

# **QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSÕES VEICULARES ATRAVÉS DO USO DE SIMULADORES DE TRÁFEGO**

**Gabriel Bittencourt Jacondino**

Porto Alegre  
novembro 2005

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA**

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção*

**QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSÕES  
VEICULARES ATRAVÉS DO USO DE  
SIMULADORES DE TRÁFEGO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

**Gabriel Bittencourt Jacondino**

Orientador:

**Helena Beatriz Bettella Cybis, PhD**

Porto Alegre  
novembro 2005

**Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.**

**Prof. Helena Beatriz Bettella Cybis, Ph.D**  
Orientadora

**Prof. Luis Antonio Lindau, Ph.D**  
Coordenador PPGEF/UFRGS

**Banca Examinadora:**

**Sérgio Henrique Demarchi**  
Prof. Depto. Eng Civil / UEM

**Vilson João Batista**  
Prof. PROMEC / EE / UFRGS

**Luis Antônio Lindau**  
Prof. PPGEF / UFRGS

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus pais, Alda e Ilo, pelo apoio, estímulo e  
confiança.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar os meus mais sinceros agradecimentos:

À minha orientadora HELENA BEATRIZ BETTELLA CYBIS, por sua dedicação e sabedoria, e pelo apoio, confiança e principalmente paciência dispensados durante a realização desta dissertação.

Aos professores do LASTRAN/PPGEP que fundamentaram a minha formação em Transportes, e aos demais professores e funcionários da UFRGS e PPGEP.

À CAPES pelo apoio financeiro concedido através da bolsa de mestrado.

Aos amigos e colegas do LASTRAN pela amizade e ajuda na coleta dos dados.

Aos amigos da turma de mestrado de 2001, AUGUSTO, CARLO, HOMERO e RAFAEL pela grande amizade construída.

Aos colegas de trabalho da COPARCO, ROSANE, MÁRCIO, LARISSA e em especial ao meu chefe SÉRGIO COELHO pelo incentivo e compreensão nos momentos finais deste trabalho.

Aos meus tios REGINA e LUIS ANTÔNIO pelo auxílio fundamental no início desta caminhada.

À minha família, ILO, ALDA e CAMILA pelo apoio e incentivo inesgotáveis em todos os momentos deste trabalho.

À família PECKER, PAULO, DENISE e PAULA por me acolherem como membro da família no transcorrer deste trabalho, e em especial à CAROLINE pelo carinho, companheirismo e ajuda indispensáveis para a concretização deste sonho.

À CLAUDIA VERAS pelos aconselhamentos e incentivos, principalmente nos momentos finais, essenciais para a conclusão deste trabalho.

## RESUMO

JACONDINO, G.B. **Quantificação das emissões veiculares através do uso de simuladores de tráfego**. 2005. 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

Este trabalho avalia o potencial de simuladores de tráfego na estimativa das emissões veiculares. Os simuladores de tráfego em conjunto com modelos de emissões são utilizados para execução de inventários de emissões. Os inventários de emissões são importantes para a avaliação da eficácia das políticas de transporte que visem redução das emissões veiculares. Erros nesta avaliação podem levar à adoção de políticas ineficientes. Por esta razão, é fundamental a compreensão da lógica destes modelos para a correta análise dos resultados gerados. Através de testes de sensibilidade avaliou-se o impacto da variação de três aspectos intrínsecos aos modelos de simulação na quantificação das emissões veiculares: (i) os parâmetros de entrada utilizados para calibração; (ii) a lógica dos modelos de progressão longitudinal; e (iii) o modelo de emissões incorporado ao simulador. Em um estudo de caso, avaliou-se o impacto de uma melhoria de fluxo de tráfego na geração das emissões com o uso de simuladores de tráfego frente às abordagens tradicionais. O trabalho demonstra que a definição dos parâmetros relativos à aceleração, bem como a modelagem adequada da progressão longitudinal dos veículos, possuem papel preponderante na correta quantificação das emissões. Em segundo plano, o grau de sofisticação do modelo de emissões incorporado também exerce influência na magnitude dos resultados. Por fim, o estudo de caso demonstrou a vantagem do uso de micro-simuladores na quantificação das emissões de projetos de melhorias de fluxo de tráfego frente aos métodos tradicionais, ainda que pese a maior dificuldade na calibração de modelos microscópicos.

**Palavras-chave:** Emissões veiculares. Simulação de tráfego. Modelagem.

## ABSTRACT

JACONDINO, G.B. **Quantifying vehicular emissions using traffic simulation models.** 2005. 133p. Dissertation (Master's in Industrial Engineering) – Post-graduate program in Industrial Engineering, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

This work analyses the potential of traffic simulation models to estimate vehicular emissions. Traffic simulation models associated with emission models are frequently used in emission inventories. Emission inventories are important for the evaluation of the effectiveness of the transport policies that aim the reduction of the vehicular emissions. Errors in this evaluation can lead to inefficient policies. The understanding of the logic of these models is essential for an appropriate results analysis. With the use of sensibility tests analysis, this dissertation evaluates the impact of the variation of three intrinsic aspects of simulation models in the quantification of the vehicular emissions: (i) the input parameters used for the model calibration; (ii) the logic of the longitudinal progression models and (iii) the nature of the emission models incorporated in traffic simulation model. This dissertation also presents a case study which evaluates the impact of a traffic flow improvement project on pollutant emissions. This work demonstrates that the definition of the acceleration parameters as well as the adequate modeling of the longitudinal progression of the vehicles play an important role in the correct quantification of emissions. The complexity of the incorporated emission models also has great influence in the magnitude of the results. Finally, the case study demonstrates the advantage of using micro-simulation models in the quantification of pollutant emissions of traffic improvement projects when compared to the traditional methods, despite the hardness of calibrating microscopic models.

**Key-words:** Vehicular emission, traffic simulation, modeling

## SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA.....</b>	<b>3</b>
<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>4</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>5</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>6</b>
<b>SUMÁRIO.....</b>	<b>7</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>10</b>
<b>LISTA DE QUADROS.....</b>	<b>12</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....</b>	<b>13</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1 JUSTIFICATIVA DO TEMA E OBJETIVO .....	15
1.2 OBJETIVOS .....	16
1.2.1 Objetivo Principal.....	16
1.2.2 Objetivos Específicos .....	16
1.3 METODOLOGIA.....	17
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	17
<b>2 EMISSÕES VEICULARES – UMA VISÃO GERAL .....</b>	<b>19</b>
2.1 INTRODUÇÃO.....	19
2.2 A ORIGEM DO PROBLEMA: OS MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA.....	19
2.2.1 Histórico .....	19
2.2.2 Classificação dos Motores de Combustão Interna.....	20
2.3 FORMAÇÃO DAS EMISSÕES VEICULARES .....	21
2.3.1 Emissões de descarga .....	21
2.3.2 Emissões evaporativas.....	24
2.4 COMPOSTOS EMITIDOS PELOS VEÍCULOS - AS EMISSÕES VEICULARES ...	25
2.4.1 Óxidos de Nitrogênio .....	26
2.4.2 Monóxido de Carbono.....	27
2.4.3 Hidrocarbonetos .....	27
2.4.4 Óxidos de enxofre.....	28
2.4.5 Chumbo .....	28
2.4.6 Material Particulado .....	28
2.4.7 Dióxido de Carbono .....	29
2.4.8 Ozônio .....	29
2.5 FATORES QUE INFLUENCIAM NO NÍVEL DAS EMISSÕES VEICULARES.....	30
2.5.1 Fatores Tecnológicos.....	30
2.5.2 Fatores de Desgaste e Manutenção.....	31
2.5.3 Fatores Operacionais e Ambientais .....	31
2.6 MEDIÇÃO DAS EMISSÕES VEICULARES .....	35
2.6.1 Testes em Laboratórios.....	36

2.6.2 Sensoriamento Remoto.....	40
2.6.3 Medições em Bordo.....	40
2.6.4 Medidas de Emissão em veículos pesados .....	41
2.7 MEDIDAS PARA O CONTROLE DAS EMISSÕES VEICULARES.....	41
2.7.1 Medidas Regulatórias .....	42
2.7.2 Medidas de Controle de Transporte .....	43
2.7.3 O Controle das Emissões Veiculares no Brasil .....	46
2.8 CONCLUSÕES .....	47
<b>3 MODELAGEM DAS EMISSÕES VEICULARES .....</b>	<b>49</b>
3.1 INTRODUÇÃO.....	49
3.2 MODELAGEM DAS EMISSÕES VEICULARES .....	49
3.3 ESTIMATIVA DO NÍVEL DE ATIVIDADE DO TRÁFEGO .....	51
3.3.1 Modelos de Tráfego.....	51
3.4 MODELOS DE EMISSÃO .....	54
3.4.1 Classificação dos Modelos de Emissão .....	56
3.4.2 Modelos Estáticos.....	56
3.4.3 Modelos Dinâmicos.....	58
3.5 CONCLUSÕES .....	67
<b>4 INVESTIGAÇÃO DO USO MICRO-SIMULADORES DE TRÁFEGO NA ESTIMATIVA DAS EMISSÕES VEICULARES.....</b>	<b>68</b>
4.1 INTRODUÇÃO.....	68
4.2 USO DE MODELOS DE SIMULAÇÃO PARA A QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSÕES VEICULARES.....	69
4.3 DESCRIÇÃO DOS MODELOS DE TRÁFEGO .....	70
4.3.1 O Modelo DRACULA .....	70
4.3.2 O Modelo INTEGRATION.....	74
4.4 CONFIGURAÇÃO DO CENÁRIO DE TESTE.....	78
4.5 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO NA ESTIMATIVA DAS EMISSÕES.....	79
4.5.1 Avaliação dos parâmetros de aceleração/desaceleração.....	80
4.5.2 Análise dos demais parâmetros de calibração .....	82
4.6 INFLUÊNCIA DOS MODELOS DE PROGRESSÃO LONGITUDINAL .....	85
4.6.1 Configuração do Teste.....	85
4.6.2 Resultados e análise.....	86
4.6.3 Influência do Modelo de Aceleração.....	90
4.7 INFLUÊNCIA DO MODELO DE EMISSÃO .....	93
4.8 CONCLUSÕES .....	96
<b>5 QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSÕES VEICULARES ATRAVÉS DO USO DE SIMULADORES DE TRÁFEGO – UM ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>98</b>
5.1 INTRODUÇÃO.....	98
5.2 CARACTERIZAÇÃO DO CENÁRIO DE ESTUDO E COLETA DE DADOS.....	98
5.2.1 Definição da Área de Estudo .....	99
5.2.2 Pontos de geração de tráfego .....	100
5.2.3 Levantamento de dados .....	101
5.2.4 Tempos de Viagem-Velocidade do Tráfego.....	102
5.2.5 Demanda de tráfego.....	103
5.3 APRESENTAÇÃO DO MODELO SATURN.....	105
5.4 CALIBRAÇÃO DOS MODELOS DE TRÁFEGO .....	106

5.4.1	Calibração Matriz Origem-Destino .....	106
5.4.2	Codificação e Calibração do Modelo SATURN .....	108
5.4.3	Codificação e Calibração Modelo DRACULA .....	109
5.4.4	Certificação das Calibrações .....	114
5.5	METODOLOGIAS EMPREGADAS .....	114
5.5.1	Abordagem Macroscópica Agregada .....	115
5.5.2	Abordagem Macroscópica Desagregada .....	116
5.5.3	Abordagem Mesoscópica .....	116
5.5.4	Abordagem Microscópica .....	117
5.6	RESULTADOS E ANÁLISES .....	118
5.7	CONCLUSÕES .....	121
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>123</b>
6.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	123
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>127</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diferentes tipos de emissões .....	21
Figura 2: Concentração de HC, CO e NOx nos gases de escape em relação à $\phi$ . .....	23
Figura 3: Variação das emissões ao longo de uma viagem .....	24
Figura 4: Causa e efeito na variabilidade do padrão de condução. ....	32
Figura 5: Efeito da aceleração nas emissões. ....	33
Figura 6: Passos para a caracterização das condições de condução e viagens, baseadas em medições do mundo real em um ciclo de condução. ....	37
Figura 7: Ciclo de condução para o teste FTP .....	39
Figura 8: Dinamômetro de chassi. ....	39
Figura 9: Equipamento para medição em bordo.....	41
Figura 10: Modelos do sistema para estimativa do impacto do tráfego na qualidade do ar....	50
Figura 11: Classificação dos Modelos de emissão. ....	56
Figura 12: Matrizes de emissão preenchidas com o ciclo de condução europeu e um típico ciclo urbano. ....	60
Figura 13: Estrutura do modelo EMIT. ....	65
Figura 14: Estrutura do modelo CMEM.....	66
Figura 15: Configuração da rede teste .....	78
Figura 16: Estimativas de emissões do DRACULA e INTEGRATION para os veículos 1 a 12. ....	88
Figura 17: Perfis de Velocidade, aceleração e emissões gerados pelo DRACULA E INTEGRATION para o veículo 1 .....	89
Figura 18: Perfis de Velocidade, aceleração e emissões gerados pelo DRACULA E INTEGRATION para o veículo 4 .....	90
Figura 19: Perfis de velocidade e aceleração obtidos pelos diferentes modelos de aceleração. ....	92
Figura 20: Perfil de emissão de CO calculado com o modelo CMEM a partir dos diferentes modelos de aceleração .....	93
Figura 21: Ciclo de condução para a velocidade de 40km/h para criação das matrizes de emissão a partir do modelo CMEM.....	94
Figura 22: Matrizes de emissão geradas a partir do modelo físico CMEM .....	95
Figura 23: Rede modelada. ....	99
Figura 24: Variabilidade da demanda ao longo do tempo de coleta de dados. ....	104
Figura 25: Fluxo Modelado x Fluxo Simulado SATURN.....	107
Figura 26: Representação da rede modelada através do modelo SATURN.....	109
Figura 27: Área de estudo representada no módulo gráfico do DRACULA .....	110
Figura 28: Curvas de emissão geradas pela aplicação dos fatores de correção de velocidade .....	116
Figura 29: Esquema para cálculo das emissões com utilização da abordagem microscópica. ....	118
Figura 30: Variação das emissões veiculares devido à ampliação da capacidade com o uso de diversas abordagens.....	119
Figura 31: Variação das velocidades médias entre os cenários simulados no modelo DRACULA.....	120
Figura 32: Variação das velocidades médias entre os cenários simulados no modelo SATURN.....	120

Figura 33: Variação das emissões de CO devido à ampliação da capacidade com o uso de diversas abordagens desagregadas por segmento..... 121

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Categoria das emissões evaporativas.....	25
Quadro 2: Compostos emitidos pelos veículos e seus efeitos .....	26
Quadro 3: Limites de emissões para veículos fabricados no Brasil. ....	46
Quadro 4: Tipos de modelos de tráfego.....	54
Quadro 5: Taxas de emissão para automóveis em velocidade constante – DRACULA.....	72
Quadro 6: Taxas de emissão para automóveis parados, em aceleração ou em desaceleração- DRACULA.....	72
Quadro 7: Níveis testados para os parâmetros de aceleração .....	80
Quadro 8: Emissões calculadas com o modelo DRACULA em conjunto com o modelo CMEM para diversos níveis aceleração .....	81
Quadro 9: Emissões calculadas com o modelo CMEM para diversos níveis dos parâmetros entrada. ....	83
Quadro 10: Emissões para os diferentes arcos da rede calculados com o modelo CMEM e 4 níveis de aceleração .....	84
Quadro 11: Estimativa de emissões para DRACULA e INTEGRATION com o uso do modelo CMEM.....	87
Quadro 12: Emissões para os vários modelos de emissão.....	92
Quadro 13: Fatores de emissão escolhidos para abastecer a matriz simplificada .....	96
Quadro 14: Resultado estimativa de emissões com diferentes métodos de cálculo.....	96
Quadro 15: Velocidades e tempos de viagem observados na rede modelada. ....	103
Quadro 16: Composição da frota e dimensão dos veículos na área de estudo. ....	104
Quadro 17: Fluxo observado x fluxo modelado SATURN.....	108
Quadro 18: Descrição dos indicadores de desempenho .....	111
Quadro 19: Descrição dos parâmetros de entrada investigados .....	111
Quadro 20: Solução ótima dos parâmetros de entrada .....	114
Quadro 21: Certificação da solução ótima .....	114

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>(A/F)</b>	Taxa ar/combustível
<b>C</b>	Carbono
<b>CMEM</b>	<i>Comprehensive Modal Emission Model</i>
<b>CO</b>	Monóxido de Carbono
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de Carbono
<b>DRACULA</b>	<i>Dynamic Route Assignment Combining User Learning and Microsimulation</i>
<b>EPA</b>	<i>Environment Protection Agency</i>
<b>FTP</b>	<i>Federal Test Procedure</i>
<b>HC</b>	Hidrocarboneto
<b>I/M</b>	Inspeção e Manutenção
<b>ITS</b>	Sistemas Inteligentes de Transporte
<b>KMVV</b>	Quilômetros Viajados por Veículo
<b>MCT</b>	Medida de controle de Transporte
<b>MP</b>	Material Particulado
<b>NO</b>	Óxido Nítrico
<b>NO<sub>2</sub></b>	Dióxido de Nitrogênio
<b>NO<sub>x</sub></b>	Óxidos de Nitrogênio
<b>O<sub>2</sub></b>	Oxigênio
<b>O<sub>3</sub></b>	Ozônio
<b>Pb</b>	Chumbo
<b>PROCONVE</b>	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
<b>SATURN</b>	<i>Simulation and Assignment of Traffic to Urban Road Networks</i>
<b>SO<sub>2</sub></b>	Dióxido de Enxofre
<b>UVP</b>	Unidade de Veículo Padrão
<b>VOC</b>	Compostos Orgânicos Voláteis
<b><math>\phi</math></b>	Taxa equivalente, relação entre $(A/F)_{\text{estequimétrica}}$ e $(A/F)_{\text{atual}}$

## 1 INTRODUÇÃO

---

Ao longo dos anos o setor de transporte tem sido diretamente associado a diferentes problemas ambientais. Entre estes problemas, estão a emissão de poluentes atmosféricos, poluição sonora, disputa do espaço urbano e segurança. Por outro lado o transporte é importante para a sociedade, pois o desenvolvimento econômico está vinculado com a mobilidade.

As emissões veiculares são geradas através das várias reações químicas que ocorrem no interior dos motores de combustão interna. Estes compostos são os principais responsáveis pela degradação do ar atmosférico, o que resulta em uma perda da qualidade de vida de todos os habitantes (problemas respiratórios, degradação de estruturas), principalmente nos grandes centros urbanos (Vasconcellos, 2000). A emissão de poluentes gerada pelos veículos também é responsável por problemas de maior magnitude relacionados a mudanças climáticas (Ribeiro *et al*, 2000).

De acordo com a União Européia (European Commission, 2002), o tráfego rodoviário foi responsável por 63% do Monóxido de Carbono (CO), 39% dos Hidrocarbonetos (HC), 47% dos Óxidos de Nitrogênio (NOx) e 29% do Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) lançados na atmosfera. Medidas como a inovação tecnológica dos veículos e o uso de combustíveis mais limpos têm contribuído para uma significativa redução das emissões veiculares por quilômetro viajado.

Entretanto, o crescimento da frota de veículos, bem como o aumento nas distâncias viajadas tem contribuído para um aumento das emissões veiculares geradas (WBCSD, 2001), compensando os benefícios já alcançados. A sociedade deseja a melhoria da qualidade do ar, sem redução de sua mobilidade. O desafio, portanto, é proporcionar uma melhoria da qualidade do ar sem comprometer a mobilidade da população.

A redução das emissões pode ser alcançada também com a implantação de medidas que modifiquem o padrão de utilização dos automóveis, quer seja pela redução do uso do automóvel, quer seja pela redução dos eventos que produzem altas taxas de emissões como acelerações. O Clean Air Act de 1990, editado nos EUA (Cambridge Systematics, 2001) define que as medidas de controle de transporte (MCT) são aquelas que promovem a redução

das emissões dos veículos, entre outros benefícios, com base na modificação do padrão de utilização dos automóveis.

Segundo Papacostas e Prevedouros (2001), até a década de 60 as decisões tomadas no setor público relacionadas a projetos de transporte eram geralmente baseadas na avaliação de capital e custos de operação das facilidades de transporte, *vis-à-vis* as melhorias diretas esperadas nos níveis de serviço e tempos de viagem experimentados pelos usuários. A partir de então, indicadores como redução do consumo de combustível e de emissões tornaram-se variáveis importantes nas tomadas de decisão relacionadas a novos projetos de transporte.

O impacto de medidas de controle de transporte na qualidade do ar é tipicamente avaliado em termos de redução das emissões veiculares trazidas por estas estratégias. Neste contexto, o impacto ambiental do transporte rodoviário está tornando-se cada vez mais uma preocupação aos planejadores e gerenciadores de transporte. Atualmente, muitos dos modelos de transporte incorporam métodos para a estimativa de poluentes provenientes do tráfego rodoviário, com a finalidade de auxiliar na avaliação de estratégias de transporte levando em conta os seus respectivos impactos ambientais.

### 1.1 JUSTIFICATIVA DO TEMA E OBJETIVO

A estimativa da quantidade de emissões produzidas pelo transporte rodoviário requer informações completas sobre: (i) características do tráfego (composição de frota e condições de tráfego), (ii) taxas de emissões, e (iii) dispersão atmosférica. Os dados necessários para caracterizar o tráfego incluem o tipo de veículo, idade e manutenção, a capacidade do motor, a composição da frota, o modo de condução dos veículos (aceleração, desaceleração, cruzeiro, parada) e temperatura do motor no momento da partida.

Há uma grande variedade de modelos de tráfego e emissões, variando de modelos simples, com um número reduzido de parâmetros até modelos complexos com uma enorme quantidade de parâmetros. A aplicação de um modelo deve envolver a sua calibração. Apenas modelos calibrados devem empregados para prognósticos futuros. Esta quase sempre é uma tarefa difícil.

A avaliação da eficácia das políticas de transporte para a redução das emissões veiculares somente pode ser comprovada a partir da elaboração de inventários de emissão. A estimativa das emissões geradas pelos veículos rodoviários é, de forma geral, feita com

modelos de emissão que usam a velocidade média e o volume, como parâmetros descritivos do nível de atividade dos veículos. Entretanto, a recente instrumentação de veículos e o uso de ciclos de condução mais realísticos para testes em laboratório possibilitaram a medição de emissões produzidas durante a sua operação em condições reais. A análise dos resultados de diversos esforços de coleta de dados indica que o uso da velocidade, como única variável de poder explanatório do nível de atividade dos veículos conduz à inventários de emissões imprecisos. Este problema é agravado quando são avaliadas políticas de transporte que modifiquem o padrão de atividade dos veículos (ex: redução dos eventos de aceleração).

A caracterização das emissões pode ser afetada por diferentes fontes de erros. Os erros podem ocorrer devido a uma estimativa ou representação do nível de atividade dos veículos deficiente, bem como podem ser inerentes à modelagem das emissões veiculares ou da caracterização inadequada da frota de veículos.

O erro na estimativa das emissões veiculares pode levar a implementação de políticas de transporte que, mesmo visando a melhoria da qualidade do ar, sejam ineficientes. Além disso, acabam impondo gastos desnecessários ou expondo o meio ambiente e a população a riscos desconhecidos. Por esta razão, é importante testar um número razoável de modelos, com suas diferentes abordagens, para explorar ao máximo o seu potencial de aplicação. Justifica-se assim, a análise da variação dos parâmetros de modelagem do cenário escolhido, para testar o grau de flexibilidade/sensibilidade dos modelos e apontar as suas vantagens e desvantagens.

## 1.2 OBJETIVOS

A partir do exposto, foram estabelecidos os objetivos do presente trabalho.

### 1.2.1 Objetivo Principal

O objetivo principal deste trabalho é analisar os resultados de modelos de emissões veiculares através do uso de simuladores de tráfego.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta dissertação consistem em :

- a) Realizar revisão bibliográfica contemplando a quantificação das emissões veiculares; a estimativa do nível de atividade veicular e a integração de modelos de transporte com modelos de emissão;
- b) Avaliar os efeitos de diferentes estruturas de modelagem microscópicas de tráfego sobre as estimativas das emissões, através da utilização dos modelos DRACULA e INTEGRATION;
- c) Avaliar a influência da variação dos parâmetros de calibração de modelos microscópicos de tráfego na quantificação das emissões veiculares, através da utilização do modelo DRACULA;
- d) Avaliar o impacto de uma medida de ampliação de capacidade viária utilizando diferentes abordagens para a estimativa das emissões, relacionando o grau de dificuldade na calibração de modelos de simulação de tráfego e a diferença de resultados entre as diferentes abordagens;

### 1.3 METODOLOGIA

Os procedimentos empregados nesta pesquisa são: (i) revisão da literatura, (ii) coleta de dados, (iii) aplicação e calibração do modelo, (iv) geração e análise dos resultados, (v) utilização de modelos de emissão agregados a simuladores de tráfego, e (vi) análise estatísticas dos dados obtidos dos diferentes cenários estudados.

### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica que contempla os seguintes tópicos: formação das emissões veiculares, os compostos produzidos e o seu impacto, fatores que influenciam a formação das emissões, medidas para o controle das emissões veiculares.

No capítulo 3 são apresentados os modelos de emissão de poluentes, a suas classificações e os principais modelos desenvolvidos. Ainda neste capítulo há uma breve descrição sobre modelos de simulação de tráfego.

O capítulo 4 apresenta uma avaliação do impacto da variação de três aspectos intrínsecos aos modelos de simulação na quantificação das emissões veiculares: (i) os

parâmetros de entrada utilizados para calibração; (ii) a lógica dos modelos de progressão longitudinal; e (iii) o modelo de emissão incorporado ao simulador.

O capítulo 5 apresenta um estudo de caso onde é avaliado o impacto de uma melhoria de fluxo de tráfego na quantificação das emissões com o uso de simuladores de tráfego frente às abordagens tradicionais.

O capítulo 6 apresenta as conclusões obtidas neste trabalho e recomendações para trabalhos futuros.

## **2 EMISSÕES VEICULARES – UMA VISÃO GERAL**

---

### **2.1 INTRODUÇÃO**

As emissões veiculares são resultado da combustão de elementos fósseis. Todos os compostos químicos emitidos pelos automóveis são considerados como poluentes, pois causam a contaminação do ar e provocam efeitos adversos no meio ambiente e na saúde da população. As emissões veiculares são lançadas na atmosfera sob a forma de gases ou material particulado.

A preocupação das autoridades com a questão ambiental é recente, principalmente em função do crescente aumento da pressão pública para que governos e empresas implementem planos contingenciais. De acordo com Papacostas e Prevedouros (2001), no setor de transportes a preocupação com os impactos ambientais provocados em função da implantação de novos projetos de transportes teve início somente na década de 70.

Este capítulo traz uma visão geral sobre as emissões veiculares. Em primeiro lugar, é apresentado um breve histórico sobre os motores de combustão interna. Logo após, são descritos os processos de formação das emissões veiculares, seguido da descrição dos compostos químicos resultantes da combustão de combustíveis fósseis e o impacto causado por estes compostos. Ainda, o capítulo traz uma revisão sobre os fatores que influenciam o nível das emissões e os métodos disponíveis para realizar a medição das emissões veiculares. Por último, são descritas as medidas que podem ser adotadas para reduzir o nível das emissões veiculares.

### **2.2 A ORIGEM DO PROBLEMA: OS MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA**

#### **2.2.1 Histórico**

O motor a vapor, desenvolvido por James Watt em 1776, era o único motor à combustão existente, e empregado em grande escala, inclusive no setor de transportes, até o fim do século XIX (De Nevers, 2000). Neste tipo de motor, a combustão ocorria em um local externo à produção de energia mecânica, devido a esta característica são denominados motores de combustão externa.

Este cenário começou a modificar-se em 1876, quando Nicolaus Otto desenvolveu o primeiro motor de combustão interna, a obter sucesso comercial (Heywood, 1988). Este motor era baseado em um ciclo de quatro tempos (admissão, compressão, expansão e exaustão).

Porém o fator preponderante para a consolidação do motor desenvolvido por Otto foi a quebra da patente de sua invenção, em decorrência de desconfianças lançadas sobre a originalidade de seu trabalho (Heywood, 1998). Este episódio foi de extrema importância para a disseminação dos motores de combustão interna, pois a falta de uma patente tornou possível o aprimoramento do motor por qualquer engenheiro.

Os motores de combustão interna, então, tornaram-se uma alternativa natural para os primeiros automóveis devido às suas características (De Nevers, 2000). Para uma determinada potência os motores de combustão interna eram substancialmente menores que os motores de combustão externa. Além disso, eles possuíam uma eficiência térmica muito maior, o que implica em um menor consumo de combustível.

## **2.2.2 Classificação dos Motores de Combustão Interna**

Os motores de combustão interna podem ser classificados sobre vários aspectos (Heywood, 1988). A classificação dos motores de combustão interna de acordo com o método de ignição apresenta grande influência na formação das emissões veiculares. De acordo com este critério os motores de combustão são classificados em duas categorias descritas abaixo.

### **2.2.2.1 Motores de Ignição por Centelha**

Os motores de ignição por centelha, tradicionalmente equipam veículos de passeio, veículos comerciais leves e motocicletas. Nestes motores, também denominados de *motores de ciclo Otto*, a combustão da mistura ar/combustível, após ser submetida à compressão nos cilindros, é iniciada por uma centelha. Os combustíveis utilizados por estes motores são normalmente hidrocarbonetos leves de alto poder calorífico, como a gasolina, o álcool, gás natural ou misturas semelhantes, os quais apresentam boa resistência à detonação.

### **2.2.2.2 Motores de Ignição por Compressão**

Nos motores de ignição por compressão, ou *motores de ciclo Diesel*, a combustão ocorre com a auto-ignição do combustível, quando este é injetado e misturado com o ar que se

encontra aquecido devido à compressão no interior dos cilindros. Os combustíveis utilizados neste tipo de motor, em geral são hidrocarbonetos mais pesados e menos voláteis, como o óleo diesel. São mais robustos que os motores de ciclo Otto, e utilizados, na sua grande maioria, em veículos pesados (de passageiros e de cargas), que necessitam de alto valor de torque. Os motores a Diesel diferem do modelo Otto pelo fato de operarem sempre com excesso de ar, proporcionando um rendimento termodinâmico superior ao dos motores de ciclo Otto.

### 2.3 FORMAÇÃO DAS EMISSÕES VEICULARES

A avaliação de qualquer medida que vise a redução do nível das emissões veiculares passa, obrigatoriamente, pelo completo entendimento do mecanismo de formação destas emissões. É necessário identificar quais atividades veiculares são responsáveis pela emissão destes poluentes.

As principais fontes das emissões produzidas pelos automóveis são os gases expelidos pelo sistema de escapamento e os gases originados da evaporação do combustível, ilustrados na Figura 1. Os gases expelidos pelo escapamento têm origem na queima dos combustíveis fósseis e constituem as *emissões de descarga*. Já as emissões formadas pela evaporação do combustível são denominadas *emissões evaporativas*. As características do processo de formação das duas fontes de emissões veiculares são descritas a seguir (TRL, 1999; TRB, 1995).



**Figura 1:** Diferentes tipos de emissões

Fonte: Adaptado de Mehta *et al.* (2003)

#### 2.3.1 Emissões de descarga

As emissões de descarga são extremamente dependentes dos modos de operação do veículo (Heywood, 1988). Os modos de operação do veículo são classificados em (i)

condições estabilizadas; (ii) partida a quente; (iii) partida a frio. Dentro de cada um desses modos o veículo pode operar em velocidade constante, parado, em aceleração ou desaceleração.

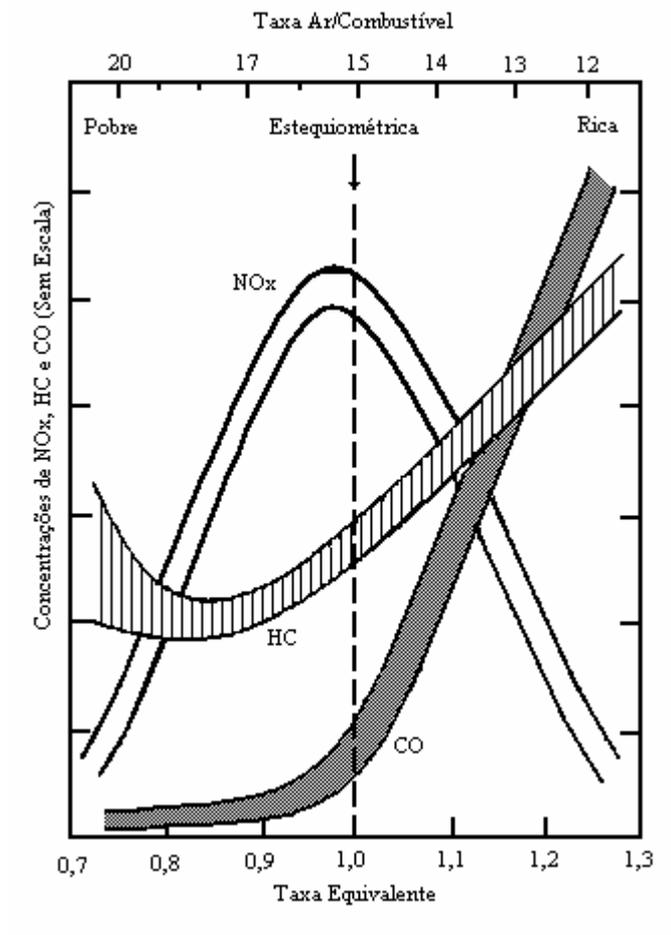
O modo de partida refere-se aos primeiros minutos de operação após a partida do veículo. A diferenciação entre a partida a frio e a partida a quente está na duração do período entre o desligamento do veículo e a sua repartida. Nas demais situações o veículo opera em condições estabilizadas (Mehta *et al.*, 2003).

O fator responsável pela diferenciação da quantidade de poluentes emitidos entre os diferentes modos de operação é a taxa ar/combustível (A/F) (Heywood, 1988). A taxa estequiométrica corresponde ao ar necessário para a completa oxidação da massa de combustível. Nesta situação a relação A/F é de aproximadamente 14,8 e denominada  $A/F_{\text{estequiométrica}}$  (De Nevers, 2000). A relação A/F é normalmente estabelecida em função do peso, e pode variar em função do combustível empregado.

Esta relação também pode ser expressa a partir de outra variável, a taxa equivalente  $\phi$ . A taxa equivalente é definida pela equação 1:

$$\text{Taxa equivalente} = \phi = \frac{(A/F)_{\text{estequiométrica}}}{(A/F)_{\text{atual}}} \quad (1)$$

Onde  $(A/F)_{\text{atual}}$ , é a taxa ar-combustível atual do motor. A utilização da taxa equivalente é mais vantajosa na medida em que ela possibilita a comparação de motores operando com combustíveis diferentes, uma vez que o valor absoluto de  $(A/F)_{\text{estequiométrico}}$  é função das propriedades do combustível empregado (De Nevers, 2000). A relação qualitativa entre a taxa equivalente e a taxa de ar-combustível com a quantidade de emissão produzida é mostrada na Figura 2.



**Figura 2:** Concentração de HC, CO e NO<sub>x</sub> nos gases de escape em relação à  $\phi$ .

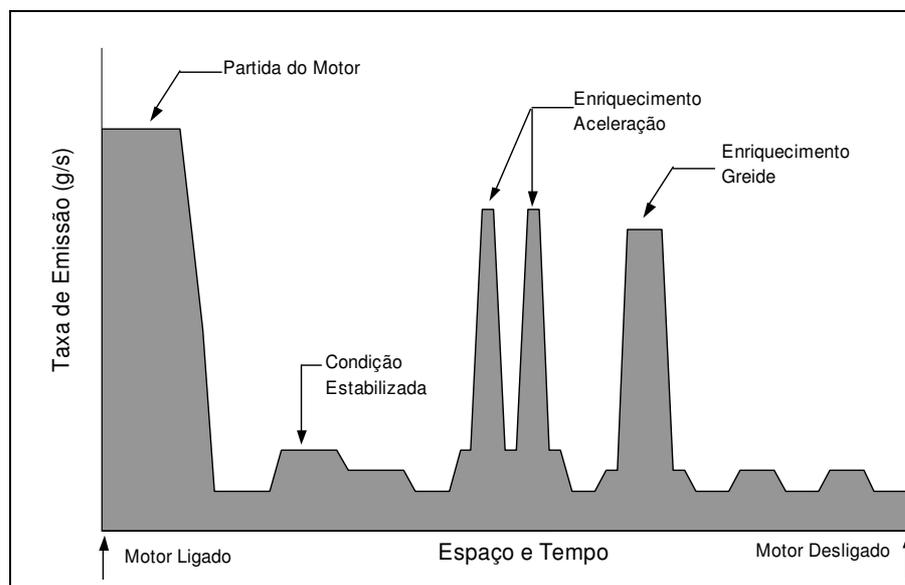
Fonte: Heywood (1988)

Em geral, misturas ricas geram grande quantidade de poluentes em função da queima incompleta do combustível. Entretanto, este mecanismo de formação não é igual para todos os tipos de motores. Nos motores de ciclo Diesel diferentemente dos motores de ciclo Otto, a combustão ocorre com grande quantidade de ar na mistura ar/combustível. Em função disso, os motores de ciclo Diesel operam, na sua maior parte do tempo, com misturas pobres, emitindo baixa quantidade de CO e grandes quantidades de NO<sub>x</sub> (De Nevers, 2000).

A demanda por potência exerce grande influência na relação ar/combustível. Os motores de ignição por centelha, normalmente operam próximos da taxa estequiométrica ( $\phi = 1$ ). Isto ocorre quando o motor opera em um regime de velocidade constante e com carregamentos leves. Esta é a típica situação de um veículo operando em uma via plana com regime de fluxo de tráfego sem interrupções (velocidade constante).

Em situações onde exige-se muita potência, como em aclives ou acelerações, os motores são dimensionados para operar com misturas ricas em combustíveis ( $\phi > 1$ ). Este enriquecimento da mistura ar-combustível também ocorre quando o motor está frio. Durante os períodos de partida a frio, o catalisador, responsável pelo controle das emissões, não fornece um controle total das emissões até que seja atingida a sua temperatura ideal de operação. Nestas duas situações a relação ar/combustível é enriquecida para não danificar o catalisador, gerando altos níveis de emissão de CO e HC. Entretanto, na medida em que há o seu aquecimento, a mistura torna-se menos rica, até o ponto onde o motor atinge a sua temperatura ideal de operação, quando  $\phi$  iguala-se a 1. (NRC, 2000).

Por outro lado, durante longos eventos de desaceleração, a mistura torna-se pobre ( $\phi < 1$ ). Este empobrecimento dá-se quando não há solicitação de potência ao motor. As condições de empobrecimento, também afetam as emissões, porém em uma escala menor do que o enriquecimento. (NRC, 2000). Estas variações das emissões ao longo de uma viagem são mostradas na Figura 3.



