) e depois simplificando, obtém-se:

$$k_3 = \frac{k_1}{2v_m^3}. \quad (2.8)$$

Assim, substituindo a nova representação de  $k_3$  (agora em termos de  $k_1$ ) e aplicando em (2.2), obtém-se a função para estimar o consumo instantâneo de combustível no simulador AIMSUN para velocidades constantes, em função de  $v_m$  (TSS, 2015):

$$f = \frac{dF}{dt} = k_1 \left( 1 + \frac{v^3}{2v_m^3} \right) + k_2 v. \quad (2.9)$$

O modelo (2.9) é adotado pelo simulador AIMSUN para velocidades constantes. Notar porém, que ao contrário de Akcelik (1983) que define  $k_1$  em (2.1) e (2.2) como a taxa de consumo de combustível em marcha lenta,  $k_1$  é um parâmetro livre a ser calibrado no AIMSUN (ver Seção 3.6.2). No AIMSUN, a taxa de consumo em marcha lenta é definida separadamente como descrito na Seção 2.2.1.

Por fim, quando o veículo está em modo de condução de velocidade constante, pequenas variações de velocidade podem ser toleradas com base em uma aceleração de tolerância<sup>2</sup>,  $a_t$  (m/s<sup>2</sup>). Mais especificamente, uma vez no modo de condução de velocidade constante, o veículo se mantém nesse modo enquanto sua aceleração ou desaceleração não excederem uma aceleração de tolerância  $a_t > 0$  m/s<sup>2</sup>, isto é, enquanto  $-a_t \leq a \leq a_t$  e  $v > 0$  km/h.

### 2.2.3 Consumo de combustível durante a aceleração

No AIMSUN, o combustível consumido durante a aceleração,  $F_a$  (ml/s), é determinado por:

$$F_a = c_1 + c_2 av \quad (2.10)$$

em que  $c_1$  (ml/s) e  $c_2$  (ml·s<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>) são constantes e  $a$  (m/s<sup>2</sup>) e  $v$  (m/s) são a aceleração e a velocidade instantâneas do veículo, respectivamente. Em (2.10), o produto  $c_2 av$  define a inércia do veículo (massa em translação e rotativa). O produto da velocidade e aceleração representa uma indicação da demanda de potência requerida pelo motor (HICKMAN, 1988). Para ser considerado no modo de aceleração, o veículo deve ter  $a > a_t$  e  $v > 0$  m/s.

Considerando (2.1) para acelerações positivas, deve ser notado que o termo  $a^2 v$  não aparece no modelo de consumo de combustível implementado no AIMSUN, que considera apenas o produto  $av$  como variável. Em Akcelik (1983), discute-se a utilização desse termo com base em outros estudos de consumo de combustível daquela década, que apontam o termo  $a^2 v$  de (2.1) como uma melhoria geral na capacidade de predição para o consumo de combustível em altas acelerações.

---

<sup>2</sup>A unidade da taxa de aceleração de tolerância também pode ser utilizada em km/h/s, embora o AIMSUN utilize a unidade m/s<sup>2</sup>.

## 2.2.4 Consumo de combustível durante a desaceleração

A taxa de consumo de combustível durante a desaceleração,  $F_d$  (ml/s), é considerada constante no AIMSUN. O veículo deve ter  $a < -a_t$  e  $v > 0$  m/s para estar nesse modo. Mais detalhes a respeito do modo de condução desaceleração serão discutidos na Seção 4.1.4 e no Apêndice A.

## 2.3 APLICAÇÃO DO MODELO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL DO AIMSUN

O AIMSUN é um simulador de tráfego microscópico, ou seja, que modela o comportamento individual de cada veículo da malha simulada. O AIMSUN também admite resoluções temporais e espaciais muito menores do que em um simulador macroscópico, podendo revelar aspectos de engenharia que não se manifestam no ambiente macroscópico (MÜLLER, 2013). Os simuladores microscópicos representam os veículos individualmente e podem, portanto, levar em consideração as tecnologias específicas do veículo (OSORIO; NANDURI, 2015). Do ponto de vista do consumo de combustível, o AIMSUN implementa um modelo modal (Seção 2.2), que calcula o combustível consumido ao longo do percurso simulado através das fórmulas da Tabela 1. A cada passo de simulação verifica-se a aceleração e a velocidade instantâneas de cada veículo para que o modo de condução seja determinado. Uma vez determinado o modo de condução, o combustível consumido durante o passo de simulação é calculado pelo produto da fórmula ou constante correspondente ao modo de operação pela duração do passo de simulação  $\Delta t$  (s).

No AIMSUN, a tolerância de aceleração para velocidades de cruzeiro é um parâmetro de entrada da simulação que define os modos de condução do veículo. A Tabela 2 apresenta a definição dos modos de condução com base na aceleração de tolerância (TSS, 2015).

Neste trabalho, a aceleração de tolerância utilizada foi de  $0,278 \text{ m/s}^2$  (ou  $1 \text{ km/h/s}$ ) e o valor de  $\Delta t$  foi de  $1 \text{ s}$ .

Tabela 1: Fórmulas para cálculo do consumo de combustível em um passo de simulação de duração  $\Delta t$  (s) para cada modo de condução. Fonte: Manual do usuário AIMSUN (TSS, 2015)

Modo de condução	Combustível consumido (ml) durante $\Delta t$ (s)
Marcha lenta	$F_i \cdot \Delta t$
Constante	$\left[ k_1 \left( 1 + \frac{v^3}{2v_m^3} \right) + k_2 v \right] \cdot \Delta t$
Aceleração	$(c_1 + c_2 a v) \cdot \Delta t$
Desaceleração	$F_d \cdot \Delta t$

Tabela 2: Valores de  $a$  e  $v$  determinantes dos quatro modos básicos 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 $v > 0 \text{ km/h}$
Desaceleração	$a < -a_t \text{ m/s}^2$ e $v > 0 \text{ km/h}$

## 2.4 MODELO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL BASEADO EM POTÊNCIA PROPOSTO POR AKCELİK (2012)

Mais recentemente, o desenvolvimento de modelos de combustível passaram a seguir uma nova abordagem, baseada em potência (RAKHA et al., 2011; RAKHA; AHN; MORAN, 2013; AKCELİK et al., 2012; AKCELİK; SMIT; BESLEY, 2014). Esses modelos fornecem estimativas de consumo de combustível com confiança e de compreensível calibração, sendo implementados em sistemas que requerem o uso do modelo de consumo de combustível no nível microscópico, isto é, os dados que compõem o perfil do fluxo de combustível de um veículo ao longo da simulação é abordada em alta resolução (por exemplo, segundo a segunda). Por isso, os modelos de consumo baseados em potência também são referenciados na literatura como modelos de alta resolução (SMIT; MCBROOM, 2009). Assim como o modelo implementado no simulador AIMSUN, o modelo baseado em potência também é considerado um modelo modal. De fato, os modelos de consumo de combustível microscópicos podem ser utilizados para prever o consumo de combustível a intervalos regulares, em que os resultados são acumulados para prever o total de combustível consumido, durante o tempo de simulação (RAKHA; AHN; MORAN, 2013).

O modelo de consumo de combustível baseado em potência proposto por Akcelik et al. (2012) estima a taxa de consumo de combustível a intervalos de, tipicamente, um segundo. O modelo é calibrado a partir de dados do perfil de consumo de combustível, velocidades e acelerações de um ciclo de condução real, que considera vias residenciais, arteriais, rodovias e condições de direção congestionadas. Nesse modelo, a taxa de consumo de combustível,  $f_t$  (ml/s), é função da potência total de tração  $P_T$  (kW) e é dada por:

$$f_t = \begin{cases} \alpha + \beta P_T, & \text{para } P_T > 0, \\ \alpha, & \text{para } P_T \leq 0, \end{cases} \quad (2.11)$$

em que  $\alpha$  (ml/s) é a taxa de consumo de combustível constante em marcha lenta e  $\beta$  (ml/kJ) é o parâmetro que expressa a eficiência de combustível consumido em relação à potência total fornecida pelo motor.

A potência total de tração  $P_T$  pode ser decomposta nas subpotências denominadas de cruzeiro ( $P_C$ ), inercial ( $P_I$ ) e gravitacional ( $P_G$ ), isto é,

$$P_T = P_C + P_I + P_G. \quad (2.12)$$

Isso propicia uma representação instantânea detalhada dos fatores que influenciam no consumo de combustível.

A componente de cruzeiro da potência total,  $P_C$  (kW), é dada por:

$$P_C = b_1 v + b_2 v^3 \quad (2.13)$$

em que  $v$  (m/s) é a velocidade instantânea,  $b_1$  (kN) é o parâmetro do veículo relacionado principalmente à resistência ao rolamento e  $b_2$  (kN/(m/s)<sup>2</sup>) é o parâmetro do veículo relacionado principalmente à aerodinâmica.

A componente inercial,  $P_I$  (kW), é dada por:

$$P_I = \frac{M_v a v}{1000} \quad (2.14)$$

em que  $M_v$  (kg) é a massa do veículo, incluindo ocupantes e qualquer outra carga e  $a$  (m/s<sup>2</sup>) é a taxa de aceleração, positiva para acelerações e negativa para desacelerações.

A componente gravitacional da potência total,  $P_G$  (kW), que incorpora a influência da inclinação da via no consumo de combustível, é dada por:

$$P_G = \frac{9,81 M_v (G/100) v}{1000} \quad (2.15)$$

em que  $G$  (%) é o grau de inclinação da via.

### 3 MÉTODOS DE AQUISIÇÃO DE DADOS E DE CALIBRAÇÃO DOS MODELOS

Neste capítulo descreve-se o método adotado para a aquisição de dados a partir do canal de diagnóstico de bordo (OBD) e os métodos empregados para calibração e validação dos modelos com os dados adquiridos.

#### 3.1 AQUISIÇÃO DE DADOS

Depreende-se da apresentação dos modelos (Capítulo 2), que três dados são necessários para o processo de calibração: a velocidade e a aceleração, que são variáveis do modelo e são também necessárias para determinar o modo de condução do veículo, e o consumo de combustível. A seguir, após a descrição do OBD, apresenta-se como esse dispositivo pode ser usado para obter os dados necessários para calibração.

##### 3.1.1 Diagnóstico de bordo (OBD)

Entre as décadas de 1970 e 1980, os fabricantes de automóveis passaram a utilizar meios eletrônicos para controlar as funções do motor e diagnosticar possíveis problemas. Em função disso, em 1988 a Sociedade de Engenheiros Automotivos (hoje *SAE international*) definiu um conector padrão e um conjunto de sinais de teste de diagnóstico que compõem o *On-Board Diagnostics* (OBD) ou Diagnóstico de Bordo (BALTUSIS, 2004). Os padrões do OBD especificam o tipo de conector e sua pinagem, o protocolo de sinais e o formato da mensagem, além de fornecer uma lista dos parâmetros disponíveis para monitorar os dados do motor, chassi, carroceria e acessórios dos automóveis.

O padrão J1979 (SAE, 2002) define um método para requisitar vários dados de diagnóstico e uma lista de parâmetros padrão que podem estar disponíveis na unidade de controle (EECU, do inglês *engine electronic control unit*). Existem dez modos de operação descritos no padrão SAE J1979, e são apresentados na Tabela 3. O prefixo *0x* indica uma raiz hexadecimal. O modo utilizado neste trabalho é o *0x01*, que mostra as informações atuais do veículo.

Tabela 3: Modos de operação OBD/SAE J1979.

Modo	Descrição
0x01	Mostra os dados atuais
0x02	Mostra dados congelados
0x03	Mostra os códigos de falha armazenados
0x04	Limpa os códigos de falha e valores armazenados
0x05	Resultado de testes, monitoramento do sensor de oxigênio
0x06	Resultado de testes, outros componentes do sistema
0x07	Mostra códigos de diagnóstico de falha pendentes
0x08	Operação de controle do sistema de diagnóstico de bordo
0x09	Solicita informações do veículo
0x0A	Códigos de diagnóstico de falhas permanentes

O OBD oferece uma valiosa fonte de dados para solucionar problemas do veículo e permite obter dados da EECU, bem como dados de diversos sensores do veículo: fluxo de massa de ar, pressão absoluta na admissão, posição do acelerador, temperatura do líquido de arrefecimento, temperatura do ar de admissão, temperatura do catalisador, carga do motor, velocidade instantânea do veículo, tensão do sensor lambda, entre outros. Dispositivos coletores de dados, chamados de *data loggers* podem ser conectados ao OBD e acessar os dados do veículo em tempo real por meio de uma conexão USB (*Universal Serial Bus*) ou sem fio (*Bluetooth* ou *Wi-Fi*) com um dispositivo de processamento (computador, *tablet*, etc).

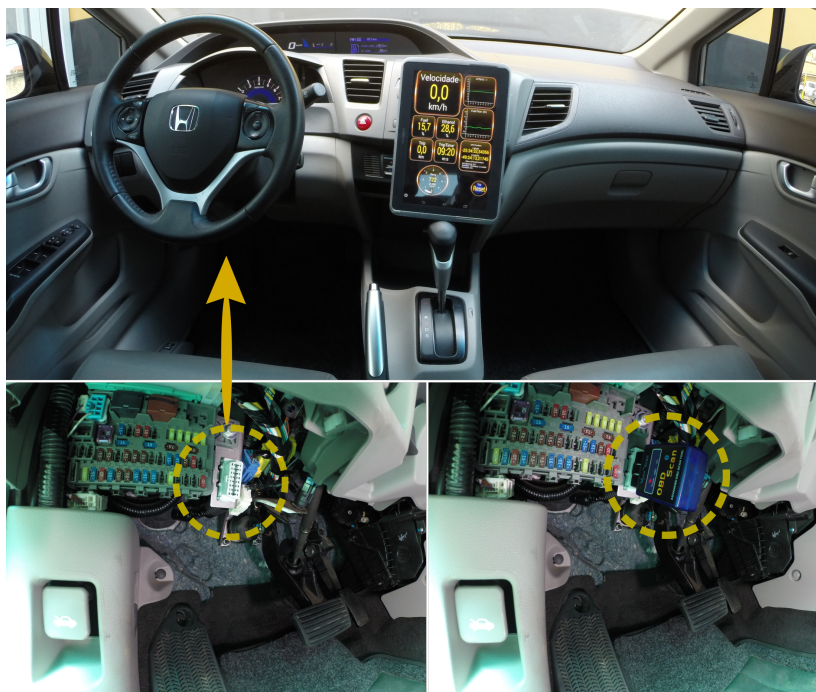
As informações disponíveis no OBD, nos diferentes tipos de veículos, depende do número de sensores instalados na sua configuração original, bem como o fluxo de informações que trafegam no barramento CAN do veículo. As tecnologias mais modernas de injeção eletrônica de combustível utilizam maior número de informações provenientes dos sensores, para controlar a injeção do combustível com maior eficiência.

No Brasil, o sistema OBD-BR1 tornou-se obrigatório a partir de janeiro de 2009 a todos os veículos novos comercializados no Brasil. Logo em seguida, a partir de janeiro de 2010 o OBD-BR2 foi implementado e já em janeiro de 2011 atingiu 100% da frota de carros novos (CONAMA, 2004). Neste trabalho, o uso da sigla OBD refere-se ao padrão OBD-BR2.



A Figura 2 mostra a localização do conector OBD em um veículo Honda Civic ano 2013. Na maioria dos veículos, o conector normalmente fica posicionado próximo à central de fusíveis embaixo do painel de instrumentos. A figura abaixo à esquerda mostra o conector OBD (branco), à direita o dispositivo de leitura e transmissão de dados conectado ao OBD.

Figura 2: Localização do conector OBD no painel de um veículo Honda Civic ano 2013



### 3.1.2 Regulamentação brasileira de normas de consumo de combustível e emissões para veículos leves de passageiros

O Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) foi criado pelo Conselho Nacional do Meio

Ambiente (CONAMA) por meio de resoluções que estabelecem diretrizes, prazos e padrões legais de emissão admissíveis para as categorias de veículos existentes. O PROCONVE foi criado com o objetivo de viabilizar um programa de controle de emissões que fosse tecnicamente factível e economicamente viável (MILHOR, 2002). A expectativa é que isso force o desenvolvimento tecnológico dos fabricantes pelo estabelecimento de exigências tecnológicas para veículos, cuja comprovação é feita a partir de ensaios padronizados, e leve à redução das emissões. A certificação de protótipo/projeto e o acompanhamento estatístico em veículos de produção também fazem parte da estratégia de controle do PROCONVE (PROCONVE, 2011). Aproximadamente 0,3% de todos os veículos produzidos no Brasil devem passar por teste de emissões (GOMES, 2016).

### 3.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

A arquitetura do sistema é apresentada na Figura 3. O sistema de aquisição utiliza dois sensores para estimar o consumo de combustível de um veículo: um sensor de oxigênio e um sensor de fluxo de massa de ar (ver também Apêndice A.2). Os sensores convertem o valor das grandezas medidas, tensão do sensor lambda e gramas por segundo, respectivamente, em sinais elétricos. A unidade de controle os interpreta e disponibiliza na rede de comunicação do veículo. Os dados que trafegam no barramento CAN do veículo, podem ser obtidos a partir da interface OBD. Para isso, neste trabalho, optou-se pela utilização de um dispositivo de aquisição de dados chamado *datalogger Vgate Scan ELM 327* (ELM, 2010), com capacidade de comunicação *bluetooth*.

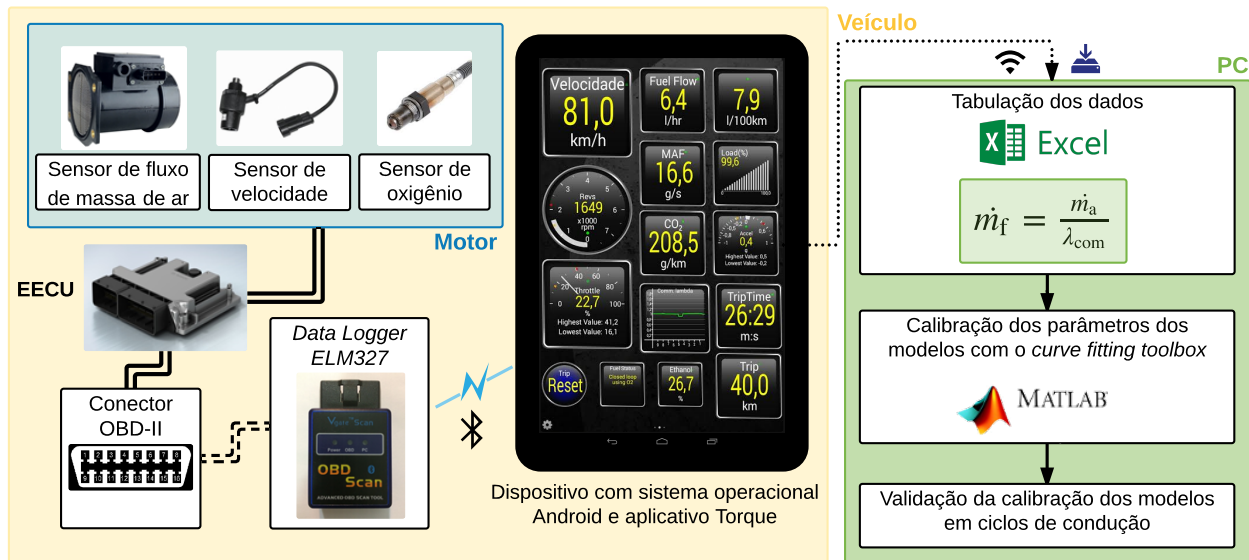
Um aplicativo chamado *Torque Pro*, desenvolvido para decodificar as mensagens transmitidas pelo barramento CAN é executado em um tablet que, quando pareado ao *datalogger*, funciona como uma Interface Homem Máquina (IHM) do sistema, gravando e apresentando as informações solicitadas em forma de um *log* de dados<sup>1</sup>. Na Figura 2 em que aparece o painel do veículo e a posição do OBD no veículo, está visível o aplicativo *Torque Pro* sendo executado no dispositivo *tablet*. A seguir, os dados foram transmitidos para um computador pessoal via rede Wi-Fi. O formato de gravação dos dados é *.csv* (*comma separated value*), compatível com diversos programas para edição de planilha eletrônica. Os dados são tratados de acordo com o formato desejado,

---

<sup>1</sup> *Log* de dados é uma expressão utilizada para descrever o processo de registro de eventos relevantes num sistema (Wikipedia, 2016).

mantendo apenas as informações relevantes para a calibração do modelo. O arquivo é importado no programa *Matlab*, em que a função de calibração é utilizada para obter os parâmetros do modelo, via métodos específicos (ver Capítulo 4). Com os parâmetros obtidos da calibração, é possível comparar a saída do modelo com valores reais obtidos em um teste de campo (ver Capítulo 5).

Figura 3: Arquitetura do sistema de aquisição de dados



### 3.3 VELOCIDADE, ACELERAÇÃO E CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

A velocidade instantânea do veículo é obtida diretamente pelo OBD. A aceleração não é fornecida pelo OBD, mas pode ser estimada conhecendo-se a frequência de aquisição de dados e dois valores sucessivos de velocidade. O consumo de combustível também não é fornecido diretamente pelo OBD e precisa ser estimado a partir de outros dados. Para isso é necessário entender o controle da razão ar/combustível que entra no motor como descrito a seguir.

O funcionamento de um motor a combustão depende da mistura de ar e combustível, cuja razão é controlada pela injeção de combustível no motor (ver também Seção A.4). Quando o motorista aciona o pedal do acelerador, o que ele faz é regular a quantidade de ar que entra no motor. A partir da medida da massa de ar obtida de um sensor de fluxo de massa de ar, o sistema de controle determina a quantidade de combustível correta a ser injetada para que a razão ar/combustível seja estequiométrica (razão Ar/Gasolina:  $\lambda_{\text{esteq}} = 14,7$ ; Ar/Etanol:  $\lambda_{\text{esteq}} = 9,1$ ).

O controle da razão ar/combustível é também chamado de controle *lambda*, pois é realizado em função da razão ar/combustível normalizada dada por (ULSOY; PENG; ÇAKMACI, 2012):

$$\lambda = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} \cdot \frac{1}{\lambda_{\text{esteq}}} \quad (3.1)$$

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 de massa do combustível. Como o OBD fornece os valores de fluxo de massa de ar ( $\dot{m}_a$ ) e o valor de razão ar/combustível comandado ( $\lambda_{\text{com}}$ ), é possível estimar o fluxo de combustível instantâneo injetado no motor a partir de (3.1) como (FONSECA; FERREIRA; FERNANDES, 2012):

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{m}_a}{\lambda_{\text{com}} \lambda_{\text{esteq}}}. \quad (3.2)$$

Experimentos realizados por Fonseca, Ferreira e Fernandes (2012) mostraram um erro de apenas 3% com uso dessa técnica em relação a medidas de referência da massa de combustível no tanque do automóvel.

### 3.4 COMBUSTÍVEIS E FLUXO DE COMBUSTÍVEL

A gasolina comercializada no Brasil é uma mistura de gasolina e álcool e, segundo o CNP (Conselho Nacional do Petróleo), a concentração de álcool deve estar entre 18% e 27,5%. A densidade dessa gasolina (E27) está entre os valores 0,73 a 0,77 g/cm<sup>3</sup> (FISPQ, 2014). Para estimar o fluxo de combustível neste trabalho usou-se a densidade igual a 0,75 g/cm<sup>3</sup>. Nesse caso, a fórmula para obtenção do fluxo de combustível a partir do fluxo de massa de combustível é definida como:

$$\dot{f}_f = \frac{\dot{m}_f}{0,75}. \quad (3.3)$$

A porcentagem de etanol adicionado à gasolina pode variar para cada abastecimento. Experimentos realizados mostraram uma variação desse percentual nos diversos abastecimentos feitos em postos de combustível em Florianópolis/SC. Os valores observados estão entre 18 e 30% de etanol na gasolina. Os experimentos foram feitos observando os valores calculados pela EECU, a partir da medição da quantidade de oxigênio lido pelo sensor lambda, e obtido via OBD. O Etanol tem oxigênio na sua composição, portanto, só haverá oxigênio na medição feita pelo sensor (depois da combustão) se houver etanol na mistura do combustível. Uma forma de confirmar o funcionamento desse método de medição é abastecer o veículo apenas com etanol, quando o valor observado deve ser de 100 %.

### 3.5 COLETA DE DADOS

A coleta de dados foi feita de duas maneiras. A primeira é considerado o consumo de combustível em testes de regime permanente, ou seja, o veículo é submetido a condições específicas de operação que representem os quatro modos de condução. A segunda é a coleta de dados em ciclos de condução, em que os dados de consumo são atribuídos ao banco de dados referente a cada modo de condução, a partir da velocidade e aceleração.

Todos os dados foram coletados com uma frequência de 1 Hz (1 amostra por segundo). Observou-se que essa é uma boa frequência para processar os dados adquiridos do OBD. Frequências de aquisição de dados menores (2, 3 ou 4 amostras por segundo) podem ser configuradas diretamente no aplicativo *Torque Pro*.

### 3.5.1 Coleta de dados em regime permanente

A coleta de dados em regime permanente é feita colocando-se para operar o veículo em cada um dos modos de operações em condições estacionárias. Nos modos de marcha lenta e velocidade constante, os dados são coletados com o veículo em velocidade constante por um certo período com o motor quente. No modo de aceleração, o veículo move-se do repouso até uma velocidade final desejada com aceleração constante para vários valores de velocidade final e vários valores de aceleração. De maneira análoga, para o modo de desaceleração faz-se o inverso com velocidade inicial diferente de zero até atingir o repouso. Em todos os casos o experimento é feito com o motor quente, estágio em que o motor opera em condições de mistura estequiométrica e de enriquecimento (AN et al., 1997). Para todos os modos de condução, os dados de consumo de combustível foram obtidos para uma via considerada plana.

### 3.5.2 Coleta de dados em ciclos de condução

Ciclo de condução (*driving cycle*) 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 (LAI et al., 2013). 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 inclinação da via. Em 2009, o Departamento de Transporte do Reino Unido (DfT) encomendou ao Laboratório de Pesquisa em Transporte (TRL) um relatório com a revisão dos métodos utilizadas no país para estimar as emissões provenientes dos veículos rodoviários. O livro de referência compila em um único documento descrições detalhada de mais de 200 ciclos de condução de diferentes países (BARLOW et al., 2009). Alguns exemplos do perfil de velocidades de ciclos de condução desenvolvidos em países específicos são apresentados nas Figuras 4, 5 e 6.

No Brasil o ciclo de condução adotado para determinação de emissões em veículos leves e comerciais leves, entre as quais o CO<sub>2</sub>, é o ciclo norte-americano conhecido como FTP-75 (*Federal Test Proce-*

Figura 4: FTP-75. Fonte: Barlow (2009)

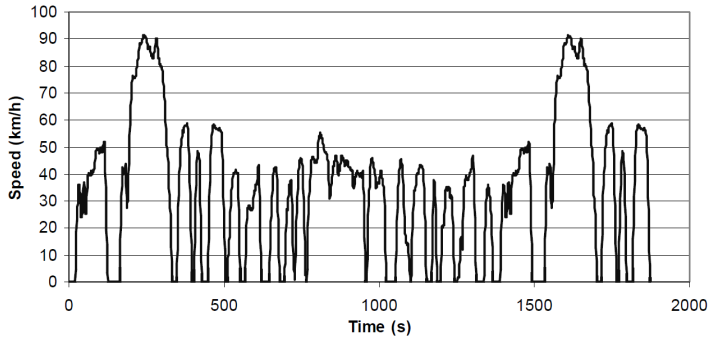


Figura 5: EPA New York City Cycle (NYCC). Fonte: Barlow (2009)

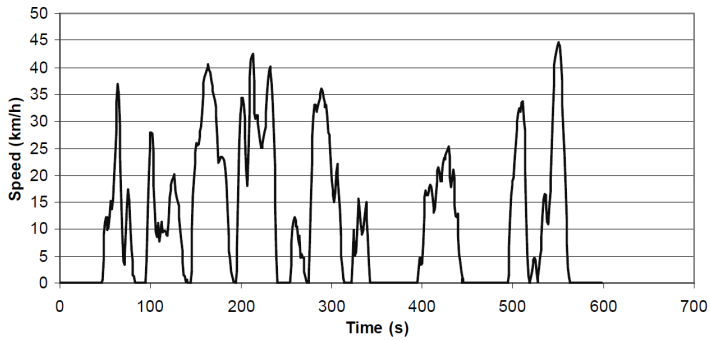
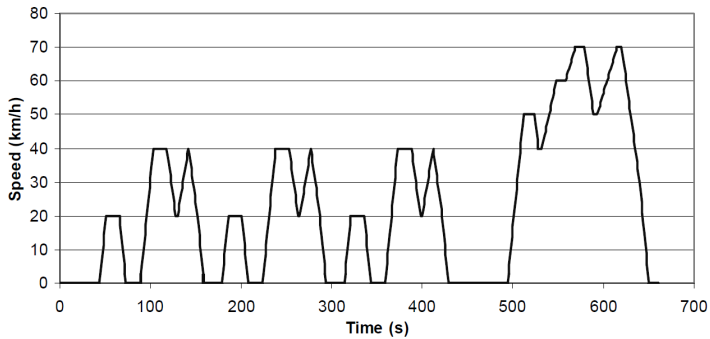


Figura 6: Japan JP 10-15-Mode. Fonte: Barlow (2009)

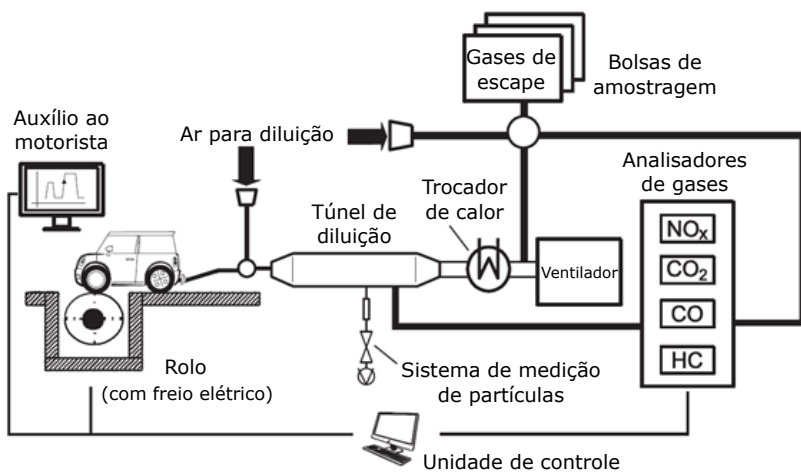




*dure 75*). Os procedimentos deste ensaio são descritos na NBR 6601 (ABNT, 2012) enquanto que a medição do consumo de combustível é normatizada pela NBR 7024 (ABNT, 2010). O Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV), anunciado pelo Governo Federal em 2008, fornece informações ao consumidor sobre o consumo de combustível dos veículos leves comercializados no Brasil. A consulta sobre o consumo dos automóveis está disponível no site do Conpet<sup>2</sup> e pode ser feita por categoria de veículo, marca, modelo ou motor.

