

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**MÉTODO PARA APRIMORAR A ESTIMATIVA DE EMISSÕES VEICULARES
EM ÁREAS URBANAS ATRAVÉS DE MODELAGEM HÍBRIDA EM REDES**

Paula Ariotti

Porto Alegre

2010

Paula Ariotti

**MÉTODO PARA APRIMORAR A ESTIMATIVA DE EMISSÕES VEICULARES
EM ÁREAS URBANAS ATRAVÉS DE MODELAGEM HÍBRIDA EM REDES**

Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia, área de concentração: Sistemas de Transporte.

Orientadora: Prof^a Helena Beatriz Bettella Cybis, Ph.D.

Porto Alegre

2010

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

Professora Helena Beatriz Bettella Cybis, Ph.D.
Orientadora

Professora Carla Schwengber ten Caten, Dr.
Coordenadora PPGEP/UFRGS

Banca Examinadora:

Professor Orlando Strambi, Dr.
Escola Politécnica / USP

Professor Luis Antonio Lindau, Ph.D.
PPGEP / UFRGS

Professor Luiz Carlos Pinto da Silva Filho, Ph.D.
PPGEC / UFRGS

Porto Alegre

2010

*Dedico este trabalho a minha mãe Inês,
por seu exemplo de coragem e superação
e por nunca ter medido esforços
para que eu chegasse onde cheguei.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, acima de tudo e de todos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudos concedida, imprescindível para a realização do curso de doutorado.

À orientadora Helena Beatriz Bettella Cybis, pelos anos de trabalho e aprendizado.

Aos professores Orlando Strambi, Luis Lindau e Luiz Carlos da Silva Filho pelas valiosas contribuições dadas a este trabalho.

A todos os funcionários, alunos, pesquisadores e professores do DEPROT e PPGEF, por terem contribuído para minha formação em transportes.

À UFRGS, que subsidiou a infraestrutura científica e tecnológica para o desenvolvimento desta pesquisa.

A todos os amigos que apoiaram e incentivaram a busca por meus objetivos.

À grande amiga Mara, pela compreensão, apoio e paciência.

À minha família, mãe, mano, Daia, Dala, Jorge, Magda, Mauro, Dé e Lalá, vocês são minha grande certeza.

Especialmente, ao meu marido, André, por todo incentivo, carinho, compreensão, paciência e amor, e à minha princesa, Layse, por compreender minhas ausências e pelo amor e apoio constantes. Amo muito vocês!

Obrigada!

RESUMO

Este estudo tem por objetivo propor um método para aprimorar a estimativa de emissões veiculares em áreas urbanas através da utilização de modelagem híbrida de tráfego associada a modelos de previsão de emissões. A modelagem híbrida agrega as vantagens individuais das abordagens agregada e desagregada de tráfego, uma vez que combina a micro-simulação de tráfego em áreas específicas com a simulação agregada em uma área de estudo mais abrangente. O método proposto neste trabalho foi consolidado a partir do desenvolvimento de um estudo de caso que consistiu na modelagem de uma rede viária com características distintas de infraestrutura e operação viárias. Os resultados do estudo de caso permitiram a identificação de trechos da rede viária nos quais as estimativas de emissões provenientes de modelos agregados foram significativamente diferentes das estimativas derivadas de modelos microscópicos, demonstrando a importância de uma abordagem híbrida. A utilização do método proposto pode embasar a elaboração e implementação de políticas de transportes que busquem reduzir a ocorrência de eventos responsáveis pela geração de elevados níveis de emissões.

Palavras-chave: modelagem híbrida, estimativa de emissões, modelos de tráfego, modelos de emissões

ABSTRACT

This study aims to propose a method to improve the vehicle emissions estimation in urban area. The method associates hybrid traffic flow models with emission models. Hybrid traffic modeling combines the specific advantages of aggregate and disaggregated approaches, since they integrate traffic microsimulation in specific areas with aggregated simulation in a wide area. The development of the proposed method was based on a case study consisting in the modeling a road network with different operations and infrastructure characteristics. Case study results indicated that emission estimates obtained from aggregated models were significantly different from emission estimates derived from microscopic models on some road segments, emphasizing the importance of a hybrid approach adopted in the method proposed in this work. The proposed method can be used to guide the development and implementation of transportation policies that aim to reduce the number of traffic events responsible for high levels of emissions.

Key Words: hybrid modeling, estimation of emissions, traffic models, emission models

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA.....	20
1.2	OBJETIVOS.....	23
1.2.1	<i>Objetivo geral.....</i>	23
1.2.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	23
1.3	DELINEAMENTO DA PESQUISA	24
1.4	DELIMITAÇÃO DO ESTUDO	26
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	26
2	PROCESSO DE FORMAÇÃO DE EMISSÕES VEICULARES	28
2.1	PRINCIPAIS FONTES DE EMISSÕES.....	28
2.2	COMPOSTOS EMITIDOS POR VEÍCULOS AUTOMOTORES.....	30
2.3	FATORES DETERMINANTES DO NÍVEL DE EMISSÕES VEICULARES	32
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	34
3	ESTIMATIVA DE EMISSÕES VEICULARES ATRAVÉS DE MODELAGEM.....	36
3.1	MODELOS DE TRÁFEGO	36
3.1.1	<i>Modelos de Tráfego Macroscópicos</i>	37
3.1.2	<i>Modelos de Tráfego Mesoscópicos.....</i>	39
3.1.3	<i>Modelos de Tráfego Microscópicos</i>	43
3.1.4	<i>Aplicabilidade e Limitações dos Modelos de Tráfego</i>	49
3.2	MODELOS DE EMISSÕES	51
3.2.1	<i>Modelos de Emissões Estáticos.....</i>	52
3.2.2	<i>Modelos de Emissões Dinâmicos</i>	55
3.3	RELAÇÕES ENTRE AS ABORDAGENS DE MODELAGEM	62
3.4	MODELAGEM HÍBRIDA DE TRÁFEGO	63
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
4	MÉTODO PROPOSTO.....	67
4.1	APRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA DO MÉTODO	67
4.1.1	<i>Definição da área de estudo</i>	68
4.1.2	<i>Definição das ferramentas de modelagem a serem usadas.....</i>	69

4.1.3	<i>Construção do modelo macroscópico/mesoscópico de tráfego</i>	69
4.1.4	<i>Análise dos resultados do desempenho agregado do tráfego</i>	70
4.1.5	<i>Definição de trechos de análise de emissões</i>	70
4.1.6	<i>Modelagem microscópica do tráfego</i>	72
4.1.7	<i>Estimativa de emissões através de modelos estáticos na área de estudo</i>	73
4.1.8	<i>Estimativa de emissões através de modelos dinâmicos nos trechos de análise</i>	73
4.1.9	<i>Compatibilização dos resultados das estimativas de emissões</i>	74
4.1.10	<i>Análise dos resultados</i>	74
4.2	CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
5	ESTUDO DE CASO	76
5.1	DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	76
5.2	DEFINIÇÃO DAS FERRAMENTAS DE MODELAGEM	77
5.3	CONSTRUÇÃO DO MODELO MESOSCÓPICO DE TRÁFEGO	78
5.3.1	<i>Representação da rede viária e demanda de viagens no SATURN</i>	78
5.3.2	<i>Calibração do modelo SATURN</i>	79
5.4	CONSTRUÇÃO DO MODELO MICROSCÓPICO DE TRÁFEGO	80
5.4.1	<i>Representação da rede viária e demanda de viagens no VISSIM</i>	80
5.4.2	<i>Definição dos Trechos de Análise de Emissões (TAEs)</i>	81
5.4.3	<i>Calibração do modelo VISSIM</i>	81
5.5	CUIDADOS ADOTADOS PARA A UTILIZAÇÃO DA MODELAGEM HÍBRIDA	82
5.6	ESTIMATIVA DE EMISSÕES ATRAVÉS DE MODELOS ESTÁTICOS	83
5.6.1	<i>Processo de cálculo do modelo MOBILE</i>	83
5.6.2	<i>Representação do tráfego e condições ambientais no MOBILE</i>	84
5.7	ESTIMATIVA DE EMISSÕES ATRAVÉS DE MODELOS DINÂMICOS	84
5.7.1	<i>Processo de cálculo do modelo IVE</i>	85
5.7.2	<i>Representação do tráfego e condições ambientais no IVE</i>	85
5.8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
6	ANÁLISE DOS RESULTADOS	87
6.1	ANÁLISE DA MODELAGEM DE TRÁFEGO	87
6.1.1	<i>Parâmetros gerais da rede modelada no SATURN</i>	87
6.1.2	<i>Análise dos TAEs modelados no SATURN</i>	88
6.1.3	<i>Análise dos TAEs modelados no VISSIM</i>	90
6.1.4	<i>Comparação de resultados do SATURN e VISSIM</i>	95

6.2	ANÁLISE DA ESTIMATIVA DE EMISSÕES.....	98
6.2.1	<i>Estimativa de emissões com modelo estático MOBILE.....</i>	<i>98</i>
6.2.2	<i>Estimativa de emissões com modelo dinâmico IVE</i>	<i>107</i>
6.3	COMPARAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DE EMISSÕES.....	113
6.3.1	<i>Comparação dos TAEs com baixo nível de carregamento viário</i>	<i>115</i>
6.3.2	<i>Comparação dos TAEs com nível médio de carregamento viário.....</i>	<i>120</i>
6.3.3	<i>Comparação dos TAEs com alto nível de carregamento viário.....</i>	<i>123</i>
6.4	ESTIMATIVA TOTAL DE EMISSÕES NA ÁREA DE ESTUDO	127
6.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	129
7	CONCLUSÃO	130
7.1	RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	133
	REFERÊNCIAS.....	135
	APÊNDICE A: ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DO MODELO MOBILE	149
	APÊNDICE B: ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DO MODELO IVE	159
	APÊNDICE C: CARACTERÍSTICAS DOS TRECHOS DE ANÁLISE.....	169

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Delineamento da pesquisa	25
Figura 2 – Níveis de detalhamento em modelos de emissões	51
Figura 3 – Relações entre as abordagens de modelagem.....	63
Figura 4 – Estrutura do método proposto.....	68
Figura 5 – Exemplos de características relevantes para definição dos TAEs	71
Figura 6 – Representação da região de estudo e rede modelada.....	77
Figura 7 – Representação da rede modelada no SATURN	79
Figura 8 – Comparação dos fluxos estimados nas sementes estocásticas	91
Figura 9 – Representação do TAE 4 modelado no VISSIM	92
Figura 10 – Comparação das velocidades estimadas nas sementes estocásticas	93
Figura 11 – Fluxos de veículos estimados pelo VISSIM e SATURN	96
Figura 12 – Velocidades médias estimadas pelo VISSIM e SATURN	97
Figura 13 – Estimativa de CO para TAEs com baixo nível de carregamento viário	99
Figura 14 – Estimativa de CO para TAEs com nível médio de carregamento viário	99
Figura 15 – Estimativa de CO para TAEs com alto nível de carregamento viário	100
Figura 16 – Relação entre a quantidade de CO estimada e a velocidade média	101
Figura 17 – Estimativa de HC para TAEs com baixo nível de carregamento viário	102
Figura 18 – Estimativa de HC para TAEs com nível médio de carregamento viário	102
Figura 19 – Estimativa de HC para TAEs com alto nível de carregamento viário	103
Figura 20 – Relação entre a velocidade média e a estimativa de HC pelo MOBILE	104
Figura 21 – Estimativa de NOx para TAEs com baixo nível de carregamento viário....	105
Figura 22 – Estimativa de NOx para TAEs com nível médio de carregamento viário ..	105
Figura 23 – Estimativa de NOx para TAEs com alto nível de carregamento viário	106

Figura 24 – Relação entre a velocidade média e a estimativa de NOx pelo MOBILE ..	107
Figura 25 – Estimativa de CO dos TAEs com nível baixo de carregamento viário	108
Figura 26 – Estimativa de CO dos TAEs com nível médio de carregamento viário	108
Figura 27 – Estimativa de CO dos TAEs com alto nível de carregamento viário	109
Figura 28 – Estimativa de HC dos TAEs com baixo nível de carregamento viário.....	110
Figura 29 – Estimativa de HC dos TAEs com nível médio de carregamento viário	110
Figura 30 – Estimativa de HC dos TAEs com alto nível de carregamento viário	111
Figura 31 – Estimativa de NOx dos TAEs com baixo nível de carregamento viário	112
Figura 32 – Estimativa de NOx dos TAEs com nível médio de carregamento viário....	112
Figura 33 – Estimativa de NOx dos TAEs com alto nível de carregamento viário.....	113
Figura 34 – Comparação das estimativas de CO pelos dois modelos de emissões	114
Figura 35 – Comparação das estimativas de HC pelos dois modelos de emissões.....	114
Figura 36 – Comparação das estimativas de NOx pelos dois modelos de emissões ...	115
Figura 37 – Estimativas de CO para TAEs com baixo carregamento viário	116
Figura 38 – Estimativas de HC para TAEs com baixo carregamento viário	116
Figura 39 – Estimativas de NOx para TAEs com baixo carregamento viário.....	117
Figura 40 – Diferenças percentuais de estimativas de emissões para TAEs com baixo carregamento viário	118
Figura 41 – Estimativas de CO para TAEs com médio carregamento viário	120
Figura 42 – Estimativas de HC para TAEs com médio carregamento viário.....	121
Figura 43 – Estimativas de NOx para TAEs com médio carregamento viário	121
Figura 44 – Diferenças percentuais de estimativas de emissões para TAEs com médio carregamento viário	122
Figura 45 – Estimativas de CO para TAEs com alto carregamento viário	124
Figura 46 – Estimativas de HC para TAEs com alto carregamento viário.....	124

Figura 47 – Estimativas de NOx para TAEs com alto carregamento viário	125
Figura 48 – Diferenças percentuais de estimativas de emissões para TAEs com alto carregamento viário	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais Poluentes Atmosféricos.....	31
Tabela 2 – Proporção de tecnologias de veículos leves em São Paulo	58
Tabela 3 – Média de quilometragem anual de veículos no Brasil.....	84
Tabela 4 – Parâmetros globais estimados pelo modelo SATURN	88
Tabela 5 – Distribuição dos TAEs conforme os fluxos estimados pelo SATURN	88
Tabela 6 – Distribuição dos TAEs conforme a velocidade média estimada pelo SATURN	89
Tabela 7 – Distribuição dos TAEs conforme a relação volume/capacidade.....	89
Tabela 8 – Distribuição dos TAEs conforme o tamanho médio de filas.....	90
Tabela 9 – Distribuição dos TAEs conforme os fluxos estimados pelo VISSIM	94
Tabela 10 – Distribuição dos TAEs conforme a velocidade média calculada com dados do VISSIM.....	95
Tabela 11 – Características dos TAEs com baixo carregamento viário e maiores diferenças relativas nas emissões de CO.....	119
Tabela 12 – Características dos TAEs com médio carregamento viário e maiores diferenças relativas nas emissões de CO.....	123
Tabela 13 – Características dos TAEs com alto carregamento viário e maiores diferenças relativas nas emissões de CO.....	127
Tabela 14 – Estimativas totais de emissões dos modelos MOBILE e IVE	128
Tabela 15 – Estimativas totais de emissões dos modelos MOBILE e calculadas através do método proposto	128
Tabela 16 – Estimativas de CO do MOBILE para Trechos de Análise de Emissões (TAEs) com baixo nível de carregamento viário	150

Tabela 17 – Estimativas de CO do MOBILE para Trechos de Análise de Emissões (TAEs) com nível médio de carregamento viário	151
Tabela 18 – Estimativas de CO do MOBILE para Trechos de Análise de Emissões (TAEs) com alto nível de carregamento viário	152
Tabela 19 – Estimativas de HC do MOBILE para Trechos de Análise de Emissões (TAEs) com baixo nível de carregamento viário	153
Tabela 20 – Estimativas de HC do MOBILE para Trechos de Análise de Emissões (TAEs) com nível médio de carregamento viário	154
Tabela 21 – Estimativas de HC do MOBILE para Trechos de Análise de Emissões (TAEs) com alto nível de carregamento viário	155
Tabela 22 – Estimativa de NOx do MOBILE para Trechos de Análise de Emissões (TAEs) com baixo nível de carregamento viário	156
Tabela 23 – Estimativa de NOx do MOBILE para Trechos de Análise de Emissões (TAEs) com nível médio de carregamento viário	157
Tabela 24 – Estimativa de NOx do MOBILE para Trechos de Análise de Emissões (TAEs) com alto nível de carregamento viário	158
Tabela 25 – Estimativas de CO do IVE para Trechos de Análise de Emissões (TAEs) com baixo nível de carregamento viário	160
Tabela 26 – Estimativas de CO do IVE para Trechos de Análise de Emissões (TAEs) com nível médio de carregamento viário	161
Tabela 27 – Estimativas de CO do IVE para Trechos de Análise de Emissões (TAEs) com alto nível de carregamento viário	162
Tabela 28 – Estimativas de HC do IVE para Trechos de Análise de Emissões (TAEs) com baixo nível de carregamento viário	163
Tabela 29 – Estimativas de HC do IVE para Trechos de Análise de Emissões (TAEs) com nível médio de carregamento viário	164
Tabela 30 – Estimativas de HC do IVE para Trechos de Análise de Emissões (TAEs) com alto nível de carregamento viário	165

Tabela 31 – Estimativas de NOx do IVE para Trechos de Análise de Emissões (TAEs) com baixo nível de carregamento viário	166
Tabela 32 – Estimativas de NOx do IVE para Trechos de Análise de Emissões (TAEs) com nível médio de carregamento viário	167
Tabela 33 – Estimativas de NOx do IVE para Trechos de Análise de Emissões (TAEs) com alto nível de carregamento viário	168
Tabela 34 – Características dos TAEs com baixo carregamento viário	170
Tabela 35 – Características dos TAEs com médio carregamento viário.....	171
Tabela 36 – Características dos TAEs com alto carregamento viário.....	172

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A/C	Relação ar/combustível
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono ou Gás Carbônico
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
FCV	Fatores de Correção de Velocidade
GEE	Gases do Efeito Estufa
HC	Hidrocarbonetos
KM _{VV} _I	Quilômetros-veículo Viajados
MP	Material Particulado
NO _x	Óxido de Nitrogênio
O ₃	Ozônio
Pb	Chumbo
RPM	Rotações por minuto
S	Enxofre
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SO _x	Óxido de Enxofre
STR	<i>Engine Stress</i>
TAE	Trecho de Análise de Emissões
TBE	Taxa Básica de Emissão
VSP	<i>Vehicle Specific Power</i>

1 INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica é um dos problemas ambientais que mais reduzem o nível de qualidade de vida. Os efeitos nocivos da degradação da qualidade do ar são percebidos pela população através de problemas de saúde, deterioração de instalações urbanas e depreciação de bens naturais. Em áreas urbanas não industriais, o transporte rodoviário é o principal responsável pela alta quantidade de poluentes lançados na atmosfera (FAIZ, 1993; STURM, 1998; COLVILE et al., 2001; CHEN; YU, 2007). Na região metropolitana de São Paulo, por exemplo, os veículos automotores são responsáveis por 98% das emissões de monóxido de carbono (CO), 97% de hidrocarbonetos (HC), 96% de óxidos de nitrogênio (NO_x), 40% de material particulado (MP) e 33% de óxidos de enxofre (SO_x) (CETESB, 2008).

A elevada taxa de motorização, principalmente pelo transporte individual, tem provocado crescentes congestionamentos e, por consequência, a redução da velocidade média do tráfego e o aumento dos tempos de deslocamento, do consumo de combustível e da poluição sonora e atmosférica. Embora o avanço tecnológico das últimas décadas tenha contribuído para o desenvolvimento de motores menos poluentes, o aumento da frota veicular acarretou altos índices de emissões. O crescimento acelerado da frota de veículos circulante e a deficiência dos programas de inspeção e manutenção de veículos são os principais fatores responsáveis pelo aumento nos níveis de emissões em grandes centros urbanos.

Os efeitos da emissão de poluentes na atmosfera podem ser percebidos em diferentes escalas, em níveis local, regional e global, podendo se agravar ao longo do tempo e em função de condições climáticas desfavoráveis à difusão dos poluentes. Em nível local, os problemas associados à poluição têm efeitos mais sérios, repercutindo principalmente em problemas de saúde, e comprometendo a qualidade de vida da população (LAM; NIEMEIER, 2005).

Quanto aos efeitos regionais, os poluentes primários derivados das emissões de veículos, sob certas condições meteorológicas, transformam-se em poluentes secundários na atmosfera, como os aerossóis ácidos, sulfatos e nitratos, podendo ser deslocados a grandes distâncias pelos ventos dominantes (KASSOMENOS et al., 2005). Globalmente, o efeito estufa e o aquecimento global destacam-se como os principais problemas para o meio ambiente, devido ao aumento da concentração de gases na atmosfera, resultado de emissões provenientes dos processos de combustão (BRAGA et al., 2002).

A preocupação com o meio ambiente levou os países da Organização das Nações Unidas a estabelecerem um acordo para controlar as intervenções humanas no clima. Este acordo foi aprovado em Kyoto, no Japão, em dezembro de 1997 e entrou em vigor em fevereiro de 2005. O Protocolo de Kyoto determina que países desenvolvidos signatários reduzam suas emissões de gases de efeito estufa (GEE) em pelo menos 5,2% até 2012, em relação aos níveis de 1990 (UNFCCC, 1998; UNFCCC, 2008). Outros acordos mais recentes têm ocorrido com o objetivo de definir metas de redução de emissões para horizontes futuros, como a COP 15 (15ª Conferência das Partes da Convenção das Nações Unidas sobre Mudança do Clima), realizada na Dinamarca em dezembro de 2009.

Tendo em vista a necessidade de melhoria da qualidade do ar, medidas de controle e redução de emissões veiculares são elaboradas com o intuito de mitigar os efeitos negativos dos transportes ao meio ambiente e evitar que esses prejuízos atinjam as gerações futuras. Pesquisas na área tecnológica têm grande importância, principalmente no que se refere ao desenvolvimento de novos equipamentos de controle de emissões e de combustíveis menos poluentes. No Brasil, apesar de vigorar uma legislação ambiental específica (BRASIL, 1998), e de existirem programas de controle da qualidade do ar, ainda é alta a concentração de gases tóxicos e material particulado nas grandes aglomerações urbanas (FEAM, 2004; MENDES, 2004).

A implementação de políticas de transportes que visem melhorar a qualidade do meio ambiente através do controle e redução de emissões é uma preocupação crescente. A avaliação dos impactos ambientais de medidas desta natureza deve ser baseada em

estudos específicos. Por isso, o planejamento e gerenciamento de projetos de transporte necessitam de ferramentas adequadas para avaliar potenciais efeitos decorrentes dos níveis de emissões gerados.

Tipicamente, as emissões geradas por fontes móveis são quantificadas através de modelos computacionais. Modelos deste tipo vêm sendo desenvolvidos na América do Norte e Europa e, de forma geral, são baseados em especificações de combustíveis, tipos de veículos, padrões de condução, programas de fiscalização e manutenção, e características climáticas (CARB, 2007; EPA, 2003; EEA, 2007).

Os países em desenvolvimento, reconhecendo a necessidade da utilização de modelos de emissões, têm utilizado versões modificadas de modelos norte-americanos ou europeus. Os fatores de emissões calculados a partir das características particulares da Europa e Estados Unidos são utilizados por esses países em função da ausência de dados disponíveis com as informações locais (BARTH et al., 2007). No entanto, essa simplificação pode gerar resultados com alto grau de incerteza em análises quantitativas de emissões.

Devido à complexidade do processo de geração de emissões, os modelos de emissões e os modelos de tráfego, que estimam o comportamento dos veículos, vêm sendo continuamente aprimorados durante décadas, buscando adequar-se às mudanças de políticas e tecnologias. Há uma grande variedade de modelos de tráfego e de emissões, com diferentes níveis de detalhes para a representação das condições de tráfego e dos níveis gerados de emissões. A adequação da aplicação de cada tipo modelo é diretamente relacionada aos objetivos da análise.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

O fenômeno de geração de emissões veiculares é bastante complexo devido à correlação entre vários fatores envolvidos. Em função das diversas dimensões entre os fatores intervenientes e os níveis de emissões, a utilização de ferramentas de modelagem torna-se necessária. A modelagem de tráfego para estimativa de emissões subsidia a identificação de estratégias de gerenciamento e controle capazes de

considerar o aumento da demanda de tráfego e a exigência dos padrões ambientais (NÖKEL et al., 1998).

De forma geral, o processo de estimativa de emissões de poluentes atmosféricos decorrentes do tráfego viário envolve três tipos de análise. O primeiro tipo de análise descreve o comportamento dos veículos na rede viária e é normalmente realizado através da utilização de modelos de tráfego. O segundo tipo de análise determina a quantidade de poluentes provenientes do tráfego através de modelos de taxas de emissões, ou simplesmente, modelos de emissões, que representam o processo de geração de poluentes a partir das características da frota de veículos e dos tipos de combustíveis. Quando as taxas de emissões são combinadas com as informações do comportamento dos veículos na corrente de tráfego, a estimativa de emissões geradas é dada por tempo e espaço.

Uma vez estimado o comportamento dos veículos e combinado com as taxas de emissões, o terceiro tipo de análise destina-se a avaliar a dispersão das emissões na atmosfera através da análise das concentrações. Os resultados, estimados em escala espacial e temporal, são associados a condições climáticas e comparados com a legislação pertinente, indicando a qualidade do ar na região analisada. Situações meteorológicas distintas, mas com idênticas produções de poluentes, podem apresentar concentrações atmosféricas completamente diferentes, devido à influência das condições de dispersão.

O foco deste trabalho concentra-se nos dois primeiros tipos de análise supracitados que se referem à modelagem de tráfego e de emissões, não incluindo a análise da dispersão de poluentes. A quantificação das emissões através de ferramentas de modelagem pode ser realizada assumindo diferentes níveis de detalhamento. Em geral, os modelos de tráfego podem apresentar três níveis de detalhamento ou agregação das variáveis consideradas: (i) o nível estratégico ou macroscópico, onde as características que descrevem as condições de circulação são agregadas, como por exemplo, volumes horários ou diários; (ii) o nível mesoscópico, que considera os veículos como parte constituinte do fluxo viário, porém avalia as condições de tráfego de forma agregada, sem considerar as interações entre os veículos, e (iii) o nível

microscópico, onde o desempenho do tráfego é dependente das interações dos veículos entre si e com a rede viária.

Os modelos de estimativa de emissões, de forma geral, podem ser classificados em dois grandes grupos, de acordo com o nível de detalhamento considerado: modelos estáticos e modelos dinâmicos. Os modelos estáticos, baseados em velocidades médias dos veículos, representam o nível mais agregado, e são comumente utilizados para avaliações estratégicas ou para grandes áreas. Os modelos dinâmicos representam o nível mais detalhado e consideram, basicamente, a variação do modo de operação dos veículos ao longo do tempo.

A avaliação de projetos de transportes em áreas urbanas associada a possíveis variações nos padrões de geração de emissões veiculares podem abranger áreas extensas. A modelagem de tráfego macroscópica, adequada para grandes extensões, estima parâmetros agregados como fluxo viário ou velocidade média da rede. Estes parâmetros não retratam adequadamente as particularidades do tráfego responsáveis pelas maiores variações nos níveis de emissões, como eventos de acelerações e desacelerações que ocorrem em condições de congestionamento.

Por outro lado, modelos microscópicos de simulação de tráfego demandam uma grande quantidade de dados, e para apresentar estimativas confiáveis necessitam ser adequadamente calibrados. Em áreas extensas, com características heterogêneas de infraestrutura e operação, a calibração microscópica é bastante complexa, uma vez que parâmetros comportamentais, por exemplo, podem ser efetivamente diferentes em vias de tráfego não saturado ou em congestionamento.

Assim, o problema de pesquisa desta tese envolve o desenvolvimento de uma estrutura híbrida de modelagem através da combinação de modelos de tráfego com diferentes níveis de detalhamento associados a modelos de estimativa de emissões veiculares. A modelagem híbrida agrega as vantagens individuais de cada abordagem, uma vez que combina a micro-simulação em áreas específicas com a simulação agregada em uma área de estudo mais abrangente. Isso permite o estudo dos efeitos na rede viária dos fenômenos microscópicos que não são capturados em níveis mais

agregados, aumentando a precisão dos resultados e reduzindo a necessidade de coleta de dados e esforços de calibração.

Esta pesquisa pretende contribuir para a melhoria da qualidade das estimativas de emissões para subsidiar análises ambientais inseridas no planejamento e gerenciamento de projetos de transportes. Os resultados decorrentes da utilização do método proposto nesta tese podem embasar a elaboração e implementação de políticas de transportes que visem à redução de eventos que proporcionem altos índices de emissões gerados.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Propor um método para aprimorar a estimativa de emissões veiculares em áreas urbanas através da utilização de modelagem híbrida de tráfego em redes associada a modelos de emissões.

1.2.2 Objetivos específicos

- Elucidar os diferentes níveis de modelagem do comportamento do tráfego e de estimativa de emissões em vias urbanas, apontando os principais modelos de tráfego e de emissões reportados na literatura;
- Analisar a adequação e as limitações das diferentes abordagens de modelagem;
- Desenvolver um estudo de caso para subsidiar a proposição e o detalhamento de um método para avaliar estimativas de emissões através de abordagem híbrida de modelagem;
- Identificar trechos da rede viária nos quais as estimativas de emissões provenientes de modelos agregados são significativamente diferentes de estimativas decorrentes de modelos microscópicos;

- Sistematizar as etapas do método, indicando os cuidados necessários para a compatibilização dos modelos de tráfego agregados e desagregados de tráfego;
- Propor recomendações dos aspectos que devem ser observados na utilização associada dos modelos de emissões e na compatibilização dos resultados das estimativas de emissões.

1.3 DELINEAMENTO DA PESQUISA

Esta pesquisa pode ser classificada como quantitativa e de natureza aplicada. Em relação ao objetivo, a pesquisa se caracteriza como exploratória, uma vez que busca o desenvolvimento de um método capaz de melhorar as estimativas de emissões através da associação de diferentes abordagens de modelagem.

A pesquisa engloba cinco etapas principais, conforme apresentado na Figura 1. A primeira etapa consiste na definição do problema de pesquisa e dos objetivos do estudo. A segunda etapa contextualiza o objeto de estudo através da revisão teórica, onde é analisado o processo de formação de emissões veiculares, os tipos de poluentes e os fatores intervenientes nas emissões de poluentes. Ainda nesta etapa são estudadas as ferramentas para a estimativa de emissões, que envolvem os modelos de tráfego e os modelos de emissões, as adequações de cada abordagem de modelagem e suas limitações.

A terceira etapa da pesquisa envolve o desenvolvimento do método proposto nesta tese baseado em um estudo de caso. Neste estudo de caso é realizada a compatibilização das abordagens de modelagem de tráfego nos níveis agregado e desagregado em uma rede viária com características heterogêneas de oferta e operação viárias. Além disso, o método prevê a identificação de trechos da rede viária em que estimativas de emissões derivadas de modelos agregados e microscópicos apresentam diferenças.

A quarta etapa refere-se à análise e discussão dos resultados do estudo de caso, os quais subsidiam as recomendações do método proposto. A quinta e última etapa da

pesquisa constitui-se das conclusões do estudo, considerações, recomendações e proposições de trabalhos futuros.