**Figura 3:** Variação das emissões ao longo de uma viagem

Fonte: Mehta *et al.* (2003)

### 2.3.2 Emissões evaporativas

As emissões evaporativas são formadas a partir da evaporação do combustível. São compostas basicamente por hidrocarbonetos (HC) e tem a sua formação vinculada à variação de temperatura (EPA, 1994). A Figura 1 mostra os diferentes tipos de emissões evaporativas.

O Quadro 1 lista os quatro tipos de emissões evaporativas em conjunto com o seu processo de origem.

### Quadro 1: Categoria das emissões evaporativas

Fonte: EPA (1994).

<b>Categoria</b>	<b>Processo de Formação</b>
Perdas de operação	Ocorrem durante a operação do motor. Estas emissões resultam da entrada de uma quantidade de combustível no sistema de controle de emissões superior à sua capacidade.
Perdas de resfriamento	Emissões do carburador e sistema de injeção eletrônica durante o resfriamento do motor após o seu desligamento.
Emissões diárias	Emissões originárias da vaporização do combustível armazenado no tanque devido a variações de temperatura ao longo das 24 horas do dia.
Perdas de reabastecimento	Ocorrem quando os vapores de gasolina escapam do tanque do combustível do veículo, quando o mesmo está sendo reabastecido.

## 2.4 COMPOSTOS EMITIDOS PELOS VEÍCULOS - AS EMISSÕES VEICULARES

Em condições ideais a combustão de hidrocarbonetos (combustíveis) resulta em H<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub>. Contudo, estas condições quase nunca são verificadas, ocorrendo a queima parcial do combustível e ainda reações indesejáveis. Não havendo combustão completa, acabam sobrando alguns subprodutos que vão constituir poluentes perigosos. (Branco e Murgel, 1995). A equação 2 demonstra a combustão completa de um hidrocarboneto (Heywood, 1988).



Esta seção descreve as principais características e os mecanismos de geração dos compostos emitidos pelos veículos e os efeitos provocados por estas emissões na saúde e no meio ambiente. São eles o CO, HC, NO<sub>x</sub>, Material Particulado, Chumbo (Pb) e Dióxidos de Enxofre (SO<sub>2</sub>). Estes são denominados *poluentes primários*, pois são lançados na atmosfera diretamente pelos automóveis. Ainda é descrita a formação do Ozônio (O<sub>3</sub>) a partir dos poluentes primários, devido a reações na atmosfera (Zannetti, 1990) e do Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), um produto da combustão que não é considerado como poluente, mas que possui grande influência no efeito estufa.

O Quadro 2 apresenta um resumo dos compostos emitidos pelos veículos, o efeito que estes provocam e qual tipo de motor é o principal responsável por sua formação.

**Quadro 2:** Compostos emitidos pelos veículos e seus efeitos

Fonte: Adaptado de TRL (1999) e Joumard *et al.* (1996).

Poluente	Classificação	Efeito	Contribuição Ciclo Otto	Contribuição Ciclo Diesel
Nox	Primário	Impacto na saúde Formação smog fotoquímico Chuva ácida Efeito estufa Degradação camada de ozônio	Baixa	Alta
CO	Primário	Impacto na saúde Formação smog fotoquímico Efeito estufa	Alta	Baixa
HC	Primário	Impacto na saúde Formação de smog fotoquímico Efeito estufa	Alta	Baixa
SOx	Primário	Impacto na saúde Chuva ácida Formação smog fotoquímico	Baixa	Alta
Pb	Primário	Impacto na saúde	Baixa	Alta
MP	Primário	Impacto na saúde	Baixa	Alta
CO <sub>2</sub>	Primário	Efeito estufa	-	-
O <sub>3</sub>	Secundário	Chuva ácida	-	-

### 2.4.1 Óxidos de Nitrogênio

Os óxidos de nitrogênio não são produtos diretos da combustão, entretanto a sua produção ocorre em um ambiente criado pela combustão. É decorrente da reação química entre o nitrogênio presente no ar atmosférico e os gases de temperatura elevada formados na combustão. Segundo Heywood (1988) a temperatura influencia de forma exponencial a formação deste composto químico. Os NO<sub>x</sub> emitidos são compostos de óxido nítrico (NO) e dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), este último em parcelas significativamente menores que o primeiro.

Quando o consumo de combustível é baixo, pequena quantidade de  $\text{NO}_x$  é emitida. Em condições de empobrecimento, a tendência é que uma quantidade maior de  $\text{NO}_x$  seja formada em função do excesso de  $\text{O}_2$ . A emissão de  $\text{NO}_x$  em motores de ciclo Diesel é superior a dos motores de ciclo Otto. Isto acontece devido às características de combustão dos motores de ciclo Diesel, que possui temperatura e pressão superiores (Branco e Murgel, 1995).

O  $\text{NO}_x$  é um dos precursores da formação do ozônio. Além disso, ele reage com a amônia e outros componentes formando o ácido nítrico que pode causar problemas respiratórios. Ele também contribui para a formação da chuva ácida.

#### **2.4.2 Monóxido de Carbono**

O monóxido de carbono é formado durante o processo de combustão. A sua concentração está ligada diretamente à taxa de equivalência ar/combustível. São produzidos quando há combustão incompleta do combustível. Isto ocorre quando há oxigênio ( $\text{O}_2$ ) insuficiente para queima de todo o carbono (C) contido no combustível em dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Os motores de ciclo Diesel, por operarem com excesso de ar (mistura pobre) produzem quantidades insignificantes de CO, comparadas às produzidas pelos motores de ciclo Otto (TRB, 1995).

O CO é um gás incolor e inodoro, porém muito tóxico. No organismo humano ele reage com a hemoglobina presente no sangue, formando a carboemoglobina, causando uma redução do  $\text{O}_2$  transportado para as células. A exposição por tempo prolongado ao CO pode causar tonturas, dores de cabeça e até asfixia, dependendo da sua concentração. Ainda, altas concentrações podem causar problemas cardíacos e respiratórios em crianças e idosos. O CO contribuí, de forma indireta, na formação o ozônio ( $\text{O}_3$ ) troposférico.

#### **2.4.3 Hidrocarbonetos**

Os hidrocarbonetos (HC) são compostos orgânicos voláteis (VOC) que não contém nitrogênio. São formados pela combustão incompleta do combustível ou pela evaporação do mesmo (ver item 2.3.2). Hoje em dia, com a utilização de controles eficientes de emissões através de descarga, as perdas evaporativas contribuem, em dias quentes, com a maior parte dos HC emitidos pelos veículos. Em condições estequiométricas e de enriquecimento, as emissões de HC são geralmente proporcionais ao consumo de combustível. Altos níveis de

emissão de HC também são verificados em condições de empobrecimento, quando há longos eventos de desaceleração (Ahn, 1998).

Os HC's emitidos são divididos em duas categorias: (i) reativos: aqueles que contribuem para a formação do *smog* fotoquímico; (ii) não-reativos; compostos estáveis que não contribuem nas reações fotoquímicas. Como forma de simplificação, os reativos são denominados de HC não-metano, e os não-reativos de HC metanos. Os hidrocarbonetos reagem na presença do  $\text{NO}_x$  e da luz do sol formando ozônio e contribuindo para a formação do *smog* fotoquímico.

#### **2.4.4 Óxidos de enxofre**

Os óxidos de enxofre (dióxido de enxofre- $\text{SO}_2$  e outros óxidos sulfurosos  $\text{SO}$  e  $\text{SO}_3$ ), emitidos por veículos, são decorrentes da oxidação do enxofre contido no combustível, principalmente no óleo diesel. Os níveis das emissões de  $\text{SO}_2$  dependem da quantidade de enxofre contida no combustível, as condições de operação do motor e do tipo de catalisador utilizado. A produção de óleo diesel com baixos teores de enxofre tem contribuído para a redução das emissões de  $\text{SO}_2$ . Pode-se citar como exemplos a redução dos níveis de enxofre no óleo diesel no Brasil de 1% para 0,2% com a criação do óleo diesel metropolitano (Vilanova, 1998). Entretanto, apesar da significativa redução do teor de enxofre, o diesel empregado no Brasil está longe de ser um produto não poluente se comparado ao diesel empregado em países da Europa e nos EUA, com 0,001% de teor de enxofre.

#### **2.4.5 Chumbo**

As emissões de Pb ocorrem em motores abastecidos com gasolinas que contém este composto orgânico na sua composição. Até 1991, a gasolina utilizada no Brasil continha aditivos antidetonantes à base de chumbo. A partir de então a adição de chumbo foi eliminada, sendo substituído pelo álcool anidro, com isso as emissões de Pb, assim como as de  $\text{SO}_2$ , são muito inferiores comparadas com valores da década de 70 (NRC, 2000).

#### **2.4.6 Material Particulado**

O material particulado orgânico (MP) consiste de substâncias sólidas ou líquidas (partículas de carbono do combustível não queimadas) que podem ser coletadas por filtragem dos gases de escape. Nos motores de ciclo Otto a emissão de MP é insignificante,

oposto aos motores de ciclo Diesel, onde é gerado grande parte deste material. O MP é caracterizado de acordo com o seu tamanho (grossos, partículas finas, e partículas inaláveis). São originados de duas fontes (i) como produtos da combustão, principalmente veículos movidos a diesel; (ii) partículas largas como pó levantado pelo deslocamento de veículos em vias não pavimentadas (Zannetti, 1990).

#### **2.4.7 Dióxido de Carbono**

O dióxido de carbono é o principal produto da combustão completa. De acordo com Zannetti (1990), até meados da década de 70 o CO<sub>2</sub> não era considerado como poluente atmosférico, isto porque sua presença, embora provocasse a contaminação do ar, não provocava efeitos adversos em organismos vivos. Em função disto, as emissões de CO<sub>2</sub> nunca foram alvo de preocupação de autoridade e controle rigorosos.

A recente preocupação com o aquecimento global levou a um maior controle dos gases de efeito estufa, entre eles o CO<sub>2</sub>. Um dos esforços mais recentes e conhecidos visando a redução dos gases de efeito-estufa é o Tratado de Kyoto. O Tratado de Kyoto instituiu o mercado de créditos de carbono, unidade métrica utilizada para comparar as emissões de diferentes gases de efeito estufa (entre eles o CO<sub>2</sub>) com base no seu potencial de aquecimento global. Para que o crescimento de algumas nações não fosse comprometido na tentativa de atingir a meta estabelecida para redução dos gases de efeito-estufa, os países podem comprar créditos de outras nações que possuam projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) (Portal do Biodiesel, 2005). O MDL trata do comércio de créditos de carbono baseado em projetos de mitigação de gases de efeito-estufa, daí a necessidade de estimativas corretas de emissões.

#### **2.4.8 Ozônio**

O ozônio (O<sub>3</sub>) é um gás que, usualmente, não é emitido diretamente na atmosfera. Ele é criado por reações fotoquímicas complexas que envolvem principalmente NO<sub>x</sub>, O<sub>2</sub> e HC na presença da luz do sol. Em função disto, a concentração de ozônio no ar é maior durante o período do verão. O ozônio é benéfico em camadas mais altas da atmosfera filtrando a radiação ultravioleta (Cappiello, 2002), entretanto em camadas mais baixas provoca problemas de saúde, tais como inflamação nos olhos, problemas de garganta e problemas respiratórios crônicos.

## 2.5 FATORES QUE INFLUENCIAM NO NÍVEL DAS EMISSÕES VEICULARES

Nesta seção descreve-se os mecanismos de formação e os impactos causados por todos os compostos químicos emitidos pelos veículos automotores. A quantidade relativa de cada composto químico é função de uma série de fatores, entre eles, a tecnologia do motor e o tipo de combustível.

As emissões produzidas por um veículo possuem um alto grau de variabilidade. De fato, existe um grande número de fatores que afetam o nível da formação das emissões veiculares. Para Wenzel *et al.* (2000) a variabilidade das emissões manifesta-se de duas formas distintas, a variabilidade nas emissões entre veículos e a variabilidade nas emissões formadas por um mesmo veículo. A variabilidade das emissões de um veículo para outro apresenta elevada ordem de magnitude e é consequência de fatores tecnológicos, do desgaste e da manutenção dos veículos. A variabilidade das emissões de um mesmo veículo é dependente de condições ambientais, operacionais e, em alguns casos, da manutenção do veículo.

### 2.5.1 Fatores Tecnológicos

Os fatores tecnológicos são agrupados em três categorias (Barth *et al.*, 2000); (i) equipamentos de controle de emissões; (ii) combustíveis; (iii) motores. Os maiores avanços no atendimento aos limites estabelecidos pelo PROCONVE (Ver item 2.7.3) para veículos foram obtidos com a implementação de melhorias tecnológicas nos veículos brasileiros. As tecnologias para o controle das emissões incorporadas nestes últimos trinta anos incluem a recirculação dos gases de exaustão para reduzir a formação de  $\text{NO}_x$  no motor, a adoção do conversor catalítico para o tratamento dos gases de descarga, a substituição dos carburadores por injeção de combustível eletrônica e controle por computador da mistura ar-combustível e tempo de ignição.

A introdução destas melhorias de controle foi feita de forma gradual na frota de veículos. Entretanto, os avanços tecnológicos verificados em motores e combustíveis desenvolvidos em países da Europa ou Estados Unidos nem sempre são verificados em similares nacionais. De forma geral, os combustíveis e motores desenvolvidos no Brasil tendem a gerar uma quantidade maior de emissões do que motores e combustíveis existentes na Europa e Estados Unidos. As emissões são muito sensíveis a estas tecnologias independentemente da idade do veículo. Características dos veículos como volume do motor, potência e peso também afetam as taxas de emissões.

## **2.5.2 Fatores de Desgaste e Manutenção**

Na medida em que o veículo envelhece e a sua quilometragem acumulada aumenta, as suas emissões tendem a ser majoradas. Este fenómeno é função tanto da degradação natural dos controles de emissão de veículos com bom estado de conservação resultando em incrementos moderados das emissões, como do mal-funcionamento ou falha do controle de emissões resultando em um grande aumento nas emissões (CO e HC).

A manutenção dispensada pelos proprietários aos seus automóveis, realizando a programação de serviços indicados pelos fabricantes, pode afetar o comportamento dos motores e equipamentos de controle de emissões e conseqüentemente as emissões. O nível de manutenção pode ser até mais crítico do que a idade do veículo (desde que bem mantido) na determinação no nível das emissões.

De acordo com Wenzel *et al.* (2000) a distribuição das emissões de um grande número de veículos é muito distorcida. A maioria dos veículos possui baixas emissões relativas, enquanto que uma parcela relativamente pequena de veículos com problemas de funcionamento possuem emissões extremamente elevadas.

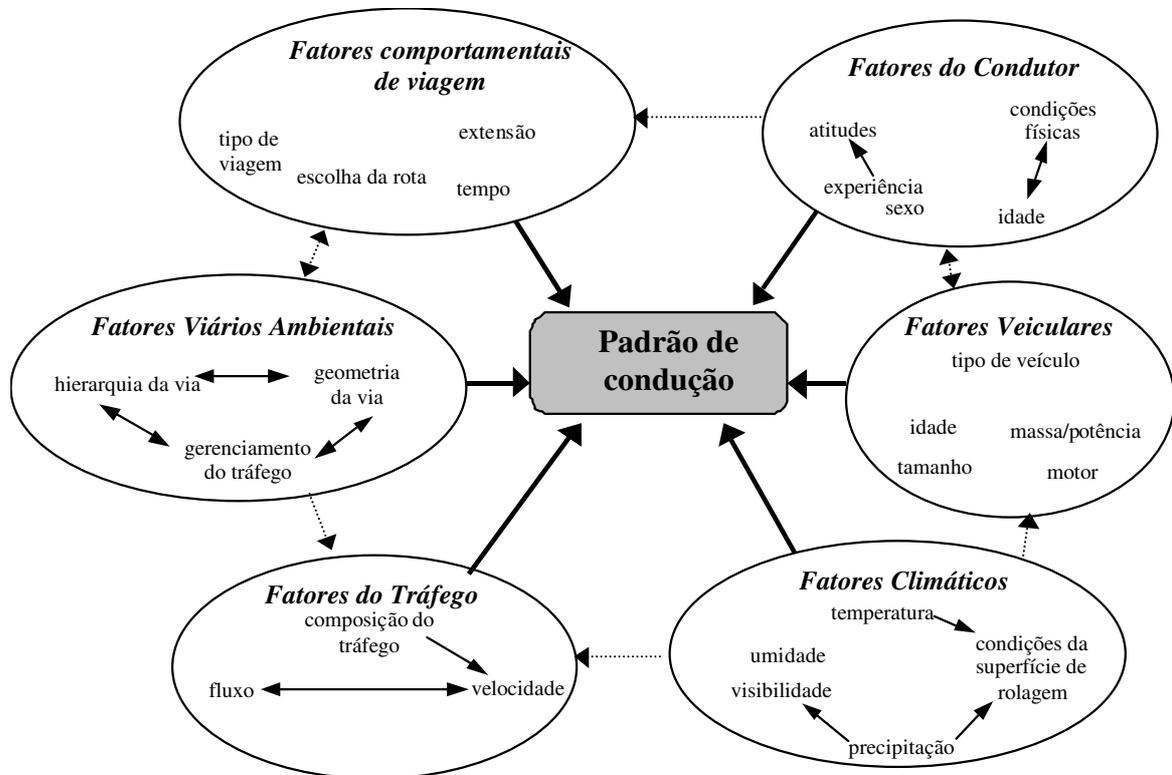
## **2.5.3 Fatores Operacionais e Ambientais**

### **2.5.3.1 Modo de condução/Carregamento do motor:**

O carregamento no motor (padrão de condução) está correlacionado com duas variáveis: as condições de operação do veículo influenciado pelas características operacionais e físicas do sistema viário e pelo comportamento do condutor. O isolamento destas características é impossível, pois a atitude do condutor é influenciada pelas condições do ambiente de condução e vice-versa (ver Figura 4).

A velocidade média é a variável operacional mais empregada para descrever o nível das emissões. A velocidade média é uma combinação de velocidade e aceleração para cada tipo de rodovia. Isto porque o regime de operação do motor é significativamente distinto para cada tipo de rodovia dada a mesma velocidade média. Por exemplo, uma velocidade média de 50 km/h em uma via urbana dá a idéia de fluxo livre, enquanto que em uma rodovia esta mesma

velocidade média indica um fluxo congestionado com freqüentes acelerações e desacelerações, e conseqüentemente maior nível de emissões.



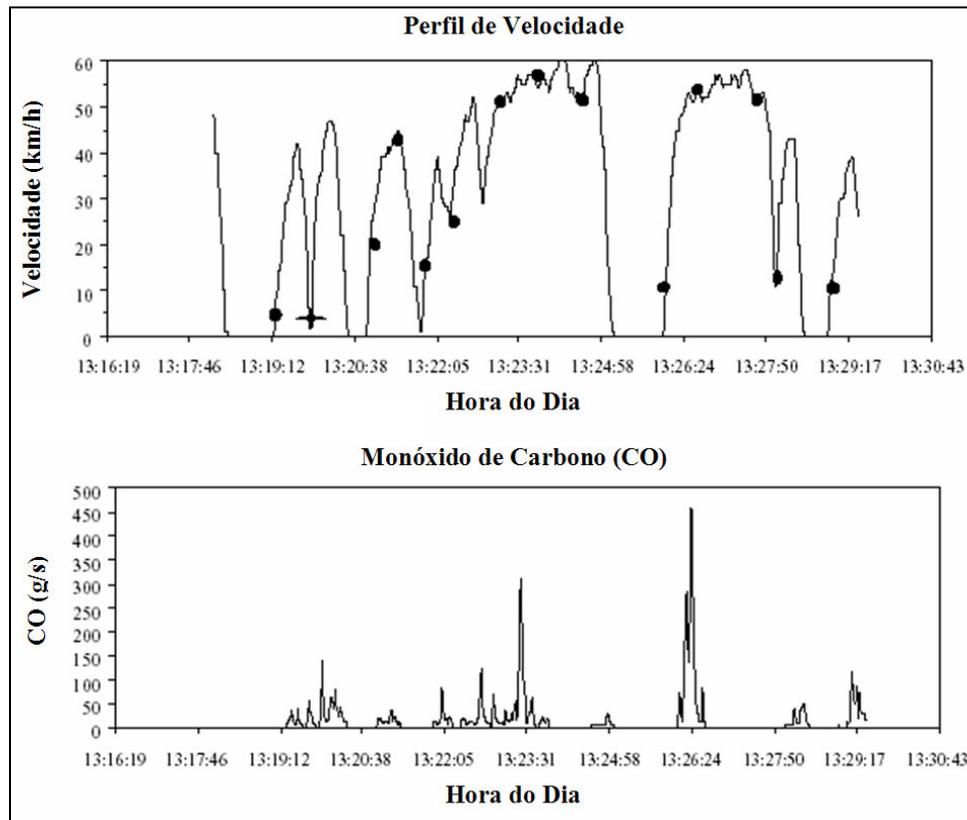
**Figura 4:** Causa e efeito na variabilidade do padrão de condução.

Fonte: Ericsson (2000)

As acelerações desempenham um papel preponderante na formação das emissões. Os níveis de aceleração observados possuem uma forte correlação com a agressividade do condutor. Do total de emissões gerado por um veículo em uma viagem, a maior parte é composta por pequenos episódios de grande emissão, como mostra Figura 5. Estes pequenos episódios ocorrem em eventos de aceleração (Rouphail *et al.*, 2000). Já as emissões com um veículo parado possuem um nível muito baixo. A influência dos eventos de aceleração na formação das emissões é reportado também por Rakha e Ding (2003). Estes eventos de aceleração caracterizam a natureza transiente dos motores de combustão interna em relação ao seu regime estequiométrico normal.

Os efeitos das acelerações nas emissões são mais notados em vias urbanas. Nas vias rurais o tráfego é mais suave. Um condutor agressivo emite até 8 vezes mais emissões que um condutor moderado em veículos equipados com catalisador (Vlieger *et al.*, 2000).

O estudo conduzido por LeBlanc *et al* (1995) reportou acréscimos em g/s de CO para a operação de veículos onde a velocidade era superior a 90 km/h em todos intervalos de aceleração, bem como, onde a velocidade era inferior a 90 km/h porém a aceleração excedia 5,3 km/h/s. Estudos de sensoriamento remoto em Houston, vincularam emissões de descarga dos veículos com o nível de atividade instantânea, observando que as taxas de emissão eram função da velocidade e aceleração (Yu, 1998).



**Figura 5:** Efeito da aceleração nas emissões

Fonte: Rouphail *et al.* (2000)

Rakha e Ding (2003) quantificaram o impacto de paradas no nível de emissão dos veículos. Mantendo uma mesma velocidade média, as emissões de HC sofrem um impacto significativo em função da realização de uma parada (100% para uma velocidade média de 80km/h). Quanto menor a velocidade média, menor o impacto das paradas nas emissões.

De acordo com Ahn (1998) as taxas de emissões são influenciadas pelas características físicas das rodovias. Facilidades como interseções semaforizadas, rampas, praças de pedágios e seções de entrelaçamento de correntes de tráfego podem aumentar o nível das emissões em função do enriquecimento do motor devido à acelerações. A inclinação do greide das rodovias também afeta o nível das emissões. Em uma via inclinada, o veículo necessita de mais

potência do motor, provocando uma redução na taxa A/F (enriquecimento da mistura), com o objetivo de manter a velocidade do veículo. Ainda, as condições do pavimento (irregularidade) exercem influência no nível de emissões.

Os estudos ainda indicam a correlação entre a carga no motor devido à operação em rampas e emissões elevadas. Pierson *et al.* (1996) observaram que as emissões em greides com inclinação positiva (0 a 3,76%) são duas vezes maiores que as emissões em descidas (0 a -3,76%) em segmentos de um túnel. Resultados semelhantes foram reportados por Cícero-Fernández *et al.* (1997). Eles reportaram um acréscimo de 0,04 g/m de HC e 3,0 g/m de CO para cada 1% de aumento na inclinação do greide.

Hallmark *et al.* (2002) identificaram as características geométricas e operacionais de vias urbanas semaforizadas que afetam a porção de tempo despendida pelos veículos em cada modo de operação (parado, em aceleração/desaceleração ou em velocidade constante). Hallmark *et al.* realizaram estudos de campo, onde foram coletadas, com pistola de laser, as velocidades instantâneas dos veículos, de forma individual. Os dados coletados foram analisados com o auxílio de regressões baseados em árvores hierárquicas. Os resultados identificaram que a posição do veículo na fila, greide, o fluxo horário por faixa de interseções semaforizadas à montante e a jusante, o percentual de veículos pesados e a velocidade limite determinada são variáveis estatisticamente mais significantes. Estas variáveis possuem maior influência sobre a atividade veicular em um arco viário semaforizado.

Veículos que ocupam as primeiras posições em filas tendem a despender frações significativas de tempo em atividades modais extremas (acelerações). Desta forma estratégias que reduzam o número de paradas dos veículos em interseções semaforizadas podem reduzir a operação dos veículos em intervalos de velocidades e acelerações com altas taxas de emissão e subseqüentemente reduzir as emissões.

#### 2.5.3.2 Características da Viagem

Como dito anteriormente as emissões durante a operação do veículo são classificadas em: (i) partida a frio; (ii) partida a quente; (iii) condições estabilizadas. Em função disso, o tempo de duração da viagem possui forte relação no nível de emissões. Os avanços tecnológicos na redução das emissões são focados nas emissões em condições estabilizadas. Entretanto, as viagens urbanas são caracterizadas por sua breve extensão e duração, com isso

o catalisador não consegue alcançar a temperatura ideal de operação (partidas a frio) gerando altos níveis de emissão. Segundo Jensen (1995), na Dinamarca embora a parcela de tempo de condução com veículos com motores frios corresponda a apenas 9% do tempo total de todas as viagens, este modo de operação contribui com 60% das emissões de CO e HC. Este fenômeno é minimizado em países de clima tropical, onde a temperatura média é mais elevada em relação à verificada nos países do hemisfério norte.

### 2.5.3.3 Temperatura do Ambiente, Umidade e Altitude

A umidade e a temperatura possuem forte influência no nível das emissões veiculares principalmente sobre as emissões de HC. Temperaturas muito baixas influenciam as emissões na partida dos veículos e causam o resfriamento do catalisador mesmo em paradas muito curtas (Wenzel *et al*, 2000). A umidade do ar pode afetar o nível de emissões de NO<sub>x</sub>. Já a altitude possui forte influência nas emissões de veículos equipados com motores de ciclo diesel, pois em cotas elevadas o ar torna-se rarefeito provocando uma redução na taxa A/F (enriquecimento da mistura).

## 2.6 MEDIÇÃO DAS EMISSÕES VEICULARES

As emissões veiculares são medidas em testes realizados em dinamômetros de chassi, em veículos instrumentados e através do sensoriamento remoto. Existem diversas técnicas disponíveis para realizar a medição das taxas de emissão. De acordo com o objetivo em questão, a medição das emissões veiculares pode ser realizada em testes conduzidos em laboratórios, onde as condições ambientais e padrões de condução são controlados e limitados. Recentemente, em função dos avanços tecnológicos, a medição das emissões em campo, chamadas de emissões do *mundo real*, torna-se cada vez mais freqüente. (Wenzel *et al*, 2000).

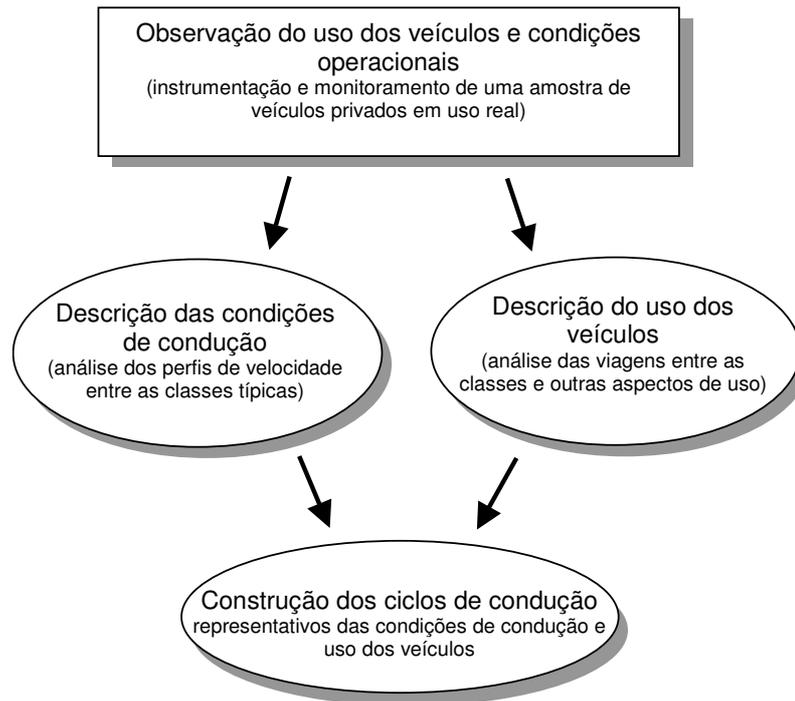
O processo de medição das emissões veiculares é muito importante por duas razões. A partir destes testes são fornecidos os certificados para os automóveis de acordo com os limites impostos pela legislação de cada país. Além disso, disponibilizam os dados necessários para o desenvolvimento de modelos de emissão. Os primeiros testes para medições de emissões veiculares foram realizados com o propósito de certificar novos veículos de acordo com a adequação aos padrões de emissões estabelecidos pelo órgão regulamentador (Wenzel *et al.*, 2000).

### 2.6.1 Testes em Laboratórios

A técnica mais utilizada para a medição das taxas de emissões de poluentes é o teste dos veículos em laboratórios. Este tipo de teste fornece resultados mais satisfatórios, principalmente pelo controle total das condições do ambiente. A medição das taxas é realizada através do teste dos veículos em dinamômetros de chassi (Faiz *et al.*, 1997) com a utilização de ciclos de condução ou ciclos de operação.

Os ciclos de condução tentam reproduzir as condições de tráfego e padrões de condução do mundo real (Andre *et al.*, 1995). Através da instrumentação e monitoração de uma amostra representativa de veículos são observadas as características de uso dos veículos (velocidades, acelerações e desacelerações) e de suas viagens (extensão da viagem, tipo de via) em condições reais. As condições do tráfego são caracterizadas segmentando os perfis de velocidades em seqüências cinemáticas entre paradas sucessivas. O uso de análise fatorial e técnicas de classificação permite a caracterização destas seqüências e a forma como elas são conectadas. O ciclo de condução é então formado pela combinação destas seqüências selecionadas aleatoriamente de acordo com o resultado de análises estatísticas (ver Figura 6).

Existem diversos ciclos de condução padronizados pelos órgãos oficiais de transporte de todo o mundo (Joumard *et al.*, 2000; Boulter *et al.*, 1999). No Brasil, o ciclo de condução utilizado para o teste de medição de emissões é definido pelo PROCONVE (IBAMA, 1998). Os ciclos de condução são caracterizados por variáveis cinemáticas tais como tempo total, velocidade média, distância viajada, velocidade máxima e máxima potência específica. A potência específica é o dobro do produto da velocidade pela aceleração ( $2 \cdot v \cdot a$ ).



**Figura 6:** Passos para a caracterização das condições de condução e viagens, baseadas em medições do mundo real em um ciclo de condução

Fonte: Andre *et al.* (1995)

Os veículos podem ser testados em laboratórios através do emprego de diferentes técnicas de medição. Existem testes padronizados por órgão reguladores. Estes testes podem ser estáticos e dinâmicos. (Wenzel *et al.*, 2000). No teste estático não há aplicação de carga no veículo (veículo em ponto morto). Nos testes dinâmicos os veículos são dispostos em um dinamômetro de chassis e conduzidos de acordo com um ciclo de condução estabelecido. As vantagens e desvantagens de cada método e a elaboração dos ciclos de condução são discutidos a seguir.

#### 2.6.1.1 Teste Estático

No teste estático medem-se as concentrações de poluentes emitidos pelo cano de descarga de um veículo estacionário. O teste foi proposto, inicialmente pelo Clean Air Act e adotado pelo CONAMA para identificar veículos com padrões irregulares de emissão devido ao baixo custo e rapidez do método. No teste estático não há a solicitação de potência ao motor, isto é, o veículo é testado em ponto morto (Wenzel *et al.*, 2000, IBAMA, 1998).

O teste estático não pode ser usado para medições de  $\text{NO}_x$  porque as emissões deste poluente são sempre muito baixas durante o regime transiente. Além disso, as emissões de HC e CO produzidas durante o regime transiente podem não ser representativas das emissões geradas quando da operação do veículo em carga.

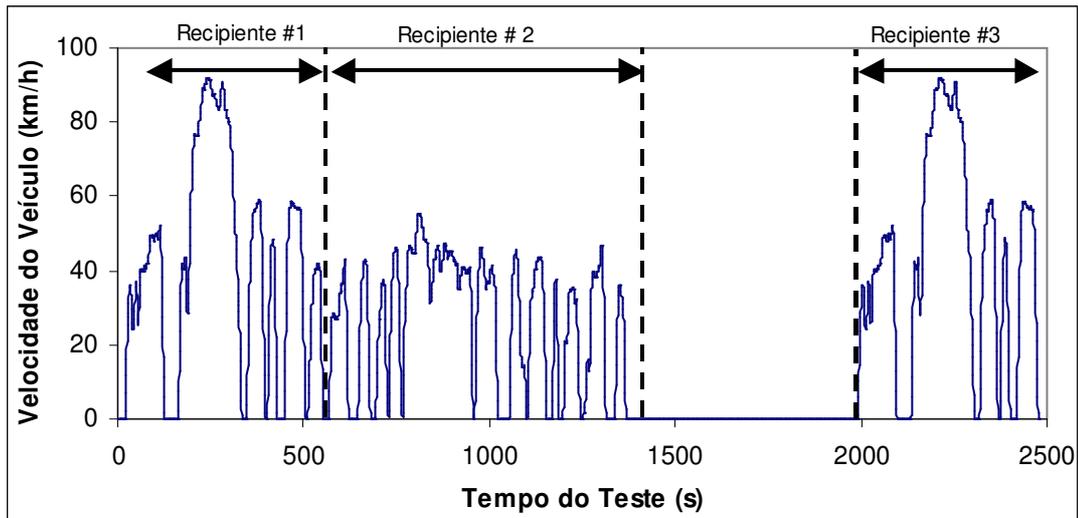
O teste estático é muito empregado em programas de inspeção e manutenção (programas I/M). Uma variante deste teste consiste em testar o veículo em ponto morto e aumentar a rotação do motor até 2500 rpm com o objetivo de simular as condições de operação do veículo em condições de carregamento.

#### 2.6.1.2 Dinamômetros de Chassi

Grande parte dos dados de emissão é levantada em testes realizados em dinamômetros de chassi (ver Figura 8). Neste tipo de teste o veículo é testado seguindo um ciclo para a condução do veículo, onde máquinas ou homens conduzem o veículo o mais próximo possível de velocidades especificadas. Durante um teste de dinamômetro de chassi as emissões podem ser medidas de duas formas: (i) total gerado durante todo o teste; ou (ii) continuamente (em geral, segundo a segundo) (Morey *et al*, 2000).

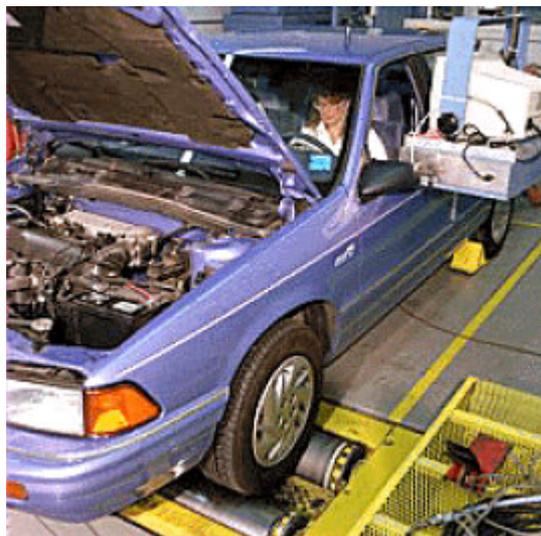
Durante a década de 70, a Environment Protection Agency (EPA), desenvolveu o Federal Test Procedure (FTP) para teste de veículos (ver Figura 7). O ciclo de condução estabelecido neste teste simula a condução de um veículo por um trajeto misto de rodovias e vias urbanas na cidade de Los Angeles. Uma velocidade limite de 91.2 km/h e uma aceleração de 5,28 km/h/s foram determinadas para acomodar limitações dos dinamômetros de chassi disponíveis na época em que o teste foi desenvolvido. O ciclo de condução oficial para testes no Brasil é semelhante ao ciclo FTP.

No ciclo FTP, as emissões de descarga geradas são armazenadas em três recipientes distintos, um para cada porção do ciclo de condução. As emissões produzidas em cada etapa do teste são coletadas em recipientes separados permitindo a comparação de diferentes modos de operação, como partidas a quente e partidas a frio. O primeiro recipiente captura a fase inicial denominada *partida a frio*. O segundo captura as emissões produzidas na fase de operação denominada *quente estabilizada*. No terceiro recipiente são medidas as emissões produzidas na fase *partida a quente*.



**Figura 7:** Ciclo de condução para o teste FTP.

Analísadores de gases medem a concentração de HC, CO, NO<sub>x</sub> e CO<sub>2</sub> em cada recipiente. As unidades de concentração relacionam a quantidade de cada poluente com a quantidade total de ar coletada (ex: em percentual ou partes por milhão de unidades (ppm)). A massa de emissões produzidas durante cada etapa do teste é calculada como produto da massa molecular e a concentração medida de cada poluente e o volume total de ar coletado. A massa de emissões, então, é relacionada com a distância viajada simulada para gerar o fator de emissão em gramas/km para cada recipiente. Tira-se a média ponderada dos fatores de emissão de cada recipiente sendo que o seus pesos são obtidos de acordo com a quantidade relativa de condução sob cada seção do ciclo. Assim obtém-se o fator das emissões de descarga composto.



**Figura 8:** Dinamômetro de chassi.

Pesquisas têm demonstrado que o ciclo FTP não representa muitos dos padrões de condução verificados (Barth *et al.*, 2000). Uma atividade veicular típica pode passar grande fração de tempo fora do envelope de desempenho do ciclo FTP. Um ciclo adicional, o US06, foi desenvolvido. Este é um ciclo regulatório agressivo, complementar ao FTP, o qual alcança altos níveis de emissão. As emissões coletadas nestes testes são utilizadas para a maior parte dos esforços de calibração e validação de modelos de emissão.