Tipicamente os testes em veículos de passeio e comerciais leves são realizados em laboratório com um dinamômetro de chassi. A Figura 7 apresenta uma representação esquemática da utilização de um dinamômetro para testes em laboratório. Em testes realizados com a utilização do dinamômetro, as rodas do veículo são posicionadas e permanecem em contato com rolos. Esses rolos podem ser ajustados para simular a resistência aerodinâmica e as perdas por atrito. A amostragem das emissões dos gases de escape é então realizada conforme o veículo progride o ciclo de condução já pré-definido, que é desenvolvido para representar um tipo particular de operação no mundo real (BARLOW et al., 2009).

Figura 7: Representação esquemática de uma instalação de ensaio de emissões com dinamômetro de chassi em ambiente de laboratório. Fonte: Adaptado de Franco et al. (2013)



<sup>2</sup><http://www.conpet.gov.br/consultacarros>

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. No entanto, os ciclos de condução podem ser muito diferentes de como os veículos são dirigidos de fato, resultando em lacunas entre os níveis de economia de combustível certificados e níveis de economia de combustível reais (LAI et al., 2013). De fato, estudos recentes sugerem que os testes sejam realizados em condições reais de tráfego (ANDRE et al., 2005; LIU; WANG; KHATAK, 2016). Neste trabalho realizamos os testes de aquisição de dados para calibração e validação em condições de tráfego reais.

### 3.6 MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO DOS MODELOS DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

Para velocidades constantes, o modelo foi calibrado de quatro formas. A primeira forma utiliza o modelo proposto por Akcelik (1983), (2.2) e (2.3) e ajusta os dados de consumo por unidade de distância, adquiridos em regime permanente, por meio de um método robusto de regressão chamado *least absolute residual* (LAR) (DIELMAN, 2009), cuja definição é apresentada no Apêndice E. A segunda forma utiliza o modelo do manual AIMSUN, (2.9), com dados de fluxo instantâneo de combustível, também adquiridos em regime permanente e utilizando LAR. A terceira forma também é aplicada ao modelo (2.9), mas utiliza dados específicos ( $F_1$ ,  $F_2$  e  $v_m$ ) e fórmulas fornecidas pelo manual do simulador para calcular  $k_1$  e  $k_2$  (ver Seção 3.6.2). A quarta forma usa dados de consumo que foram armazenados ao longo de um ciclo de condução, quando o veículo se encontrava no modo velocidade constante, também utiliza o modelo do AIMSUN (2.9) para calibração do modelo pelo método LAR. Para acelerações e desacelerações, os modelos utilizados foram os do manual do AIMSUN (TSS, 2015) (Seção 3.6.3). As técnicas de calibração são detalhadas a seguir.

#### 3.6.1 Calibração em marcha lenta

O manual do AIMSUN não dá orientações sobre como obter o consumo em marcha lenta, mas a estimação do parâmetro  $F_i$  (marcha lenta) pode ser obtida por medição direta no veículo tomando-se o valor médio ao longo de um período de coleta de dados em regime (BOWYER; AKCELIK; BIGGS, 1985). Pode ser obtido também por re-

gressão linear tanto dos dados em regime como dos dados do ciclo de condução em conjunto com a calibração para velocidades constantes (ver Seção 3.6.2).

### 3.6.2 Calibração em velocidades constantes

O método para estimar o consumo de combustível em velocidades constantes apresentado no manual do AIMSUN define que é possível determinar os coeficientes  $k_1$  e  $k_2$  de (2.9) por meio de fórmulas específicas definidas por Ferreira (1982):

$$k_1 = \frac{(F_1 - F_2)v_1v_2v_m^3}{180(2v_2v_m^3 - 2v_1v_m^3 + v_2v_1^3 - v_1v_2^3)}, \quad (3.4)$$

$$k_2 = \frac{2F_2v_2v_m^3 - 2F_1v_1v_m^3 + F_2v_2v_1^3 - F_1v_1v_2^3}{360(2v_2v_m^3 - 2v_1v_m^3 + v_2v_1^3 - v_1v_2^3)}. \quad (3.5)$$

Os valores de  $F_1$  e  $F_2$  correspondem aos consumos medidos às velocidades  $v_1 = 90$  km/h e  $v_2 = 120$  km/h, respectivamente, obtidos em regime permanente. O valor de  $v_m$ , que é a velocidade em que ocorre o consumo mínimo por unidade de distância, também pode ser obtido por testes em regime permanente (ponto de mínimo de (2.3)).

Os valores de  $k_1$  e  $k_2$ , bem como o valor de  $v_m$ , podem ser obtidos também por regressão linear. Lembrar que, como discutido na Seção 2.2.1, no modelo originalmente proposto por Akcelik (1983) a constante  $k_1$  corresponde à taxa de consumo em marcha lenta, enquanto no AIMSUN a constante não possui esse significado e  $F_1$  é usado quando em marcha lenta.

### 3.6.3 Calibração em aceleração e desaceleração

Tanto para aceleração como para desaceleração foram utilizados dados em regime e dados do ciclo de condução, já que o manual do AIMSUN não sugere técnica de calibração. Para as acelerações, foi utilizada regressão linear. Para as desacelerações, foi calculado em forma de média simples das amostras de consumo, no período com o veículo desacelerando.

### 3.6.4 Modelo com representação em potência

Pesquisas direcionadas à estimação de consumo de combustível instantâneo apontam que a forma mais utilizada para estimar o consumo de combustível em simuladores de tráfego, é através do modelo microscópico elementar modal (SMIT; MCBROOM, 2009). Contudo, certamente há interesse em desenvolver modelos que acabam tendo uma complexidade maior justamente por que consideram as variações mais expressivas no consumo de combustível e detalhem melhor as trocas de marchas e outros fatores importantes para um modelo bem representativo, do ponto de vista dos estados de operação de um motor.

O modelo de consumo instantâneo de combustível com representação em termos potência estima a taxa de consumo de combustível (ml/s) como sendo um valor medido por unidade de tempo durante toda a trajetória em função da potência requerida pelo veículo.

A descrição do modelo por representação em potência foi apresentada na Seção 2.4. A seguir, são apresentados os passos para calibração desse modelo, conforme proposto por Akcelik et al. (2012) e Akcelik, Smit e Besley (2014).

A partir de (2.11)–(2.15), a taxa de consumo de combustível instantâneo para velocidades de cruzeiro ( $a = 0 \text{ m/s}^2$ ,  $P_1 = 0 \text{ kW}$ ) em uma estrada plana ( $G = 0\%$ ,  $P_G = 0 \text{ kW}$ ) é dado por:

$$f_{ct} = \alpha + c_1 v + c_2 v^3 \quad (3.6)$$

em que

$$c_1 = b_1 \beta \quad (3.7)$$

$$c_2 = b_2 \beta \quad (3.8)$$

e as unidades dos parâmetros são ml/m para  $c_1$  e  $\text{ml}\cdot\text{s}^2/\text{m}^3$  para  $c_2$ . A calibração desse modelo consiste na determinação dos valores de  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $b_1$  e  $b_2$ .

Os parâmetros  $c_1$  e  $c_2$  são determinado via regressão linear e os parâmetros  $b_1$  e  $b_2$  refletem os componentes de resistência associados ao motor, que são obtidos indiretamente por:

$$b_1 = \frac{c_1}{\beta} \quad (3.9)$$

$$b_2 = \frac{c_2}{\beta} \quad (3.10)$$

Primeiramente a taxa de consumo de combustível,  $\alpha$  (ml/s), é determinada por medição do consumo de combustível enquanto em marcha lenta, como descrito na Seção 3.6.1. Em seguida, os parâmetros  $c_1$  e  $c_2$  da parcela constante do consumo de combustível são obtidos via regressão utilizando os dados de consumo de combustível em regime permanente, levando em consideração a definição dos modos de condução da Tabela 2 (considera-se velocidades entre 15 e 120 km/h). A equação em que os dados de consumo em regime permanente serão ajustados à curva é dada por:

$$f_{ct} - \alpha = c_1 v + c_2 v^3 \quad (3.11)$$

Por último, determina-se o valor de  $\beta$  e os parâmetros  $b_1$ ,  $b_2$  e  $\beta$  utilizando os dados de consumo instantâneo de combustível. Para isso, determina-se o componente de cruzeiro do combustível ( $f_{ct}$ ) para cada ponto de dado utilizando (3.11) com os valores dos parâmetros conhecidos ( $\alpha$ ,  $c_1$  e  $c_2$ ). Então, o componente inercial de consumo de combustível é calculado utilizando (2.14) para cada ponto de dado de consumo do ciclo de condução por:

$$f_{it} = f_t - f_{ct} = \beta P_1 \quad (3.12)$$

em que  $f_t$  é o consumo instantâneo de combustível medido via OBD,  $f_{it}$  é o consumo e combustível instantâneo da iteração que será utilizado no ajuste do  $\beta$ , até que o valor convirja. (3.12) é aplicada para os dados coletados em que a potência total instantânea é maior do que zero.

O trabalho desenvolvido por Akcelik et al. (2012) calibra o modelo de consumo de combustível baseado em potência e apresenta alguns resultados que são ilustrados na Tabela 4. É importante o acesso a esses dados disponibilizados pelo autor pois alguns parâmetros da calibração dependem de um determinado valor inicial, como os valores de  $b_1$  e  $b_2$ .

Tabela 4: Parâmetros do modelo de consumo de combustível baseado em potência para um veículo Toyota Corolla *Ascent* ano 2004. Fonte: Akcelik et al. (2012)

Parâmetro	Descrição	Combustível
$\alpha$	Consumo em marcha lenta	0,361 ml/s
$b_1$	$b_1 = c_1/\beta$	0,222 kN
$b_2$	$b_2 = c_2/\beta$	$7,2 \cdot 10^{-4}$ kN/(m/s) <sup>2</sup>
$c_1$	Regressão linear	0,02 ml/m
$c_2$	Regressão linear	$6,5 \cdot 10^{-5}$ ml·s <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
$\beta$	Parâmetro de eficiência	0,09 ml/kJ
$M_v$	Massa do veículo	1.250 kg

## 4 RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO

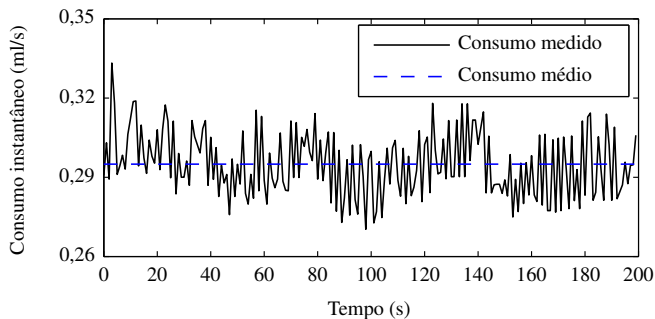
Este capítulo apresenta detalhes da coleta de dados e também os resultados obtidos de calibração e validação dos modelos de consumo de combustível. Um total de quatro veículos de vários pesos e tamanhos de motor foram submetidos a testes específicos que serão explicados neste capítulo. Esses quatro veículos são representativos da atual tecnologia dos motores de combustão interna (com injeção eletrônica de combustível). Os resultados da calibração e validação do modelo para o veículo que mostrou melhor desempenho (veículo 1), marca Honda modelo Civic, são ilustrados através de gráficos neste capítulo e os resultados da calibração e validação para outros tipos de veículos são apresentados no Apêndice C. Nos modelos de consumo para velocidades constantes, foi adotada a técnica de regressão linear robusta LAR (ver Apêndice E).

### 4.1 RESULTADOS COM DADOS DE REGIME PERMANENTE

#### 4.1.1 Marcha lenta

As amostras de consumo instantâneo de combustível medidas via OBD com o veículo parado em regime permanente em um pátio aberto, são apresentadas na Figura 8. As medições foram realizadas durante um período de 200 s (200 amostras). A taxa de consumo em marcha lenta foi estimada por meio de uma média simples das medições e resultou em  $F_i = 0,295$  ml/s.

Figura 8: Consumo de combustível em marcha lenta



Existem alguns sistemas aplicados em automóveis para redução do consumo de combustível como por exemplo, o *Eco-Driving* e o *Start-Stop*. O *Eco-Driving* (SIVAK; SCHOETTLE, 2011) é um sistema utilizado para aumentar a economia de combustível, que se baseia essencialmente no monitoramento e controle de comportamento do condutor. É definido como um processo de tomada de decisão que influencia a economia de combustível e emissões. É fornecida aos motoristas uma série de recomendações para minimizar o consumo de combustível enquanto dirigem, como a troca da marcha para uma marcha maior assim que possível, manter velocidades constantes, antecipar o fluxo de tráfego, acelerar e desacelerar suavemente, manter a boa manutenção do veículo, etc. Diferentes pesquisas *eco-driving* têm trabalhado para produzir melhorias na economia de combustível da ordem de 5 a 15 %.

No contexto de marcha lenta, o sistema *Start-Stop* (OWENS; LAUGHLIN, 2016) desliga o motor durante o período em que o veículo encontra-se parado. O emprego desse sistema pode fornecer economia de combustível de até 6% em uso urbano e até 25% em condições de trânsito congestionado (VALEO, 2016), isto é, sempre que o veículo para o consumo é igual a zero. O Apêndice B traz uma discussão da aplicação do sistema *Start-Stop*.

#### 4.1.2 Velocidade constante

Para a calibração usando dados de regime foram consideradas 30 amostras para cada valor de velocidade, a intervalos de 5 km/h, entre 10 e 120 km/h para a calibração do modelo (2.3) e entre 0 e 120 km/h para a calibração do modelo (2.9).

A Figura 9 apresenta os valores de consumo e os valores dos coeficientes resultantes da regressão linear para o modelo (2.3) proposto por Akcelik (1983). Notar que refere-se aqui ao modelo proposto por Akcelik (que contém o coeficiente  $k_3$ ) e não ao modelo do AIMSUN. O coeficiente de determinação  $R^2 = 0,9968$  sugere que o modelo (2.3) teve um bom ajuste aos dados de consumo de combustível, obtidos via OBD em ml/km. Os coeficientes  $b_1$ ,  $b_2$  e  $b_3$  são utilizados para obter  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  através das relações:  $b_1 = 3600k_2$ ,  $b_2 = 3600k_1$  e  $b_3 = 3600k_3$ . O modelo resultante é identificado por C-Ak (para  $v$  constante). Os dados de consumo de combustível por unidade de distância foram obtidos da grandeza em l/100 km e convertidos para ml/km conforme a fórmula:

$$f_{[\text{ml/km}]} = f_{[\text{l/100km}]} \cdot 10. \quad (4.1)$$



A estimativa do consumo instantâneo de combustível em  $l/100$  km é feita pelo aplicativo *Torque Pro*, que leva em consideração o combustível consumido pelo espaço percorrido, sempre num intervalo de tempo de 1 segundo. Com isso, é possível adquirir instantaneamente dados de consumo de combustível por unidade de distância, que são utilizados para calibrar o modelo representado por C-Ak.

A Figura 10 apresenta os valores de consumo e os valores dos coeficientes resultantes da regressão linear para o modelo apresentado no manual do simulador AIMSUN (2.9). O modelo resultante é identificado por C-CB (para  $v$  constante). Ambos os métodos são calibrados com dados de consumo em regime (ver Seção 2.2.2). O coeficiente de determinação  $R^2 = 0,9995$  sugere que o modelo (2.9) teve um bom ajuste aos dados de consumo de combustível, obtidos via OBD em ml/s.

Observa-se nas Figuras 9 e 10 que mesmo mantendo-se a velocidade constante por um certo período de tempo em uma via plana, o consumo de combustível tem uma dispersão maior dos valores em velocidades superiores a 90 km/h. Isso se dá por conta da influência do ar no consumo do veículo nessas velocidades. O coeficiente responsável por viabilizar o ajuste da taxa de consumo de combustível referente à resistência do ar é  $k_3$  de (2.1), e aparece em função de  $v_m$  em (2.9).

Figura 9: Calibração do modelo de consumo de combustível para velocidades constantes, segundo Akcelik (1983)

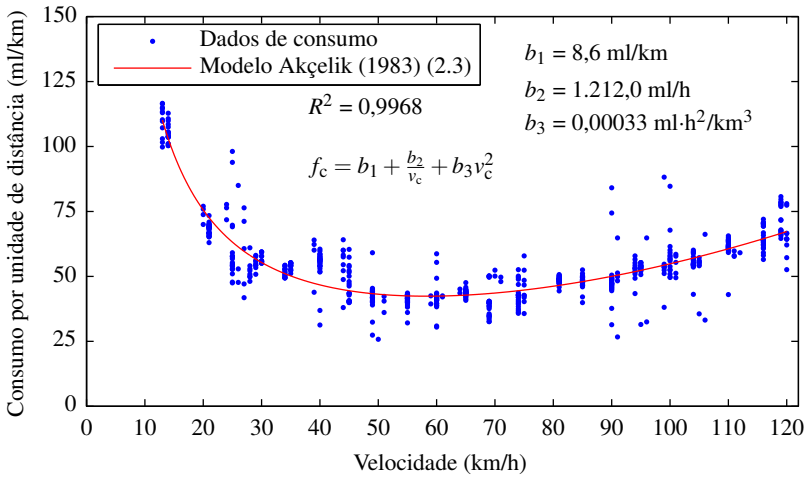
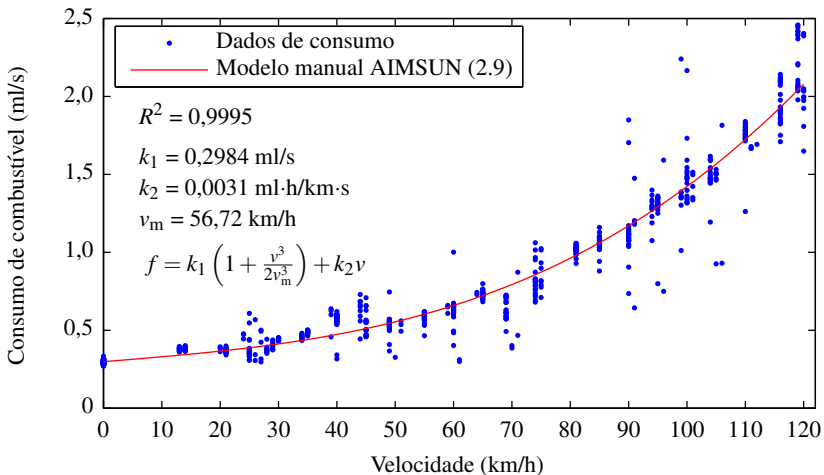


Figura 10: Calibração do modelo de consumo instantâneo de combustível para velocidades constantes, segundo o manual do simulador AIMSUN TSS (2015)



Para o cálculo dos coeficientes do modelo para velocidades constantes utilizando  $k_1$  e  $k_2$  por meio de (3.4) e (3.5), a partir das medições de  $v_m$ ,  $F_1$  e  $F_2$  (ver Seção 3.6.2), o modelo resultante é identificado por C-CC (para  $v$  constante). Os valores dos coeficientes encontrados via regressão linear e cálculo podem ser encontrados no fim deste capítulo, na Tabela 5.

Para validar a calibração do modelo, os valores estimados foram confrontados com os valores medidos por outras 30 amostras de cada velocidade constante, a intervalos de 5 km/h. As Figuras 11, 12 e 13 mostram a validação da calibração do modelo para velocidades constantes com identificações C-Ak, C-CB e C-CC, respectivamente. Qualitativamente, os resultados obtidos pelas três técnicas são muito parecidos, quando comparados os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) da validação para o modo velocidade constante.

Figura 11: Validação do modelo proposto por Akcelik (1983) com coeficientes calibrados

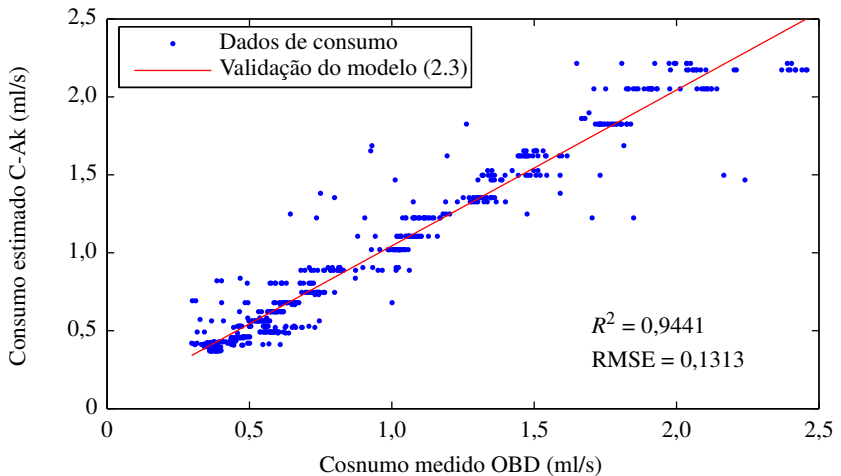


Figura 12: Validação do modelo apresentado no manual do simulador TSS (2015) com coeficientes calibrados

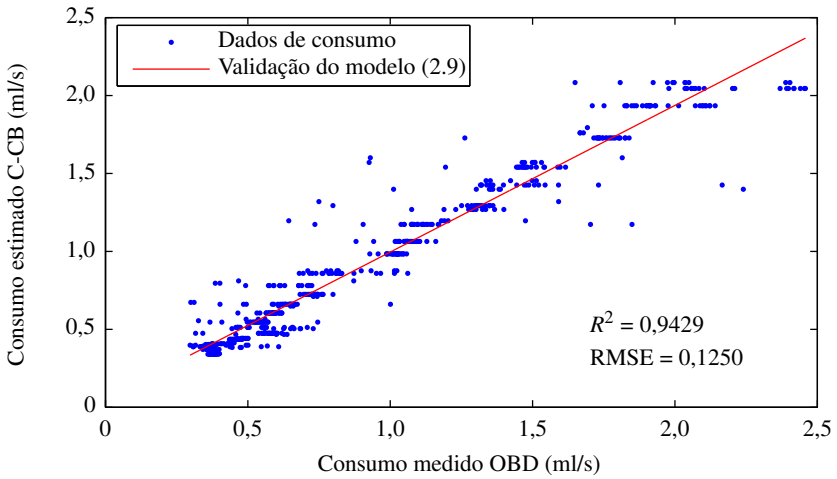
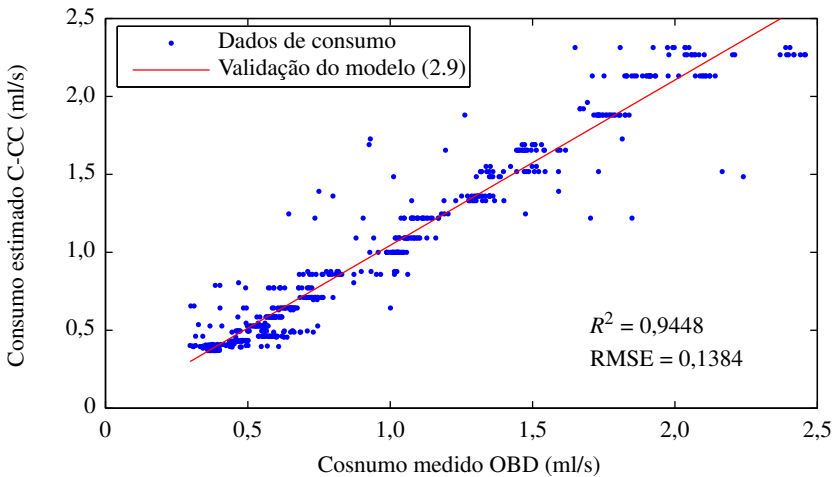


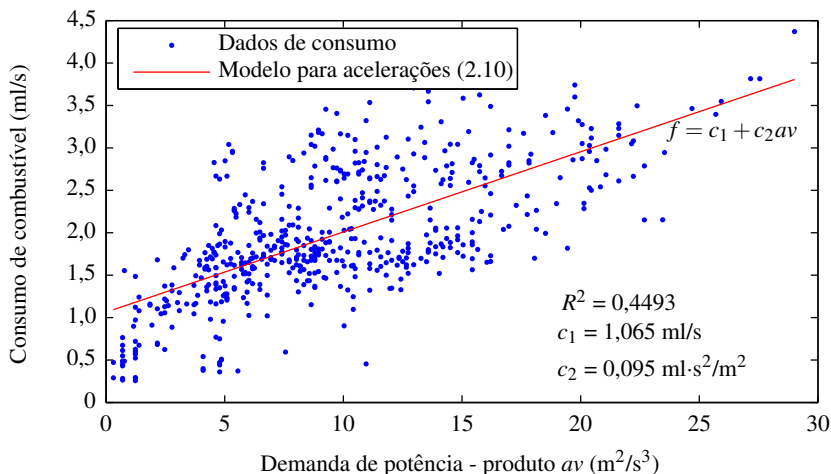
Figura 13: Validação do modelo apresentado no manual do simulador TSS (2015) com coeficientes calculados



### 4.1.3 Aceleração

Para a calibração do modo de aceleração foram usadas acelerações a partir do repouso ( $v = 0$  km/h) até velocidades finais  $v_f = \{25,50,75,100\}$  km/h. Foram feitas quatro coletas para cada velocidade final com diferentes taxas de aceleração. A Figura 14 mostra a calibração do modelo e os valores de  $c_1$  e  $c_2$  ( $R^2 = 0,4493$ ). Qualitativamente, percebe-se grande dispersão dos dados, refletidos no baixo valor de  $R^2$ .

Figura 14: Calibração do modelo de consumo de combustível do AIM-SUN para acelerações constantes

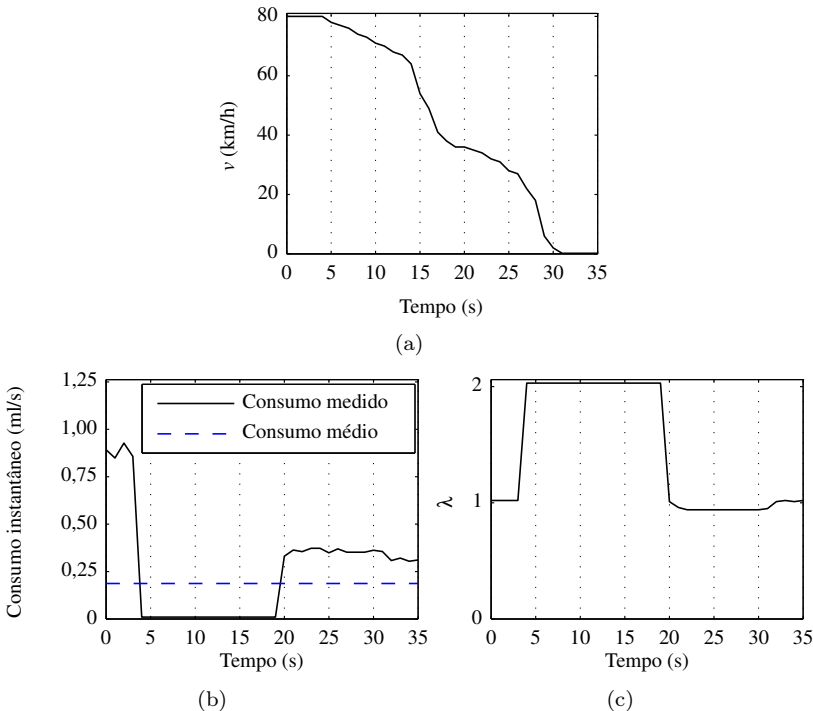


### 4.1.4 Desaceleração

Para a calibração do modo de desaceleração foram usadas desacelerações a partir de velocidades iniciais  $v_i = \{30,50,80\}$  km/h até o repouso ( $v = 0$  km/h), com quatro coletas para cada velocidade com diferentes taxas de desaceleração. Nesse modo, o motorista aciona o pedal do freio do veículo; a unidade de controle do veículo reconhece a desaceleração, comanda um valor de  $\lambda = 2$  e corta a injeção de combustível (*cut-off*). Após o corte, à medida que o veículo aproxima-se de  $v = 0$ , o motor volta a operar em marcha lenta. A Figura 15 mos-

tra esse processo para uma velocidade inicial de 80 km/h. A média dos valores de consumo durante várias situações de desaceleração foi usada para estimar a taxa de consumo de combustível nesse modo, que resultou em  $F_d = 0,185$  ml/s. A taxa de consumo de combustível em desacelerações é menor do que a taxa em marcha lenta ( $F_d < F_i$ ). Isso acontece pois, como apresentado na Figura 15, durante todo o período considerado como desaceleração, o veículo passa por dois estados de consumo de combustível: a desaceleração propriamente dita (*cut-off*) e marcha lenta (instantes antes de se aproximar de  $v = 0$ ). Os valores obtidos para  $F_i$  e  $F_d$  foram muito próximos, o que justifica a unificação das duas taxas de consumo de combustível no modelo baseado em potência proposto por Akcelik et al. (2012), que considera o valor de  $\alpha$  (ml/s) para o consumo em marcha lenta e desaceleração. No Apêndice B, Figura 32, mais exemplos de desacelerações são apresentados.