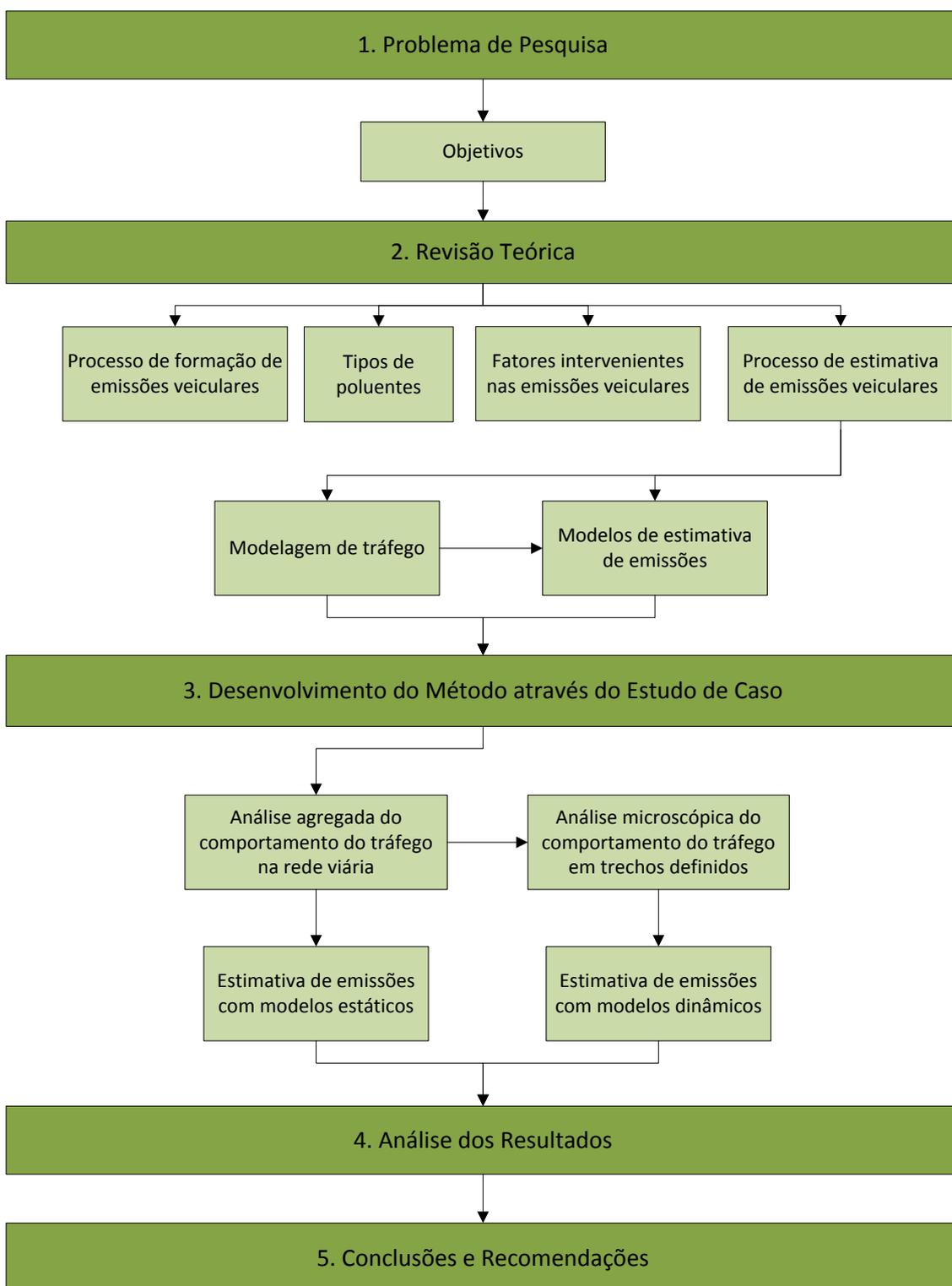


Figura 1 – Delineamento da pesquisa

1.4 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

Este estudo busca o desenvolvimento de uma estrutura de modelagem capaz de aprimorar a estimativa de emissões veiculares em áreas urbanas. Esta estrutura envolve a utilização de diferentes abordagens de modelagem de tráfego e de emissões veiculares. A pesquisa limita-se a estudar as estimativas de emissões de descarga considerando apenas veículos leves, com motores de ciclo Otto, que correspondem ao maior percentual de veículos da frota urbana. Emissões produzidas por veículos pesados, de motores de ciclo Diesel, como por exemplo, veículos de transporte público ou de carga, não foram contempladas neste trabalho, em função do padrão de condução diferenciado realizado por esses veículos e da utilização de combustíveis distintos. A análise de emissões proveniente do tráfego urbano de motocicletas também não foi considerada. Apesar das motocicletas contribuírem fortemente para o total de emissões gerado, elas apresentam um modo de condução bastante diferenciado.

Desta forma, este trabalho se restringe a avaliar as diferenças nos níveis de emissões de veículos leves decorrentes das variações das características relativas ao comportamento do tráfego. Não são avaliadas variações nos níveis de emissão decorrentes da composição da frota ou utilização de diferentes tipos de combustíveis.

O enfoque da pesquisa, portanto, abrange a análise relativa dos resultados, não cabendo conclusões sobre os valores absolutos estimados de emissões. Ainda, o método proposto nesta tese não é vinculado ao cálculo de taxas de emissões, sendo que estas podem ser incorporadas e melhoradas com informações exógenas aos modelos.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este documento está estruturado em sete capítulos. O capítulo 2 descreve o processo de formação de emissões veiculares, apontando os principais compostos emitidos e os fatores intervenientes no nível de emissões gerado.

O capítulo 3 apresenta a revisão teórica sobre a modelagem de tráfego em redes e de emissões veiculares. São apresentados os principais modelos reportados na literatura, sua classificação, adequação e limitações. Ainda, são expostas as relações entre as diferentes abordagens de modelagem de acordo com o nível de agregação das variáveis.

O capítulo 4 expõe o método proposto. São descritas as etapas do método e as recomendações para sua utilização. O capítulo 5 apresenta o estudo de caso utilizado no desenvolvimento do método proposto.

No capítulo 6 são apresentados os resultados obtidos no estudo de caso, bem como sua análise e discussão. O capítulo 7 relata as conclusões do estudo e traz as recomendações e sugestões para trabalhos futuros.

2 PROCESSO DE FORMAÇÃO DE EMISSÕES VEICULARES

Este capítulo descreve as características do processo de formação de emissões veiculares. Também, são apresentados os principais compostos emitidos por veículos automotores e os fatores intervenientes na quantidade de emissões gerada.

As emissões veiculares são provenientes do processo de combustão de combustíveis nos motores. Heywood (1988) classifica os motores de combustão interna dos veículos, em relação ao método de ignição, em dois tipos: ignição por compressão e por centelha. Nos motores de ignição por compressão, ou motores de ciclo Diesel, a combustão ocorre com a auto-ignição do combustível, após ser injetado e misturado com o ar que se encontra aquecido no motor, devido à compressão no interior dos cilindros. Esses motores são utilizados, em sua maioria, em veículos pesados de passageiros e de cargas. Os combustíveis utilizados neste tipo de motor, em geral são hidrocarbonetos mais pesados e menos voláteis, como o óleo diesel.

Em motores de ignição por centelha, também denominados motores de ciclo Otto, a combustão da mistura ar/combustível (A/C), após ser submetida à compressão nos cilindros, é iniciada por uma centelha. Esse tipo de motor está presente, principalmente, em veículos leves e motocicletas. Os principais combustíveis utilizados por motores de ciclo Otto são gasolina, álcool, gás natural ou misturas semelhantes. Neste trabalho, apenas veículos com motores de ciclo Otto são considerados na avaliação da estimativa de poluentes atmosféricos.

2.1 PRINCIPAIS FONTES DE EMISSÕES

As principais fontes de emissões de poluentes em veículos envolvem o sistema de escapamento, que expelle as emissões de descarga, e elementos como carburador, tanque de combustível e cárter, que originam gases provenientes da evaporação de combustível.

Desta forma, as emissões originadas pelo uso de veículos automotores podem ser divididas nas seguintes categorias:

- Emissões de gases e partículas pelo escapamento do veículo: subprodutos da combustão lançados na atmosfera pelo tubo de escapamento;
- Emissões evaporativas de combustível: lançadas na atmosfera através de evaporação de hidrocarbonetos do combustível; e emissões evaporativas nas operações de transferência de combustível, associadas ao armazenamento e abastecimento. As emissões evaporativas são diretamente dependentes da variação da temperatura ambiente. Apesar de, individualmente, esse tipo de emissão ser aparentemente insignificante, ao se analisar o número de veículos existentes em grandes centros urbanos, verifica-se a geração de toneladas de poluentes por dia (FAIZ et al., 1996).
- Emissões de gases do cárter do motor: subprodutos da combustão que passam pelos anéis de segmento do motor e gases e vapores do óleo lubrificante;
- Emissões de partículas provenientes do desgaste de pneus, freios e embreagem; ressuspensão de partículas de poeira do solo.

As emissões de descarga são mais significativas, representando cerca de 80% das emissões totais dos veículos (FEAM, 2004). Esse tipo de emissão é diretamente dependente do modo de operação dos veículos (HEYWOOD, 1988).

O modo de operação pode ser classificado em relação à temperatura de operação do motor e à velocidade do veículo. Em relação à velocidade, os modos de operação consistem em velocidade constante, parado, em aceleração ou desaceleração. Com relação à temperatura do motor, o veículo pode estar em modo de partida a frio, partida a quente ou em condições estabilizadas. Os modos de partida a frio ou a quente referem-se aos primeiros minutos de operação do veículo após um determinado período desligado. Quando o veículo não está operando em algum dos modos de partida, considera-se a operação em condições estabilizadas, na qual o motor atingiu sua temperatura de operação.

Os principais fatores responsáveis pela diferença da quantidade de emissões associada aos modos de operação envolvem a relação da mistura ar/combustível (A/C) no motor e o funcionamento de equipamentos de controle de emissões, quando existentes. Por exemplo, durante o modo de partida a frio, os equipamentos de controle de emissões, como catalisadores, não desempenham o controle completo das emissões até que seja atingida a temperatura de operação apropriada do motor. Além disso, em partida a frio, o motor necessita uma mistura ar/combustível mais rica, com maior quantidade de combustível. Isso implica em uma quantidade de poluentes emitidos maior que nos modos de partida a quente e em condições estabilizadas (WU et al., 1996). A porção de emissões gerada no modo de partida a frio é objeto de estudo de diversos trabalhos, como Sanketi et al. (2006), Hansen et al. (2007) e Hansen (2008).

O combustível em contato com o ambiente, ou sua queima juntamente com o oxigênio presente no motor do veículo, reage e forma compostos químicos. Todos os compostos derivados dessas reações são considerados poluentes, uma vez que contaminam o ar e produzem efeitos adversos à saúde e ao meio ambiente. A seguir são apresentados os principais compostos emitidos pelos veículos e seus efeitos sobre a saúde.

2.2 COMPOSTOS EMITIDOS POR VEÍCULOS AUTOMOTORES

Os principais poluentes nocivos à saúde lançados na atmosfera são provenientes do processo de combustão incompleta e consistem das emissões de monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC ou C_nH_m), óxidos de nitrogênio (NO_x), óxidos de enxofre (SO_x), material particulado (MP) e aldeídos (BAIRD, 2002). Outros gases, como o dióxido de carbono (CO_2) e o metano (CH_4), em altas concentrações potencializam o efeito estufa, provocando o desequilíbrio térmico da superfície terrestre. A Tabela 1 apresenta as principais fontes emissoras dos poluentes nocivos à saúde e os principais danos causados. Além dos poluentes apresentados na Tabela 1, pode-se considerar, ainda, a emissão de partículas provenientes do desgaste de pneus, freios, embreagem e o levantamento de poeira do solo (FEEMA, 2004).

Tabela 1 – Principais Poluentes Atmosféricos

Poluentes	Fontes de Emissão	Efeitos sobre a Saúde
Monóxido de Carbono (CO)	Veículos (95,5% das emissões) e indústrias	Combina-se com a hemoglobina formando a carboxihemoglobina, um composto que diminui a oxigenação do sangue, prejudica o desenvolvimento dos fetos, causa tonturas, afeta os sistemas nervoso central, pulmonar, redução dos reflexos e da acuidade visual.
Hidrocarbonetos (HC)	Resultante da queima incompleta e evaporação de combustíveis e outros produtos voláteis	Provocam irritação nos olhos, nariz, pele e aparelho respiratório. Podem causar dano celular, sendo que diversos HC's são considerados carcinogênicos e mutagênicos.
Óxidos de nitrogênio (NO _x)	Processo de combustão em geral e veículos	Podem provocar desconforto respiratório, diminuição da resistência a infecções e alterações celulares.
Óxidos de enxofre (SO _x)	Processos resultantes da queima de óleo combustível, produção de papel, fertilizantes	Em concentrações altas, causam inflamações graves da mucosa nas vias respiratórias, podendo até causar a morte. Aumenta a incidência de rinite, faringite e bronquite. Afeta plantas e espécies mais sensíveis, causa acidificação do solo e corpos d'água.
Material particulado (fumaça, poeira e fuligem)	Veículos movidos a diesel, indústrias, desgaste dos pneus e freios de veículos em geral	Agravam quadros alérgicos, de asma e bronquite. As poeiras mais grossas ficam retidas no nariz e na garganta, causando irritação e facilitando a propagação de infecções gripais.
Aldeídos	Veículos	Irritação dos olhos, nariz e garganta. Os aldeídos emitidos por veículos a diesel, a gasolina e a álcool podem provocar câncer.

Fonte: adaptado de LOUREIRO (2005); CETESB (2006); CETESB (2008)

Outros poluentes podem ser formados a partir destes, através de reações químicas ocorridas pela presença de altas temperaturas, como é caso do ozônio (O₃). O ozônio é um importante gás de efeito estufa que é gerado a partir da reação de hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio no topo da atmosfera, quando ativados pela luz solar. Nas camadas superiores da atmosfera, esse gás tem uma importante função ecológica, absorve as radiações ultravioletas do sol e reduz sua quantidade na superfície terrestre. Por outro lado, nas camadas inferiores da atmosfera, exerce ação nociva sobre os vegetais, animais, materiais e o homem, mesmo em concentrações relativamente baixas. Os principais efeitos do ozônio sobre a saúde envolvem danos na estrutura pulmonar, diminuição da resistência às infecções dos pulmões, aumento da incidência de tosse, asma, irritação no aparelho respiratório e nos olhos.

A formação dos tipos de poluentes veiculares é diretamente relacionada à composição do combustível utilizado. Cada poluente é emitido em maior ou menor quantidade em

função de diversas características. A seguir são apresentados os principais fatores que influenciam os níveis de emissões gerados pelos veículos.

2.3 FATORES DETERMINANTES DO NÍVEL DE EMISSÕES VEICULARES

As emissões veiculares variam em função de um número elevado de fatores, os quais determinam os padrões de emissão dos poluentes. Entre os principais fatores destacam-se:

- Características da frota como ano, modelo e categoria veicular: aspectos de tamanho, peso, potência e tecnologia do motor (injeção eletrônica de combustível ou através de carburadores) do veículo interferem na quantidade emitida de poluentes. Em geral, veículos novos, em função das tecnologias mais avançadas e equipamentos de redução de poluentes mais eficientes (conversor catalítico ou catalisador), são menos poluidores. A tecnologia de alimentação do motor por injeção eletrônica de combustível evita seu desperdício, contribuindo para a redução do grau de emissão. Com o uso do veículo, o desgaste de peças e componentes afeta as características de eficiência do motor, provocando índices mais elevados de emissão.
- Regulagem e manutenção: a regulagem e manutenção adequadas mantêm um funcionamento eficiente do motor, evitando desperdícios de combustível e garantindo que os níveis de emissão permaneçam dentro dos limites estabelecidos pela legislação. A manutenção adequada reduz a degradação natural do motor e dos equipamentos de controle de emissão de poluentes, aumentando a vida útil do veículo e contribuindo para o controle das emissões de poluentes.
- Tipo e composição do combustível: o tipo de combustível utilizado define a qualidade da queima da mistura ar-combustível (A/C) dentro do motor, influenciando diretamente na formação dos poluentes emitidos. A redução, ou até mesmo a eliminação, de compostos presentes nos combustíveis como chumbo (Pb) e enxofre (S), tem grande influência nas emissões de óxidos de enxofre e chumbo pelos veículos. A emissão de hidrocarbonetos depende,

principalmente, da qualidade e do grau de oxidação incompleta do combustível.

- Sistema de tráfego local e traçado da via: a emissão de poluentes veiculares é dependente das condições de tráfego, cujas características podem variar consideravelmente de uma área para outra. As características de controle nas interseções, números de faixas de tráfego, programações semaforicas, facilidades para estacionamento e permissividade de conversões são fatores relacionados ao sistema de tráfego local com conseqüências indiretas na emissão veicular, pois influenciam o modo de condução dos veículos (BEEVERS; CARSLAW, 2005). A largura e a inclinação da via também influenciam as emissões. A largura exerce influência sobre a liberdade do fluxo, e a inclinação leva a uma maior demanda de potência, reduzindo a relação ar/combustível em acilves, ocasionando emissões mais elevadas (ANH, 1998; ARIOTTI et al., 2008). Ainda, as emissões veiculares são diretamente proporcionais à demanda de tráfego em operação em determinada área.
- Condições climáticas: A variação da temperatura tem grande influência nas emissões evaporativas de HC. Em locais com temperaturas mais elevadas, o uso do ar-condicionado nos veículos exige um maior carregamento do motor, emitindo mais poluentes. Em ambientes mais frios, o resfriamento do motor e dos equipamentos de controle de emissão de poluentes ocorre mais rapidamente, fazendo com que uma nova partida do motor ocorra em temperaturas mais baixas (WENZEL et al., 2000).
- Modo de condução: o modo de condução de cada motorista pode influenciar consideravelmente a emissão de poluentes, principalmente CO e HC. Acelerações mais bruscas e que exigem mais potência do motor tendem a emitir mais poluentes que acelerações mais “suaves”. Em um padrão de condução mais agressivo, o veículo pode emitir dez vezes mais poluentes do que em um padrão de condução calmo, e até três vezes mais do que em um padrão de condução normal (DE VLIEGER, 1997; DE VLIEGER et al., 2000).

- Modo de operação do veículo: como mencionado anteriormente, 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. (MEHTA et al., 2003). Quando os veículos trafegam em condições estabilizadas de temperatura do motor e dos equipamentos de controle de emissão de poluentes, as emissões variam em função da ocorrência de eventos de aceleração e desaceleração. A maior parte dos poluentes emitidos ocorrem em pequenos episódios de aceleração e desaceleração que acarretam elevados níveis de emissões (ROUPHAIL et al., 2000; RAKHA; DING, 2003). O modo de partida do veículo também exerce influência sobre a quantidade de poluentes emitidos. Em geral, quando os veículos operam em partida a frio ou a quente, o nível de emissões tende a ser maior que em condições estabilizadas.
- Altitude em relação ao nível do mar: A altitude possui forte influência nas emissões de veículos, uma vez que em cotas elevadas o ar torna-se rarefeito, provocando uma redução na taxa ar/combustível e consequente enriquecimento da mistura.

É importante considerar que os fatores intervenientes no processo de emissões veiculares são dependentes e interligados (ERICSSON, 2000; ERICSSON, 2001; BRUNDELL-FREIJ, 2005). Os modelos computacionais utilizados para a estimativa de emissões, muitas vezes, possuem restrições quanto a consideração de alguns fatores, como por exemplo, os programas de inspeção e manutenção dos veículos. Em função disso, a qualidade da estimativa das emissões veiculares está relacionada ao tratamento adequado do maior número de fatores intervenientes considerados na análise.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os veículos automotores desempenham um papel fundamental no contexto ambiental, visto que suas emissões são prejudiciais à saúde e ao bem-estar da população. Observa-se nos centros urbanos, a tendência de um agravamento na

qualidade do ar decorrente, principalmente, do aumento do número de veículos circulantes.

As emissões veiculares apresentam um cenário de constantes mudanças, quer seja pela alteração do perfil da frota, pelas modificações na composição dos combustíveis, ou ainda pelo avanço tecnológico incorporado aos veículos novos. A estimativa das emissões provenientes das atividades de transportes é fundamental para a avaliação dos efeitos decorrentes de modificações tecnológicas, na infraestrutura ou na demanda por viagens.

As estimativas de emissões podem ser realizadas através de ferramentas de modelagem que buscam representar, de forma simplificada, o processo de formação de emissões ocorrido no mundo real. O próximo capítulo apresenta e classifica algumas dessas ferramentas e discute acerca de sua utilização. Essa discussão subsidia a elaboração de um método que se propõe a aperfeiçoar o processo de estimativas de emissões em áreas urbanas através da associação de modelos computacionais.

3 ESTIMATIVA DE EMISSÕES VEICULARES ATRAVÉS DE MODELAGEM

Este capítulo aborda a utilização de modelos computacionais para estimar emissões veiculares em áreas urbanas. A estimativa de emissões pode ser realizada através de modelos de previsão das atividades operacionais dos veículos, denominados modelos de tráfego, e modelos de emissões veiculares. Os modelos de tráfego representam as interações entre a demanda e a oferta de transportes, determinando os fluxos na rede viária modelada e outros parâmetros de desempenho viário, como velocidades ou atrasos. Os modelos de emissões buscam estimar a quantidade de poluentes gerada, baseados nas informações da atividade operacional dos veículos na rede viária.

Inicialmente, são apresentadas as características de cada tipo de modelo, bem como sua adequação e limitações. Posteriormente, são identificadas as relações entre os níveis de modelagem, buscando a compatibilidade da utilização de dados entre os modelos.

3.1 MODELOS DE TRÁFEGO

Os modelos de tráfego podem ser classificados sob diversos aspectos, como por exemplo, em escala espacial ou temporal, ou em relação ao nível de agregação das variáveis. Em relação à escala espacial, os modelos podem representar grandes áreas, sub-regiões, trechos de vias ou simplesmente interseções viárias. Na dimensão temporal, os modelos podem ser estáticos, quando assumem condições médias de equilíbrio, ou dinâmicos, quando representam as variações ao longo do período da modelagem.

Com relação ao nível de agregação das variáveis do fluxo de tráfego, os modelos classificam-se em macroscópicos, mesoscópicos e microscópicos. Modelos macroscópicos descrevem o tráfego com alto nível de agregação do fluxo, por exemplo, através do volume por hora que passa por um determinado ponto. Os

modelos microscópicos descrevem o comportamento dos veículos que compõem a corrente de tráfego, bem como suas interações com o ambiente viário e com outros veículos. Modelos mesoscópicos estão em um nível intermediário de detalhes, descrevendo os veículos individualmente, mas sem considerar suas interações. As seções a seguir apresentam as principais características de cada tipo de abordagem e alguns exemplos de modelos reconhecidos no meio técnico-científico.

3.1.1 Modelos de Tráfego Macroscópicos

Modelos de tráfego macroscópicos descrevem a evolução do tráfego ao longo do tempo e do espaço através de um conjunto de equações diferenciais baseado em formulações de teorias semelhantes às de fluxo hidro-dinâmico. A solução dessas equações pode ser obtida analiticamente ou através de simulação. Quando se avalia um segmento simples de uma via, a abordagem analítica pode ser utilizada. No entanto, quando é necessário avaliar as interações espaciais e temporais do fluxo de tráfego, o método de solução normalmente utilizado é a simulação através de modelos computacionais.

O uso de modelos de tráfego macroscópicos tem se justificado devido à possibilidade desses modelos utilizarem informações dos sistemas de medidas de tráfego em grandes áreas urbanas (BURGHOUT, 2005). De fato, um dos motivos da popularidade das ferramentas macroscópicas refere-se ao fato de que os dados necessários para a aplicação desses modelos, como contagens de fluxo e velocidades, possuem o mesmo nível de agregação dos sistemas de medidas de desempenho de tráfego. Exemplos de modelos macroscópicos envolvem o STRADA (BUISSON et al., 1996a; 1996b; SEGARD, 1999), o METACOR (PAPAGEORGIOU et al., 1989; ELLOUMI et al., 1994; BRABANLEDOUX, 2000) e o DAGANZO (DAGANZO, 1994; 1995; 1999).

3.1.1.1 Modelo STRADA

O modelo STRADA (BUISSON et al., 1996a; 1996b) foi desenvolvido pela ENPC (*Ecole Nationale des Ponts-et-Chaussees*) e ENTPE-INRETS (*Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat - Institut National de la Recherche sur les Transports et leur Securite*).

O modelo é uma ferramenta computacional para a simulação do fluxo de tráfego sob condições de alocação dinâmicas, e para avaliação de estratégias de engenharia de tráfego, incluindo sistemas de informação ao usuário.

O modelo STRADA compreende um esquema de discretização aplicado aos arcos e interseções para a descrição das condições dinâmicas do tráfego. A discretização utiliza a generalização do esquema Godunov (GODUNOV, 1959; WESSELING, 2001) de resolução de equações diferenciais parciais, baseado nos conceitos de oferta e demanda do fluxo de tráfego. A forma discretizada do modelo torna-o adequado para a simulação de redes extensas, embora possa ser também aplicado em redes urbanas e corredores exclusivos. Ainda, o fluxo de tráfego estimado pelo modelo STRADA pode ser desagregado de acordo com critérios distintos, como pares origem-destino ou rotas.

Uma aplicação das equações do modelo STRADA foi realizada por Lefebvre et al. (2000). Os autores aplicaram o modelo em uma área da cidade de Nancy, na França. Os resultados da modelagem de tráfego foram utilizados em sistemas de redes neurais artificiais para prever a ocorrência de incidentes de tráfego.

3.1.1.2 Modelo METACOR

O modelo METACOR (PAPAGEORGIOU et al., 1989; ELLOUMI et al., 1994; BRABANLEDOUX, 2000) é um modelo macroscópico que utiliza simulação para descrever o fluxo de veículos baseado em outro modelo contínuo analítico desenvolvido por Payne (PAYNE, 1971). No METACOR, a via é dividida em células, onde para cada intervalo discreto de tempo são calculados, utilizando equações diferenciais, a velocidade, a densidade e o fluxo de veículos.

Em cada intervalo de tempo, são calculadas as interações de células adjacentes em termos de velocidade e densidade. A cada passo da simulação, as dinâmicas temporais e espaciais do sistema de tráfego são aproximadas por esses cálculos. Desse modo, o modelo considera que a interação entre as células compõe a via e, as vias são conectadas através das interseções.

3.1.1.3 Modelo DAGANZO

O modelo de Transmissão Celular Daganzo (DAGANZO, 1994) é a discretização em células do modelo contínuo proposto pela teoria LWR, criada por Lighthill, Whitham e Richards (LIGHTHILL; WHITHAM, 1955; RICHARDS, 1956). Nesse modelo, a via é representada por um número de pequenas seções, denominadas células. O modelo de simulação registra o número de veículos em cada célula, e a cada intervalo da simulação, calcula o número de veículos que atravessam os limites entre as células adjacentes.

O fluxo de veículos em cada célula depende da quantidade de veículos que podem ser enviados para a célula seguinte e de quantos veículos podem ser recebidos pela célula anterior. O volume de veículos que pode ser enviado é função da densidade da célula seguinte, e o número que pode ser recebido depende da densidade da célula receptora.

Estudos como o de Lin e Ge (2006) utilizaram a abordagem baseada em células do modelo Daganzo para estimar variáveis de tráfego, como fluxos, velocidades e tamanho de filas. Este estudo buscou avaliar a influência da heterogeneidade das condições do tráfego nas concentrações de monóxido de carbono (CO) em segmentos viários. Os resultados indicaram a ocorrência de maiores concentrações de CO quando considerada a variação das condições de tráfego ao invés de valores constantes.

3.1.2 Modelos de Tráfego Mesoscópicos

Modelos mesoscópicos estimam o fluxo de tráfego de maneira agregada, porém consideram os veículos individualmente sem as interações entre si. Eles, usualmente, são baseados em relações de velocidade e densidade e, teoria de filas, possuindo diversas abordagens. Uma das formas envolve a consideração dos veículos agrupados em pacotes que são alocados na rede viária. Esses pacotes atuam como entidades de tráfego e são regidos por uma função velocidade-densidade definida para cada arco da rede viária. A função velocidade-densidade diz respeito à velocidade dos veículos no arco com determinada densidade. Se a densidade do arco for alta, a função velocidade-densidade resulta em baixa velocidade para os veículos, enquanto que

baixa densidade remete a altas velocidades. As mudanças de faixa e a aceleração/desaceleração dos veículos não são modeladas (BURGHOUT, 2004).

Outra abordagem dos modelos mesoscópicos considera os veículos individuais agrupados em células que controlam seu comportamento. Essas células atravessam o arco e os veículos podem entrar e sair das células quando necessário, porém sem ultrapassá-las. A velocidade dos veículos é determinada por célula, sem considerar a decisão individual do motorista. Alternativamente, a abordagem de filas é utilizada em alguns modelos, onde a via é modelada como uma fila. Embora não seja usual nesse tipo de modelo, as faixas de tráfego podem ser modeladas individualmente (BURGHOUT, 2005). Exemplos de modelos mesoscópicos compreendem o CONTRAM (LEONARD et al., 1989), o SATURN (VAN VLIET; HALL, 2000), o DynaMIT (BEN-AKIVA et al., 2002) e o DYNASMART (JAYAKRISHNAN et al., 1994; MAHMASSANI, 2001; 2006).

3.1.2.1 Modelo CONTRAM

O modelo CONTRAM (LEONARD et al., 1989) foi um dos primeiros modelos mesoscópicos desenvolvidos com o objetivo de reproduzir os aspectos de tráfego da modelagem de equilíbrio de alocação dinâmica. A partir desse conceito, na década de 80, o modelo foi aperfeiçoado buscando a melhor representação contínua das condições dinâmicas do tráfego.

A estrutura do modelo é baseada em uma rede viária, composta por arcos e nós, onde o comportamento do pacote de veículos no arco é determinado pela velocidade de fluxo livre no arco, ou pela relação velocidade-fluxo. Além disso, a capacidade dos arcos é definida por um valor máximo de fluxo de saturação e, nos nós, o atraso dos veículos é calculado considerando a programação semaforica e as regras de prioridade de conversões.

A principal característica do CONTRAM é que ele realiza o processo de alocação de forma iterativa, buscando satisfazer as proporções de fluxo dadas pela matriz origem/destino até que as condições de equilíbrio sejam alcançadas. Ao contrário dos

modelos DynaMIT e DYNASMART, o CONTRAM não permite a armazenagem das informações em históricos que possam ser usados em análises de tempo real.

3.1.2.2 Modelo SATURN

O modelo SATURN – *Simulation and Assignment of Traffic to Urban Road Networks* – (VAN VLIET; HALL, 2000) é um modelo de alocação de tráfego associado a um módulo de simulação de interseções desenvolvido para a avaliação de esquemas de gerenciamento de tráfego em redes. Ele foi concebido originalmente no início da década de 80 e desde então vem sofrendo vários aperfeiçoamentos teóricos e computacionais.

O SATURN é formado por dois módulos que podem atuar combinados ou de maneira distinta. O módulo de alocação estima a escolha de rotas e determina a demanda nos arcos da rede viária. O módulo de simulação de tráfego é responsável pela previsão dos tempos de viagem na rede. Assim, o processo é iterativo entre os dois módulos até o alcance das condições de equilíbrio.

O SATURN permite a modelagem da rede viária em dois níveis de detalhamento, ambos com objetivos distintos: redes tipo *buffer* e redes de simulação. Nas redes *buffer* é utilizado somente o módulo de alocação, enquanto que em redes de simulação são utilizados os módulos de alocação e simulação. Redes *buffer* são representadas no modelo apenas pelos arcos, onde cada arco tem informações como comprimento, velocidade de fluxo livre, velocidade na capacidade, número de faixas e sentido de circulação. As redes de simulação são compostas por arcos e nós, e além das informações comuns às redes *buffer*, necessitam também de informações da programação semafórica e conversões permitidas.

Os resultados da modelagem do SATURN são fornecidos através de relatórios de saída, que podem conter dados de desempenho global da rede viária ou para cada arco individualmente, como informações de tamanho de filas e relação volume/capacidade. Ainda, o modelo dispõe de um módulo gráfico para análise, que pode representar a escolha de rotas pelos veículos e informações de arcos ou nós de simulação. O SATURN

é modelo consolidado e com várias aplicações em todo o mundo, incluindo análise de projetos de circulação em áreas urbanas (ARIOTTI et al., 2004), avaliação da operação de sistemas de transporte público (TRANHUU et al., 2007) ou estimativa de emissões de poluentes (JACONDINO, 2005).