### **2.6.2 Sensoriamento Remoto**

Sensores remotos (Wenzel *et al.*, 2000; Yu, 1998), desenvolvidos na década de 80, medem as modificações na intensidade de feixe de luz apontado para a via provocadas pela pluma de exaustão de um automóvel. Junto com o sensor acopla-se uma câmara de vídeo para identificação da placa do veículo, e através do acesso aos registros de licenciamento determina-se a idade, o tipo e eventualmente a quilometragem do veículo.

A vantagem do uso deste tipo de medição é que apenas um único equipamento é capaz de medir as emissões de um grande número de veículos em um único dia com um custo muito inferior aos outros procedimentos de medição, além do fato de fornecerem dados reais de emissões de campo. Assim o sensoriamento remoto serve para fornecer dados sobre emissões médias da frota ou as emissões típicas de um determinado tipo de veículo. Medições repetidas de veículos individuais podem ser usadas para identificar altos-emissores. Entretanto, este tipo de medição, além do problema do controle das condições do experimento, apresenta problemas na conversão das unidades, de concentração de emissões para taxas de emissões.

A medição das emissões de cada veículo é feita em uma fração de segundo apenas, e conseqüentemente, as emissões totais deste veículo podem variar consideravelmente daquelas obtidas pela medição através do sensoriamento remoto. Outro aspecto é o desconhecimento das condições de operação dos veículos (carregamento), porém esta dificuldade pode ser transposta com a medição da inclinação do greide e da velocidade e aceleração dos veículos. Dessa forma, a condição de operação pode ser obtida pelo cálculo do carregamento físico do veículo aplicando os conceitos de cinemática.

### **2.6.3 Medições em Bordo**

As medições realizadas nos veículos em operação nas vias (Rouphail *et al.*, 2000), permitem a medição simultânea da velocidade aceleração e emissões dos veículos segundo a

segundo em condições reais de operação. As medições são realizadas a partir da instalação de um dispositivo portátil nos veículos. As medições realizadas nos veículos em operação nas vias, por serem conduzidas em um ambiente de condições não controladas, apresentam grande variabilidade em seus resultados. A Figura 9 ilustra um veículo equipado com dispositivo para medição das emissões em bordo.



**Figura 9:** Equipamento para medição em bordo

#### 2.6.4 Medidas de Emissão em veículos pesados

Assim como os automóveis os caminhões e os ônibus também são testados em dinamômetros de chassi, porém testes desta natureza são recentes. Em países como o Brasil, por exemplo, devido à questões de praticidade e custos, a certificação de veículos pesados em relação ao seu padrão de emissões ainda é realizada através de medidas em bancadas de testes dinâmicos de motores (Jost *et al.*, 1995). A partir dos resultados dos motores testados e dados sobre a resistência aerodinâmica dos veículos é estimada a emissão dos veículos pesados. Em função destas limitações e também da pequena quantidade de medições em dinamômetros de chassi (se comparadas com a dos veículos leves) a modelagem das emissões de veículos pesados ainda é um processo incerto.

### 2.7 MEDIDAS PARA O CONTROLE DAS EMISSÕES VEICULARES

O objetivo das medidas de controle das emissões veiculares é melhorar a qualidade do ar através da redução da poluição gerada pelos automóveis. O controle das emissões pode ser realizado de duas formas distintas (Walsh, 1998 e EPA, 1998): (i) o controle das emissões para cada quilômetro viajado por veículo (KMVV) – medidas regulatórias; e (ii) a alteração do padrão de utilização dos automóveis – medidas de controle de transporte. O objetivo desta seção é descrever estas medidas.

### 2.7.1 Medidas Regulatórias

O controle das emissões produzidas para cada KMOV é feito através da adoção de medidas regulatórias que tem como objetivo a implantação de padrões para a qualidade e redução no nível das emissões veiculares. Os Estados Unidos foram pioneiros na implantação deste tipo de medida, promulgando o Clean Air Act em 1970, que foi complementado posteriormente em 1990. Além dos EUA outros países também implantaram atos da mesma natureza, como por exemplo, o ato Europeu e o PROCONVE no Brasil. O PROCONVE será tratado em maiores detalhes no item 2.7.3.

Em geral, o atendimento aos níveis de emissões estabelecidos em medidas regulatórias é obtido com a implantação de inovações tecnológicas. Entre elas cita-se: a produção de combustíveis mais limpos, o uso de tecnologias de combustão mais limpas, uso de equipamentos para reduzir a emissão de poluentes e programas de inspeção e manutenção de veículos. De acordo com Ribeiro (2001), a adoção de medidas tecnológicas produz excelentes resultados na redução das emissões veiculares. Entretanto, possuem um custo de implantação muito elevado e os seus resultados são de longo prazo, em função da gradual taxa de substituição da frota.

A adoção de medidas tecnológicas tem reduzido significativamente a quantidade de poluente emitido por unidade de distância viajada. De acordo com Capiello (2002), os dispositivos de controle de emissões implantados reduziram as emissões a um nível mínimo. Em consequência, não havendo modificações no combustível empregado pelos veículos, futuras inovações tecnológicas nos motores de combustão interna provocarão apenas reduções marginais no nível de emissões.

Por outro lado, falhas nos dispositivos de emissão irão tornar um veículo normal em um grande emissor. Wenzel e Ross (1996) estimam que, na Califórnia, 10% dos veículos possuem problemas no seu controle de emissões, contribuindo com metade das emissões veiculares. Em função disto, é muito importante realizar o controle das emissões durante toda a vida dos veículos. Isto pode ser conseguido com a adoção de programas efetivos de inspeção e manutenção (LIMA, 2000).

## 2.7.2 Medidas de Controle de Transporte

O controle das emissões veiculares através da alteração do padrão de utilização dos automóveis é feito através da diminuição da quantidade KMVV em horários e locais críticos ou redução de eventos que produzam grandes quantidades de emissões. Basicamente este grupo de solução busca a redução das emissões pela redução do congestionamento. Estas medidas representam uma abordagem alternativa no controle das emissões veiculares e são denominadas medidas de controle de transporte (MCT).

A diminuição dos KMVV pode ser alcançada através da adoção de diversas políticas de transporte. Citam-se políticas que promovam a utilização de meios de transportes mais eficientes, políticas que visem uma maior ocupação por veículo, políticas de mudança do horário da ocorrência do pico e redução da demanda.

A redução dos eventos que produzam grandes quantidades de poluentes é obtida com a implantação de melhorias no fluxo de tráfego. Estas melhorias incluem a adoção de uma gama de estratégias que visem o aumento da capacidade e da eficiência do sistema viário sem promover, no entanto, a sua ampliação física. Uma vez reduzidos os congestionamentos, as emissões produzidas tendem a reduzir. De acordo com EPA (1998) as estratégias para melhoria do fluxo de tráfego são agrupadas em três grupos: (i) semaforização (coordenação/otimização semafórica); (ii) operação (restrições a conversões, eliminação de gargalos); e (iii) gerenciamento e fiscalização (gerenciamento de incidentes, controle de rampas).

### 2.7.2.1 Medidas de Melhoria de Fluxo de Tráfego

Existem diversas medidas para a melhoria do fluxo de tráfego. Os parágrafos seguintes descrevem a aplicação de algumas medidas, com a avaliação da sua eficácia na redução das emissões.

Os benefícios da estratégia de coordenação semafórica implantada em um corredor viário de 9,6km Phoenix nos EUA na redução das emissões foram estudados por Rakha *et al.* (2001b). A partir de dados de velocidade, coletados em campo segundo a segundo, utilizando veículos equipados com GPS, e de estimativas de velocidade fornecidas por um modelo de simulação foram quantificadas as emissões com o uso do modelo desenvolvido por Ahn

(1998). Foram observados ganhos localizados, entretanto ao considerar toda a rede houve um aumento nas emissões de CO em 1,2% e não houve modificação nas emissões de HC e NO<sub>x</sub>.

Robertson *et al.* (1996) estudaram o efeito de plano fixo de coordenação semafórica elaborados com o TRANSYT nas emissões e compararam com os resultados obtidos com uma estratégia de controle isolado de semáforos atuados em uma artéria de 6km em East London. Para cada um dos planos foram coletados dados relacionados à aproximação dos veículos (distância percorrida para cada incremento de tempo) e as emissões foram estimadas com ao auxílio do modelo MODEM (Joumard *et al.* 1995). Em geral, a quantidade de emissões quando do uso da coordenação com o TRANSYT foi levemente superior (1 a 3%) ao controle isolado.

Medidas de *traffic calming* também podem ser empregadas para reduzir as emissões veiculares. Várhelyi (2002) estudou o efeito da substituição de uma interseção semaforizada por uma rotatória. Os resultados mostraram que as emissões de CO foram reduzidas em 29%. Entretanto medidas de *traffic calming* podem ter resultados adversos, no mesmo estudo Várhelyi apontou que a substituição de interseções controladas por regra de prioridade por rotatórias provocou um aumento de 5% nas emissões. Ainda, Grosso *et al.* (2002), a partir do uso do simulador microscópico VISSIM em conjunto com o modelo de emissões MODEM, avaliaram a implantação de um conjunto de medidas de *traffic calming*, em conjunto com a adoção de um limite de velocidade de 32 km/h (o cenário base era de 60 km/h) em um grupo de vias locais, gerou um aumento nas emissões em até 50% (no caso do CO). Isoladamente a redução do limite de velocidade mostrou-se mais danoso ao aumento das emissões.

A alteração do limite de velocidade em freeways constitui-se em mais uma medida para a redução das emissões veiculares. As emissões (em g/s) possuem uma correlação positiva com a velocidade. Quanto maior a velocidade e conseqüentemente a potência utilizada, maior será a taxa de emissões (g/s). Por outro lado, quanto maior a velocidade menor será o tempo de percurso do veículo para um dado segmento e conseqüentemente menor será o seu período de emissão. Esta combinação é responsável pelo formato em “U” das curvas de emissão apresentadas em g/km, onde o menor nível de emissões é verificado a uma velocidade de aproximadamente 80km/h. Segundo Tongbin *et al.* (2003), em algumas rodovias do Texas o limite de velocidade foi reduzido para 88km/h com o objetivo de reduzir as emissões veiculares.

Outro grupo de medidas que vem ganhando espaço é a aplicação de Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS). Elas requerem tempo para ter sua implantação efetiva, mas já tem sido empregadas com sucesso na redução do congestionamento e conseqüentemente das emissões. Entre as medidas de ITS cita-se: (i) Sistemas avançados de gerenciamento de tráfego (gerenciamento de incidentes, controle semafórico, controle de acessos, cobrança automática de pedágio); (ii) Gerenciamento da demanda; (iii) Sistemas avançados de informações ao viajante (informações dinâmicas visando a otimização das escolhas dos viajantes); (iv) Sistemas avançados de controle do veículo (EPA, 1998).

#### 2.7.2.2 Aplicação de Políticas de Transporte

A restrição à circulação de veículos é uma das alternativas empregadas para a redução das emissões. O impacto da restrição à circulação de veículos é óbvio se analisado localmente, pois reduz a zero as emissões veiculares nos locais. Entretanto, não havendo troca no modo de transporte (deslocamento a pé, por ônibus ou carro) provoca um aumento no fluxo de veículo nas vias adjacentes em função da reorganização do tráfego e conseqüentemente um incremento nas emissões em nível global. O impacto ambiental da implantação de vias restritas a pedestres foi analisado por Chiquetto (1997) com o uso do modelo SATURN e um modelo de emissões baseado no modo de operação dos veículos. De acordo com Chiquetto, a restrição à circulação não provocou uma mudança significativa na escolha modal, houve uma redução na distância total viajada e as emissões cresceram 5% se considerada toda a rede analisada.

#### 2.7.2.3 Restrições ao Uso de Medidas de Controle de Transporte na Redução das Emissões

A ação mais tradicional para a solução de problemas de transporte compreende a construção de novas rodovias. A implantação destas novas infra-estruturas tem se tornado inviável em função de restrições físicas, ambientais e econômicas. Além disso, há dúvidas em relação à eficácia deste tipo de solução, pois podem encorajar a um aumento no número de viagens e conseqüentemente as emissões tendem a crescer. Este incremento no KMMV pode ofuscar o ganho obtido com a melhoria do fluxo de tráfego. Este fenômeno é denominado demanda induzida (Noland e Lem, 2002).

É incerto o alcance dos benefícios propiciados por medidas de controle de transporte. Em algumas ocasiões, ganhos obtidos localmente tornam-se insignificantes se comparados à

melhoria global. Ainda, medidas de melhoria de fluxo podem provocar aumento das velocidades sem necessariamente contribuir para a redução das emissões, geradas principalmente por eventos de aceleração, um exemplo (EPA, 1998) é o caso do controle de rampas realizado em rodovias do EUA. Esta medida visa basicamente o aumento da velocidade nas vias arteriais, reduzido o congestionamento. Entretanto, provocam um aumento na concentração de CO nas áreas próximas às rampas.

### 2.7.3 O Controle das Emissões Veiculares no Brasil

Em 1986, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabeleceu o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) através de várias resoluções e suportado pela Lei nº 8.723/93 (IBAMA, 1998). O objetivo deste programa é a melhoria da qualidade do ar através da redução e controle das emissões produzidas por veículos.

Entre as medidas estabelecidas pelo PROCONVE destaca-se a adoção de limites de emissão (ver Quadro 3) que gradualmente tornaram-se mais restritivos, de acordo com as suas fases de implantação. Além disso, estabeleceu procedimentos para o ensaio, de veículos leves e pesados, para medição das emissões de escapamento e evaporativas. A partir disso, para que um novo veículo seja introduzido no mercado, seu nível de emissão obtido em teste padronizado deve estar de acordo com os limites impostos pelo PROCONVE.

**Quadro 3:** Limites de emissões para veículos fabricados no Brasil.

Ano	POLUENTE			
	CO (g/km)	HC (g/km)	NO <sub>x</sub> (g/km)	MP (g/km)
89 – 91	24	2,1	2	-
92 – 96	24	2,1	2	-
92 – 93	12	1,2	1,4	-
Mar – 94	12	1,2	1,4	0,05
Jan – 97	2	0,3	0,6	0,05

O método adotado pelo PROCONVE, para medição das emissões de veículos leves e normatizado pela NBR-6601, é idêntico ao utilizado pela Environmental Protection Agency (EPA), a agência ambiental americana, para certificação de veículos (ver item 2.6.1.2).

Em 2001, em estudo realizado pelo Laboratório Interdisciplinar do Meio Ambiente (LIMA, 2001), comprova-se a sucesso do PROCONVE na redução das emissões de poluentes de origem veicular. Este mesmo estudo mostra que, em 1999 a adoção do PROCONVE causou na Região Metropolitana de São Paulo, uma redução de 15,8% nas emissões de CO, 15,2% nas de HC e 21,4% em relação ao cenário sem a implantação do PROCONVE e uma natural evolução tecnológica nos veículos.

## 2.8 CONCLUSÕES

As emissões veiculares são responsáveis por uma série de externalidades, principalmente nos grandes centros urbanos. Entretanto seus impactos não se limitam à escala local, provocando impactos de repercussão global.

A formação das emissões está intimamente relacionada com o modo de operação dos veículos, especificamente ao comportamento transiente dos motores de combustão interna em relação a sua natureza estequiométrica. Até recentemente empregava-se apenas a velocidade média como variável descritiva para relacionar o nível de emissões com a atividade veicular. Entretanto, com a instrumentação de veículos percebeu-se o grande impacto das acelerações na formação das velocidades. Outro aspecto fundamental na formação das emissões é a parcela de veículos que circulam com seus motores em condições frias.

As medidas para redução das emissões são caracterizadas em dois grupos: (i) regulatórias; e (ii) medidas de controle de transporte. As medidas regulatórias têm se mostrado mais eficientes, contudo seus resultados não são visíveis em curto prazo. Além disso, grande parte de seus ganhos podem ser compensados com o aumento da motorização mundial onde cada vez é maior o número e a extensão de viagens por carros.

É importante também ressaltar as diferenças tecnológicas verificadas entre os motores e combustíveis fabricados no Brasil em relação aos produzidos em países Europeus e Estados Unidos. De forma geral, em função de questões de adaptação destas tecnologias a ambientes tropicais, deficiências tecnológicas e questões econômicas os veículos brasileiros tendem a

emitir uma quantidade maior de poluentes em relação aos veículos produzidos nos países desenvolvidos.

As medidas de controle de transportes mostram-se atrativas pelo seu baixo custo se comparadas com as medidas regulatórias, e sua eficiência no curto prazo. Entretanto é preciso ser criterioso na análise dos seus benefícios. Medidas que, em um primeiro momento contribuem para a redução das emissões em escala local podem contribuir para um aumento das emissões em escala global. Além disso, o uso de métodos inapropriados para a avaliação do impacto de uma medida de transporte pode levar à resultados enganosos.

Em função disto é fundamental ter conhecimento das ferramentas disponíveis para a quantificação das emissões. Este assunto será tratado com profundidade no próximo capítulo.

### 3 MODELAGEM DAS EMISSÕES VEICULARES

---

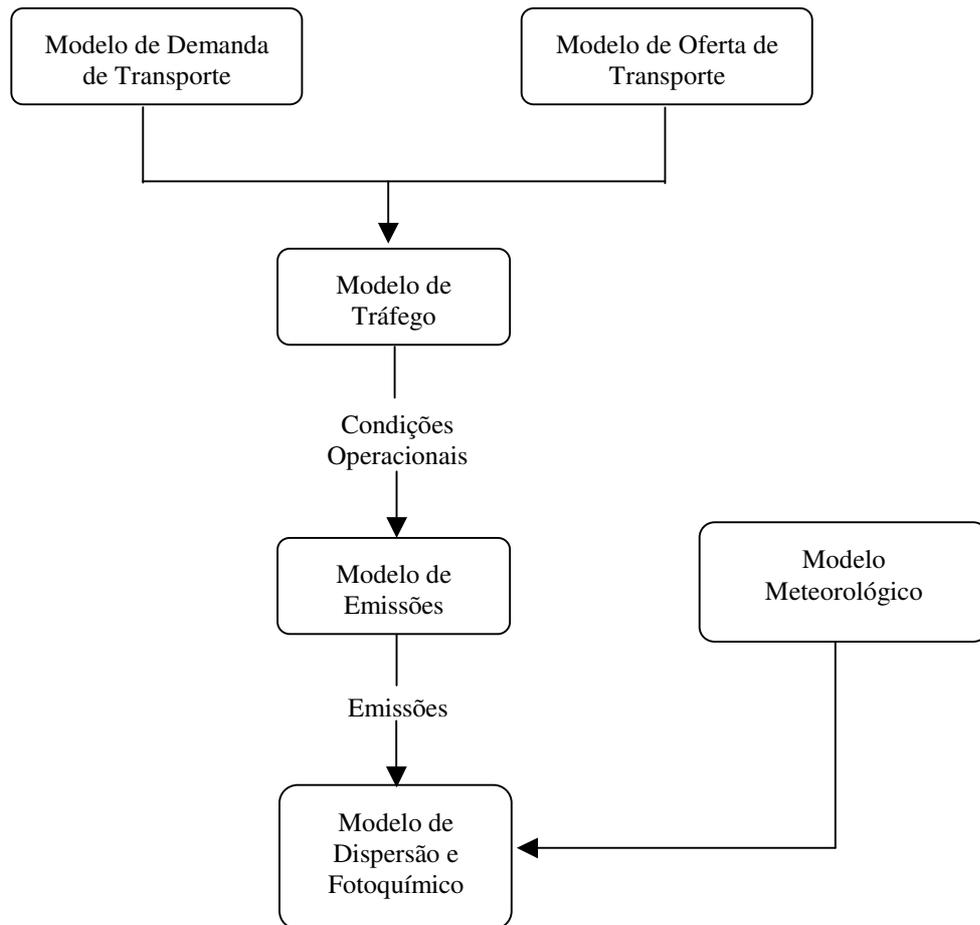
#### 3.1 INTRODUÇÃO

O objetivo deste capítulo é a descrever o conjunto de modelos empregados para a modelagem das emissões veiculares. São descritas vantagens e limitações de cada uma das diferentes metodologias apresentadas na literatura para a modelagem das emissões veiculares. Este capítulo apresenta a seguinte estrutura: (i) uma revisão de modelos para a estimativa do nível de atividade do tráfego; e (ii) uma revisão dos modelos de emissão encontrados na literatura.

#### 3.2 MODELAGEM DAS EMISSÕES VEICULARES

A modelagem das emissões veiculares é constituída de dois estágios: (i) a estimativa do nível de atividade das fontes emissoras; (ii) a quantificação das emissões geradas por estas atividades. A interação entre a demanda e a oferta de transporte determinam o fluxo de tráfego na rede de transporte, isto é, o nível de atividade. Os veículos consomem combustível e produzem emissões. Estas emissões irão determinar a concentração de poluentes no ar.

Para a modelagem das emissões é preciso utilizar um conjunto de modelos que representem os processos descritos acima, constituindo-se um sistema para estimativa do impacto do tráfego na qualidade do ar (ver Figura 10). Os modelos podem representar redes em várias escalas espaciais, de uma área regional a uma interseção singela. No que diz respeito à dimensão temporal, os modelos podem ser estáticos, se eles assumirem condições de equilíbrio contínuo, ou dependentes do tempo (dinâmicos). Estas várias abordagens de modelagem necessitam de diferentes esforços em termos de calibração, dados de entrada e esforço computacional. A escolha da abordagem de modelagem depende do objetivo (do planejamento regional de transportes ao planejamento local de tráfego) e das restrições em termos de disponibilidade de dados e tempo computacional.



**Figura 10:** Modelos do sistema para estimativa do impacto do tráfego na qualidade do ar

Os modelos de planejamento de transporte (geração e distribuição de viagens, escolha modal e alocação do tráfego) fornecem a matriz origem-destino de deslocamentos dentro da rede viária e os carregamentos dos arcos viários. Estes modelos representam a interação entre a oferta (sistema viário) e demanda. Maiores informações sobre modelos de planejamento de transporte podem ser obtidas em Ortuzar e Willumsen (1994).

Para a execução de uma modelagem completa das emissões veiculares é necessário, além das informações operacionais do tráfego, variável de grande importância, outras características dos veículos que exercem influência sobre o nível de emissões produzido, tais como composição da frota, idade dos veículos, característica tecnológica dos veículos, percentual de viagens realizadas por veículos com motores frios, umidade do ar e características dos combustíveis.

### 3.3 ESTIMATIVA DO NÍVEL DE ATIVIDADE DO TRÁFEGO

A estimativa das emissões veiculares requer um conhecimento satisfatório das informações operacionais do tráfego. Estas informações podem ser obtidas a partir de medições em campo, instrumentação de veículos, diários de viagem, desenvolvimento de ciclos de condução específicos e modelagem do tráfego (André e Hammarstöm, 2000).

A medição em campo, assim como a utilização de diários de viagem, fornece apenas a velocidade ou tempo de viagem como variável explanatória da operação dos veículos. Para uma quantificação de emissões em nível estratégico este dado pode ser aplicável, entretanto é necessário ainda obter informações sobre fluxos nas vias, o que pode ser inviável para uma área extensa. Os ciclos de condução desenvolvidos, outra alternativa, nem sempre conseguem representar o comportamento do tráfego de uma forma apurada (Barth *et al.*, 2000).

Atualmente observa-se a grande utilização de modelos de tráfego agregados a modelos de emissão para a estimativa de emissões. De acordo com Algers *et al.* (1997), dentre os 32 micro-simuladores de tráfego avaliados, 54% incorporam modelos de emissão. A utilização de modelos de tráfego para o cálculo das emissões veiculares torna-se interessante, na medida em que eles podem representar as dinâmicas e o comportamento do tráfego urbano de uma forma real em escala temporal e espacial.

Modelos de tráfego macroscópicos fornecem dados mais agregados tais como viagens, KMOV e velocidade média nos arcos. Os resultados gerados por estes modelos são suficientes apenas para estimar emissões em uma base regional. Entretanto, estes modelos não são sensíveis a estratégias que afetem o desempenho operacional dos veículos, tais como atrasos e padrões de fila e eventos de desaceleração e aceleração. Neste caso o recomendável é o uso de um modelo microscópico de tráfego. Ainda, o uso de modelos oportuniza a avaliação de condições e a condução de análise de sensibilidade que não são possíveis em campo.

#### 3.3.1 Modelos de Tráfego

Modelos de tráfego utilizam informações sobre a demanda de transportes para prever as futuras condições do tráfego. Um modelo típico de demanda de transporte inclui os seguintes componentes: (i) geração de viagens; (ii) distribuição de viagens; (iii) escolha modal; (iv) alocação do tráfego.

Os modelos de tráfego podem ser classificados de acordo com os critérios listados abaixo (May, 1990; Hoogendoorn e Bovy, 2001):

- Mudanças de estado do sistema (contínuo x discreto);
- Variáveis do fluxo de tráfego (agregado x desagregado);
- Representação do processo (determinístico x estocástico);
- Lógica estrutural (analítico x simulação);
- Escala de aplicação (interseção, corredores ou redes).

Em relação às mudanças de estado do sistema os modelos podem ser contínuos ou discretos. Nos modelos contínuos as mudanças de estado do sistema são descritas continuamente no tempo em resposta a estímulos contínuos. Os modelos discretos consideram que o estado do sistema é modificado abruptamente em determinados instantes de tempo. Ainda, neste último, o estado pode ser modificado em sucessivos e determinados intervalos de tempo (tempo discreto), ou em resposta à ocorrência de algum evento pré-determinado (eventos discretos).

As variáveis do fluxo de tráfego podem ser agregadas ou desagregadas. Variáveis agregadas caracterizam a rede de tráfego por parâmetros macroscópicos, tais como fluxo, densidade e a velocidade. Variáveis desagregadas caracterizam os veículos individualmente, utilizando modelos comportamentais que representam a interação entre os veículos, como exemplo modelos de *car-following* e modelos de troca de faixa.

A representação do processo pode ser determinística ou estocástica. Os modelos determinísticos desprezam a variabilidade aleatória, ou seja, todas as interações entre as entidades do sistema são definidas por relações exatas. Os modelos estocásticos incorporam funções de probabilidade, sendo utilizados para representar a incerteza de um processo ou para expressar, na forma de distribuições estatísticas, o efeito de uma variável aleatória nos parâmetros de saída.

Em relação à sua lógica operacional, os modelos de tráfego podem ser analíticos ou simulação. Modelos analíticos capturam as relações entre as componentes do sistema através do uso de um conjunto de equações matemáticas, enquanto que modelos de simulação

predizem as condições do sistema através da representação das interações temporais e espaciais entre os componentes do sistema em problemas complexos, os quais não podem ser descritos em termos analíticos.

Entre as vantagens mais citadas da modelagem por simulação incluem-se (May, 1990):

- A modelagem por simulação é menos onerosa do que a implementação efetiva. Ainda, a simulação evita distúrbios nas operações de tráfego que geralmente acompanham experimentos de campo;
- Os resultados gerados pelos modelos de simulação incluem medidas de desempenho que possuem difícil mensuração em campo;
- O impacto operacional de demandas futuras pode ser objeto de avaliação;
- Muitas variáveis, que no campo não podem ser controladas, no ambiente de simulação podem ser mantidas constantes. Isto permite a compreensão clara de quais variáveis são importantes e como elas se interrelacionam.

Por outro lado, quando aplicados de maneira inapropriada e tratados como “caixas pretas” (McShane e Roess, 1990), os modelos de simulação podem levar a soluções incorretas. Entre as potenciais reservas à modelagem por simulação citam-se:

- Podem existir alternativas mais fáceis para resolver o problema;
- A simulação pode demandar muito tempo;
- Os modelos de simulação requerem muitos dados de entrada, que podem ser de difícil obtenção ou até mesmo impossíveis;
- Os modelos de simulação requerem verificação, calibração e validação que uma vez dispensadas tornam o modelo sem efetividades;
- Podem ser de difícil uso para não desenvolvedores devido à falta de documentação;
- A simulação não é possível a menos que desenvolvedor compreenda o sistema na sua integralidade;

- Alguns usuários tendem a aplicar os modelos e tratá-los como caixas pretas e não compreendem o que eles representam;
- Alguns usuários tendem a aplicar os modelos sem conhecer as limitações e hipótese do modelo.

O nível de detalhe de um modelo de tráfego é determinado pela combinação de duas características, a representação do tráfego e as variáveis do tráfego. O Quadro 4 define os tipos de modelos em relação à representação do tráfego: (i) microscópicos, (ii) mesoscópicos, e (iii) macroscópicos. Modelos macroscópicos assumem que o ambiente afeta o comportamento agregado dos veículos, caracterizado por fluxo, velocidade e densidade. Modelos mesoscópicos usam variáveis menos agregadas fornecendo mais detalhes sobre as trajetórias dos veículos. Os veículos são representados em nível individual e regras de comportamento são especificadas, mas ainda de forma genérica, como funções de distribuição de probabilidade da relação fluxo/capacidade. Modelos microscópicos usam variáveis desagregadas e representação discreta dos veículos, fornecendo a trajetória dos veículos de forma detalhada com valores de aceleração e velocidade a cada instante.

**Quadro 4:** Tipos de modelos de tráfego.

		Quanto às Variáveis do Fluxo de Tráfego	
		Variáveis Agregadas (velocidade, densidade, etc)	Variáveis Desagregadas (acel. e vel. seg a seg)
Quanto à Representação do Tráfego	Baseada no Fluxo	MACROSCÓPICOS	-
	Veículos Individuais	MESOSCÓPICOS	MICROSCÓPICOS

Maiores detalhes sobre modelos microscópicos de simulação serão fornecidos no capítulo 4.

### 3.4 MODELOS DE EMISSÃO

Os modelos de emissão têm a finalidade de quantificar as emissões veiculares com base no modo de operação dos veículos. Seu desenvolvimento é feito a partir de dados medições das taxas de emissões realizadas em veículos. Existem várias metodologias disponíveis para

realizar a quantificação das emissões de poluentes. De acordo com Sturm *et al.* (1997) a definição do tipo de modelo de emissão depende muito da necessidade específica e da exatidão requerida para descrever o comportamento das emissões provenientes do tráfego rodoviário.

Os modelos de emissão são empregados para dois tipos de cálculo. Eles podem ser utilizados para prever os valores absolutos de poluição (inventários), como, por exemplo, identificar as ruas que excedem os padrões de qualidade do ar, mas para este tipo de análise um alto grau de precisão nos fatores de emissão será requerido. Outra finalidade do modelo de emissão é a sua utilização em avaliações de impacto, como a comparação de diferentes estratégias de tráfego. Neste tipo de análise a precisão nos fatores de emissão pode não ser um fator muito importante.

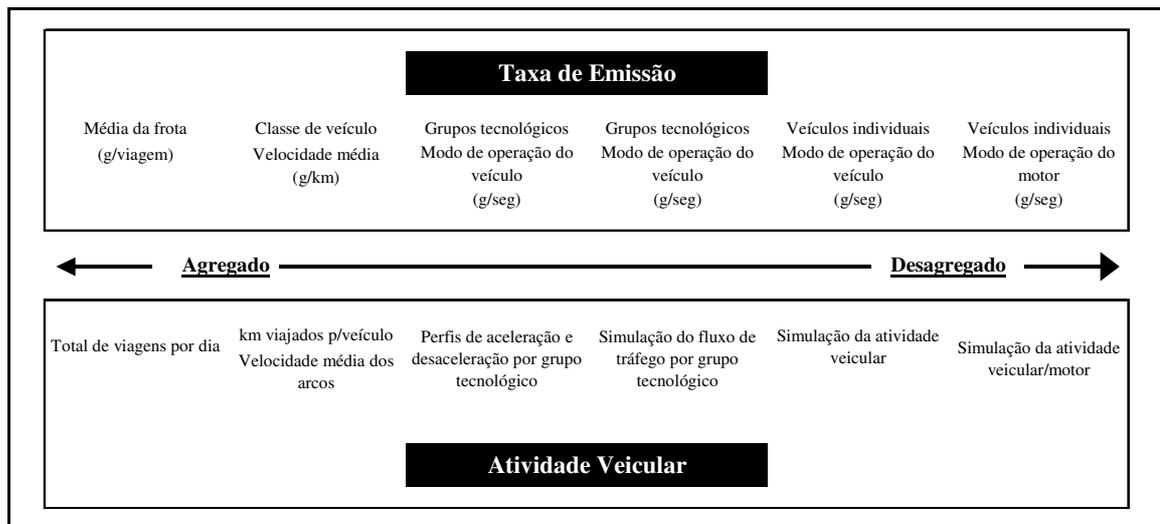
Os poluentes tradicionalmente modelados pelos modelos de emissão veiculares são o CO, o HC, o NO<sub>x</sub> e o CO<sub>2</sub>. Modelos que representem a emissão de Material Particulado, poluente importante em veículos com motor de diesel, ainda são objeto de desenvolvimento na literatura. Atualmente as emissões produzidas e emitidas pelos motores, que são descritas com relativa precisão pelo consumo de combustível, são modeladas com precisão razoável. Entretanto, após o motor as emissões passam pelo sistema de controle de emissão, que filtra uma parcela dos poluentes, enquanto que as emissões restantes são emitidas pelo sistema de descarga – emissões de descarga. As emissões de descarga são muito difíceis de estimar, uma vez que o catalisador apresenta um comportamento não linear (Barth *et al.*, 2000).

Modelos de emissão têm sido utilizados para determinar as quantidades de emissões do tráfego rodoviário pela total incapacidade de se quantificar estas emissões no mundo real. Segundo Faiz (1997) os fatores de emissão utilizados para cada localidade deveriam ser baseados em medições das taxas de emissão realizados em veículos utilizados na área de estudo, mas a obtenção de medições precisas de fatores de emissão é um processo complexo e com custo elevado. Em razão disto, poucos experimentos são realizados e estes geralmente testam uma pequena quantidade de veículos e sob condições limitadas (em termos das condições de condução dos veículos testados – em laboratório ou em condições reais de tráfego).

### 3.4.1 Classificação dos Modelos de Emissão

Os modelos de emissão são calibrados a partir de medições realizadas em dinamômetros de chassi. Durante um teste de dinamômetro de chassi as emissões podem ser medidas de duas formas: (i) total gerado durante todo o teste; ou (ii) continuamente (em geral, segundo a segundo). Estes métodos correspondem às duas formas de modelar as emissões veiculares, denominadas (Capiello, 2002): (i) modelos estáticos (modelos baseados na velocidade média); (ii) e modelos dinâmicos, respectivamente.

A necessidade de modelos que fossem mais sensíveis ao modo de operação dos veículos resultou em uma série de pesquisas visando o desenvolvimento de modelos de emissão mais desagregados, ou chamados modelos modais. Estes modelos mais desagregados podem modelar de forma explícita as emissões resultantes de uma vasta gama de modos de operação. A Figura 11 mostra o espectro das abordagens para estimar as emissões, do nível mais agregado até o mais desagregado.



**Figura 11:** Classificação dos modelos de emissão.

### 3.4.2 Modelos Estáticos

Modelos baseados na velocidade média ou modelos estáticos são os modelos mais comumente utilizados e levam em conta as dinâmicas veiculares através do conceito de velocidade média. Eles funcionam com base em fatores específicos de emissão para cada tipo tecnologia de veículo/motor, fator de degradação e uma situação de tráfego médio. Geralmente eles formam a base para o cálculo da qualidade do ar em escala local. São empregados caracteristicamente em cidades. Modelos como MOBILE (EPA), EMFAC

(Califórnia), COOPERT (Agência ambiental européia) e o método britânico existente no Design Manual for Road and Bridges são exemplos deste tipo de modelo.

Eles tomam forma a partir estatísticas de uso dos veículos, como, por exemplo, a milhagem anual, a divisão dos tipos de vias, etc. Eles calculam as emissões médias, incluindo os efeitos das partidas a frio, evaporações, etc e são utilizados para inventários regionais e nacionais de emissões. Em geral, modelos estáticos são abastecidos com dados provenientes de modelos macroscópicos de tráfego. O cálculo das emissões é feito com o uso da equação 3.

$$E_i = \sum_c \sum_l KMVV_l \times f_c \times BER_i(\bar{s}_l, c) \quad (3)$$

Onde:

$E_i$ : é o total de emissões do tipo  $i$  para um dado período de tempo e uma dada área;

$c$ : é a categoria do veículo;

$l$ : é o índice de uma sub-rede (ex: um arco isolado ou um conjunto de arcos) caracterizado por uma velocidade média  $\bar{s}_l$ ;

$KMVV$ : são os quilômetros viajados pelos veículos em uma dado período de tempo em uma sub-rede  $l$ ;

$f_c$ : é a fração de veículos da categoria  $c$ ;

$BER_i(\bar{s}_l, c)$ : é a taxa básica de emissão do tipo  $i$  por km.

O valor de  $BER_i(\bar{s}_l, c)$  é determinado a partir do ciclo de condução padronizados FTP a uma dada velocidade média  $\bar{s}_l$ , para cada categoria de veículo  $c$ .

O  $BER_i$  é ajustado para diferentes velocidades com o uso de Fatores de Correção de Velocidade (SCF). Os fatores de correção de velocidade têm o objetivo de refletir as diferenças entre as taxas de emissão sob condições de teste e taxas de emissão sob características regionais de operação. Os fatores de correção podem também ser empregados para a consideração de condições diferenciadas tais como partidas a frio e modos de operação diferenciados. Por esta razão, emissões bases são chamadas de emissões ciclo, e a emissões não base são chamadas emissões fora de ciclo.

Estes modelos não podem ser empregados para gerar estimativas instantâneas de emissões, uma vez que determinam emissões por intervalo de tempo em função da velocidade

média de um ciclo. As aplicações deste tipo de modelo incluem análises de larga escala e casos onde a velocidade média caracteriza adequadamente o fluxo de tráfego (ex: fluxo contínuo em rodovias). Embora os ciclos de condução incorporem vários níveis de aceleração e velocidades (energia cinética), estes modelos não captam as dinâmicas associadas com as emissões na avaliação de projetos de melhoria do fluxo de tráfego e redução do congestionamento. Isto por que a importância da aceleração e desaceleração é subestimada por este tipo de modelo. Estudos mostram que uma simples aceleração pode produzir mais CO do que é emitido no balanço de uma típica viagem de 5 minutos. Outros eventos que levem a um alto esforço do motor podem produzir uma grande quantidade de emissões. Por exemplo, veículos viajando em greides muito acentuados emitem muito mais poluentes do que na horizontal, e por causa da natureza do modelo, os greides não são levados em conta.

Além disso, em algumas situações a mesma velocidade média pode corresponder a diferentes condições de operação (Lin e Niemeier, 2003). Contudo, o argumento mais relevante está no fato de que o ciclo de condução, empregado para o desenvolvimento dos modelos baseados na velocidade média (ciclo FTP), apresenta características de operação (velocidade média e acelerações) muito distintas das condições de operação do mundo real (Kelly e Groblicki, 1993). Para compensar estas deficiências a última versão do modelo MOBILE (EPA, 2001) inclui 11 tipos de ciclos de condução, de acordo com a classificação da via e o seu nível de serviço.