Figura 15: Consumo de combustível e variação do  $\lambda$  durante uma desaceleração



## 4.2 RESULTADOS COM DADOS DO CICLO DE CONDUÇÃO

Usaram-se dados coletados em condições de tráfego reais na forma de um ciclo de condução. Os dados foram coletados na Av. Beiramar Norte em Florianópolis/SC. O trajeto apresentado na Figura 16, com início no ponto A e fim no ponto B tem 13,4 km de extensão e 17 semáforos. Foi usado um veículo Honda Civic modelo 2013 com motor de 1.8 l para percorrer o trajeto da via por dez vezes. Cinco ciclos foram realizados em condições de pouco tráfego durante a madrugada, permitindo manter por períodos mais longos num determinado modo. Outros cinco ciclos foram realizados com tráfego intenso mas não congestionado, com maiores variações de velocidade. Para os dois cenários, os ciclos duraram entre 14 e 17 minutos. O ciclo com pouco tráfego foi projetado com velocidades constantes entre semáforos, sempre que possível, para que o veículo parasse no mesmo semáforo em todos os ciclos gerados.

Os dados coletados ao longo do ciclo de condução podem ser carregados em uma visualização no *Google Earth*. O acesso à esses dados é importante pois com essa visualização é possível identificar geograficamente aonde o veículo se encontra em cada instante de tempo, a partir das coordenadas de GPS (*global positioning system*) do dispositivo *tablet*. De fato, existem pesquisas que utilizam dados do GPS para estimar emissões em modos reais de condução, inclusive com aplicações para *smartphone* (THIBAUT et al., 2016). A Figura 17 apresenta um exemplo de *log* de dados gerado pelo aplicativo *Torque*, num trecho do ciclo de condução em que o veículo manteve velocidade constante nos dois sentidos, sem parada no semáforo.

A Figura 18 mostra um exemplo da aquisição de dados de consumo de combustível e velocidade e aceleração instantâneas, obtidos via OBD em um ciclo de condução. A velocidade instantânea é apresentada na primeira janela do gráfico e a partir dessa medição, a taxa de aceleração é obtida para um intervalo de 1 segundo. O consumo instantâneo é obtido por meio da estimativa do fluxo instantâneo de combustível a partir do método do lambda (Seção 3.3). Uma das vantagens em se realizar a calibração do modelo de consumo de combustível utilizando dados de medição do ciclo de condução, é o fato de os dados adquiridos terem sido medidos em uma situação real, tal que as influências do tráfego de veículos na via são consideradas na calibração do modelo. Uma desvantagem é que, dependendo da via em que será realizada a coleta de dados, pode não ser possível atingir medições de consumo nas velocidades mais elevadas por causa dos limites de velocidade.

Figura 16: Percurso do ciclo de condução na Av. Beira-mar Norte em Florianópolis/SC





Figura 17: Exemplo da exposição dos dados dos sensores do veículo e do GPS no Google Earth obtido via aplicativo *Torque*

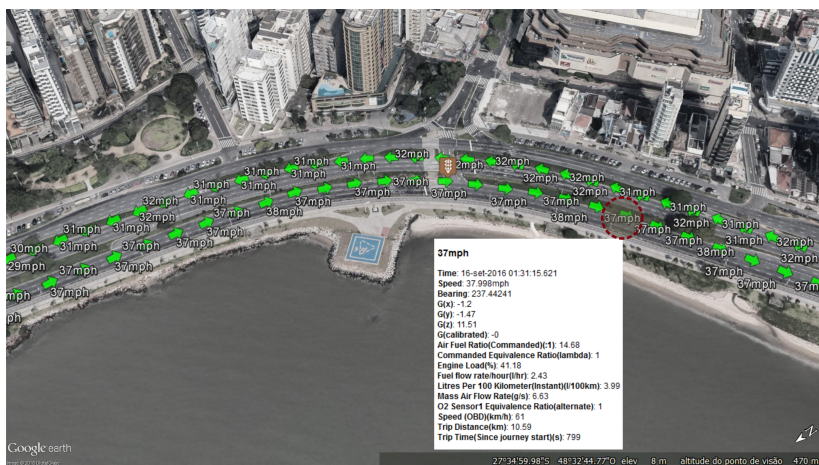
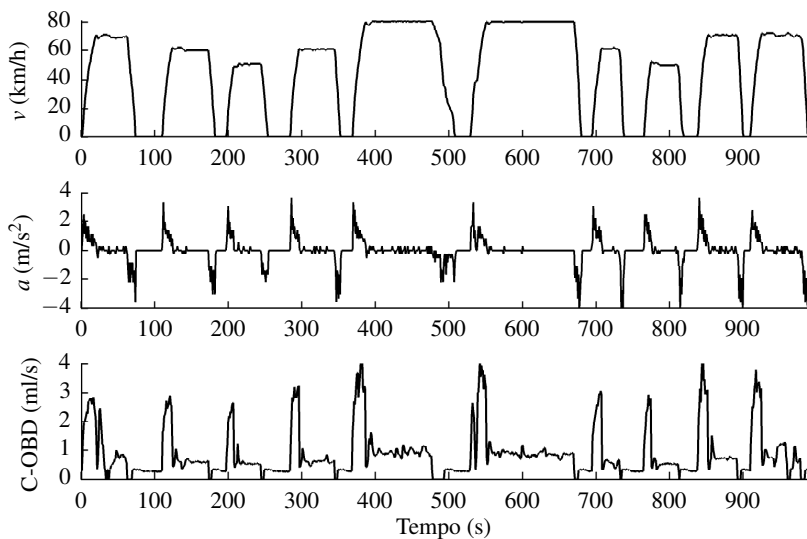


Figura 18: Velocidade, aceleração e consumo de combustível



Durante o processamento dos dados, os modos foram determinados segundo os critérios da Seção 2.2 com  $a_t = 0,278 \text{ m/s}^2$  (1 km/h/s). Esse valor de aceleração de tolerância também é usado na calibração de modelos de consumo de combustível baseados em potência apresentados em Akcelik et al. (2012) e Rakha et al. (2011), nos quais os perfis de consumo de combustível e velocidade são expressos segundo a segundo.

Os dados de velocidade da trajetória foram processados e separados em micro viagens (definida como uma atividade de condução contínua entre duas paradas, uma viagem pode conter várias micro viagens). Os parâmetros adquiridos da unidade de controle do veículo foram: velocidade (km/h), razão ar/combustível comandada e medida ( $\lambda$ ), carga do motor (%), fluxo de massa de ar (g/s), rotação do motor (rpm) e avanço do ponto de ignição (graus). É importante adquirir também os dados que não fazem diretamente parte da estimação do consumo instantâneo de combustível apresentado nesta dissertação, para compreender os estados de funcionamento do motor nos modos de condução.

Para cada modo condução, os dados de consumo de combustível instantâneo são armazenados nos bancos de dados de cada modo e, posteriormente, são utilizados para calibrar os modelos de marcha lenta, velocidade constante, aceleração e desaceleração. Em cada instante de medição a velocidade e a aceleração são lidas, de acordo com as definições dos modos de condução da Tabela 2 e com as fórmulas da Tabela 1, agrega-se os dados de consumo nas bases de dados dos respectivos modos de condução.

A Figura 19 mostra os resultados de calibração do modelo para velocidades constantes (2.9) com dados do ciclo de condução, em condições de tráfego intenso. A qualidade dos resultados são da mesma ordem dos anteriormente obtidos com dados de regime permanente, e apresentou um coeficiente de determinação  $R^2 = 0,9793$ . É notável no gráfico que a dispersão dos dados de consumo coletados em ciclos de condução a velocidades constantes é maior do que os dados coletados em regime. Isso ocorre por conta das condições de preservação, características do relevo e tráfego de veículos da via, isto é, por mais que o veículo esteja a uma determinada velocidade constante, o consumo de combustível pode variar. Lembrar que na calibração do modelo para velocidades constantes com dados de regime permanente, o veículo foi colocado para rodar em condições de estrada boa, sem inclinação e por um certo período de tempo. Também observa-se na Figura 19 que mesmo a uma velocidade constante, o consumo de combustível pode ser igual a zero em alguns instantes. Isso ocorre quando há o corte

da injeção de combustível (ver Seção A.5). Esses dados de consumo de combustível são considerados na calibração do modelo para velocidades constantes pois fazem parte das condições reais encontradas no decorrer do ciclo de condução.

O modelo de velocidades constantes com dados do ciclo foi validado da mesma maneira da Seção 4.1.2 e é apresentado na Figura 20.

A Figura 21 mostra os resultados de calibração do modelo para acelerações com dados do ciclo de condução. O coeficiente de determinação  $R^2 = 0,5496$  obtido nesse método de calibração é maior do que o valor obtido com dados de regime.

A média de consumo dos instantes com  $v = 0$  km/h e  $a = 0$  m/s<sup>2</sup> resultou numa taxa de consumo em marcha lenta de 0,2860 ml/s. A média das desacelerações nos ciclos foi de 0,1792 ml/s.

Figura 19: Calibração do modelo para velocidades constantes com dados do ciclo de condução

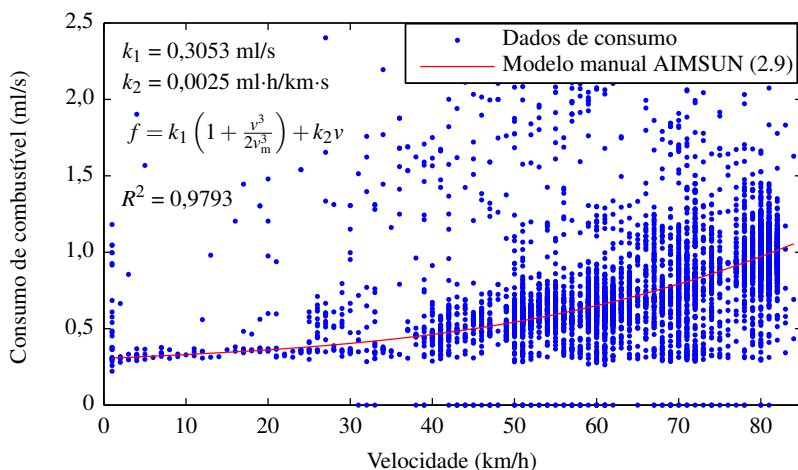


Figura 20: Validação do modelo para velocidades constantes apresentado no manual TSS (2015) com dados do ciclo de condução

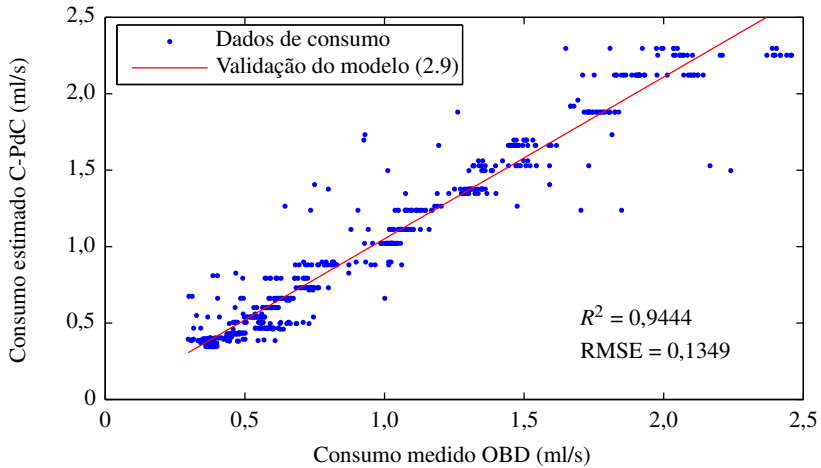
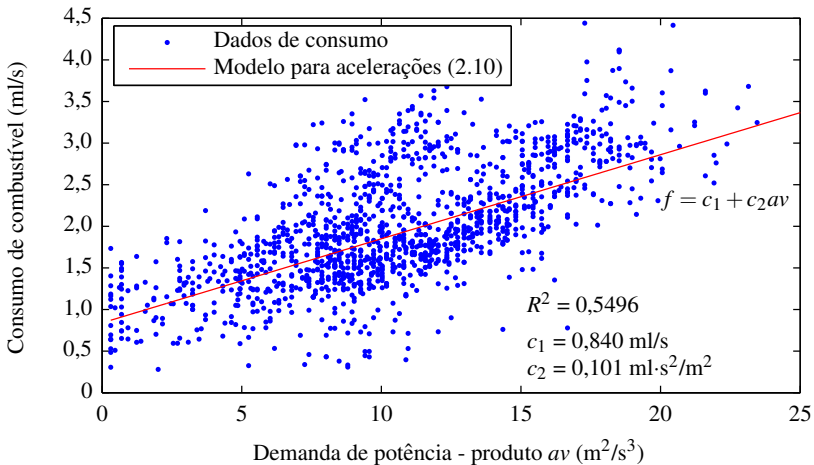


Figura 21: Calibração do modelo para acelerações com dados do ciclo de condução



### 4.3 RESULTADOS DO MODELO BASEADO EM POTÊNCIA

Os parâmetros do modelo de consumo de combustível baseado em potência foram encontrados via implementação do método de calibração passo a passo apresentado na Seção 3.6.4. Os dados utilizados são os mesmos de antes e também foram obtidos do veículo Honda Civic via OBD. A Figura 22 apresenta a primeira etapa da calibração do modelo, que determina os coeficientes  $c_1$  e  $c_2$  via regressão linear, com o valor de  $\alpha$  medido igual a 0,295 ml/s (taxa de consumo em marcha lenta). A Figura 23 mostra a validação para este modelo para velocidades constantes, da mesma maneira que foi validado na Seção 4.1.2.

A calibração utilizando esse método foi realizada tendo como valores iniciais  $b_1 = 0,2222$  kN e  $b_2 = 0,00072$  kN/(m/s)<sup>2</sup> (apresentados na Tabela 4), para então determinar o valor de  $P_T$  instantâneo via (2.12). Na sequência, foi determinado o valor de  $\beta$  por regressão de  $P_I$  via (2.14) em  $f_{it}$  via (3.12). Com o novo valor de  $\beta$ , novos valores de  $b_1$  e  $b_2$  são calculados utilizando (3.9) e (3.10). Os novos valores de  $b_1$  e  $b_2$  são utilizados para determinar  $P_T$  novamente e o processo de estimação se repete até estabilizar o valor de  $\beta$ . Com os valores de  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $P_T$  calibrados, aplica-se (2.11) para estimar o consumo de combustível instantâneo através do modelo baseado em potência.

Figura 22: Calibração do modelo baseado em potência para velocidades constantes

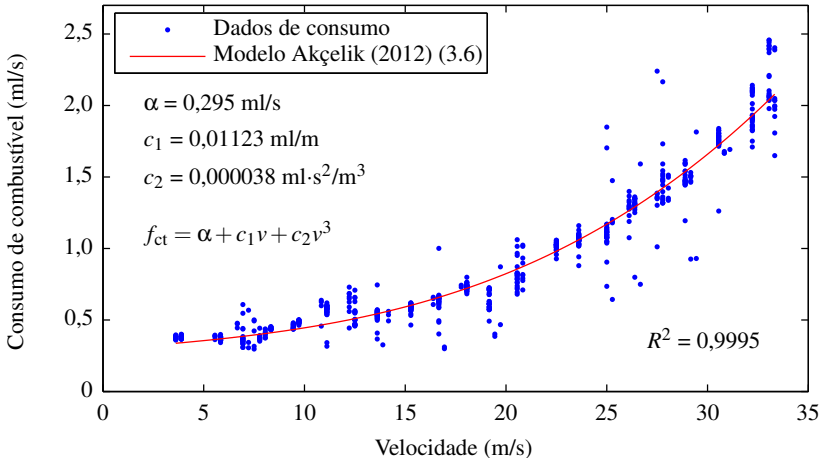
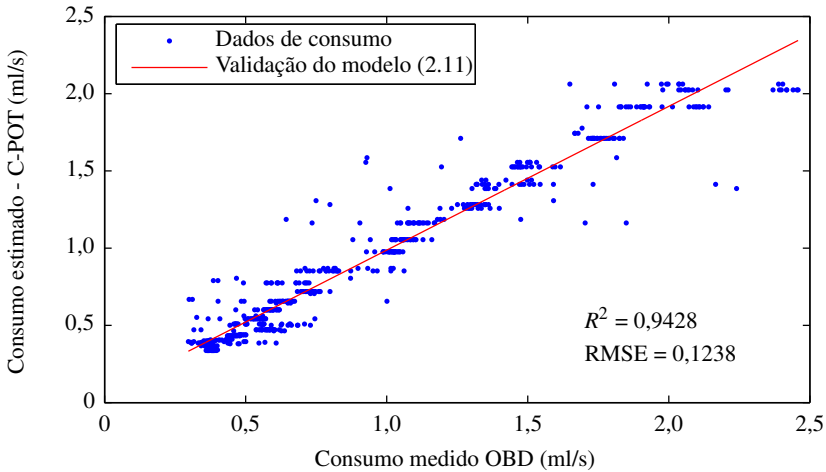


Figura 23: Validação do modelo baseado em potência com dados de consumo de testes de regime permanente para velocidades constantes



#### 4.4 RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO

Neste trabalho, os modelos apresentados foram calibrados em uma mesma resolução (Tabela 2), em que os modos de condução são definidos pela taxa de aceleração de tolerância igual a  $0,278 \text{ m/s}^2$  (ou  $1 \text{ km/h/s}$ ).

A Tabela 5 apresenta os valores dos coeficientes obtidos da calibração do modelos de consumo de combustível pelos métodos apresentados. Nota-se que os valores dos coeficientes encontrados seguem a mesma ordem de grandeza numérica, independente do método de calibração.

Para os coeficientes  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  do modelo (2.2) proposto por Akcelik (1983), foram utilizadas as Equações (2.4)–(2.6) com os valores de  $b_1$ ,  $b_2$  e  $b_3$  obtidos da regressão linear.

Tabela 5: Coeficientes da calibração dos modelos de consumo de combustível para o veículo Honda Civic 1.8 l

Coeficientes da calibração Akcelik (1983)	Coeficientes da calibração AIMSUN TSS (2015)	Coeficientes obtidos via cálculo AIMSUN TSS (2015)
$k_1 = 0,337$ ml/s	$k_1 = 0,2984$ ml/s	$k_1 = 0,335$ ml/s
$k_2 = 0,0024$ ml·h/km·s	$k_2 = 0,0031$ ml·h/km·s	$k_2 = 0,0096$ ml·h/km·s
$k_3 = 9,2 \cdot 10^{-8}$ ml·h <sup>3</sup> /km <sup>3</sup> ·s	$v_m = 56,72$ km/h	$v_m = 55$ km/h
-	-	$F_1 = 4,885$ l/100 km
-	-	$F_2 = 6,952$ l/100 km
	$F_i = 0,295$ ml/s	
	$F_d = 0,185$ ml/s	
	$c_1 = 1,065$ ml/s	
	$c_2 = 0,095$ ml·s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	
Coeficientes da calibração com dados do ciclo AIMSUN TSS (2015)	Coeficientes da calibração modelo baseado em potência Akcelik et al. (2012)	
$k_1 = 0,3053$ ml/s	$\alpha = 0,295$ ml/s	
$k_2 = 0,0025$ ml·h/km·s	$\beta = 0,0752$ ml/kJ	
$v_m = 55$ km/h	$b_1 = 0,1494$ kN	
$F_i = 0,2860$ ml/s	$b_2 = 0,0005$ kN/(m/s) <sup>2</sup>	
$F_d = 0,1792$ ml/s	$M_v = 1500$ kg	
$c_1 = 0,840$ ml/s	$c_1 = 0,0113$ ml/m	
$c_2 = 0,101$ ml·s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	$c_2 = 3,8 \cdot 10^{-5}$ (ml·s <sup>2</sup> )/m <sup>3</sup>	





## 5 IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL EM CICLOS DE CONDUÇÃO

A partir dos valores dos coeficientes encontrados da calibração dos modelos apresentados no Capítulo 4 e utilizando os modelos apresentados no Capítulo 2, é aplicado um método de validação utilizando ciclos de condução em áreas urbanas. Os resultados da validação são apresentados neste capítulo.

Na implementação da calibração dos modelos, dois cenários foram desenvolvidos para comparação dos dados de consumo de combustível medido e estimados na Av. Beira-mar Norte:

1. cinco ciclos percorridos **com pouco tráfego**: o veículo para em 9 semáforos e tem um perfil de velocidades melhor definido onde é possível permanecer durante mais tempo em um mesmo modo pré-determinado (velocidade constante, aceleração, desaceleração ou em marcha lenta), pois não há influência significativa do tráfego nas medições. Esse teste foi realizado em um horário alternativo, na faixa das 2:00 h.
2. cinco ciclos percorridos **com tráfego intenso**: o veículo para em 6 semáforos e apresenta um perfil de velocidades mais variável, acelerando e desacelerando mais vezes, por conta da influência dos outros veículos no decorrer do percurso. Esse teste foi realizado a partir das 6:00 h, quando já existe um certo fluxo de veículos na via, mas não o suficiente para provocar congestionamentos. Este segundo tipo de ciclo, com tráfego intenso de veículos, foi realizado para verificar se a influência do tráfego afetaria o desempenho do modelo na estimativa do consumo de combustível.

Para melhor compreensão das abreviações utilizadas nas tabelas e gráficos deste capítulo são apresentadas as seguintes convenções:

- $v$ : Velocidade instantânea (km/h) adquirida via OBD (valores do sensor de velocidade do veículo);
- $a$ : Taxa de aceleração ( $m/s^2$ ) calculada a partir da variação da velocidade instantânea entre duas medições sucessivas;
- C-OBD: Consumo de combustível instantâneo (ml/s) estimado por (3.1) e a nova fórmula da pag. 54, a partir dos dados de fluxo

de massa de ar e  $\lambda_{\text{com}}$  obtidos via OBD. Esse valor é a referência de medição para cada ciclo de validação;

- C-Ak: Consumo de combustível instantâneo estimado (ml/s), utilizando os valores dos coeficientes  $b_1$ ,  $b_2$  e  $b_3$  (e consequentemente  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$ ) da calibração, e aplicados no modelo de consumo de combustível instantâneo (2.2) apresentado por Akcelik (1983). Para essa técnica, o modelo foi calibrado com dados de consumo de combustível em ml/km, adquiridos em testes de regime permanente;
- C-CB: Consumo de combustível instantâneo estimado (ml/s), utilizando os valores dos coeficientes  $k_1$ ,  $k_2$  e  $v_m$  da calibração, e aplicados no modelo de consumo de combustível instantâneo (2.9) do manual TSS (2015). Para essa técnica, o modelo foi calibrado com dados de consumo de combustível diretamente em ml/s, adquiridos em testes de regime permanente;
- C-CC: Consumo de combustível instantâneo estimado (ml/s), utilizando os valores dos coeficientes  $k_1$  e  $k_2$  calculados segundo as fórmulas (3.4) e (3.5) do manual TSS (2015) e  $v_m$  medido, e aplicados no modelo de consumo de combustível instantâneo (2.9) do manual TSS (2015). Para essa técnica de calibração via cálculo dos parâmetros, o modelo foi calibrado com medições de consumo de combustível em l/100 km, para as velocidades de 90 e 120 km/h. Também mediu-se a velocidade em que o consumo de combustível por unidade de distância é mínimo;
- C-PdC: Consumo de combustível instantâneo estimado (ml/s), utilizando os valores dos coeficientes da calibração obtidos com dados do ciclo de condução e aplicado no modelo de consumo de combustível instantâneo (2.9) do manual TSS (2015).
- C-POT: Consumo de combustível instantâneo estimado (ml/s), utilizando os valores dos coeficientes da calibração do modelo de consumo de combustível baseado em potência (2.11) proposto por Akcelik et al. (2012). Para essa técnica de calibração, utilizaram-se dados de regime permanente para os modos velocidades constantes, marcha lenta e desaceleração, e dados de ciclos de condução para o modo aceleração.

Para quantificar as diferenças entre os valores medidos e previstos pelo modelo, empregou-se a raiz da média quadrática dos erros (RMSE)

(CHAI; DRAXLER, 2014) e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Os cálculos de RMSE foram realizados representando o desvio padrão da amostra, da diferença entre os valores de C-OBD (medido) e C-Ak, C-CB, C-CC, C-PdC e C-POT (estimados). Os resultados da validação utilizando ciclos de condução para os dois cenários são apresentados na Tabela 6. Os ciclos foram numerados de 1 a 5 para o cenário com pouco tráfego e de 6 a 10 para o cenário com tráfego intenso. Dos 10 ciclos de testes usados na validação, um ciclo de cada cenário foi escolhido para apresentação das figuras e tabelas de consumo de combustível global e consumo de combustível por modo de condução. O ciclo 3 para o caso com pouco tráfego e o ciclo 8 para o caso com tráfego intenso são apresentados nas Figuras 24 e 25, respectivamente. As figuras dos outros ciclos de condução são apresentados no Apêndice D.

As cores de fundo das figuras ilustram o modo de condução do veículo segundo a Tabela 2. Vermelho é marcha lenta, azul é velocidade constante, verde é aceleração, e amarelo é desaceleração. É importante destacar também que, em ambos os cenários, a instrução para o motorista é de manter a velocidade constante pré-determinada sempre que possível (utilizando o controle de cruzeiro<sup>1</sup> para manter a velocidade constante por mais tempo). As velocidades pré-determinadas são, nesta ordem: 70, 60, 50, 60, 80, 80, 60, 50, 70 e 70 km/h, e são utilizadas para o cenário com pouco tráfego, uma vez que no cenário com tráfego intenso as velocidades são influenciadas pelos outros veículos. Quando a sequência de velocidades é seguida corretamente, o veículo para nos mesmos semáforos em todos os ciclos de testes. Isso resulta na obtenção de uma variedade de testes com manobras semelhantes de aceleração – velocidade constante – desaceleração, com intervalos de tempo parecidos.

As Tabelas 7 e 9 apresentam os valores de consumo de combustível medido e estimados para cada modo de condução, referente aos ciclos das Figuras 24 e 25, para os casos com pouco tráfego e com tráfego intenso, respectivamente. As Tabelas 8 e 10 mostram o combustível consumido, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e a raiz média quadrática dos erros (RMSE) para o ciclo completo, para os dois ciclos escolhidos (Ciclos 3 e 8).

Para as técnicas de calibração C-Ak, C-CB, C-CC, C-PdC e C-POT, o cenário com pouco tráfego apresentou valores de  $R^2$  próximos a 0,80, enquanto que no cenário com tráfego intenso os valores de  $R^2$

---

<sup>1</sup>O controle de cruzeiro basicamente funciona fazendo a comparação entre a velocidade do veículo e a velocidade programada de forma a fazer a compensação entre elas.

se mantiveram próximos a 0,65. Os resultados obtidos no cenário com pouco tráfego apresentaram um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) melhor do que o cenário com tráfego intenso por conta da influência do tráfego nas medições e por haver maior número de acelerações e desacelerações durante o ciclo de condução.

No cenário com pouco tráfego, foram observados 10 períodos de aceleração, 10 períodos em velocidades constantes, 10 períodos de desaceleração e 9 períodos com o veículo em marcha lenta. Já para o cenário com tráfego intenso, o número de períodos de acelerações no ciclo foi de 14, de velocidades constantes 28, de desaceleração 15 e em marcha lenta 6 períodos.

As Figuras 26 e 27 apresentam uma amostra do perfil temporal dos valores medidos e estimados das taxas de consumo instantâneo de combustível durante o ciclo de condução escolhido, no intervalo do instante 230 s a 530 s para o caso com pouco tráfego, e do instante 630 s a 880 s para o caso com tráfego intenso. Nesses gráficos fica evidente na situação de desaceleração/frenagem, quando o valor de consumo de combustível medido é igual a zero (situação de corte na injeção de combustível *cut-off*). No caso com tráfego intenso é observado um maior número de frenagens ao longo do ciclo.

Na Figura 26 observa-se a partir do instante 480 s uma desaceleração lenta, em que alguns períodos de velocidades constantes são identificados na medição, embora o consumo de combustível medido continue sendo igual a zero. Como o simulador identifica o estado do veículo a partir da velocidade instantânea e aceleração, os modos de condução se alternaram entre velocidade constante e desaceleração nesse período, o que justifica o efeito oscilatório do consumo de combustível nessa desaceleração em específico. As demais desacelerações observadas no ciclo são desacelerações constantes. Também observa-se um longo período de velocidades constantes no intervalo do instante 400 s a 470 s, em que o consumo de combustível medido apresenta uma pequena variação devido ao relevo instável da via nesse trecho, que antecede o retorno no ciclo de condução (Figura 16).