3.1.2.3 Modelo DynaMIT

O modelo DynaMIT (BEN-AKIVA et al., 2002) tem sido desenvolvido desde a década de 90 no Laboratório de Sistemas Inteligentes de Transportes do MIT (*Massachusetts Institute of Technology*). O DynaMIT possui duas versões, sendo uma para planejamento (DynaMIT-P) e outra que permite a análise do comportamento do tráfego em tempo real (DynaMIT-R), onde as informações são dadas continuamente para o modelo. O modelo é composto por dois módulos que interagem entre si:

- O simulador de oferta, que simula os movimentos dos veículos ao longo da rede viária;
- O simulador de demanda, que simula a variação ao longo do tempo do fluxo de demanda entre pontos de origem-destino ou rotas específicas.

O simulador de oferta é um modelo de tráfego mesoscópico que modela os veículos de forma individual. A rede viária é representada através de arcos e/ou faixas de tráfego, e nós. Os veículos são agrupados em pacotes que se movem ao longo dos arcos com velocidade determinada pela densidade atual do arco. A operação dos semáforos da rede é representada nos nós, e o modelo reproduz a formação e a dissipação de filas, bem como a propagação das filas em outros arcos quando a capacidade é excedida. A simulação é dividida em intervalos de tempo e a progressão do modelo se dá em função das mudanças ocorridas entre intervalos.

O modelo de demanda consiste na modelagem, dependente no tempo, dos fluxos de demanda entre pares origem-destino, escolha de rotas e tempos de partida e das mudanças ocorridas nas rotas decorrentes das escolhas dos usuários frente às informações.

3.1.2.4 Modelo DYNASMART

O modelo DYNASMART – *Dynamic Network Assignment Simulation Model for Advanced Road Telematics* – foi desenvolvido na década de 90 (JAYAKRISHNAN et al., 1994; MAHMASSANI, 2006) e compreende um sistema de alocação dinâmica de tráfego, capaz de representar as escolhas de rotas dos usuários por um processo de otimização. Assim como o DynaMIT, o DYNASMART possui duas versões, uma destinada ao planejamento e outra que pode atuar em tempo real.

A simulação do tráfego no DYNASMART possui elementos de modelos macroscópicos e microscópicos. Esse modelo reproduz a movimentação dos veículos de acordo com velocidade instantânea e sua posição na via. A relação de velocidade e densidade atualmente utilizada corresponde a uma versão modificada da equação de Greenshields (GREENSHIELDS, 1935).

A geração dos veículos na rede é baseada na matriz origem/destino entre as zonas de tráfego e pode ser especificada de forma dinâmica. Os veículos são gerados em arcos, e cada destino dos veículos é probabilisticamente determinado com base nos dados de demanda. O DYNASMART possui capacidade para simular incidentes através da especificação de fatores de redução de capacidade durante um período determinado. Kaysi et al. (2004) utilizaram a simulação de incidentes do DYNASMART, considerando sistemas de informações de transportes, e avaliaram as diferenças nos níveis de emissões. Uma das conclusões desse estudo indica que quando os incidentes ocorrem, os níveis de CO aumentam em 0,5% enquanto os tempos de viagem têm aumento de 13,8%.

3.1.3 Modelos de Tráfego Microscópicos

Modelos de tráfego microscópicos fornecem uma representação detalhada do processo do tráfego, possibilitando a avaliação de estruturas mais complexas envolvendo gerenciamento de tráfego, segurança viária e sistemas de informações. Nos modelos microscópicos, o tráfego é descrito em nível individual dos veículos, contemplando as interações dos veículos entre si e com a infraestrutura viária.

Normalmente, o comportamento de tráfego é representado por um conjunto de regras que determinam quando um veículo acelera, desacelera ou troca de faixa. Os modelos que regem o comportamento dos veículos podem ser classificados em modelos de *car-following* e modelos de troca de faixa, ou *lane-changing*.

O modelo de *car-following* descreve os padrões de aceleração e desaceleração que resultam da decisão do veículo diante da movimentação do veículo que está a sua frente e de outros fatores que influem em sua velocidade, como o limite máximo de velocidade ou a curvatura e inclinação da via. O modelo de troca de faixas, ou *lane-changing* descreve as decisões de mudança de faixa de tráfego baseada nas preferências do usuário e na situação de tráfego na faixa atual e em outras faixas, como velocidade do veículo da frente ou a existência de uma brecha na corrente de tráfego da faixa adjacente. Exemplos de modelos microscópicos de tráfego envolvem o AIMSUN (BARCELO et al., 1997; HUGHES, 2002; TSS, 2006), o DRACULA (LIU, 2002), o VISSIM (FELLENDORF, 1996; PTV, 2006), o INTEGRATION (VAN AERDE, 2004) e o PARAMICS (SMITH et al., 1994).

3.1.3.1 Modelo AIMSUN

O modelo AIMSUN – *Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-urban Networks* (TSS, 2006) foi desenvolvido pela Universidade Politécnica da Catalunha, na Espanha. O AIMSUN é um modelo de simulação que combina a abordagem contínua e discreta. Enquanto os elementos do sistema de transportes, como veículos e detectores, mudam continuamente ao longo da simulação, outros elementos, como semáforos, sofrem mudanças discretas no tempo em pontos específicos durante a simulação. O AIMSUN considera diferentes tipos de veículos e características de geometria de rede e é capaz de modelar incidentes e conflitos em manobras.

O AIMSUN utiliza três tipos de dados: descrição da rede viária, programação semafórica e condições de tráfego. A descrição da rede contém informações sobre a geometria da rede, movimentos de conversão, configuração de interseções e localização de detectores. A programação semafórica é definida pelos estágios, sua

duração e definições de prioridade. Os dados essenciais do simulador envolvem os fluxos de tráfego em cada arco, as proporções de veículos realizando conversões e o estado inicial da rede. Os dados de saída do modelo incluem a representação da rede de forma gráfica, animada e contínua e, relatórios com dados estatísticos. O AIMSUN é integrado ao modelo GETRAM (*Generic Environment for Traffic Analysis and Modeling*), um editor gráfico de redes viárias que contém uma base de dados de rede, modelos de alocação estática, modelos de simulação temporal e um módulo de armazenamento e apresentação de resultados.

Xiao et al. (2005) compararam os modelos AIMSUN e VISSIM. Os autores constataram que os dois modelos têm boa capacidade para representar de forma adequada as características do comportamento do tráfego. Em relação à qualidade dos dados de saída, ambos simuladores apresentaram resultados similares.

3.1.3.2 Modelo DRACULA

O modelo DRACULA – *Dynamic Route Assignment Combining User Learning and Microsimulation* – (LIU, 2002) é um simulador microscópico de redes de tráfego urbanas. O DRACULA é composto por três sub-modelos independentes: o modelo de escolhas, o modelo de aprendizado, e o micro-simulador de tráfego. Os modelos de escolhas e aprendizado compõem a modelagem de demanda, que avalia o comportamento de uma população de potenciais viajantes e agrega as informações em uma base de dados diária.

O micro-simulador de tráfego DRACULA representa a trajetória dos veículos ao longo de rotas pré-especificadas. O modelo de *car-following* do DRACULA, assim como o do AIMSUN, representa as interações longitudinais dos veículos na rede, através do cálculo da velocidade corrente do veículo a partir da sua velocidade desejada, em resposta à velocidade e distância em relação ao veículo da frente. Esse modelo assume as características do modelo proposto por Gipps (1981). O modelo de *lane-changing* avalia a movimentação transversal dos veículos na via, reproduzindo o processo de troca de faixas.

Os veículos são individualmente caracterizados através de sua descrição física, como tipo de veículo, comprimento, máxima aceleração e desaceleração, e descrição comportamental do condutor, como tempo de reação, velocidade desejada, e distância mínima de afastamento em relação ao veículo à frente. Estas características são aleatoriamente escolhidas a partir de uma distribuição normal dos tipos de veículos, com médias e coeficientes de variação definidos pelo pesquisador.

Os parâmetros de saída do modelo, registrados em relatórios, são referenciados com base em diferentes níveis: para a rede, por tipo de veículo, para cada arco, por origem-destino ou faixa. O micro-simulador registra parâmetros como atrasos, distâncias percorridas, velocidades instantâneas e médias, número de paradas e tamanho de filas.

Uma condição frequente de uso do DRACULA envolve a associação com o modelo SATURN, na qual parte das informações é exportada do modelo de alocação, como apresentado em Ariotti et al. (2004). Desta forma, dados necessários para a codificação da rede e especificação da demanda no DRACULA, como rotas ou volumes, podem ser obtidos através da transferência de arquivos proveniente do SATURN.

3.1.3.3 Modelo VISSIM

O modelo VISSIM (FELLENDORF, 1996; PTV, 2006) foi desenvolvido pela *University of Karlsruhe*, na Alemanha, no início da década de 70. O VISSIM pode ser utilizado para avaliar o desempenho de redes viárias sob diversas condições de configurações de vias, composição do tráfego, presença de semáforos e operação de transporte coletivo.

O VISSIM utiliza o modelo de *car-following* psicofísico de Wiedemann (WIEDEMANN, 1974) para a movimentação longitudinal dos veículos, e um algoritmo baseado em regras de mudança de faixas (*lane-changing*) para a movimentação lateral dos veículos (VÉLEZ, 2006). No modelo de *car-following*, os veículos seguem uns aos outros em um processo oscilatório. Quando um veículo em alta velocidade aproxima-se de outro veículo com velocidade mais baixa, necessita desacelerar. O ponto onde ocorre essa

reação depende da diferença de velocidade, da distância e do comportamento do veículo da frente. Em arcos com mais de uma faixa, os veículos verificam a possibilidade de melhoria de sua velocidade através do modelo de *lane-changing*. Se isso é possível, eles buscam uma brecha na corrente de tráfego da faixa adjacente.

O VISSIM utiliza dois tipos de dados para representação da rede viária: (i) dados sobre a infraestrutura, que correspondem aos arcos, com os pontos de início e fim, comprimento e largura, inclinação da via, número de faixas, localização de paradas de transporte coletivo, entre outros, e (ii) dados para a simulação do tráfego, que incluem: fluxo de veículos nos arcos, bem como os volumes de veículos que realizam conversões nas interseções; rotas de transporte público, frequência das rotas e tempos de parada; e regras de prioridade e programações semaforicas das interseções (CHEN; YU, 2007).

Yu et al. (2008) realizaram uma pesquisa de avaliação de modelos de tráfego e de emissões entre profissionais das áreas acadêmica, governamental e industrial, com atuação nas áreas de transportes, uso do solo e qualidade do ar. Esta pesquisa avaliou aspectos como o uso do modelo no meio técnico-científico, facilidade de implementação, interface amigável e precisão dos resultados. Os resultados indicaram que o modelo VISSIM obteve a maior média geral dentre os modelos avaliados.

3.1.3.4 Modelo INTEGRATION

O modelo INTEGRATION (VAN AERDE, 2004) integra a alocação e simulação de tráfego. O modelo executa a simulação rastreando de forma explícita o movimento dos veículos ao longo da rede viária. O rastreamento dos veículos permite a análise dos movimentos de troca de faixa, aceitação de brechas e manobras em conversões. O modelo de *car-following* utilizado pelo INTEGRATION combina os modelos de Pipes (PIPES, 1966) e Greenshields (GREENSHIELDS, 1935). Nesse modelo de *car-following*, são combinadas características de modelos microscópicos de *car-following* com aspectos dos modelos macroscópicos de fluxo. A principal característica dessa associação de abordagens consiste na representação do percurso do veículo em velocidades constantes apropriadas antes e após a formação de filas.

O INTEGRATION apresenta lógicas distintas para representar eventos de aceleração e desaceleração enquanto simula a transição das velocidades dos veículos. A lógica de desaceleração, baseada na cinemática, reconhece a diferença de velocidade entre o veículo seguidor e o veículo à sua frente. O veículo seguidor estima o espaço excedente entre ele e o veículo à sua frente. Esse espaço excedente corresponde à diferença entre o espaçamento atual e o espaçamento mínimo. Isso garante que o veículo seguidor possa desenvolver uma taxa de desaceleração constante, mantendo o espaçamento mínimo em congestionamentos. As taxas de aceleração são governadas por um modelo de dinâmica veicular, o qual estima a aceleração máxima dos veículos baseada na força resultante.

O modelo INTEGRATION, assim como o VISSIM, pode registrar a velocidade dos veículos com uma resolução de até um décimo de segundo. Isso permite que a taxa de consumo de combustível de cada veículo seja também registrada a cada décimo de segundo com base em sua velocidade atual. Ainda, considerando as mudanças na velocidade, o modelo estima a quantidade adicional de combustível consumido devido aos ciclos de aceleração e desaceleração (VAN AERDE et al., 1996). O INTEGRATION, assim como o AIMSUN e o PARAMICS, apresenta potencial para simulação e avaliação de sistemas inteligentes de transportes (RATROUT; RAHMAN, 2009).

Imasato et al. (2008) investigaram relações entre a atividade operacional dos veículos modelada pelos modelos de simulação de tráfego DRACULA e INTEGRATION e as estimativas de CO previstas pelo modelo de emissões CMEM. Os resultados indicaram que estimativa de CO resultante da simulação através do DRACULA foi significativamente maior do que a estimativa com dados do INTEGRATION. O estudo indicou que características distintas dos processos *car-following* e *lane-changing* em diferentes modelos microscópicos podem ser responsáveis por variações nas acelerações e velocidades instantâneas dos veículos ao longo da rede viária, e conseqüentemente por diferenças nas estimativas de emissões.

3.1.3.5 Modelo PARAMICS

O modelo PARAMICS – PARAllel MICroscopic Simulation – (QUADSTONE, 2004) foi desenvolvido pelo *Edinburgh Parallel Computing Center* e Quadstone Ltd (UK). O PARAMICS é um pacote de micro-simulação de tráfego que inclui três módulos: (i) de modelagem, responsável pelo desenvolvimento da rede viária; (ii) de análise, que fornece dados de saída e as análises e, (iii) de processamento, que realiza as simulações.

O PARAMICS vem sendo aperfeiçoado para representar estimativas de poluição sonora e atmosférica, simulação de tráfego multi-modal, desempenho do tráfego a partir de contagens em tempo real e para fornecer informações das condições do tráfego para serviços a bordo de veículos.

Shaw e Nam (2002) compararam os modelos PARAMICS e VISSIM em termos de facilidade de uso. Os autores compararam o processo de dados de entrada, de codificação e edição da rede, e a apresentação de dados de saída. O estudo apontou que a codificação/edição da rede e os dados de saída do PARAMICS são adequados, porém o processo de dados de entrada precisa de melhorias. Em relação ao VISSIM, todos os critérios testados são aceitáveis. Hidas (2005) comparou PARAMICS e AIMSUN com relação à capacidade de construção do modelo. O autor constatou que o processo de dados de entrada do AIMSUN é mais fácil e rápido do que no PARAMICS, sendo que alguns usuários necessitaram de 30% a 50% menos tempo para usar o AIMSUN do que o PARAMICS.

3.1.4 Aplicabilidade e Limitações dos Modelos de Tráfego

Enquanto os modelos macroscópicos têm habilidade para simular redes viárias extensas eficientemente, não são capazes de representar o comportamento dos veículos individualmente. Além disso, a simulação do efeito provocado por incidentes na rede viária e da reação dos veículos é limitada nesse tipo de modelo. Os resultados obtidos da modelagem macroscópica são estáticos e representam condições médias de desempenho viário. Assim, não são capturadas as variações que ocorrem nas condições de tráfego durante o período de simulação (NESAMANI et al., 2005)

Modelos microscópicos, por outro lado, são adequados para analisar as respostas dos veículos frente às condições do tráfego com mais detalhes. Entretanto, a utilização desses modelos requer cuidados na codificação dos detalhes da rede, devido à sensibilidade dos resultados em função de falhas de codificação (ESPIE et al., 2006).

Os modelos microscópicos são adequados para simulação de pequenas áreas, porém avanços tecnológicos têm permitido seu uso em grandes extensões. No entanto, mesmo que a simulação de grandes redes seja semelhante às pequenas, há uma série de dificuldades práticas, e algumas teóricas, relativas ao desenvolvimento e calibração de tais modelos. Algumas dessas dificuldades foram pouco abordadas na literatura e são, portanto, um obstáculo significativo à aplicação de modelos de simulação microscópica de tráfego em redes de grande escala (JHA et al., 2004).

Nos modelos mesoscópicos, apesar de os veículos serem representados individualmente e manterem sua velocidade individual, seus comportamentos não são modelados em detalhe. Os veículos percorrem a via com a velocidade determinada por uma função macroscópica de velocidade-densidade. A abordagem mesoscópica combina as vantagens da modelagem da corrente de tráfego dinâmica desagregada, onde os veículos são modelados individualmente, com a facilidade de calibração e utilização das relações macroscópicas de velocidade-densidade. A principal área de aplicação de modelos mesoscópicos consiste em situações onde detalhes da simulação microscópica podem ser desejáveis, mas inexecutáveis devido ao extenso tamanho da rede viária, ou indisponibilidade de recursos para codificação da rede modelada.

Em relação à estimativa de emissões, alguns modelos de tráfego apresentam módulos que estimam emissões de poluentes. Tais módulos apresentam, entretanto, grandes variações, tanto em sua abordagem teórica, como em relação aos fatores de emissões associados aos veículos. O esforço de desenvolvimento de pacotes computacionais de modelagem de tráfego raramente contempla uma preocupação com atualização de parâmetros de emissões veiculares. As estimativas de emissões veiculares provenientes dos módulos de emissões de modelos de tráfego devem ser consideradas com cuidado. A seguir são apresentadas algumas ferramentas específicas para a previsão de emissões de poluentes veiculares.

3.2 MODELOS DE EMISSÕES

Modelos de emissões têm sido utilizados para determinar as quantidades de emissões decorrentes do tráfego em função da dificuldade de quantificá-las no mundo real. Modelos desse tipo podem ser utilizados para estimativas de condições futuras e avaliação de novos projetos. Os modelos de emissões podem ser classificados em dois tipos: estáticos e dinâmicos (CAPIELLO, 2002).

Os modelos estáticos representam o nível agregado de consideração de variáveis, enquanto os modelos dinâmicos possuem uma representação mais detalhada das variáveis consideradas. Ainda podem existir variações intermediárias de acordo com o nível de detalhamento considerado, como mostra a Figura 2. Os modelos estáticos são, em geral, baseados na velocidade média dos veículos, enquanto que, os modelos dinâmicos representam as emissões continuamente, em geral, de segundo a segundo. A calibração de ambos os modelos pode ser realizada através de testes em dinamômetros de chassi realizados em laboratório, ou a partir de medições de equipamentos embarcados em veículos.

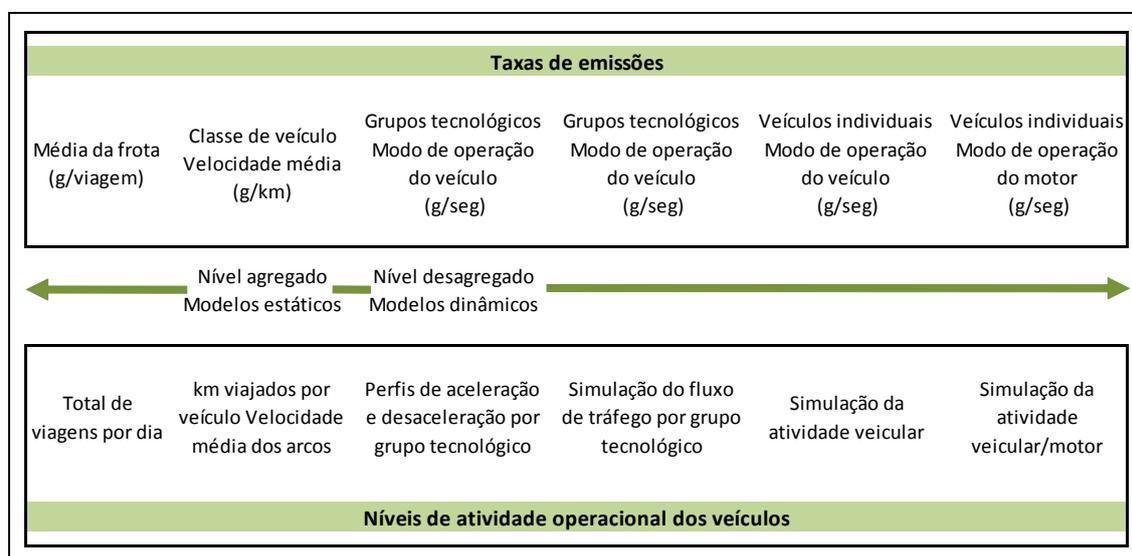


Figura 2 – Níveis de detalhamento em modelos de emissões

Fonte: adaptado de Bachman (1997)

A seguir são apresentadas as principais características de cada tipo de modelo de emissões e exemplos de modelos mais conhecidos.

3.2.1 Modelos de Emissões Estáticos

Modelos de emissões estáticos, modelos baseados em velocidade média, ou ainda, modelos de inventário, estimam fatores de emissões baseados em taxas básicas de emissões para cada tipo de tecnologia de veículo ou motor. Os fatores de emissão estimados para um determinado período em uma determinada área são associados a uma situação de tráfego média, caracterizada pela velocidade média, e à distância viajada no período de análise. Esses modelos, que podem também ser utilizados para estimativa do consumo de combustível, formam a base para o cálculo da qualidade do ar de uma região. De forma geral, os modelos de emissões estáticos assumem a forma da Equação 1.

$$E_i = \sum_c \sum_l KMVV_l * f_c * TBE(\bar{v}_l, c) \quad (1)$$

Em que:

E_i = total de emissões do poluente i ou total de combustível consumido para um dado período (hora, dia, ano) em uma determinada área (região, cidade, rede específica);

c = categoria de veículos;

l = índice da sub-rede (arco específico ou conjunto de vias);

$KMVV_l$ = quilômetros-veículo viajados em dado período na sub-rede;

f_c = proporção de veículos da categoria c ;

$TBE(\bar{v}_l, c)$ = taxa básica de emissão por quilômetro para o poluente i .

A taxa básica de emissão (TBE) é determinada através de ciclos de condução para uma velocidade média particular \bar{v}_l , para cada categoria de veículo c . Por isso, a TBE pode também ser chamada de emissão de ciclo, e caso contrário, se as emissões não forem baseadas na velocidade média, podem ser chamadas de emissões fora de ciclo. As TBEs podem ser utilizadas para diferentes velocidades com o uso de fatores de correção de velocidade (FCV). Esses fatores de correção podem representar diferentes condições de tráfego ou modos de operação, como por exemplo, período de partida a frio ou tipo de via utilizada.

Modelos estáticos são adequados para análises estratégicas, em larga escala, e em casos onde a velocidade média caracteriza o fluxo de tráfego de forma adequada em relação ao objetivo do estudo. É importante salientar que a velocidade média utilizada nesses modelos corresponde à de um ciclo, e um mesmo valor pode representar condições de tráfego diferentes, onde a previsão dos níveis de poluentes emitidos pode ser subestimada (LIN; NIEMEIER, 2003). Entre os modelos estáticos mais utilizados pode-se citar o modelo MOBILE (EPA, 2007), o EMFAC (CARB, 2007) e o COPERT (NTZIACHRISTOS; SAMARAS, 2000).

3.2.1.1 Modelo MOBILE

O modelo MOBILE (EPA, 2007) foi desenvolvido pela agência de proteção ambiental dos Estados Unidos – *Environmental Protection Agency* – EPA em 1978. A última versão, MOBILE 6.2, lançada em 2007, calcula fatores de emissão para 28 classes de veículos em regiões de baixa e alta altitude dos Estados Unidos. As estimativas de fatores de emissão do MOBILE dependem de várias condições, como temperatura ambiente, velocidades médias, modos operacionais do motor, volatilidade de combustível, e taxas de acréscimo de milhagem.

O MOBILE utiliza valores padrão para uma série de condições de fatores intervenientes nas emissões veiculares. Esses valores padrão são utilizados para representar condições médias dos valores dos dados de entrada. Os usuários do modelo podem substituir os valores padrão por informações mais precisas que reflitam as condições locais. O uso de valores locais pode ser comum em locais que possuam inventários de emissões para diferentes categorias de vias, áreas geográficas e distintos períodos nos quais as condições do tráfego variam consideravelmente.

O MOBILE calcula as emissões médias da frota para diversos poluentes, como HC, CO e NO_x, material particulado e emissões evaporativas. O modelo pode estimar emissões para veículos particulares, caminhões, ônibus e motocicletas e considerar diferentes tipos de combustíveis como gasolina, óleo diesel e gás natural veicular.

Em relação às versões anteriores, o MOBILE 6.2 considera ciclos de condução associados ao tipo de via, como expressa, arterial, coletora e local. O MOBILE vem sendo aplicado em diversos países e adaptado de acordo com características locais. Em Toronto, Canadá, Hatzopoulou et al. (2007) associaram o MOBILE com um modelo de demanda de tráfego TASHA – *Travel Activity Scheduler for Household Agents*.

3.2.1.2 Modelo EMFAC

O modelo EMFAC – *EMission FACtor* – (CARB, 2007) foi desenvolvido pelo *California Air Resource Board* para estimar taxas de emissões para HC, CO, NOx, PM, SO₂, Pb, e CO₂, bem como o consumo de combustível, considerando padrões de emissão do estado da Califórnia. O modelo EMFAC fornece fatores de emissão separadamente para partidas a frio, partidas a quente e em condições estabilizadas.

O EMFAC, cuja última versão é o EMFAC 2.30 de 2007, tem estrutura e funções similares ao MOBILE e utiliza relações estatísticas com base em séries de testes de emissões realizadas em veículos novos e usados. Além das condições de teste padrão, muitos veículos foram testados em outras temperaturas, com diferentes composições de combustível, e em ciclos de condução diferentes.

3.2.1.3 Modelo COPERT

O modelo COPERT 4 – *COmputer Programme to calculate Emissions from Road Transport model* – (BEL et al., 2005; EEA, 2007) é um modelo europeu que calcula as emissões produzidas por um ou mais veículos em um ano. A última versão do modelo COPERT 4 é a versão 5.0 e data de dezembro de 2007.

A metodologia COPERT 4 (NTZIACHRISTOS; SAMARAS, 2000; GKATZOFLIAS et al., 2007) calcula os fatores de emissões que descrevem a quantidade de poluentes produzida por um veículo por km. Basicamente, o modelo considera dois tipos de fatores de emissões: fatores de emissões quentes e fatores de emissões frias. Essa diferenciação decorre de que a quantidade de poluentes produzida por um veículo depende diretamente da temperatura do motor. Fatores de emissões quentes correspondem à quantidade de emissões produzidas em condições de temperatura estabilizada do

motor, enquanto que os fatores de emissões frias referem-se aos poluentes gerados no período em que o motor ainda não atingiu a temperatura adequada.

Depois de calculados os fatores de emissões, é possível calcular as emissões a quente e a frio que um veículo produz em um ano. A partir da quantidade emitida em um km, em condições quentes ou frias, multiplica-se pelo número de km rodados por ano, identificando a quilometragem rodada em condições de temperatura do motor quente ou fria.

A identificação da quantidade de quilômetros rodados em condições de temperatura fria ou quente é complexa. Para alcançar resultados mais satisfatórios, o COPERT calcula e utiliza dois fatores de correção: um fator de degradação de milhagem, que considera a idade dos veículos e assume que veículos antigos emitem mais poluentes que veículos novos, e um fator real de combustível, que considera os efeitos de combustíveis melhorados utilizados em veículos antigos, em que esses veículos produzem menos poluição que veículos antigos com combustíveis comuns.

3.2.2 Modelos de Emissões Dinâmicos

Os modelos de emissões dinâmicos, ou modelos modais, consideram, de forma geral, os ciclos de condução dos veículos ao longo de sua trajetória na rede viária, ou seja, a variação dos modos de operação em velocidade constante, acelerando ou desacelerando. Assim, as condições operacionais dos veículos em um determinado tempo, associadas a um valor de velocidade, são registradas simultaneamente com a quantidade de poluentes emitida.

Outras variáveis também podem ser consideradas em modelos dinâmicos, como velocidade do motor, posição do acelerador, uso do ar condicionado, ou ainda, a transição de marchas no câmbio. Para a calibração de modelos na abordagem dinâmica, as emissões são medidas continuamente em testes de dinamômetros de chassi ou através de equipamentos embarcados em veículos, e armazenadas em intervalos de tempo, geralmente, de segundo em segundo (CAPIELLO, 2002).

Medidas instantâneas de características do tráfego permitem a análise e a modelagem instantânea ou modal, baseadas, respectivamente, em variáveis cinemáticas instantâneas, como velocidade e aceleração, ou em variáveis agregadas por modo, como tempo gasto enquanto o veículo está acelerando, em cruzeiro ou parado (CAPIELLO, 2002). De forma geral, os modelos de emissões dinâmicos assumem a forma da Equação 2.

$$E_i(t) = \sum_j e_i(c_j, x_j(t)) \quad (2)$$

Em que:

$E_i(t)$ = total de emissões do poluente i gerado (ou total de combustível consumido) para um dado período de análise em uma determinada área;

j = identificação do veículo;

c_j = categoria do veículo (j);

$x_j(t)$ = representa a variável instantânea ou modal do veículo j no tempo t .

Alguns modelos utilizam também variáveis históricas, como valores passados de velocidade, ou tempo decorrido desde o início da viagem;

$e_i(c_j, x_j(t))$ = representa a emissão do poluente i para o veículo j no tempo t .

Modelos dinâmicos mais conhecidos incluem o VT-Micro (AHN, 1998; AHN et al., 1999; RAKHA et al., 2005), o IVE (DAVIS et al., 2005), o ARTEMIS (ANDRÉ, 2005; ANDRÉ et al., 2006), o CMEM (BARTH et al., 2000) e o MOVES (KROUPAL et al., 2002; CUMBERWORTH et al., 2004).

3.2.2.1 Modelo VT-Micro

O modelo de emissões VT-Micro (AHN, 1998; AHN et al., 1999; RAKHA et al., 2005) foi desenvolvido na *Virginia Tech*, Estados Unidos. O modelo é constituído por regressões lineares, desenvolvidas a partir de uma base de dados derivada de testes realizados em veículos no *OakRidge National Laboratory*. Os dados dos testes foram agrupados em tabelas que apresentam as quantidades de poluentes, em g/s, em função da velocidade e aceleração. Para evitar a estimativa de valores negativos de taxas de emissão, o modelo calcula o logaritmo da taxa de emissão.

O modelo foi validado por Ahn et al. (2002) a partir de dados fornecidos pela EPA. A versão atual do VT-Micro 2.0 (El-SHAWARBY et al., 2005) expandiu os testes de dinamômetros de chassis para 60 veículos, que foram classificados, de acordo com algoritmos de regressão, em cinco categorias para veículos e duas para caminhões leves. O VT-Micro 2.0 foi validado por comparação com medidas obtidas em laboratório, com uma previsão de erro de 17%.

3.2.2.2 Modelo IVE

O modelo IVE – *International Vehicle Emissions* – (DAVIS et al., 2005) foi desenvolvido pelo *International Sustainable Systems Research Center* (ISSRC) e pela *University of California* em Riverside (UCR), com apoio da U.S. EPA. O modelo estima as emissões de uma gama de poluentes, como CO, HC, NOx, CH₄ e CO₂, considerando veículos de passeio, motocicletas, caminhões e ônibus.