### **3.4.3 Modelos Dinâmicos**

A indicação de uma relação complexa entre o modo de operação do motor e as emissões induziram o desenvolvimento de modelos de emissão modal por diversos grupos de pesquisa de diversas nacionalidades. O modo de operação dos veículos está relacionado ao regime de operação dos motores de combustão interna. São eles (i) partida com tempo de inatividade variável (partida a frio); (ii) operação estequiométrica; (iii) enriquecimento; (iv) empobrecimento. Os modelos modais avaliam as emissões através de um ciclo de condução completo e estima-as em função do modo de operação específico ou de variáveis que possam explicar o carregamento do motor. A velocidade e a aceleração são indicadores do carregamento do motor. Normalmente, são utilizados para a quantificação dos poluentes em escala local.

Na abordagem dinâmica, as emissões são medidas de forma contínua em testes de dinamômetro de chassi e armazenadas em intervalos de tempos específicos (geralmente a cada segundo). As condições operacionais do veículo a cada intervalo de tempo, comumente o valor da velocidade e da aceleração, são observadas simultaneamente com as emissões. Estas medições instantâneas permitem a análise instantânea e modal das emissões baseada respectivamente em variáveis cinemáticas instantâneas, tais como velocidade e aceleração, ou variáveis modais mais agregadas tais como tempo gasto no modo aceleração, modo cruzeiro ou modo parado.

Os modelos instantâneos possuem dois tipos de classificação. No que se refere à descrição do tráfego eles podem ser: (i) microscópicos, quando empregam variáveis cinemáticas instantâneas (velocidade e aceleração segundo a segundo); e (ii) mesoscópicos, quando as variáveis cinemáticas são agregadas (ex: velocidade e número de paradas, velocidade e aceleração média, tempo gasto em cada modo de operação).

Os modelos instantâneos podem ser classificados ainda de acordo a metodologia empregada no seu desenvolvimento. Os mapas de emissão possuem a forma de matriz, onde uma dimensão representa as variações de velocidade e a outra as acelerações ou potência. Os cálculos são feitos a partir da visualização das matrizes, onde para cada velocidade e aceleração há uma quantidade específica de emissões. Os modelos baseados em regressão são, em geral, regressões lineares que empregam funções de aceleração e velocidades específicas como variáveis explanatórias. Os modelos baseados no carregamento, ou modelos físicos, representam os fenômenos físicos e químicos que geram as emissões veiculares. Estes modelos são compostos por módulos que simulam cada passo do processo.

De forma geral o cálculo das emissões com o uso de modelos dinâmicos é feito empregando a seguinte formulação (Equação 4).

$$E_i(t) = \sum_j e_i(c_j, x_j(t)) \quad (4)$$

Onde:

*j*: é a identificação do veículo (ID);

*c<sub>j</sub>*: é a categoria do veículo *j*;

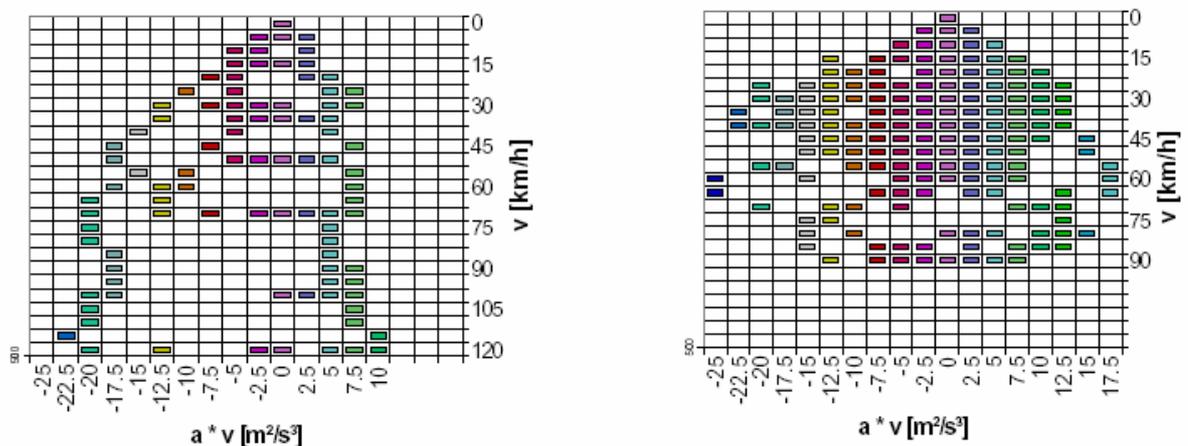
$x_j(t)$ : denota a variável instantânea ou modal do veículo  $j$  no tempo  $t$ . Alguns modelos também utilizam o histórico das variáveis (tais como os valores passados de velocidade, e o tempo transcorrido desde o início da viagem);

$e_i(c_j, x_j(t))$ : denota o tipo de emissão  $i$  para o veículo  $j$  no tempo  $t$ .

### 3.4.3.1 Modelos Baseados em Tabelas (Mapas)

Os modelos baseados em tabelas, ou mapas de emissão, possuem a forma de uma matriz, onde uma dimensão representa os intervalos de velocidade e a outra intervalos de aceleração ou potência específica. Para cada tipo de emissão e categoria de veículo, as medições instantâneas de emissão são alocadas a uma célula específica da matriz, de acordo com a velocidade e aceleração medidas no instante correspondente. Com isso, para cada célula calcula-se a média de todas as emissões medidas. As matrizes são baseadas em uma enorme quantidade de medições.

Embora, a geração da matriz seja um processo relativamente fácil, bem como a sua implementação, o seu uso apresenta algumas limitações. Elas podem ser esparsas e sensíveis ao ciclo de condução utilizado para o seu preenchimento (Sturm *et al.*, 1997). Ainda, elas não são flexíveis o suficiente para levar em conta fatores importantes na formação das emissões como greide da via, o uso de acessórios ou o histórico de eventos. A Figura 12 exemplifica este problema onde são apresentadas duas matrizes de emissões desenvolvidas a partir de dois ciclos de condução específicos. Cada célula da matriz representa uma taxa de emissão para um determinado par de velocidade e produto aceleração/velocidade. É difícil projetar um ciclo de condução que preencha toda a matriz.



**Figura 12:** Matrizes de emissão preenchidas com o ciclo de condução europeu e um típico ciclo urbano.

Devido a sua simplicidade os mapas de emissão são amplamente empregados, especialmente em modelos de tráfego. Uma revisão detalhada de mapas de emissão, e discussão sobre suas limitações e aplicações é encontrada em TRL (1999) e Sturm *et al.* (1997). Sturm *et al.* (1997) investigaram os requisitos que os ciclos de condução devem atender para a obtenção de matrizes satisfatórias, a influência da agregação de dados e métodos de interpolação de dados, e a necessidade de parâmetros adicionais para considerar as dinâmicas do comportamento do condutor.

Atualmente diferentes tipos de matrizes são utilizados. Os parâmetros nas matrizes de emissão tradicionais são a velocidade instantânea e a aceleração. Ao invés de aceleração ( $a$ ) os mais recentes modelos de cálculo utilizam o produto da velocidade multiplicado pela aceleração ( $v*a$ ). Parâmetros adicionais podem também ser utilizados para criar matrizes multidimensionais como nível de serviço, temperatura de operação, etc.

O modelo MODEM (TRL, 1999) é um exemplo de modelo de emissão baseado em mapas. Ele foi desenvolvido na Europa como parte do programa de pesquisa Europeu DRIVE II. A base de dados é derivada de teste realizados em uma amostra de 150 veículos da população de diferentes países integrantes da comunidade européia. Os veículos foram testados em 14 diferentes ciclos de condução baseados em uma pesquisa de larga escala conduzida em zonas urbanas da Europa. As emissões de HC, CO, CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> são calculadas com o uso de mapas para 12 categorias de veículos. O intervalo de velocidades está situado entre 0km/h e 90km/h, e o produto da aceleração pela velocidade varia entre -15 e +15 ( $m^2/s^3$ ).

West, *et al* (1997) também desenvolveu uma série de tabelas para calcular as emissões de CO, NO<sub>x</sub> e HC com base na aceleração e velocidade dos veículos. Para isto foram testados 8 veículos dentro do seu envelope de operação. Por envelope de operação entenda-se a combinação máxima entre velocidades e aceleração em que um veículo possa operar respeitando as suas limitações mecânicas. O modelo de West é utilizado no modelo CORSIM, se serviu como base de dados para o desenvolvimento do modelo de emissão incorporado no modelo INTEGRATION.

### 3.4.3.2 Modelos Baseados em Regressões

Os modelos baseados em regressão são geralmente regressões lineares que adotam funções onde geralmente a velocidade e a aceleração instantâneas são as variáveis explanatórias. A vantagem dos modelos de regressão é a possibilidade de extrapolar e interpolar os resultados que não fazem parte de um ciclo de condução. De acordo com Capiello (2002), embora os modelos baseados em regressão tenham apresentado bons resultados, eles carecem de interpretação física e em função do seu grande número de variáveis eles podem levar a um falso ajuste dos dados. Além disso, eles podem produzir resultados não satisfatórios se aplicados em situações não cobertas pelos dados de calibração.

#### a) Georgia Institute of Technology Model

Este modelo foi desenvolvido dentro do projeto MEASURE para região metropolitana de Atlanta nos EUA. É um modelo estatístico e agregado baseado em viagens, projetado para quantificar ou prever a atividade de tráfego baseada em viagens. Isto significa que este modelo não quantifica emissões instantâneas, mas taxas médias de emissão por segundo relativas a um viagem completa ou um ciclo de condução.

O modelo consiste em regressões de mínimo quadrado a partir de dados de ciclos de condução (Fomunung *et al.*, 1999). A variável estimada é a taxa de emissão (para CO, HC e NO<sub>x</sub>) normalizados pela taxa média do recipiente 2 do teste FTP (ver seção 2.6.1.2). As variáveis explanatórias são selecionadas usando a técnica de regressão baseada em árvores de decisão, entre o seguinte conjunto de variáveis:

- variáveis modais tais como velocidade média e percentual o ciclo excedente à vários limites de energia cinética positiva, potência e aceleração;
- interação entre variáveis dummy obtida pela combinação de características dos veículos, tais como leitura de odômetros, tipo de injeção de combustível, tipo de catalisador, e status de emissão (alto/baixo).

O modelo foi calibrado utilizando uma ampla base de dados contendo mais de 13.000 veículos testados, o que aumenta a significância estatística, embora poucos modelos atuais estejam representados. Para calibração as informações foram ponderadas para refletir a diversidade etária da frota de Atlanta.

O modelo da Georgia Institute of Technology possui algumas limitações. Adaptá-lo a uma outra área urbana é uma tarefa complexa e o de difícil calibração uma vez que muitas das variáveis precisarão ser recalculadas. Ainda, o modelo não estima taxas instantâneas de emissão, mas apenas taxas baseadas na viagem, o que dificulta sua aplicação em modelos microscópicos de tráfego. E, finalmente, a distribuição etária da frota está incorporada nos coeficientes de calibração.

b) Modelo de Yu

Yu (1998) desenvolveu um modelo utilizando regressão, a partir de dados coletados em campo em cinco pontos de Houston. Os modelos estimam taxas de CO e HC em gramas por segundo em função da velocidade e aceleração. Os modelos foram desenvolvidos separadamente para três categorias de veículos: (i) veículos de passeio; (ii) pick-ups e vans; e (iii) caminhões.

c) POLY

O modelo POLY foi desenvolvido por pesquisadores da Universidade Politécnica de Nova York e da Texas Southern University. Este modelo adota regressões lineares que levam em conta, além da velocidade e aceleração instantâneas, o passado de acelerações e o greide da rodovia (Teng *et al.*, 2002). A formulação do modelo é apresentada na Equação 5.

$$e_i(c,t) = \beta_0 + \beta_1 v(t) + \beta_2 v^2(t) + \beta_3 v^3(t) + \beta_{T'} T'(t) + \beta_{T''} T''(t) + \beta_{A_1} A(t) + \dots + \beta_{A_{t-9}} A(t-9) + \beta_W W(t) \quad (5)$$

Onde:

$e_i(c,t)$ : denota a taxa de emissão do poluente  $i$ , que depende da categoria de veículo  $c$  e do tempo  $t$ ;

$v(t)$ : é a velocidade no tempo  $t$ ;

$T'(t)$ : é a duração da aceleração desde o seu início até o tempo  $t$ ;

$T''(t)$ : é a duração da desaceleração desde o seu início até o tempo  $t$ ;

$A(t-\bar{t})$ : é a combinação da aceleração e desaceleração no tempo  $(t-\bar{t})$  ( $t = 0, \dots, 9$ ), calculada a partir da aceleração  $a(t)$  e do greide  $g(t)$  (em %) como abaixo:

$$A(t-\bar{t}) = a(t-\bar{t}) + 9,81 \times \left( \frac{g(t-\bar{t})}{\sqrt{1+g(t-\bar{t})}} \right) \quad (6)$$

$W(t)$ : é o produto de  $v(t)$  e  $A(t)$ ;

$\beta$ 's : são os parâmetros calibrados para cada categoria  $c$ .

O modelo foi desenvolvido a partir da base de dados do NCRHP (Barth *et al.*, 2000). O modelo utilizou o teste FTP para sua calibração, enquanto que para sua validação utilizou os ciclos US06 e MEC01.

#### d) VT-Micro

O modelo de emissões VT-Micro desenvolvido na Virginia Tech (EUA) (Ahn, 1998; Ahn 2002) é integrado ao INTEGRATION. O VT Micro é um modelo estatístico instantâneo que estima CO, HC e NO<sub>x</sub>. O modelo é constituído por regressões lineares, desenvolvidas a partir de uma base de dados derivada de testes realizados em 8 veículos no Oak Ridge National Laboratory. Os dados destes testes foram agrupados em tabelas visualizáveis (g/s do poluente em função da velocidade e aceleração). O espectro de velocidade dos veículos nos teste variou entre 0 a 121km/h, as acelerações variaram entre -1,5 a 3,7 m/s<sup>2</sup>.

As velocidade e aceleração são as variáveis explanatórias do modelo, uma equação polinomial de terceiro grau (Equação 7). O modelo estima o logaritmo da taxa de emissão, para que não ocorra a estimativa de valores negativos de taxas de emissão. O modelo é apresentado na equação 7.

$$\text{Log}(e_i) = \begin{cases} \sum_{m=0}^3 \sum_{n=0}^3 (\alpha_{m,n}^i \cdot v^m \cdot a^n) & \text{para } a \geq 0 \\ \sum_{m=0}^3 \sum_{n=0}^3 (\beta_{m,n}^i \cdot v^m \cdot a^n) & \text{para } a < 0 \end{cases} \quad (7)$$

Onde:

$e_i$ : é a taxa de emissão do poluente  $i$  (g/s);

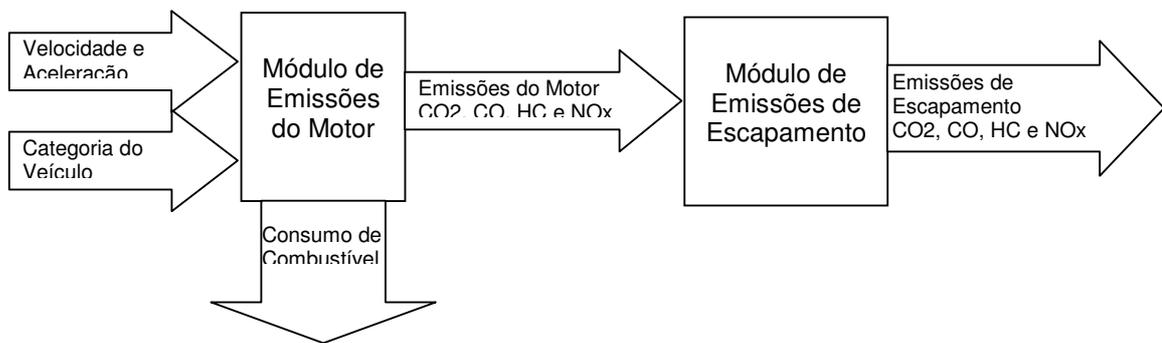
$v$ : é a velocidade do veículo (km/h);

$a$ : é a aceleração do veículo (km/h/s);

O modelo foi validado por Ahn (2002) a partir de dados fornecidos pela EPA. Ainda foi comparado aos resultados obtidos pelo modelo CMEM obtendo boa aderência.

e) EMIT

O EMIT desenvolvido por Capiello (2002) é um modelo de emissões dinâmico e estatístico, derivado dos modelos físicos (item 3.4.3.3). O objetivo do modelo é preservar as características inerentes aos modelos físicos, contudo possuindo um tempo de execução menor e sendo de fácil calibração. A estrutura do modelo EMIT é apresentada na Figura 13.



**Figura 13:** Estrutura do modelo EMIT.

### 3.4.3.3 Modelos Físicos

Os modelos físicos representam os fenômenos físicos e químicos responsáveis pela formação das emissões. Estes modelos são compostos por módulos que simulam todos os passos do processo. Cada um destes módulos é calibrado com medições feitas em laboratório e dados de especificação de veículos.

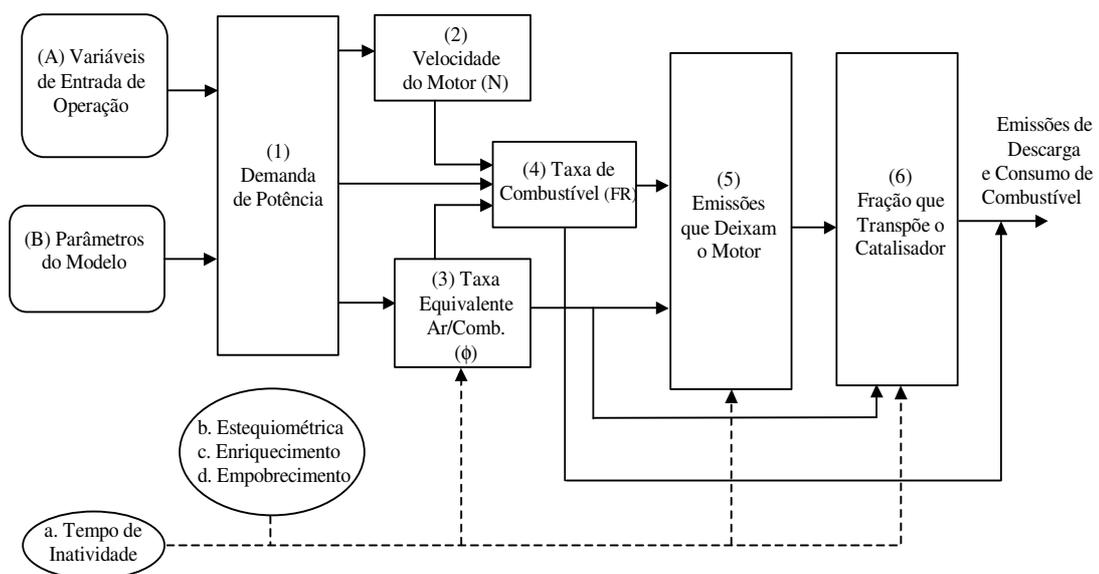
O CMEM (Comprehensive Modal Emissions Model) é um modelo de emissão modal físico, baseado na demanda por potência, desenvolvido na Universidade da Califórnia em Riverside e na Universidade de Michigan (Barth *et al.*, 2000) patrocinado pelo *National Cooperative Research Project*. O modelo pode estimar as emissões de CO, HC, NO<sub>x</sub> e CO<sub>2</sub> segundo a segundo, além do consumo de combustíveis, em função do modo de operação para automóveis e veículos comerciais leves.

O modelo possui quatro modos de operação: (i) partida com tempo de inatividade variável; (ii) operação estequiométrica; (iii) enriquecimento; e (iv) empobrecimento. A operação do veículo em condições estabilizadas compreende os modos 2 a 4 e cabe ao modelo determinar em qual modo o veículo estará operando em um determinado momento através da comparação da demanda de potência do veículo (velocidade e aceleração) com dois limites de demanda de potência. O modelo não determina o tempo inicial de inatividade. Este tempo é especificado pelo usuário e representa a quantidade de tempo em que o veículo não esteve

operando a priori de sua partida. O modelo determina quando a condição de operação alterna da condição de partida a frio para a operação plenamente aquecida.

O modelo CMEM é composto por 6 módulos (ver Figura 14) e é capaz de estimar a emissão de 26 categorias de veículos, entre automóveis e veículos comerciais leves. O usuário especifica a categoria do veículo e a variação da sua velocidade segundo a segundo. Podem ser especificados ainda, o tempo de inatividade dos veículos, a sua aceleração, a inclinação do greide e a presença de equipamentos no veículo (ex: ar-condicionado).

O modelo foi calibrado usando uma ampla base de dados de testes em 300 veículos. A base de dados inclui medidas em dinamômetro de chassi segundo a segundo da velocidade, emissões do motor e emissões de descarga em três diferentes ciclos de condução. Os veículos usados para compor a base de dados do CMEM são representativos da frota encontrada no condado de Riverside, Califórnia, em 1997 quando da coleta dos dados. Obviamente, as emissões observadas na frota brasileira serão relativamente maiores, uma vez que nos EUA a regulação das emissões é mais rigorosa do que a realizada no Brasil, mesmo que com veículos com idade avançada. A frota de veículos da Califórnia é, em geral, mais limpa do que o restante da frota americana em função de padrões de emissões ainda mais rigorosos. Apesar destas limitações, e o propósito da análise desta dissertação, a base de dados do modelo CMEM é a melhor e mais recente base de dados disponível de emissões modais.



**Figura 14:** Estrutura do modelo CMEM.

O modelo CMEM foi validado através da comparação da medição de emissões em veículos com os resultados gerados, apresentando resultados satisfatórios (Schultz *et al.*, 2000). Os bons resultados de sua validação e sua fundamentação teórica robusta são responsáveis pela disseminação do CMEM.

#### 3.4.3.4 Modelo Mesoscópicos

Os modelos mesoscópicos consistem em uma abordagem intermediária entre os modelos estáticos e os modelos dinâmicos. Eles não quantificam as emissões com base nos valores instantâneos de aceleração e velocidade média. A atividade veicular é representada por outras variáveis cinemáticas além da velocidade média (ex: tempo dispendido em cada modo de operação). A sua vantagem em relação aos modelos microscópicos é um menor tempo de execução e uma maior facilidade de calibração, podendo ser aplicados em análises de áreas extensas.

### 3.5 CONCLUSÕES

As pesquisas recentes para a modelagem do impacto dos transportes na qualidade do ar estão direcionadas ao desenvolvimento e implantação de modelos de emissões modais. Para implementar modelos modais, são necessárias distribuições estatísticas da atividade veicular correspondendo às frações de tempo que um veículo despense em um intervalo de diferentes velocidades e correspondentes acelerações. Estimativas precisas do comportamento veicular são importantes uma vez que as taxas de emissões dos modelos modais emergentes são sensíveis a combinações específicas de velocidade e aceleração.

A implementação e precisão de modelos modais depende de estimativas precisas e desagregadas da atividade veicular, uma vez que estes modelos são dependentes da correlação entre as emissões e o modo de operação dos veículos. Mesmo com o uso de modelos de emissão com alta resolução, as estimativas resultantes de esforços de modelagem serão tão acuradas quanto forem os dados de entrada da atividade veicular no modelo de emissão. O aprimoramento da precisão da modelagem do comportamento dos veículos possibilita a estimativa de emissões mais aprimoradas. A realização de estudos com o objetivo de aperfeiçoar a representação da atividade veicular é fundamental para o sucesso da implantação destes modelos de emissão.

## 4 INVESTIGAÇÃO DO USO MICRO-SIMULADORES DE TRÁFEGO NA ESTIMATIVA DAS EMISSÕES VEICULARES

---

### 4.1 INTRODUÇÃO

É crescente o uso de simuladores microscópicos de tráfego na quantificação das emissões veiculares. Os modelos de simulação de tráfego são combinados com modelos de emissão para estimar as emissões. A trajetória do veículo segundo a segundo gerada pelo simulador de tráfego é o dado de entrada para o modelo de emissão. Hoje, grande parte dos simuladores já incorpora o seu próprio modelo de emissões.

É consenso que o uso dos simuladores não consiste em uma tarefa fácil. Para que o modelo possa ser corretamente empregado, ele deve ser calibrado, etapa complexa e que consome muito tempo. Além disso, pouca atenção é despendida ao modelo de emissão presente no simulador de tráfego, sendo seu uso feito de forma indiscriminada, sem qualquer análise crítica aos seus resultados gerados.

Em função disto, este capítulo apresenta uma série de testes de análise de sensibilidade, desenvolvidos com modelos microscópicos de simulação de tráfego. O objetivo desses testes é comparar e avaliar o impacto da variação de três aspectos intrínsecos aos modelos de simulação na quantificação das emissões veiculares: (i) os parâmetros de entrada utilizados para calibração; (ii) a lógica dos modelos de progressão longitudinal; e (iii) o modelo de emissão geralmente incorporado ao simulador. Isto porque a correta interpretação das estimativas de emissões feitas pelos simuladores de tráfego, em conjunto com modelos de emissões, passa obrigatoriamente pelo entendimento da lógica dos modelos e das hipóteses nas quais os resultados estão baseados.

Os testes foram conduzidos em uma rede de configuração simples para tornar possível o isolamento e a explicação das diferenças encontradas. Os testes foram adaptados do trabalho de Crowther (2001) cujo objetivo era a comparação do *car-following* dos modelos INTEGRATION e NETSIM. Foram empregados os modelos de tráfego INTEGRATION e DRACULA. Embora estes simuladores de tráfego tenham modelos de emissão incorporados, todas as estimativas de emissões foram conduzidas com o modelo CMEM (ver item 3.4.3.3).

## 4.2 USO DE MODELOS DE SIMULAÇÃO PARA A QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSÕES VEICULARES

Os modelos de simulação de tráfego são representações matemáticas e lógicas do mundo real, que tomam a forma de um software computacional. Um grande número de modelos de simulação de tráfego foi desenvolvido. Eles distinguem-se entre si em função da complexidade dos algoritmos utilizados e do tamanho de rede que eles podem representar. Os modelos de simulação de tráfego microscópicos simulam movimentos detalhados do tráfego através de regras de *car-following*, troca de faixa, aceitação de brechas, reações à controles de tráfego e interseções e lógicas de aceleração e desaceleração.

Os processos que representam a progressão longitudinal dos veículos são os que possuem maior influência na quantificação das emissões veiculares. Os veículos progridem longitudinalmente ao longo da rede viária governados pela lógica do *car-following*. Os modelos de *car-following* calculam a distância que um condutor manterá relação ao veículo que o antecede. É função de múltiplos parâmetros tais como velocidade do veículo, diferença de velocidade entre os dois veículos e agressividade do condutor (Rakha *et al.* 2002). Em situações de fluxo livre, onde os veículos não possuem nada que os impeça praticar a sua velocidade desejada, os veículos são governados de acordo com o modelo de aceleração incorporado em cada simulador (Snare, 2002).

Williams *et al* (1998) compararam a estimativa de emissões feita a partir de perfis de velocidade gerados pelo modelo TRANSIMS com estimativa a partir de dados reais empregando o modelo CMEM. De acordo com Williams *et al*, as emissões calculadas foram superiores, principalmente quando os veículos aceleravam a partir do repouso e de veículos saindo da zona de congestionamento. Hallmark e Guensler (1999) também conduziram estudo semelhante comparando perfis de velocidade-aceleração, em interseções, gerados pelo modelo NETSIM, com dados medidos em campo. O NETSIM estimou frações superiores de acelerações bruscas em comparação com dados de campo. Além disso, os dados de campo indicaram que, na posição intermediária do arco, as distribuições de velocidades e acelerações dos veículos eram superiores as modeladas pelo modelo NETSIM. Os autores não efetuaram nenhum tipo de calibração no modelo, o que poderia provocar uma melhoria nos resultados verificados na posição intermediária do arco.

## 4.3 DESCRIÇÃO DOS MODELOS DE TRÁFEGO

### 4.3.1 O Modelo DRACULA

O DRACULA - Dynamic Route Assignment Combining User Learning and Microsimulation – (Liu, 2002) é um modelo microscópico de simulação do tráfego urbano.

No modelo de tráfego as velocidades e as posições dos veículos são atualizadas em incrementos fixos de tempo de 1 segundo. O modelo de tráfego é contínuo no espaço, o que significa que o veículo pode ser posicionado em qualquer ponto ao longo dos arcos. Os veículos são individualmente caracterizados, incluindo a sua descrição física (tipo de veículo, comprimento, máxima aceleração e desaceleração) e descrição comportamental do condutor (tempo de reação, velocidade desejada, e distância do veículo precedente). Estas características são aleatoriamente escolhidas a partir de uma distribuição normal dos tipos de veículos, com médias e coeficientes de variação escolhidos pelo usuário. O seu movimento é governado por modelos de *car-following*, regras de aceitação de brechas e regulamentações do tráfego em interseções.

Cada veículo gerado no modelo DRACULA possui um conjunto de características individuais incluindo (i) tipo do veículo (carro, caminhão, etc); (ii) comprimento do veículo; (iii) *headway* espacial mínimo desejado; (iv) aceleração normal e máxima; (v) desaceleração máxima e desejada; velocidade desejada (relativa à velocidade média especificada para um arco); e (vi) gap aceitável. Estas características são amostradas aleatoriamente a partir de distribuições normais representativas de cada tipo de veículo. O modelo emprega, originalmente, uma distribuição exponencial transladada para os *headways* espaciais para descrever a chegada dos veículos no sistema.

De acordo com o publicado no manual do DRACULA, o veículo entra na rede com posição inicial e velocidade baseadas na velocidade e posição do veículo precedente. Entretanto, a partir dos resultados obtidos nos testes realizados pode-se, observar que todos os veículos gerados pelo modelo DRACULA entram na rede com velocidade inicial igual a zero, acelerando até atingir a sua velocidade desejada. Esta questão será tratada em detalhes no item 4.5.

O modelo de *car-following* calcula a aceleração do veículo em resposta à sua velocidade desejada e a velocidade e distância relativas ao veículo precedente. Dependendo da magnitude

da distância relativa o veículo é classificado em um dos três regimes: (i) movimento livre; (ii) seguidor; (ii) seguidor próximo.

O veículo encontra-se em movimento livre quando a posição relativa à linha de parada de um veículo líder for superior à um limite pré-estabelecido ( $d^h = 60\text{m}$ ), ou se for um veículo seguidor com *headway* espacial superior também a  $d^h$ . Neste caso o veículo acelera e desacelera livremente com o objetivo de manter a sua velocidade desejada.

Quando o *headway* espacial for inferior ao limite  $d^h$ , mas superior ao limite  $d^l$  (15m), o veículo irá assumir uma velocidade controlada, derivada a partir da distância e velocidade relativa do veículo precedente de acordo com a equação 8:

$$v_i^{following}(t) = c_1 v_i(t - \tau) + c_2 v_{i-1}(t) + c_3 (x_{i-1}(t) - x_i(t - \tau) - L_{i-1} - s_i^{min}) \quad (8)$$

Onde  $i$  e  $i-1$  denotam o veículo e o seu veículo precedente,  $v$  e  $x$  a velocidade e a posição do veículo,  $\tau$  é o tempo de reação,  $L_i$  o comprimento e  $s_i^{min}$  a distância mínima de segurança do veículo. Os parâmetros  $c_1$ ,  $c_2$  e  $c_3$  são constantes.

Quando o *headway* espacial for inferior ao limite  $d^l$ , o veículo seguidor irá se preparar para parar, caso o veículo precedente freie bruscamente. O modelo Gipps (1981) é usado neste caso e apresenta a seguinte formulação:

$$v_i^{close}(t) = d_i \tau + \sqrt{d_i^2 \tau^2 - d_i \{2[x_{i-1}(t - \tau) - x_i(t - \tau) - L_{i-1} - s_i^{min}] - v_i(t - \tau)^2 / d_{i-1}'\}} \quad (9)$$

Onde  $d_i$  é desaceleração máxima do veículo  $i$  e  $d_{i-1}$  é a desaceleração do veículo  $i-1$  percebida pelo veículo  $i$ ; este último é assumido como o mínimo entre  $-3,0$  e  $(d_{i-1}-3,0)/2 \text{ m/s}^2$ . No modelo, o tempo de reação do veículo  $\tau$  é assumido como sendo igual ao passo da simulação. A velocidade assumida pelo veículo seguidor  $i$  no tempo  $t$  é o menor valor entre  $v_i^{following}$  e  $v_i^{close}$ . Os limites  $d^l$  e  $d^h$  não podem ser alterados pelo usuário.

Em todos os casos, os veículos não irão desenvolver velocidades superiores à sua velocidade desejada, nem acelerar a uma taxa que exceda sua máxima aceleração, ou desacelera a taxas abaixo da sua máxima taxa de desaceleração.

#### 4.3.1.1 Descrição do Modelo de Emissão

O modelo de emissão incorporado ao DRACULA (Liu, 2002) está baseado no uso de tabelas de emissão. Os fatores de emissão utilizados são obtidos a partir de QUARTET Deliverables N°2 (1992). Taxas de emissão para três tipos de poluentes estão disponíveis: CO, NO<sub>x</sub> e HC não queimados. O modelo assume que os fatores de emissão são constantes para veículos esperando em uma fila (parados), acelerando ou desacelerando. Para veículos trafegando em uma velocidade constante, os fatores de emissão são assumidos como sendo função da velocidade.

Os fatores de emissão para cada um dos 4 modos de operação (aceleração, desaceleração, parado e em cruzeiro) são apresentados nos Quadros 5 e 6. Uma interpretação linear é utilizada para obter os fatores de emissão a uma velocidade entre duas das listadas na tabela.

**Quadro 5:** Taxas de emissão para automóveis em velocidade constante – DRACULA.

Poluente (g/s)	Velocidade (km/h)						
	10	20	30	40	50	60	70
CO	0,6	0,091	0,13	0,129	0,09	0,11	0,177
NO <sub>x</sub>	0,0006	0,0006	0,0017	0,0022	0,0042	0,0050	0,0058
HC	0,063	0,0078	0,0083	0,0128	0,0097	0,117	0,0136

**Quadro 6:** Taxas de emissão para automóveis parados, em aceleração ou em desaceleração-DRACULA.

Modo de operação/ Poluente (g/s)	Parado	Acelerando	Desacelerando
CO	0,06	0,377	0,072
Nox	0,0008	0,01	0,005
HC	0,0067	0,02	0,0067

O modelo é flexível permitindo novos valores (novas taxas de emissão para os poluentes existente e para novos poluentes) possam ser incorporados assim que eles tornem-se disponíveis. Tais mudanças podem ser feitas através da atualização da tabela POL.TAB.

Os dados de entrada do tráfego no modelo provem diretamente do modelo de tráfego. A cada segundo o modelo de tráfego calcula o movimento (velocidade, aceleração e posição) de

cada veículo na rede, com isso determina-se o modo de operação de cada veículo: aceleração, desaceleração, velocidade constante, ou parado em uma fila (onde a velocidade é menor que 0,5 m/s, o veículo é considerado como parado). Com isso, o modelo de emissão, a partir da consulta às tabelas de emissão, estima a quantidade de poluente emitido pelos veículos a cada segundo de simulação.

#### 4.3.1.2 Parâmetros de Entrada do Modelo DRACULA

##### a) Descrição da Rede

A rede é representada por nós, e por arcos. Cada arco é caracterizado por um conjunto de parâmetros como: número de faixas, velocidade média de fluxo livre e movimentos de conversão permitidos. O DRACULA permite, ainda, modelar faixas exclusivas para tipos específicos de veículos.

##### b) Representação da Demanda

A partir dos fluxos nas rotas e da composição do tráfego, a demanda de tráfego é composta por veículos que são originados individualmente nos pontos de entrada da rede.

##### c) Características dos Veículos

O DRACULA permite modelar seis tipos diferentes de veículos. Cada veículo que entra na rede possui um conjunto de características particulares que descrevem o comportamento do condutor e parâmetros do veículo. Estas características são definidas aleatoriamente a partir dos valores médios e variâncias previamente informadas.

##### d) As características por tipo de veículo são:

- Tipo e comprimento;
- Taxas normais de aceleração e desaceleração;
- Taxas máximas e mínimas de aceleração e desaceleração;
- Fator de velocidade: define a velocidade desejada do condutor em relação à velocidade de fluxo livre determinada para o arco.
- Distância mínima de afastamento em relação ao veículo á frente;
- Fator de aceitação de brechas;

- XAPPRO\_JNCT: ou fator de reação ao controle semafórico, determina a distância na qual um veículo inicia a reagir a um dispositivo de controle de tráfego;

e) Variabilidade Aleatória

No DRACULA, as variáveis aleatórias são especificadas pelo seu valor médio e pela variância. A partir da definição de uma dada semente estocástica, o modelo atribui um valor específico, à variável aleatória, segundo uma distribuição normal. A partir daí, a simulação tem início considerando aquele conjunto particular de valores de dados gerados aleatoriamente. A variabilidade dos veículos envolve as características dos veículos e a distribuição de *headways* na geração de tráfego.

### 4.3.2 O Modelo INTEGRATION

#### 4.3.2.1 Descrição Geral

O INTEGRATION é um modelo que integra a alocação e a simulação de tráfego (Van Aerde, 2004). O modelo executa a simulação rastreando de forma explícita o movimento dos veículos individualmente dentro de uma rede de tráfego a cada deci-segundo. Este rastreamento dos veículos permite uma análise detalhada dos movimentos de troca de faixa, aceitação de brechas e comportamentos de convergência ou entrelaçamento de correntes de tráfego em interseções ou em entradas e saídas de *freeways*. A modelagem microscópica realizada pelo modelo permite uma boa flexibilidade na representação de variações espaciais nas condições do tráfego em consequência de variações temporais de demanda, rota dos veículos, capacidade dos arcos ou dos controles de tráfego.

O modelo INTERGRATION usa o modelo de car-following para condições de *steady-state* proposto por Van Aerde, que combina os modelos de Pipes e Greenshields em um único modelo. O modelo é apresentado na equação 10.

$$h = c_1 + c_3u + \frac{c_2}{u_f - u} \quad (10)$$

Onde:

*h*: espaçamento entre veículos consecutivos na mesma faixa de tráfego (km/veí);

$u$ : velocidade (km/h)

$u_f$ : velocidade de fluxo livre (km/h);

$c_1$ : constante de calibração 1 (km);

$c_2$ : constante de calibração 2 ( $\text{km}^2/\text{h}$ );

$c_3$ : constante de calibração 3.

Este modelo de Van Aerde (Crowther, 2001) combina aspectos de modelos microscópicos de *car-following* com aspectos dos modelos macroscópicos de fluxo. Esta relação entre atributos macroscópicos e microscópicos de fluxo de tráfego assegura que o veículo, no modelo INTEGRATION, viaje a velocidades constantes apropriadas antes e após a formação de filas.