Tabela 6: Resultados da validação

Ciclo	ID	$R^2$	RMSE	Ciclo	ID	$R^2$	RMSE
1	C-Ak	0,7663	0,3391	6	C-Ak	0,6563	0,3802
	C-CB	0,7717	0,3359		C-Cb	0,6547	0,3823
	C-CC	0,7606	0,3439		C-CC	0,6541	0,3823
	C-PdC	0,7744	0,3289		C-PdC	0,6583	0,3509
	C-POT	0,7823	0,3116		C-POT	0,6731	0,3289
2	C-Ak	0,7368	0,3239	7	C-Ak	0,6484	0,3253
	C-CB	0,7393	0,3231		C-Cb	0,6481	0,3638
	C-CC	0,7290	0,3305		C-CC	0,6448	0,3283
	C-PdC	0,7310	0,3485		C-PdC	0,6532	0,3003
	C-POT	0,7517	0,3355		C-POT	0,6614	0,2985
3	C-Ak	0,7929	0,3888	8	C-Ak	0,6502	0,3913
	C-CB	0,7988	0,3844		C-Cb	0,6482	0,3910
	C-CC	0,7868	0,3940		C-CC	0,6479	0,3948
	C-PdC	0,7879	0,4073		C-PdC	0,6533	0,3810
	C-POT	0,8051	0,4175		C-POT	0,6801	0,4011
4	C-Ak	0,7225	0,3247	9	C-Ak	0,6590	0,3644
	C-CB	0,7233	0,3253		C-Cb	0,6461	0,3672
	C-CC	0,7163	0,3295		C-CC	0,6473	0,3663
	C-PdC	0,7274	0,3473		C-PdC	0,6538	0,3343
	C-POT	0,7313	0,3347		C-POT	0,6736	0,3197
5	C-Ak	0,7514	0,3063	10	C-Ak	0,6324	0,3503
	C-CB	0,7522	0,3067		C-Cb	0,6306	0,3527
	C-CC	0,7461	0,3109		C-CC	0,6293	0,3530
	C-PdC	0,7485	0,3268		C-PdC	0,6368	0,3250
	C-POT	0,7511	0,3327		C-POT	0,6406	0,3044

Figura 24: Perfil de velocidades e consumos de combustível ao longo do ciclo de condução na Av. Beira-mar Norte em Florianópolis/SC para o caso com pouco tráfego

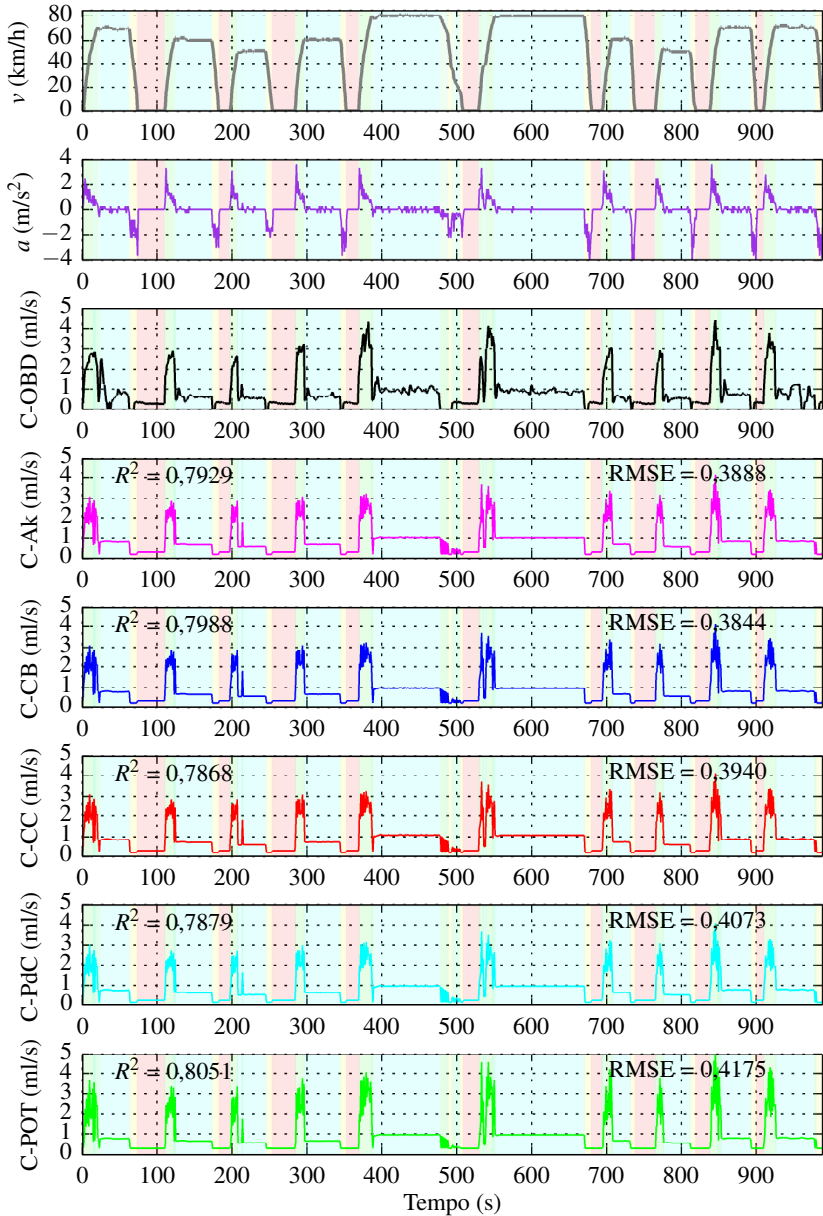


Figura 25: Perfil de velocidades e consumos de combustível ao longo do ciclo de condução na Av. Beira-mar Norte em Florianópolis/SC para o caso com tráfego intenso

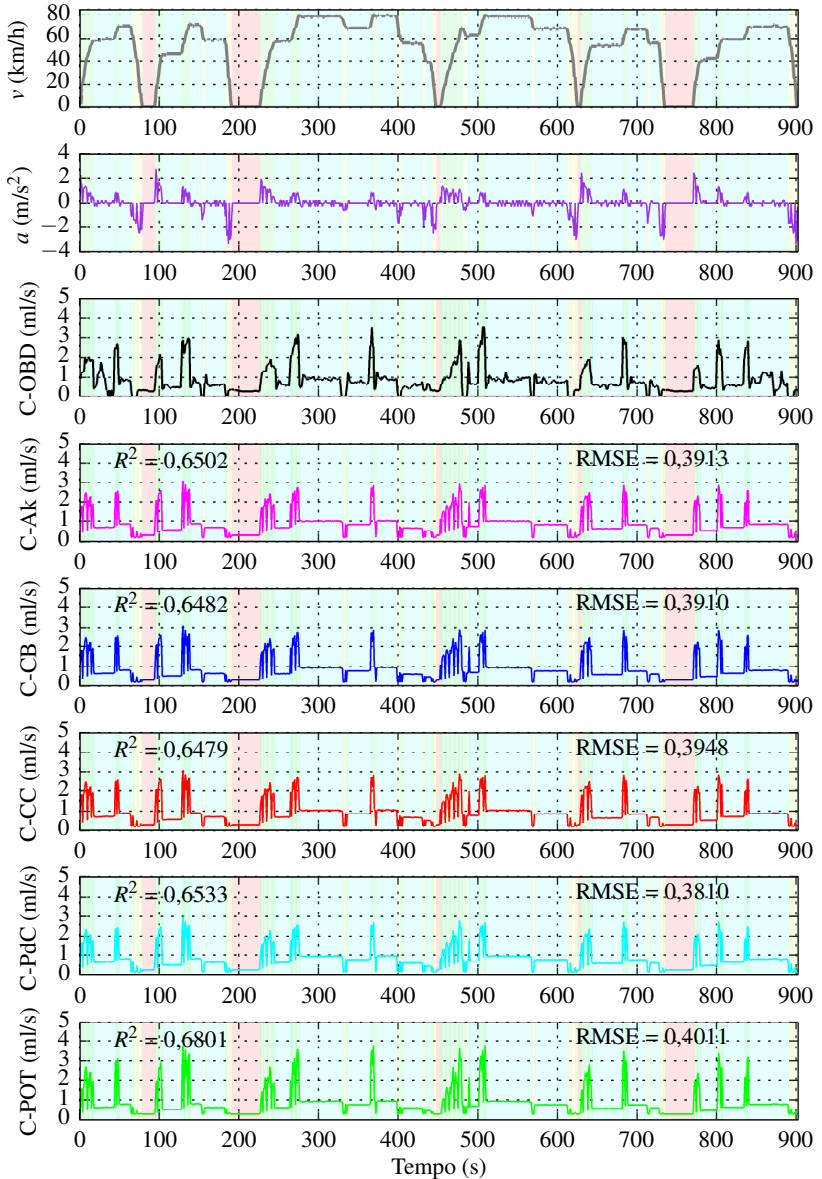


Tabela 7: Cenário com pouco tráfego - Consumo de combustível, raiz da média quadrática dos erros e tempo para cada modo de condução

Modo de condução	ID	Consumo (ml)	RMSE	Tempo (s)
Marcha lenta	C-OBD	59,03	-	193
	C-Ak	56,94	0,102	
	C-CB	56,94	0,102	
	C-CC	56,94	0,102	
	C-PdC	55,20	0,103	
	C-POT	56,92	0,102	
Constante	C-OBD	425,02	-	563
	C-Ak	472,52	0,344	
	C-CB	446,44	0,335	
	C-CC	488,57	0,354	
	C-PdC	446,76	0,336	
	C-POT	444,60	0,335	
Aceleração	C-OBD	366,04	-	140
	C-Ak	323,28	0,746	
	C-CB	323,28	0,746	
	C-CC	323,28	0,746	
	C-PdC	302,78	0,826	
	C-POT	349,34	0,858	
Desaceleração	C-OBD	16,36	-	92
	C-Ak	17,02	0,175	
	C-CB	17,02	0,175	
	C-CC	17,02	0,175	
	C-PdC	16,48	0,174	
	C-POT	27,13	0,209	

Tabela 8: Cenário com pouco tráfego - Consumo de combustível, coeficiente de determinação e raiz da média quadrática dos erros para o ciclo completo

ID	Consumo global		
	(ml)	$R^2$	RMSE
C-OBD	866,59	-	-
C-Ak	869,76	0,7929	0,388
C-CB	843,68	0,7988	0,384
C-CC	885,81	0,7868	0,394
C-PdC	821,22	0,7879	0,407
C-POT	877,99	0,8051	0,417



Tabela 9: Cenário com tráfego intenso - Consumo de combustível, raiz da média quadrática dos erros e tempo para cada modo de condução

Modo de condução	ID	Consumo (ml)	RMSE	Tempo (s)
Marcha lenta	C-OBD	28,65	-	98
	C-Ak	28,91	0,098	
	C-CB	28,91	0,098	
	C-CC	28,91	0,098	
	C-PdC	28,03	0,101	
	C-POT	28,90	0,101	
Constante	C-OBD	458,92	-	606
	C-Ak	469,84	0,412	
	C-CB	443,46	0,411	
	C-CC	483,26	0,417	
	C-PdC	441,93	0,413	
	C-POT	441,54	0,412	
Aceleração	C-OBD	237,25	-	126
	C-Ak	263,28	0,513	
	C-CB	268,28	0,513	
	C-CC	268,28	0,513	
	C-PdC	248,40	0,451	
	C-POT	283,50	0,555	
Desaceleração	C-OBD	10,36	-	72
	C-Ak	13,32	0,174	
	C-CB	13,32	0,174	
	C-CC	13,32	0,174	
	C-PdC	12,90	0,173	
	C-POT	21,23	0,227	

Tabela 10: Cenário com tráfego intenso - Consumo de combustível, coeficiente de determinação e raiz da média quadrática dos erros para o ciclo completo

ID	Consumo global (ml)	$R^2$	RMSE
C-OBD	735,18	-	-
C-Ak	780,35	0,6502	0,391
C-CB	753,97	0,6482	0,391
C-CC	793,77	0,6479	0,395
C-PdC	731,26	0,6533	0,381
C-POT	775,17	0,6801	0,401

Figura 26: Parte do perfil temporal dos valores de consumo de combustível instantâneo medido e estimados para o caso com pouco tráfego

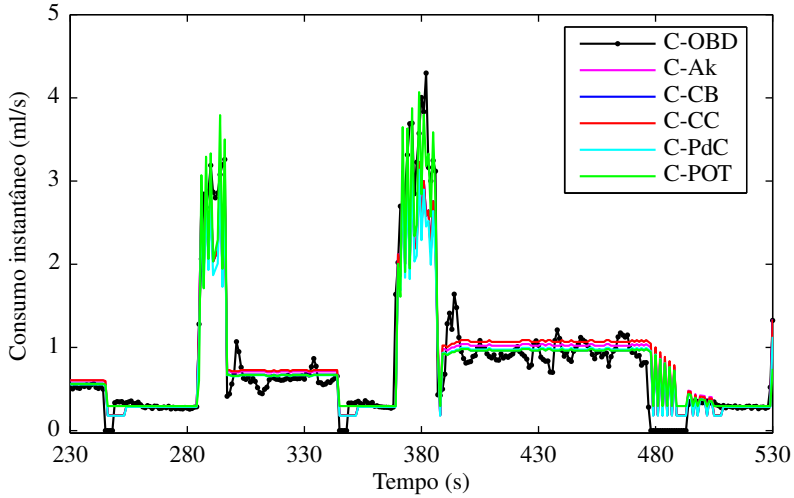
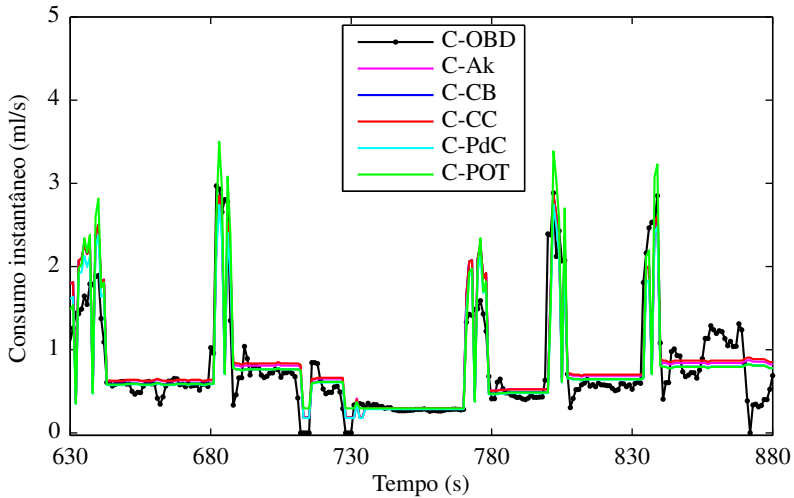


Figura 27: Parte do perfil temporal dos valores de consumo de combustível instantâneo medido e estimados para o caso com tráfego intenso



## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram apresentados métodos de calibração de modelos microscópicos de consumo de combustível implementado no simulador AIMSUN e para um modelo baseado em potência, a partir de dados disponíveis em veículos automotores no padrão OBD.

O consumo instantâneo de combustível foi estimado usando dados de sensores instalados nos veículos, através da instrumentação capaz de comunicar com o sistema eletrônico dos veículos (OBD/CAN). Estimar o consumo instantâneo de combustível através do acesso aos dados desses sensores via dispositivo de aquisição de dados portátil, é uma forma barata e simples para obter-se dados operacionais de uma gama diversificada de veículos.

Na coleta de dados, independentemente da origem dos dados coletados, os coeficientes requeridos pelos modelos apresentaram resultados com valores em uma mesma ordem de grandeza numérica, tanto para testes em regime permanente quanto para testes em ciclo de condução em área urbana.

Era esperado que o modelo baseado em potência, por ser um modelo considerado mais moderno, representasse melhor as variações do consumo de combustível do veículo em simulação. Porém, como esse não deixa de ser também um modelo modal, que leva em consideração a velocidade, a aceleração e o regime de operação do veículo para estimar o consumo de combustível, os resultados obtidos apresentaram diferenças pouco significantes na estimação do consumo de combustível através dos dois modelos apresentados.

Para a análise das emissões dos veículos no tráfego urbano, é necessário a estimação real das taxas de emissões que podem ser obtidas através de PEMS. Este trabalho contemplou apenas a estimação do consumo de combustível pois não havia acesso a um PEMS. Entretanto, as taxas de emissão de CO<sub>2</sub> podem ser obtidas por meio de uma relação direta com as taxas de consumo instantâneo de combustível (AKCELIK et al., 2012).

Os resultados de validação em ciclos de condução em áreas urbanas indicam a precisão adequada do método nos casos de velocidades constantes e de marcha lenta, e com precisão menor no caso de acelerações constantes. De todo modo, os resultados ao longo de um ciclo completo de condução que combina os vários modos indicam que o modelo é capaz de fornecer avaliações consistentes do consumo global de combustível.

A partir dos procedimentos descritos, serão desenvolvidos em trabalhos futuros modelos de simulação para cenários urbanos a fim de permitir a avaliação comparativa de estratégias de controle de tráfego do ponto de vista da eficiência de consumo de combustível. Tais modelos fornecerão, ainda, estimativas de emissão de gases do efeito estufa e de poluentes, permitindo avaliar a qualidade ambiental do tráfego sendo controlado. Essa análise requer a calibração do modelo de consumo de combustível apresentado no simulador para os diferentes tipos de veículo, como apresentado no Apêndice C, e características gerais como marca, modelo, ano de fabricação e estilo de direção, que compõem o tráfego da região estudada, bem como para diferentes condições de tráfego.

## REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 7024. **Veículos Rodoviários Automotores Leves – Medição do Consumo de Combustível – Método de Ensaio.** Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2010.

ABNT. NBR 6601. **Veículos Rodoviários Automotores Leves – Determinação de Hidrocarbonetos, Monóxido de Carbono, Óxidos de Nitrogênio, Dióxido de Carbono e Material Particulado no Gás de Escapamento.** Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2012.

AHN, K. Microscopic Fuel Consumption and Emission Modeling. **Virginia Polytechnic Institute and State University**, Virginia, USA, 1998.

AKCELIK, R. Progress in Fuel Consumption Modelling for Urban Traffic Management. **Australian Road Research Board**, Vermont South, Austrália, p. 51–56, 1983. ISSN 0518-0728.

AKCELIK, R.; BESLEY, M. Operational Cost, Fuel Consumption, and Emission Models in aaSIDRA and aaMOTION. **25th Conference of Australian Institutes of Transport Research**, Adelaide, Austrália, p. 15, Dezembro 2003.

AKCELIK, R.; SMIT, R.; BESLEY, M. Recalibration of a Vehicle Power Model for Fuel and Emission Estimation and its Effect on Assessment of Alternative Intersection Treatments. Washington, EUA, p. 16, 2014.

AKCELIK, R. et al. Calibrating Fuel Consumption and Emission Model for Modern Vehicles. **IPENZ Transportation Group Conference**, Rotorua, Nova Zelândia, p. 1–13, 2012.

ALESSANDRINI, A.; FILIPPI, F.; ORTENZI, F. Consumption calculation of vehicles using OBD data. **Centre For Transport and Logistics**, Roma, 2004.

AN, F. et al. Development of Comprehensive Modal Emissions Model Operating Under Hot–Stabilized Conditions. **Transportation Research Board**, n. 970706, p. 52–62, 1997.

AN, F.; EARLEY, R.; GREEN-WEISKEL, L. Global Overview on Fuel Efficiency and Motor Vehicle Emission Standards: Policy Options and Perspectives for International Cooperation. **United Nations Department of Economic and Social Affairs**, Nova Iorque, EUA, p. 22, 2011.

ANDRE, M. et al. Real-World European Driving Cycles, for Measuring Pollutant Emissions. **Laboratory Transport and Environment, INRETS**, França, v. 40, p. 5944–5953, 2005.

BALTUSIS, P. On Board Vehicle Diagnostics. **Convergence International Congress Exposition On Transportation Electronics**, EUA, SAE Technical Paper No. 2004-21-0009, 2004.

BARLOW, T. et al. A Reference Book of Driving Cycles for Use in the Measurement of Road Vehicle Emissions. **TRL Published Project Report**, Wokingham, Reino Unido, p. 280, 2009. ISSN 9068–4093.

BARTOLOMAIS, L. Adeus Carburador. **Quatro Rodas**, n. 1, p. 32–39, 1989.

BAYLEY, C. Energy Implications of Co-ordinated Traffic Signal. **ARRB Transport Research**, Austrália, No. 10, p. 16–24, 1980.

BOWYER, D.; AKCELIK, R.; BIGGS, D. Guide to Fuel Consumption Analysys for Urban Traffic Management. Vermont South, Austrália, n. Special Report SR No. 32., 1985.

BULACH, V. **Influence of Driving Patterns on the Localised Urban Emissions Sources**. Tese (Doutorado) — Universidade de Melbourne, Melbourne, Austrália, 1977.

CHAI, T.; DRAXLER, R. Mean Square Error (RMSE) or Mean Absolute Error (MAE) - Arguments Against Avoiding RMSE in the Literature. **Geoscientific Model Development**, EUA, 2014.

CONAMA. Dispõe Sobre os Requisitos para Adoção de Sistemas de Diagnose de Bordo - OBD nos Veículos Automotores Leves Objetivando Preservar a Funcionalidade dos Sistemas de Controle de Emissão. Resolução n. 354, de 13 de dezembro de 2004. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, 2004.

DENTON, T. **Automobile Electrical and Electronic Systems**. Massachusetts, USA: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. 476 p. ISBN 0 7506 62190.

DIELMAN, T. Least Absolute Value vs. Least Squares Estimation and Inference Procedures in Regression Models with Asymmetric Error Distributions. **Journal of Modern Applied Statistical Methods**, v. 8, n. 1, p. 13, 2009. ISSN 1538 - 9472.

ELM. **ELM 327 – OBD to RS232 Interpreter**. Manual do usuário, 2010. 94 p.

FERREIRA, L. Car Fuel Consumption in Urban Traffic: The Results of a Survey in Leeds using Instrumented Vehicles. **Institute of Transport Studies, University of Leeds**, Inglaterra, p. 77, 1982.

FHWA. Traffic Analysis Toolbox Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software. Washington, EUA, 2004.

FISPQ. GASOLINA ESPECIAL BR E27 - Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico. **Petrobrás Distribuidora S.A.**, Rio de Janeiro, 2014.

FONSECA, H.; FERREIRA, C.; FERNANDES, T. New Methodologies To Measure in Real Time Fuel Consumption of Internal Combustion Engines. **15th International Conference on Experimental Mechanics**, Leiria, Portugal, p. 8, 2012.

FRANCO, V. et al. Road vehicle emission factors development: A review. **Atmospheric Environment**, n. 70, p. 84–97, 2013.

GIPPS, P.; WILSON, B. MULTSIM: A Computer Package for Simulating Multilane Traffic flows. **4th Biennial Conference of Simulation**, Austrália, 1980.

GOMES, C. Calibração de Motores. **Curso SAE Brasil**, São Paulo, jul. de 2016, Acesso em: 27 jul. 2016. 316 slides. Apresentação em Power-point, 2016. Disponível em:  
<<http://saebrasil.org.bra2016cLinkcalibraacaomotores.zip>>.

HICKMAN, A. J. Methodology for Calculating Transport Emissions and Energy Consumption. **Transport Research Laboratory**, United Kingdom, p. 381, 1988.

KODJAK, D. Policies to reduce fuel consumption, air pollution, and carbon emissions from vehicles in G20 nations. **The International Council on Clean Transportation - ICCT**, Washington DC, USA, p. 22, 2015.

KOENKER, R.; BASSETT, G. Error Theory of Least Absolute Asymptotic Regression. **Journal of the American Statistical Association**, v. 73, n. 363, p. 618–622, 1978. ISSN 0162-1459.

LAI, J. et al. Development of City-Specific Driving Cycles for Transit Buses Based on VSP Distributions: Case of Beijing. **Journal of Transportation Engineering**, Pequim, China, v. 139, p. 749–757, 2013. ISSN 1943–5436.

LEAL, L.; ROSA, E.; NICOLAZZI, L. **Uma Introdução à Modelagem Quase-Estática de Automóveis**: Publicação interna do grante, emc-ufsc. Florianópolis, Brasil, 2012.

LIU, J.; WANG, X.; KHATTAK, A. Customizing Driving Cycles to Support Vehicle Purchase and Use Decisions: Fuel Economy Estimation for Alternative Fuel Vehicle Users. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, EUA, p. 281–298, 2016.

MARTIN, D. J. Incremental Operating Costs of Cars at Roundabouts. **Transportation Research Laboratory, Supplementary Report**, United Kingdom, p. 23, 1974. ISSN 0305-1315.

MILHOR, C. **Sistema de Desenvolvimento para Controle Eletrônico dos Motores de Combustão Interna Ciclo Otto**. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 2002.

MÜLLER, E. **Estudo por Microsimulação do Controle de Fluxo Principal em Rodovias Através de Limite de Velocidade Variável**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas, Florianópolis, Brasil, 2013.

NANDURI, K. **Mitigating Emissions and Energy Consumption for Urban Transportation Networks: Simulation-Based Signal Control Strategies**. 85 p. Dissertação (Mestrado) — Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, EUA, 2013.

OSORIO, C.; NANDURI, K. Energy-Efficient Urban Traffic Management: A Microscopic Simulation-Based Approach. **Transportation Science**, v. 49, n. 3, p. 637–651, Agosto 2015. ISSN 0041–1655.



OWENS, R.; LAUGHLIN, M. Idling Reduction Technologies for Emergency Service Vehicles. **U.S. Department of Energy**, Chicago, EUA, p. 36, 2016.

PELKMAN, L.; DEBAL, P. Comparison of On-Road Emissions with Emissions Measured on Chassis Dynamometer Test Cycles. **Transportation Research Part D – Transport and Environment**, Bélgica, 2006.

PROCONVE. Programa de controle da poluição do ar por veículos automotores Proconve/Promot/Ibama. **Coleção Meio Ambiente. Série Diretrizes Gestão Ambiental**, Brasília, v. 3, p. 586, 2011.

RAKHA, H.; AHN, K.; MORAN, K. Virginia Tech Comprehensive Power-based Fuel Consumption Model (VT-CPFM): Model Validation and Calibration Considerations. **International Journal of Transportation Science and Technology**, Virginia, EUA, v. 265, n. 312, p. 17, 2013. ISSN 2046-0430.

RAKHA, H. et al. Virginia Tech Comprehensive Power-Based Fuel Consumption Model: Model development and testing. **Transportation Research: Transportation and Environment**, Virginia, USA, v. 16, p. 492–503, 2011.

SAE. **E/E Diagnostic Test Modes – J1979**. abril 2002. 25–121 p.

SIVAK, M.; SCHOETTLE, B. Eco-driving: Strategic, tactical, and operational decisions of the driver that influence vehicle fuel economy. **Instituto de Pesquisas do Transporte**, Michigan, EUA, Report No. UMTRI-2011-34, 2011.

SMIT, R.; MCBROOM, J. Development of a new high resolution traffic emissions and fuel consumption model for Australia and New Zealand. **Air Quality and Climate Change**, Nathan, Austrália, v. 43, p. 14–16, 2009.

THIBAUT, L. et al. A new GPS-based method to estimate real driving emissions. **IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)**, Rueil-Malmaison, França, p. 1628–1633, 2016.

TSS. Manual do usuário do Simulador AIMSUN. **Transport Simulation Systems**, Barcelona, Espanha, p. 393 – 396, 2015.

ULSOY, G.; PENG, H.; ÇAKMACI, M. **Automotive control systems**. New York, USA: Cambridge University Press, 2012. 1089 p.

VALEO. **Stop-Start Systems**. França, 2016. Acesso em: 27 jul. 2016. Disponível em: <<http://www.valeo.com/en/our-activities/powertrain-systems/technologies/systems-stop-start-48>>.

WATSON, H. C. Influence of Driving Patterns on the Localised Urban Emissions Source. **Society of Automotive Engineers**, EUA, p. 15, 1973.

## **APÊNDICE A – Sistemas de controle e sensores automotivos**



Este apêndice é uma revisão de alguns conceitos de sistemas de controle automotivos pertinentes para o estudo de consumo de combustível, entre eles, o controle da razão ar/combustível. As informações aqui apresentadas são baseadas principalmente em Ulsoy, Peng e Çakmaci (2012).

## A.1 SISTEMAS DE CONTROLE AUTOMOTIVOS

O automóvel está rapidamente se tornando um sistema eletromecânico complexo devido, em parte, aos avanços na computação e tecnologias de detecção, bem como avanços na teoria de controle e teoria de estimação. Veículos agora incluem sistemas de computação embarcados hierarquicamente distribuídos, que coordenam várias funções de controle. Entre elas estão as funções de controle associadas com o motor e a transmissão, controle de cruzeiro, controle de tração e suspensões ativas. As funções de controle em um automóvel podem ser agrupadas da seguinte forma (ULSOY; PENG; ÇAKMACI, 2012):

1. Controle do *powertrain*: consiste em sistemas de controle do motor e de transmissão. Os sistemas de controle do motor incluem controle de injeção de combustível, controle do carburador, controle da velocidade de marcha lenta e controle da recirculação dos gases de escape (EGR). O objetivo dos sistemas de controle do motor é assegurar que o motor opere em condições próximas às ótimas. Sistemas de controle de transmissão determinam o ponto de mudança ideal para o conversor de torque e do ponto de operação de bloqueio com base em medições da aceleração angular e velocidade do veículo.
2. Controle do veículo: inclui controle de suspensão, controle de direção, controle de cruzeiro, controle de frenagem (ABS), e controle de tração. Estes sistemas melhoraram várias funções do veículo, incluindo resposta, estabilidade de direção e dirigibilidade.
3. Controle da carroceria: refere-se a sistemas como o ar-condicionado, medidores eletrônicos, sistemas de controle de energia, sistemas de segurança, sistemas de comunicação, sistemas de fechamento de portas e detecção de obstáculos traseiro. A intenção destes sistemas é a de aumentar o conforto de condução. Portanto esses recursos muitas vezes são percebidos imediatamente por motoristas como um benefício e normalmente são introduzidos primeiro em veículos de luxo.