A versão mais atual do modelo IVE tem incorporada um conjunto de aproximadamente 1400 tecnologias de veículos. Essas tecnologias foram agrupadas de acordo com vários parâmetros, como por exemplo, tipo e tamanho do veículo, tempo de uso e sistema de alimentação de combustível. O IVE utiliza três grupos de dados para os cálculos das emissões: distribuição da frota veicular, de acordo com as tecnologias; características da região de análise e atividade veicular, que compreendem dados como temperatura média, inclinação das vias, informações da composição de combustíveis, distâncias percorridas e as distribuições dos padrões de condução e dos tempos de resfriamento do motor e; fatores de emissão dos veículos, que envolvem as taxas básicas de emissões em função do tipo de tecnologia dos veículos e fatores de ajuste para diversos efeitos em diferentes condições ambientais e de operação, como temperatura, inclinação da via, programas de inspeção/manutenção e uso de ar condicionado nos veículos.

O modelo IVE foi desenvolvido com o objetivo principal de ser utilizado em países em desenvolvimento que não dispõe de modelos locais e dados de emissões. Nesse contexto e como parte da elaboração do banco de dados da frota veicular, a cidade de São Paulo foi selecionada para a obtenção de dados. Assim, foram realizadas pesquisas

para o levantamento de informações de frota, padrões de condução e padrões dos regimes de partida. Os resultados, apresentados em Lents et al. (2004), indicaram que a frota de veículos leves em São Paulo (75,6%) é similar às frações observadas na Cidade do México (74%) e Santiago, no Chile (79%). Ainda, a maioria dos veículos leves pesquisados em São Paulo, correspondente a 77,6%, foi classificada na categoria veículos a gasolina, quatro cilindros, injeção de combustível multiponto e catalisador de três vias, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 – Proporção de tecnologias de veículos leves em São Paulo

Tecnologias de veículos leves a gasolina	Proporção da frota
Gasolina, quatro cilindros, carburador e sem catalisador	9,5%
Gasolina, quatro cilindros, carburador e catalisador de duas vias	1,7%
Gasolina, quatro cilindros, injeção de combustível simples e sem catalisador	3,9%
Gasolina, quatro cilindros, injeção de combustível simples e catalisador de três vias	6,7%
Gasolina, quatro cilindros, injeção de combustível multiponto e sem catalisador	0,5%
Gasolina, quatro cilindros, injeção multiponto e catalisador de três vias	77,6%

A pesquisa ainda apontou que a cidade de São Paulo possui um alto número de motocicletas nas vias quando comparadas com outras cidades que compõem o banco de dados do IVE, sendo a segunda depois de Pune, na Índia (BARTH et al., 2007), que registrou 55% de veículos sobre duas rodas.

Para corrigir as taxas básicas de emissões, o IVE utiliza um cálculo de demanda de potência no motor por unidade de massa do veículo. Esse fator de potência, expresso em kW/ton, é chamado de potência específica do veículo (VSP, do inglês *Vehicle Specific Power*). O VSP é definido como a potência instantânea por unidade de massa do veículo e busca descrever e quantificar as condições de emissões durante a operação do veículo e os efeitos do ciclo de condução nas emissões. A Equação 3 apresenta a forma de cálculo do VSP.

$$VSP = v [1,1a + 9,81 (\text{atan}(\text{sen}(\text{inclinação da via})) + 0,132) + 0,000302v^3 \quad (3)$$

Em que:

$$\text{Inclinação da via} = (h_{t=0} - h_{t=-1}) / v_{(t=-1 \text{ a } 0 \text{ segundos})}$$

v = velocidade (m/s)

a = aceleração (m/s²)

Desde sua primeira aplicação na quantificação de emissões por Jiménez-Palacios (1999), a abordagem VSP tem sido amplamente utilizada e aceita por outros pesquisadores em modelagem de emissões e consumo de combustível, tornando-se uma tendência no desenvolvimento de modelos com este objetivo (ZHAI et al., 2008). O benefício dessa variável envolve a combinação no mesmo parâmetro de fatores físicos que influenciam o nível de emissões e o consumo de combustível, como velocidade e aceleração do veículo, e a inclinação da via.

Segundo Lents et al. (2004), o VSP é o melhor, embora imperfeito, indicador de emissões dos veículos em relação à taxa básica de emissão dos veículos. Cerca de 75% da variação das emissões pode ser contabilizada usando o VSP. Para melhorar ainda mais a correção das emissões em função do ciclo de condução dos veículos, o IVE utiliza um fator que considera uma estimativa da rotação por minuto do veículo (RPM) combinada com a média da força exercida pelo veículo nos últimos 15 segundos antes do evento de interesse. Esse fator é chamado de força do veículo (STR, do inglês *Engine Stress*) e pode assumir três níveis: baixo, médio e alto.

Para a estimativa das emissões, o IVE associa os fatores de VSP e STR. São definidas vinte categorias de VSP e considerados os três níveis de STR que, combinados, determinam sessenta pares, denominados *power bins*. A partir de dados de velocidades e acelerações registrados segundo a segundo são calculados os valores de VSP e STR, e então determinada a fração do tempo de viagem em que o modo de condução se refere a cada um dos *power bins*.

No Brasil, o IVE foi utilizado por Castro (2008) para avaliar a influência de fatores intervenientes nas emissões veiculares em corredores de ônibus de alta capacidade. O

autor analisou diferentes cenários e tecnologias de ônibus para identificar impactos nas emissões de poluentes. Dentre os principais resultados, o autor apontou a importância de infraestrutura e condições operacionais adequadas para permitir a melhoria dos ciclos de condução dos ônibus.

3.2.2.3 Modelo ARTEMIS

O modelo ARTEMIS – *Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems* – (ANDRÉ, 2005; ANDRÉ et al., 2006) é um modelo europeu que dispõe de uma base de dados de fatores de emissão e fornece uma série de procedimentos para o cálculo de emissões (KELLER; KLJUN, 2007). O cálculo de emissões requer situações específicas de entrada no modelo, descrevendo as características do tráfego, em uma situação particular ou em um ponto específico. No entanto, o modelo necessita de outros dados adicionais informados pelo usuário.

O modelo ARTEMIS é composto, basicamente, pelos seguintes elementos:

- Uma base de dados de fatores de emissão: esses fatores estão baseados em medidas de emissões realizadas no Projeto ARTEMIS e de outras fontes como bases nacionais.
- Um modelo de frota: esse modelo permite ao usuário configurar a composição de frota necessária para um local em particular, para um ou vários anos.
- Um módulo de fator de emissão: esse módulo permite o acesso ao banco de dados de fatores de emissão e, calcula os fatores de emissão para situações particulares de tráfego (para um país, para um ou vários anos) utilizando a composição de frota especificada pelo usuário através do modelo acima mencionado.
- Um modelo de emissões: esse modelo pode calcular as emissões globais em uma base agregada para um país ou região ou cidade, ou para uma rede viária específica, em uma base de arcos. Para esse cálculo, o modelo novamente

busca a descrição do tráfego especificada pelo usuário e os fatores de emissão incorporados no modelo de frota.

Os dados utilizados na definição dos ciclos de condução do ARTEMIS foram coletados de 60 veículos particulares na França, Inglaterra e Alemanha. Estes veículos portavam equipamentos de medição a bordo. Foram percorridos mais de 160.000 km em 10.500 viagens monitoradas. Desta forma, os ciclos de condução do ARTEMIS foram divididos em três tipos: (i) urbano, (ii) rural e (iii) para vias expressas (ANDRÉ, 2004).

3.2.2.4 Modelo CMEM

O CMEM – *Comprehensive Modal Emissions Model* – (BARTH et al., 2000) é um modelo de emissão modal físico, baseado na demanda por potência, desenvolvido na Universidade da Califórnia em Riverside e na Universidade de Michigan. O modelo pode estimar as emissões de CO, HC, NO_x e CO₂ e o consumo de combustíveis segundo a segundo, em função do modo de operação dos veículos.

O modelo considera 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 (ii) a (iv) 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 anteriormente à sua partida. O modelo determina quando a condição de operação alterna da condição de partida a frio para a operação plenamente aquecida.

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 utilizados para compor a base de dados do CMEM são representativos da frota de Riverside, Califórnia, no ano de 1997. O CMEM, assim

como o IVE, calcula a demanda por potência do veículo para realizar a estimativa das emissões.

3.2.2.5 Modelo MOVES

O modelo MOVES – *MOtor Vehicle Emission Simulator* – (KROUPAL et al., 2002; CUMBERWORTH et al., 2004) está sendo desenvolvido pela *Environmental Protection Agency* (EPA) e pretende substituir o modelo MOBILE, expandindo o universo de análises. O MOVES utiliza a abordagem de *power bins*, da mesma forma que IVE e CMEM. Além disso, a calibração do MOVES considera tecnologias de medidas embarcadas em veículos, ao contrário de utilizar apenas testes em dinamômetros de chassis.

O MOVES apresenta a vantagem da facilidade de incorporar dados provenientes de diversas fontes, ao contrário do MOBILE que apresenta uma estrutura limitada para inserção de novos fatores de emissões. Ainda, o MOVES apresenta melhor estrutura computacional que o MOBILE, proporcionando ferramentas de mais fácil manipulação pelo usuário.

O MOVES possui capacidade para analisar emissões provenientes de redes viárias extensas, em nível regional, e de projetos viários em áreas menores. O modelo pode estimar emissões para diferentes tipos de vias, através da consideração de padrões de condução típicos para cada via. Ainda, o usuário pode criar novas distribuições de modo de operação baseadas em outros ciclos de condução.

3.3 RELAÇÕES ENTRE AS ABORDAGENS DE MODELAGEM

As seções anteriores apresentaram, de forma individual, as características de cada tipo de modelagem de tráfego e de emissões. A partir disso, foram mapeadas as relações entre as diferentes abordagens, como é apresentado na Figura 3. De forma geral, têm-se três níveis de análise: (i) modelos de tráfego, que fornecem parâmetros de desempenho do tráfego; (ii) modelos de emissões, que prevêm a quantidade de poluentes emitida pelos veículos e, (iii) modelos de dispersão de poluentes, que proporcionam índices da qualidade do ar na região analisada.

Os dados provenientes de modelos macroscópicos e mesoscópicos de tráfego são adequados para utilização em modelos de emissões estáticos, que representam o nível agregado de consideração de variáveis. Da mesma forma, informações de modelos microscópicos e mesoscópicos podem ser incorporadas a modelos de emissões dinâmicos, os quais exigem informações mais detalhadas para sua utilização. Os resultados de ambos os modelos de emissões estáticos e dinâmicos podem alimentar modelos de dispersão de poluentes. Como mencionado anteriormente, a análise da qualidade do ar através de modelos de dispersão de poluentes não está incluída no foco deste trabalho.

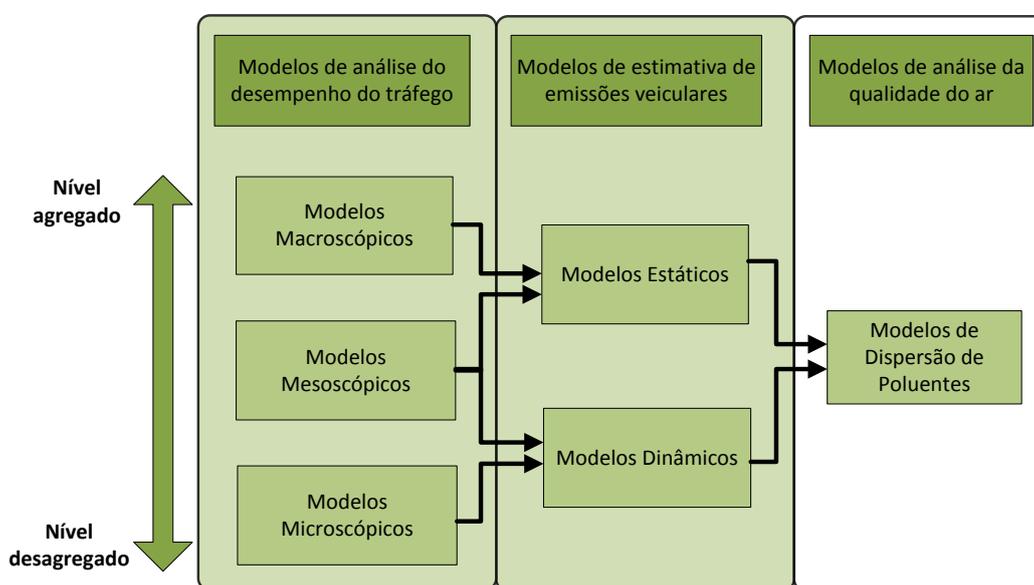


Figura 3 – Relações entre as abordagens de modelagem

A associação de modelos de tráfego a fim de fornecer informações para subsidiar as estimativas de emissões pode trazer benefícios, uma vez que podem ser avaliados em nível detalhado os eventos que contribuem para os níveis de emissões. A seguir são apresentadas as principais características da utilização da abordagem híbrida da modelagem de tráfego.

3.4 MODELAGEM HÍBRIDA DE TRÁFEGO

A literatura reporta trabalhos que utilizaram abordagem híbrida pela utilização simultânea de modelagem macroscópica/mesoscópica e microscópica. No entanto, a abordagem considerada híbrida, nestes trabalhos, se refere aos próprios modelos, que

apresentam características agregadas e desagregadas em uma mesma estrutura de modelagem.

O uso da simulação de tráfego microscópica tem crescido devido aos avanços tecnológicos e computacionais. No entanto, esforços para a calibração microscópica e a preparação dos dados de entrada dos modelos frequentemente tem inibido seu uso em grande escala. Por isso, modelos com características híbridas, mesoscópicas/microscópicas, como os modelos de Burghout (2004), Burghout et al. (2005), Yang e Morgan (2006) e Shi e Ziliaskopoulos (2006) têm sido reportados na literatura. Esses modelos permitem a simulação microscópica em áreas específicas de interesse, enquanto simulam as áreas remanescentes com menos detalhes, em nível mesoscópico. Outros modelos ainda utilizam a abordagem híbrida macroscópica e microscópica, como os modelos de Bourrel e Lesort (2003), Magne et al. (2000), Poschinger et al. (2000), Espie et al. (2006) e Mammam et al. (2006).

A utilização integrada de diferentes níveis de modelagem de tráfego necessita a observação de cuidados específicos. As principais recomendações para a utilização de modelos de abordagem híbrida envolvem:

- Consistência da representação da rede: uma das mais importantes condições básicas para a consistência geral entre as duas abordagens é a representação da rede viária, especialmente na definição dos limites entre os dois modelos. A consistência da representação da rede tem implicações na determinação da capacidade, e conseqüentemente, impactos nas dinâmicas do tráfego nos limites entre os dois modelos.
- Consistência na representação da escolha de rotas: a escolha de rotas entre as duas abordagens necessita ser consistente para garantir que os veículos adotem as mesmas decisões. Isto significa que a representação das alternativas necessita ser adequada no modelo híbrido, bem como a definição dos custos associados aos arcos da rede viária.

- Consistência das condições dinâmicas do tráfego nos limites das duas abordagens: as condições dinâmicas dos limites à montante e à jusante dos limites entre as duas abordagens devem ser garantidas. Por exemplo, quando uma fila é formada à jusante do limite físico entre as duas abordagens, ela pode continuar no outro sub-modelo, ultrapassando o limite. Assim, a definição do limite entre as abordagens deve ser cuidadosamente analisada.
- Consistência do desempenho entre as duas abordagens: idealmente, as estruturas da rede viária devem ser modeladas de modo a representar suficientemente bem as condições do tráfego nos dois modelos. Assim, os resultados em ambos os modelos, como por exemplo, tempos de viagem, fluxos, velocidades ou densidades, devem ser similares. Isso implica na necessidade de calibração consistente dos dois modelos.
- Adequada troca de informações entre as abordagens: os sub-modelos necessitam de adequada transmissão de dados das características dos veículos e das condições de tráfego. Isso requer uma eficiente sincronização e comunicação de informações, e um projeto de simulação que minimize a frequência e a quantidade de dados transmitidos de um modelo para outro.

A abordagem híbrida de modelagem de tráfego pode ser utilizada para atender objetivos distintos ou avaliar diferentes situações. Quando utilizada para analisar emissões veiculares em grandes áreas urbanas como é o caso deste trabalho, apresenta como principais vantagens a diminuição dos esforços de calibração de modelos microscópicos e, em consequência da análise detalhada em regiões menores, também reduz a quantidade de dados utilizados em modelos de emissões dinâmicos, cuja base de informações, em geral, é dada por veículo/segundo.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A modelagem das emissões veiculares contempla a utilização de informações operacionais do tráfego e da rede viária e, de variáveis que exercem influência sobre o nível de emissões produzido, como por exemplo, composição da frota, idade dos

veículos, padrão tecnológico dos veículos, percentual de viagens realizadas por veículos com motores frios, umidade do ar e características dos combustíveis.

A utilização de modelos de tráfego para estimativa das emissões veiculares é útil na medida em que eles representam as dinâmicas e o comportamento do tráfego urbano em escala temporal e espacial. Os modelos macroscópicos e mesoscópicos capturam as informações dinâmicas do tráfego com menos detalhes, porém, de forma mais rápida e com maior facilidade de aplicação e calibração do que os modelos microscópicos. Por essa razão, eles são mais adequados para a modelagem em redes amplas, enquanto que os modelos microscópicos são usualmente aplicados em redes de pequena extensão.

A integração dos modelos de tráfego, através de uma abordagem híbrida, associada a modelos de emissões, conserva as vantagens individuais de cada abordagem e pode aumentar a precisão dos resultados. O capítulo a seguir apresenta um método que utiliza diferentes abordagens de modelagem com vistas a melhorar as estimativas de emissões em áreas urbanas.

4 MÉTODO PROPOSTO

O planejamento e gerenciamento do sistema de transporte urbano, incluindo a avaliação de novos projetos viários, envolvem a análise de diversas esferas, como econômica, financeira, de desempenho do tráfego e dos impactos ambientais. Uma maneira de avaliar impactos ambientais decorrentes das alterações viárias, como as emissões veiculares, é a utilização de ferramentas de modelagem de tráfego e de emissões.

Este capítulo apresenta o método proposto para aprimorar as estimativas de emissões veiculares através da utilização de uma abordagem híbrida de modelagem de tráfego associada a modelos de emissões. O método integra diferentes modelos de tráfego através de uma estrutura que associa conceitos distintos de simulação. Assim, busca-se identificar, através da modelagem agregada, trechos da rede viária em que determinadas condições ou características podem implicar níveis de emissões diferenciados e, posteriormente, usar a modelagem microscópica nesses trechos. Inicialmente é apresentada a estrutura do método e após são descritas as suas etapas constituintes.

4.1 APRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA DO MÉTODO

O método proposto neste trabalho para aprimorar a estimativa de emissões veiculares em áreas urbanas é composto por dez etapas. O método foi desenvolvido com base em um estudo de caso, detalhado no próximo capítulo, e cujos resultados são apresentados no capítulo 6.

A utilização do método pode envolver o diagnóstico das emissões veiculares de uma região, ou a avaliação de projetos de transportes, que podem incluir, por exemplo, mudanças nos sentidos de circulação viária, alteração ou implantação de semáforos, construção de novas vias ou ainda modificações na demanda de viagens. A Figura 4 apresenta a estrutura metodológica proposta.

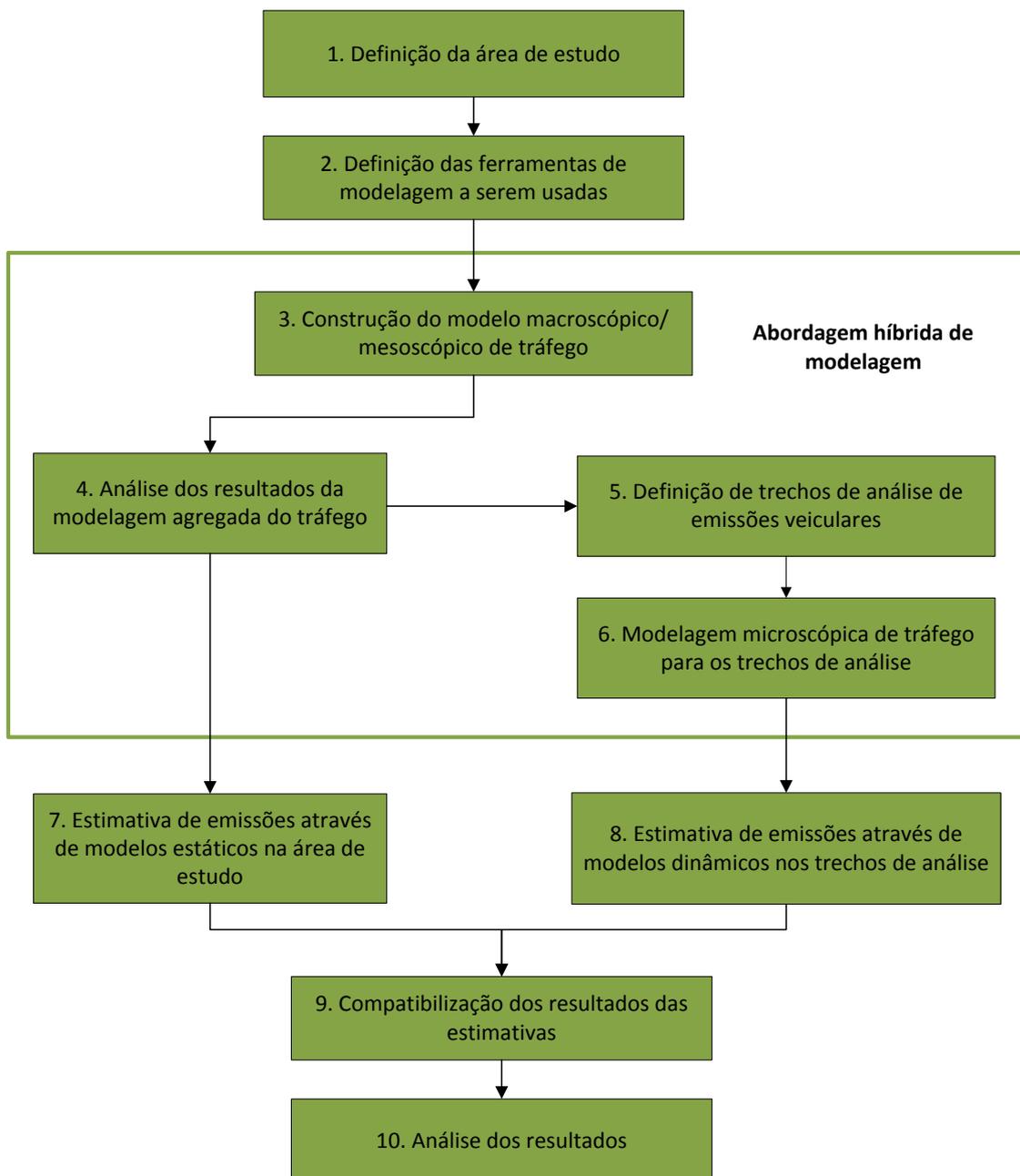


Figura 4 – Estrutura do método proposto

A seguir são descritas as etapas do método e as recomendações para sua utilização.

4.1.1 Definição da área de estudo

A área de estudo a ser considerada na utilização do método representa a região da rede viária que demanda um diagnóstico dos níveis de emissões ou que representa a região de abrangência de um projeto de transportes a ser avaliado. Neste caso, a extensão da área de estudo deve considerar a região na qual são previstas alterações,

sejam elas em relação à oferta por transporte ou à operação da rede, até o limite onde os efeitos dessas alterações têm algum impacto. Os critérios utilizados para essa definição são baseados em conhecimentos técnicos da região de estudo e do projeto a ser avaliado.

4.1.2 Definição das ferramentas de modelagem a serem usadas

O método propõe a utilização integrada de modelos agregados e desagregados de tráfego associados a modelos de estimativas de emissões. Em relação aos modelos de tráfego, a escolha das ferramentas deve considerar a forma de representação da rede viária, ou seja, a rede viária deve ser codificada de maneira que seja possível a comparação dos parâmetros de análise de tráfego dos dois modelos. Quanto aos modelos de estimativa de emissões, é importante que a base de dados de fatores básicos de emissões e de informações da frota de veículos seja compatível, para que seja possível a comparação das estimativas.

4.1.3 Construção do modelo macroscópico/mesoscópico de tráfego

Esta etapa contempla o desenvolvimento do modelo de tráfego em nível agregado de variáveis através do uso de modelos macroscópicos ou mesoscópicos. Assim, nesta etapa ocorre a representação da rede viária e da demanda de viagens, considerando as particularidades do modelo utilizado. A demanda de viagens pode envolver a consideração de diferentes categorias de veículos, como transporte privado, público ou de carga e é, usualmente, informada para o modelo através de uma matriz origem/destino entre as zonas de tráfego da área de estudo.

Em geral, modelos agregados representam a rede viária através de um conjunto de arcos, ou de arcos e nós, onde os arcos correspondem às vias, e os nós às interseções viárias. Alguns modelos deste tipo podem realizar a alocação do tráfego em rotas, onde são definidos os fluxos nas vias, de acordo com a capacidade viária informada para o modelo.

Nesta etapa, um aspecto importante que deve ser observado refere-se à calibração do modelo de tráfego, uma vez que as condições modeladas poderão ser representadas

posteriormente em nível microscópico. Se a calibração for adequada, menores são as possibilidades de propagação de erros devido ao processo de representação do tráfego.

4.1.4 Análise dos resultados do desempenho agregado do tráfego

Esta etapa compreende a análise dos parâmetros de desempenho viário provenientes da modelagem agregada do tráfego. É importante que o modelo de tráfego utilizado permita a análise segregada por arcos ou trechos, onde seja possível identificar características da rede viária ou condições de tráfego que indiquem a possível ocorrência de altos níveis de emissões.

Assim, esta etapa subsidia a divisão da rede viária em trechos específicos para análise de emissões. Os parâmetros agregados mais importantes para definição dos trechos de análise envolvem volumes de tráfego e velocidades médias. Porém outras informações, caso sejam fornecidas pelo modelo, também podem ser úteis para a definição dos trechos de análise, como tamanho de filas ou relação volume/capacidade nos arcos.

4.1.5 Definição de trechos de análise de emissões

Esta etapa consiste na definição de trechos da rede viária que necessitam de análise detalhada do comportamento do tráfego. Esses trechos foram denominados de Trechos de Análise de Emissões (TAE) e caracterizam-se por apresentarem fatores ou condições que potencialmente provocam índices diferenciados de emissões quando modelados em distintos níveis de detalhamento. As diferenças podem ocorrer principalmente devido ao fato de que em nível agregado não são capturadas informações de eventos que provocam aumento nos níveis de emissões, como picos de aceleração.

Um trecho de análise de emissões (TAE) pode ser simplesmente um segmento da via, a composição de vários segmentos da mesma via ou ainda, a combinação de segmentos de vias diferentes. A divisão da rede viária em trechos de análise de emissões é condicionada às características de codificação dos modelos e às particularidades da

rede. Ainda, a análise técnica da área de estudo também pode auxiliar a seleção dos trechos.

A definição dos trechos de análise deve ser baseada na identificação de características específicas que influenciam as emissões veiculares. Estas características podem ser relacionadas à oferta, referentes ao projeto, ou à demanda de transportes, derivadas da modelagem de tráfego. A Figura 5 apresenta alguns exemplos das características que podem auxiliar a definição dos trechos de análise. Entende-se que alterações de uma ou mais destas características podem provocar mudanças importantes nos ciclos de condução dos veículos e, conseqüentemente, nos níveis de emissões.

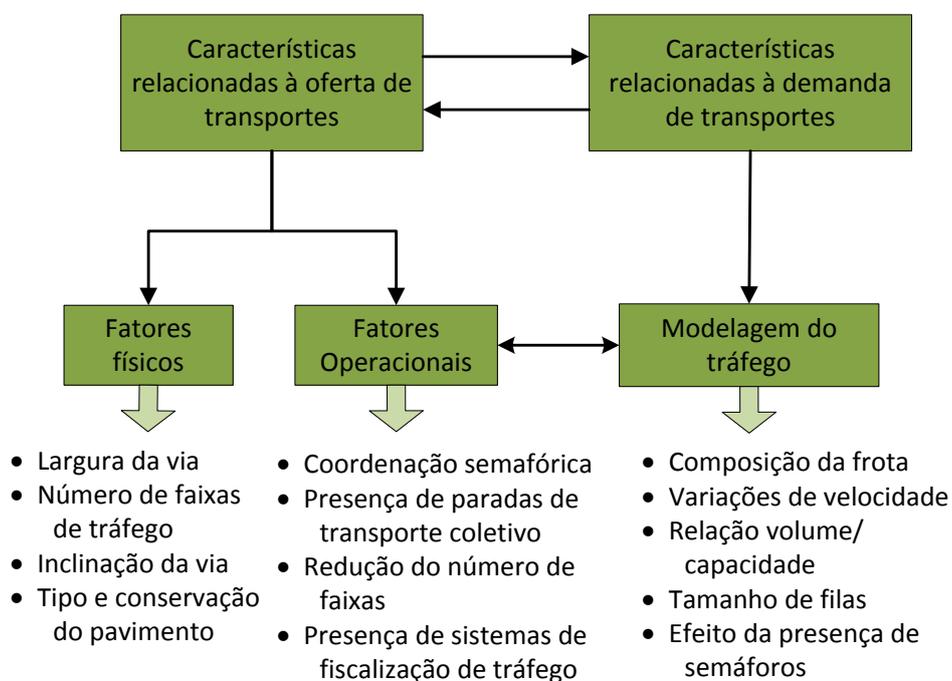


Figura 5 – Exemplos de características relevantes para definição dos TAEs

As características relacionadas à oferta de transportes podem ser divididas em fatores físicos ou operacionais. Os fatores físicos podem envolver aspectos do projeto geométrico, como largura da via, número de faixas de tráfego ou inclinação da via e, condições de qualidade das estruturas viárias, como tipo e conservação do pavimento. Os fatores operacionais envolvem os aspectos que podem afetar a operação do tráfego de acordo com sua existência ou modo de operação, como a coordenação

semafórica, presença de pontos de parada de transporte coletivo, redução do número de faixas de tráfego ou presença de sistemas de controle ou fiscalização de tráfego.

As características relacionadas à demanda por transportes, que se referem aos aspectos da modelagem de tráfego, envolvem os parâmetros de saída do modelo de tráfego e a análise destes parâmetros. Exemplos de parâmetros decorrentes da modelagem podem envolver a composição da frota, variações de velocidade, relação volume/capacidade, tamanho de filas ou efeitos da presença dos semáforos.

4.1.6 Modelagem microscópica do tráfego

Esta etapa prevê a simulação dos trechos de análise de emissões (TAEs) definidos na etapa anterior através de modelos de micro-simulação de tráfego. A codificação dos TAEs no modelo de tráfego microscópico deve ser realizada de forma que a equivalência espacial desses trechos seja garantida.

A equivalência espacial dos TAEs nas duas abordagens de tráfego presume que as características físicas e operacionais da rede viária sejam iguais ou semelhantes, principalmente, em relação ao tamanho dos arcos, número de faixas, características de interseções, conversões permitidas, regras de prioridade e velocidade codificada. Isso é importante para a estimativa de emissões, uma vez que são evitadas discrepâncias nos níveis de emissões decorrentes de diferenças na codificação dos modelos. O auxílio de sistemas de informações geográficas pode contribuir para a compatibilidade espacial da codificação dos modelos agregados e desagregados de tráfego.

Outro ponto importante para a simulação dos TAEs em nível microscópico é a alocação dos fluxos de tráfego. Se os fluxos são derivados do modelo agregado, deve-se garantir a equivalência das rotas entre as zonas de tráfego e os volumes associados a cada rota.

Ainda, para reproduzir os efeitos da variabilidade aleatória das condições do tráfego na modelagem microscópica, recomenda-se a simulação dos TAEs considerando diferentes sementes estocásticas. Assim, sugere-se utilizar como insumos do modelo de emissões dinâmico, os resultados obtidos da simulação com cada semente estocástica.