Para representar a transição de velocidades dos veículos individuais, entre estes regimes, o INTEGRATION apresenta lógicas distintas para a aceleração e desaceleração. A lógica de desaceleração, baseada na cinemática, reconhece a diferença de velocidade entre o veículo seguidor e o veículo a sua frente. O veículo seguidor, em primeiro lugar, estima o excesso de espaçamento entre ele e o veículo a sua frente. Este excesso de espaçamento é a diferença entre o espaçamento corrente e o espaçamento mínimo. Isto garante que o veículo seguidor irá selecionar uma taxa de desaceleração constante que permitirá a ele parar atrás do veículo líder mantendo o espaçamento mínimo (congestionamento).

Baseado neste espaçamento residual, o veículo irá computar o tempo disponível para desacelerar confortavelmente de sua velocidade atual para a velocidade do veículo líder. Este tempo é, para taxas constantes de desaceleração, igual ao *headway* residual dividido pela velocidade média do veículo a frente e do veículo seguidor. Subseqüentemente, o veículo seguidor computa a taxa de desaceleração requerida, sendo ela a diferença de velocidades dividida pelo tempo de desaceleração.

Se o veículo líder está em movimento, o veículo seguidor desacelera a uma taxa constante, até que sua velocidade se equipare a velocidade do veículo líder. Isto ocorre quando o veículo seguidor se encontra na posição onde espaçamento entre ele e o veículo líder seja igual ao espaçamento de congestionamento. Nesta situação, na medida em que o veículo seguidor atingir esta posição o veículo líder já terá se deslocado, resultando em uma aceleração assintótica do veículo seguidor em relação ao veículo líder.

As taxas de aceleração no INTEGRATION são governadas por um modelo de dinâmica veicular, o qual estima a aceleração máxima dos veículos baseada na força resultante, indicada na equação 11 (Rakha *et al*, 2001a). Além disso, as taxas de aceleração são limitadas em função do espaçamento entre os veículos.

$$a = \frac{F - R}{M} \quad (11)$$

Onde:

*F*: é a força motriz (N);

*R*: é a força total de resistência, resultado da soma das forças de resistência aerodinâmica, de greide e de rolamento (N);

*M*: é a massa do veículo (kg);

*a*: é a aceleração ( $m/s^2$ ).

O modelo de dinâmica veicular estima o esforço trator usando a equação 12, com o valor máximo baseado na equação 13, como demonstrado na equação 14. A equação 13 leva em conta o atrito entre os pneus do eixo trator do veículo e a superfície da rodovia. O uso da equação 14 garante que o esforço trator não atinja valores infinitos a baixas velocidades.

$$F_t = 3600\eta \frac{P}{v} \quad (12)$$

$$F_{\max} = 9,8066M_{ta}\mu \quad (13)$$

$$F = \min(F_t, F_{\max}) \quad (14)$$

Onde:

*F<sub>t</sub>*: é a força motriz (N);

*P*: é a potência do motor (kW);

*v*: é a velocidade do veículo (km/h);

*η*: é a eficiência da transmissão;

*F<sub>max</sub>*: é a força motriz máxima (N);

*M<sub>ta</sub>*: é a massa do veículo no eixo trator (kg);

$\mu$ : é a coeficiente de atrito entre os pneus e o pavimento;

$F$ : é o esforço trator que efetivamente atua no veículo (N).

O modelo de dinâmica veicular considera três tipos de forças de resistência, incluindo resistência aerodinâmica, de rolamento e greide. A resistência total é computada como a soma dos três componentes de resistência, sumarizados na equação 15.

$$R = R_a + R_r + R_g \quad (15)$$

A resistência aerodinâmica é função da área frontal do veículo, a altitude, o coeficiente de arrasto, e velocidade do veículo ao quadrado, como ilustrado nas equações 16 e 17. A constante  $c_1$  leva em conta a densidade do ar ao nível do mar, com temperatura de 15°C. A resistência do ar é uma função linear da velocidade e da massa do veículo, indicada na equação 18. A resistência de greide é uma constante que varia em função da massa total e da velocidade do veículo, como indicado na equação 19. A resistência de greide contabiliza a proporção da massa do veículo que resiste ao seu próprio movimento.

$$R_a = c_1 C_d C_h A v^2 \quad (16)$$

$$C_h = 1 - 8,5 \times 10^{-5} H \quad (17)$$

$$R_r = 9,8066 C_r (c_2 v + c_3) \frac{M}{1000} \quad (18)$$

$$R_g = 9,8066 M i \quad (19)$$

Onde:

$A$ : é a área frontal do veículo ( $m^2$ );

$v$ : é a velocidade do veículo (km/h);

$C_d$ : é o coeficiente de arrasto do veículo;

$C_h$ : é o coeficiente de altitude;

$c_1$ : é uma constante (0,047285);

$H$ : é a altitude (m);

$M$ : é a massa do veículo (kg);

$C_r$ : é o coeficiente de rolamento;

$c_2, c_3$ : são coeficientes de resistência de rolamento;

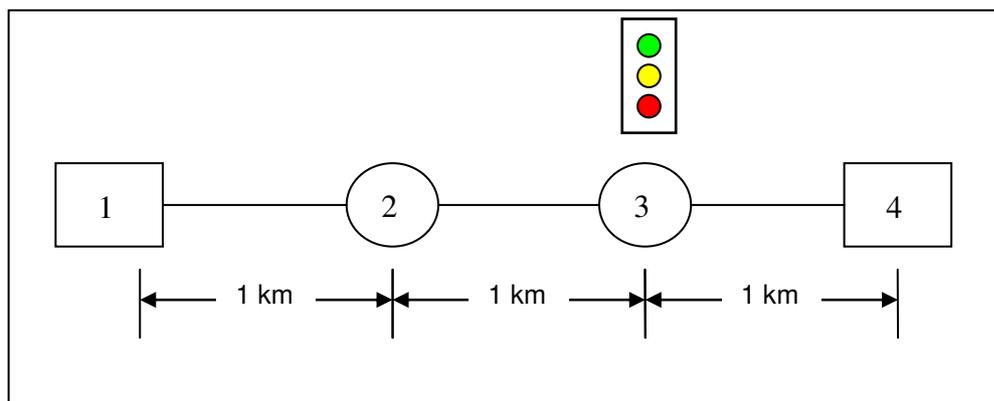
$i$ : é o percentual de inclinação longitudinal do greide da rodovia (m/100).

#### 4.4 CONFIGURAÇÃO DO CENÁRIO DE TESTE

Para a condução dos testes com os modelos de tráfego, foi codificada uma rede simples constituída de uma interseção semaforizada. A simplicidade da rede permite identificar com maior clareza as diferenças nos resultados fornecidos pelos modelos.

A rede codificada simula uma via arterial urbana com uma interseção semaforizada. A rede possui um segmento de 2 km, com apenas uma faixa antecedendo o semáforo. O uso de uma faixa permite isolar a diferença de resultados provocada pela progressão longitudinal dos veículos, ignorando a influência da troca de faixa. A rede é apresentada na Figura 15.

A rede possui velocidade de fluxo livre de 60km/h. No modelo DRACULA a capacidade não é um parâmetro definido. O fluxo efetivo é consequência do comportamento agregado dos veículos decorrente da micro-simulação (Araújo, 2003). O semáforo possui ciclo de 60 segundos, sendo 30 segundos de fase verde.



**Figura 15:** Configuração da rede teste

A rede foi carregada com uma demanda determinística e uniforme, com *headway* igual a 5 s, o que equivale a um fluxo de 720 veh/h, resultando em uma rede não saturada. A demanda é composta exclusivamente por veículos leves. O período de simulação foi de 15 minutos, precedido por um período de *warm-up* de 5 minutos, resultando num fluxo 120 veículos no período simulado. O offset semafórico foi configurado para que o primeiro

veículo a entrar na rede seja obrigado a chegar ao semáforo no momento em que ele mudar para vermelho. Com uma velocidade de 60km/h, os veículos percorrerão a aproximação de 2km em 2 minutos.

Em todos os testes a estimativa das emissões é realizada com o uso do modelo CMEM, embora os simuladores tenham os seus próprios modelos de emissão. Apenas serão estimadas as emissões de veículos em condições normais de operação com motor e catalisador quentes. A composição da frota também é desconsiderada neste estudo, adotando-se apenas uma classe de veículo de passeio.

#### 4.5 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO NA ESTIMATIVA DAS EMISSÕES

Nesta seção é avaliada a influência da variação dos parâmetros de calibração de simuladores de tráfego na quantificação das emissões veiculares. Para a condução deste teste foi empregado o modelo de tráfego DRACULA. O cálculo das emissões foi realizado com o auxílio do modelo CMEM. O conjunto de parâmetros investigado caracteriza-se pela capacidade de influenciar na progressão longitudinal dos veículos.

Para avaliar a influência da variação dos parâmetros de calibração na estimativa das emissões foram constituídos dois conjuntos de simulação. O primeiro conjunto avalia apenas o efeito da alteração dos parâmetros relacionados aos eventos de aceleração e desaceleração. No segundo conjunto são testados os efeitos de três parâmetros: (i) a aceleração; (ii) o espaçamento; e (iii) o fator de reação ao controle semaforico. No primeiro conjunto a análise dos resultados é agregada, isto é avalia-se apenas o resultado global. No segundo conjunto, a análise será conduzida observando-se os resultados de forma desagregada, para os três arcos que compõem a rede. Com isso, espera-se observar a influência da entrada dos veículos na rede com velocidade zero, fenômeno simulado pelo modelo DRACULA.

Em ambos os conjuntos de simulação a definição dos valores extremos dos parâmetros avaliados ficou limitado a dois critérios. O primeiro diz respeito ao desempenho da rede. Em todas as simulações não poderá haver variações significativas do indicador de desempenho da rede, neste caso a velocidade média temporal, afim de que as variações nas emissões fiquem limitadas à alterações nos parâmetros de calibração do modelo. O segundo é a escolha de parâmetros razoáveis quando da calibração de modelos, com o uso de valores factíveis se serem observados em campo.

#### 4.5.1 Avaliação dos parâmetros de aceleração/desaceleração

Como visto anteriormente, o modelo DRACULA permite a definição de valores máximos e normais para os eventos de aceleração e desaceleração. Ainda, para cada parâmetro o usuário necessita configurar o valor médio e a variabilidade para os valores escolhidos. Todas as simulações deste teste são determinísticas não havendo variabilidade nos parâmetros estudados.

O teste consistiu na simulação da rede empregando três níveis para os parâmetros aceleração máxima, aceleração normal, desaceleração máxima e desaceleração normal. Os valores definidos são apresentados no Quadro 7. Com isto foram simulados 81 conjuntos de dados.

**Quadro 7:** Níveis testados para os parâmetros de aceleração

Parâmetro	Nível		
	Baixo	Médio	Alto
Aceleração Normal	0,5 m/s <sup>2</sup>	1,5 m/s <sup>2</sup>	2,5 m/s <sup>2</sup>
Aceleração Máxima	Igual à normal	50% superior à normal	100% superior à normal
Desaceleração Normal	0,5 m/s <sup>2</sup>	2,0 m/s <sup>2</sup>	3,5 m/s <sup>2</sup>
Desaceleração Máxima	Igual à normal	50% superior à normal	100% superior à normal

Os cenários com nível baixo de aceleração normal foram descartados, pois houve variação significativa do indicador de desempenho da rede. Os resultados são apresentados no Quadro 8.

**Quadro 8:** Emissões calculadas com o modelo DRACULA em conjunto com o modelo CMEM para diversos níveis aceleração

Cenário	Acel Normal (m/s <sup>2</sup> )	Acel Máxima (m/s <sup>2</sup> )	Desacel Normal (m/s <sup>2</sup> )	Desacel Máxima (m/s <sup>2</sup> )	Vel Media (km/h)	Emissões HC (g)	Emissões CO (g)	Emissões NOx (g)
1	1,50	1,50	0,50	0,50	53,41	34,47	1.732,81	86,47
2	1,50	2,30	0,50	0,50	53,41	34,50	1.737,78	86,48
3	1,50	3,00	0,50	0,50	53,50	34,20	1.683,95	86,21
4	1,50	1,50	0,50	0,80	53,41	34,47	1.732,81	86,47
5	1,50	2,30	0,50	0,80	53,41	34,50	1.737,78	86,48
6	1,50	3,00	0,50	0,80	53,50	34,20	1.683,95	86,21
7	1,50	1,50	0,50	1,00	53,41	34,47	1.732,81	86,47
8	1,50	2,30	0,50	1,00	53,41	34,50	1.737,78	86,48
9	1,50	3,00	0,50	1,00	53,50	34,20	1.683,95	86,21
10	1,50	1,50	2,00	2,00	53,70	33,29	1.606,28	84,03
11	1,50	2,30	2,00	2,00	53,70	33,29	1.606,28	84,03
12	1,50	3,00	2,00	2,00	53,70	33,29	1.606,28	84,03
13	1,50	1,50	2,00	3,00	53,76	33,38	1.610,55	83,66
14	1,50	2,30	2,00	3,00	53,76	33,38	1.610,55	83,66
15	1,50	3,00	2,00	3,00	53,76	33,38	1.610,55	83,66
16	1,50	1,50	2,00	4,00	53,76	33,32	1.613,81	83,72
17	1,50	2,30	2,00	4,00	53,76	33,32	1.613,81	83,72
18	1,50	3,00	2,00	4,00	53,75	33,32	1.613,81	83,72
19	1,50	1,50	3,50	3,50	53,78	33,14	1.572,83	83,40
20	1,50	2,30	3,50	3,50	53,78	33,14	1.572,83	83,40
21	1,50	3,50	3,50	3,50	53,78	33,14	1.572,83	83,40
22	1,50	1,50	3,50	5,30	53,76	33,32	1.613,81	83,72
23	1,50	2,30	3,50	5,30	53,76	33,32	1.613,81	83,72
24	1,50	3,00	3,50	5,30	53,76	33,32	1.613,81	83,72
25	1,50	1,50	3,50	7,00	53,76	33,32	1.613,81	83,72
26	1,50	2,30	3,50	7,00	53,76	33,32	1.613,81	83,72
27	1,50	3,00	3,50	7,00	53,76	33,32	1.613,81	83,72
28	2,50	2,50	0,50	0,50	54,80	55,00	4.554,69	70,11
29	2,50	3,80	0,50	0,50	54,85	53,32	4.323,83	69,14
30	2,50	5,00	0,50	0,50	54,90	53,54	4.370,34	69,76
31	2,50	2,50	0,50	0,80	54,80	55,00	4.554,69	70,11
32	2,50	3,80	0,50	0,80	54,85	53,32	4.323,83	69,14
33	2,50	5,00	0,50	0,80	54,90	53,54	4.370,34	69,76
34	2,50	2,50	0,50	1,00	54,80	55,00	4.554,69	70,11
35	2,50	3,80	0,50	1,00	54,85	53,32	4.323,83	69,14
36	2,50	5,00	0,50	1,00	54,90	53,54	4.370,34	69,76
37	2,50	2,50	2,00	2,00	54,41	56,53	4.729,23	75,71
38	2,50	3,80	2,00	2,00	54,41	56,53	4.729,23	75,71
39	2,50	5,00	2,00	2,00	54,41	56,53	4.729,23	75,71
40	2,50	2,50	2,00	3,00	59,49	58,42	4.674,29	85,74
41	2,50	3,80	2,00	3,00	54,49	55,85	4.635,82	75,46
42	2,50	5,00	2,00	3,00	54,49	55,85	4.635,82	75,46
43	2,50	2,50	2,00	4,00	54,49	55,89	4.638,01	75,64
44	2,50	3,80	2,00	4,00	54,49	55,89	4.638,01	75,64
45	2,50	5,00	2,00	4,00	54,49	55,89	4.638,01	75,64
46	2,50	2,50	3,50	3,50	54,49	55,85	4.634,76	75,48
47	2,50	3,80	3,50	3,50	54,49	55,85	4.634,76	75,48
48	2,50	5,00	3,50	3,50	54,49	55,85	4.634,76	75,48
49	2,50	2,50	3,50	5,30	54,49	55,93	4.624,76	75,85
50	2,50	3,80	3,50	5,30	54,49	55,93	4.624,76	75,85
51	2,50	5,00	3,50	5,30	54,49	55,93	4.624,76	75,85
52	2,50	2,50	3,50	7,00	54,49	55,93	4.624,76	75,85
53	2,50	3,80	3,50	7,00	54,49	55,93	4.624,76	75,85
54	2,50	5,00	3,50	7,00	54,49	55,33	4.543,36	75,35

Para os cenários avaliados é possível concluir que o fator que apresenta maior influência no valor das emissões estimadas é a aceleração normal. O CO mostrou-se mais suscetível à variação no valor da aceleração média. As emissões de HC também são influenciadas pela

variação da aceleração, porém em uma escala inferior. Já as emissões de NO<sub>x</sub> apresentaram comportamento inverso, reduzindo na medida em que há um aumento no valor da taxa média de aceleração. Os resultados mostraram-se de acordo com o observado na bibliografia, onde as emissões de CO e HC são fortemente relacionadas com eventos de enriquecimento da mistura (eventos de aceleração). Por sua vez as emissões de NO<sub>x</sub> tendem a aumentar à medida em que há um aumento na taxa de desaceleração, e por consequência aumento na intensidade dos eventos de empobrecimento da mistura.

#### **4.5.2 Análise dos demais parâmetros de calibração**

Este teste de análise de sensibilidade tem por objetivo avaliar a variação da aceleração, do fator de afastamento e do fator de reação ao controle de tráfego na quantificação das emissões. Neste item a análise será conduzida de forma desagregada a fim de se investigar a variação dos resultados ao longo dos arcos da rede de teste verificar a influência da geração dos veículos com velocidade inicial igual a zero.

Para aprofundar a análise do parâmetro aceleração normal, neste teste foram testados 4 níveis de aceleração (de  $1\text{m/s}^2$  a  $2,5\text{ m/s}^2$  em intervalos de  $0,5\text{m/s}^2$ ). O fator de afastamento foi definido em três níveis (1; 1,5 e 2 metros). O fator de reação ao controle de tráfego também foi definido em três níveis (10, 50 e 90 metros). O fator de reação ao controle de tráfego determina a que distância o veículo reagirá ao controle. Os resultados estão apresentados no Quadro 9.

As emissões não foram influenciadas pelo fator de afastamento. As emissões de CO sofreram variação de 25% a uma taxa de aceleração de  $1,0\text{m/s}^2$  em função alteração do fator de reação ao controle de tráfego. Entretanto esta diferença torna-se desprezível na medida em que há o aumento da taxa de aceleração.

**Quadro 9:** Emissões calculadas com o modelo CMEM para diversos níveis dos parâmetros entrada.

Cenário	Acel Normal (m/s <sup>2</sup> )	Afastamento	X-Appro-Jnct	Velocidad e media (km/h)	Emissões HC (g)	Emissões CO (g)	Emissões NOx (g)
Rodada1	1,00	1,00	10,00	51,77	26,95	781,67	98,85
Rodada2	1,00	1,00	50,00	51,66	25,73	631,17	100,00
Rodada3	1,00	1,00	90,00	51,66	25,67	624,27	100,07
Rodada4	1,00	1,50	10,00	51,79	26,90	774,88	99,07
Rodada5	1,00	1,50	50,00	51,68	25,77	631,40	99,54
Rodada6	1,00	1,50	90,00	51,69	25,77	631,41	99,54
Rodada7	1,00	2,00	10,00	51,77	26,95	781,67	98,85
Rodada8	1,00	2,00	50,00	51,66	25,73	631,17	100,00
Rodada9	1,00	2,00	90,00	51,66	25,67	624,27	100,07
Rodada10	1,50	1,00	10,00	53,90	33,18	1.585,02	82,84
Rodada11	1,50	1,00	50,00	53,76	33,17	1.579,62	84,24
Rodada12	1,50	1,00	90,00	53,76	33,17	1.579,62	84,24
Rodada13	1,50	1,50	10,00	53,92	33,11	1.557,19	82,89
Rodada14	1,50	1,50	50,00	53,76	33,32	1.613,81	83,72
Rodada15	1,50	1,50	90,00	53,76	33,32	1.613,81	83,72
Rodada16	1,50	2,00	10,00	53,90	33,18	1.585,02	82,84
Rodada17	1,50	2,00	50,00	53,76	33,17	1.579,62	84,24
Rodada18	1,50	2,00	90,00	53,76	33,17	1.579,62	84,24
Rodada19	2,00	1,00	10,00	54,30	52,23	3.798,91	90,76
Rodada20	2,00	1,00	50,00	54,20	52,77	3.907,02	90,12
Rodada21	2,00	1,00	90,00	54,20	52,77	3.907,02	90,12
Rodada22	2,00	1,50	10,00	54,34	51,83	3.775,24	90,46
Rodada23	2,00	1,50	50,00	54,21	52,66	3.899,68	90,39
Rodada24	2,00	1,50	90,00	54,21	52,66	3.899,68	90,39
Rodada25	2,00	2,00	10,00	54,30	52,23	3.798,91	90,76
Rodada26	2,00	2,00	50,00	54,20	52,77	3.907,02	90,12
Rodada27	2,00	2,00	90,00	54,20	52,77	3.907,02	90,12
Rodada28	2,50	1,00	10,00	54,83	54,13	4.399,60	74,60
Rodada29	2,50	1,00	50,00	54,48	54,99	4.500,89	75,39
Rodada30	2,50	1,00	90,00	54,48	54,99	4.500,89	75,39
Rodada31	2,50	1,50	10,00	54,85	54,15	4.399,13	74,60
Rodada32	2,50	1,50	50,00	54,49	55,93	4.624,76	75,85
Rodada33	2,50	1,50	90,00	54,49	55,93	4.624,76	75,85
Rodada34	2,50	2,00	10,00	54,83	54,13	4.399,60	74,60
Rodada35	2,50	2,00	50,00	54,48	54,99	4.500,89	75,39
Rodada36	2,50	2,00	90,00	54,48	54,99	4.500,89	75,39

Para a análise das estimativas de emissões em cada arco da rede foram seleccionados os resultados referentes a quatro rodadas de simulação. Este grupo de rodadas é caracterizado pela variação dos valores de aceleração normal e com os demais fatores em um nível fixo (rodadas 5, 14, 23 e 32). Os resultados desagregados espacialmente são apresentados no Quadro 10.

**Quadro 10:** Emissões para os diferentes arcos da rede calculados com o modelo CMEM e 4 níveis de aceleração

Rodada	Arco	Emissões HC (g)	Emissões de CO (g)	Emissões de NOx (g)
Rodada 5	1	9,22	87,89	50,71
	2	5,15	46,00	9,20
	3	11,40	497,51	39,62
	<b>Total</b>	<b>25,77</b>	<b>631,40</b>	<b>99,54</b>
Rodada 14	1	17,54	1.113,46	44,52
	2	5,25	47,27	10,88
	3	10,53	453,09	28,32
	<b>Total</b>	<b>33,32</b>	<b>1.613,81</b>	<b>83,72</b>
Rodada 23	1	32,21	2.883,04	50,78
	2	5,46	48,90	11,42
	3	15,00	967,74	28,19
	<b>Total</b>	<b>52,66</b>	<b>3.899,68</b>	<b>90,39</b>
Rodada 32	1	32,83	3.241,89	37,80
	2	5,55	53,31	12,51
	3	17,56	1.329,55	25,54
	<b>Total</b>	<b>55,93</b>	<b>4.624,76</b>	<b>75,85</b>

Não há variação significativa dos resultados do arco 2 nos quatro grupos de simulação analisados. O arco 2 é caracterizado pela predominância de eventos de desaceleração e eventos de parada. Em relação aos resultados do arco 1 (arco de entrada), pode-se observar uma grande variação na estimativa de CO (mais de 3500%). Já o resultado global apresenta uma variação de 633%, e analisando somente os resultados do segundo e terceiro arcos a variação é de 155%. A geração de veículos com velocidade inicial igual a zero (isto pode ser melhor observado na figura 17) provoca uma grande distorção nos resultados. Sendo o nível de emissões fortemente relacionado ao nível de aceleração, principalmente quando o veículo encontra-se em repouso, quanto mais elevado for a aceleração normal configurada no modelo, maior será a influência do resultado do arco de entrada na quantificação total das emissões.

A inclusão das estimativas de emissões referentes aos arcos iniciais da rede no resultado global pode distorcer a análise dos resultados, principalmente em redes com poucos arcos. Desta forma, é aconselhada a exclusão dos resultados relativos aos arcos de entrada na rede, quando da quantificação das emissões veiculares através de modelos de tráfego nos quais a velocidade inicial dos veículos gerados seja igual a zero.

## 4.6 INFLUÊNCIA DOS MODELOS DE PROGRESSÃO LONGITUDINAL

Como visto nos itens anteriores, a aceleração é uma variável preponderante na estimativa das emissões. A estimativa da aceleração nos modelos de simulação de tráfego é derivada do resultado dos modelos de progressão longitudinal dos veículos, modelos de *car-following* e aceleração. O objetivo desta seção é verificar a diferença na quantificação das emissões a partir do uso de modelos de simulação distintos. Para isto é feita a comparação entre as estimativas de emissão a partir de resultados gerados pelos simuladores DRACULA e INTEGRATION. Estes modelos empregam lógicas distintas tanto para o modelo de *car-following*, como para o modelo de aceleração.

### 4.6.1 Configuração do Teste

Os testes foram realizados na rede apresentada no item 4.4. A rede possui velocidade de fluxo de livre configurada em 60km/h. O semáforo possui tempo de ciclo igual a 60 segundos, sendo 30 segundos de fase verde. Especificamente para o modelo INTEGRATION, a velocidade na capacidade é aproximadamente igual à velocidade de fluxo livre ( $u_c = 59,99\text{km/h}$ ) de modo a garantir que todo o atraso provocado na rede seja de responsabilidade da interseção semaforizada. A demanda é determinística e uniforme, com *headway* igual a 5 segundos, sendo uma rede não saturada. Com isto espera-se que os veículos empreguem apenas o modelo de aceleração para progredir longitudinalmente. Este trabalho não abordará diferenças nos resultados devido aos modelos de *car-following*.

O tempo de simulação é de 15 minutos. O modelo DRACULA foi calibrado para que o seu resultado fosse compatível com o apresentado pelo INTEGRATION. A aceleração média adotada no modelo DRACULA foi de  $2 \text{ m/s}^2$ , com o isto o resultado apresentado em ambos modelos mostrou-se compatível (velocidade média temporal  $\approx 54,5 \text{ km/h}$  com desvio padrão  $\approx 15 \text{ km/h}$ ).

Para o cálculo das emissões foi empregado o modelo CMEM. O DRACULA, assim como o INTEGRATION, possui um modelo de emissão incorporado. O INTEGRATION emprega o modelo desenvolvido na Virginia Tech (ver item 3.4.3.2). A decisão de optar por um terceiro modelo de emissão é justificada em função de dois aspectos: (i) diferenças metodológicas entre os modelos de emissão; (ii) diferenças entre as bases de dados utilizadas para o desenvolvimento dos modelos de emissão. A comparação direta entre os resultados de

emissão geradas pelos próprios simuladores poderia levar a conclusões incorretas. A análise dos modelos de emissão será conduzida no item 4.7.

#### 4.6.2 Resultados e análise

O Quadro 11 mostra o resultado para as estimativas de HC, CO e NO<sub>x</sub> para todo o período de simulação (120 veículos). Os resultados estão segmentados por arco, desta forma é possível identificar novamente a influência do resultado do arco de entrada na estimativa total das emissões geradas pelos dois modelos. Incluindo o arco de entrada, as emissões de CO estimadas pelo modelo CMEM a partir dos resultados do modelo DRACULA foram 28 vezes superiores às emissões estimadas utilizando os resultados do modelo INTEGRATION. Para o caso das emissões de HC estas foram 8 vezes superiores, e 7 superiores vezes para o NO<sub>x</sub>. No INTEGRATION, diferentemente do DRACULA, os veículos são gerados já com a velocidade desejada. No DRACULA a aceleração dos veículos do repouso até atingirem a velocidade desejada emite uma grande quantidade de CO e HC.

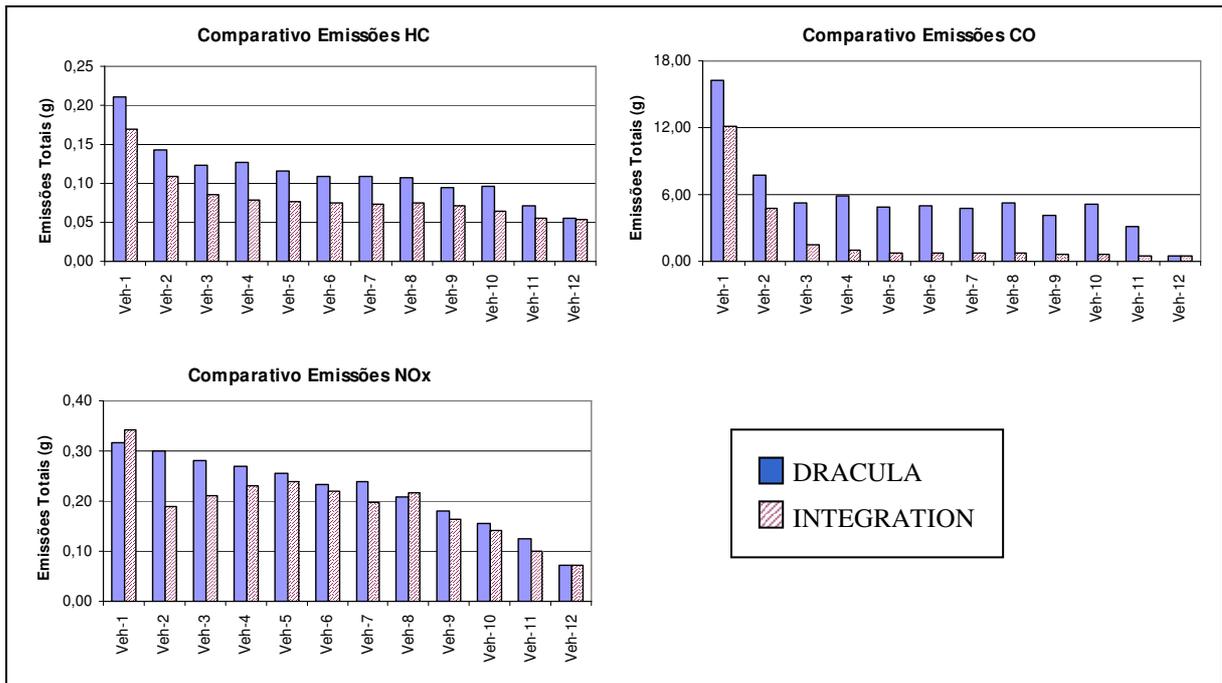
Desconsiderando os resultados do arco de entrada, em ambos os modelos, para a comparação e análise dos resultados a diferença entre as estimativas foi reduzida consideravelmente. As emissões estimadas pelo CMEM a partir dos resultados do DRACULA foram superiores a 1,4 vezes para o HC, 2,8 vezes para o CO e 1,2 vezes para o NO<sub>x</sub>. A diferença entre as estimativas de NO<sub>x</sub> e HC para o arco 2 foram insignificantes. Para a estimativa do CO, a diferença entre as estimativas é significativa nos arcos 2 e 3, sendo no arco 2 verificada a diferença mais considerável.

A distinção entre os modelos de *car-following* e aceleração presente nos dois modelos é responsável pela diferença entre as estimativas de emissões. Desta forma são gerados perfis diferentes de aceleração e velocidade. O modelo DRACULA adota um modelo de aceleração constante, isto é, independente da velocidade empreendida pelo veículo, estando em fluxo livre a taxa de aceleração empregada é única. Já o INTEGRATION, emprega um modelo de aceleração baseado na dinâmica do veículo (Snare, 2002). A aceleração disponível é calculada com base no regime de forças que atuam sobre o veículo. Desta forma, quanto maior a velocidade do veículo, menor será a sua aceleração disponível. Este item será explorado em maiores detalhes no item 4.6.4.

**Quadro 11:** Estimativa de emissões para DRACULA e INTEGRATION com o uso do modelo CMEM.

Modelo	Arco	HC	CO	NOx
DRACULA	1	32,206	2.883,038	50,784
	2	5,460	48,903	11,416
	3	14,996	967,740	28,188
	Total	52,66	3.899,68	90,39
INTEGRATION	1	5,07	48,18	6,61
	2	5,48	61,87	11,22
	3	9,35	305,62	21,67
	Média	6,63	138,56	13,17

A Figura 16 apresenta a estimativa de emissões para os 12 primeiros veículos da simulação após o período de *warm-up*, correspondente ao número de veículos que cruza a interseção durante um ciclo semafórico. Como a demanda é determinística, o comportamento dos veículos para cada ciclo semafórico é semelhante. As estimativas de CO e HC a partir dos dados do DRACULA são superiores para os 12 veículos analisados. No caso do HC a diferença verificada entre todos os veículos é praticamente constante. Para as emissões de NOx as diferenças foram variáveis, para alguns veículos elas são superiores no DRACULA e para outros elas são superiores no INTEGRATION. As estimativas de emissões para o veículo 12, que não efetua parada no semáforo, é igual independentemente do modelo de tráfego empregado.

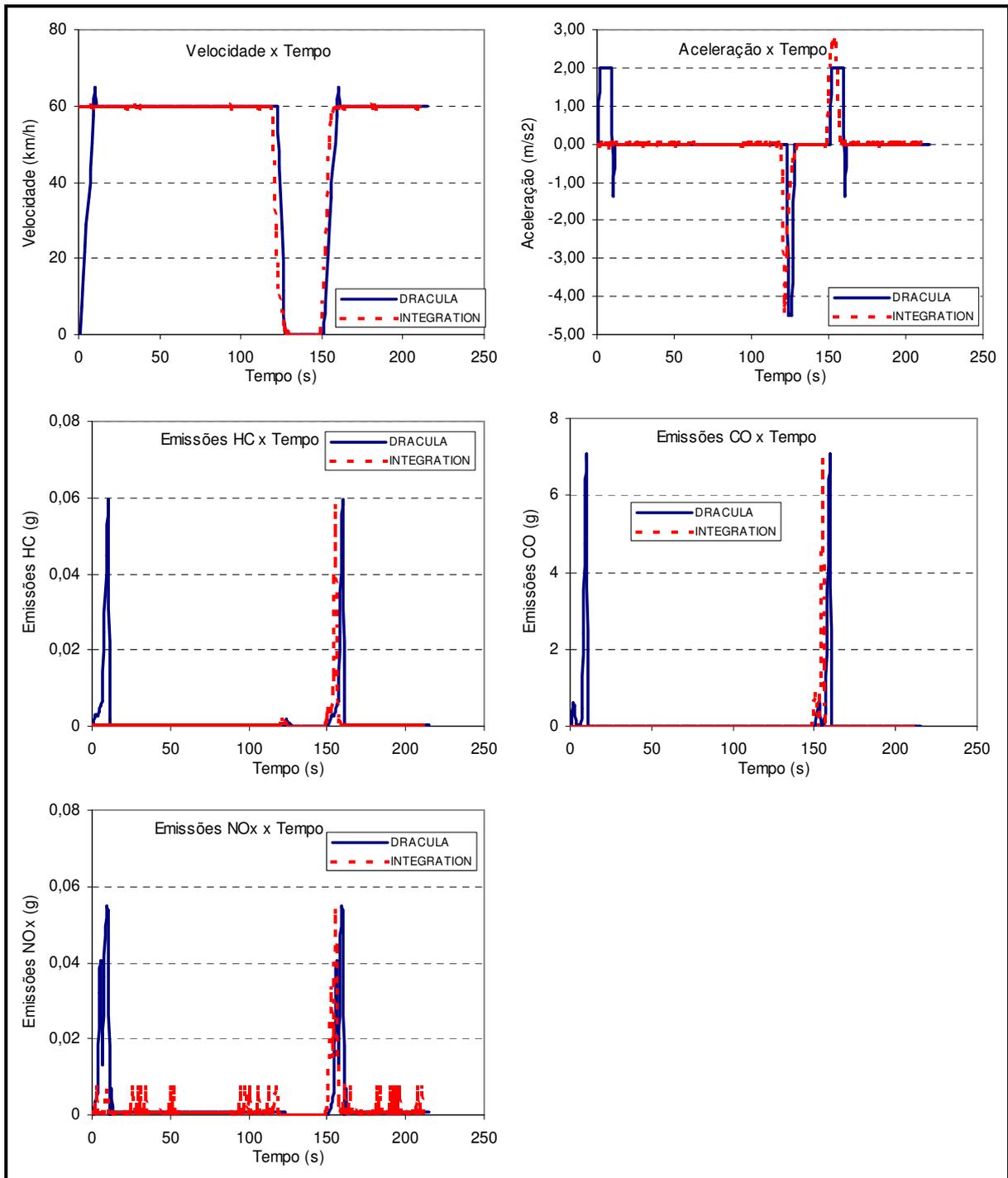


**Figura 16:** Estimativas de emissões do DRACULA e INTEGRATION para os veículos 1 a 12.

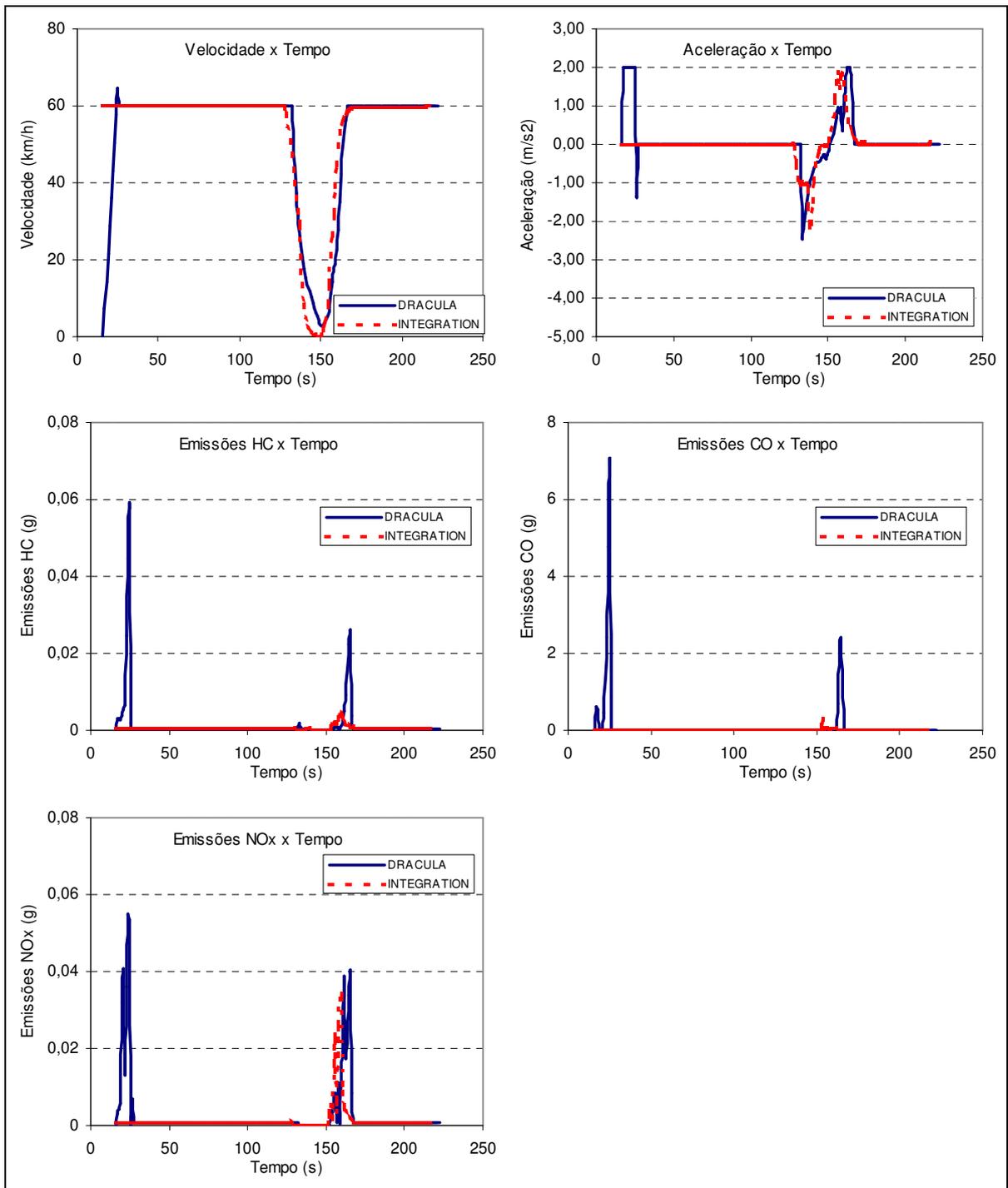
A análise dos perfis de velocidade, aceleração e emissões, apresentados nas Figuras 17 e 18, permite a identificação da diferença entre as velocidades de entrada dos veículos nos modelos DRACULA e INTEGRATION. No modelo INTEGRATION pequenas oscilações na velocidade desejada do veículo 1 foram responsáveis por eventos significativos de emissões de NOx. Isto explica porque para o veículo 1 as emissões de NOx foram superiores com o uso do modelo INTEGRATION em relação ao modelo DRACULA.