É claro que muitos sensores e atuadores são necessários para implementar os vários sistemas de controle existentes em um veículo. A unidade de gerenciamento eletrônico do motor (EECU) tem como função determinar a quantidade correta de combustível a ser injetada e controlar o sistema de ignição eletrônica, com base nas informações que recebe de diversos componentes (sensores e atuadores) do sistema. Assim, a quantidade de combustível injetada é dosada através do tempo de abertura das válvulas de injeção (ULSOY; PENG; ÇAKMACI, 2012).

## A.2 SENSORES AUTOMOTIVOS UTILIZADOS PARA ESTIMAR O CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

### A.2.1 Sensor de oxigênio

O sensor de oxigênio, também conhecido como sonda lambda, é um componente que determina a concentração de oxigênio do gás de escape de um veículo em relação à concentração ambiente. Sua função é auxiliar no controle de emissões dos gases de escapamento de acordo com as leis regulamentadoras de cada país, funcionando como realimentação do sistema de gerenciamento eletrônico do motor. Antigamente, os carros utilizavam somente carburadores para a injeção de combustível. Não era possível controlar a quantidade de combustível adicionada em malha fechada.

Com a introdução da injeção eletrônica, desenvolveu-se um sensor para medir a concentração de oxigênio resultante da combustão. Se a quantidade de oxigênio for menor que a esperada (concentração atmosférica), diminui-se a quantidade de combustível injetado para a próxima combustão, aumentando-se assim a concentração de oxigênio nos gases de escapamento e vice-versa. Este controle permitiu um melhor rendimento do motor, a redução do consumo de combustível e a consequente redução de poluentes emitidos.

O sistema eletrônico de controle de injeção de combustível do motor trabalha em malha aberta ou em malha fechada. Quando em malha aberta, o sinal do sensor é ignorado pela EECU, portanto, a temperatura dos gases de escape aquece lentamente o sensor. A EECU opera com os valores genéricos de cálculo de combustível, o que pode levar ao enriquecimento da mistura ar/combustível (adiciona mais combustível do que o necessário para combustão estequiométrica), ou empobrecimento da mesma. Quando o motor atinge a temperatura de trabalho, a EECU passa a considerar o sinal do sensor e o motor passa a traba-

lhar em malha fechada. Quando o elemento atinge a temperatura de trabalho de aproximadamente 300°C, torna-se eletricamente condutor de íons de oxigênio ocorrendo a difusão do oxigênio do ar devido à diferença de pressão parcial de oxigênio. O oxigênio que está localizado onde há alta pressão tende a se deslocar para onde há baixa pressão. Isto é, em uma mistura rica, a pressão parcial de oxigênio é menor do que a do ar de referência. O oxigênio tende a partir do interior do sensor (ar de referência) para os gases de escape.

Depois que a temperatura de trabalho é atingida, a função do sensor de oxigênio é comparar a quantidade de oxigênio do gás de exaustão com o ar de referência e enviar um sinal à EECU (tensão de saída) em função da diferença encontrada entre as duas quantidades (exaustão-referência). Ao receber o sinal do sensor, a EECU processa os dados e altera a mistura ajustando a quantidade de combustível, a fim de melhorar a eficiência do motor, trabalhando próximo à mistura estequiométrica. Com o sensor de oxigênio, é possível determinar se o motor está funcionando com muito combustível (mistura rica) ou pouco combustível (mistura pobre).

## A.2.2 Sensor de fluxo de massa de ar

O sensor de fluxo de massa de ar MAF (sigla em inglês para *mass air flow*) é o sensor responsável pela medição direta da massa de ar admitida. O MAF fica instalado logo após o filtro de ar e antes da borboleta de aceleração. É utilizado um medidor de massa por meio de um elemento quente, que pode ser um fio ou filme aquecido. A medida que o ar passa pelo fio aquecido ou pela superfície do filme aquecido, ocorre uma troca de calor entre o elemento quente (MILHOR, 2002). O método de medição de admissão de ar via sensor MAF é o método mais preciso e moderno, contudo, nem todos os veículos produzidos optam por utilizar essa tecnologia, por ser mais caro e sensível do que outro método, como o *speed-density*<sup>1</sup>. A Figura 28 apresenta uma ilustração dos diversos tipos de sensores MAF.

---

<sup>1</sup>O método *speed-density* (rotação x densidade) é uma medição indireta do fluxo de massa de ar, obtido através da temperatura e pressão do ar no coletor de admissão. Nesse caso, para estimar o fluxo de massa de ar é utilizado o sensor MAP (do inglês *manifold absolute pressure*).

Figura 28: Sensores de fluxo de massa de ar. Fonte: Gomes (2016)



### A.3 GERENCIAMENTO E CALIBRAÇÃO DE MOTORES

O controle eletrônico dos motores passou a ser utilizado em veículos no Brasil pela Volkswagen no final da década de 80 (BARTOLOMAIS, 1989). Já no início da década de 90 todas as montadoras já utilizavam o sistemas de injeção eletrônica de combustível.

O gerenciamento eletrônico do motor através de sua estratégia, controla a relação lambda. Dadas as condições de funcionamento do veículo, a EECU irá controlar a quantidade de injeção de combustível na câmara de combustão em função da massa de ar admitida. Em condições de funcionamento normal, a relação ar/combustível real sempre tende a razão estequiométrica. Denton (2004) classifica as diferentes relações de ar-combustível como: partida, aquecimento (*warm-up*), marcha lenta, cargas parciais, plena carga, aceleração rápida e desaceleração.

As decisões tomadas na EECU são determinadas por mapas que nas quais, contém os valores de injeção ou avanço de ignição para o melhor desempenho do motor sob determinada situação. Cada decisão tomada será uma função das variáveis principais do controle do motor.



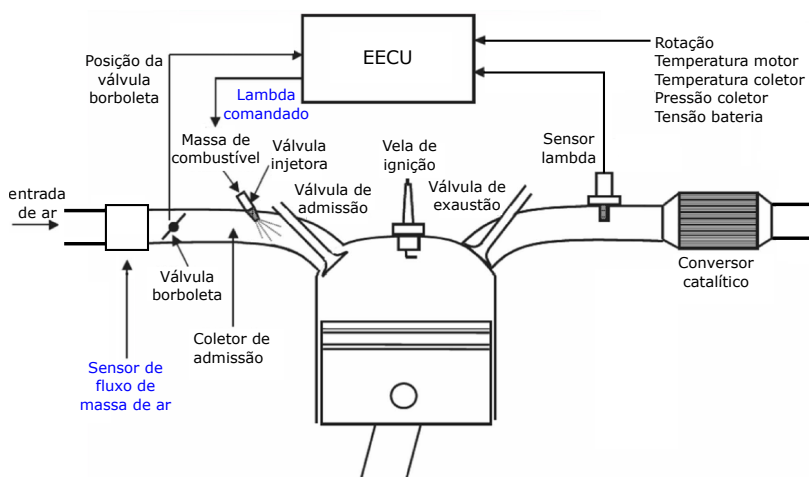
A calibração do motor prepara o veículo para apresentar o melhor desempenho para uma dada condição de uso (veículos com mais ou menos potência, economia, poluentes emitidos, etc.), e consiste em trabalhar com diversos mapas de operação numa EECU (GOMES, 2016).

#### A.4 VISÃO GERAL DOS PROBLEMAS DE CONTROLE DE UM MOTOR DE IGNIÇÃO POR CENTELHA

A maioria dos veículos modernos de passeio no Brasil estão equipados com motores ciclo Otto *Flex*. A combustão pré-misturada e estequiométrica do processo permite uma purificação dos gases de exaustão extremamente eficiente juntamente com um conversor catalítico de três vias. Um sistema típico de controle de injeção de tal motor é mostrado na Figura 29. O torque de um motor de ignição por centelha é controlado pela quantidade de ar/combustível no cilindro, durante cada tempo do motor.

A razão ar-combustível é a variável controlada do sistema de controle de combustível, e é controlada pela injeção de combustível nos cilindros. Um sensor de fluxo de massa de ar é usado e o injetor de combustível é o atuador. Um controle ótimo é utilizado para manter

Figura 29: Caminho da mistura ar/combustível em um motor de ignição por centelha. Fonte: Adaptado de Gomes (2016)



a mistura de ar e combustível em estequiometria (razão ar/gasolina = 14,7). Essa referência de 14,7 partes de ar para uma parte de combustível é utilizada pois em conjunto com um conversor catalítico, proporciona um desempenho próximo ao ótimo em um motor. Deste modo, um controle preciso da razão ar-combustível é importante do ponto de vista da redução de emissões e redução do consumo de combustível.

O sensor lambda é altamente não-linear mas produz uma tensão proporcional à quantidade de oxigênio existente nos gases de exaustão. Por sua vez, isso indica se a mistura ar-combustível é rica ( $\lambda < 1$ ), pobre ( $\lambda > 1$ ) ou estequiométrica ( $\lambda = 1$ ). O tempo de resposta do sensor para uma mudança de tensão em lambda é cerca de 300 ms.

O motorista regula a quantidade de ar  $\dot{m}_a$  que entra nos cilindros através do pedal do acelerador e a quantidade de combustível correta  $\dot{m}_f$  deve ser adicionado pelo controlador e um sensor lambda fornece a informação necessária para o controle realimentado.

Um controlador PI é normalmente utilizado para essa aplicação. No entanto, a não-linearidade do sensor lambda é um problema, e há um interesse considerável no desenvolvimento de um sensor linear de baixo custo para ser utilizado no controle do lambda. A variação dos parâmetros do modelo também criou um interesse considerável em controladores de lambda adaptativos, que podem estimar os parâmetros durante a operação. Além disso, a medição realizada com o sensor lambda é um valor médio de lambda para o motor; investigação para controlar o valor do lambda em cada cilindro é também de interesse (ULSOY; PENG; ÇAKMACI, 2012).

## A.5 ESTRATÉGIAS DO USO DO LAMBDA NO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

Para cargas parciais, o motor roda em condição de malha fechada. A única exceção é durante os gradientes no pedal do acelerador, em que ocorre um enriquecimento de combustível. Há ainda uma terceira condição denominada *cut-off* em que não há injeção de combustível. A estratégia funciona com o fechamento da borboleta de aceleração e o aumento da rotação do motor, que resultam no corte do combustível (ALESSANDRINI; FILIPPI; ORTENZI, 2004). Na condição de *cut-off*, o valor de lambda é igual a 2 e não se aplica a estimação do fluxo mássico de combustível por meio de (3.2). Ao longo de um percurso em vias urbanas ou rodovias, o consumo de combustível é igual a zero nas situações em que a carga do motor é baixa, ocorrendo tipicamente

durante as desacelerações, ou ainda a velocidades constantes quando a inércia do veículo for maior do que potência exigida.

## A.6 ESTEQUIOMETRIA E EMISSÕES

A Figura 30 mostra o valor de estequiometria fornece um desempenho próximo ao ótimo em um motor, isto é, torque do motor (T) próximo do máximo e consumo específico de frenagem (BSFC) próximo do mínimo, entretanto, a emissão de óxido de nitrogênio (NOx) é maximizada. O BSFC consiste no consumo de combustível ao longo do tempo por unidade de potência desenvolvida pelo motor. Nele o seu valor máximo é quando o motor funciona no regime mínimo de rotação, pois a potência desenvolvida é mínima. A quantidade de combustível a ser injetado é definido a partir de ensaios a uma velocidade de rotação e potência regulares. O consumo específico é utilizado como para comparar níveis de economia de combustível (GOMES, 2016).

A importância do conversor catalítico, encontrado na maioria dos veículos modernos, é apresentada na Figura 31. Na Figura é ilustrado que em uma banda estreita em torno do ponto de mistura estequiométrica a eficiência de conversão também é muito alta para as emissões de HC, CO, NOx. Portanto, um sistema de controle de razão de ar-combustível preciso é muito importante do ponto de vista de redução das emissões, assim como outras medidas de desempenho (ULSOY; PENG; ÇAKMACI, 2012).

Figura 30: Efeito da razão ar-combustível no desempenho do motor.  
 Fonte: Adaptado de Ulsoy, Peng e Çakmaci (2012)

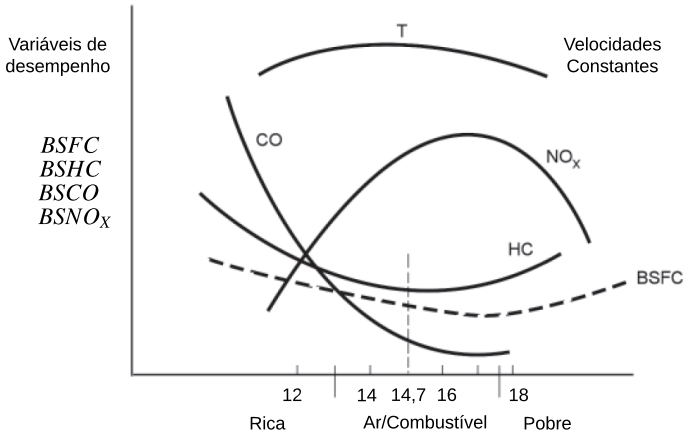
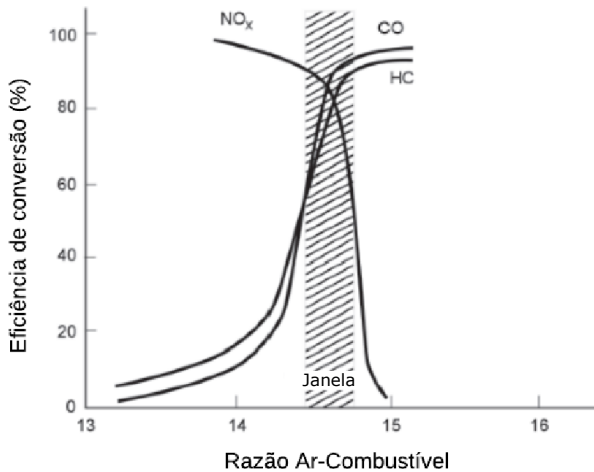


Figura 31: Eficiência de conversão de um conversor catalítico. Fonte: Adaptado de Ulsoy, Peng e Çakmaci (2012)



## APÊNDICE B – Sistemas *Stop/Start*



O *stop/start* é um sistema que desliga o motor de forma instantânea quando o carro encontra-se parado por alguns segundos e volta a ligá-lo quando o freio é aliviado. Esse sistema originou-se no Japão com a marca Toyota em meados da década de 70, quando a crise do petróleo abalou o mundo e o preço do barril subiu mais de 300% em poucas semanas. Em busca de alternativas para poupar combustível, as montadoras acabaram desenvolvendo esse sistema, o qual não foi popularizado na época em função dos motores demorarem a ligar, apresentarem muitas falhas e, principalmente, porque naquela época ainda não existia ainda a injeção eletrônica (VALEO, 2016).

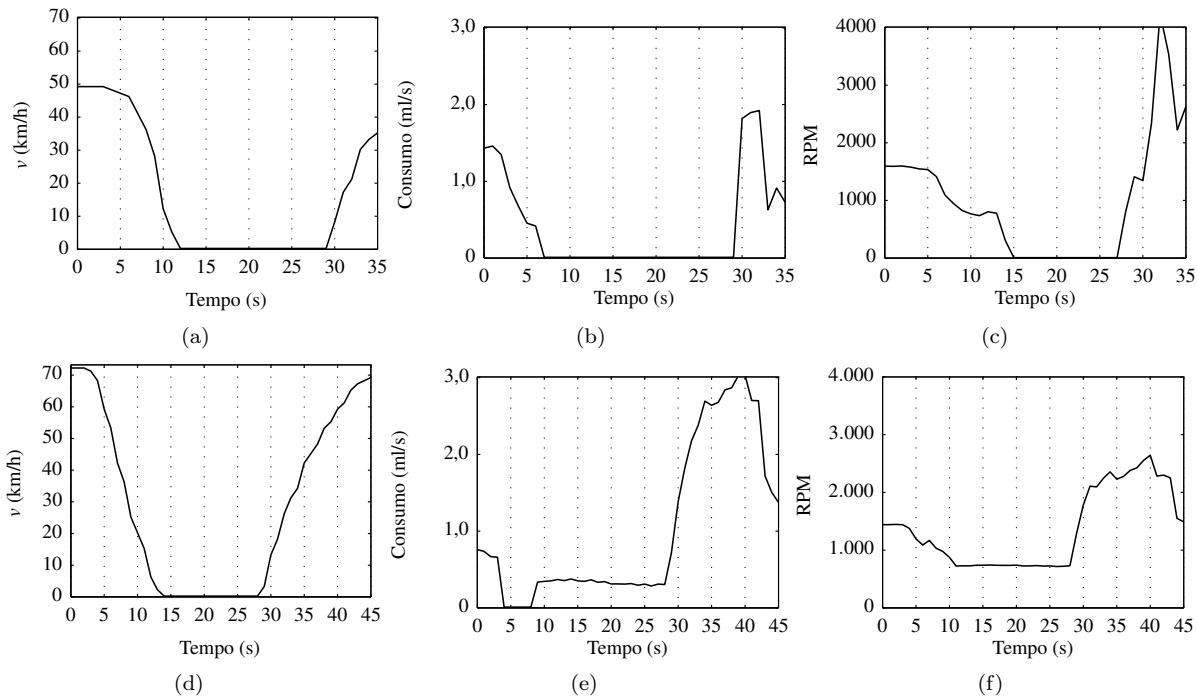
O *stop/start* utiliza um controlador para monitorar a carga da bateria e a partida e parada do motor. Para o *Stop/Start* entrar em funcionamento, o veículo precisa estar parado e com a rotação do motor em marcha lenta, então, o sistema zera a rotação do motor quando o veículo para no semáforo ou em uma condição de tráfego congestionado, por exemplo, e o consumo de combustível é, de fato, igual a zero (OWENS; LAUGHLIN, 2016).

As Figuras 32 (a)–(c) mostram os dados de velocidade, consumo de combustível e rotação do motor, para um veículo Golf TSI ano 2014 (modelo 2015) com a tecnologia *Stop/Start*, em um movimento de desaceleração - parada - aceleração. As Figuras 32 (d)–(f) mostram um movimento semelhante, mas com velocidades iniciais e finais diferentes, para um veículo sem a tecnologia *Stop/Start* (Honda Civic, usado para coleta de dados na calibração dos modelos de consumo). Observa-se que quando o veículo para, o consumo de combustível no caso com *Stop/Start* é igual a zero, enquanto que para o caso sem *Stop/Start*, o motor continua em funcionamento com uma taxa de consumo de combustível de marcha lenta.





Figura 32: (a) Velocidade, (b) consumo e (c) rotações por minuto (RPM) para um veículo equipado com a tecnologia *start-stop* e (d) velocidade, (e) consumo e (f) RPM para um veículo sem *Stop/Start* na vizinhança de uma interseção semaforizada





**APÊNDICE C - Calibração e validação dos modelos de  
consumo de combustível para outros tipos de veículos**



A calibração de um modelo de consumo de combustível é válida para um tipo específico de veículo. Com efeito, para que haja uma melhor estimativa do consumo de combustível em uma simulação, vários tipos de veículos devem ser utilizados para a calibração do modelo.

### C.1 VEÍCULOS UTILIZADOS PARA COLETA DE DADOS

A Figura 33 mostra a foto dos veículos utilizados na coleta de dados. Também são apresentadas informações de marca/modelo, motorização e o ano do modelo de cada veículo.

Figura 33: Veículos utilizados na coleta de dados



(a) Veículo 1: Honda Civic motor 1.8 l ano 2013



(b) Veículo 2: Ford Fusion motor 2.4 l ano 2015



(c) Veículo 3: Ford Fiesta motor 1.0 l ano 2011



(d) Veículo 4: Volkswagen Saveiro motor 1.6 l ano 2015

## C.2 DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E RESULTADOS

Os gráficos apresentados nesta seção são referentes à calibração e validação dos modelos de consumo de combustível apresentados, para os três outros veículos com motorização diferentes do veículo 1. Utilizam-se os mesmos métodos apresentados nos Capítulos 3, 4 e 5 para aquisição de dados, calibração e validação, respectivamente.

Embora o método utilizado para aquisição de dados seja o mesmo, a quantidade de dados adquiridos para os outros veículos foi limitada, isso por conta da disponibilidade dos veículos para instrumentação e realização dos testes. Em específico, nos testes de aquisição de dados em regime permanente, foram realizadas medições a cada 10 km/h, e não a cada 5 km/h, como feito para o veículo 1. Na aquisição de dados em ciclos de condução, quatro ciclos foram percorridos de cada veículo, no ciclo de condução escolhido na cidade de Curitiba/PR. Posteriormente, os dados desses ciclos foram divididos em: três ciclos para calibração e um ciclo para validação<sup>1</sup>. Também não foram realizados os testes de validação para velocidades constantes, apresentados para o veículo 1 na Seção 4.1.2.

Os dados foram coletados na Av. Linha Verde em Curitiba/PR, cujo trajeto é apresentado na Figura 34, considerando um cenário com tráfego intenso. O trajeto com 9 km de extensão foi escolhido por ter pouca variação do relevo, coordenação semafórica e por ser uma região em que há congestionamentos nos horários de pico e, portanto, é uma região que motiva o estudo de consumo de combustível.

Os modelos de consumo de combustível apresentados no Capítulo 2 foram utilizados para estimar o combustível consumido ao longo do ciclo da Figura 34, a partir dos coeficientes obtidos via método de calibração específico, apresentados resumidamente no Capítulo 5 (C-Ak, C-CB, C-CC, C-PdC, C-POT).

Os gráficos e tabelas a seguir são apresentados em sequência para os veículos Ford Fusion (2), Ford Fiesta (3) e Volkswagen Saveiro (4). A calibração dos modelos para velocidades constantes são apresentadas nas Figuras 35–37 para C-Ak e nas Figuras 38–40 para C-CB. A calibração através do cálculo dos coeficientes (C-CC) é feita pelas fórmulas (3.4) e (3.5). As Figuras 41–43 apresentam os gráficos da calibração do modelo para acelerações (2.10). Para a calibração com dados de consumo do próprio ciclo de condução (C-PdC), as Figuras 44–46 apresentam os resultados da calibração do modelo (2.9) para ve-

---

<sup>1</sup>Lembrar que o veículo 1 percorreu o trajeto na Av. Beira-mar Norte vinte vezes, em dois cenários de tráfego diferentes.

locidades constantes, e as Figuras 47–49 apresentam os resultados para acelerações (2.10).

Para os modos marcha lenta e desaceleração, as taxas de consumo de combustível foram estimadas de acordo com o método apresentado nas Seções 4.1.1 e 4.1.4, respectivamente. As taxas de consumo de combustível em marcha lenta ( $F_i$ ) podem ser usadas para observar o consumo mínimo que acontece em marcha lenta, e aumenta proporcionalmente com o tamanho dos motores dos veículos. Em testes de regime permanente, a taxa de consumo de combustível medida em marcha lenta foi de  $F_i = 0,2601$  ml/s para o veículo Ford Fiesta motor 1.0 l,  $F_i = 0,3339$  ml/s para Volkswagen Saveiro motor 1.6 l e  $F_i = 0,5229$  ml/s para Ford Fusion motor 2.4 l.

Para o modelo baseado em potência (C-POT), as Figuras 50–52 apresentam os resultados da calibração para o modo velocidades constantes.

As Tabelas 11, 12 e 13, apresentam os resultados obtidos da calibração dos modelos para cada veículo.

As Figuras 53–55 ilustram o perfil de velocidades e consumos de combustível estimados, ao longo do ciclo de condução da Figura 34. As Figuras 56–58 apresentam parte do perfil temporal dos valores de consumo de combustível medido e estimados.

Para a validação da implementação dos modelos, as Tabelas 14, 16 e 18 apresentam os valores de consumo de combustível, raiz da média quadrática dos erros e tempo, para cada modo de condução ao longo do ciclo. As Tabelas 15, 17 e 19 apresentam os valores de consumo de combustível global, coeficiente de determinação e raiz da média quadrática dos erros, para o ciclo completo.

Figura 34: Percurso do ciclo de condução na Av. Linha Verde em Curitiba/PR





Figura 35: Calibração do modelo (2.3) para velocidades constantes segundo Akçelik (1983) - dados de regime - veículo 2

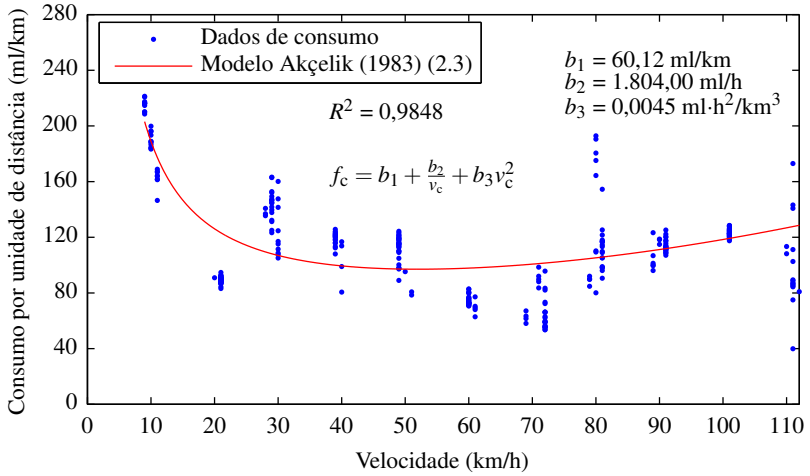


Figura 36: Calibração do modelo (2.3) para velocidades constantes segundo Akçelik (1983) - dados de regime - veículo 3

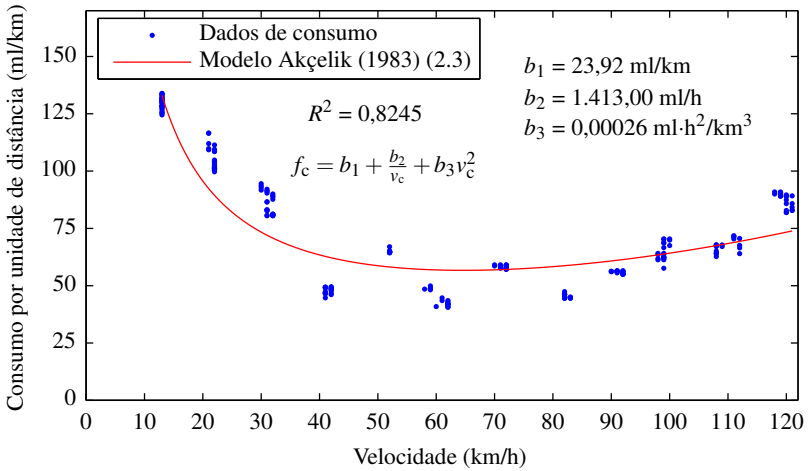


Figura 37: Calibração do modelo (2.3) para velocidades constantes segundo Akçelik (1983) - dados de regime - veículo 4

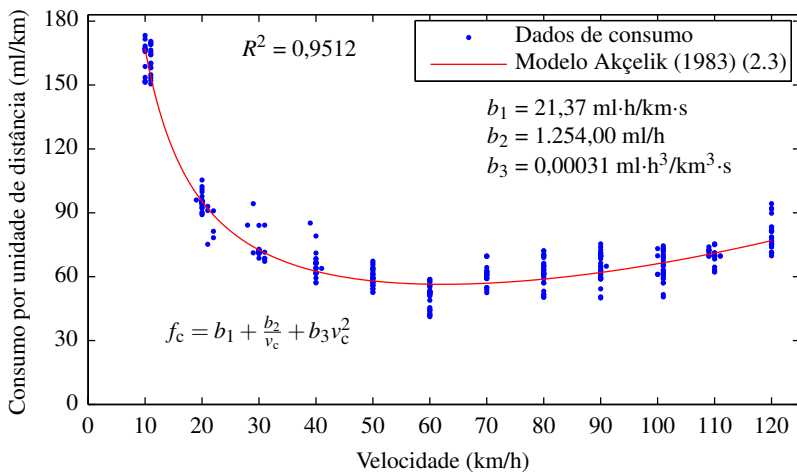


Figura 38: Calibração do modelo (2.9) para velocidades constantes, segundo o manual do simulador AIMSUN TSS (2015) - dados de regime - veículo 2

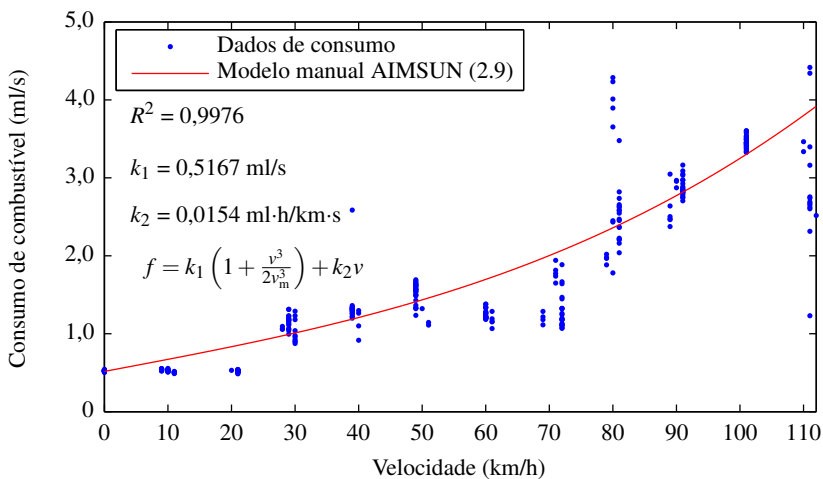


Figura 39: Calibração do modelo (2.9) para velocidades constantes, segundo o manual do simulador AIMSUN TSS (2015) - dados de regime - veículo 3