4.1.7 Estimativa de emissões através de modelos estáticos na área de estudo

Esta etapa corresponde à estimativa de emissões veiculares através da utilização de modelos estáticos. O cálculo da estimativa de emissões deve utilizar como dados de entrada, as informações provenientes do modelo de tráfego agregado para a área de estudo. Estas informações podem envolver, principalmente, os fluxos de tráfego e as velocidades médias. Como recomendado anteriormente, é importante que as informações do modelo de tráfego agregado sejam dadas por arcos ou trechos para subsidiar a posterior compatibilização dos resultados.

A estimativa de emissões de forma estática utiliza valores médios das variáveis de tráfego, mas também necessita de dados adicionais, como a composição da frota de veículos da área de estudo, informações sobre os combustíveis utilizados e a porção da frota que utiliza cada tipo de combustível. Ainda, variáveis ambientais ou climatológicas, como temperatura média e altitude, podem ser solicitadas pelo modelo de emissões estático.

4.1.8 Estimativa de emissões através de modelos dinâmicos nos trechos de análise

A estimativa de emissões através de modelos de emissões dinâmicos nos trechos de análise de emissões (TAE) é decorrente de informações do modelo de tráfego microscópico. Os dados para o cálculo da estimativa de emissões envolvem as informações da atividade operacional dos veículos ao longo da rede viária, ou dos trechos de análise, com resolução temporal mínima a cada segundo. A atividade operacional corresponde à representação dos ciclos de condução dos veículos durante o período da simulação, ou seja, são representados os tempos em que os veículos estiveram em velocidade constante, acelerando ou desacelerando.

Dependendo do modelo de emissões utilizado, essas informações podem ser transformadas em dados de potência, onde as emissões são relacionadas com a demanda por potência dos veículos. Assim como nos modelos estáticos, os modelos dinâmicos exigem algumas informações adicionais para o cálculo das emissões, como por exemplo, composição da frota veicular, características de combustíveis e frota associada a cada tipo, distribuição dos tempos de resfriamento do motor, temperatura

ambiente e altitude. É importante enfatizar que tais informações devem ser compatíveis com os dados utilizados no modelo estático, para que seja possível a comparação e a compatibilização dos resultados.

Outro ponto importante que deve ser considerado para a utilização do método proposto diz respeito à compatibilidade dos fatores de emissão básicos utilizados em ambos os modelos estático e dinâmico. As taxas de emissão básicas devem corresponder à composição de frota considerada no estudo. Valores diferentes de fatores de emissões calculados para veículos distintos nos dois tipos de modelos podem invalidar a análise comparativa da estimativa de emissões.

4.1.9 Compatibilização dos resultados das estimativas de emissões

Esta etapa consiste na compatibilização dos resultados das estimativas de emissões derivadas dos modelos estático e dinâmico. A divisão da área de estudo em trechos de análise de emissões permite a comparação direta das estimativas obtidas nestes trechos a partir de cada um dos modelos utilizados. Se o objetivo final da análise prevê a estimativa global de emissões de poluentes em toda a área de estudo, como propõe o método desta tese, uma alternativa é a substituição dos valores de emissões calculados com o modelo estático pelos valores estimados com o modelo dinâmico.

É importante ressaltar que, para que a compatibilização dos resultados seja adequada, os trechos de análise considerados nos modelos de tráfego macroscópico e microscópico devem assumir uma coerência espacial e operacional aceitável, caso contrário, a compatibilização não é possível. Vale lembrar novamente que, além dessas condições referentes aos modelos de tráfego, as consistências entre os modelos de estimativa de emissões devem ser adequadas, tanto em termos das taxas básicas de emissões quanto em relação às demais variáveis ambientais consideradas nos modelos.

4.1.10 Análise dos resultados

A última etapa do método proposto consiste na análise dos resultados de estimativas de emissões. A análise pode envolver ainda a relação entre os níveis de emissões

calculados e as características dos trechos de análise, buscando identificar quais os fatores mais influentes para diferenças nas estimativas de emissões. Este tipo de análise pode contribuir para a elaboração de políticas para o planejamento de transportes e subsidiar a elaboração de estratégias para auxiliar no gerenciamento do sistema viário.

É importante salientar que a melhoria da estimativa de emissões prevista no método proposto está condicionada à adequada definição dos trechos de análise de emissões (TAE). Por isso, a análise de resultados referente à etapa do modelo agregado de tráfego é muito importante, pois subsidia a definição dos TAEs.

4.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou o método proposto para a melhoria das estimativas de emissões em redes viárias urbanas através da modelagem híbrida de tráfego associada à estimativa de emissões. Uma série de cuidados que devem ser observados para a utilização do método foi destacada, principalmente no que se refere à compatibilidade de abordagens de simulação de tráfego. O próximo capítulo descreve as etapas metodológicas realizadas no estudo de caso que subsidiaram o desenvolvimento e a consolidação do método proposto neste trabalho.

5 ESTUDO DE CASO

Este capítulo apresenta o estudo de caso desenvolvido para a elaboração e detalhamento do método proposto neste trabalho. O estudo de caso prevê a caracterização das condições de tráfego que podem contribuir para variações nos ciclos de condução dos veículos, e conseqüentemente, nos níveis de emissões. O objetivo do método é aprimorar a estimativa de emissões a partir da utilização de informações do desempenho viário provenientes de modelos de tráfego com diferentes níveis de representação das variáveis de fluxo veicular.

5.1 DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo definida para o desenvolvimento do método corresponde a uma porção da rede viária da cidade de Porto Alegre, Brasil. O uso do solo da região envolve áreas comerciais e de serviços, complexo de ensino e saúde e área militar. A rede viária modelada tem extensão de aproximadamente 33 km, e engloba três importantes eixos de ligação do município. As vias que compõem a rede modelada podem ser classificadas em arteriais e coletoras. A Figura 6 apresenta a rede modelada neste estudo.

A área de estudo foi dividida em 21 zonas de tráfego, sendo que as entradas e saídas de pólos geradores de tráfego, como *shopping* e universidade, foram consideradas zonas internas da rede. A rede viária modelada apresenta características heterogêneas em relação à hierarquia das vias, projeto geométrico e sistema de controle do tráfego em interseções, e diferentes condições de congestionamento em pontos distintos da área de estudo. A existência de tais características na rede viária é importante para possibilitar a identificação de fatores que podem estar associados a diferenças significativas nos níveis de emissões quando estimados por modelos agregados e desagregados.

5.3 CONSTRUÇÃO DO MODELO MESOSCÓPICO DE TRÁFEGO

O modelo de tráfego em nível mesoscópico foi construído com a utilização do modelo de alocação e simulação SATURN (VAN VLIET; HALL, 2000). A seguir são apresentadas as características da codificação da rede viária e representação da demanda de viagens, e os aspectos considerados na calibração do modelo.

5.3.1 Representação da rede viária e demanda de viagens no SATURN

A rede viária modelada no SATURN é constituída de arcos e nós. Cada arco representa um segmento de via entre dois nós, e cada nó corresponde a uma interseção viária ou a um semáforo. Assim, o SATURN utiliza como dados de entrada para a rede de simulação informações do tipo de nó e dos arcos associados. Os nós podem ser de três tipos: (i) prioritários, que representam locais sem sistema de controle do tráfego e, por isso, obedecem a regras de prioridade de movimentos; (ii) semaforicos, que correspondem aos locais onde o controle do tráfego é regido por semáforos; e, (iii) externos, que referem-se aos limites da rede viária.

Cada nó codificado no SATURN é identificado por um código e recebe informações das aproximações (arcos) que são ligadas a ele. Assim, são informados, para cada aproximação, o comprimento do arco, a velocidade de fluxo livre, os movimentos permitidos e proibidos na interseção, os fluxos de saturação para cada movimento e a definição das faixas de tráfego que podem realizar as conversões.

Para os nós semaforicos, também é informada a programação semaforica através do tempo de ciclo, dos tempos dos estágios semaforicos, dos movimentos associados a cada estágio e das faixas de tráfego em que é possível realizar tais movimentos. Os nós externos representam as extremidades da rede viária e, em geral, são ligados aos conectores, que correspondem às ligações entre os centróides das zonas de tráfego e a rede viária.

A Figura 7 ilustra a rede viária modelada no SATURN, construída sobre uma base de dados geo-referenciada em um sistema de informações geográficas (SIG). A rede viária representada no SATURN é composta de 209 arcos e 171 nós.

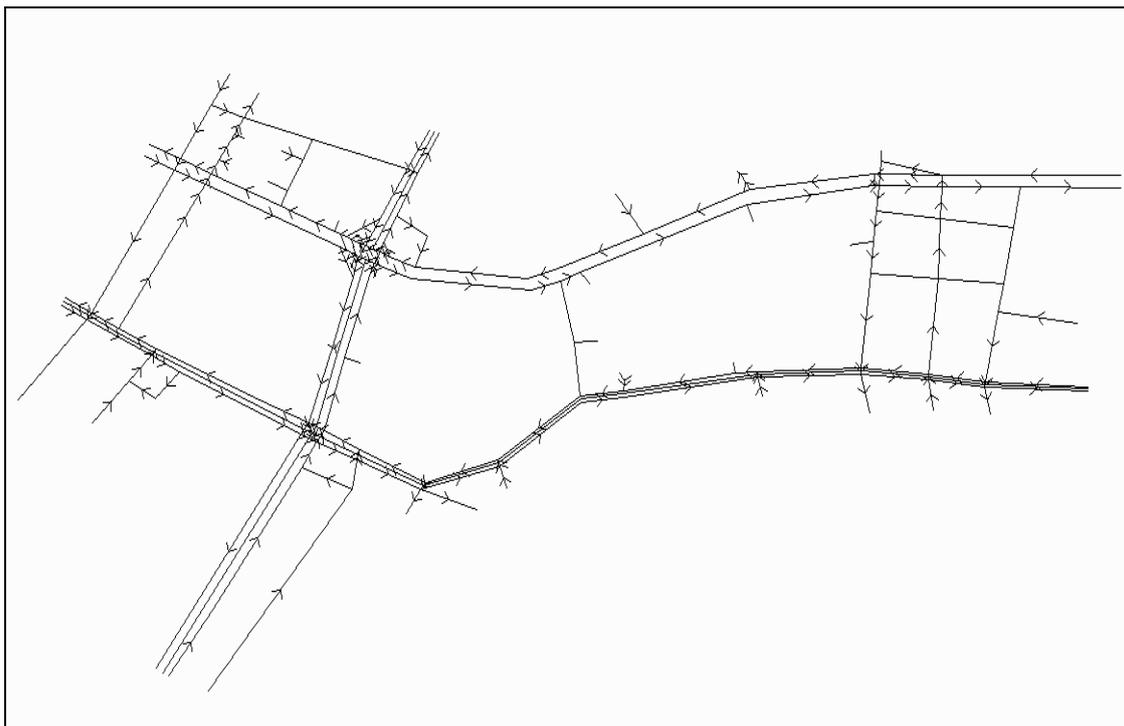


Figura 7 – Representação da rede modelada no SATURN

As informações de demanda utilizadas no estudo provêm de uma matriz de viagens preliminar, ou matriz semente, construída a partir de dados da pesquisa origem/destino de Porto Alegre referentes à área de estudo. A matriz de viagens corresponde ao volume de veículos para o período de uma hora. A partir da rede viária codificada e da matriz de viagens, o módulo de alocação de tráfego do SATURN permite identificar as rotas utilizadas pelos veículos, considerando a função de custo generalizado adotada pelo modelo.

5.3.2 Calibração do modelo SATURN

A calibração do modelo de tráfego no SATURN foi realizada através de métodos tradicionais, buscando a melhor representação dos fluxos nas vias. Assim, a matriz semente de viagens, que no caso deste estudo considerou apenas veículos leves, foi submetida ao processo de atualização do modelo ME2 inserido no SATURN. O ME2 (MATZOROS et al., 1987; WILLUMSEN, 1992) estima matrizes origem/destino a partir de contagens volumétricas de veículos. As contagens de veículos referem-se a pontos estratégicos da rede viária capazes de representar as principais demandas observadas.

5.4 CONSTRUÇÃO DO MODELO MICROSCÓPICO DE TRÁFEGO

Para que fosse possível a identificação das características que poderiam gerar níveis de emissões diferenciados entre as estimativas derivadas de dados agregados ou desagregados, a rede viária modelada no SATURN foi também codificada no modelo microscópico VISSIM (FELLENDORF, 1996; PTV, 2006). Esta etapa do estudo de caso prevê a compatibilização das características de representação da oferta e demanda para a área de estudo em ambos os níveis de detalhamento das variáveis de fluxo de tráfego, agregados e desagregados, segundo os preceitos necessários para o desenvolvimento de modelos híbridos.

5.4.1 Representação da rede viária e demanda de viagens no VISSIM

A representação da rede viária no modelo VISSIM foi realizada a partir de fotos aéreas geo-referenciadas. Este recurso permitiu a compatibilidade geométrica com a rede modelada no SATURN. A codificação da rede viária no VISSIM é dada por *links* e conectores. Os *links* representam os segmentos viários que podem incluir interseções e semáforos. A representação dos movimentos das conversões é feita através dos conectores, que também são usados para conectar *links* quando há alteração no número de faixas de tráfego. A rede viária modelada no VISSIM possui 89 *links* e 158 conectores.

Os semáforos codificados no VISSIM reproduziram as programações dos ciclos e movimentos permitidos do SATURN. A demanda de tráfego foi representada no VISSIM através da codificação das rotas escolhidas pelos veículos no SATURN, assim como os fluxos alocados em cada rota. Da mesma forma que no modelo de tráfego agregado, a frota de veículos considerada no VISSIM é composta apenas de veículos leves.

Para representar a variabilidade decorrente do padrão estocástico das condições do tráfego, foram realizadas três simulações adotando diferentes sementes estocásticas, mantendo-se a mesma configuração de rede viária e demanda de viagens. A cada semente estocástica, o VISSIM modifica o perfil do tráfego através da variação dos tempos de chegada, que representa a taxa de geração de viagens durante a simulação.

As informações das condições do tráfego simuladas pelo VISSIM foram registradas a cada segundo. Desta forma, o modelo fornece relatórios de saída em que foram observadas as velocidades instantâneas e acelerações a cada segundo, para cada um dos veículos gerados na rede ao longo do período da simulação. O tratamento das informações fornecidas pelo VISSIM exigiu elevada capacidade computacional.

5.4.2 Definição dos Trechos de Análise de Emissões (TAEs)

A necessidade de comparação dos resultados dos dois modelos de tráfego implicou na elaboração de um conceito para representar a porção da rede viária em análise. Assim, foram definidos os Trechos de Análise de Emissões (TAE). Como mencionado no capítulo anterior, os TAEs representam trechos da rede viária que potencialmente apresentam características capazes de provocar variações nos níveis de emissões.

No caso deste estudo, cujo objetivo é identificar quais características provocam diferenças significativas quando comparados os resultados de modelos agregados e desagregados, os TAEs representam trechos da mesma via com características geométricas homogêneas, como o número de faixas. Desta forma, foram definidas 78 TAEs.

5.4.3 Calibração do modelo VISSIM

A calibração do modelo de tráfego no VISSIM teve o objetivo de representar as condições operacionais modeladas no modelo SATURN. Desta forma, buscou-se representar, principalmente, os fluxos de veículos estimados nas vias e as velocidades dos arcos.

Para representar no VISSIM as velocidades estimadas pelo SATURN, foram codificados nos *links*, pontos de decisão de velocidade desejada, onde os veículos identificavam a necessidade de adequar sua velocidade corrente ao valor informado pelo modelo. Os valores codificados em cada *link* correspondem às velocidades de fluxo livre informados no SATURN. A utilização deste recurso teve por objetivo reproduzir as mesmas condições de tráfego nos dois modelos.

Ainda, para representar o comportamento dos veículos em interseções não semaforizadas, foi ajustado o tempo médio de espera por brechas na corrente de tráfego. Vale ressaltar que o processo de calibração microscópica é bastante demorado e complexo, porém é de grande importância para a qualidade dos resultados da simulação.

5.5 CUIDADOS ADOTADOS PARA A UTILIZAÇÃO DA MODELAGEM HÍBRIDA

Como descrito no capítulo 3, alguns cuidados devem ser observados para a utilização da abordagem híbrida de modelagem. No caso deste estudo, onde foram utilizados dois modelos de tráfego com níveis distintos de detalhamento das variáveis, foram observadas as seguintes recomendações:

- Consistência da representação da rede viária: esta recomendação refere-se à definição das TAE e a equivalência da codificação em relação aos comprimentos dos trechos, largura e número de faixas, movimentos permitidos e programação semafórica.
- Consistência da representação dos fluxos nas vias: essa recomendação refere-se à representação das trajetórias dos veículos ao longo da rede, que deve ser semelhante, bem como os volumes de tráfego alocados em cada rota.
- Consistência das condições dinâmicas do tráfego: essa questão está relacionada às características que influenciam o comportamento dos veículos na rede viária. Um aspecto importante é o tratamento dado à codificação das velocidades em cada modelo de tráfego. Neste estudo, buscou-se compatibilizar as velocidades através de um recurso do modelo VISSIM que condiciona os veículos a desenvolverem as velocidades de fluxo livre informadas no SATURN. É importante ressaltar que o modelo microscópico considera as interações dos veículos entre si e com a rede viária, e pode haver situações em que não seja possível atender às velocidades codificadas por esse recurso.

5.6 ESTIMATIVA DE EMISSÕES ATRAVÉS DE MODELOS ESTÁTICOS

A estimativa de emissões em nível agregado foi realizada com a utilização do modelo MOBILE (EPA, 2007), versão 6.2. As informações do tráfego utilizadas nesta etapa são provenientes da modelagem de tráfego mesoscópica, realizada com o modelo SATURN. Foram avaliados poluentes considerados críticos para a saúde humana, incluindo monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC) e óxidos de nitrogênio (NO_x). A seguir é descrito o processo de cálculo utilizado pelo MOBILE e a representação das variáveis de tráfego e condições ambientais para a estimativa de emissões.

5.6.1 Processo de cálculo do modelo MOBILE

O modelo de emissões MOBILE estima fatores de emissão a partir de ciclos de condução médios inseridos no modelo e de taxas básicas de emissões para cada poluente e categoria de veículos. Como dados de entrada das características de tráfego, o MOBILE utiliza as velocidades médias nos trechos de análise e a categoria viária de cada trecho, ou seja, a classificação das vias em *freeways*, arteriais, coletoras ou locais.

A estimativa de emissões do trecho em análise corresponde ao produto do número de veículos do trecho analisado, da distância viajada e do fator de emissão estimado para o poluente analisado. Assim, considerando cada TAE como um trecho de análise, as emissões foram calculadas através da Equação 4.

$$E_{t(i)} = N_{veic} \times D_{viaj} \times F_{ee(i)} \quad (4)$$

Em que:

$E_{t(i)}$ = Emissões totais para o poluente i

N_{veic} = Número de veículos do TAE

D_{viaj} = Extensão do trecho do TAE

$F_{ee(i)}$ = Fator de emissão estimado para o poluente i

5.6.2 Representação do tráfego e condições ambientais no MOBILE

Para a estimativa dos fatores de emissão no MOBILE, foi considerada uma frota de veículos composta apenas por veículos leves, utilizando gasolina como combustível. A distribuição da idade da frota foi realizada através da conversão das frações de veículos leves de cada idade, também utilizados no modelo IVE, considerando uma quilometragem média anual de 12000 km, que corresponde a uma aproximação da quilometragem média de veículos de passeio no Brasil, conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Média de quilometragem anual de veículos no Brasil

Tipo de veículo/combustível	Km/ano
gasolina	12.000
álcool	18.300
diesel	80.000
táxi	60.000
motocicletas e similares	12.000

Fonte: CETESB (2001)

Devido à necessidade de codificação no modelo dinâmico dos tempos em que os motores estiveram desligados, foi considerada no MOBILE uma distribuição dos tempos de resfriamento do motor. Esta distribuição, derivada do modelo IVE, refere-se àquela pesquisada na cidade de São Paulo (LENTS et al., 2004) e é utilizada pelo modelo para prever as emissões decorrentes das partidas a frio. Ainda, a temperatura média considerada para as estimativas de emissões foi de 25°C. Outras características solicitadas pelo MOBILE, como programas de inspeção/manutenção de veículos, altitude e inclinação das vias, não foram consideradas para o cálculo das estimativas de emissões.

5.7 ESTIMATIVA DE EMISSÕES ATRAVÉS DE MODELOS DINÂMICOS

A estimativa de emissões através do modelo de emissões dinâmico IVE (DAVIS et al., 2005) considerou a representação dos ciclos de condução dos veículos definidos a partir dos dados de velocidade e aceleração dos veículos estimados pelo modelo VISSIM. Apesar de o modelo IVE possuir taxas de emissões calculados para a frota da cidade de São Paulo, foram utilizadas taxas referentes à frota das cidades dos Estados Unidos para que fosse possível a comparação com os resultados do MOBILE. Os

poluentes avaliados incluem monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC) e óxidos de nitrogênio (NO_x).

5.7.1 Processo de cálculo do modelo IVE

O processo de estimativa de emissões do IVE consiste no produto das taxas básicas de emissões determinadas para as diferentes categorias de veículos e de diversos fatores de correção destas taxas. Assim, os fatores de emissões são estimados e associados aos volumes de veículos e às distâncias percorridas.

Os fatores de correção utilizados no IVE são divididos em três categorias: (i) variáveis locais, que correspondem à temperatura ambiente, umidade relativa do ar, altitude e programas de inspeção/manutenção de veículos; (ii) variáveis relativas ao combustível, que referem-se basicamente ao tipo de combustível (gasolina, diesel, gás natural veicular) e sua composição; e, (iii) variáveis de potência e condução, que consistem em informações dos ciclos de condução dos veículos, da inclinação da via, do uso de ar condicionado e da distribuição dos tempos de partida a frio.

5.7.2 Representação do tráfego e condições ambientais no IVE

As variáveis locais codificadas no IVE correspondem às informações utilizadas no modelo MOBILE. Assim, considerou-se a temperatura média de 25°C, e altitude zero, correspondente ao nível do mar. Não foi considerada para o cálculo das emissões, a existência de programas de inspeção/manutenção dos veículos. Da mesma forma que no MOBILE, foram considerados somente veículos leves, utilizando gasolina como combustível.

As informações dos ciclos de condução foram determinadas através do cálculo do VSP (*Vehicle Specific Power*) para cada TAE. Assim, esse cálculo foi realizado para cada uma das simulações com diferentes sementes estocásticas. Desta forma, cada TAE obteve três estimativas de emissões provenientes do modelo IVE. Os resultados das estimativas de emissões apresentados no próximo capítulo referem-se à média das três rodadas para cada TAE.

5.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo de caso apresentado subsidiou o desenvolvimento e consolidação do método proposto nesta tese. No entanto, algumas questões práticas puderam ser observadas, como por exemplo, as diferenças de forma de codificação entre os modelos de tráfego e entre os modelos de emissões.

Em relação aos modelos de tráfego, grande parte dos esforços para a codificação poderia ser minimizada se fossem usados modelos com interfaces integradas. No caso deste trabalho, os modelos de tráfego utilizados apresentam linguagens computacionais distintas e, por isso, a construção das redes de tráfego e a troca de informações entre os modelos foram bastante dispendiosas.

O próximo capítulo apresenta uma discussão dos resultados que auxiliaram a consolidar o método proposto neste trabalho.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta a discussão dos resultados que subsidiaram a elaboração e o detalhamento do método proposto nesta pesquisa. Inicialmente, são apresentados os resultados obtidos da modelagem do desempenho do tráfego através das abordagens mesoscópica e microscópica. Posteriormente, são avaliados os resultados da estimativa de emissões realizada com os modelos de emissões estático e dinâmico. É importante ressaltar que este trabalho não tem por objetivo avaliar os valores absolutos das emissões, mas identificar diferenças nos níveis de emissões relativas às variações das características do tráfego de veículos resultantes da modelagem.

6.1 ANÁLISE DA MODELAGEM DE TRÁFEGO

A análise da modelagem de tráfego é apresentada em blocos. No primeiro bloco são apresentados os parâmetros gerais da rede modelada em nível agregado. O segundo e o terceiro blocos apresentam a avaliação do desempenho viário nos trechos de análise de emissões (TAEs) estimados pelos modelos SATURN e VISSIM, respectivamente. O quarto bloco refere-se à comparação da modelagem de tráfego nos TAEs realizada pelos dois modelos.

6.1.1 Parâmetros gerais da rede modelada no SATURN

Os parâmetros globais estimados pelo SATURN para a rede modelada são apresentados na Tabela 4. Os parâmetros de comprimento de filas transientes e além da capacidade representam valores médios durante o período de análise. O tempo de cruzeiro representa a soma dos tempos de viagens de todos os veículos, e o tempo total de viagem corresponde à soma do tempo em cruzeiro e dos atrasos sofridos pelos veículos durante as viagens. A distância de viagem refere-se à soma das distâncias viajadas por todos os veículos da rede, e o número total de viagens reflete o

volume informado ao modelo através da matriz de viagens origem/destino entre as zonas de tráfego.

Tabela 4 – Parâmetros globais estimados pelo modelo SATURN

Parâmetros de análise	Valores estimados
Comprimento de fila transiente	92,9 veículos
Comprimento de fila além da capacidade	2,9 veículos
Tempo total de cruzeiro	532,5 h
Tempo total de viagem	724 h
Distância total de viagem	24431,3 km
Velocidade média global	31,7 km/h
Total de viagens carregadas	10654 veículos/h

A seguir são apresentadas as análises considerando os 78 trechos de análise de emissões (TAEs) definidos neste estudo.

6.1.2 Análise dos TAEs modelados no SATURN

Na análise dos TAEs simulados no modelo SATURN, foram observados parâmetros como fluxos estimados, velocidade média no trecho, relação volume/capacidade e tamanho médio de filas. A Tabela 5 apresenta a distribuição dos TAEs em relação aos diferentes níveis de carregamento viário.

Tabela 5 – Distribuição dos TAEs conforme os fluxos estimados pelo SATURN

Intervalo dos fluxos estimados	Quantidade de TAEs no intervalo	Percentual de TAEs no intervalo
até 100 veículos	3	3,8%
entre 101 e 300 veículos	8	10,3%
entre 301 e 500 veículos	7	9,0%
entre 501 e 700 veículos	10	12,8%
entre 701 e 900 veículos	4	5,1%
entre 901 e 1100 veículos	12	15,4%
entre 1101 e 1300 veículos	10	12,8%
entre 1301 e 1500 veículos	8	10,3%
entre 1501 e 1700 veículos	6	7,7%
entre 1701 e 1900 veículos	4	5,1%
entre 1901 e 2100 veículos	1	1,3%
entre 2101 e 2300 veículos	5	6,4%
Total de TAEs	78	100%

É possível observar que 41% dos TAEs apresentam carregamento viário menor do que 900 veículos na hora modelada, 38,5% possuem entre 901 e 1500 veículos e 20,5% indicaram carregamentos altos, acima de 1500 veículos registrados durante o período de análise. A Tabela 6 apresenta a análise dos TAEs de acordo com a velocidade média estimada pelo SATURN.

Tabela 6 – Distribuição dos TAEs conforme a velocidade média estimada pelo SATURN

Intervalo de velocidades médias estimadas	Quantidade de TAEs no intervalo	Percentual de TAEs no intervalo
até 20 km/h	10	12,8%
entre 20 km/h e 30 km/h	18	23,1%
entre 30 km/h e 40 km/h	26	33,4%
entre 40 km/h e 50 km/h	21	26,9%
entre 50 km/h e 54 km/h	3	3,8%
Total de TAEs	78	100%

Observa-se que o SATURN estimou para a maior parte dos trechos de análise de emissões, ou seja, em 64,1% dos TAEs, velocidades médias superiores a 30 km/h. A Tabela 7 apresenta a distribuição dos TAEs de acordo com a relação volume/capacidade dos trechos de análise.

Tabela 7 – Distribuição dos TAEs conforme a relação volume/capacidade

Relação Volume/Capacidade	Quantidade de TAEs no intervalo	Percentual de TAEs no intervalo
menor que 10%	35	44,9%
entre 10% e 20%	19	24,4%
entre 20% e 30%	10	12,8%
entre 30% e 40%	8	10,3%
entre 40% e 50%	4	5,1%
entre 50% e 60%	2	2,5%
Total de TAEs	78	100,0%

Através dos resultados expostos da Tabela 7, é possível notar que a rede viária modelada apresenta boas condições de circulação. A maioria dos TAEs, 92,4%, apresenta relação volume/capacidade menor do que 40%. A Tabela 8 apresenta a distribuição dos TAEs de acordo com os comprimentos médios de filas estimados na modelagem.

Tabela 8 – Distribuição dos TAEs conforme o tamanho médio de filas

Tamanho de fila média	Quantidade de TAEs no intervalo	Percentual de TAEs no intervalo
menor do que 1 veículo	43	55,1%
entre 1 e 2 veículos	16	20,5%
entre 2 e 3 veículos	8	10,3%
entre 3 e 4 veículos	7	9,0%
entre 4 e 5 veículos	4	5,1%
Total de TAEs	78	100,0%

Em relação ao tamanho médio de filas, observou-se que, de forma geral, não houve pontos na rede viária onde ocorreu grande formação de filas. Da mesma forma do que na análise da relação volume/capacidade, os comprimentos médios das filas mostram que a rede modelada apresenta boas condições de circulação.

Ainda, os TAEs foram avaliados em relação ao potencial de contribuição para emissões através de um índice teórico que relaciona de forma direta o volume de veículos estimado do TAE e a extensão do trecho. Assim, foi possível classificar os TAEs segundo um critério de importância por uma relação multiplicativa direta desses dois parâmetros. Este critério tem por objetivo identificar trechos que potencialmente teriam maiores contribuições para a estimativa de emissões.

De forma geral, os maiores volumes de tráfego foram observados nos grandes eixos, os quais representam os trechos de maior comprimento. Ainda, observou-se que os principais eixos viários da rede representam 66% do potencial de contribuição dos níveis de emissões.

6.1.3 Análise dos TAEs modelados no VISSIM

O primeiro ponto analisado na modelagem microscópica diz respeito à aleatoriedade do tráfego decorrente do padrão estocástico da geração de viagens. Foram realizadas três simulações com diferentes sementes estocásticas. Os resultados foram analisados em relação aos fluxos modelados e às velocidades médias para cada trecho de análise (TAEs). A Figura 8 apresenta a comparação dos fluxos estimados para cada par de sementes estocásticas. De forma geral, os resultados em relação às estimativas de fluxos mostraram-se satisfatórios, apresentando coeficientes de determinação maiores do que 0,90.