Mesmo havendo diferença entre os modelos de aceleração dos dois modelos, a estimativa de emissões de CO e HC para o veículo 1 foi muito próxima. Embora a aceleração máxima atingida pelo veículo no INTEGRATION tenha sido superior, o tempo de aceleração no modelo DRACULA foi mais extenso.

O modelo de *car-following* também foi responsável por diferença entre o resultado dos modelos. No modelo INTEGRATION não houve interação entre os veículos. No modelo DRACULA, com exceção do veículo 1, é possível perceber, pela análise do perfil de velocidade do veículo 4, oscilações na taxa de aceleração após a passagem pela interseção. Estas oscilações foram responsáveis por grandes eventos de emissões de todos os poluentes. Isto evidencia também a importância de se determinar de forma adequada o limite entre o regime de fluxo livre e o regime de *car-following*.



**Figura 17:** Perfis de Velocidade, aceleração e emissões gerados pelo DRACULA E INTEGRATION para o veículo 1



**Figura 18:** Perfis de Velocidade, aceleração e emissões gerados pelo DRACULA E INTEGRATION para o veículo 4

#### 4.6.3 Influência do Modelo de Aceleração

Como pode ser observado nas seções anteriores, a modelagem da aceleração dos veículos em fluxo livre é um importante componente para a correta estimativa das emissões veiculares. É possível encontrar na literatura (Bham e Benekohal, 2002) diversos tipos de

modelos de aceleração. Os modelos de aceleração classificam-se em dois tipos (Snare, 2002): (i) modelos baseados nas equações de cinemática; (ii) modelos que incorporam a dinâmica dos veículos.

Os modelos baseados na cinemática apresentam diversos graus de complexidade. O mais simples é aquele onde a taxa de aceleração é constante para qualquer valor de velocidade. Em função de sua simplicidade este tipo modelo é vastamente empregado em modelos de simulação de tráfego, como no caso do modelo DRACULA.

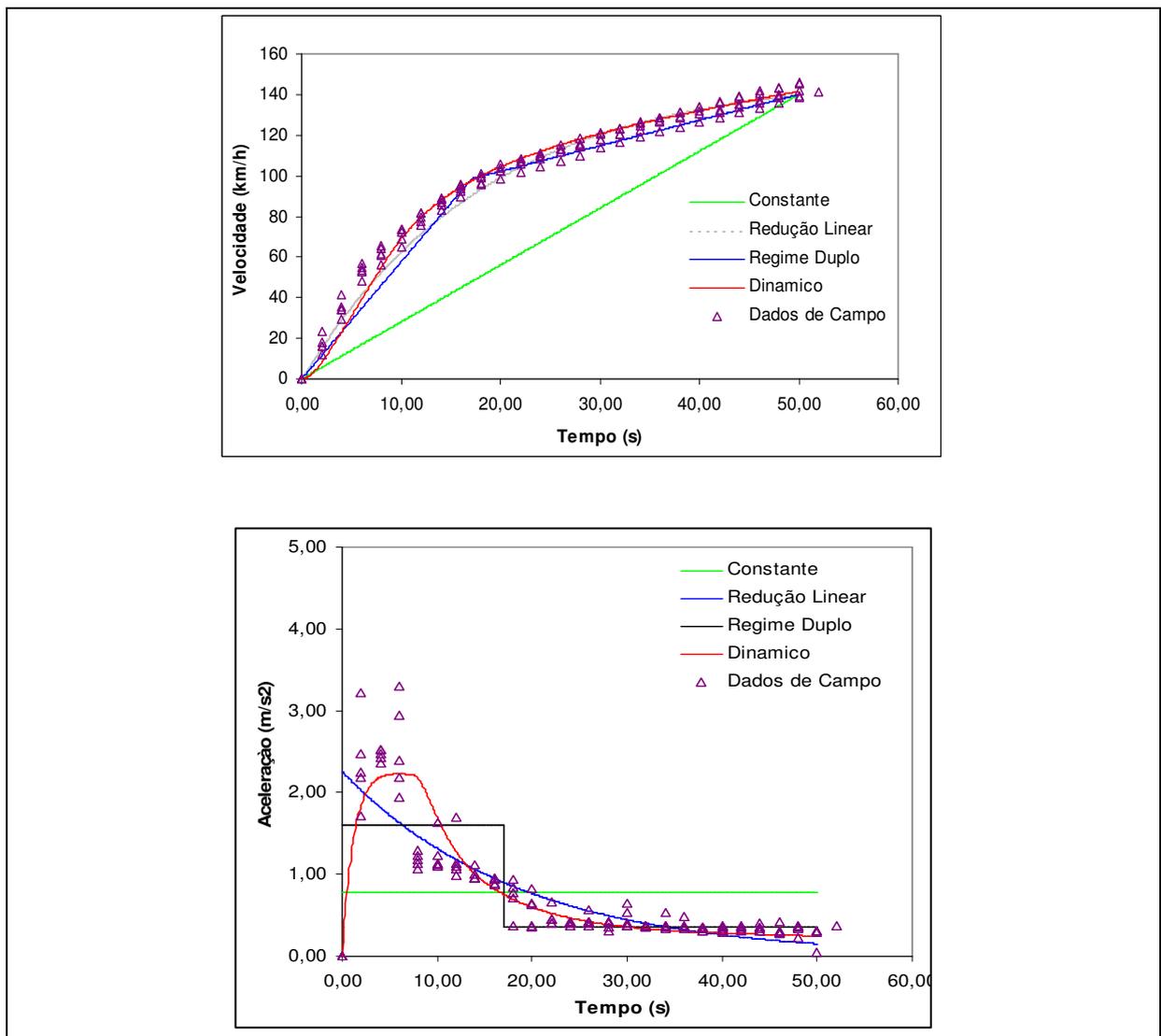
No entanto Akcelik e Biggs (1987) mostram que o veículo acelera a taxas mais altas quando está em baixas velocidades. O modelo de regime duplo é similar ao modelo constante, porém são empregadas duas taxas de aceleração, uma para baixas velocidades e outra para altas velocidades. O modelo linear decrescente constitui-se em outra abordagem para tratar do mesmo fenômeno. Neste modelo, a taxa máxima de aceleração ocorre na velocidade zero, e a aceleração decresce linearmente até o valor de zero quando a velocidade for máxima.

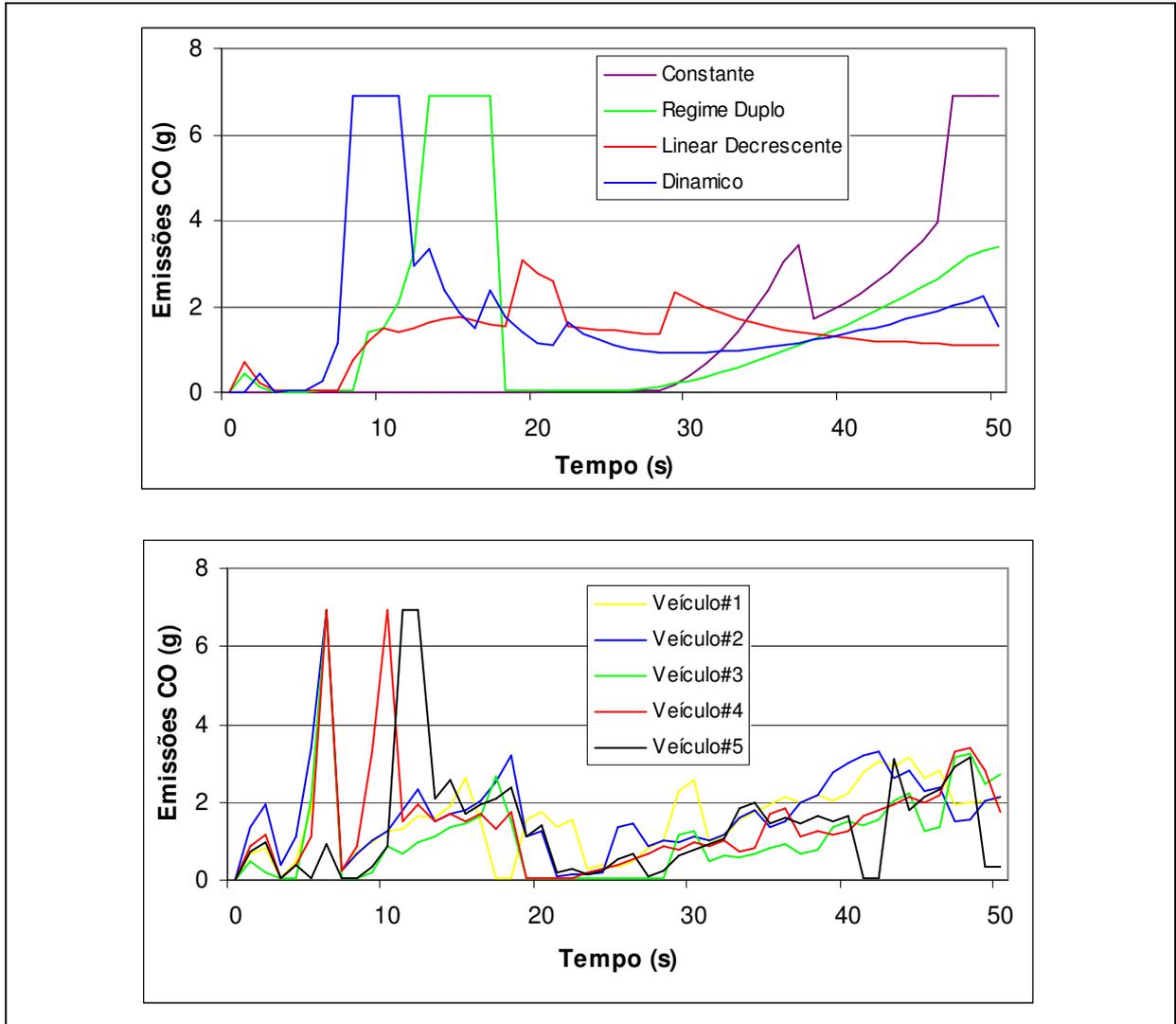
O modelo que incorpora a dinâmica do veículo incorpora a descrição das forças que atuam sobre o veículo resultando no seu movimento. O INTEGRATION incorpora este tipo de modelo de aceleração, que tem sua descrição feita no item 4.6.1.

O objetivo desta seção é avaliar a diferença provocada na estimativa das emissões veiculares pela modelagem da aceleração através do uso de diferentes modelos de aceleração. Para isto, quatro perfis de velocidade obtidos a partir do uso de modelos de aceleração distintos e 5 perfis reais de velocidade, coletados em campo com o veículo em regime de fluxo livre, foram inseridos no modelo CMEM para o cálculo das emissões. Os resultados são mostrados no Quadro 12. A Figura 19 ilustra os perfis de velocidade e aceleração calculados nos modelos de aceleração e os 5 perfis reais medidos campo. Os modelos de aceleração foram calibrados para que a velocidade máxima fosse atingida no mesmo intervalo de tempo verificado nos levantamentos de campo (dados obtidos em Snare, 2002). A Figura 20 ilustra os perfis de emissão de CO calculados no modelo CMEM a partir dos resultados teóricos e dos dados levantados em campo (dados reais).

**Quadro 12:** Emissões para os vários modelos de emissão

Modelo de Aceleração	Emissões (g)		
	HC	CO	NOx
Constante	0,69	66,47	1,27
Regime Duplo	0,74	79,51	1,05
Linear Decrescente	0,64	67,25	1,06
Dinamico	0,82	88,21	1,18
Real#1	0,76	82,28	1,10
Real#2	0,79	87,14	1,12
Real#3	0,57	54,98	1,05
Real#4	0,72	74,37	1,10
Real#5	0,69	68,53	1,06
Média Real	0,70	73,46	1,08

**Figura 19:** Perfis de velocidade e aceleração obtidos pelos diferentes modelos de aceleração.



**Figura 20:** Perfil de emissão de CO calculado com o modelo CMEM a partir dos diferentes modelos de aceleração

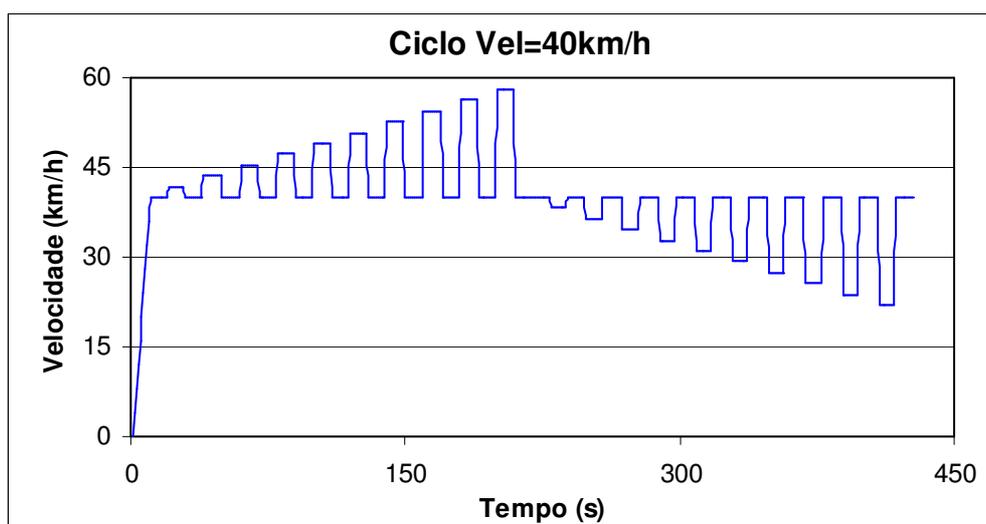
O modelo de aceleração do tipo regime duplo e o do tipo linear decrescente foram aqueles que apresentaram os resultados de emissões mais próximos ao resultado médio obtido pelos dados de reais de campo. Entretanto, ao fazer a análise dos perfis de emissão de CO é possível observar que o modelo dinâmico e o modelo linear apresentaram perfis mais semelhantes com os calculados para os dados dos dados reais. Da mesma forma, estes mesmos modelos apresentaram perfis de aceleração e velocidade semelhantes aos obtidos em campo. O modelo constante mostrou-se inadequado para a estimativa das emissões veiculares.

#### 4.7 INFLUÊNCIA DO MODELO DE EMISSÃO

Neste item é avaliada a influência da variação do tipo de modelo de emissão na estimativa das emissões veiculares. Especificamente serão comparados os resultados obtidos

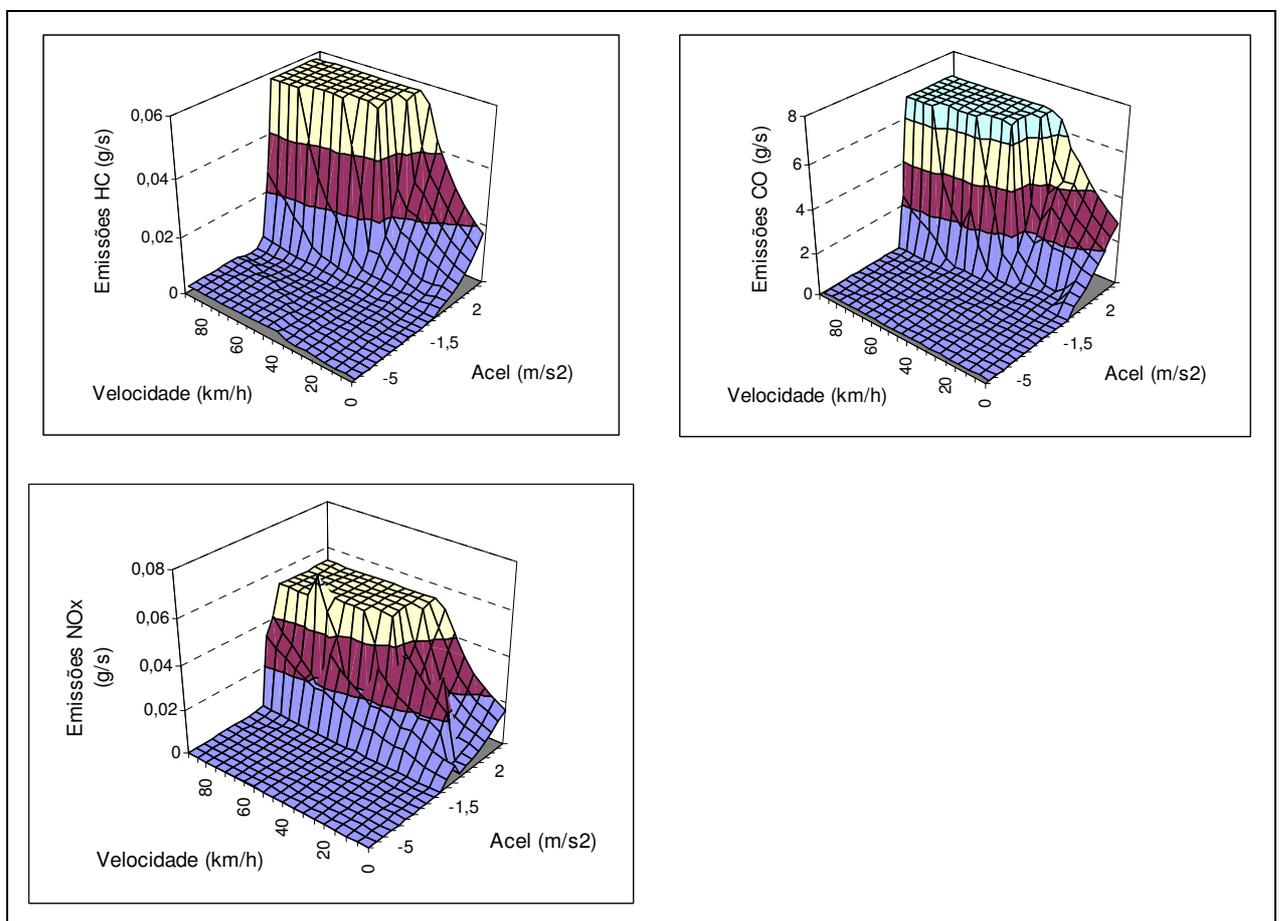
por 3 abordagens distintas de modelos dinâmicos: (i) o modelo físico; (ii) modelo baseado em tabela; e (iii) modelo baseado em tabela simplificada (uma variante do modelo anterior). Este comparativo envolverá a estimativa das emissões para rede de teste descrita no item 4.5, empregando o modelo de tráfego DRACULA, configurado com uma taxa normal de aceleração de  $1,5\text{m/s}^2$ .

O CMEM é o modelo físico empregado neste comparativo. Os modelos baseados em tabela foram originados a partir de matrizes de emissão geradas pelo modelo CMEM. As matrizes de emissões (ver Figura 22) foram geradas a partir da quantificação das emissões pelo CMEM, utilizando como dado de descrição do nível de atividade do tráfego, ciclos de condução criados especificamente para este objetivo. A característica destes ciclos de condução é possuir todas as combinações possíveis de velocidade e aceleração. A figura 21 ilustra o ciclo de condução 40km/h, onde esta velocidade é combinada com todas as possibilidades de aceleração possíveis. Foram desenvolvidos ciclos de condução para velocidade variando de 0 km/h a 100 km/h com incrementos de 5 km/h. As matrizes simplificadas são equivalentes ao modelo de emissão integrado ao modelo DRACULA. Na matriz simplificada, ao contrário da matriz tradicional, há apenas um fator de emissão para qualquer evento de aceleração ou desaceleração. O desenvolvimento de matrizes de emissão a partir de dados do modelo CMEM exclui da comparação entre as diversas abordagens para estimativa das emissões, diferenças nos resultados devido ao uso de base de dados distintas.



**Figura 21:** Ciclo de condução para a velocidade de 40km/h para criação das matrizes de emissão a partir do modelo CMEM

As várias abordagens para estimativa das emissões diferenciam-se entre si pelo seu tempo de execução e complexidades de processamento (Liu, 2003). Os modelos baseados em matriz são os de mais fácil execução. A desvantagem da matriz é não poder modelar o efeito de fatores como greide, temperatura de operação dos veículos e histórico de operação dos veículos. Os modelos baseados em equação já possuem tempo um pouco maior de execução, sua vantagem em relação a matriz é uma maior facilidade de processamento no caso de haver múltiplas categorias de veículos a serem modeladas. Os modelos físicos, em função da complexidade de seus cálculos, requerem um grande esforço computacional e sua aplicação requer uma grande quantidade de manipulação de dados.



**Figura 22:** Matrizes de emissão geradas a partir do modelo físico CMEM

O uso da matriz simplificada pressupõe a adoção de um único fator de emissão para eventos de aceleração e um único fator para eventos de desaceleração. A grande dificuldade na escolha destes parâmetros é que o fator de emissão cresce exponencialmente em função da velocidade e da aceleração. Uma escolha errada pode levar a resultados não satisfatórios. Neste estudo optou-se pela escolha do fator de emissão para eventos de aceleração correspondente ao par velocidade/aceleração  $30 \text{ km/h}; 1,5 \text{ m/s}^2$ . Para eventos de desaceleração

o fator escolhido corresponde ao para velocidade/desaceleração 60km/h;-2m/s<sup>2</sup>. O Quadro 13 abaixo apresenta os fatores de emissão escolhidos para CO, HC e NO<sub>x</sub>.

**Quadro 13:** Fatores de emissão escolhidos para abastecer a matriz simplificada

Poluente	Fator de Emissão (g/s)	
	Aceleração	Desaceleração
CO	0,00065	0,02493
HC	0,00108	0,00108
Nox	0,00018	0,02442

O Quadro 14 apresenta o resultado da estimativa das emissões utilizando os três métodos. De forma geral, os resultados obtidos com o uso do modelo físico (CMEM) ficaram muito próximos dos valores obtidos com a matriz completa (6% superiores para HC e 1% superiores para NO<sub>x</sub> e CO). A utilização de matrizes na quantificação das emissões se mostrou eficaz em uma rede pequena, ainda que seja um método simplificado se comparado ao modelo físico. Os resultados gerados pelo método da matriz simplificada apresentaram diferenças significativas em relação aos outros métodos, notadamente para emissões de CO, cujas emissões em aceleração são geralmente 100 vezes superiores às emissões de HC. Esta diferença provavelmente está relacionada a erro na escolha dos fatores de emissão. Recomenda-se em aplicações posteriores o uso de fatores de emissão que respeitem a ordem de grandeza entre os compostos emitidos.

**Quadro 14:** Resultado estimativa de emissões com diferentes métodos de cálculo

Método	Emissões (g)		
	HC	CO	Nox
Matriz	31,32	1.595,78	82,73
Matriz Simplificada	25,18	221,74	107,74
CMEM	33,32	1.613,81	83,72

#### 4.8 CONCLUSÕES

Este capítulo apresentou uma série de testes onde foram avaliados o impacto da variação de três aspectos intrínsecos aos modelos de simulação de tráfego na quantificação das emissões veiculares: (i) os parâmetros de entrada utilizados para calibração; (ii) a lógica dos modelos de progressão longitudinal; e (iii) o modelo de emissão geralmente incorporado ao simulador.

Os testes indicaram que os valores definidos para o parâmetro relativo à aceleração normal possuem forte influência sobre a estimativa das emissões, realizadas com o modelo CMEM. Para diferentes cenários, onde a velocidade teste da rede era similar, a variação na taxa de aceleração em 80% gerou um aumento na quantidade de CO em 180%. O NO<sub>x</sub> mostrou-se pouco influenciável pela variação na taxa de aceleração normal. A variação dos demais parâmetros avaliados não apresentou variações significativas na estimativa das emissões.

No modelo DRACULA os veículos gerados no processo de simulação ao entrarem na rede, o fazem com velocidade igual a zero. Consequentemente, todos os veículos para atingirem a sua velocidade desejada executam movimentos de aceleração. Estes eventos são responsáveis por grande quantidade de emissão produzida. Em redes pequenas a apropriação das estimativas de emissão dos arcos de entrada pode distorcer o resultado global.

Diferenças entre os modelos de progressão longitudinal também foram responsáveis por diferenças na estimativa de emissões. O valor limite entre o regime de fluxo livre e o regime de *car-following* também foram responsáveis por variações nos resultados. A quantificação das emissões utilizando modelos baseados em tabelas obteve resultados próximos aos estimados empregando o modelo físico CMEM.

No próximo capítulo será realizado um estudo de caso onde é avaliada a implantação de uma melhoria de fluxo de tráfego com o emprego de diferentes abordagens, segundo a ótica da agregação das variáveis do tráfego.

## **5 QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSÕES VEICULARES ATRAVÉS DO USO DE SIMULADORES DE TRÁFEGO – UM ESTUDO DE CASO**

---

### **5.1 INTRODUÇÃO**

Este capítulo apresenta um estudo de caso onde é avaliado o potencial de aplicação de uma melhoria de fluxo de tráfego na redução das emissões veiculares. A rede viária analisada será modelada com o uso de dois modelos de simulação de tráfego distintos: (i) o modelo microscópico DRACULA; e (ii) o modelo mesoscópico SATURN. As emissões veiculares serão quantificadas com o emprego de quatro metodologias com diferentes abordagens em relação ao nível de agregação das variáveis do tráfego: (i) a partir da velocidade média do trecho analisado; (ii) a partir da velocidade média dos segmentos que compõem o trecho analisado; (iii) a partir do tempo médio de viagem e número de parada por segmento; (iv) a partir da velocidade instantânea dos veículos ao longo de seu percurso no trecho analisado.

O objetivo do capítulo é comparar os resultados obtidos pelas quatro metodologias descritas na avaliação comparativa do cenário de estudo antes e após a implantação da melhoria de fluxo de tráfego. As análises do estudo envolvem: (i) questões sobre as dificuldades de calibração dos modelos de tráfego; (ii) questões sobre a calibração dos modelos de emissão; (iii) comparação dos resultados obtidos.

As análises serão feitas a partir dos resultados da comparação entre os dois cenários. A idéia central do estudo é verificar a capacidade dos diferentes modelos em captar as variações da atividade veicular em função de alterações na rede. Não é objetivo deste trabalho avaliar a precisão dos modelos em quantificar de forma absoluta as emissões veiculares.

### **5.2 CARACTERIZAÇÃO DO CENÁRIO DE ESTUDO E COLETA DE DADOS**

Nesta seção será apresentada a área de estudo e as justificativas para a escolha da área modelada. Também são apresentados os dados levantados em campo, as técnicas de coleta e as medidas adotadas para apropriar as informações de campo a cada modelo.



A área da Segunda Perimetral modelada é composta por um trecho de 1,3 km, onde o comprimento médio dos arcos é de 147m. A rede contém 13 interseções: 6 interseções semaforizadas, 5 controladas por regra de prioridade e 2 alças de acesso, sendo codificadas através de 39 arcos, 16 nós internos e 17 nós externos. A programação semaforizada é implementada através de tempos fixos em sincronismo. Todas as vias transversais possuem sentido único, parte delas com sentido Centro-Bairro (Oeste-Leste) e outras com sentido Bairro-Centro (Leste-Oeste).

O horário modelado corresponde ao período de pico vespertino, entre 18:00h e 19:00h. Na hora modelada há formação de extensas filas, com algumas interseções operando próximo da capacidade. O tráfego é composto basicamente por automóveis.

O trecho estudado possui gargalos, uma vez que o número de faixas de tráfego em toda a sua extensão não é constante. Na maior parte do trecho, os segmentos viários possuem 3 faixas/sentido, entretanto no segmento entre as ruas Dona Laura e Castro Alves o número de faixas/sentido é reduzido a 2. Ainda, no sentido Norte-Sul, no segmento entre a Rua Vasco da Gama e Helena Sperotto, embora a sinalização horizontal demarque 3 faixas de tráfego, em função da largura reduzida, só há o uso efetivo de duas faixas. No sentido Sul-Norte, o segmento entre a Rua Vasco da Gama e Castro Alves possui três faixas de tráfego, porém em função da presença de veículos estacionados, mesmo havendo proibição, restringe o tráfego a duas faixas.

A escolha desta rede viária deve-se a um projeto da Prefeitura de Porto Alegre que prevê a ampliação das avenidas Goethe e Mariante. As obras têm a finalidade de eliminar os gargalos existentes e uniformizar o número de faixas ao longo deste trecho. As obras tinham o início previsto para fevereiro de 2002, entretanto em função da pressão popular, a obra foi adiada já que a mesma envolvia o corte de mais de 56 árvores.

### **5.2.2 Pontos de geração de tráfego**

Em cada arco de entrada ou saída da rede modelado foi definido um ponto de origem ou destino de viagens, respectivamente. O tráfego predominante na rede é de passagem, não havendo pólos geradores de tráfego notórios ao longo de sua extensão, em função disto não foram modelados pontos de geração de tráfego internos à rede. Em função da configuração da rede, só há uma rota possível entre cada par origem-destino. Desta forma, o processo de

alocação restringe-se apenas à calibração da matriz origem-destino, a partir de uma matriz semente (Processo descrito no item 5.4.1).

### **5.2.3 Levantamento de dados**

O levantamento dos dados envolve basicamente três conjuntos de informação: (i) descrição da rede; (ii) quantificação da demanda; e (iii) caracterização do tráfego. A caracterização do tráfego e a quantificação da demanda decorrem conjuntamente. A descrição da rede é obtida em informações previamente cadastradas, e com levantamentos complementares em campo.

#### **5.2.3.1 Levantamento prévio de dados**

O levantamento prévio dos dados consistiu na obtenção de informações em escritório que já estavam cadastradas em fontes já existentes. Os dados obtidos referem-se à descrição da rede e são compostos por:

- Estrutura geométrica da rede;
- Programação semafórica;
- Itinerários e frequência de linhas de transporte público.

A programação semafórica vigente na hora modelada, assim como as informações referentes às linhas de transporte público foram obtidas junto ao órgão responsável pelo gerenciamento do trânsito. A estrutura geométrica da rede, envolvendo os comprimentos dos arcos e as coordenadas dos nós, foi obtida através de Sistemas e Informações Geográficas.

#### **5.2.3.2 Coleta de dados em campo**

A etapa de coleta de dados em campo envolveu o levantamento de informações sobre a descrição da rede, quantificação da demanda e a caracterização do tráfego viário. A coleta de dados se desenvolveu em um único dia, onde todos os elementos foram coletados de forma simultânea na hora modelada.

Sobre a descrição da rede foram coletadas as seguintes informações: (i) número efetivo de faixas de circulação; (ii) compartilhamento das faixas na execução de manobras de

conversão em interseções; (iii) A localização dos pontos de embarque e desembarque das linhas de transporte público.

A determinação da composição do tráfego foi realizada a partir de filmagens feitas na área de estudo. Para fins de coleta, o tráfego foi dividido em três categorias – veículos pequenos, veículos médios e veículos pesados. Os tempos de viagem foram levantados empregando-se o método do veículo flutuante (FHWA, 1998). Nesta pesquisa coletou-se o tempo de viagem em movimento, dado de entrada do modelo SATURN, e o tempo total de viagem que contabiliza os atrasos em virtude de semáforos nos dois sentidos do tráfego.

A demanda de tráfego foi obtida através de contagens volumétricas manuais com pesquisadores localizados em 17 pontos da área de estudo. As contagens foram realizadas no período das 18:00 às 19:00 horas e segregadas em períodos de 15 minutos.

#### **5.2.4 Tempos de Viagem-Velocidade do Tráfego**

Para este estudo dois tempos de viagem foram contabilizados. O tempo em cruzeiro que consiste no tempo em que o veículo encontra-se efetivamente em movimento. Esta informação é necessária para a codificação do modelo SATURN. O tempo geral é tempo que o veículo gasta para percorrer o trecho modelado. O tempo geral consiste no dado de caracterização do tráfego que será empregado para a calibração dos modelos. Os tempos de viagem foram coletados nos sentidos do trecho de estudo de acordo com a técnica do veículo flutuante.

Os tempos de viagem foram coletados em seis rodadas, nos dois sentidos do tráfego. Os arcos foram agrupados em segmentos para a contabilização dos tempos de viagem. Os segmentos são compreendidos por duas interseções semaforizadas, totalizando 6 trechos em ambos os sentidos. A velocidade média é obtida pela divisão dos tempos de viagem pela extensão dos segmentos. O Quadro 15 apresenta as velocidades médias e os tempos de viagem observados em campo para os segmentos do corredor formado pelas avenidas Goethe/Mariante. A velocidade média geral coletada na rede no sentido Sul-Norte equivale a 22,3 km/h, no sentido Norte-Sul 18,7 km/h.

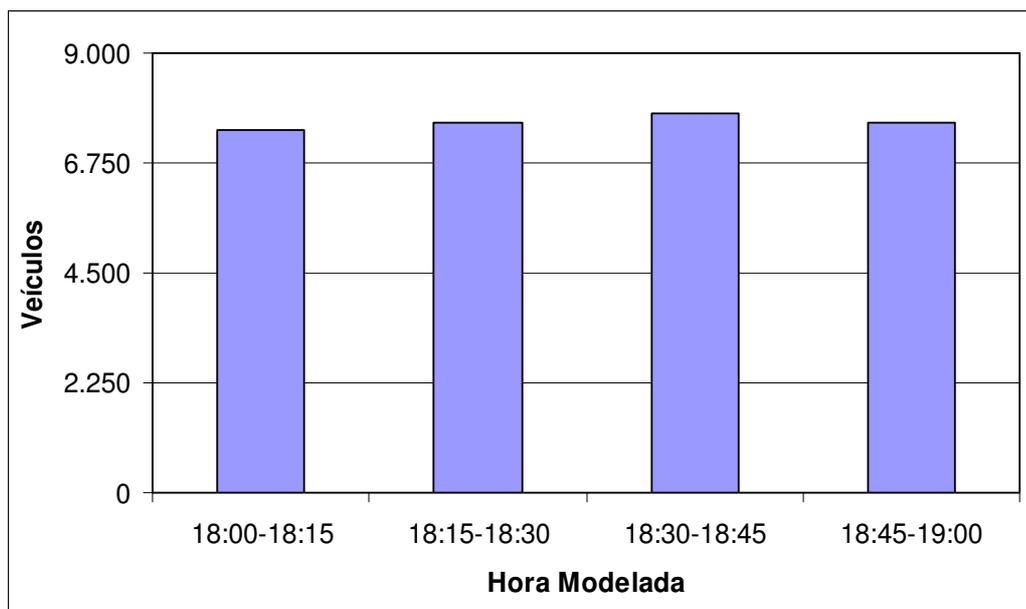
**Quadro 15:** Velocidades e tempos de viagem observados na rede modelada.

<b>Sentido Norte-Sul</b>					
Segmento		Tempo Cruzeiro (s)	Vel Cruzeiro (km/h)	Tempo Geral (s)	Vel Geral (km/h)
Segmento NS-1	Pq Moinhos de Vento - Mostardeiro	25,52	24,96	63,63	17,70
Segmento NS-2	Mostardeiro-Dona Laura	26,75	21,71	53,75	31,39
Segmento NS-3	Dona Laura - Castro Alves	37,86	24,86	49,25	17,97
Segmento NS-4	Castro Alves - Vasco da Gama	21,35	37,91	26,63	42,11
Segmento NS-5	Vasco da Gama - Helena Sperotto	50,69	23,80	73,50	7,92
Segmento NS-6	Helena Sperotto - Protásio Alves	16,87	51,18	19,25	31,56
<b>Total Norte-Sul</b>		<b>179,04</b>	<b>27,30</b>	<b>286,00</b>	<b>18,17</b>
<b>Sentido Sul-Norte</b>					
Segmento		Tempo Cruzeiro (s)	Vel Cruzeiro (km/h)	Tempo Geral (s)	Vel Geral (km/h)
Segmento NS-1	Protásio Alves - Helena Sperotto	22,70	38,68	28,13	32,68
Segmento NS-2	Helena Sperotto - Cabral	33,40	32,07	46,75	24,12
Segmento NS-3	Cabral - Castro Alves	23,87	42,01	28,13	35,15
Segmento NS-4	Castro Alves - Dona Laura	38,78	25,24	60,63	17,23
Segmento NS-5	Dona Laura - Mostardeiro	19,96	29,15	37,63	19,77
Segmento NS-6	Mostardeiro - Pq Moinhos de Vento	15,76	39,55	16,00	38,44
<b>Total Norte-Sul</b>		<b>154,45</b>	<b>31,45</b>	<b>217,25</b>	<b>22,39</b>

### 5.2.5 Demanda de tráfego

A demanda de tráfego foi obtida através de contagens volumétricas manuais com pesquisadores localizados em 17 pontos da área de estudo. As contagens foram realizadas no período das 18:00 às 19:00 horas e segregadas em períodos de 15 minutos, de modo a evidenciar a variabilidade da demanda ao longo da hora modelada.