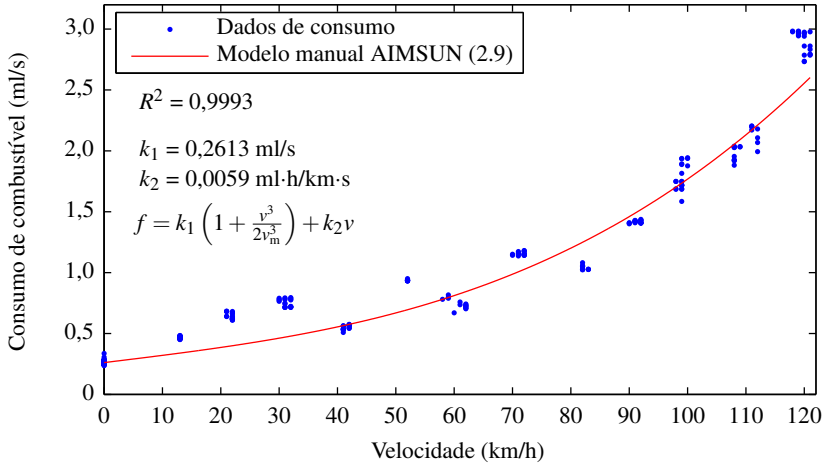


Figura 40: Calibração do modelo (2.9) para velocidades constantes, segundo o manual do simulador AIMSUN TSS (2015) - dados de regime - veículo 4

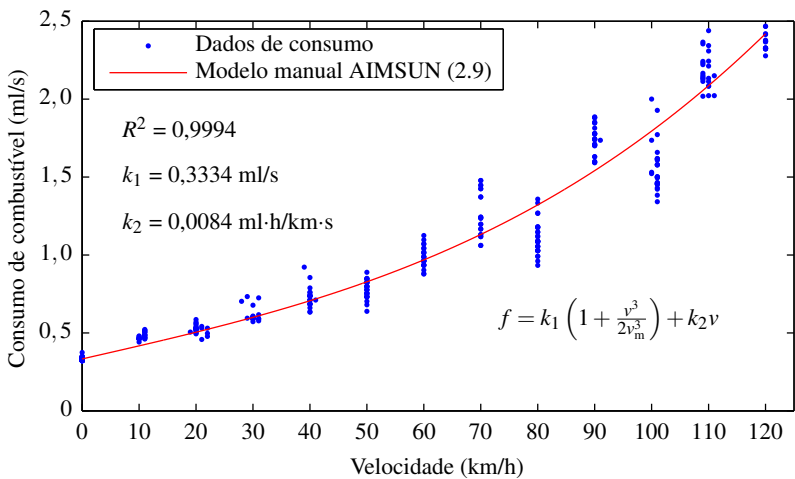


Figura 41: Calibração do modelo de consumo de combustível do AIM-SUN para acelerações constantes (2.10) - dados de regime - veículo 2

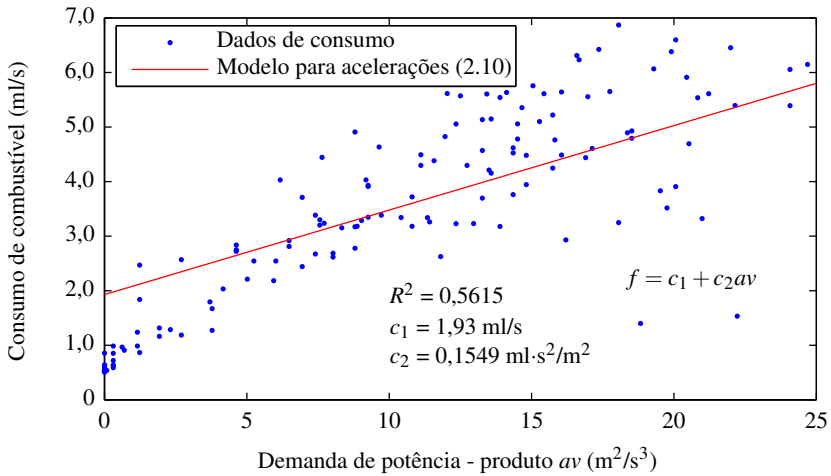


Figura 42: Calibração do modelo de consumo de combustível do AIM-SUN para acelerações constantes (2.10) - dados de regime - veículo 3

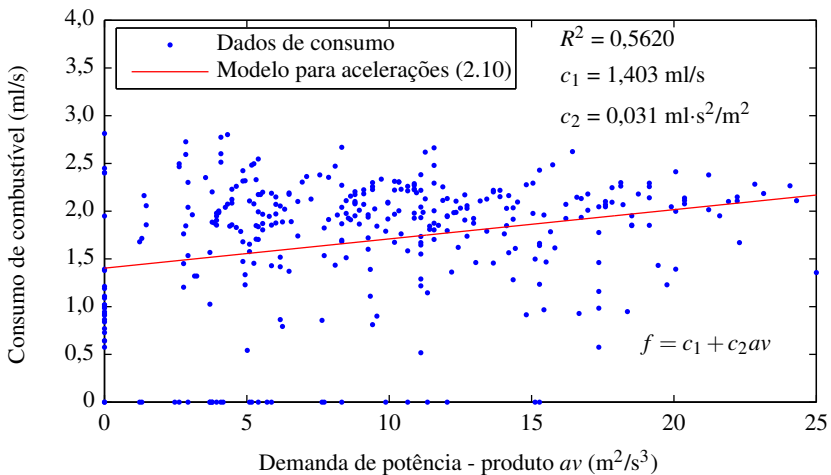


Figura 43: Calibração do modelo de consumo de combustível do AIMSUN para acelerações constantes (2.10) - dados de regime - veículo 4

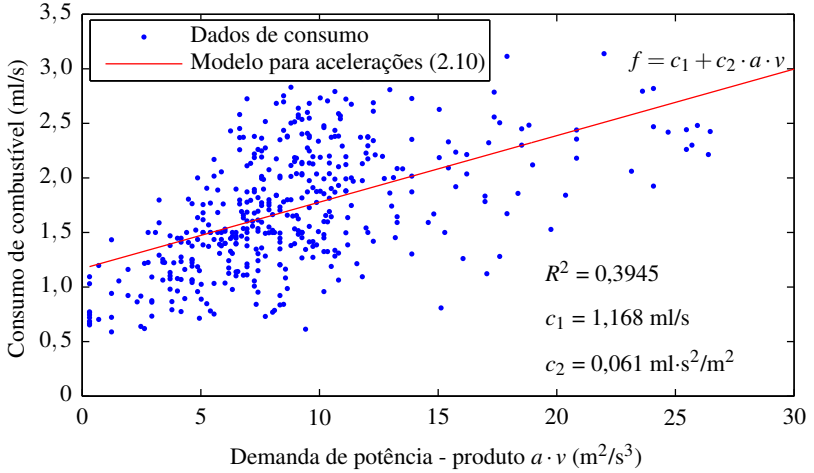


Figura 44: Calibração do modelo (2.9) para velocidades constantes com dados de consumo do próprio ciclo - veículo 2

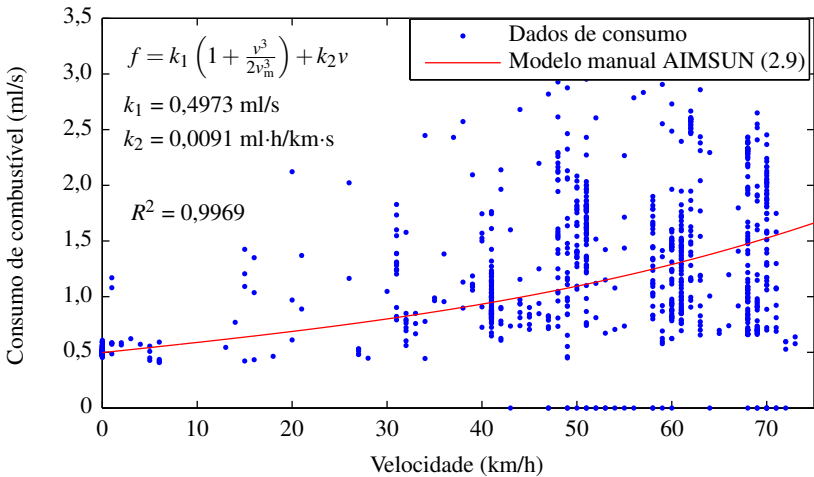


Figura 45: Calibração do modelo (2.9) para velocidades constantes com dados de consumo do próprio ciclo - veículo 3

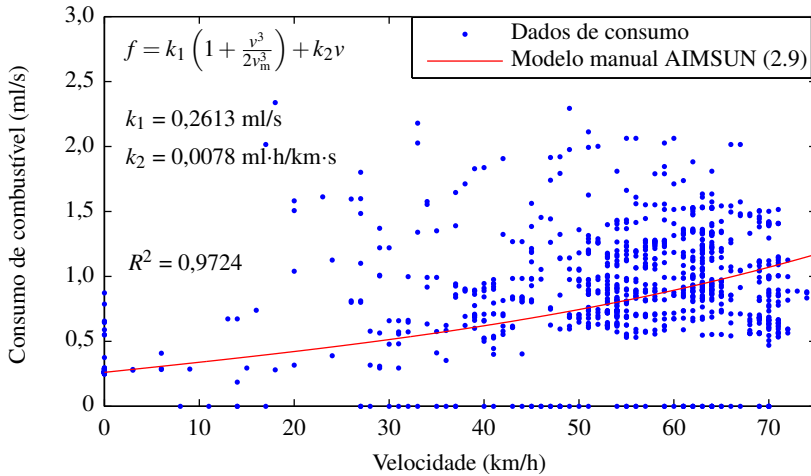


Figura 46: Calibração do modelo (2.9) para velocidades constantes com dados de consumo do próprio ciclo - veículo 4

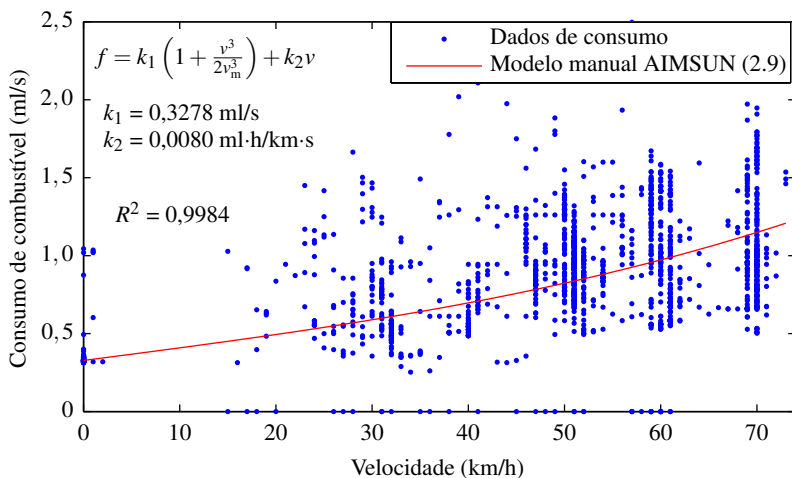


Figura 47: Calibração do modelo (2.10) para acelerações com dados de consumo do próprio ciclo - veículo 2

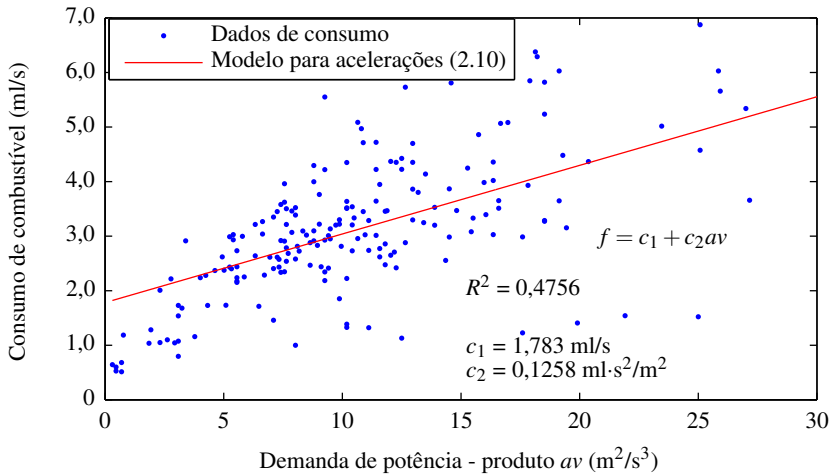


Figura 48: Calibração do modelo (2.10) para acelerações com dados de consumo do próprio ciclo - veículo 3

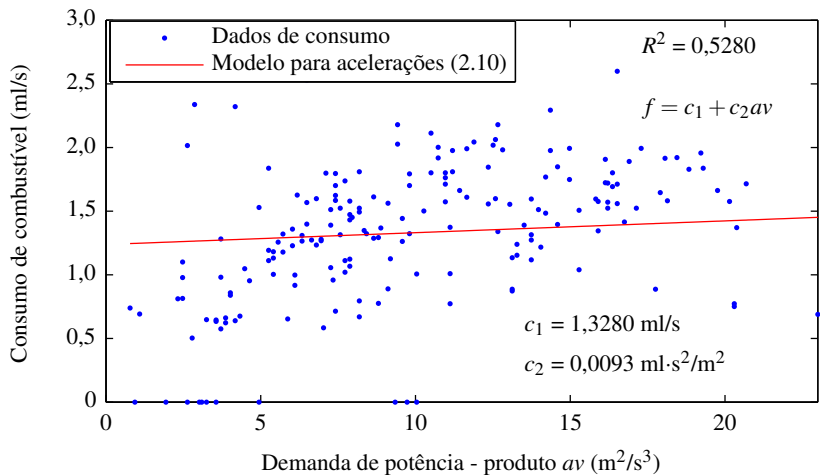


Figura 49: Calibração do modelo (2.10) para acelerações com dados de consumo do próprio ciclo - veículo 4

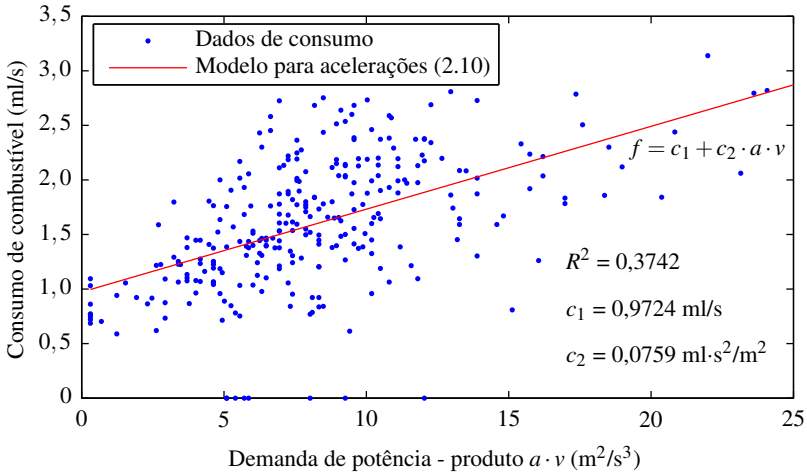


Figura 50: Calibração do modelo baseado em potência (3.6) para velocidades constantes - veículo 2

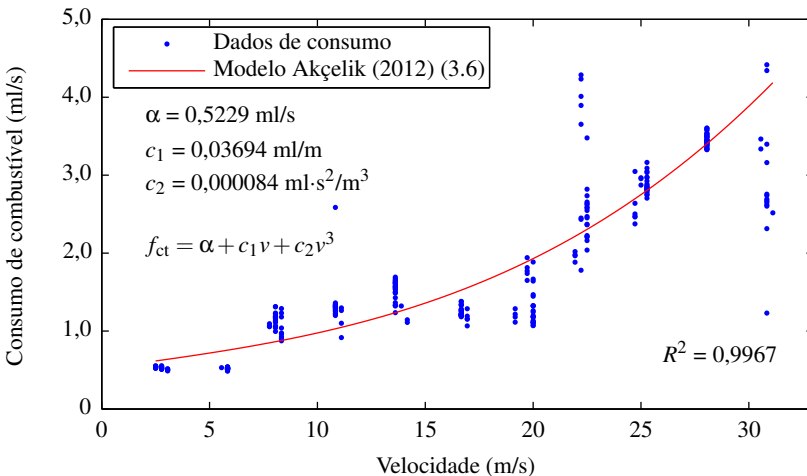




Figura 51: Calibração do modelo baseado em potência (3.6) para velocidades constantes - veículo 3

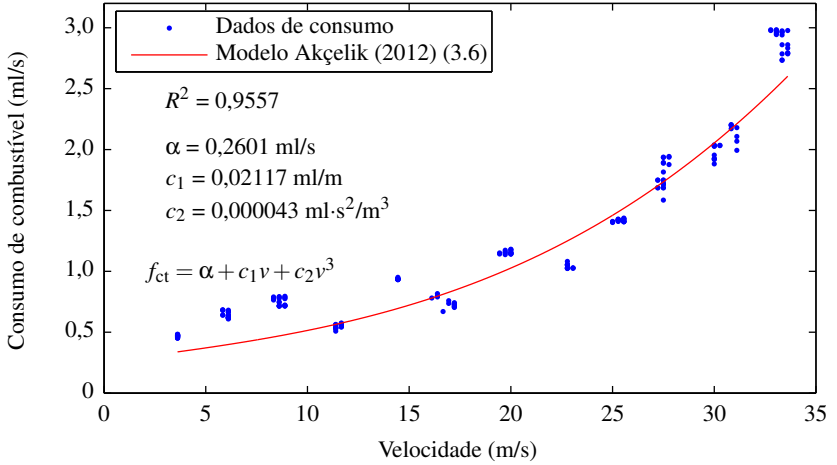


Figura 52: Calibração do modelo baseado em potência (3.6) para velocidades constantes - veículo 4

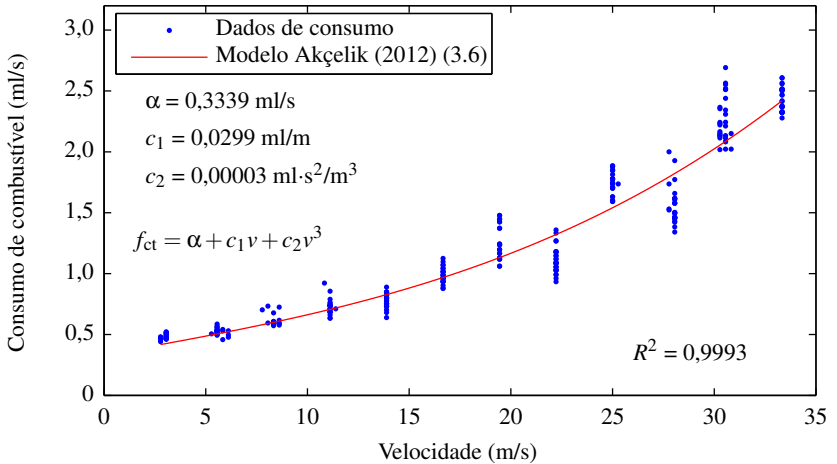


Tabela 11: Coeficientes da calibração dos modelos de consumo de combustível para o veículo 2 - Ford Fusion 2.4 l

Coeficientes da calibração Akcelik (1983)	Coeficientes da calibração AIMSUN TSS (2015)	Coeficientes obtidos via cálculo AIMSUN TSS (2015)
$k_1 = 0,5011$ ml/s	$k_1 = 0,5167$ ml/s	$k_1 = 0,5487$ ml/s
$k_2 = 0,016$ ml·h/km·s	$k_2 = 0,0154$ ml·h/km·s	$k_2 = 0,0118$ ml·h/km·s
$k_3 = 1,25 \cdot 10^{-6}$ ml·h <sup>3</sup> /km <sup>3</sup> ·s	$v_m = 64,42$ km/h	$v_m = 60$ km/h
-	-	$F_1 = 11,252$ l/100 km
-	-	$F_2 = 14,443$ l/100 km
	$F_i = 0,5229$ ml/s	
	$F_d = 0,2739$ ml/s	
	$c_1 = 1,93$ ml/s	
	$c_2 = 0,1549$ ml·s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	
Coeficientes da calibração com dados do ciclo AIMSUN TSS (2015)	Coeficientes da calibração modelo baseado em potência Akcelik et al. (2012)	
$k_1 = 0,4973$ ml/s	$\alpha = 0,5229$ ml/s	
$k_2 = 0,0091$ ml·h/km·s	$\beta = 0,0974$ ml/kJ	
$v_m = 60$ km/h	$b_1 = 0,3793$ kN	
$F_i = 0,5008$ ml/s	$b_2 = 0,0009$ kN/(m/s) <sup>2</sup>	
$F_d = 0,3122$ ml/s	$M_v = 2300$ kg	
$c_1 = 1,783$ ml/s	$c_1 = 0,03694$ ml/m	
$c_2 = 0,1258$ ml·s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	$c_2 = 8,4 \cdot 10^{-5}$ (ml·s <sup>2</sup> )/m <sup>3</sup>	

Tabela 12: Coeficientes da calibração dos modelos de consumo de combustível para o veículo 3 - Ford Fiesta 1.0 l

Coeficientes da calibração Akcelik (1983)	Coeficientes da calibração AIMSUN TSS (2015)	Coeficientes obtidos via cálculo AIMSUN TSS (2015)
$k_1 = 0,3925$ ml/s	$k_1 = 0,2613$ ml/s	$k_1 = 0,3040$ ml/s
$k_2 = 0,0067$ ml·h/km·s	$k_2 = 0,0059$ ml·h/km·s	$k_2 = 0,0081$ ml·h/km·s
$k_3 = 7 \cdot 10^{-8}$ ml·h <sup>3</sup> /km <sup>3</sup> ·s	$v_m = 54,15$ km/h	$v_m = 60$ km/h
-	-	$F_1 = 6,183$ l/100 km
-	-	$F_2 = 7,475$ l/100 km
	$F_i = 0,2601$ ml/s	
	$F_d = 0,2524$ ml/s	
	$c_1 = 1,403$ ml/s	
	$c_2 = 0,031$ ml·s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	
Coeficientes da calibração com dados do ciclo AIMSUN TSS (2015)	Coeficientes da calibração modelo baseado em potência Akcelik et al. (2012)	
$k_1 = 0,2613$ ml/s	$\alpha = 0,2601$ ml/s	
$k_2 = 0,0078$ ml·h/km·s	$\beta = 0,0803$ ml/kJ	
$v_m = 60$ km/h	$b_1 = 0,2636$ kN	
$F_i = 0,3879$ ml/s	$b_2 = 0,00054$ kN/(m/s) <sup>2</sup>	
$F_d = 0,1559$ ml/s	$M_v = 1300$ kg	
$c_1 = 1,328$ ml/s	$c_1 = 0,02117$ ml/m	
$c_2 = 0,0093$ ml·s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	$c_2 = 4,3 \cdot 10^{-5}$ (ml·s <sup>2</sup> )/m <sup>3</sup>	

Tabela 13: Coeficientes da calibração dos modelos de consumo de combustível para o veículo 4 - VW Saveiro 1.6 l

Coefficientes da calibração Akcelik (1983)	Coefficientes da calibração AIMSUN TSS (2015)	Coefficientes obtidos via cálculo AIMSUN TSS (2015)
$k_1 = 0,3483$ ml/s	$k_1 = 0,3334$ ml/s	$k_1 = 0,3296$ ml/s
$k_2 = 0,006$ ml·h/km·s	$k_2 = 0,0084$ ml·h/km·s	$k_2 = 0,0081$ ml·h/km·s
$k_3 = 8,6 \cdot 10^{-8}$ ml·h <sup>3</sup> /km <sup>3</sup> ·s	$v_m = 64,22$ km/h	$v_m = 60$ km/h
-	-	$F_1 = 6,454$ l/100 km
-	-	$F_2 = 7,885$ l/100 km
	$F_i = 0,3339$ ml/s	
	$F_d = 0,5123$ ml/s	
	$c_1 = 1,116$ ml/s	
	$c_2 = 0,061$ ml·s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	
Coefficientes da calibração com dados do ciclo AIMSUN TSS (2015)	Coefficientes da calibração modelo baseado em potência Akcelik et al. (2012)	
$k_1 = 0,3278$ ml/s	$\alpha = 0,3339$ ml/s	
$k_2 = 0,0080$ ml·h/km·s	$\beta = 0,0764$ ml/kJ	
$v_m = 60$ km/h	$b_1 = 0,3914$ kN	
$F_i = 0,3343$ ml/s	$b_2 = 0,0004$ kN/(m/s) <sup>2</sup>	
$F_d = 0,5413$ ml/s	$M_v = 1500$ kg	
$c_1 = 0,9724$ ml/s	$c_1 = 0,0299$ ml/m	
$c_2 = 0,0759$ ml·s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	$c_2 = 3 \cdot 10^{-5}$ (ml·s <sup>2</sup> )/m <sup>3</sup>	

Figura 53: Perfil de velocidades e consumos de combustível ao longo do ciclo de condução na Av. Linha Verde em Curitiba/PR - veículo 2

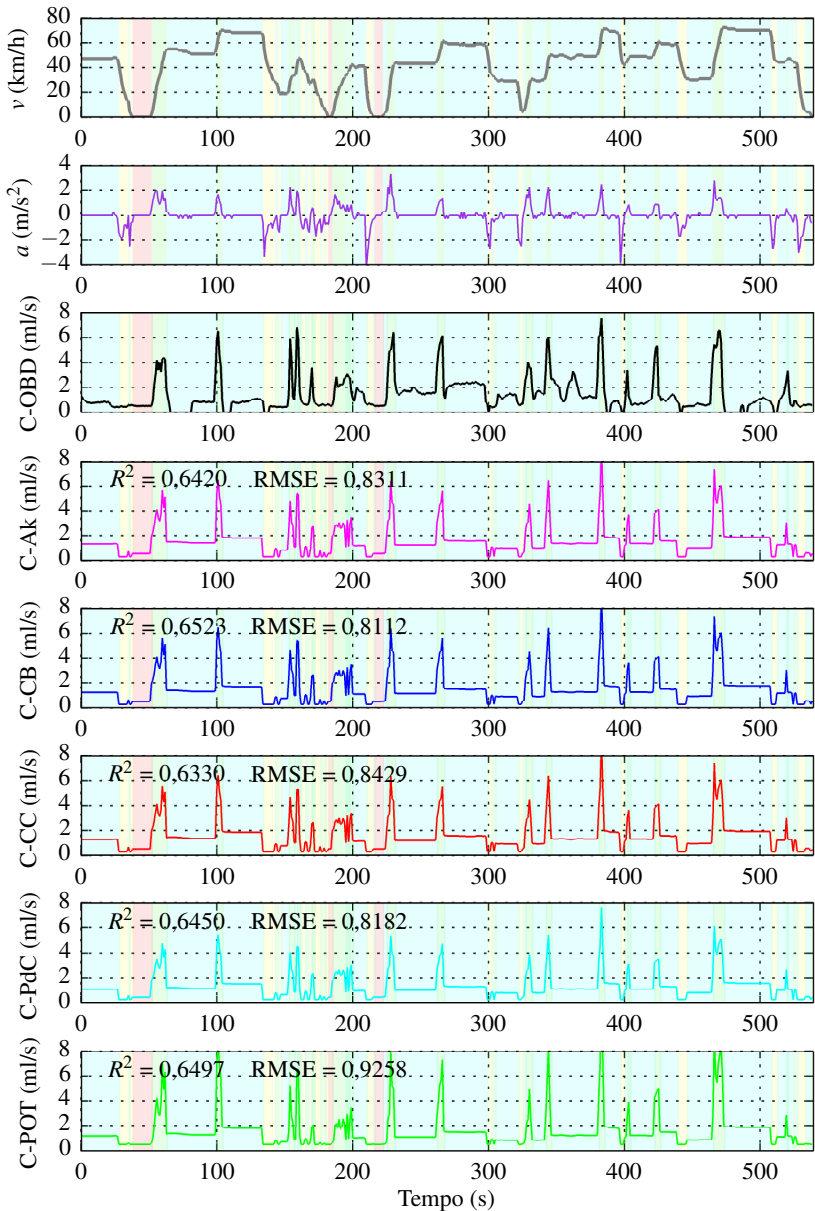


Figura 54: Perfil de velocidades e consumos de combustível ao longo do ciclo de condução na Av. Linha Verde em Curitiba/PR - veículo 3

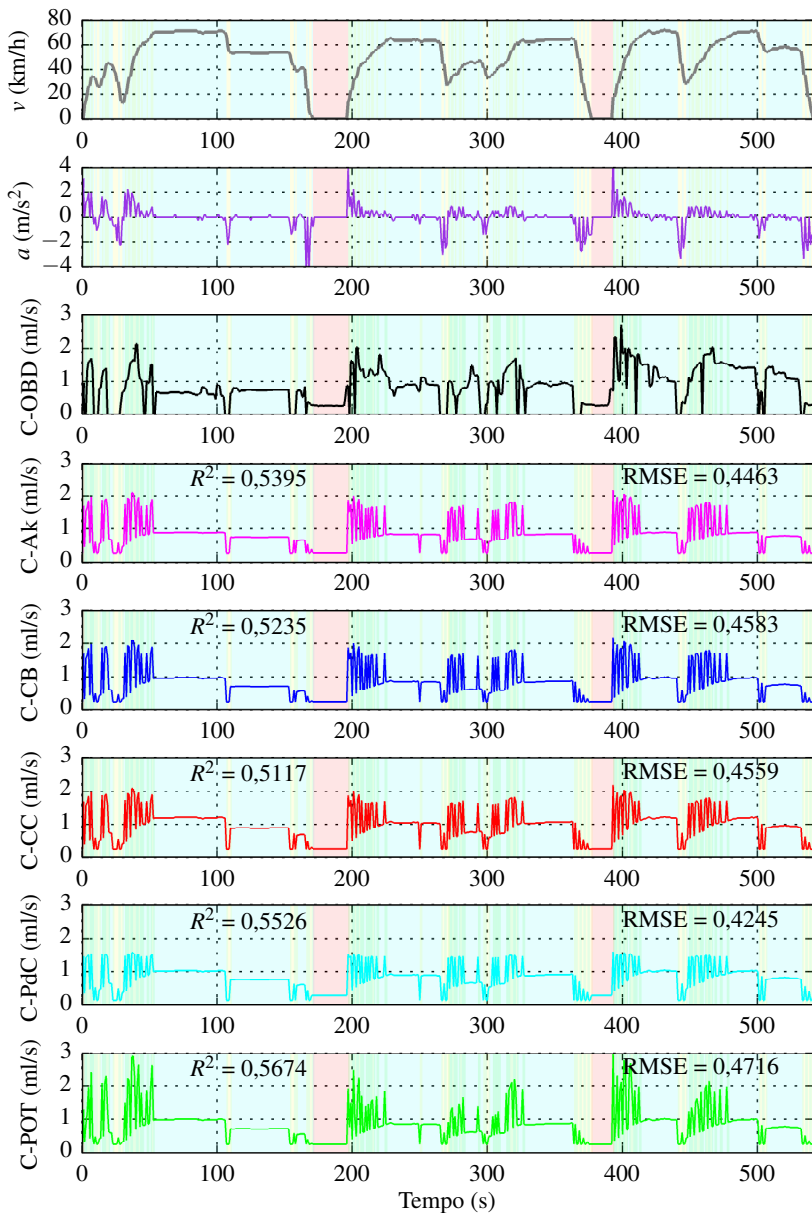


Figura 55: Perfil de velocidades e consumos de combustível ao longo do ciclo de condução na Av. Linha Verde em Curitiba/PR - veículo 4