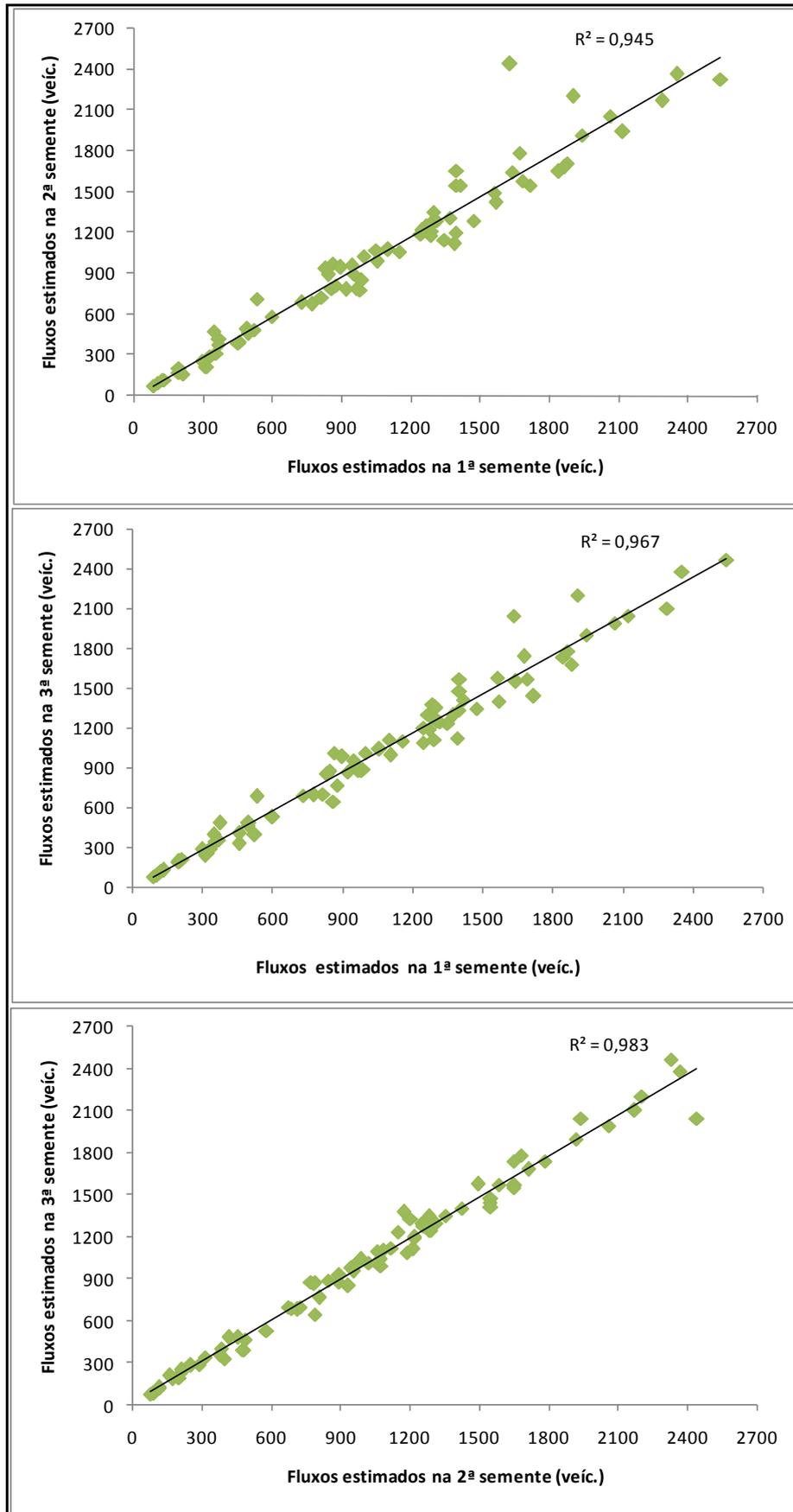


Figura 8 – Comparação dos fluxos estimados nas sementes estocásticas

A análise dos fluxos estimados permitiu identificar que os TAEs apresentaram variações absolutas médias menores do que 200 veículos no período modelado. A diferença média considerando todos os trechos de análise foi de 55 veículos. O TAE de código 4, identificado na Figura 9, foi o único trecho que apresentou diferença absoluta média entre as três sementes maior que 200, correspondendo a 279 veículos. Este trecho referente ao TAE 4 representa um eixo viário onde a variabilidade das interações do tráfego foi bastante evidenciada pela variação dos fluxos estimados.

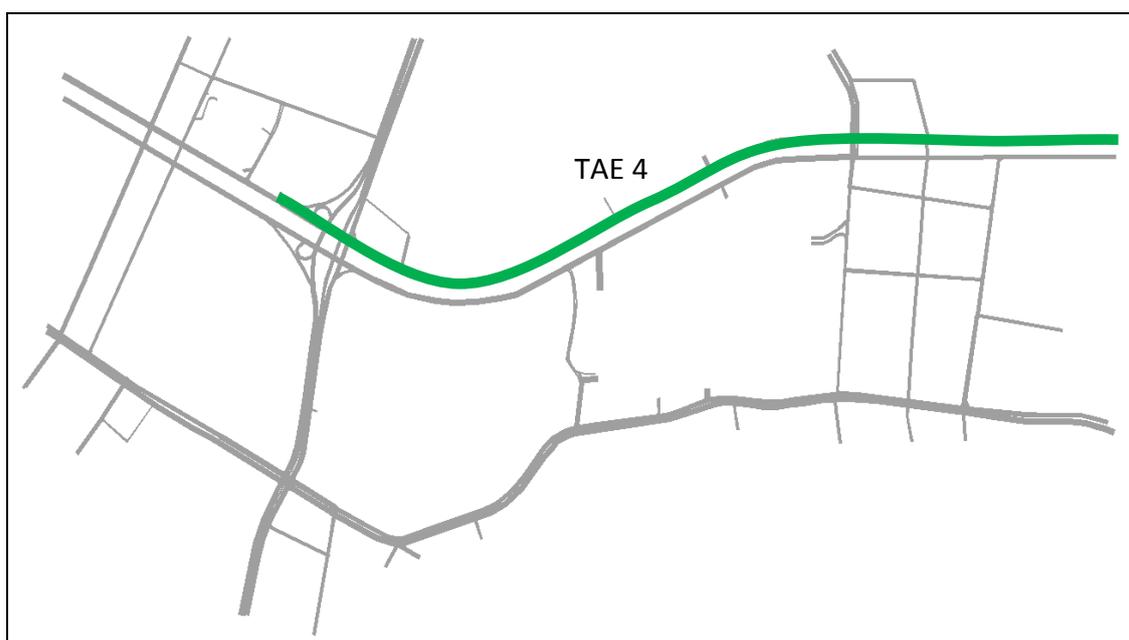


Figura 9 – Representação do TAE 4 modelado no VISSIM

A Figura 10 apresenta a comparação das velocidades estimadas pelo VISSIM para cada par das três sementes estocásticas. Observou-se uma variabilidade entre as simulações das diferentes sementes, contudo os resultados foram considerados satisfatórios. De forma geral, a variação média absoluta das velocidades considerando todos os TAEs foi de 1,79 km/h. A maior variação média absoluta entre os TAEs corresponde a 5,7 km/h, onde a variação percentual entre as sementes foi de 29%. Embora a variação percentual entre as sementes estocásticas seja grande, os valores absolutos são considerados baixos.

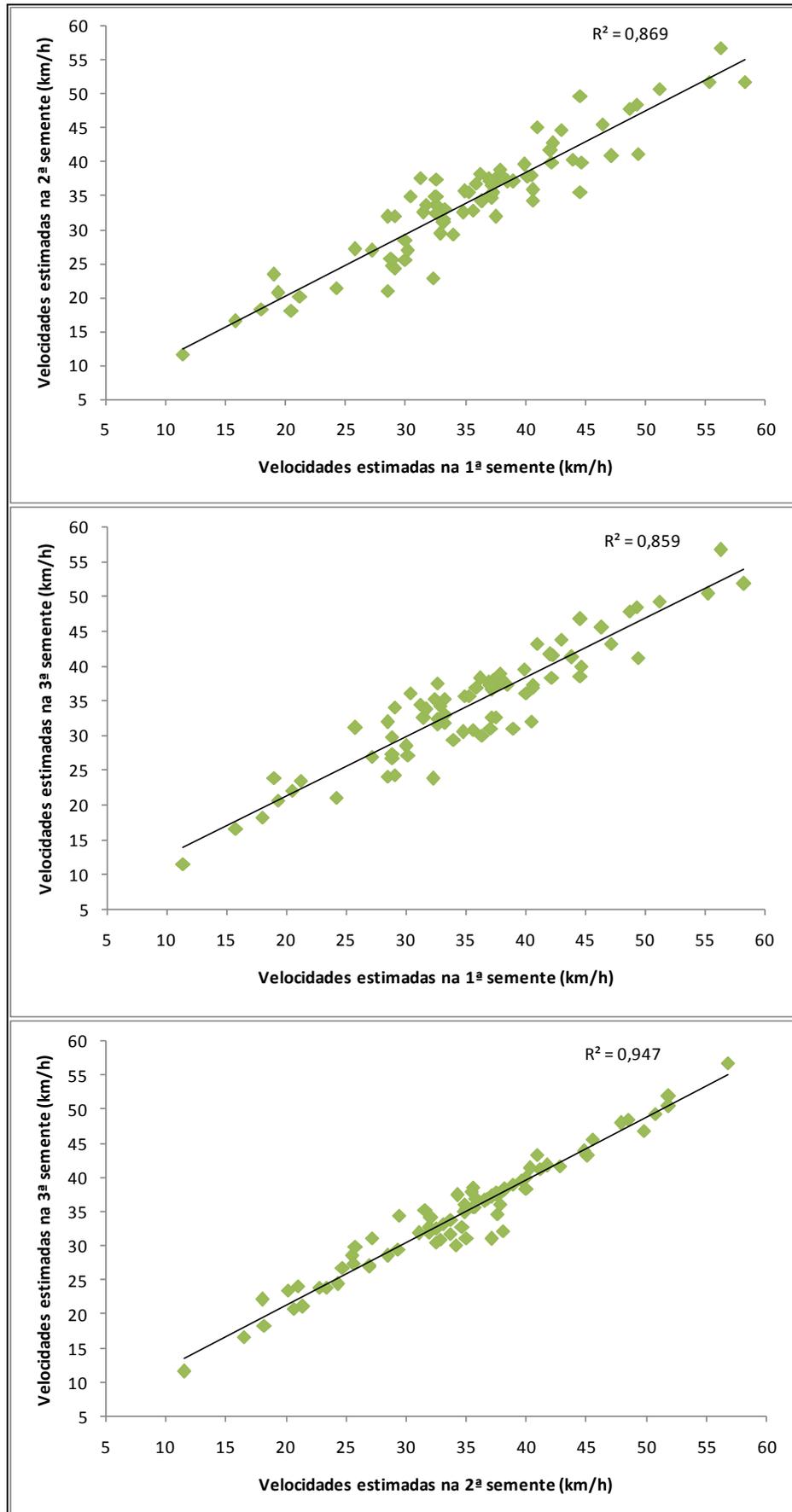


Figura 10 – Comparação das velocidades estimadas nas sementes estocásticas

A Tabela 9 apresenta a distribuição dos TAEs de acordo com os fluxos estimados pelo VISSIM. Os valores da Tabela 9 representam a média das simulações das três sementes estocásticas.

Tabela 9 – Distribuição dos TAEs conforme os fluxos estimados pelo VISSIM

Intervalo dos fluxos estimados	Quantidade de TAEs no intervalo	Percentual de TAEs no intervalo
até 100 veículos	2	2,6%
entre 101 e 300 veículos	8	10,3%
entre 301 e 500 veículos	10	12,8%
entre 501 e 700 veículos	2	2,6%
entre 701 e 900 veículos	10	12,8%
entre 901 e 1100 veículos	10	12,8%
entre 1101 e 1300 veículos	12	15,4%
entre 1301 e 1500 veículos	7	9,0%
entre 1501 e 1700 veículos	5	6,4%
entre 1701 e 1900 veículos	4	5,1%
entre 1901 e 2100 veículos	4	5,1%
entre 2101 e 2300 veículos	2	2,6%
entre 2301 e 2500 veículos	2	2,6%
Total de TAEs	78	100%

De forma geral, a distribuição dos TAEs de acordo com os fluxos estimados pelo VISSIM foi semelhante à distribuição estimada pelo SATURN. A porção de TAEs que apresentaram carregamento viário menor do que 900 veículos foi igual a 41%. O percentual de TAEs com volume estimado entre 901 e 1500 veículos foi de 37,2% e os TAEs com mais de 1500 veículos estimados na hora modelada representam 21,8%.

Da mesma forma, foi analisada a distribuição dos TAEs de acordo com a velocidade média estimada pelo VISSIM. A Tabela 10 apresenta a distribuição dos TAEs considerando a média das velocidades estimadas nas três simulações com diferentes sementes estocásticas. De forma geral, observou-se que na maior parte dos TAEs, as velocidades médias estimadas pelo VISSIM concentraram-se no intervalo entre 30 km/h e 40 km/h.

Tabela 10 – Distribuição dos TAEs conforme a velocidade média calculada com dados do VISSIM

Intervalo de velocidades médias estimadas	Quantidade de TAEs no intervalo	Percentual de TAEs no intervalo
até 20 km/h	3	3,8%
entre 20 km/h e 30 km/h	16	20,5%
entre 30 km/h e 40 km/h	42	53,9%
entre 40 km/h e 50 km/h	13	16,7%
entre 50 km/h e 54 km/h	4	5,1%
Total de TAEs	78	100%

Os TAEs ainda foram avaliados em relação ao potencial de contribuição para as emissões através de um índice teórico representado pela multiplicação do volume de veículos estimado no TAE e a extensão do trecho. Foram considerados três níveis de carregamento viário estimados na hora modelada: (i) baixo, para volume menor do que 900 veículos; (ii) médio, para volumes entre 901 e 1500 veículos, e (iii) alto, para fluxos maiores do que 1500 veículos.

Assim, a análise do índice teórico de contribuição para as emissões indicou que os TAEs com nível baixo de carregamento viário representam 8,7% do potencial de contribuição para as emissões. Os TAEs que apresentam nível médio de carregamento correspondem a 33,9% e os TAEs do nível alto de carregamento correspondem a 57,4% do potencial de contribuição.

6.1.4 Comparação de resultados do SATURN e VISSIM

A análise comparativa do comportamento do tráfego nos dois modelos é útil para avaliar a consistência da representação das condições de oferta e demanda da rede viária modelada. Isso é importante para garantir que as emissões sejam estimadas a partir de informações coerentes e que eventuais disparidades nas emissões não sejam derivadas de inconsistências da modelagem do tráfego.

Em relação ao volume total de viagens observou-se que no SATURN, conforme Tabela 4, foram geradas 10654 viagens, correspondente ao volume informado na matriz origem/destino. No VISSIM, o número de viagens lançadas na rede, considerando o

valor médio das três sementes estocásticas, foi de 10691 viagens, que indica uma diferença percentual absoluta de 0,35% em relação ao SATURN.

Através da análise dos TAEs, foi possível observar que os fluxos estimados pelos dois modelos de tráfego apresentaram desempenho satisfatório. A Figura 11 traz a comparação dos fluxos estimados pelo VISSIM e pelo SATURN, considerando os 78 trechos de análise de emissões definidas para o estudo.

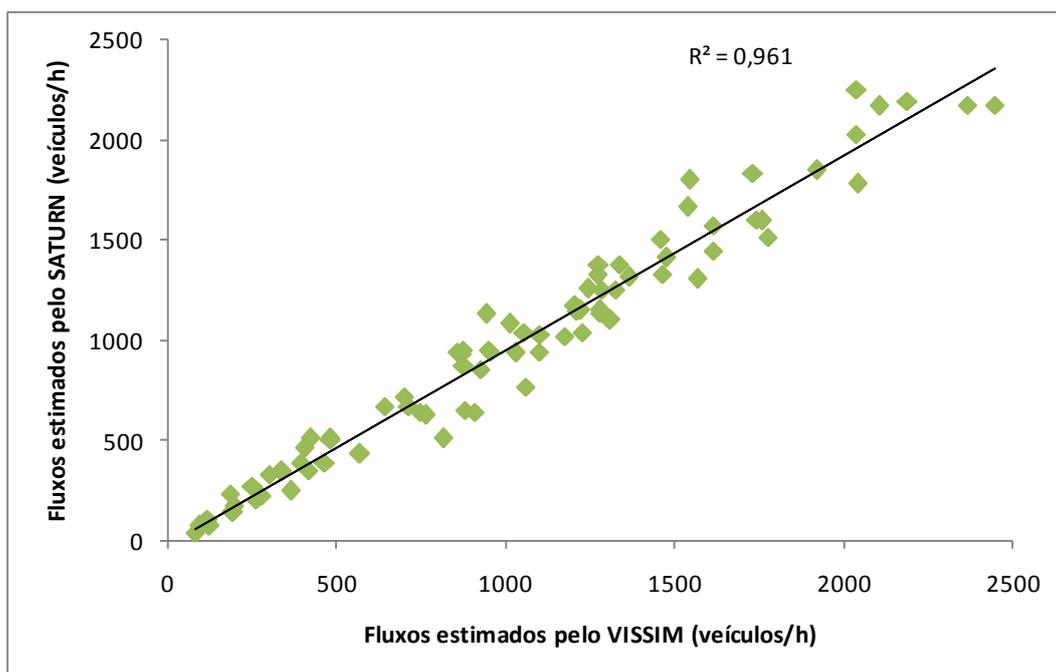


Figura 11 – Fluxos de veículos estimados pelo VISSIM e SATURN

A Figura 12 apresenta a comparação das velocidades médias estimadas pelo VISSIM e pelo SATURN. É importante ressaltar que a velocidade média estimada pelo SATURN corresponde à velocidade média calculada pelo modelo para cada trecho de análise. O modelo VISSIM não fornece a velocidade média diretamente, sendo que esta foi calculada considerando as velocidades instantâneas de todos os veículos, ou seja, as velocidades a cada segundo ao longo da hora modelada, em cada trecho de análise.

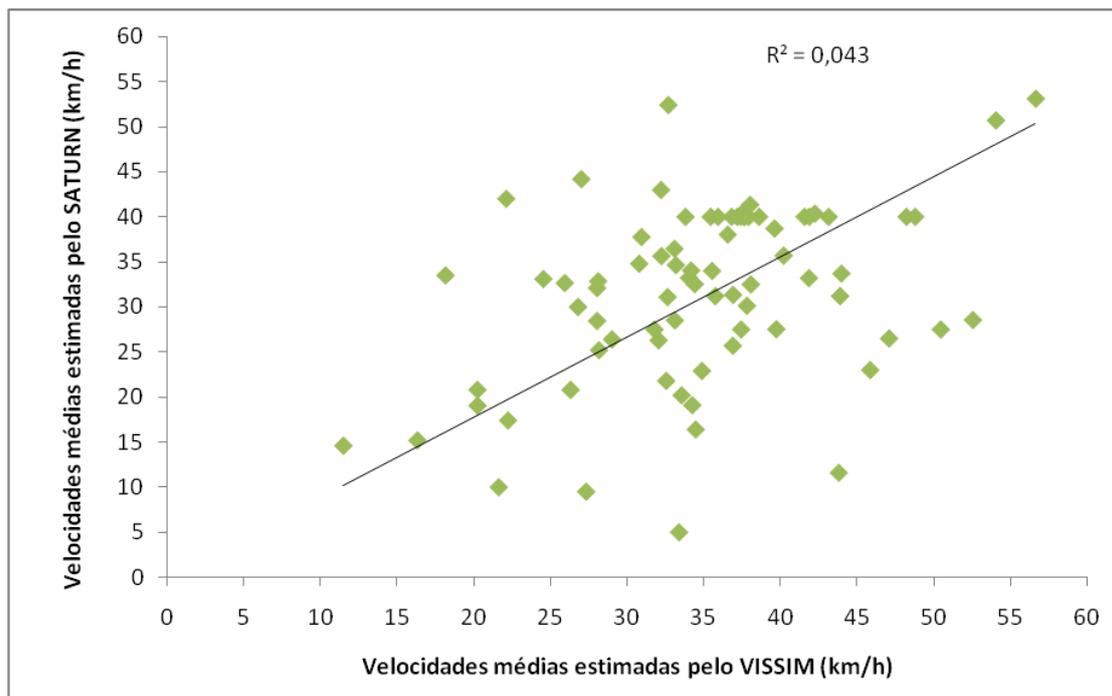


Figura 12 – Velocidades médias estimadas pelo VISSIM e SATURN

De forma geral, observou-se grande variabilidade nos valores da velocidade média estimados pelos dois modelos de tráfego. Ainda, identificou-se que os eixos viários principais, modelados no VISSIM, apresentaram velocidades médias menores do que quando modelados no SATURN. Isso, de certa forma, seria esperado, uma vez que o SATURN representa a velocidade média dos veículos sem considerar as interações dos veículos entre si e com a rede viária. O VISSIM, no entanto, consegue captar as interferências ocorridas durante a trajetória dos veículos e por isso, a velocidade média tende a retratar de maneira mais realista este parâmetro.

Embora a compatibilidade das velocidades médias não tenha alcançado bom desempenho, é importante lembrar que para a estimativa de emissões a velocidade média estimada pelo SATURN é diretamente utilizada no modelo de emissões estático, porém para o modelo dinâmico, são utilizadas informações da combinação das velocidades e acelerações instantâneas do VISSIM. Portanto, é importante ressaltar que as velocidades médias calculadas a partir de velocidades instantâneas estimadas pelo VISSIM e apresentadas na Figura 12 para fins de comparação, não são utilizadas diretamente no cálculo das estimativas de emissões. A seguir são apresentados os resultados da análise das estimativas de emissões.

6.2 ANÁLISE DA ESTIMATIVA DE EMISSÕES

A análise da estimativa de emissões compreende a avaliação dos valores estimados em nível agregado, através do modelo estático MOBILE, e em nível desagregado, através do modelo dinâmico IVE. Foram analisados três poluentes considerados críticos pelas autoridades mundiais: monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC) e óxidos de nitrogênio (NOx). Inicialmente são apresentados os resultados estimados pelo MOBILE, seguidos dos resultados previstos pelo IVE e, posteriormente, a comparação dos resultados dos dois modelos.

6.2.1 Estimativa de emissões com modelo estático MOBILE

Para facilitar a análise das estimativas de emissões, os resultados são apresentados de acordo com os níveis de carregamento de cada TAE. Foram considerados três níveis de carregamento viário estimados pelo modelo de tráfego SATURN: (i) baixo, para volume menor do que 900 veículos; (ii) médio, para volumes entre 901 e 1500 veículos, e (iii) alto, para fluxos maiores do que 1500 veículos. A seguir são apresentados os resultados para cada poluente analisado.

6.2.1.1 Estimativa de emissões de CO

As Figuras 13, 14 e 15 apresentam a estimativa de emissões de monóxido de carbono (CO) para os TAEs com nível baixo, médio e alto de carregamento, respectivamente, considerando os fluxos estimados pelo SATURN. Os valores das estimativas de CO previstas pelo MOBILE são apresentados no Apêndice A. As barras das figuras representam cada um dos TAEs identificados por um código e são ordenadas por ordem crescente do volume de tráfego estimado para o trecho.

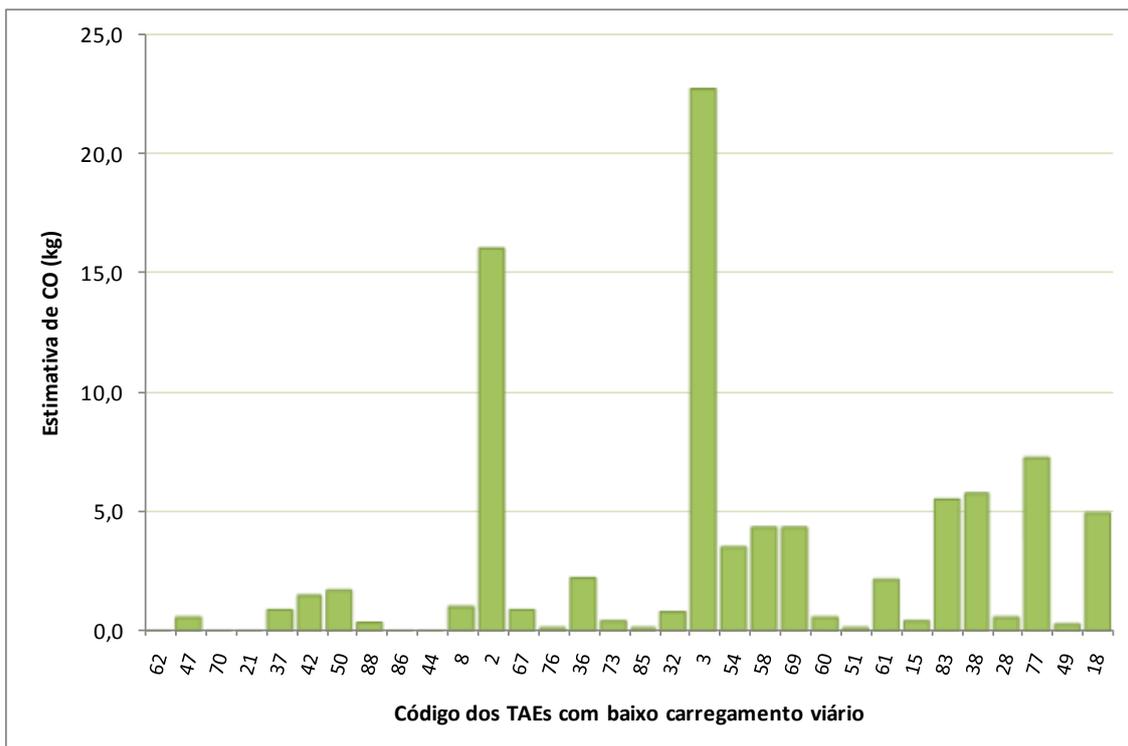


Figura 13 – Estimativa de CO para TAEs com baixo nível de carregamento viário

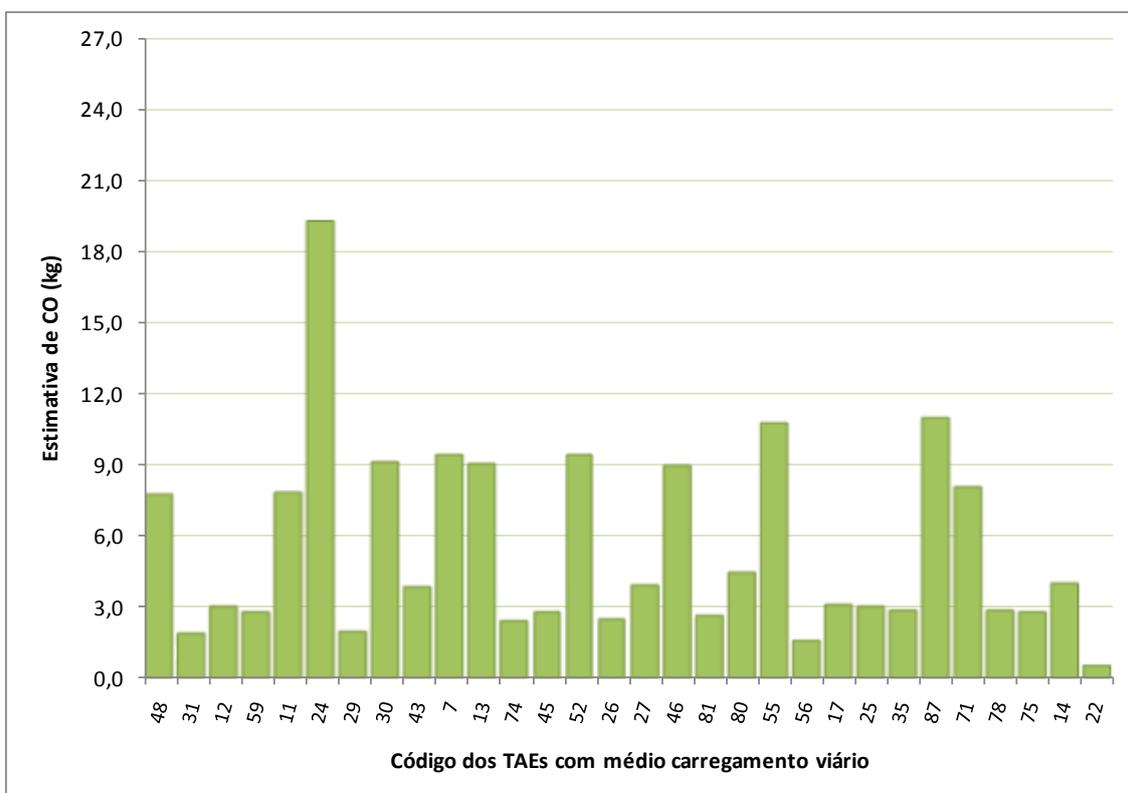


Figura 14 – Estimativa de CO para TAEs com nível médio de carregamento viário

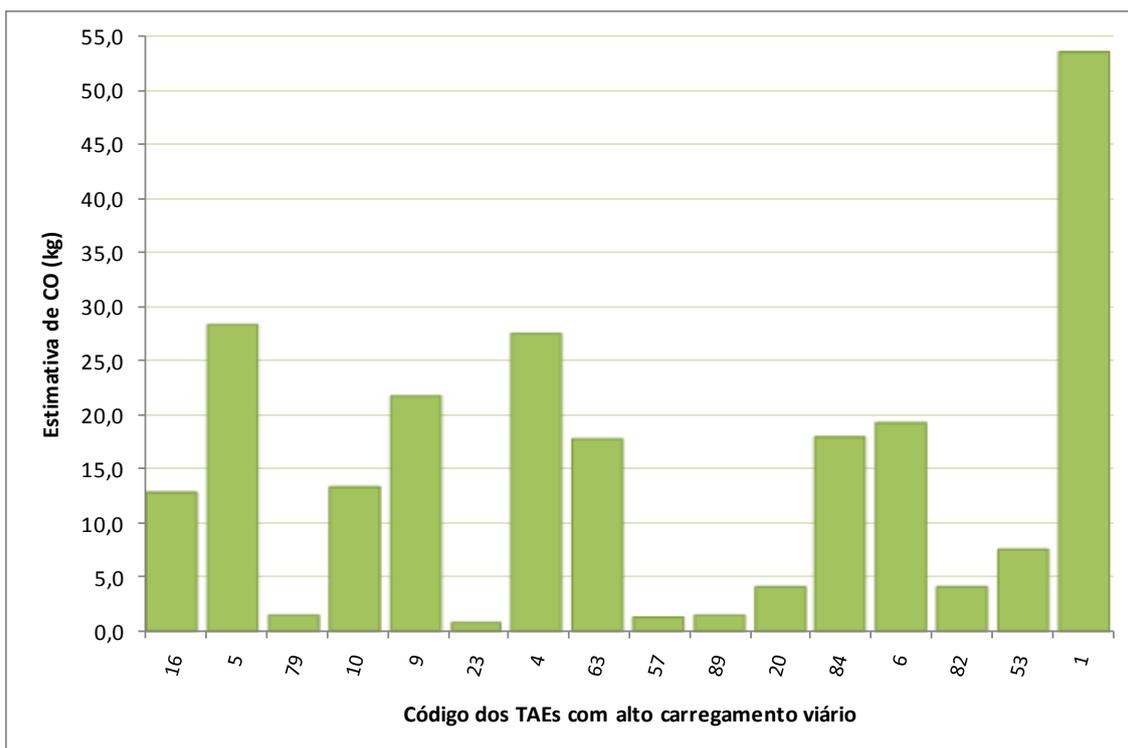


Figura 15 – Estimativa de CO para TAEs com alto nível de carregamento viário

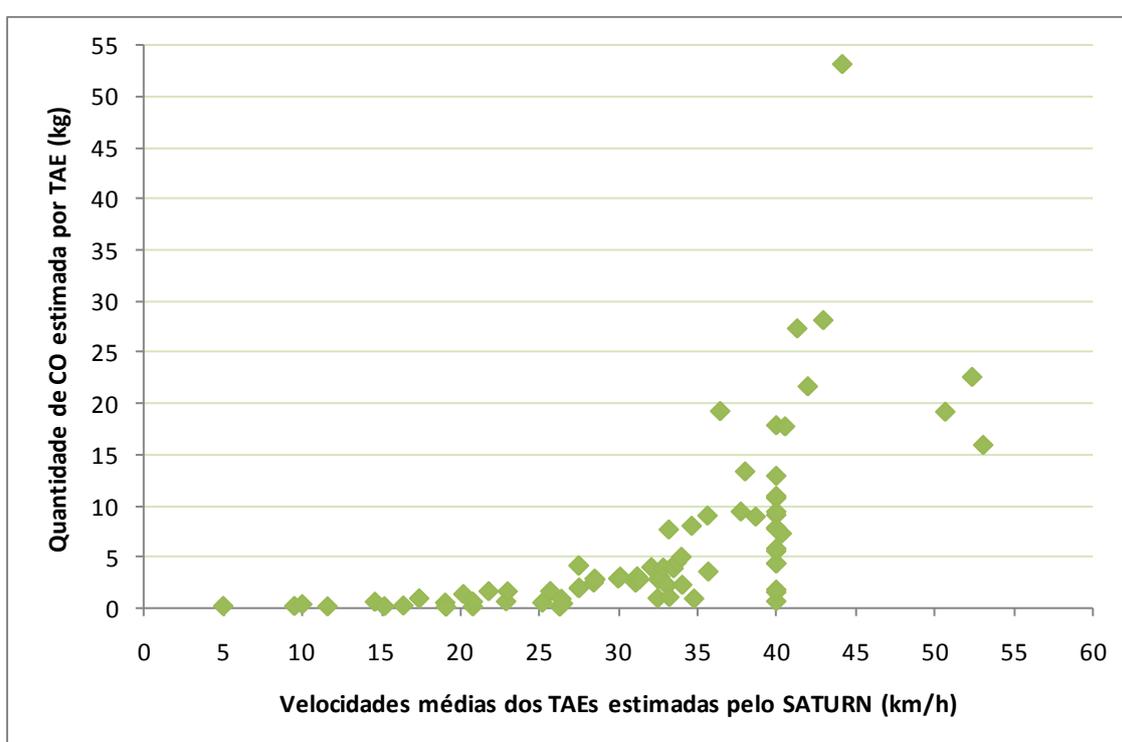
Observa-se na Figura 13 que os TAEs 2 e 3 apresentaram altos índices de CO estimados pelo MOBILE. Apesar desses TAEs apresentarem fluxos de veículos considerados baixos, menores que 900 veículos/h, elas registraram velocidade média estimada pelo SATURN igual a 53,1 km/h e 52,4 km/h, respectivamente, enquanto os demais TAEs apresentaram velocidade média menor do que 40 km/h.