A variação da demanda entre os intervalos de tempo em relação à média apresentou-se relativamente baixa, em torno de 1,7%. Com isso, para efeitos de modelagem, foi assumida uma taxa constante da demanda ao longo do período modelado. A Figura 24 ilustra a variabilidade da demanda na hora modelada.



**Figura 24:** Variabilidade da demanda ao longo do tempo de coleta de dados.

A determinação da composição do tráfego foi realizada a partir de filmagens feitas na área de estudo. O fluxo na rede modelada é composto por 95% de veículos leves, 4% de veículos médios (caminhões pequenos e lotações) e 1% de veículos pesados (ônibus e demais caminhões). As informações sobre o comprimento dos veículos foram obtidas em Araújo (2003) que realizou levantamento desta natureza em estudo realizado na mesma área. O Quadro 16 apresenta a composição da frota e a dimensão dos veículos na área de estudo. As informações referentes aos ônibus são codificadas em um registro independente.

**Quadro 16:** Composição da frota e dimensão dos veículos na área de estudo.

Categoria	Veículos Englobados	Comprimento(m)	Percentual	$E_v$
Veículos pequenos	Automóveis	4,5	95%	1
Veículos médios	Caminhonetes, Lotações e Caminhões Pequenos	8	4%	1,78
Veículos Grandes	Caminhões	12,5	1%	2,78

No modelo SATURN o fluxo de veículos é expresso em Unidade de Veículo Padrão (UVP). Ainda, na matriz origem-destino do modelo SATURN não são computadas viagens realizadas por ônibus responsáveis pela operação de linhas regulares de transporte público. Estas viagens são codificadas em um arquivo de registro independente. Para o modelo

SATURN a equivalência entre veículos é definida em função da diferença (divisão entre comprimento veículo passeio e veículo maior) entre as dimensões dos diferentes tipos de veículos e do seu afastamento médio. Neste estudo, o afastamento entre veículos é considerado igual para todas as classes de veículos, dessa forma o fator UVP será função apenas do comprimento dos veículos. A obtenção do fator de conversão de fluxo de veículos para fluxo em UVP é feita com o uso da equação 20, sendo neste estudo igual a 1,05.

$$UVP = 1 + P_{VM} \times (E_{VM} - 1) + P_{VG} \times (E_{VG} - 1) \quad (20)$$

Onde:

*UVP:* Fator de conversão fluxo veículo p/ fluxo em UVP;

*P<sub>VM</sub>:* Percentual de veículos médios;

*E<sub>VM</sub>:* Comprimento veículo médio;

*P<sub>VG</sub>:* Percentual de veículos grandes;

*E<sub>VG</sub>:* Comprimento veículo grande.

### 5.3 APRESENTAÇÃO DO MODELO SATURN

O SATURN - Simulation and Assignment of Traffic to Urban Road Networks – (Van Vliet e Hall, 2000) é um modelo de alocação e simulação de tráfego desenvolvido para a avaliação de esquemas alternativos de gerenciamento de tráfego em redes locais. Ele foi concebido originalmente no início da década de 80 e desde então vem sofrendo vários aperfeiçoamentos teóricos e computacionais.

O modelo SATURN é formado por dois módulos que podem funcionar combinados ou de maneira distinta. O módulo de alocação realiza a escolha de rotas e determina a demanda nos arcos da rede viária. O módulo de simulação de tráfego, que incorpora os mesmos princípios teóricos do TRANSYT, é responsável pela estimativa dos tempos de viagem na rede.

A estrutura de simulação de tráfego é baseada nas conversões das interseções. A função básica da simulação é estimar o atraso, as curvas atraso-fluxo e as capacidades viárias dependentes de fluxos. O modelo assume que os veículos trafegam com velocidade constante ao longo do arco, havendo formação de fila vertical na interseção de jusante. Os atrasos são avaliados nas filas, junto às interseções viárias, em reação ao controle de tráfego.

O SATURN faculta duas abordagens para avaliar a velocidade do arco: velocidade média de cruzeiro constante (independente do fluxo), ou velocidade definida a partir de relações fluxo-velocidade. Neste trabalho é adotada a velocidade de cruzeiro constante no arco, que de acordo com Araújo (2003) é mais apropriada para a modelagem de redes urbanas e pressupõe que a influência do fluxo nos atrasos ao longo dos arcos é desprezível frente à magnitude dos atrasos nas interseções.

#### 5.4 CALIBRAÇÃO DOS MODELOS DE TRÁFEGO

Para qualquer tipo de modelo é necessária a calibração de seus parâmetros. Modelos macroscópicos são relativamente fáceis de calibrar. Entretanto o processo de calibração para modelos microscópicos pode necessitar de muitos dados e consumir muito tempo.

A etapa de calibração consiste no ajuste dos parâmetros dos modelos de tráfego para que os resultados gerados sejam compatíveis com os observados em campo. Os indicadores de desempenho adotados neste estudo para a calibração dos simuladores de tráfego são o fluxo total da rede, o tempo de viagem no sentido Norte-Sul e o tempo de viagem no sentido Sul-Norte.

Os arcos de entrada da rede não são considerados neste estudo. Como visto no capítulo 4, a quantificação das emissões a partir de dados fornecidos pelo modelo DRACULA não deve levar em conta os resultados do arco de entrada, devido a grande quantidade de eventos de aceleração em função da entrada dos veículos na rede com velocidade zero. Com isso, apenas os resultados dos segmentos intermediários serão analisados (Segmentos 2 a 5 – ver Quadro 15) e utilizados para a calibração dos modelos de tráfego.

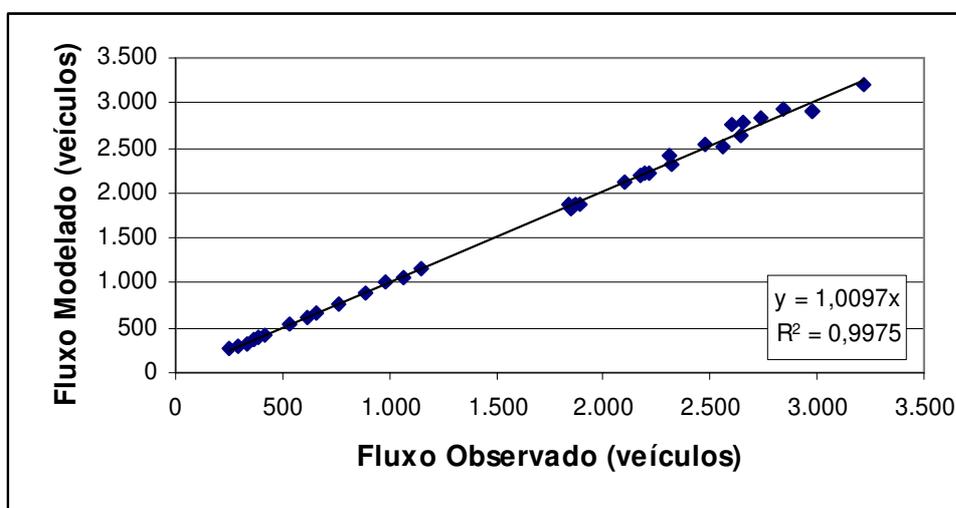
##### 5.4.1 Calibração Matriz Origem-Destino

A calibração da matriz origem-destino de viagens (matriz OD) foi realizada a partir do módulo de atualização de matrizes do SATURN ME2 (Matzoros *et al.*, 1987). O ME2 estima, a partir de uma matriz preliminar, a matriz mais provável associada a um conjunto de contagens volumétricas.

A matriz preliminar foi definida a partir das contagens volumétricas localizadas nos arcos de entrada e saída da rede. Os volumes de entrada na rede caracterizaram o total de viagens produzidas em cada ponto. Os volumes de saída, por sua vez, definiram o total de

viagens atraídas nestes pontos. A distribuição de viagens foi efetuada por fator uniforme. Assim, as viagens produzidas em cada ponto de geração de tráfego foram distribuídas aos demais, proporcionalmente ao potencial de atração de cada ponto. Para a calibração da matriz através do ME2 foi contemplado todo o conjunto de contagens volumétricas.

O Quadro 17 apresenta um comparativo dos fluxos observados em campo com os fluxos correspondentes estimados pelo SATURN, após a calibração definitiva da matriz de viagens. A Figura 25 compara, através da reta de ajuste, os fluxos estimados e os fluxos observados. O erro máximo ficou em 5,7%.



**Figura 25:** Fluxo modelado x fluxo simulado SATURN

**Quadro 17:** Fluxo observado x fluxo modelado SATURN.

Local da Contagem	No A	No B	Fluxo Contagem (Veic/h)	Fluxo SATURN (Veic/h)	Diferença %
Mariante N-S 1	7965	7953	3.223	3.203	-0,62%
Mariante S-N 1	7953	7965	2.975	2.914	-2,05%
Mariante N-S 2	7966	7965	2.606	2.759	5,87%
Helena Sperotto	7964	7965	617	617	0,00%
Cabral 1	8182	7966	390	390	0,00%
Mariante S-N 2	7965	8190	2.975	2.914	-2,05%
Mariante N-S 4	7963	7961	2.306	2.418	4,86%
Mariante S-N 3	8190	7968	2.562	2.508	-2,11%
Liberdade 2	8171	7968	365	362	-0,82%
Vasco da Gama 1	7963	8170	984	1.014	3,05%
Mariante S-N 4	7968	7963	1.065	1.050	-1,41%
Goethe N-S 2	7970	7963	2.654	2.797	5,39%
Goethe S-N 1	7968	7969	1.847	1.820	-1,46%
Mariante S-N 5	7963	8187	414	414	0,00%
Goethe N-S 3	8105	7970	2.840	2.933	3,27%
Goethe S-N 3	7974	8105	1.889	1.871	-0,95%
Goethe N-S 4A(SAT)	8189	8105	2.735	2.829	3,44%
Castro Alves 1	8154	8105	765	762	-0,39%
Castro Alves 2	8105	8186	658	658	0,00%
Goethe S-N 4	8105	8184	1.866	1.870	0,21%
Goethe N-S 4B	8184	8189	2.479	2.541	2,50%
Florencio Ygartua	8188	8189	289	288	-0,35%
Dona Laura 1	8184	8160	534	538	0,75%
Dona Laura 2	8179	8184	891	891	0,00%
Goethe N-S 5A	8130	8184	2.172	2.188	0,76%
Dona Laura 3	8159	8179	1.146	1.150	0,35%
Goethe S-N 5A	8184	8178	1.841	1.870	1,58%
Alça DL-G	8179	8178	255	259	1,57%
Goethe N-S 5B	8165	8130	1.857	1.856	-0,05%
Alça M-G	8164	8130	331	331	0,00%
Mostardeiro 1	8163	8164	2.647	2.648	0,04%
Goethe S-N 5B	8178	8165	2.099	2.130	1,48%
Goethe N-S 6	8185	8165	1.857	1.856	-0,05%
Mostardeiro 2	8164	8165	2.316	2.316	0,00%
Mostardeiro 3	8165	8161	2.199	2.227	1,27%
Goethe S-N 6	8165	8185	2.219	2.219	0,00%

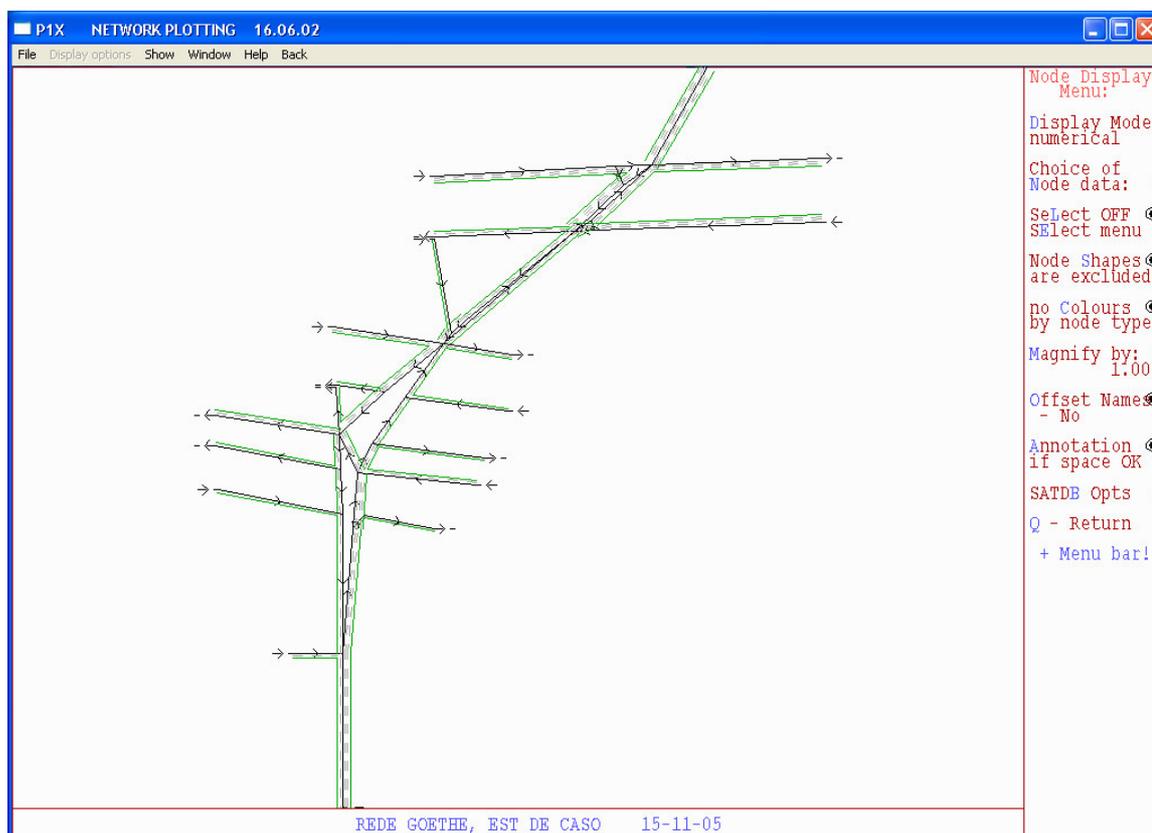
#### 5.4.2 Codificação e Calibração do Modelo SATURN

A codificação do modelo SATURN foi realizada a partir da definição dos seguintes parâmetros: (i) dados de descrição da rede (coordenadas, dos nós, dispositivos de controle do tráfego nas interseções); (ii) comprimentos dos arcos; (iii) definição das velocidades de cruzeiro; (iv) fluxos de saturação; e parâmetro de aceitação de brechas. Os valores iniciais para os fluxos de saturação e parâmetros de aceitação de brechas empregados foram definidos a partir do trabalho elaborado por Araújo (2003).

A calibração do modelo SATURN consistiu no ajuste dos valores do fluxo de saturação inicialmente configurados de acordo com os valores adotados por Araújo e Cybis (2002) e

modificação do valor *default* da variável representativa do parâmetro de aceitação de brechas. A matriz de viagens empregada no modelo SATURN é definida no item 5.4.1.

A Figura 26 ilustra o corredor Goethe/Mariante modelado através do SATURN. A imagem foi obtida no módulo gráfico do modelo.



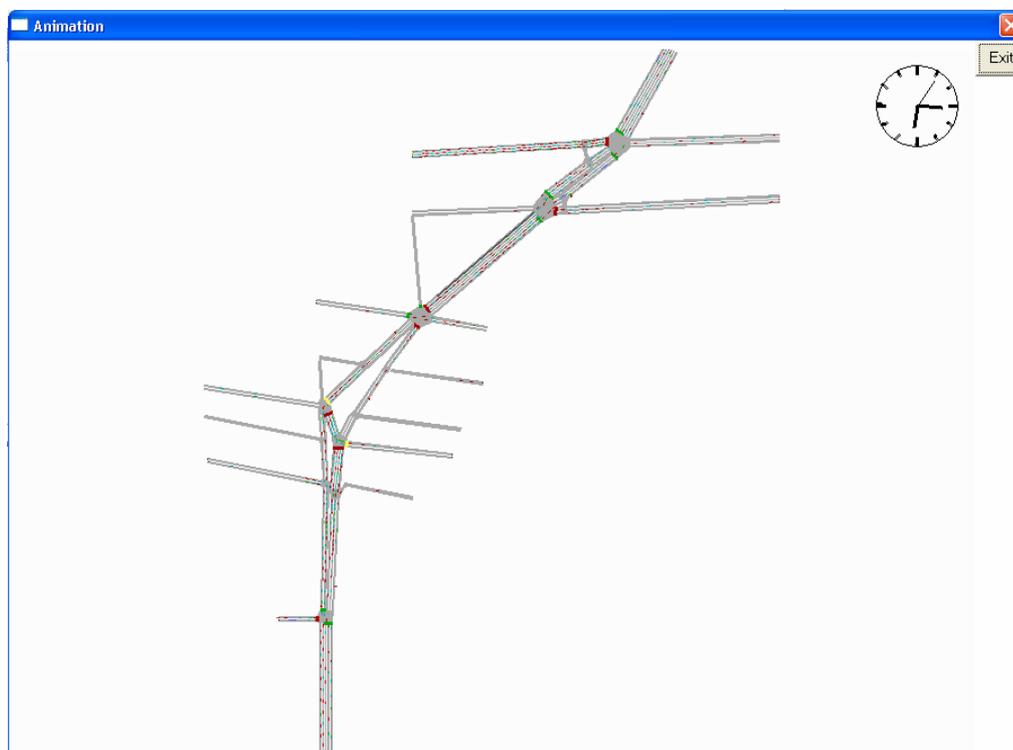
**Figura 26:** Representação da rede modelada através do modelo SATURN.

### 5.4.3 Codificação e Calibração Modelo DRACULA

A codificação do modelo DRACULA envolve a definição dos seguintes parâmetros: (i) dados de descrição da rede (coordenadas, dos nós, dispositivos de controle do tráfego nas interseções); (ii) quantificação da demanda através dos fluxos nas rotas; (iii) velocidades de fluxo livre; (iv) parâmetros comportamentais do modelo de progressão longitudinal; (v) parâmetros do modelo de troca de faixas; (vi) parâmetros do modelo de aceitação de brechas; e (vii) características dos veículos.

O modelo DRACULA é estocástico, sendo possível definir o valor médio e a variabilidade para cada um dos conjuntos de dados de entradas citados acima. Os dados referentes à configuração da rede e à demanda foram importados do modelo SATURN.

Maiores detalhes da associação entre estes dois modelos podem ser obtidos em Araújo (2003). A velocidade de fluxo livre para os arcos da rede foi definida em 60 km/h. A Figura 27 ilustra o corredor Goethe/Mariante modelado através do DRACULA.



**Figura 27:** Área de estudo representada no módulo gráfico do DRACULA

Os parâmetros comportamentais do modelo DRACULA foram calibrados com o uso do método de calibração multivariada de modelos de simulação de tráfego, adaptado de um método de otimização industrial (Araújo *et al.*, 2004; Caten, 1995). O método desdobra-se em cinco etapas principais: (i) planejamento dos experimentos; (ii) execução dos experimentos; (iii) modelagem individual dos indicadores de desempenho; (iv) definição da função objetivo; e (v) otimização dos múltiplos indicadores de desempenho.

Na etapa do planejamento do experimento, são escolhidos os parâmetros de entrada e os indicadores de desempenho que serão objeto de avaliação. Na definição dos indicadores devem ser especificados suas importâncias relativas, seus valores alvo e as tolerâncias ao erro na função de perda. A lista dos indicadores e desempenho é apresentada no Quadro 18.

**Quadro 18:** Descrição dos indicadores de desempenho

Indicador de Desempenho	Nome	Alvo (Tj)	Tolerância (erro)	Importância Relativa (IRj)
Y1	Fluxo na Rede	11.013 veículos	± 5%	3,33
Y2	Tempo de Viagem S-N	179 segundos	± 10%	3,33
Y3	Tempo de Viagem N-S	203 segundos	± 10%	3,33

Os indicadores de desempenho adotados no estudo foram: fluxo na rede e tempos de viagem (ou velocidade média) nos dois sentidos de circulação, sendo os trechos de entrada excluídos. Esses parâmetros foram escolhidos por serem largamente empregados para caracterizar os níveis de demanda, e principalmente para caracterizar o tráfego.

Os parâmetros de entrada a serem calibrados foram escolhidos com base em Araújo *et al* (2004). O conjunto de parâmetros escolhidos possui forte influência com os indicadores de desempenho selecionados. Para cada parâmetro de entrada selecionado foi definido o intervalo de investigação. O Quadro 19 apresenta os parâmetros de entrada selecionados.

**Quadro 19:** Descrição dos parâmetros de entrada investigados

Parâmetro de Entrada	Nome	Intervalo de Investigação
X1	Fator de troca de faixa	1 a 2
X2	Fator de aceleração	0,5 a 1,5
X3	Fator de afastamento	1,0 a 2,5 m
X4	Fator de Risco	0,5 a 1,5
X5	Fator de Velocidade	0,5 a 1,5

O “fator troca de faixa” (X1) atua no estímulo para troca de faixas: define o acréscimo mínimo na velocidade do veículo necessário para efetuar a ultrapassagem de veículos mais lentos. O “fator de aceleração” (X2) é um multiplicador sobre os valores default de aceleração e desaceleração normais dos veículos. O “fator de afastamento” (X3) representa a distância mínima entre veículos em repouso. O “fator de risco” (X4) representa a agressividade dos

veículos no modelo de aceitação de brechas. O “fator de velocidade” (X5) define a velocidade desejada dos veículos em relação à velocidade de fluxo livre dos arcos. Para os demais parâmetros de entrada assume-se o seu valor *default*.

Uma vez definidos os indicadores de desempenho e os parâmetros de entrada, parte-se para a definição do conjunto de experimentos que será realizado. Os cenários são formados por combinações dos níveis dos parâmetros de entrada, gerados a partir de um projeto de experimentos. Neste trabalho foi utilizado o projeto composto de segunda ordem (PCSO) (Montgomery, 2000).

A etapa de execução de experimentos envolve o desenvolvimento dos ensaios na simulação. Na matriz de experimentos foram projetados 27 cenários. Em consequência da variabilidade aleatória no DRACULA, o conjunto de cenários foi replicado 10 vezes, onde cada conjunto foi associado a uma semente estocástica particular. Assim, a rede avaliada foi simulada 270 vezes, com diferentes combinações dos parâmetros de entrada.

A partir do resultado do experimento é realizada a modelagem individual dos indicadores de desempenho em função dos parâmetros de entrada. A partir da modelagem é possível identificar quais parâmetros de entrada que exercem influência significativa sobre cada indicador de desempenho.

Neste estudo, o modelo utilizado tenta captar os efeitos lineares, efeitos quadráticos e as interações de dois parâmetros de entrada sobre os indicadores de desempenho. As regressões múltiplas foram geradas a partir da utilização do *software* estatístico SPSS. Os modelos finais de cada indicador de desempenho consideram exclusivamente os termos que apresentam efeito significativo. Os modelos obtidos para cada indicador de desempenho, junto com o seu coeficiente de correlação ajustado ( $R_{\text{ajustado}}$ ) são apresentados nas equações a seguir.

$$Y1 = 10016 + 1114,03 \cdot X2 - 206,969 \cdot X3 + 633,83 \cdot X5 + 189,75 \cdot X1^2 - 723,03 \cdot X2^2 + \quad (21)$$

$$+ 262,03 \cdot X3^2 + 283,32 \cdot X4^2 - 665,61 \cdot X5^2 + 242,06 \cdot X2 \cdot X5 + 102,78 \cdot X3 \cdot X5$$

$$R_{\text{ajustado}}^2 = 0,824$$

$$Y2 = 156,27 + 11,09 \cdot X1 - 47,78 \cdot X2 - 42,31 \cdot X5 + 10,16 \cdot X1^2 - 723,03 \cdot X2^2 + \quad (22)$$

$$+ 13,97 \cdot X2^2 + 40 \cdot X5^2 - 6,86 \cdot X1 \cdot X2 - 21,22 \cdot X2 \cdot X5$$

$$R_{\text{ajustado}}^2 = 0,737$$

$$Y3 = 155,35 + 9,8 \cdot X1 - 73,44 \cdot X2 - 48,3 \cdot X5 + 54,49 \cdot X2^2 - 10,63 \cdot X3^2 - 15,19 \cdot X4^2 + 47,54 \cdot X5^2 + 8,26 \cdot X1 \cdot X5 - 37,81 \cdot X2 \cdot X5 \quad (23)$$

$$R^2_{\text{ajustado}} = 0,799$$

As regressões foram desenvolvidas com os níveis codificados dos parâmetros de entrada (entre -1 e +1). Com isso, as diferenças de escala entre os parâmetros são eliminadas de forma que a magnitude dos coeficientes seja diretamente comparável. A partir da análise dos modelos verifica-se que os parâmetros “fator de velocidade” e “fator de aceleração” estão presentes em todos os modelos. Além disso, os impactos desses parâmetros nos indicadores de desempenho são superiores aos impactos dos demais parâmetros de entrada.

Após a modelagem individual dos indicadores de desempenho, a próxima etapa consiste na calibração propriamente dita. É importante que a calibração propicie um ajuste dos parâmetros de entrada, que conduza ao valor ideal todos os indicadores de desempenho de forma simultânea. Assim é necessário realizar uma otimização global dos indicadores. Essa otimização global implica em compromissos entre os indicadores de desempenho, ou seja, uma solução conciliatória que pondere as importâncias relativas de cada indicador sobre a realidade da rede modelada. A otimização global foi realizada através da função objetivo denominada Função de Perda Quadrática Multivariada, apresentada na equação 24.

$$\hat{Z}(i) = \sum_{j=i}^J w_j (\hat{Y}_j - T_j)^2 \quad (24)$$

Onde:

$\hat{Z}$ : é a função objetivo a ser minimizada;

$w_j$ : são pesos que levam em conta a unidade e a importância relativa ( $IR_j$ ) de cada indicador de desempenho  $j$  e as respectivas tolerâncias ao erro. Onde  $w_j = IR / (\text{tolerância})^2$

$T_j$ : é o valor ideal para o indicador de desempenho  $j$ ;

$\hat{Y}_j$ : é a estimativa média do indicador de desempenho  $j$ .

O Quadro 20 ilustra a solução ótima dos parâmetros de entrada que minimiza a função e perda multivariada  $Z$ . A avaliação da consistência do conjunto de parâmetros de entrada é avaliada no próximo item.

**Quadro 20:** Solução ótima dos parâmetros de entrada

Parâmetros de Entrada					Indicadores de Desempenho			Função de Perda			
X1	X2	X3	X4	X5	Y1	Y2	Y3	Z1	Z2	Z3	Z
1,2	1,2	2	1,5	0,7	9.959	183,7	170,6	1,8	0,0	1,3	1,0

#### 5.4.4 Certificação das Calibrações

A certificação da solução envolve a comparação entre os indicadores de desempenho simulados a partir dos parâmetros de entrada ajustados, e os valores alvo. Ainda são comparados os resultados do modelo DRACULA e SATURN calibrados. Os valores dos indicadores de desempenho estimados pelo DRACULA correspondem à média de dez rodadas com sementes estocásticas distintas. O Quadro 21 apresenta os valores dos indicadores de desempenho simulados através do SATURN e DRACULA comparados aos indicadores de desempenho observados em campo.

**Quadro 21:** Certificação da solução ótima

FONTE		Fluxo	Tempo de Viagem S-N	Tempo de Viagem N-S
<b>Observado em Campo</b>		11.013	173	203
<b>DRACULA</b>	Média	10.079	181,79	187,58
	Desvio	81,74	23,38	11,93
	C.V.	0,01	0,13	0,06
<b>SATURN</b>		11.007	170	200

#### 5.5 METODOLOGIAS EMPREGADAS

O uso de modelos de emissão baseados na velocidade média associados com modelos macroscópicos de tráfego não se constitui na ferramenta mais adequada para avaliar medidas de melhoria de fluxo de tráfego. A solução para este problema é a adoção de modelos microscópicos para a estimativa dos níveis de emissões. Porém, modelos microscópicos requerem grandes esforços de calibração, o que pode tornar o seu uso proibitivo. Uma

alternativa é o uso de modelos que empreguem outras variáveis para descrever o tráfego além da velocidade média.

Neste trabalho serão comparados os resultados de quatro abordagens distintas (duas macroscópicas, uma mesoscópica e uma microscópica) na avaliação do impacto de uma medida de melhoria de fluxo de tráfego no nível de emissões veiculares. As emissões veiculares avaliadas foram o CO, os NO<sub>x</sub> e os HC. Os modelos de emissão em todas as abordagens foram calibrados a partir do modelo CMEM. As emissões foram quantificadas tendo como base uma única categoria de veículo leve e com todos os veículos da rede operando em condições estabilizadas no que diz respeito a temperatura de operação dos veículos. As emissões dos veículos pesados não foram contabilizadas.

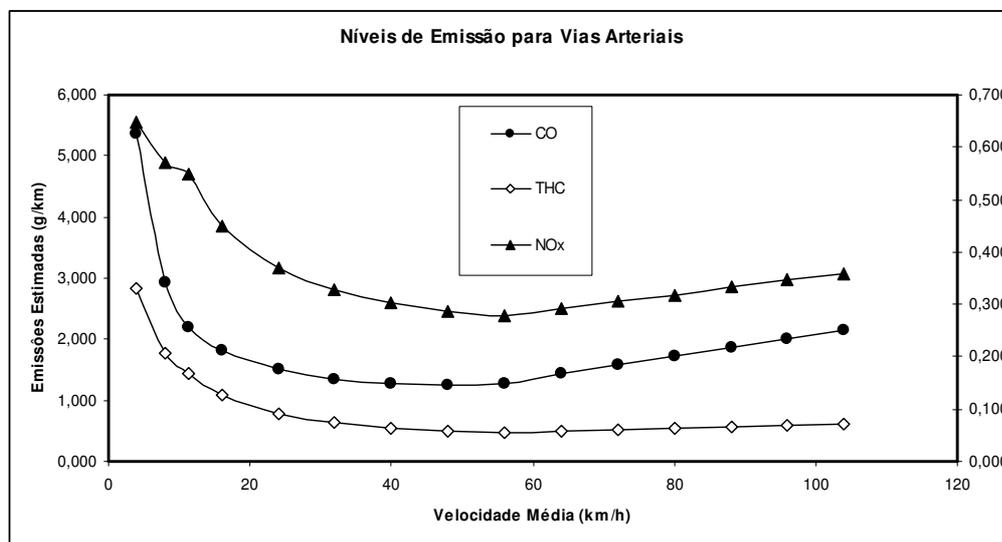
A descrição das diferentes abordagens e os passos necessários para a modelagem das emissões é exposta a seguir.

### **5.5.1 Abordagem Macroscópica Agregada**

A abordagem microscópica consiste na quantificação das emissões tendo como base a velocidade média de todo o trecho modelado, em ambos os sentidos (N-S e S-N) com exceção dos segmentos de entrada, a distância total percorrida pelos veículos e a quantidade de veículos. Esta metodologia é a mais usualmente utilizada, aplicada aos inventários de emissões em áreas extensas devido à facilidade codificação e calibração dos modelos. A modelagem das emissões é composta por três etapas. Na primeira, foram coletados os dados de campo (fluxos, comprimento do trecho e velocidades). Na segunda etapa foram construídas as curvas dos fatores de emissão empregando a metodologia dos fatores de correção de velocidade (EPA, 2001) aos resultados do teste de um veículo em um dinamômetro de chassi (ciclo FTP) simulado pelo modelo CMEM.

A quantificação das emissões foi executada com a aplicação da equação 25. Na equação  $FE_{vm}$  representa o fator de emissão (g/km) para determinada velocidade média. Estes valores são retirados dos gráficos da Figura 28. O  $KMVV_{total}$  é a distância total viajada pelos veículos (km) resultado do produto do fluxo de veículos e distância dos arcos.  $E_T$  é a quantidade emitida do poluente  $T$  (CO, NO<sub>x</sub> e HC) durante o período de estudo.

$$E_T = FE_{vm} \times KMVV_{total} \quad (25)$$



**Figura 28: Curvas de emissão geradas pela aplicação dos fatores de correção de velocidade**

### 5.5.2 Abordagem Macroscópica Desagregada

A segunda metodologia é semelhante à primeira, porém as emissões são calculadas com base nas velocidades médias dos segmentos que compõem o trecho. O trecho de estudo é composto por quatro segmentos. Eles são compreendidos entre duas interseções semaforizadas. Em comparação com a primeira metodologia esta representa uma desagregação espacial da velocidade média, identificando melhor as particularidades da rede. A modelagem das emissões é semelhante ao procedimento descrito no item anterior, porém com o uso da equação 26. Na equação  $FE_{v_{mi}}$  representa o fator de emissão (g/km) para determinada velocidade média no arco  $i$  e  $KMVV_i$  é a distância total viajada pelos veículos (km) no arco  $i$ .

$$E_T = \sum_{ar\ cos} FE_{v_{mi}} \times KMVV_i \quad (26)$$

### 5.5.3 Abordagem Mesoscópica

A modelagem das emissões na abordagem mesoscópica é baseada na integração dos parâmetros estimados pelo modelo SATURN e com o modelo de emissões CMEM. As emissões são calculadas a partir das estimativas de velocidades e número de paradas

fornecidas pelo modelo SATURN. Com isso, a abordagem para o cálculo das emissões deixa de ser estática, uma vez que o fluxo de tráfego passa a ser representado de forma mesoscópica. Isto enquadra esta metodologia em uma posição intermediária entre a abordagem macroscópica (baseada na velocidade média) e a microscópica (velocidades segundo a segundo). A grande vantagem desta metodologia é uma representação mais apurada do tráfego em comparação com a abordagem tradicional o que, a princípio, implica em uma precisão maior na estimativa das emissões. Outro ponto positivo é a menor demanda computacional se comparada com abordagens microscópicas.

O modelo SATURN (Van Vliet e Hall, 2000) contém um modelo para a estimação e exibição de 5 padrões de poluentes: monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrocarbonetos, óxidos de nitrogênio e chumbo. O modelo é linear com variáveis explicativas de tempo, distância, parada primária e parada secundária. O cálculo das emissões por arco é feito de acordo com a equação 27. Ela é função do volume de veículos, número de paradas primárias e secundárias, tempo em cruzeiro e tempo parado. Os coeficientes da equação (a, b, c, d) foram calibrados com base na metodologia usada por Jacondino e Cybis (2002) com o uso do modelo de emissão CMEM.

$$E^i = (a_1^i d + a_2^i t_c + a_3^i t_q + a_4^i s_1 + a_5^i s_2) V \quad (27)$$

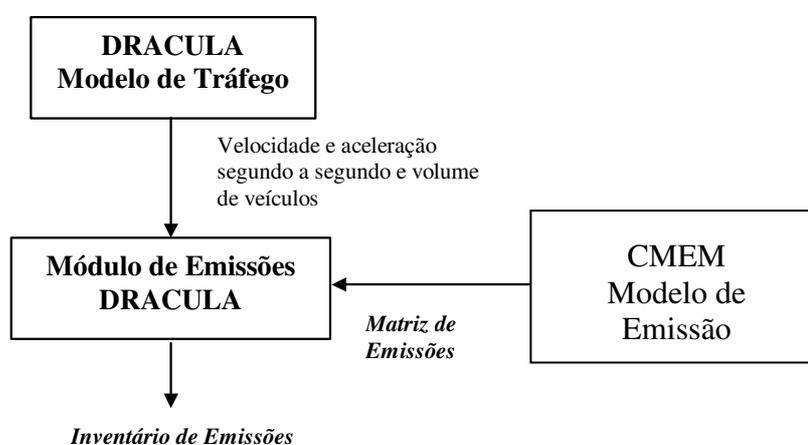
Onde

- E<sub>i</sub>*: quantidade do poluente *i* emitido / período modelado;  
*d*: é a distância do arco (apenas para a estimativa de CO<sub>2</sub>);  
*t<sub>c</sub>*: é o tempo médio de viagem em cruzeiro no arco / período modelado;  
*t<sub>q</sub>*: é o tempo gasto em espera em filas nas interseções / período modelado;  
*s<sub>1</sub>*: é o número de paradas primárias por veículo / período modelado;  
*s<sub>2</sub>*: é o número de paradas secundárias por veículo / período modelado;  
*a<sub>1i</sub>, a<sub>2i</sub>, a<sub>3i</sub>, a<sub>4i</sub>, a<sub>5i</sub>*,: são fatores de emissão calibrados pelo usuário;  
*V*: é o fluxo de veículos / período modelado;

#### 5.5.4 Abordagem Microscópica

Esta abordagem corresponde ao cálculo das emissões em um nível microscópico. Os veículos são representados individualmente e as suas velocidades e acelerações são calculadas

segundo a segundo. As emissões também são calculadas por segundo e ao final do período de estudo, o total de emissões em um segmento corresponde ao somatório de todos os eventos. A figura 29 ilustra a metodologia aplicada para o cálculo das emissões neste caso. O DRACULA possui um módulo de emissões do tipo mapa de emissão que pode ser calibrado. Matrizes de emissão foram geradas pelo modelo CMEM para a calibração do módulo de emissão do DRACULA. Detalhes sobre este procedimento podem ser obtidos no item 4.7. Uma vez tendo o seu módulo de emissão calibrado, o inventário de emissões é produzido pelo próprio DRACULA.