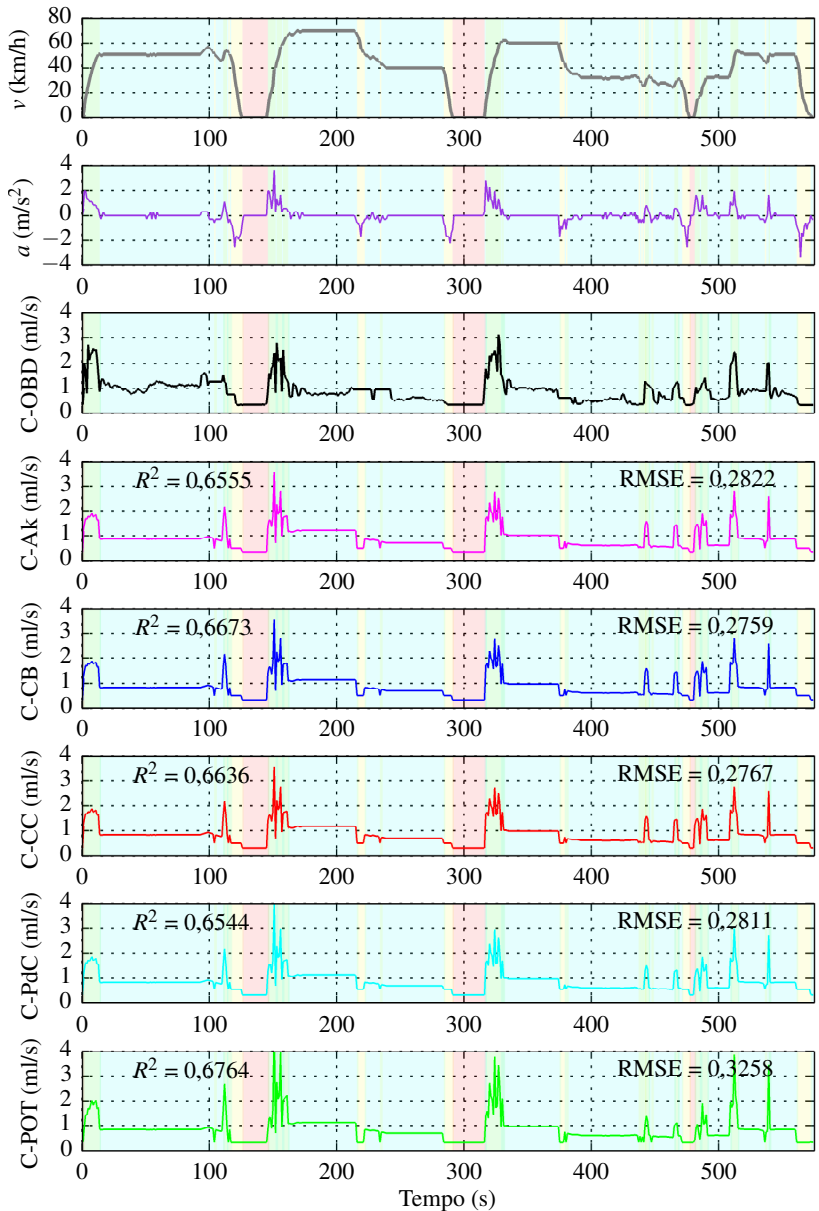


Figura 56: Parte do perfil temporal dos valores de consumo de combustível medido e estimados - veículo 2

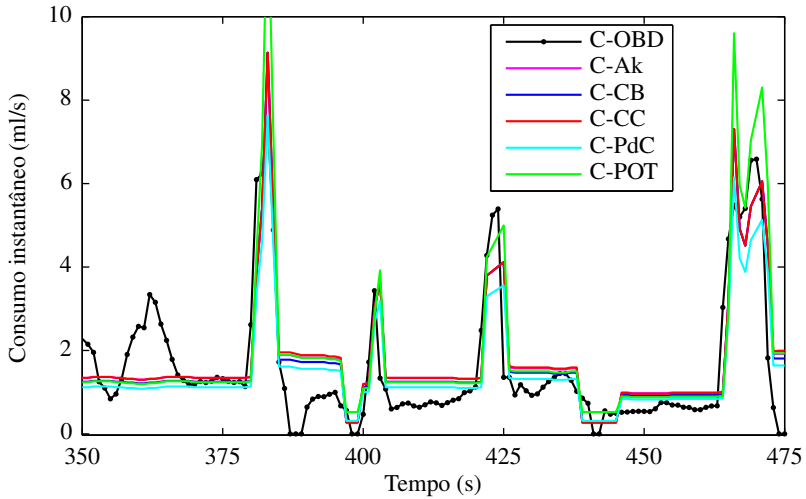


Figura 57: Parte do perfil temporal dos valores de consumo de combustível medido e estimados - veículo 3

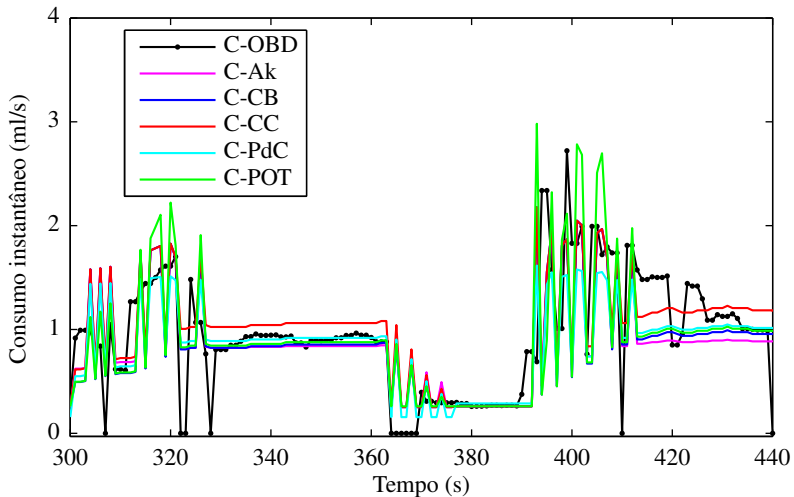




Figura 58: Parte do perfil temporal dos valores de consumo de combustível medido e estimados - veículo 4

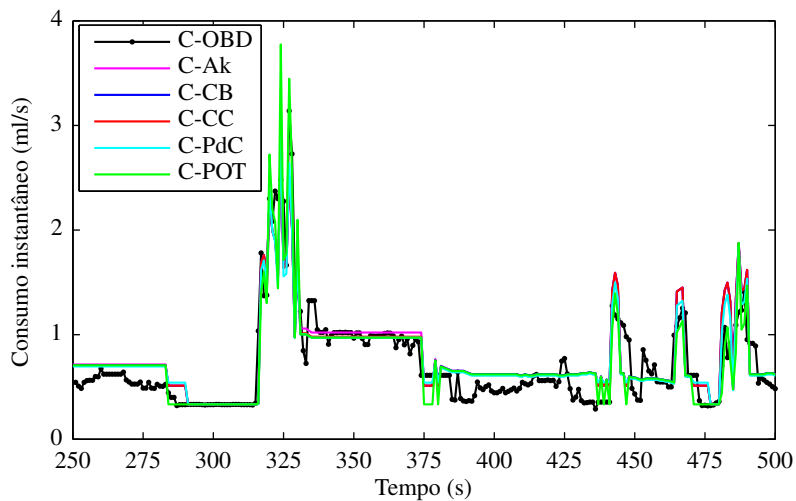


Tabela 14: Consumo de combustível, raiz da média quadrática dos erros e tempo para cada modo de condução - veículo 2

Modo de condução	ID	Consumo (ml)	RMSE	Tempo (s)
Marcha lenta	C-OBD	13,38	-	24
	C-Ak	12,55	0,048	
	C-Cb	12,55	0,048	
	C-CC	12,55	0,048	
	C-PdC	12,02	0,065	
	C-Pot	12,55	0,048	
Constante	C-OBD	420,93	-	373
	C-Ak	510,50	0,858	
	C-Cb	477,96	0,829	
	C-CC	514,83	0,876	
	C-PdC	430,10	0,805	
	C-Pot	482,40	0,861	
Aceleração	C-OBD	292,20	-	75
	C-Ak	295,43	1,091	
	C-Cb	295,43	1,091	
	C-CC	295,43	1,091	
	C-PdC	256,10	1,221	
	C-Pot	318,39	1,553	
Desaceleração	C-OBD	34,35	-	67
	C-Ak	18,35	0,351	
	C-Cb	18,35	0,351	
	C-CC	18,35	0,351	
	C-PdC	20,92	0,326	
	C-Pot	35,04	0,257	

Tabela 15: Consumo de combustível, coeficiente de determinação e raiz da média quadrática dos erros para o ciclo completo - veículo 2

ID	Consumo global (ml)	$R^2$	RMSE
C-OBD	760,86	-	-
C-Ak	836,83	0,5502	0,831
C-Cb	804,29	0,5482	0,811
C-CC	841,16	0,5479	0,843
C-PdC	719,13	0,5533	0,818
C-Pot	848,36	0,5801	0,926

Tabela 16: Consumo de combustível, raiz da média quadrática dos erros e tempo para cada modo de condução - veículo 3

Modo de condução	ID	Consumo (ml)	RMSE	Tempo (s)
Marcha lenta	C-OBD	13,73	-	44
	C-Ak	11,44	0,154	
	C-Cb	11,44	0,154	
	C-CC	11,44	0,154	
	C-PdC	12,57	0,146	
	C-Pot	11,44	0,154	
Constante	C-OBD	334,79	-	368
	C-Ak	291,97	0,445	
	C-Cb	286,91	0,463	
	C-CC	356,48	0,459	
	C-PdC	309,74	0,449	
	C-Pot	293,95	0,461	
Aceleração	C-OBD	104,62	-	79
	C-Ak	138,78	0,630	
	C-Cb	138,78	0,630	
	C-CC	138,78	0,630	
	C-PdC	117,85	0,511	
	C-Pot	143,04	0,700	
Desaceleração	C-OBD	6,57	-	51
	C-Ak	12,88	0,225	
	C-Cb	12,88	0,225	
	C-CC	12,88	0,225	
	C-PdC	7,95	0,190	
	C-Pot	13,26	0,229	

Tabela 17: Consumo de combustível, coeficiente de determinação e raiz da média quadrática dos erros para o ciclo completo - veículo 3

ID	Consumo global (ml)	$R^2$	RMSE
C-OBD	459,70	-	-
C-Ak	455,07	0,5395	0,446
C-Cb	450,00	0,5235	0,458
C-CC	519,57	0,5117	0,456
C-PdC	448,20	0,5526	0,424
C-Pot	561,69	0,5674	0,472

Tabela 18: Consumo de combustível, raiz da média quadrática dos erros e tempo para cada modo de condução - veículo 4

Modo de condução	ID	Consumo (ml)	RMSE	Tempo (s)
Marcha lenta	C-OBD	17,002	-	518
	C-Ak	17,03	0,010	
	C-Cb	17,03	0,010	
	C-CC	17,03	0,010	
	C-PdC	17,05	0,101	
	C-Pot	17,03	0,010	
Constante	C-OBD	355,98	-	407
	C-Ak	344,41	0,256	
	C-Cb	335,00	0,246	
	C-CC	334,00	0,249	
	C-PdC	331,09	0,249	
	C-Pot	333,18	0,247	
Aceleração	C-OBD	114,49	-	65
	C-Ak	115,72	0,488	
	C-Cb	115,72	0,488	
	C-CC	115,72	0,488	
	C-PdC	112,73	0,509	
	C-Pot	119,02	0,688	
Desaceleração	C-OBD	28,28	-	52
	C-Ak	26,64	0,258	
	C-Cb	26,64	0,258	
	C-CC	26,64	0,258	
	C-PdC	28,15	0,256	
	C-Pot	17,36	0,331	

Tabela 19: Consumo de combustível, coeficiente de determinação e raiz da média quadrática dos erros para o ciclo completo - veículo 4

ID	Consumo global (ml)	$R^2$	RMSE
C-OBD	495,75	-	-
C-Ak	503,80	0,6555	0,282
C-Cb	493,45	0,6673	0,276
C-CC	493,39	0,6636	0,277
C-PdC	489,02	0,6544	0,281
C-Pot	486,58	0,6764	0,326

**APÊNDICE D – Perfis de velocidade e consumo de  
combustível - Ciclos de condução não apresentados no  
Capítulo 5**



Neste Apêndice são apresentados os outros 8 ciclos de aquisição de dados que não foram mostrados no Capítulo 5. No total, foram realizados 10 ciclos, 5 para o caso de pouco tráfego e 5 para o caso de tráfego intenso. Embora os ciclos das Figuras 59–66 tenham apresentado um coeficiente de determinação menor do que os ciclos das Figuras 24 e 25 - apresentados no Capítulo 5, todos os ciclos têm a mesma ordem de grandeza nos resultados. Observa-se nos casos de pouco tráfego que o perfil de velocidades é praticamente o mesmo para todos os ciclos pois o veículo para nos mesmos semáforos no decorrer dos ciclos, enquanto que para o caso de tráfego intenso o perfil de velocidades se altera em cada ciclo por conta da influência dos outros veículos durante o teste, fazendo o veículo parar em semáforos alternados durante os ciclos. Nas Figuras 67–74 são apresentadas partes do perfil temporal dos valores de consumo de combustível instantâneo medido e estimados.

Figura 59: Ciclo 1 - Perfil de velocidades e consumos de combustível ao longo do ciclo de condução para o caso com pouco tráfego

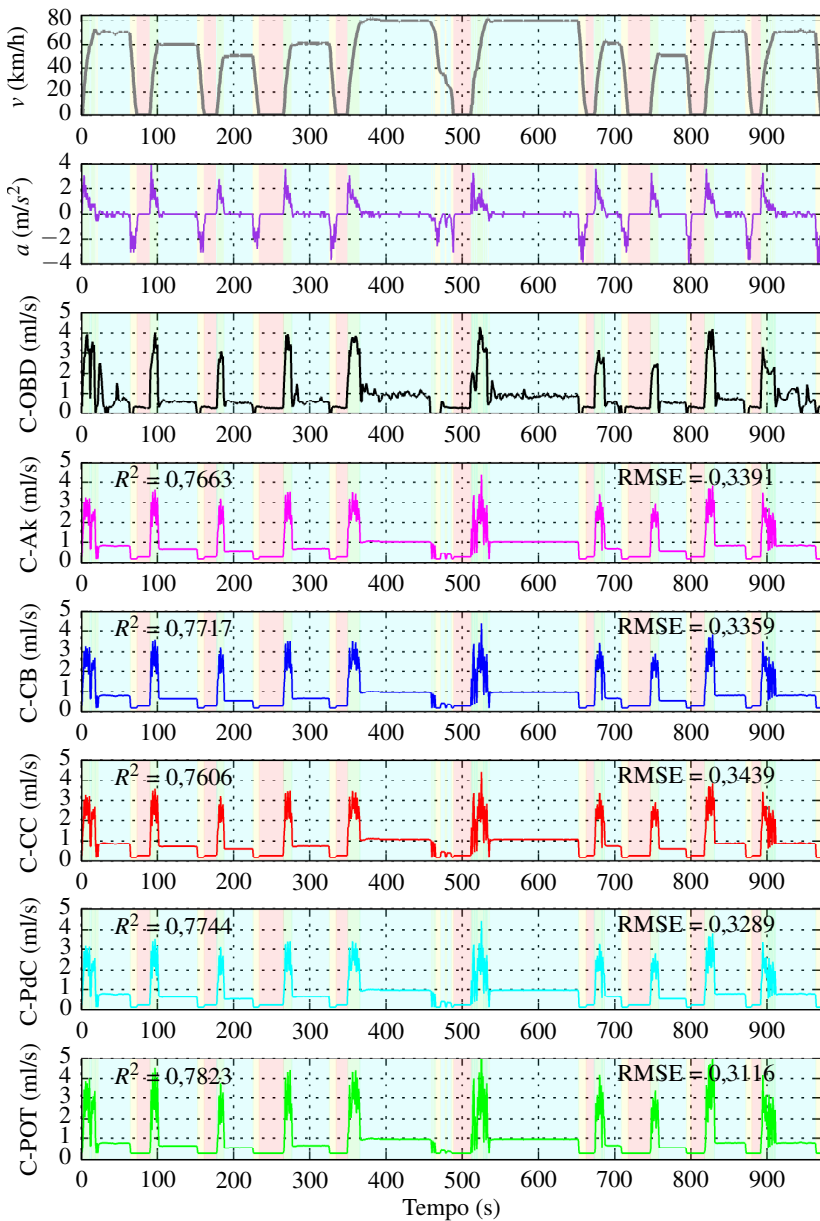




Figura 60: Ciclo 2 - Perfil de velocidades e consumos de combustível ao longo do ciclo de condução para o caso com pouco tráfego

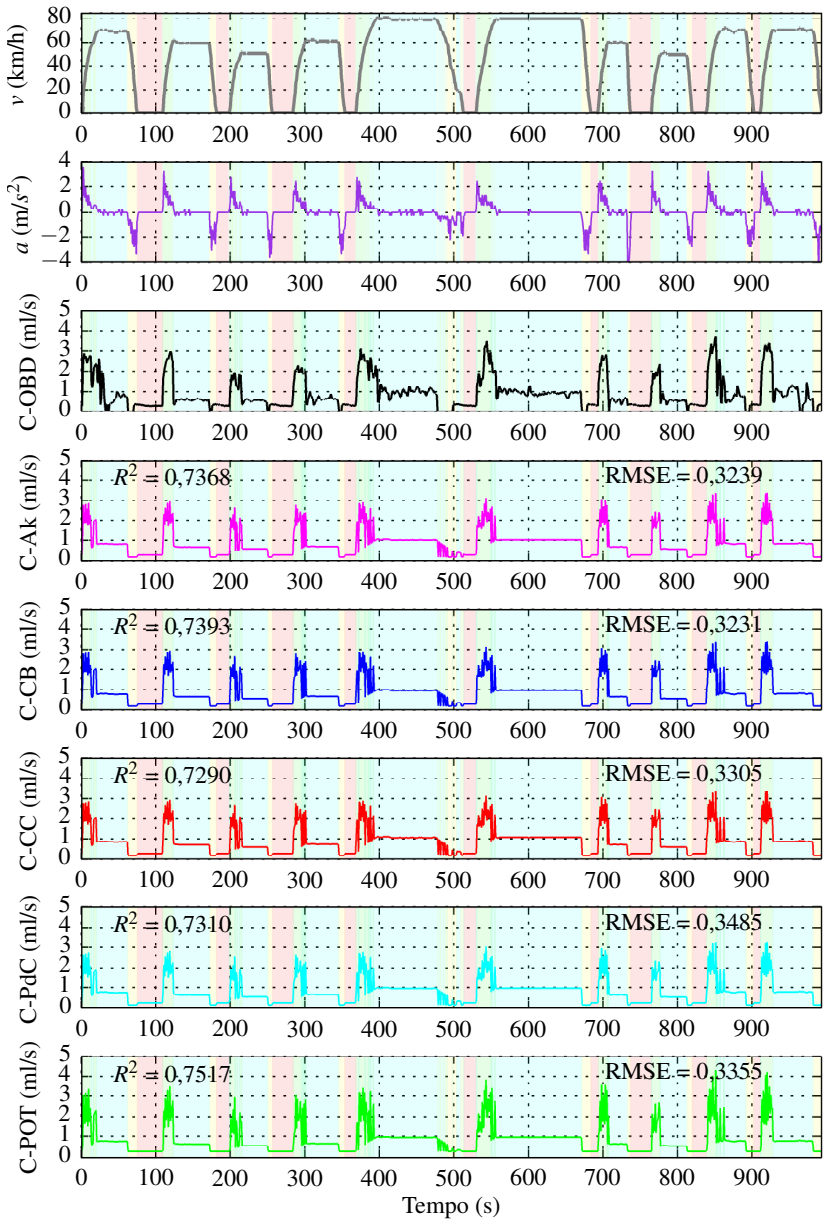


Figura 61: Ciclo 4 - Perfil de velocidades e consumos de combustível ao longo do ciclo de condução para o caso com pouco tráfego

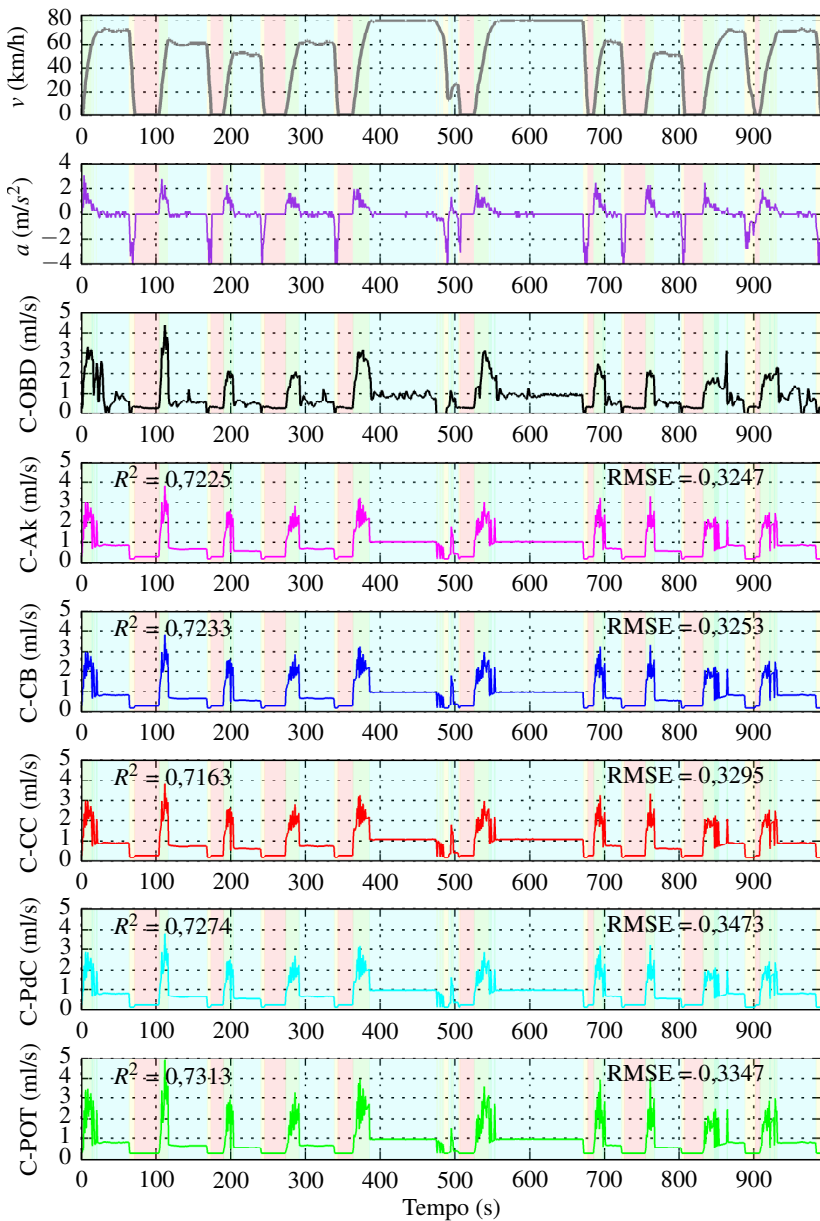


Figura 62: Ciclo 5 - Perfil de velocidades e consumos de combustível ao longo do ciclo de condução para o caso com pouco tráfego

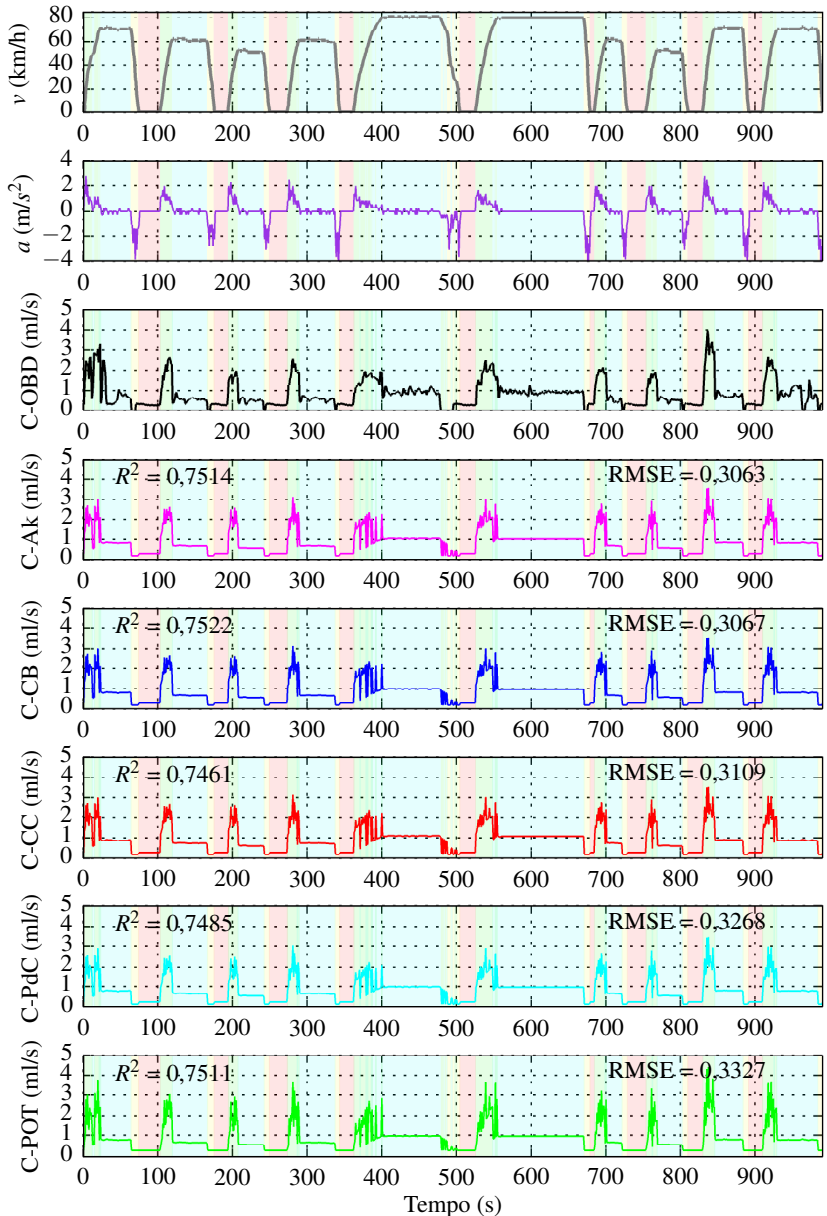


Figura 63: Ciclo 6 - Perfil de velocidades e consumos de combustível ao longo do ciclo de condução para o caso com tráfego intenso