Através da análise da Figura 14, é possível observar que o TAE 24 apresentou a mais alta estimativa de emissões em comparação com os demais TAEs. Neste TAE, o SATURN registrou uma velocidade média igual a 50,7 km/h. Os TAEs que tiveram estimativas de CO em torno de 9 kg apresentaram velocidades médias próximas de 40 km/h, enquanto os demais TAEs, com estimativas de CO por volta de 3 kg, apresentaram velocidades médias em torno de 30 km/h.

A Figura 15 apresenta as mais altas estimativas de emissões. São representadas nessa figura trechos dos principais eixos viários da rede modelada, correspondentes aos TAEs 1, 4, 5, 6, 10 e 63. O TAE 9, que também apresentou altas emissões, representa um

trecho que liga dois eixos principais. A Figura 15 ainda representa alguns trechos da rede viária, como por exemplo, 53 e 84, que correspondem a arcos externos da rede.

A Figura 16 apresenta a relação entre as velocidades médias estimadas pelo SATURN para cada TAE e as estimativas de CO realizadas pelo MOBILE. Dentre o total de TAEs analisados, 67% apresentaram estimativas de CO menores do que 5 kg durante o período de análise. É possível observar ainda que velocidades acima de 40 km/h tendem a resultar em estimativas bastante elevadas, principalmente quando associadas a altos volumes e grandes distâncias.



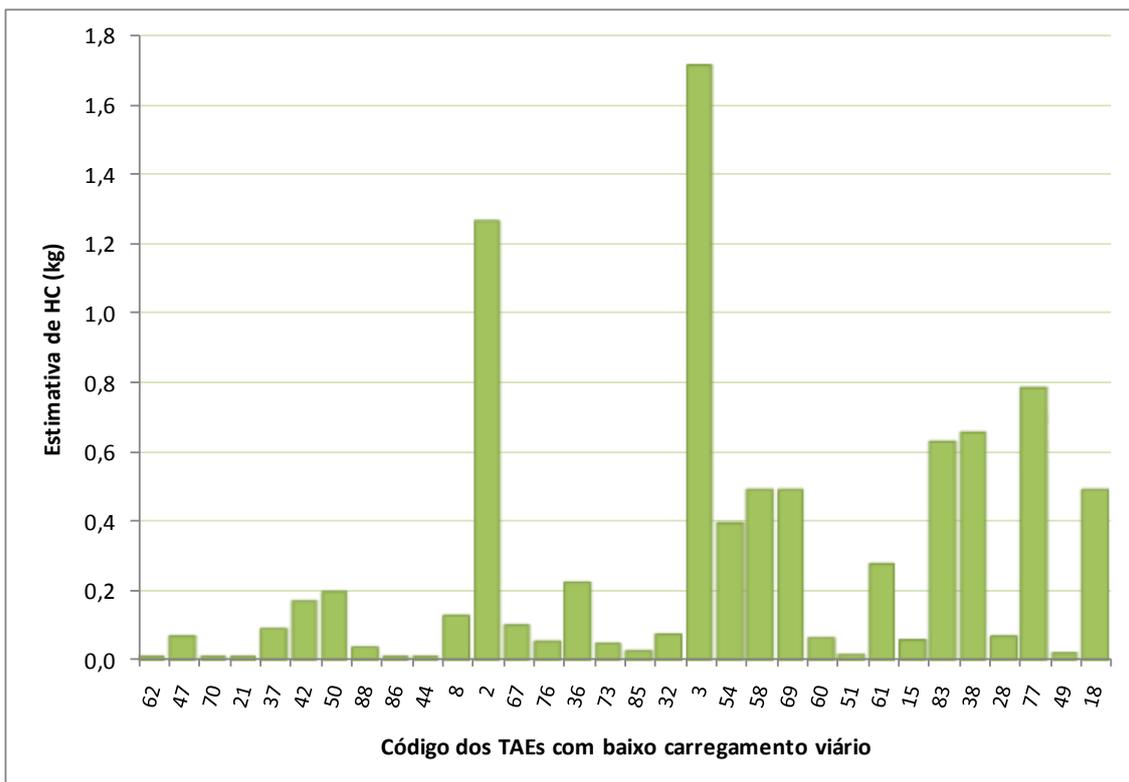


Figura 17 – Estimativa de HC para TAEs com baixo nível de carregamento viário

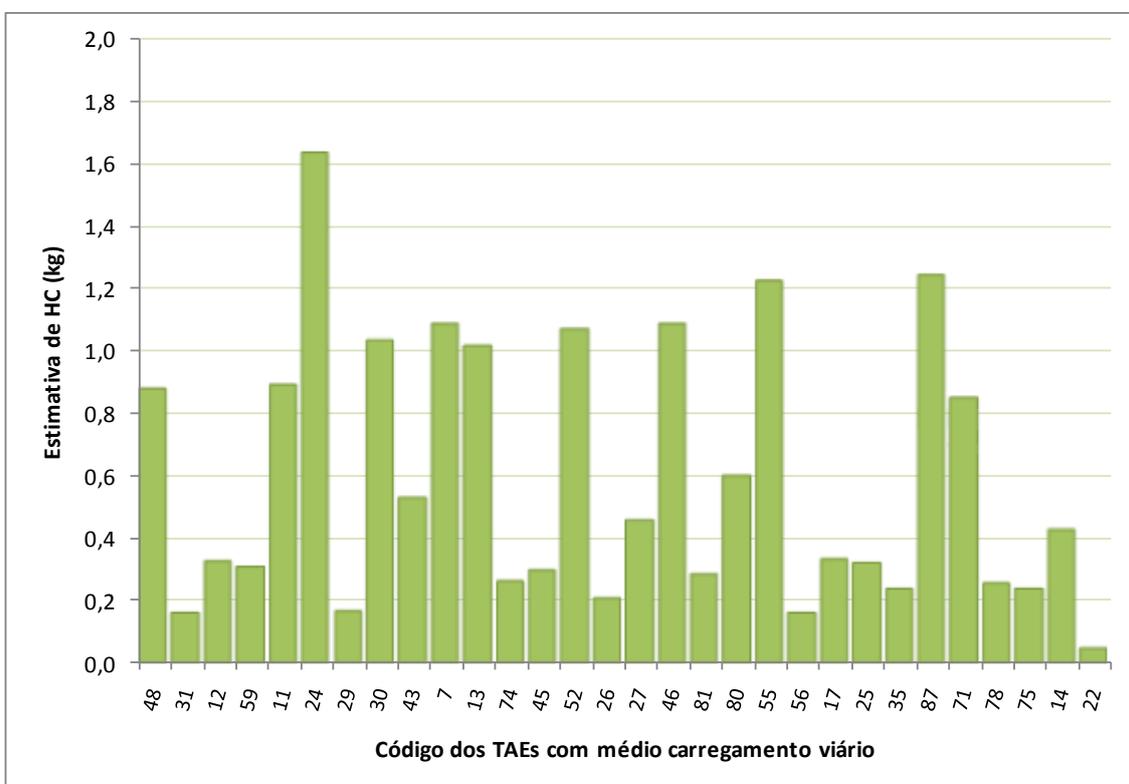


Figura 18 – Estimativa de HC para TAEs com nível médio de carregamento viário

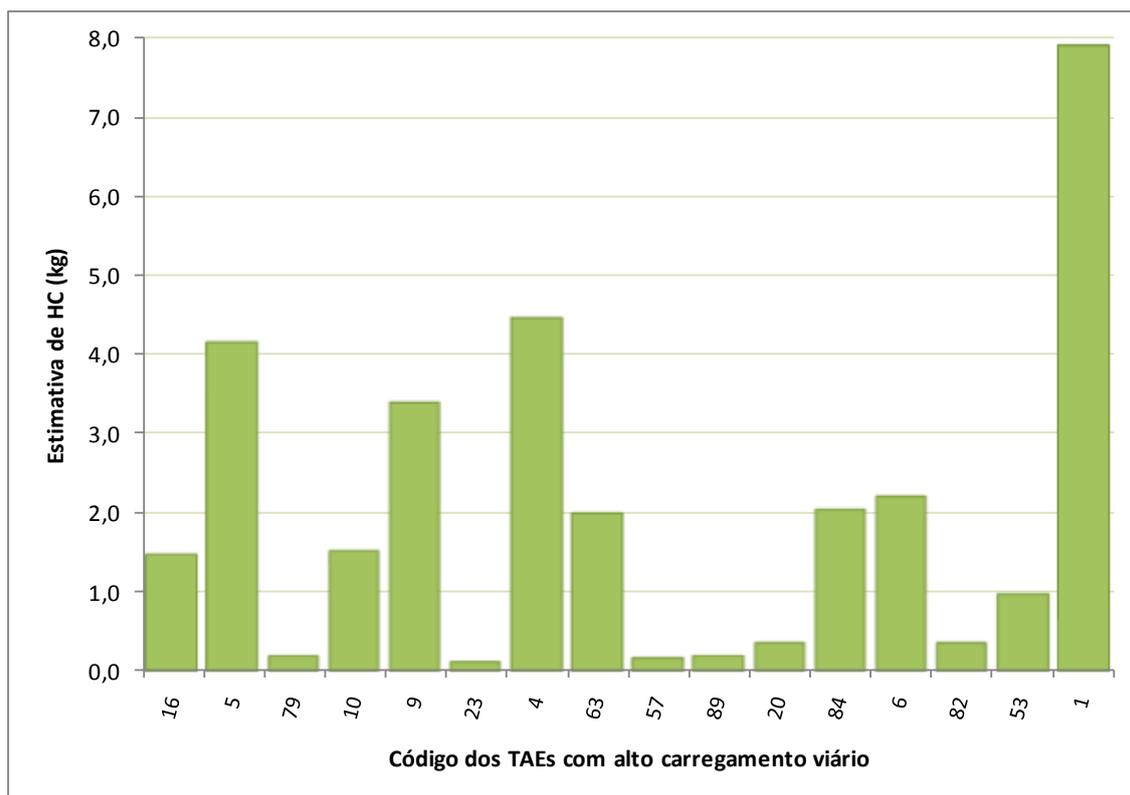


Figura 19 – Estimativa de HC para TAEs com alto nível de carregamento viário

As estimativas de hidrocarbonetos (HC) estimadas pelo MOBILE para os trechos de análise, mantidas as proporções entre as escalas, de forma geral apresentaram o mesmo perfil de distribuição do que as estimativas de monóxido de carbono (CO). Na Figura 17 são destacados os TAEs 2 e 3. Em função destes TAEs estarem classificados no nível de carregamento viário baixo, é provável que as altas estimativas sejam decorrentes das velocidades médias maiores do que 50 km/h.

A Figura 18 mostra novamente que o TAE 24 apresentou a maior estimativa de emissões dentre os TAEs com nível médio de carregamento viário. Os demais TAEs cujas velocidades médias são próximas de 30 km/h, apresentaram estimativas de HC em torno de um valor médio de 0,32 kg, enquanto outros TAEs, cuja velocidade média variou em torno de 40 km/h, apresentaram estimativas de HC próximas a 1 kg na hora modelada.

A análise da Figura 19 indica que as maiores estimativas de HC correspondem aos TAEs que representam os principais trechos viários da rede modelada. Da mesma forma que

na análise de CO, os arcos externos da rede viária que desempenham o papel de conectar a malha viária com as zonas de tráfego também apresentam altas estimativas de emissões. Por uma questão característica da modelagem, esses trechos concentram toda a demanda da zona de tráfego que se liga com a rede modelada naquele ponto. A Figura 20 relaciona a velocidade média dos TAEs estimadas pelo SATURN com as estimativas de hidrocarbonetos realizadas pelo modelo MOBILE.

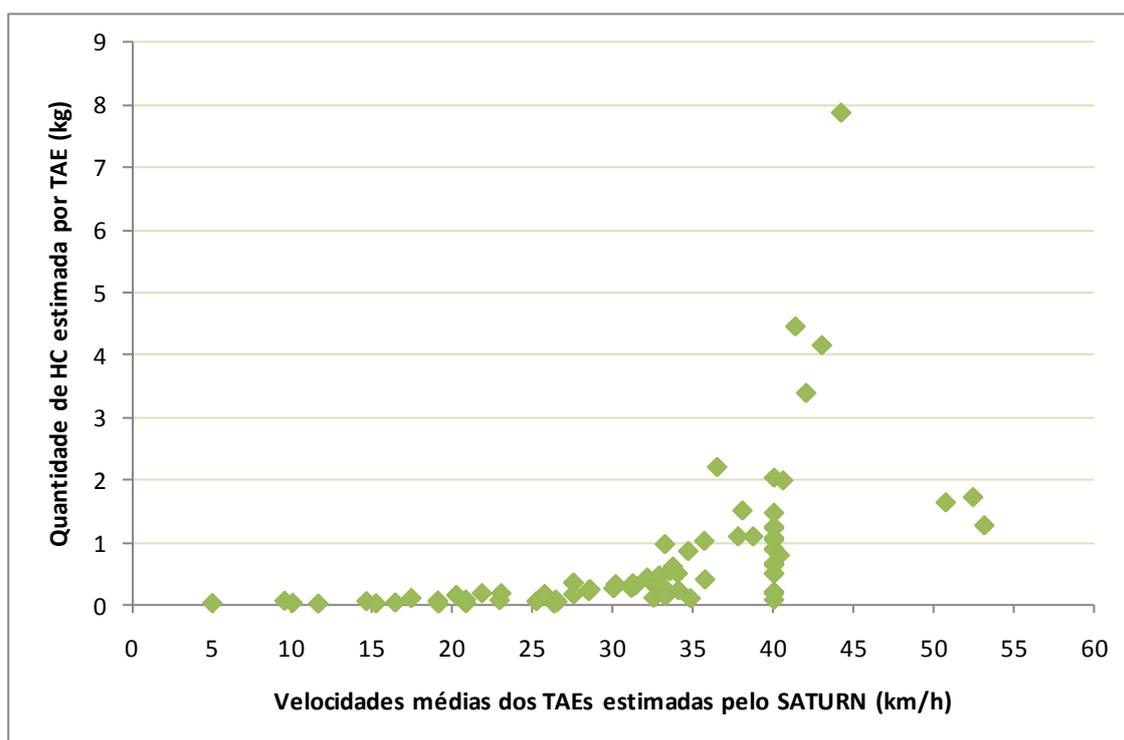


Figura 20 – Relação entre a velocidade média e a estimativa de HC pelo MOBILE

É possível perceber na Figura 20 a mesma tendência observada na relação entre velocidade média e estimativa de CO apresentada anteriormente na Figura 16. A maior parte dos TAEs, 75,6%, obteve estimativa de HC menor do que 1 kg. Observou-se ainda que velocidades acima de 40 km/h tendem a resultar em estimativas bastante elevadas, principalmente quando associadas a altos volumes e grandes distâncias.

6.2.1.3 Estimativa de emissões de NOx

As Figuras 21, 22 e 23 apresentam a estimativa de emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) para os TAEs com nível baixo, médio e alto de carregamento, respectivamente, considerando os fluxos estimados pelo SATURN. Os valores das estimativas de NOx

previstas pelo MOBILE são apresentados no Apêndice A. As barras das figuras representam cada um dos TAEs identificados por um código e são ordenadas por ordem crescente do volume de tráfego estimado para o trecho.

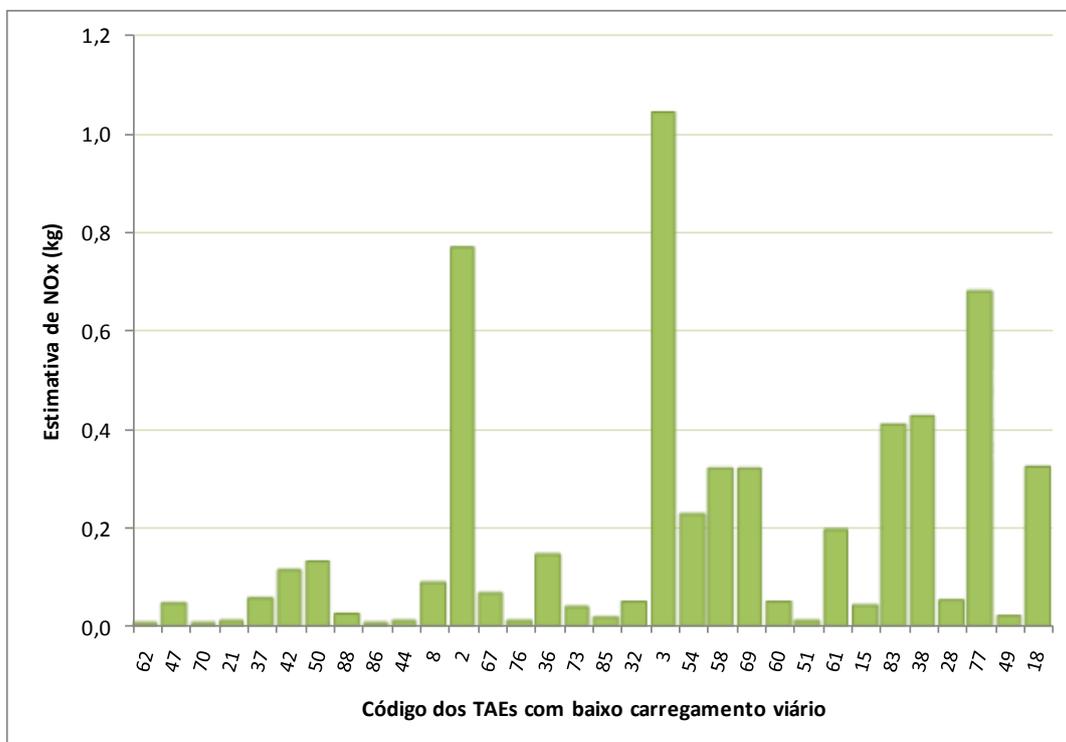


Figura 21 – Estimativa de NOx para TAEs com baixo nível de carregamento viário

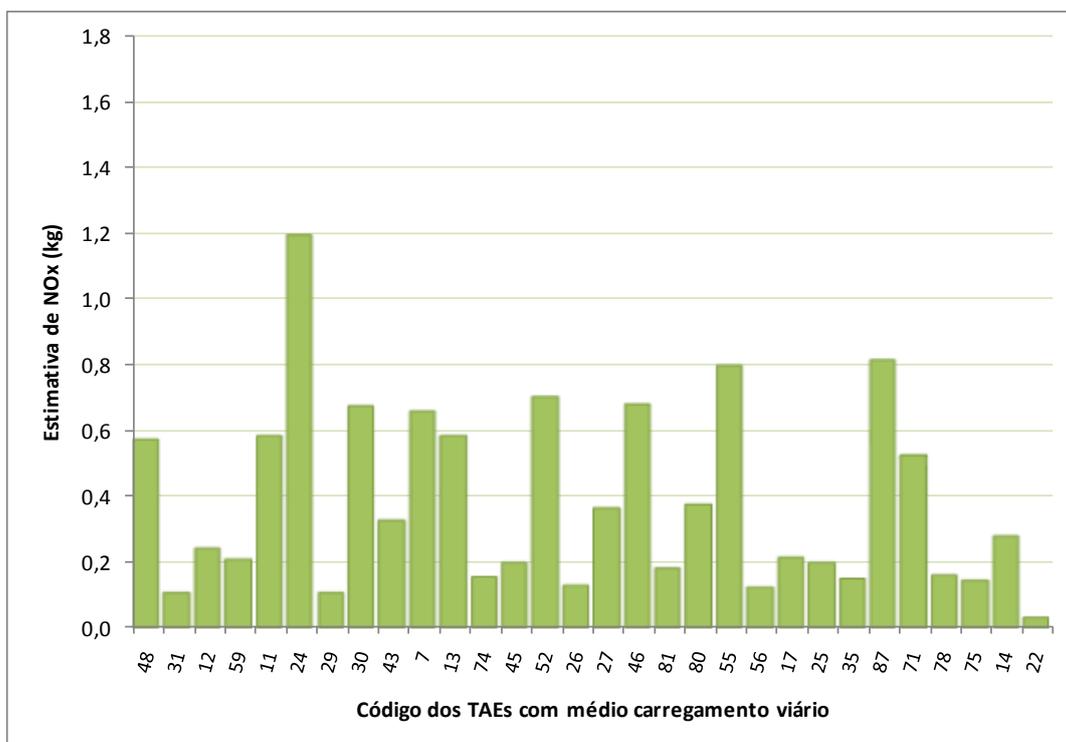


Figura 22 – Estimativa de NOx para TAEs com nível médio de carregamento viário

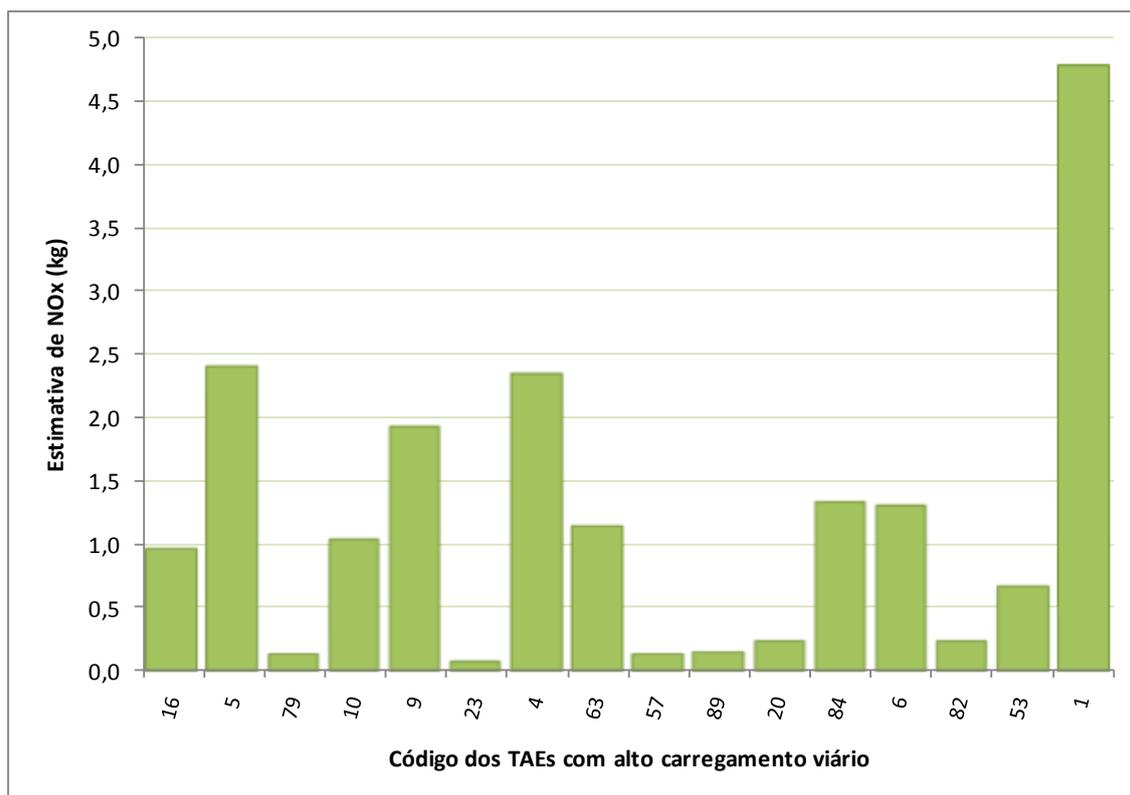


Figura 23 – Estimativa de NOx para TAEs com alto nível de carregamento viário

De forma geral, as estimativas de óxidos de nitrogênio (NOx) realizadas pelo MOBILE apresentaram o mesmo perfil de distribuição do que as estimativas de monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos (HC), guardadas as diferenças de escala. Isso é consequência natural do modelo de estimativa de emissões do MOBILE, no qual a velocidade média representa o fator com maior contribuição para as diferenças nos níveis de emissões, associada aos fluxos estimados e ao comprimento dos trechos de análise.

A Figura 24 relaciona a velocidade média dos TAEs com as estimativas de NOx realizadas pelo modelo MOBILE. É possível observar novamente a tendência de estimativas de NOx a partir das velocidades médias maiores do que 40 km/h. A maioria dos TAEs, correspondente a 78%, cuja velocidade média estimada pelo SATURN foi menor ou igual a 40 km/h, apresentaram estimativas de NOx até 0,5 kg.

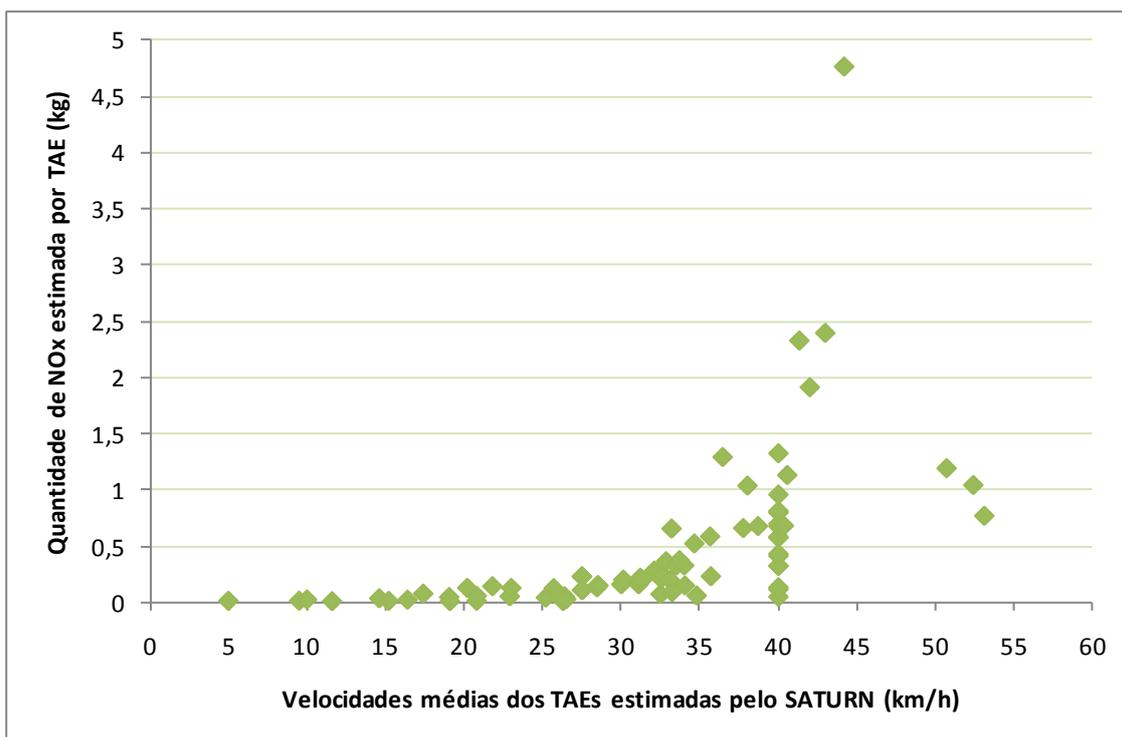


Figura 24 – Relação entre a velocidade média e a estimativa de NOx pelo MOBILE

A seguir são apresentados os resultados das estimativas de emissões realizadas pelo modelo IVE.

6.2.2 Estimativa de emissões com modelo dinâmico IVE

As estimativas de emissões realizadas pelo modelo IVE para os TAEs são apresentadas para cada um dos três níveis de carregamento viário estimado pelo modelo de tráfego VISSIM. Os níveis de carregamento são os seguintes: (i) baixo, para volume menor do que 900 veículos; (ii) médio, para volumes entre 901 e 1500 veículos, e (iii) alto, para fluxos maiores do que 1500 veículos na hora modelada. A seguir são apresentados os resultados para cada poluente analisado.

6.2.2.1 Estimativa de emissões de CO

As Figuras 25, 26 e 27 apresentam a estimativa de emissões de monóxido de carbono (CO) para os TAEs com nível baixo, médio e alto de carregamento, respectivamente, considerando os fluxos estimados pelo VISSIM. Os valores das estimativas de CO previstas pelo IVE são apresentados no Apêndice B. As barras das figuras representam

cada um dos TAEs identificados por um código e são ordenadas por ordem crescente do volume de tráfego estimado para o trecho.