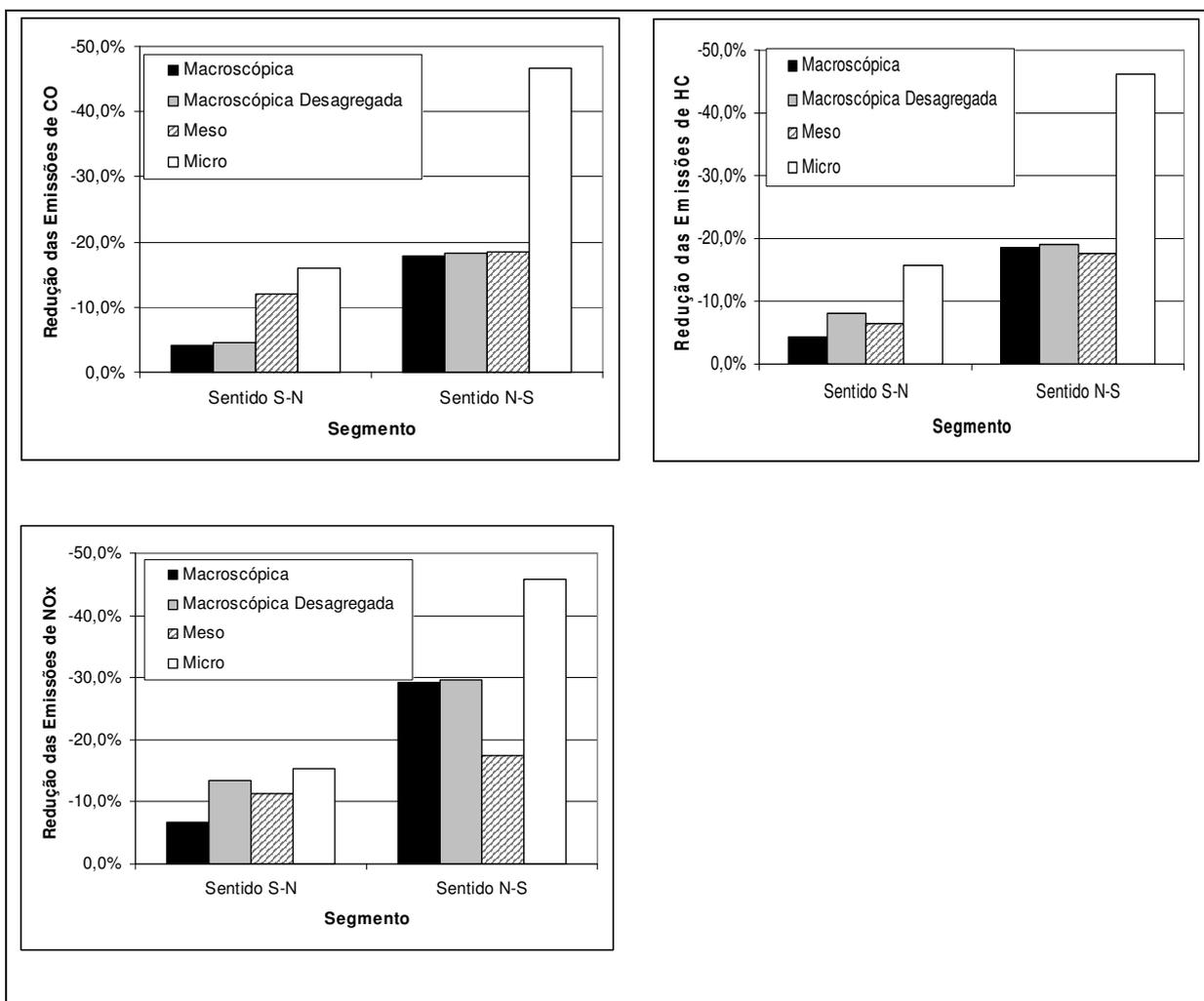
**Figura 29:** Esquema para cálculo das emissões com utilização da abordagem microscópica.

## 5.6 RESULTADOS E ANÁLISES

A figura 30 apresenta a comparação dos resultados, em termos da variação da quantificação das emissões entre o cenário base e o cenário com a implantação da medida de melhoria de fluxo de tráfego, para as quatro abordagens avaliadas. A ampliação da capacidade foi implantada em 4 trechos do sentido Sul-Norte e 4 trechos no sentido Norte-Sul.

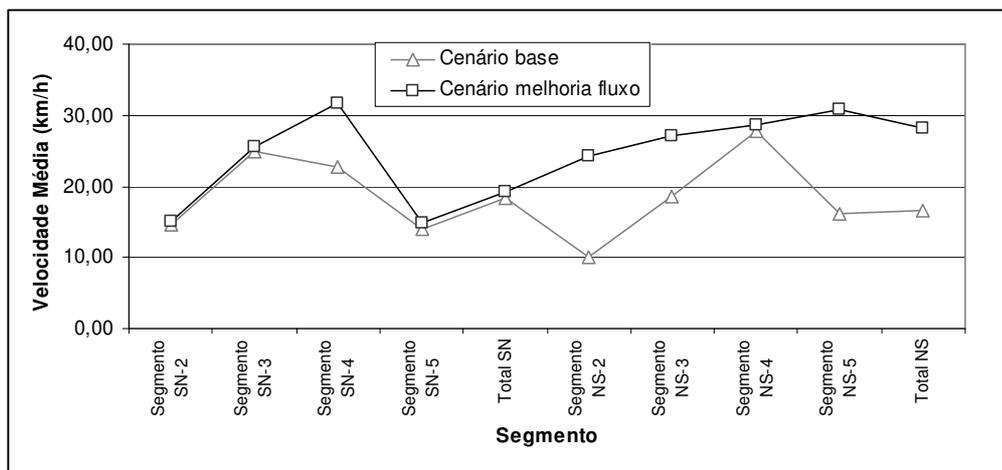
Para todas as metodologias verifica-se uma redução no nível das emissões para todos os poluentes. Entretanto a redução das emissões é superior quando quantificada através da abordagem microscópica. A diferença é mais acentuada para as emissões de CO e HC, no sentido de deslocamento Norte-Sul. Isto ocorre devido a dois fatores: (i) as emissões de CO e HC são fortemente relacionadas a eventos de aceleração, fenômeno melhor modelado na abordagem microscópica; (ii) é no sentido Norte-Sul onde ocorrem as maiores variações de velocidade em relação ao cenário base, por consequência alterações nos eventos de aceleração.

A desagregação espacial da rede para quantificação das emissões através da abordagem macroscópica não apresentou resultados satisfatórios. Em todos os casos a diferença entre os resultados foi insignificante. Isto ocorre devido á pequena variação das velocidades tanto para toda a rede, como para os segmentos isolados.

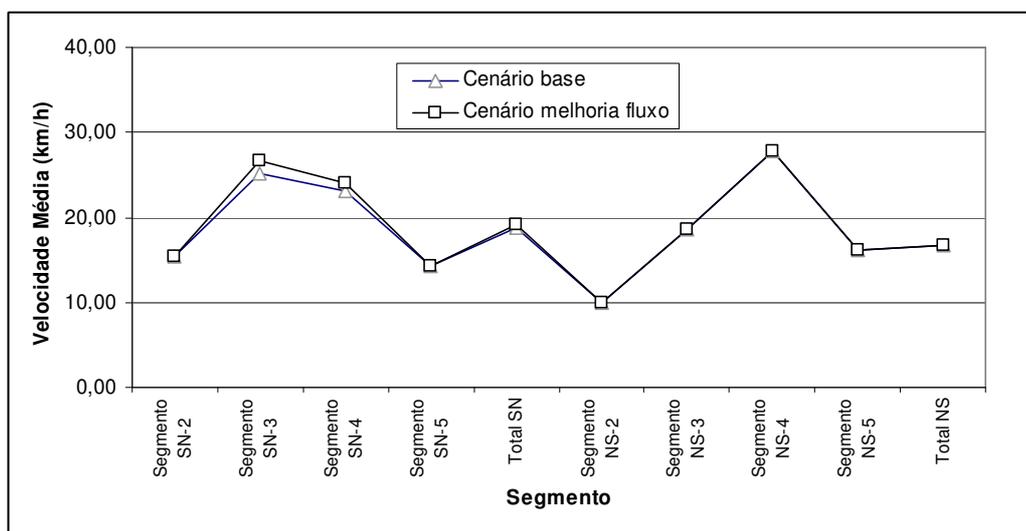


**Figura 30:** Variação das emissões veiculares devido à ampliação da capacidade com o uso de diversas abordagens

As figuras 31 e 32 apresentam as velocidades médias por segmento modeladas pelo SATURN e DRACULA para os dois cenários simulados: (i) cenário base; (ii) cenário com implantação da medida de melhoria do fluxo de tráfego. Pela figura é possível observar a pequena variação entre as velocidades médias modeladas pelo modelo SATURN. Isto explica porque a abordagem mesoscópica foi aquela que apresentou as menores variações nas estimativas de emissões.

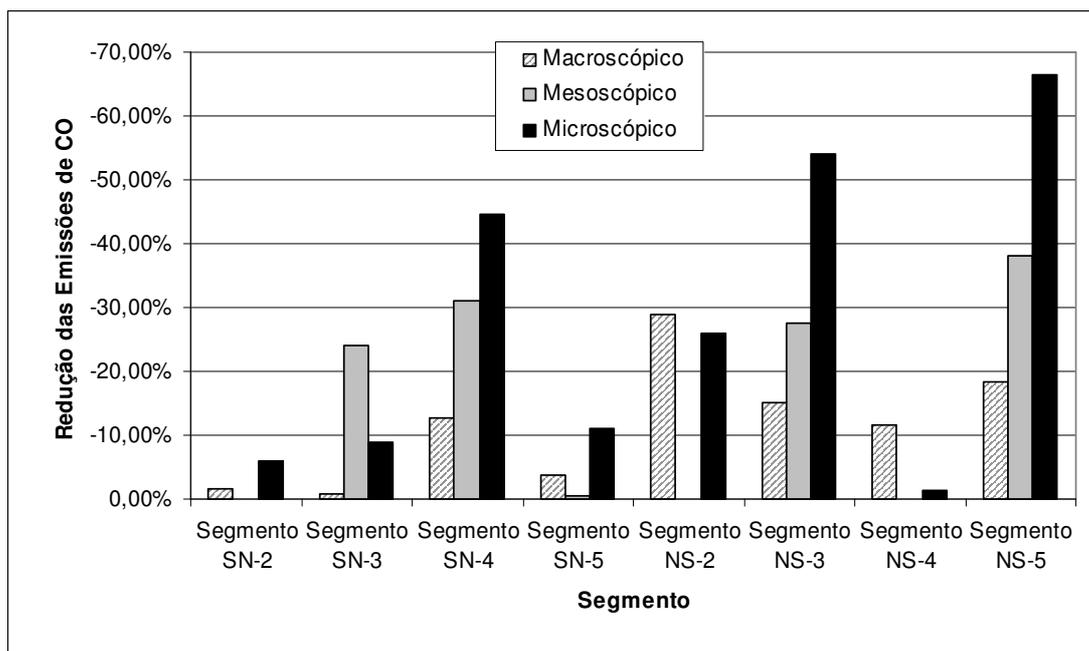


**Figura 31:** Variação das velocidades médias entre os cenários simulados no modelo DRACULA.



**Figura 32:** Variação das velocidades médias entre os cenários simulados no modelo SATURN.

Na rede modelada não havia arcos com super saturação, isto é, com formação crescente de filas. No modelo SATURN, variações significativas nas velocidades médias em função de aumento de capacidade somente serão percebidas em arcos onde há saturação. Nestes casos há apenas uma diferença marginal, como nos casos dos segmentos SN-3 e SN-4. Ainda, no modelo SATURN em arcos não saturados e não controlados por semáforos é nula a variação no tempo de viagem dos veículos em função de ampliação da capacidade, como no caso dos arcos intermediários de cada segmento. Em função disso, a variação na total de emissões geradas estimadas pelo modelo SATURN (abordagem mesoscópica) é muito inferior à abordagem microscópica.



**Figura 33:** Variação das emissões de CO devido à ampliação da capacidade com o uso de diversas abordagens desagregadas por segmento.

A figura 33 mostra a variação na estimativa das emissões de CO a partir do emprego de três abordagens (a abordagem macroscópica não é utilizada, pois o resultado é desagregado). Nos segmentos onde houve ampliação da capacidade: SN-4, NS-3 e NS-5 a estimativa da variação das emissões na abordagem microscópica foi superior às estimativas realizadas pelas outras abordagens. A única exceção foi o segmento SN-3, onde na abordagem microscópica a variação na estimativa foi inferior à mesoscópica.

Nos segmentos onde não houve nenhum tipo de melhoria no fluxo de tráfego a variação nas emissões estimada pela abordagem mesoscópica foi nula, enquanto que nas outras abordagens, mesmos nestes segmentos, é verificada uma redução na geração das emissões. Isto porque no modelo SATURN, se não há nenhuma alteração na capacidade do arco, não há variação nos tempos de viagem estimados.

## 5.7 CONCLUSÕES

O presente capítulo desenvolveu um estudo de caso, onde foi avaliado o impacto de uma medida de melhoria do fluxo de tráfego na geração das emissões veiculares.

Para desenvolver o estudo de caso foram executadas todas as etapas tradicionais para a aplicação de modelos SATURN e DRACULA: concepção, levantamento de dados, calibração de modelos, validação ou verificação do ajuste e análise de resultados.

Foram empregadas quatro metodologias distintas para a quantificação das emissões veiculares: (i) macroscópica; (ii) macroscópica desagregada espacialmente (ambas com o conceito do fator de correção de velocidade); (iii) mesoscópica, com o uso do modelo SATURN; e (iv) microscópica com o uso do modelo DRACULA. Para todas as abordagens empregou-se a base de dados gerada pelo modelo CMEM.

Os modelos DRACULA e SATURN obtiveram resultados satisfatórios no que diz respeito a sua calibração. Por modelar os eventos de aceleração, a metodologia microscópica apresentou maior diferença entre os cenários do que as demais metodologias utilizadas para estimar as emissões.

## 6 CONCLUSÃO

---

Este trabalho analisou os resultados de modelos de emissões veiculares através do uso de simuladores de tráfego. Para atingir este objetivo foi avaliado o impacto da variação de três aspectos intrínsecos aos modelos de simulação na quantificação das emissões veiculares: (i) os parâmetros de entrada utilizados para calibração; (ii) a lógica dos modelos de progressão longitudinal; e (iii) o modelo de emissão incorporado ao simulador. Além disso, um estudo de caso foi conduzido, onde foi avaliado o impacto de uma melhoria de fluxo de tráfego na geração das emissões com o uso de simuladores de tráfego frente às abordagens tradicionais.

A formação das emissões veiculares está intimamente relacionada ao modo de operação dos veículos, especialmente à ocorrência de eventos de aceleração. A quantificação das emissões é realizada através do uso conjunto de simuladores de tráfego e modelos de emissões. A quantificação das emissões veiculares é importante para a avaliação da eficácia das políticas de transporte que visem redução dessas emissões. Erros nesta avaliação podem levar à adoção de políticas ineficientes.

Para avaliar a influência da variação dos parâmetros de calibração de modelos microscópicos de tráfego na quantificação das emissões veiculares, foi empregado o modelo de tráfego DRACULA. A rede utilizada para os testes possui uma configuração simples, o que possibilitou o isolamento dos fatores intervenientes e a explicação das diferenças encontradas. O cálculo das emissões foi realizado com o auxílio do modelo CMEM. O conjunto de parâmetros investigado caracteriza-se pela capacidade de influenciar na progressão longitudinal dos veículos.

Para avaliar a influência da variação dos parâmetros de calibração na estimativa das emissões foram constituídos dois conjuntos de simulação. O primeiro conjunto avaliou apenas o efeito da alteração dos parâmetros relacionados aos eventos de aceleração e desaceleração. No segundo conjunto foram testados os efeitos de três parâmetros: (i) a aceleração; (ii) o espaçamento; e (iii) o fator de reação ao controle semafórico. De acordo com os resultados, a definição da aceleração normal possui forte influência na quantificação das emissões de CO e HC. A influência dos demais parâmetros avaliados não foi significativa. Isto evidencia a importância de coletar valores realísticos de taxas de aceleração em campo. Em regra, este parâmetro é calibrado de forma empírica, em função da sua difícil apropriação em campo.

Além disso, o trabalho demonstrou a influência da velocidade inicial dos veículos gerados na rede, na quantificação das emissões veiculares. No modelo DRACULA os veículos são gerados com velocidade inicial igual à zero. A partir de então, os veículos atingem a sua velocidade desejada empregando a sua velocidade normal. Sendo o nível de emissões fortemente relacionado ao nível de aceleração, principalmente quando o veículo encontra-se em repouso, quanto mais elevado for a aceleração normal configurada no modelo, maior será a influência das emissões estimadas para o arco de entrada na quantificação total das emissões.

A inclusão das estimativas de emissões referentes aos arcos de entrada da rede no resultado global pode distorcer a análise dos resultados, principalmente em redes com poucos arcos. Desta forma, é aconselhada a exclusão dos resultados relativos aos arcos de entrada na rede, quando da quantificação das emissões veiculares através de modelos de tráfego nos quais a velocidade inicial dos veículos gerados seja igual a zero.

Para a verificação da diferença entre a lógica dos modelos de progressão longitudinal dos modelos de tráfego na quantificação das emissões foi realizada a comparação entre as estimativas de emissão a partir de resultados gerados pelos simuladores DRACULA e INTEGRATION. As estimativas de emissão foram realizadas através do modelo CMEM. O modelo DRACULA adota um modelo de aceleração constante, isto é, independente da velocidade empreendida pelo veículo, estando em fluxo livre a taxa de aceleração empregada é única. Já o INTEGRATION, emprega um modelo de aceleração baseado na dinâmica do veículo.

A distinção entre os modelos de *car-following* e aceleração presente nos dois modelos foi responsável por variações entre as estimativas de HC, CO e NO<sub>x</sub> de respectivamente 38%, 177%, 20% . Um fator preponderante na diferenças dos resultados foi a definição do limite entre o regime de fluxo livre e o regime de *car-following*. Oscilações na velocidade, em função do regime de *car-following*, foram responsáveis por grandes eventos de emissões.

O trabalho avaliou a diferença provocada na estimativa das emissões veiculares pela modelagem da aceleração através do uso de diferentes modelos de aceleração. Para isto, quatro perfis de velocidade obtidos a partir do uso de modelos de aceleração distintos: (i) constante; (ii) regime duplo; (iii) linear decrescente; e (iv) dinâmico e 5 perfis reais de velocidade, coletados em campo com o veículo em regime de fluxo livre, foram inseridos no

modelo CMEM para o cálculo das emissões. Na comparação entre as estimativas de emissão a partir de dados gerados por diferentes modelos de aceleração e dados reais coletados em campo, apenas o modelo de aceleração dinâmico e o modelo de aceleração com regime duplo foram capazes de reproduzir perfis de emissão próximos aos verificados com dados de campo.

A avaliação da influência da variação do tipo de modelo de emissão na estimativa das emissões veiculares foi realizada através da comparação dos resultados obtidos por 3 abordagens distintas de modelos dinâmicos: (i) o modelo físico; (ii) modelo baseado em tabela; e (iii) modelo baseado em tabela simplificada (uma variante do modelo anterior). A utilização de matrizes na quantificação das emissões se mostrou eficaz em uma rede pequena, ainda que seja um método simplificado se comparado ao modelo físico CMEM.

O estudo de caso realizado avaliou o impacto de uma medida de ampliação de capacidade viária utilizando diferentes abordagens para a estimativa das emissões, relacionando o grau de dificuldade na calibração de modelos de simulação de tráfego e a diferença de resultados entre as diferentes abordagens.

O cenário modelado é consiste no corredor formado pelas avenidas Goethe e Mariante, trecho entre a avenida Protásio Alves e o Parque Moinhos de Vento, na cidade de Porto Alegre. O trecho estudado possui gargalos, uma vez que o número de faixas de tráfego em toda a sua extensão não é constante. A medida de fluxo de tráfego avaliada compreende a eliminação destes gargalos existentes, uniformizando o número de faixas ao longo do trecho modelado.

O desenvolvimento do estudo de caso abrangeu a execução de todas as etapas tradicionais na aplicação dos modelos de tráfego: concepção, levantamento de dados, calibração de modelos, validação ou verificação do ajuste e análise de resultados. Neste estudo foram utilizados os modelos DRACULA e SATURN.

As emissões veiculares foram quantificadas com o emprego de quatro metodologias com diferentes abordagens em relação ao nível de agregação das variáveis do tráfego: (i) a partir da velocidade média do trecho analisado - macroscópica; (ii) a partir da velocidade média dos segmentos que compõem o trecho analisado - macroscópica desagregada espacialmente; (ambas com o conceito do fator de correção de velocidade) (iii) a partir do tempo médio de viagem e número de parada por segmento - mesoscópica, com o uso do modelo SATURN; e (iv) a partir da velocidade instantânea dos veículos ao longo de seu

percurso no trecho analisado - microscópica com o uso do modelo DRACULA. Para todas as abordagens empregou-se a base de dados gerada pelo modelo CMEM.

Os modelos DRACULA e SATURN obtiveram resultados satisfatórios no que diz respeito a sua calibração. O estudo de caso demonstrou a vantagem do uso de micro-simuladores na quantificação das emissões de projetos de melhorias de fluxo de tráfego frente aos métodos tradicionais, ainda que pese a maior dificuldade na calibração de modelos microscópicos. O método mesoscópico se mostrou de fácil calibração. Entretanto a variação no nível de atividade do tráfego foi imperceptível.

## 6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para a realização de trabalhos futuros recomenda-se as seguintes sugestões:

A realização de um estudo de caso para quantificação das emissões onde sejam coletados dados microscópicos da rede tais como distribuição das velocidades e principalmente perfis de aceleração.

Coleta de dados de campo sobre o comportamento de veículos em regime de *car-following* para avaliar a confiabilidade destes modelos na representação dos perfis de velocidade e conseqüentemente para a estimativa de emissões.

Realização de estudo de caso, semelhante ao conduzido no capítulo 5, envolvendo a análise comparativa entre as estimativas de emissões realizadas com o modelo baseado em tabelas e o modelo físico CMEM. O objetivo é avaliar se a magnitude da diferença observada entre os resultados destas abordagens, compensa o grande esforço computacional necessário para o uso de modelos físicos para estimativas de emissões em redes extensas.

Realização de medições das emissões de veículos nacionais em condições reais de operação, para formação de base de dados que possibilite o desenvolvimento de modelo de emissões para veículos fabricados no Brasil.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

- AHN, K. **Microscopic fuel consumption and emission modeling**. 1998. 131f. Thesis (Master of Science in Civil and Environmental Engineering) – Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, EUA.
- AHN, K. **Modeling light vehicle emissions based on instantaneous speed and acceleration levels**. 2002. 177f. Dissertation (Doctor of Philosophy in Civil and Environmental Engineering) – Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, EUA.
- AKCELIK, R; BIGGS, D.C. Acceleration profile models for vehicles in road traffic. **Transportation Science**, v. 21, n. 1, p. 36-54, 1987.
- ALGERS, S., E. BERNAUER, M. BOERO, L. BREHERET, C. DI TARANTO, M. DOUGHERTY, K. FOX AND J.F. GABARD **Review of micro-simulation models**. Report of the SMARTEST project - deliverable 3, 1997.
- ANDRE, M.; HICKMAN, A.J.; HASSEL, D.; JOUMARD, R. Driving cycles for emission measurements under european conditions, **SAE Technical Papers Series**, n. 950926, p. 193-205, 1995.
- ANDRE, M.; HAMMARSTRÖM, U. Driving speeds in Europe for pollutant emission estimation. **Transportation Research Part D**, v. 5, p. 321-335, 2000.
- ARAÚJO, D.R.C.; CYBIS, H.B.B. Aplicação do simulador de tráfego DRACULA em Porto Alegre: análise comparativa com o SATURN. In: XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2002. Natal. **Panorama Nacional de Pesquisa em Transportes**, v. 1, p. 341-352, Rio de Janeiro: ANPET, 2002.
- ARAÚJO, D.R.C. **Comparação das simulações de tráfego dos modelos SATURN e DRACULA**. 2003. 123f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- ARAÚJO, D.R.C.; JACONDINO, G.B; CATEN, C.S.; CYBIS, H.B.B. Método de calibração de modelos de micro-simulação de tráfego através da otimização multivariada. **Transportes**, v. 2, n. 1, p. 5-12, 2004.
- BARTH, M.; NA, F.; YOUNGLOVE, T.; SCORA, G.; LEVINE, C.; ROSS, M.; WENZEL, T. **Development of a comprehensive modal emission model: final report NCHRP Project 25-11**. Washington D.C.: Transportation Research Board, National Research Council, 2000.
- BARTH, M.; NA, F.; YOUNGLOVE, T.; SCORA, G.; LEVINE, C.; ROSS, M.; WENZEL, T. **Comprehensive modal emission model (CMEM) version 2.02: user's guide**, 2001.
- BHAM, G.H.; BENEKOHAL, R.F. Development, evaluation and comparison of acceleration models. In: 81<sup>st</sup> ANNUAL MEETING OF THE TRANSPORTATION RESEARCH

- BOARD, 2002. Washington. **Proceedings of the...**, Washington, National Research Council, 2002. CD-ROM
- BOUTLER, P.G.; LATHAM, S.; AINGE, M. Driving cycles for measuring passenger cars emissions on roads with traffic calming measures. **The Science of Total Environment**, v. 235, p. 77-89, 1999.
- BRANCO, S.M.; MURGEL, E. **Poluição do ar**. São Paulo: Editora Moderna, 1995.
- CAMBRIDGE SYSTEMATICS **Quantifying air-quality and other benefits and costs of transportation control measures: NCHRP 462**. Washington D.C.: Transportation Research Board, National Research Council, 2001.
- CAPIELLO, A. **Modeling traffic flow emissions**. 2002. 157f. Thesis (Master of Science in Transportation) – Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, EUA.
- CATEN, C.S. **Método de otimização de produtos e processos medidos por múltiplas características de qualidade**. 1995. 154f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- CHIQUETTO, S. the environmental impacts from the implementation of a pedestrianization scheme. **Transportation Research Part D**, v2, p. 33-146, 1997.
- CÍCERO-FERNANDÉZ, P.; LONG, J.R.; WINER, A.M. Effects of grades and other loads on on-road emissions of hydrocarbons and carbon monoxide. **Journal of the Air and Waste Management Association**, v. 47, p. 898-404, 1997.
- CROWTHER, B.C. **A comparison of CORSIM and INTEGRATION for the modelling of stationary bottlenecks**. 2001. 132f. Thesis (Master of Science in Civil and Environmental Engineering) – Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, EUA.
- DE NEVERS, N. **Air pollution control engineering**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2000.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA) **Automobile emissions: an overview**. EPA 400-F-92-007. 1994. Disponível em <<http://www.epa.gov/otaq/consumer/05-autos.pdf>>. Acesso em: 7 jul 2001.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA) **Transportation control measures: traffic flow improvements** EPA 420-S-98-012. 1998. Disponível em <<http://www.epa.gov/otaq/>>. Acesso em: 19 out 2003.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA) **Final facility specific speed correction factors** EPA420-R-01-060. 2001. Disponível em <<http://www.epa.gov/otaq/>>. Acesso em: 19 out 2003.
- ERICSSON, E. Variability in urban driving patterns. **Transportation Research Part D**, v. 5, p. 337-354, 2000.

- EUROPEAN COMMISSION. **European Union energy and transport in figures: statistical pocketbook**. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2002.
- FAIZ, A.; C.S. WEAVER E M.P. WALSH **Air pollution from motor vehicles: standards and technologies for controlling emissions**. Washington, D.C: .The World Bank, 1997.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA) **Travel time data collection handbook**. 1998. Disponível em: <<http://www.fhwa.dot.gov/ohim/timedata.htm>>. Acesso em: 5 mar 2002.
- FOMUNUNG, I.; WASHINGTON, S.; GUENSLER, R. A statistical model for estimating oxides of nitrogen emissions from light duty motor vehicles. **Transportation Research Part D**, v5, p. 333-352, 1999.
- FOMUNUNG, I.; WASHINGTON, S.; GUENSLER, R.; BACHMAN, W. Validation of the MEASURE automobile emissions model: statistical analysis. **Journal of Transportation and Statistics**, v. 3, n. 2, p. 65-84, 2000.
- GROSSO, S; WRIGHT,S.; BELL, M.G.H. Using VISSIM to evaluate the environmental impact of traffic calming. **Traffic engineering and control**. v. 43, n. 5, p. 238-243, 2002.
- HALLMARK, S.L.; GUENSLER, R. Comparison of speed-acceleration profiles from field data with NETSIM output for modal air quality analysis of signalized intersections. **Transportation Research Record**, n. 1664, p. 40-46, 1999.
- HALLMARK, S.L.; GUENSLER, R.; FOMUNUNG, I. Characterizing on-road variables that affect passenger vehicle modal operation. **Transportation Research Part D**, v. 7, p. 81-98, 2002.
- HEYWOOD, J.B. **Internal combustion engine fundamentals**. New York: McGraw-Hill, 1988.
- HOOGENDOORN,S.P.; BOVY,P.H.L State of the art of vehicular traffic flow modeling. Special issue on road traffic modeling control of the Journal of Systems and Control Engineering, v. 215, n. 4, 2001.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE (IBAMA) **PROCONVE: programa de controle da poluição do ar por veículos automotores**. Coleção Meio-ambiente. 2.ed. Brasília, 1998.
- JACONDINO, G.B.; CYBIS, H.B.B. Avaliação de modelos de emissão em simuladores de tráfego. In: XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2002. Natal. **Panorama Nacional de Pesquisa em Transportes**, v. 1, p. 211-222, Rio de Janeiro: ANPET, 2002.
- JENSEN, S.S. Driving patterns and emissions from different types of roads. **The Science of Total Environment**, v. 169, p. 123-128, 1995.
- JOST, P.; HASSEL, D.; SONNBORN, K.S. A new method to determine exhaust emission

factors for heavy duty vehicles. **The Science of Total Environment**, v. 169, p. 213-217, 1995.

JOUMARD, R.; LAMURE, C.; JAQUES, L.; TRIPIANA, F. Air quality and urban space management. **The Science of the Total Environment**, v. 189/190, p. 57-67, 1996.

JOUMARD, R.; JOST, P.; HICKMAN, J. Influence of instantaneous speed and acceleration on hot passenger car emissions and fuel consumption. **SAE Technical Papers Series**, n. 950928, p.207-214, 1995.

JOUMARD, R.; ANDRÉ, M.; VIDON, R.; TASSEL, P.; PRUVIST, C. Influence of driving cycles on unit emissions from passengers cars. **Atmospheric Environment**, v. 34, p. 4621-4628, 2000.

KELLY, N.A.; GROBLICKI, P.J. Real-world emissions from a modern production vehicle driven in Los Angeles. **Journal of the Air and Waste Management Association**, v. 43, p. 1351-1357, 1993.

LABORATÓRIO INTERDISCIPLINAR DE MEIO AMBIENTE (LIMA) **Avaliação do programa de inspeção e manutenção de veículos em uso no Rio de Janeiro**. 2001. Disponível em <<http://www.lima.coppe.ufrj.br>> Acesso em 31 out 2002.

LEBLANC, D.C.; SAUNDERS, F.M.; MEYER, M.D.; GUENSLER, R. Driving pattern variability and impacts on vehicle carbon monoxide emissions. **Transportation Research Record**, n. 1472, p. 45-52, 1995.

LIN, J.; NIEMEIER, D.A. Regional driving characteristics, regional driving cycles. **Transportation Research Part D**, v. 8, p. 361-381, 2003.

LIU, R. **DRACULA traffic simulation model: a user guide**. Institute for Transportation Studies, University of Leeds, 2002.

LIU, T.G.G. **Modeling and experimental studies of network traffic emissions using a microscopic simulation approach**. 2003. 193f. Thesis (Master of Science in Transportation) – Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, EUA.

MATZOROS, T; VAN VLIET, D.; RANDLE, J.; WESTON, B. A validation of the SATURN and ME2 models using before-after survey data from Manchester. **Traffic Engineering and Control**, v. 34, n. 1, p. 20-27, 1987.

MAY, A. **Traffic flow fundamentals**. New Jersey: Prentice Hall, 1990.

MCSHANE, R.P.; McSHANE, W.R. **Traffic engineering**. 2a ed. New Jersey: Prentice Hall, 1990.

MEHTA, T; KOTTAPALLI, A; MAHMASSANI, H.S.; BHAT, C. **Assessing the environmental benefits of intelligent transportation systems: methodologies and applications**. CTR/University of Texas at Austin. 2003. Disponível em <[http://www.utexas.edu/research/ctr/pdf\\_reports/index.html](http://www.utexas.edu/research/ctr/pdf_reports/index.html)> Acesso em 01 jan 2005.

- MONTGOMERY, D.C. **Design and analysis of experiments**. 5. ed., EUA: John Wiley and Sons, 2000.
- MOREY, J.E.; LIMANOND, T.; NIEMEIER, D.A. Validity of chase car data used in developing emission cycles. **Journal of Transportation and Statistics**, v. 3, n. 2, p. 15-28, 2000.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC) **Modeling mobile-source emissions**. Washington D.C.: National Research Council, 2000.
- NOLAND, R.B.; LEM, L.L. A Review of the evidence for induced travel and changes in transportation policy in the US and the UK. **Transportation Research Part D**, v. 7, p. 1-26, 2002.
- ORTUZAR, J.D.; WILLUMSEN, L.G. **Modelling transport**. 2a ed. New York: John Willey, 1994. 439p.
- PAPACOSTAS, C.S.; PREVEDOUROS, P.D. **Transportation engineering and planning**. 3.ed. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 2001.
- PIERSON, W.R.; GERTLER, A.W.; ROBINSON, N.F.; SAGEBIEL, J.C.; ZIELINSKA, B.; BISHOP, G.A.; STEDMAN, D.H.; ZWEIDINGER, R.B.; RAY, W.D. Real-world automotive emissions-summary of studies in the Fort McHenry and Tuscarora mountain tunnels. **Atmospheric Environment**, v. 30, n. 12, p. 2233-2256, 1996.
- PORTAL DO BIODISEL. **Crédito de carbono**: mecanismo de desenvolvimento limpo. 2005. Disponível em < <http://www.biodieselecooleo.com.br/credito-de-carbono/index.htm>>. Acesso em: 5 dez 2005.
- RAKHA, H; LUCIC, I.; DEMARCHI, S.; SETTI, J.; VAN AERDE, M. Vehicle dynamics model for predicting maximum truck acceleration levels. **Journal of Transportation Engineering**, v. 27, n. 5, p. 418-425, 2001a.
- RAKHA, H; MEDINA, A; SIN, H; DION, F; VAN AERDE, M. Coordination of traffic signals across jurisdictional boundaries: field and modeling results. In: 80<sup>th</sup> ANNUAL MEETING OF THE TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2000. Washington. **Proceedings of the...**, Washington, National Research Council, 2001b. CD-ROM.
- RAKHA, H.; DING, Y. Impact of stops on vehicle fuel consumption and emissions. **Journal of Transportation Engineering**, v. 129, n. 1, p. 23-32, 2003.
- RIBEIRO, S.K.; COSTA, C.V.; DAVID, E.G.; REAL, M.V.; D'AGOSTO, M.A. **Transporte e mudanças climáticas**. Rio de Janeiro: MAUAD, 2000.
- RIBEIRO, S.K. **Transporte sustentável**: alternativas para ônibus urbanos. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2001.
- ROBERTSON, D; WILSON, N; KEMP, S. The effects of co-ordinated and isolated signal control on journey times and exhaust emissions along the A12 in London. **Traffic Engineering and Control**, v. 37, n. 1, p. 1-9, 1996.

- ROUPHAIL, N.M.; FREY, J.D.; COLYAR, A.; UNAL, A. Vehicle emissions and traffic measures: exploratory analysis of field observations at signalized arterials. In: 79<sup>th</sup> ANNUAL MEETING OF THE TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2000. Washington. **Proceedings of the...**, Washington, National Research Council, 2000. CD-ROM.
- SCHULZ, D.; YOUNGLOVE, T.; BARTH, M. Statistical analysis and model validation of automobile emissions. **Journal of Transportation Statistics**, v. 3, n. 2, p. 29-38, 2000.
- SNARE, M.C. **Dynamics model for predicting maximum and typical acceleration rates of passenger vehicles**. 2002. 124f. Thesis (Master of Science in Civil and Environmental Engineering) – Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, EUA.
- STURM, P.J.; PUCHER, K.; SUDY, C.; ALMBAUER, R.A. Determination of traffic emissions – intercomparison of different calculation methods. **The Science of Total Environment**, v.189/190, p. 187-196, 1996.
- STURM, P.J.; BOULTER, P.; HANN, P.; JOUMARD. **Instantaneous emission data and their use in estimating passenger car emission**: report of the MEET project - deliverable 6, 1997.
- TENG, H.; YU, L.; QI, Y. Statistical microscale emission models incorporating acceleration and deceleration. In: 81<sup>rd</sup> ANNUAL MEETING OF THE TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2002. Washington. **Proceedings of the...**, Washington, National Research Council, 2002. CD-ROM
- TONGBIN, Q.; RILETT, L.R.; ZIETSMAN, J. Estimating the impact of freeway speed limits on automobile emissions. In: 82<sup>rd</sup> ANNUAL MEETING OF THE TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 2003. Washington. **Proceedings of the...**, Washington, National Research Council, 2003. CD-ROM.
- TRANSPORT RESEARCH LABORATORY (TRL). **Methodology for calculating transportation emission and energy consumption**: deliverable 22 for the MEET Project. Report no SE/491/98, 1999. Disponível em <<http://www.inrets.fr/infos/cost319>>. Acesso em: 10 ago 2001.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (TRB) **Expanding metropolitan highways**: implications for air quality and energy use. Special report 245. Washington D.C.: Transportation Research Board, National Research Council, 1995.
- VAN AERDE M AND ASSOCIATES. **INTEGRATION release 2.30 for Windows user's guide – vol I and II**: fundamental modal features and advanced model features. Ontario: Kingston, 2004.
- VAN VLIET, D., HALL, M. **SATURN 10.1 user manual**. Leeds: Institute for Transport Studies, University of Leeds, 2000.
- VÁRHELYI, A. The effects of small roundabouts on emission and fuel consumption: a case study. **Transportation Research Part D**, v. 7, p. 65-71, 2002.
- VASCONCELLOS, E.A. **Transporte urbano nos países em desenvolvimento**. 3. ed., São

Paulo: Annablume, 2000.

- VILANOVA, L.C. **Contribuição das emissões veiculares na qualidade do ar atmosférico da região metropolitana de Porto Alegre** 1998. 147f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- VLIEGER, I.; KEUKELEERE, D.; KRETZCHMAR, J. Environmental effects of driving behaviour and congestion related to passenger cars. **Atmospheric Environment**, v. 34, p. 4649-4655, 2000.
- WENZEL, T.; ROSS, M. Emissions from modern passenger cars with malfunctioning emission controls. . **SAE Technical Papers Series**, n. 960067, 1996.
- WALSH, M.P. Motor vehicle emission control measures. In: SCHEWLER, D.; ZALI, O. **Urban traffic pollution**. EUA: Taylor & Francis, 1998.
- WENZEL, T.; SINGER, B.C.; SLOTT, R. Some issues in the statistical analysis of vehicle emissions. **Journal of Transportations Statistics**, v. 3, n. 2, p. 1-14, 2000.
- WEST, B.; MCGILL, R.; HODGSON, J.; SLUDER, S.; SMITH, D. Development of data-based light-duty modal emission and fuel consumption models, **SAE Technical Papers Series**, n. 972910, 1997.
- WILLIAMS, M.D.; THAYER, G.; SMITH, L. **A comparison of emissions estimated in the Transims approach with those estimated from continuous speeds and accelerations**. Los Alamos National Laboratory, LA-UR-98-3162, 1998. Disponível em: <<http://lib-www.lanl.gov/la-pubs/00412971.pdf>>. Acesso em: 9 set 2003.
- WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD) **Mobility 2001: world mobility at the end of the twentieth century and its sustainability**. EUA, 2001. Disponível em <[www.wbcds.org](http://www.wbcds.org)>. Acesso em: 22 jul 2003.
- YU, L. Remote vehicle exhaust emission sensing for traffic simulation and optimization models. **Transportation Research Part D**, v. 3, p. 337-347, 1998.
- ZANETTI, P. **Air pollution modeling: theories, computational methods and available software**. WIT Press, 1990.