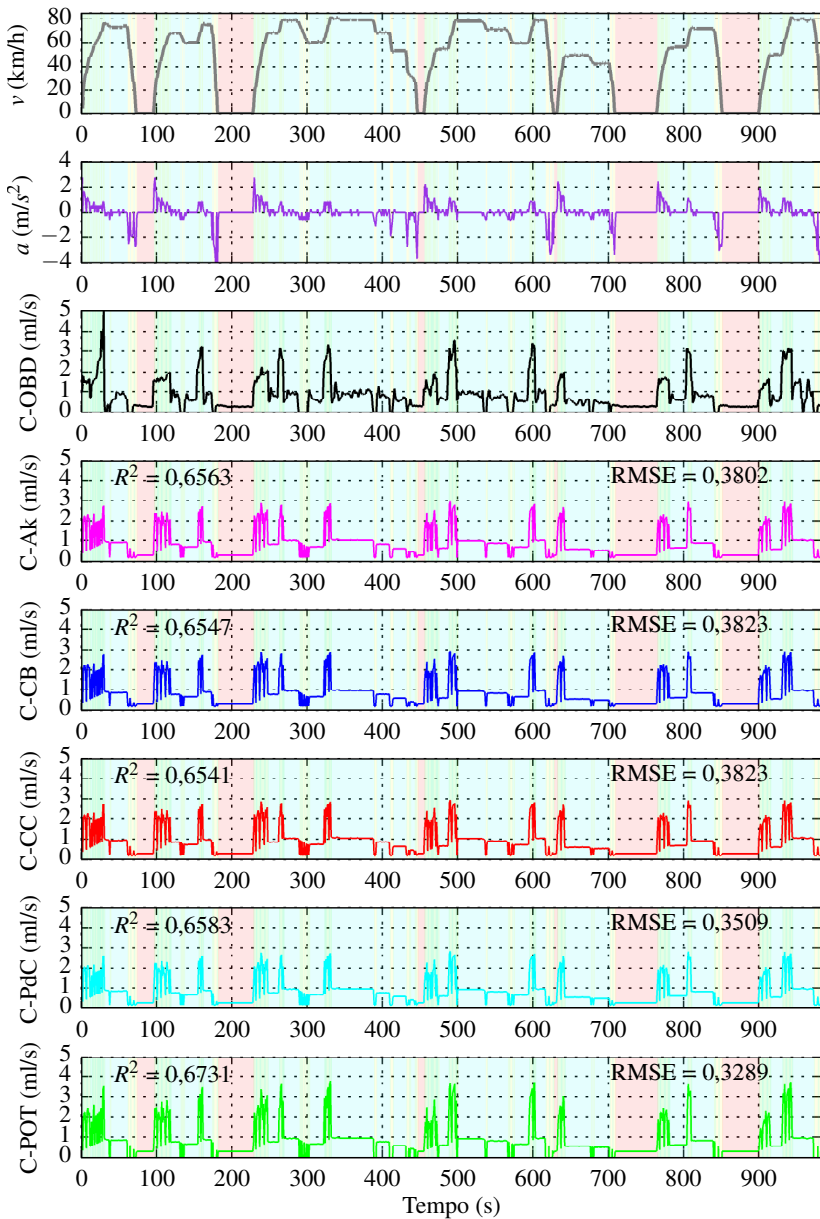


Figura 64: Ciclo 7 - Perfil de velocidades e consumos de combustível ao longo do ciclo de condução para o caso com tráfego intenso

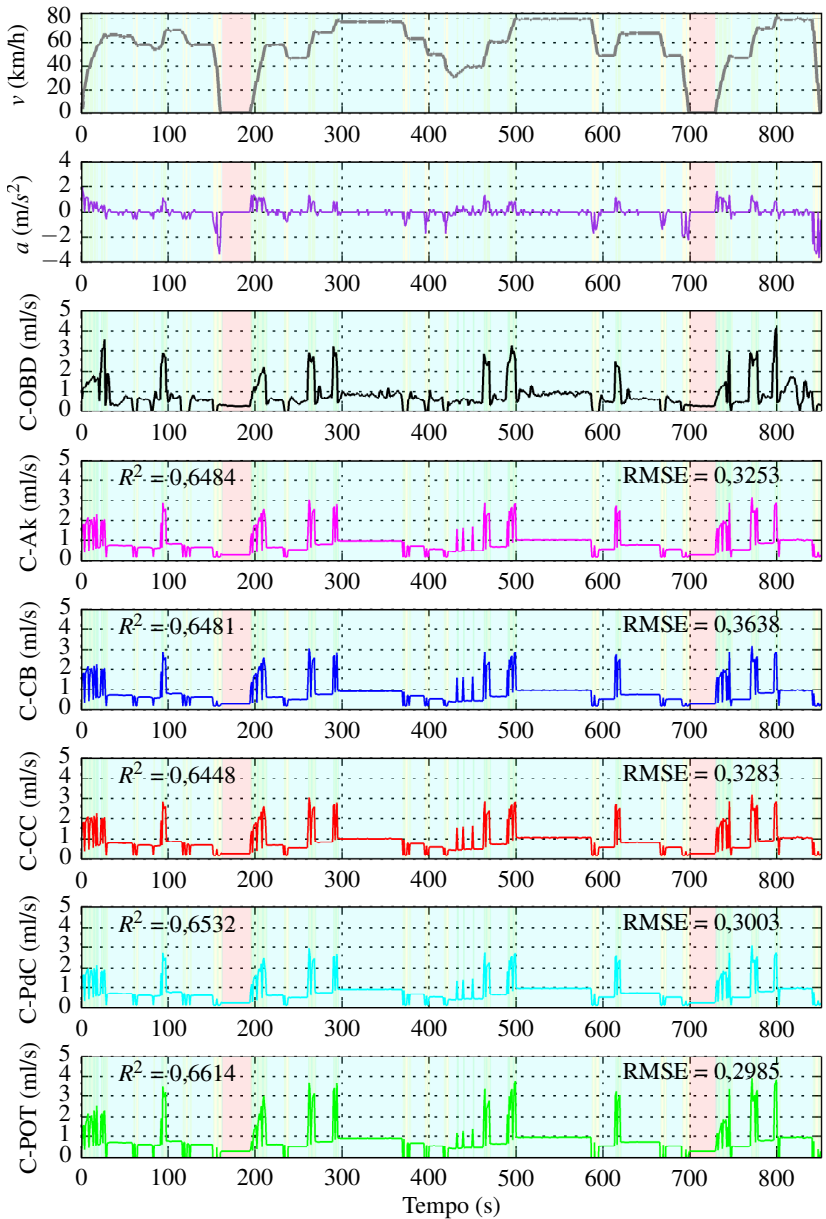


Figura 65: Ciclo 9 - Perfil de velocidades e consumos de combustível ao longo do ciclo de condução para o caso com tráfego intenso

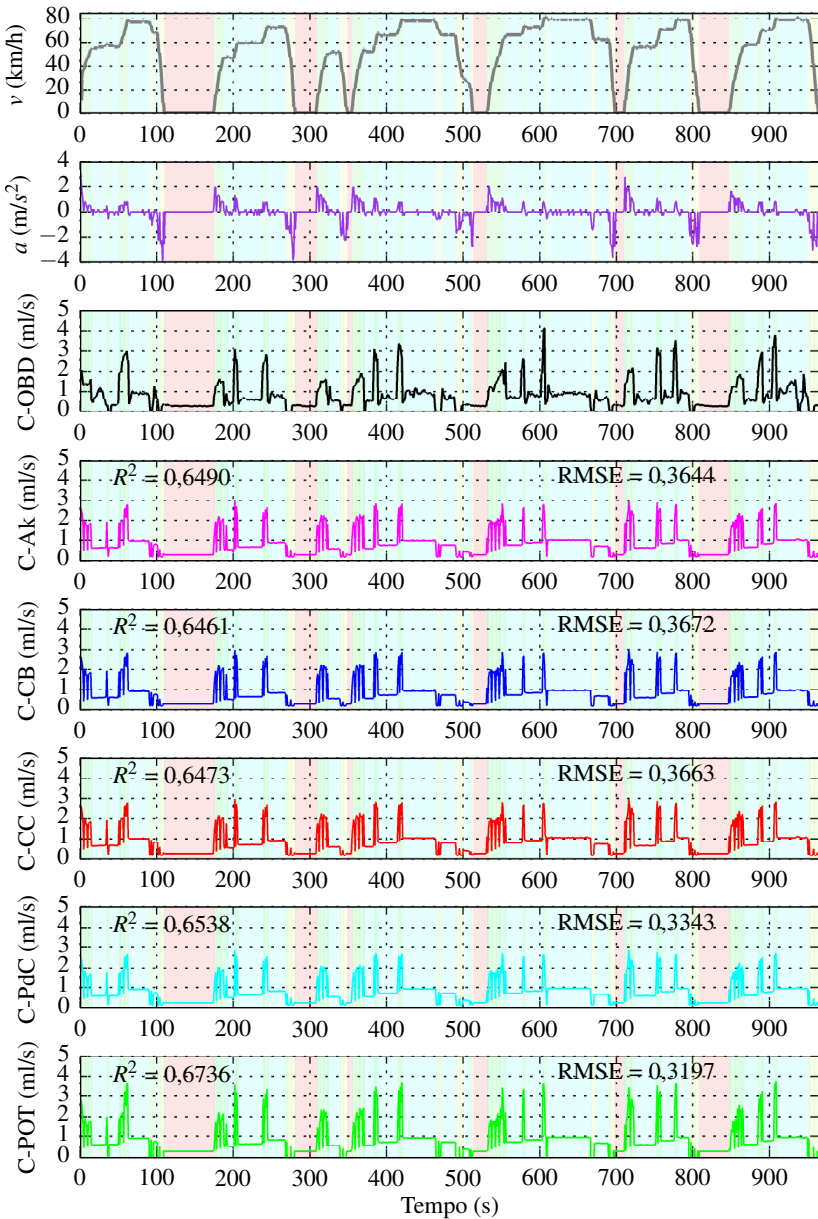


Figura 66: Ciclo 10 - Perfil de velocidades e consumos de combustível ao longo do ciclo de condução para o caso com tráfego intenso

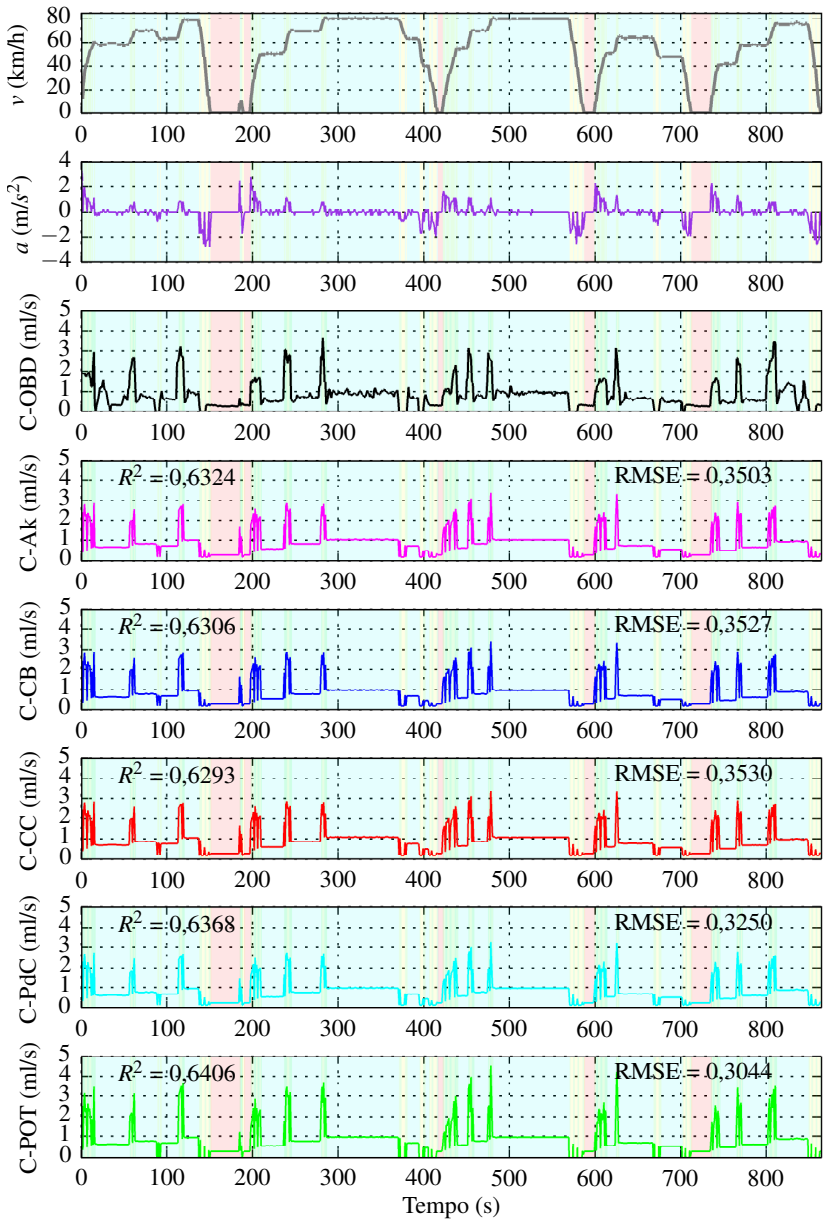


Figura 67: Ciclo 1 - Parte do perfil temporal dos valores de consumo de combustível instantâneo medido e estimados para o caso de pouco tráfego

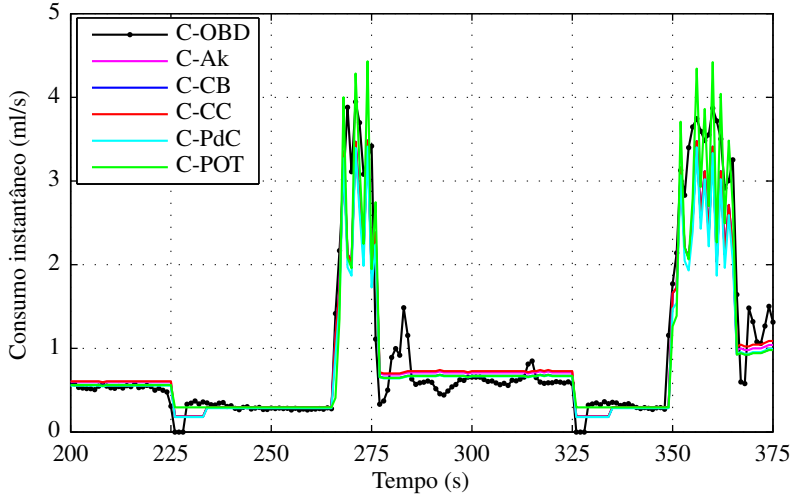


Figura 68: Ciclo 2 - Parte do perfil temporal dos valores de consumo de combustível instantâneo medido e estimados para o caso de pouco tráfego

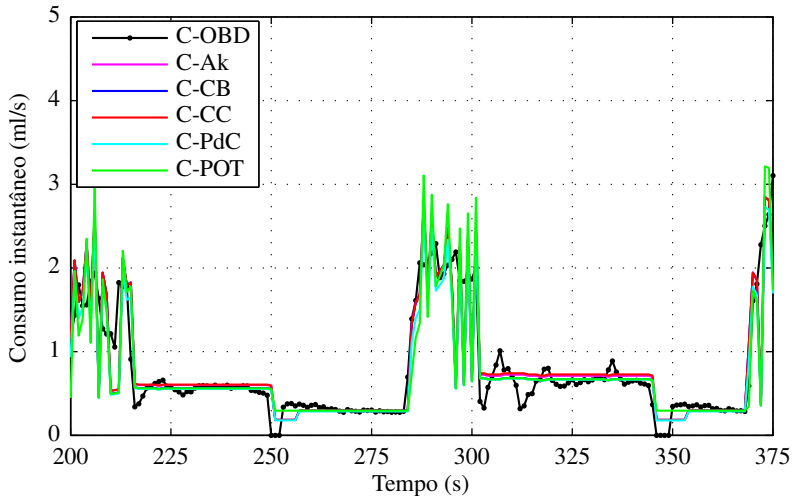




Figura 69: Ciclo 4 - Parte do perfil temporal dos valores de consumo de combustível instantâneo medido e estimados para o caso de pouco tráfego

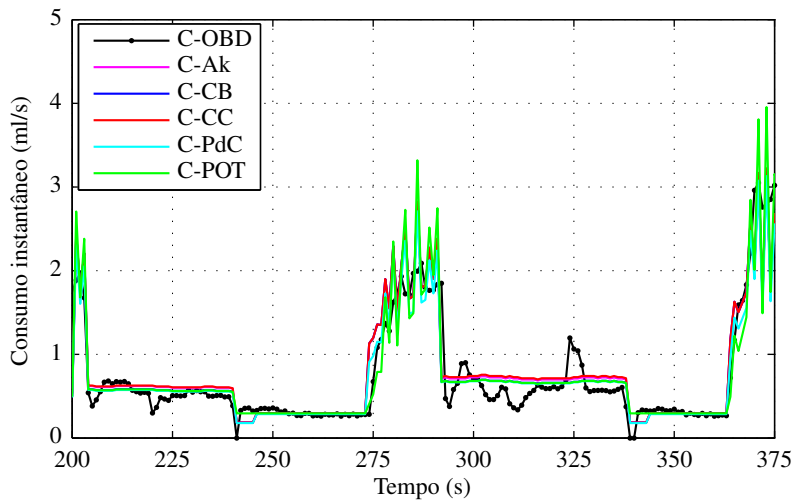


Figura 70: Ciclo 5 - Parte do perfil temporal dos valores de consumo de combustível instantâneo medido e estimados para o caso de pouco tráfego

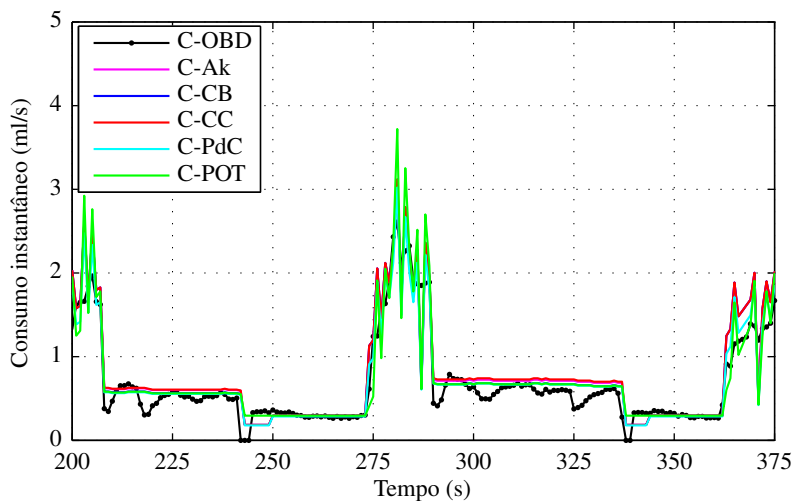


Figura 71: Ciclo 6 - Parte do perfil temporal dos valores de consumo de combustível instantâneo medido e estimados para o caso de tráfego intenso

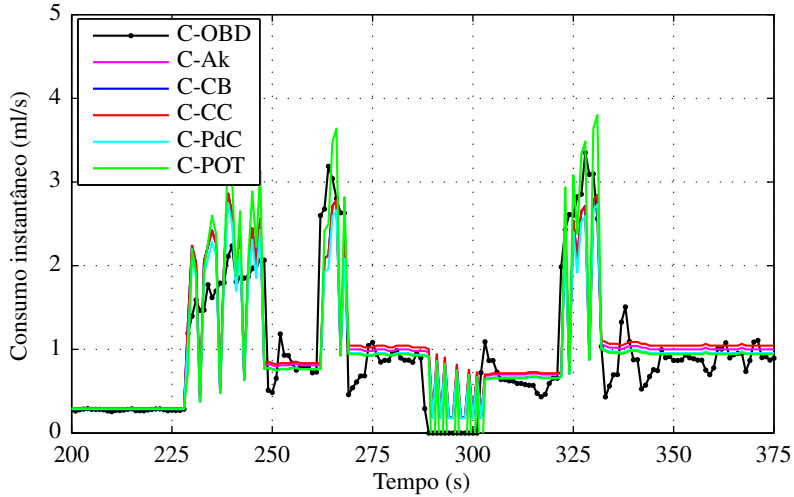


Figura 72: Ciclo 7 - Parte do perfil temporal dos valores de consumo de combustível instantâneo medido e estimados para o caso de tráfego intenso

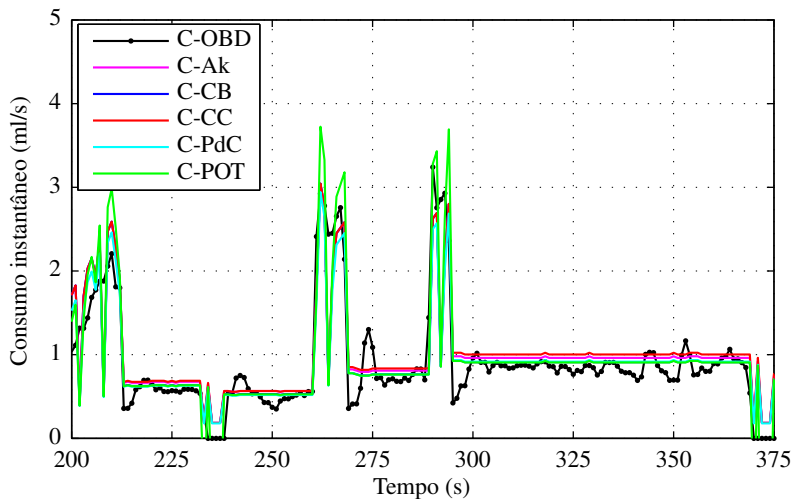


Figura 73: Ciclo 9 - Parte do perfil temporal dos valores de consumo de combustível instantâneo medido e estimados para o caso de tráfego intenso

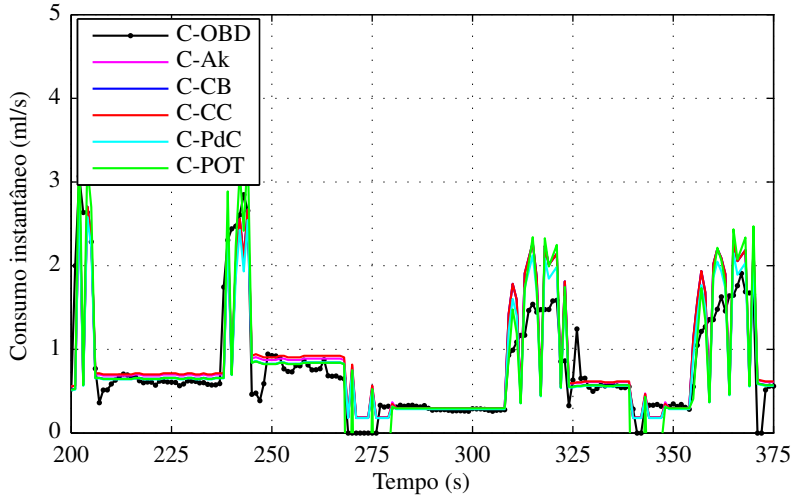
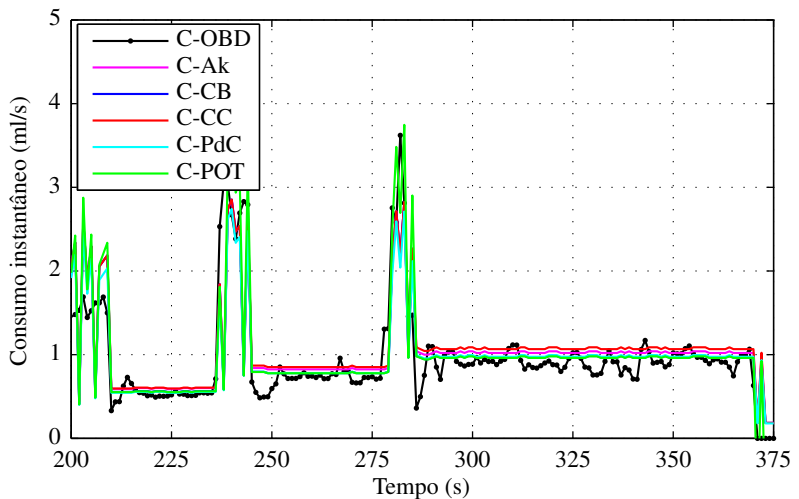


Figura 74: Ciclo 10 - Parte do perfil temporal dos valores de consumo de combustível instantâneo medido e estimados para o caso de tráfego intenso





**APÊNDICE E - Método de regressão linear robusta (*Least Absolute Residual* - LAR)**



A técnica de regressão robusta de mínimos residuais absolutos (*Least Absolute Residuals* - LAR) 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. Comparado ao LS, a curva encontrada com o LAR minimiza a diferença absoluta dos resíduos, portanto, valores extremos têm uma influência menor sobre o ajuste (DIELMAN, 2009). A regressão LAR é conhecida por vários outros nomes, *Least Absolute Deviations* (LAD), *Least Absolute Errors* (LAE), *Least Absolute Value* (LAV) ou ainda soma dos desvios absolutos ou condição de norma  $\mathbf{L}_1$ .

Nos estudos de Koenker e Bassett (1978) o desempenho das técnicas LAR e LS foram comparados e observou-se que ambos os métodos aplicados produzem resultados simétricos (valores dos coeficientes próximos). Como resultado confirmou-se que o método LAR apresenta um valor de coeficiente de determinação ( $\mathbf{R}^2$ ) melhor do que a regressão por mínimos quadrados.

Normalmente utiliza-se LAR para dados com menos *outliers* nos dados medidos (cada dado é tão importante quanto o outro e fazem parte da calibração). O Matlab *curve fitting toolbox* implementa o seguinte modelo de regressão linear para ajustar os dados à equação do modelo em questão:

$$\mathbf{y}_i = \beta_0 + \sum_{k=1}^K \beta_k \cdot \mathbf{x}_{ik} + \epsilon_i \quad (\text{E.1})$$

em que  $\mathbf{y}_i$  é o  $i$ th valor da variável de resposta,  $\mathbf{x}_{ik}$  a  $i$ th observação na variável explicativa  $k$ th,  $\beta_0$  a constante da equação,  $\beta_k$  o coeficiente da variável explicativa e  $\epsilon_i$  é o  $i$ th valor da perturbação. A regressão LAR envolve encontrar as estimativas de  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_K$ , denotado  $\mathbf{b}_0, \mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \dots, \mathbf{b}_K$ , que minimize a soma dos valores absolutos dos residuais,  $\sum_{i=1}^n |\mathbf{y}_i - \hat{\mathbf{y}}_i|$ , em que  $\hat{\mathbf{y}}_i = \mathbf{b}_0 + \sum_{k=1}^K \mathbf{b}_k \mathbf{x}_{ik}$  representa os valores previstos.





**APÊNDICE F – Aquisição de dados em ciclos de condução  
de longa duração para calibração dos modelos de consumo de  
combustível**



Na calibração dos modelos apresentados ao longo dos capítulos da dissertação, são contemplados dados de consumo de combustível coletados em regime permanente e em ciclos de condução de curta duração. Neste apêndice, apresenta-se a coleta de dados de consumo de combustível do veículo Honda Civic para ciclos de condução de maior duração, aplicado a rodovias.

A Figura 75 mostra os perfis de velocidade e consumo de combustível em um ciclo de condução que contempla o acesso à ilha de Florianópolis pela via expressa (dos instantes 0 s a 1.500 s) e três ciclos de condução consecutivos do mesmo ciclo utilizado na Figura 16 (a partir do instante 1.500 s). O ciclo tem 30 km de extensão e leva aproximadamente 80 minutos para ser completado.

A Figura 76 mostra também os perfis de velocidade e consumo de combustível mas para um ciclo de condução mais longo. Esse ciclo foi realizado em uma viagem de Curitiba a Florianópolis, sem tempo de parada considerável. O veículo passou por diferente tipos de relevo durante este ciclo, inclusive uma serra onde o consumo de combustível do veículo foi igual a zero em várias situações (entre os instantes 1.800 s e 3.600 s). O trajeto também contempla 4 praças de pedágio e diversos postos da polícia rodoviária federal, nas quais a velocidade do veículo foi reduzida para a velocidade limite de 60 km/h. O ciclo tem 300 km de extensão e leva aproximadamente 180 minutos para ser completado.

Os modelos apresentados no Capítulo 2 foram calibrados com os dados dos dois ciclos de longa duração e os coeficientes obtidos apresentaram a mesma ordem de grandeza dos coeficientes obtidos para ciclos de condução de curta duração.



Figura 75: Exemplo de ciclo de condução de longa duração (30 km de extensão)

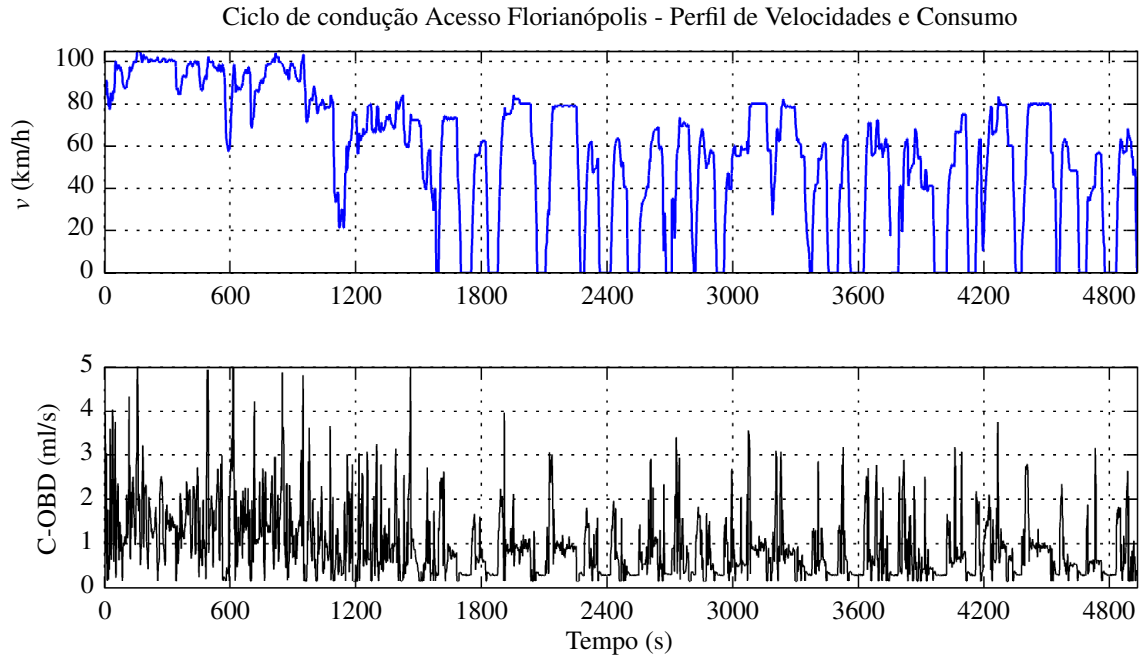




Figura 76: Exemplo de ciclo de condução de longa duração (300 km de extensão)