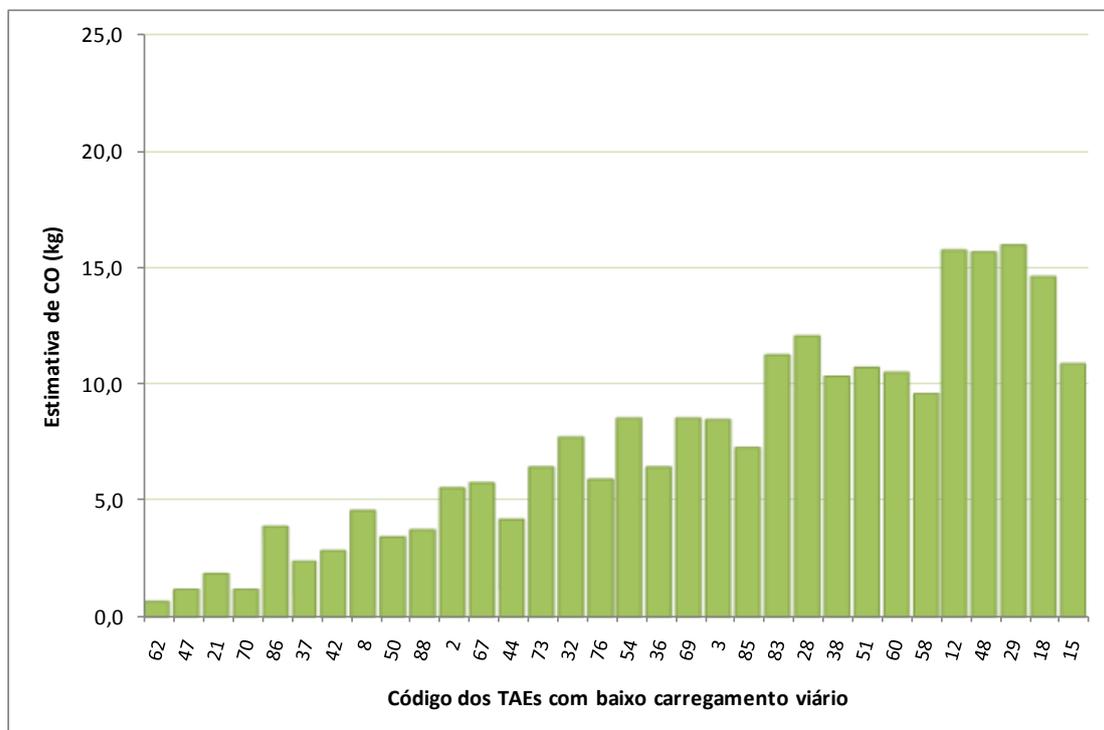


Figura 25 – Estimativa de CO dos TAEs com nível baixo de carregamento viário

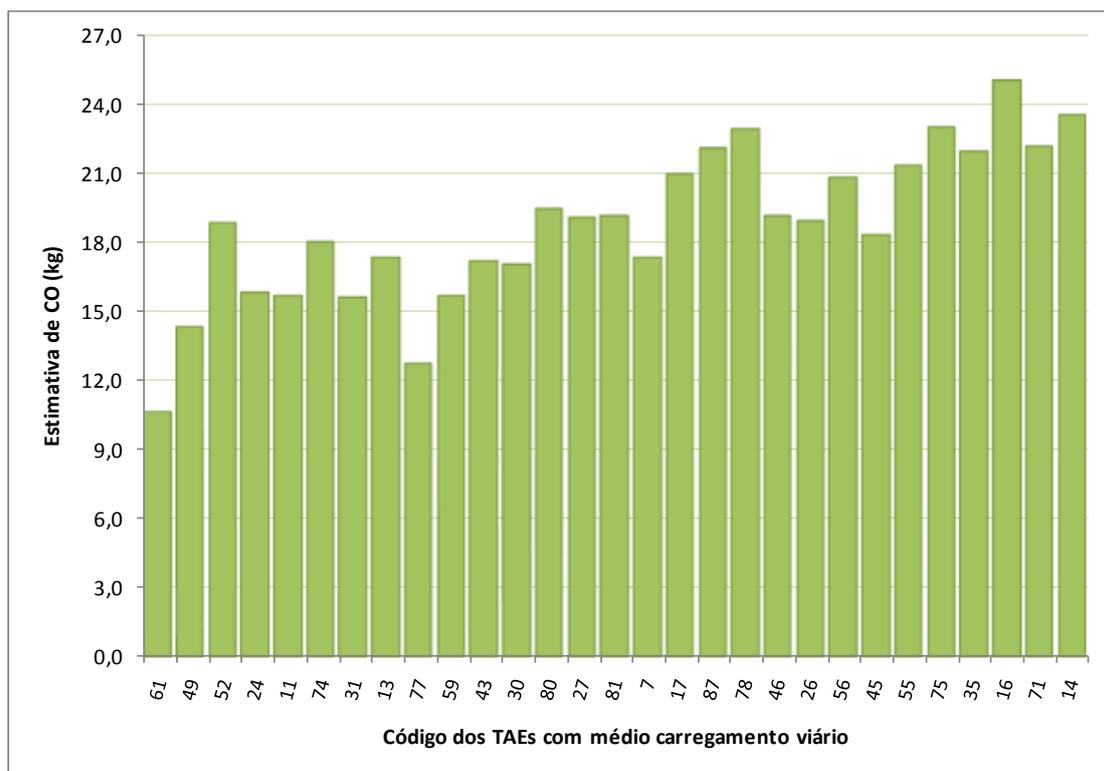


Figura 26 – Estimativa de CO dos TAEs com nível médio de carregamento viário

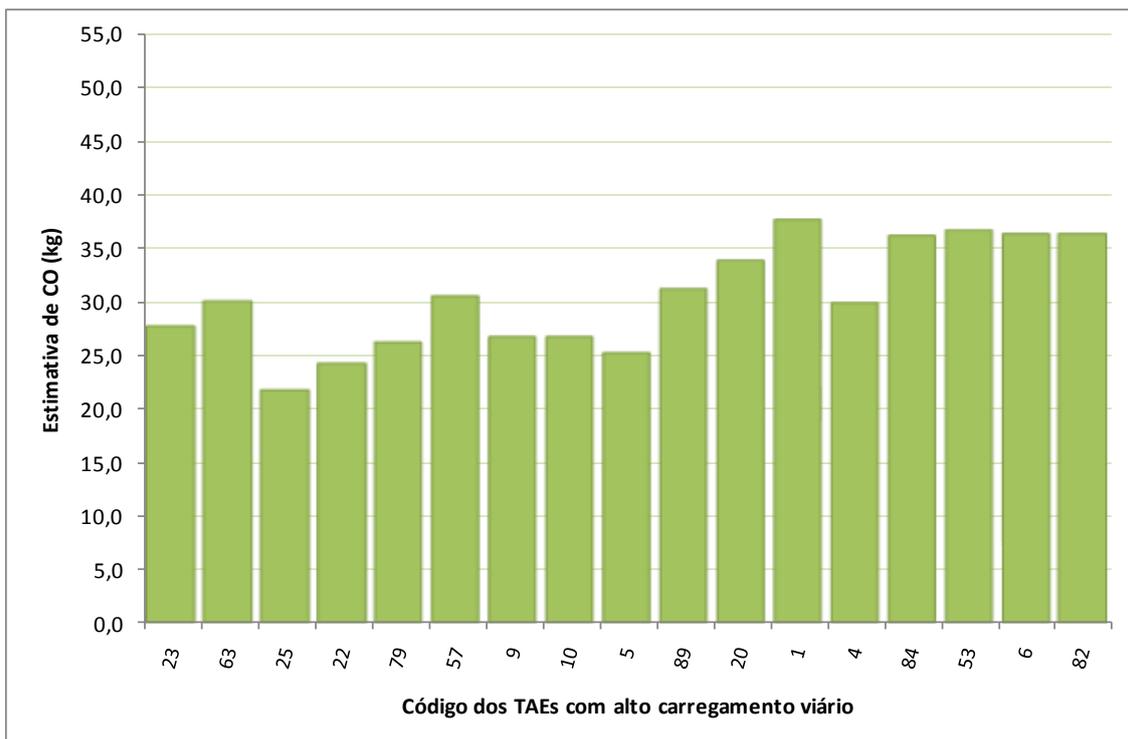


Figura 27 – Estimativa de CO dos TAEs com alto nível de carregamento viário

A análise das Figuras 25, 26 e 27 indica que existe uma tendência crescente das emissões de CO em relação ao volume de veículos em cada trecho. Em relação aos TAEs com baixo e médio carregamento viário, essa tendência foi mais acentuada. Os TAEs com altos volumes de tráfego apresentaram estimativas de CO em torno de um valor médio de 30 kg e o perfil da distribuição das estimativas em relação ao fluxo de veículos mostrou-se menos acentuado do que nos outros dois casos.

6.2.2.2 Estimativa de emissões de HC

As Figuras 28, 29 e 30 apresentam a estimativa de emissões de hidrocarbonetos (HC) para os TAEs com nível baixo, médio e alto de carregamento, respectivamente, considerando os fluxos estimados pelo VISSIM. Os valores das estimativas de HC previstas pelo IVE são apresentados no Apêndice B. As barras das figuras representam cada um dos TAEs identificados por um código e são ordenadas por ordem crescente do volume de tráfego estimado para o trecho.

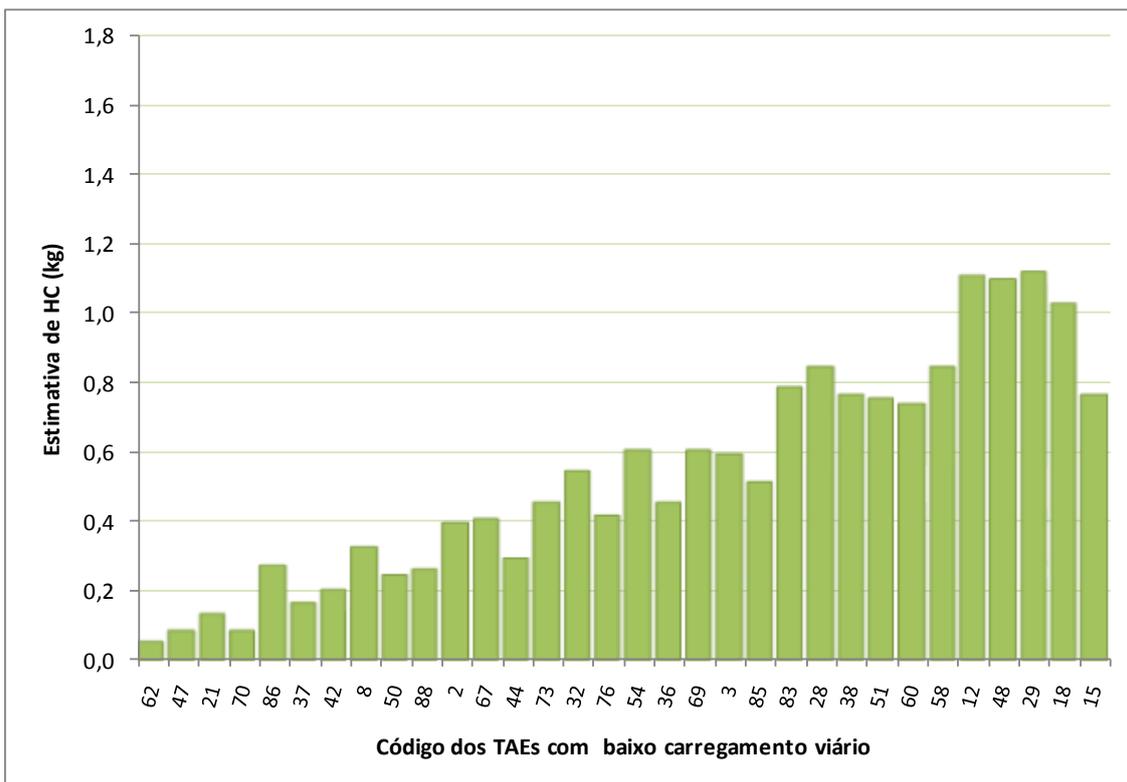


Figura 28 – Estimativa de HC dos TAEs com baixo nível de carregamento viário

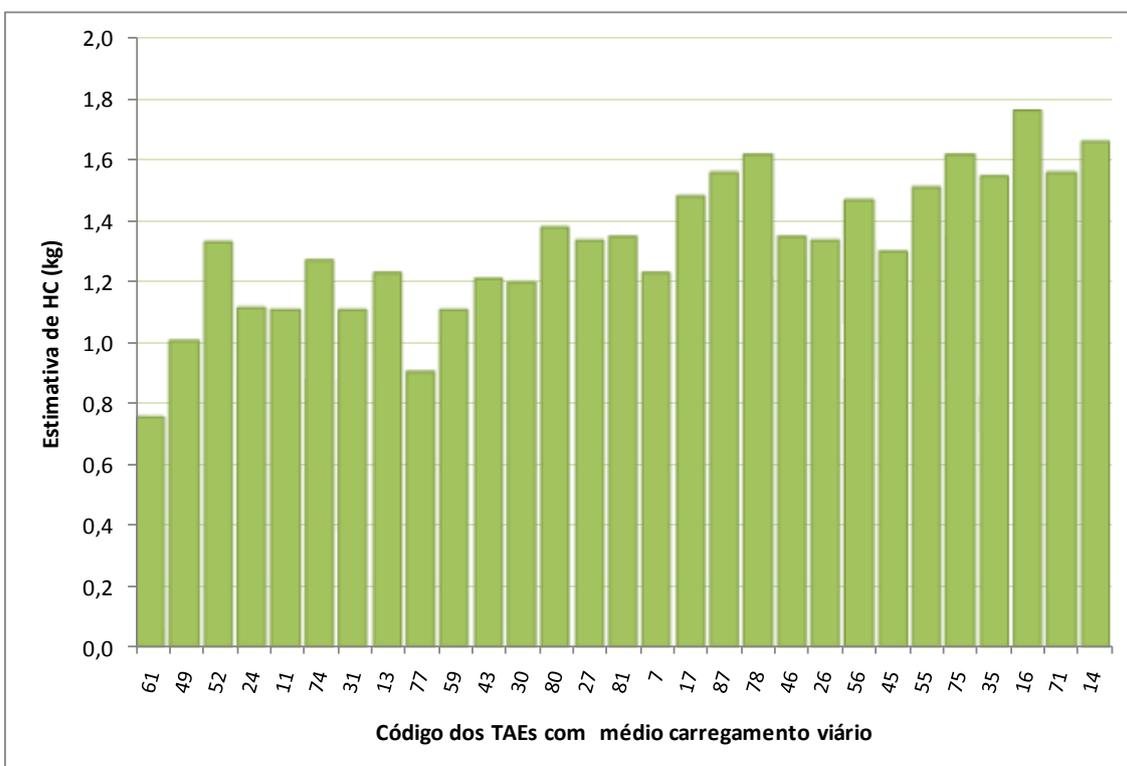


Figura 29 – Estimativa de HC dos TAEs com nível médio de carregamento viário

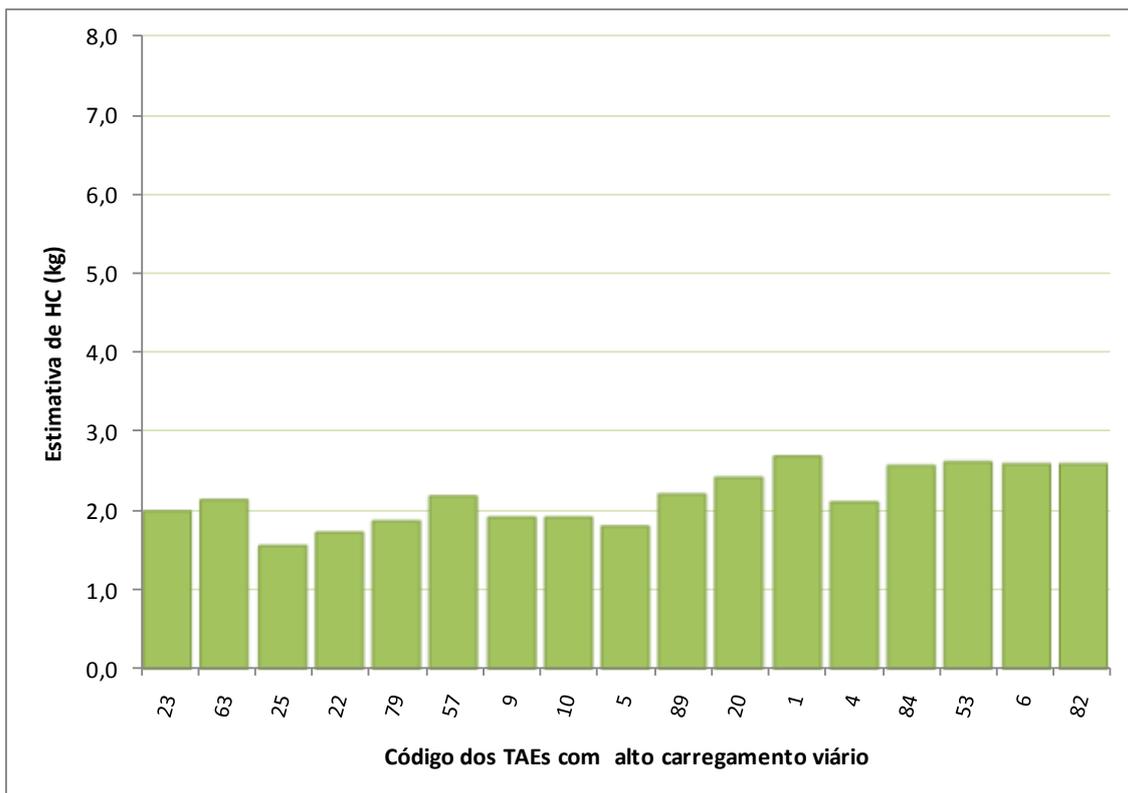


Figura 30 – Estimativa de HC dos TAEs com alto nível de carregamento viário

Da mesma forma do que na análise de CO, as estimativas de hidrocarbonetos (HC) apresentaram uma tendência crescente em relação ao volume de veículos em cada trecho, como mostram as Figuras 28, 29 e 30. A tendência do aumento dos níveis de HC em função do volume de veículos foi mais acentuada nos TAEs com baixos carregamentos. Os TAEs com altos volumes de tráfego apresentaram estimativas de HC próximas de 2 kg e o perfil da distribuição das estimativas em relação ao fluxo de veículos mostrou-se menos acentuado do que nos outros dois casos.

6.2.2.3 Estimativa de emissões de NOx

As Figuras 31, 32 e 33 apresentam a estimativa de emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) para os TAEs com nível baixo, médio e alto de carregamento, respectivamente, considerando os fluxos estimados pelo VISSIM. Os valores das estimativas de NOx previstas pelo IVE são apresentados no Apêndice B. As barras das figuras representam cada um dos TAEs identificadas por um código e são ordenadas por ordem crescente do volume de tráfego estimado para o trecho.

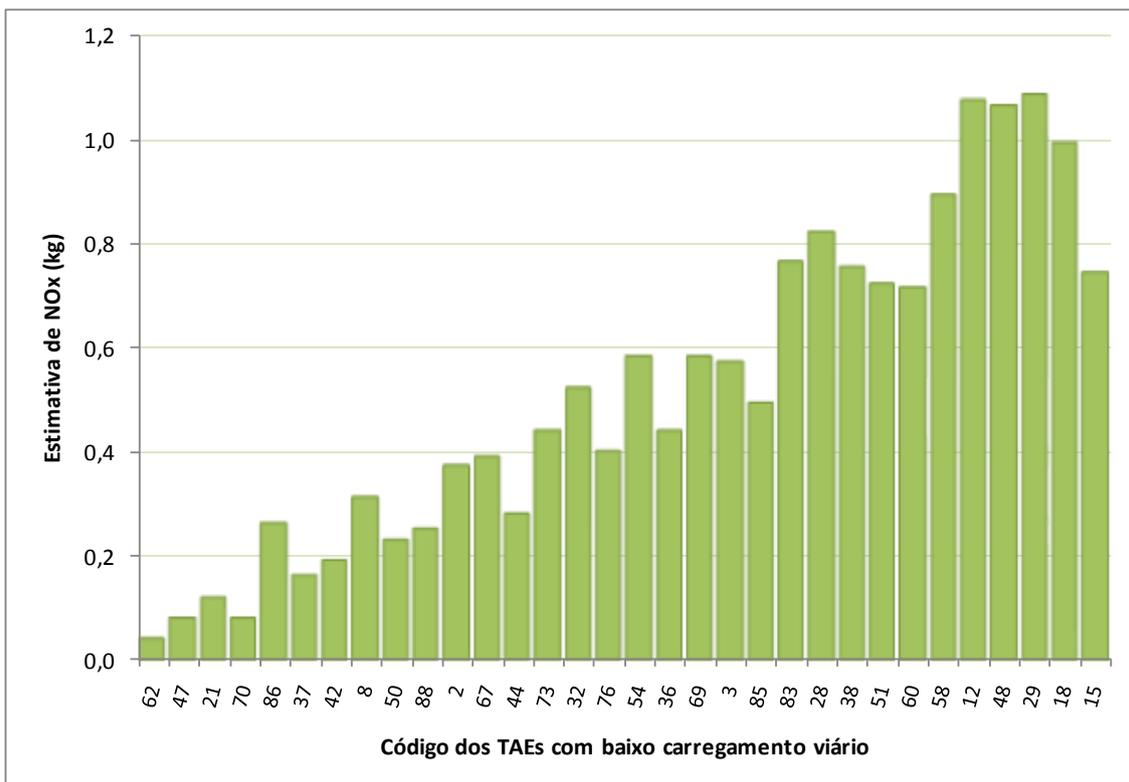


Figura 31 – Estimativa de NOx dos TAEs com baixo nível de carregamento viário

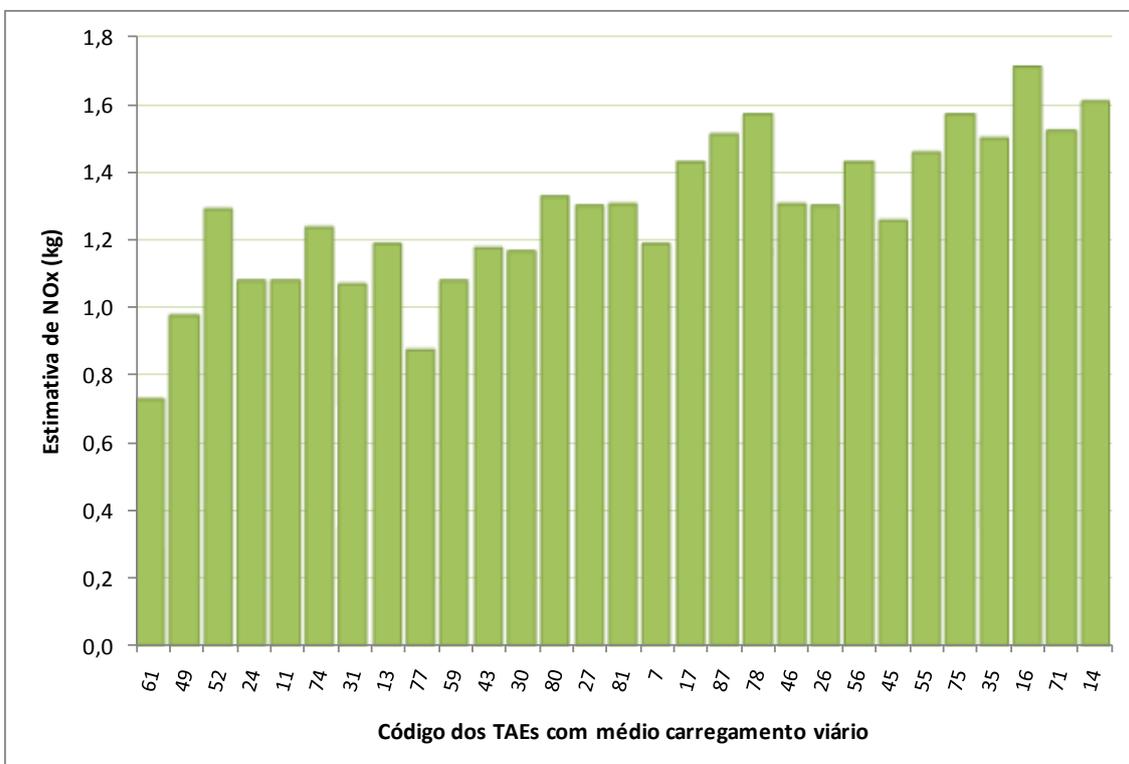


Figura 32 – Estimativa de NOx dos TAEs com nível médio de carregamento viário

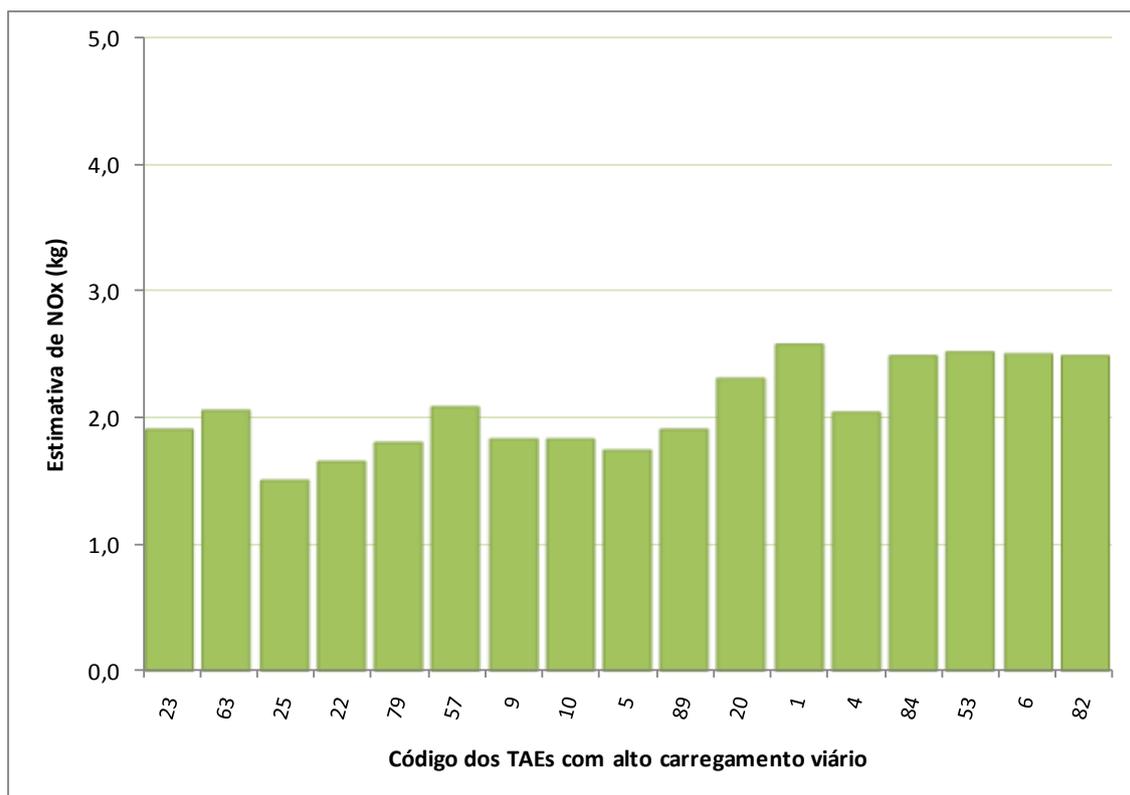


Figura 33 – Estimativa de NOx dos TAEs com alto nível de carregamento viário

As estimativas de óxidos de nitrogênio (NOx) realizadas pelo IVE, em geral, seguiram as mesmas tendências dos perfis de distribuição em relação ao volume de veículos observados na análise de CO e HC. Novamente, a tendência do aumento dos níveis de NOx em relação ao volume de veículos foi mais acentuada nos TAEs com baixos carregamentos. Os TAEs com altos volumes de tráfego apresentaram estimativas de NOx próximas de 2 kg e o perfil da distribuição das estimativas em relação ao fluxo de veículos mostrou-se menos acentuado do que nos outros dois casos.

6.3 COMPARAÇÃO DAS ESTIMATIVAS DE EMISSÕES

Esta seção apresenta a análise comparativa das emissões de poluentes estimadas pelos modelos MOBILE e IVE. O objetivo desta análise é identificar onde as emissões apresentaram maiores diferenças e associá-las às características do tráfego responsáveis por tais diferenças. Para a análise, os TAEs foram divididos em grupos de acordo com o nível de carregamento viário estimado pelo modelo VISSIM. Assim, os níveis considerados são: (i) baixo, para volume menor do que 900 veículos; (ii) médio, para volumes entre 901 e 1500 veículos, e (iii) alto, para fluxos maiores do que 1500

veículos. As Figuras 34, 35 e 36 apresentam a comparação das estimativas de CO, HC e NOx, respectivamente, realizadas pelos dois modelos de emissões, MOBILE e IVE. Cada ponto plotado no gráfico representa um TAE.

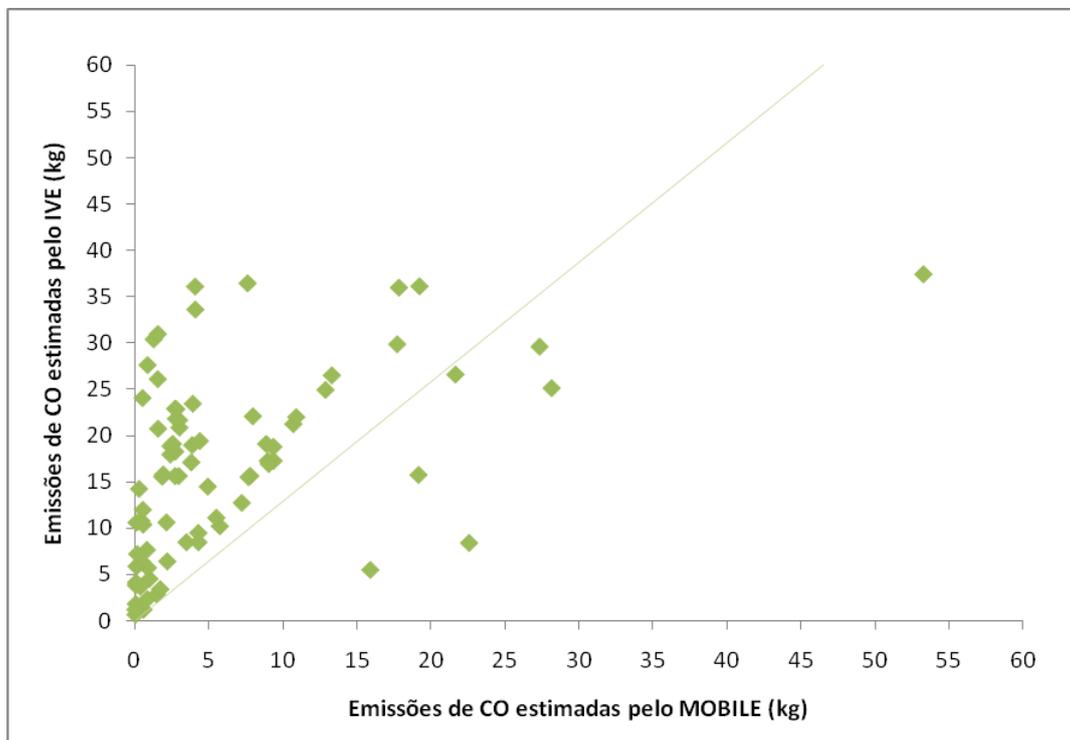


Figura 34 – Comparação das estimativas de CO pelos dois modelos de emissões

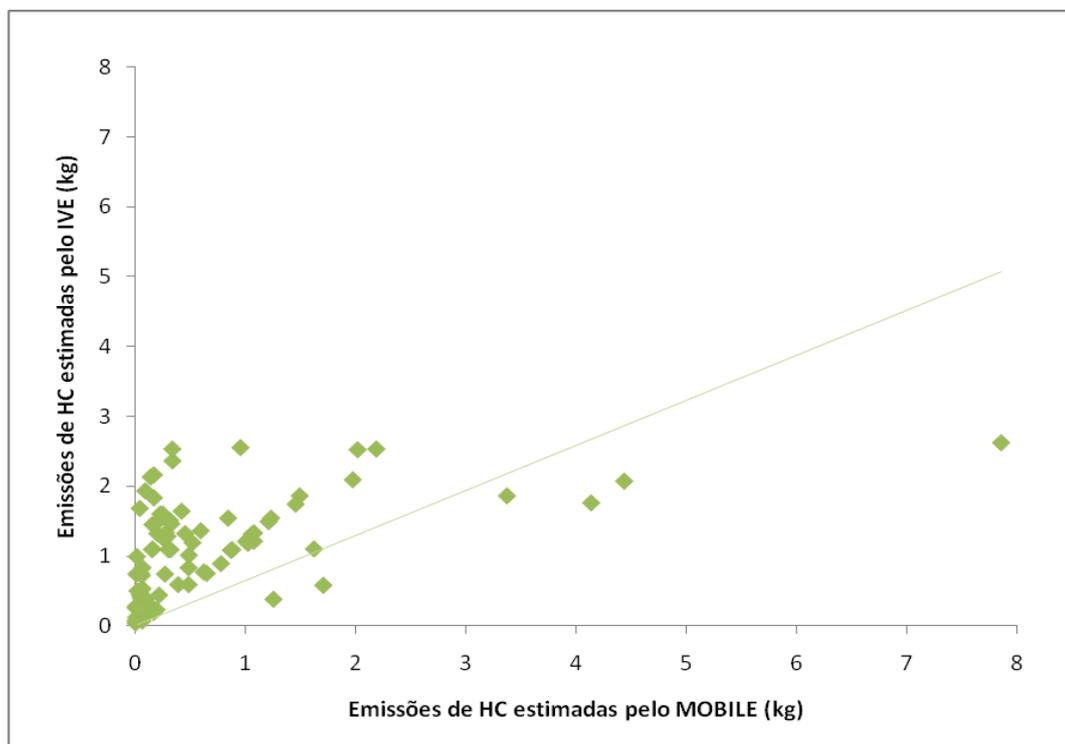


Figura 35 – Comparação das estimativas de HC pelos dois modelos de emissões

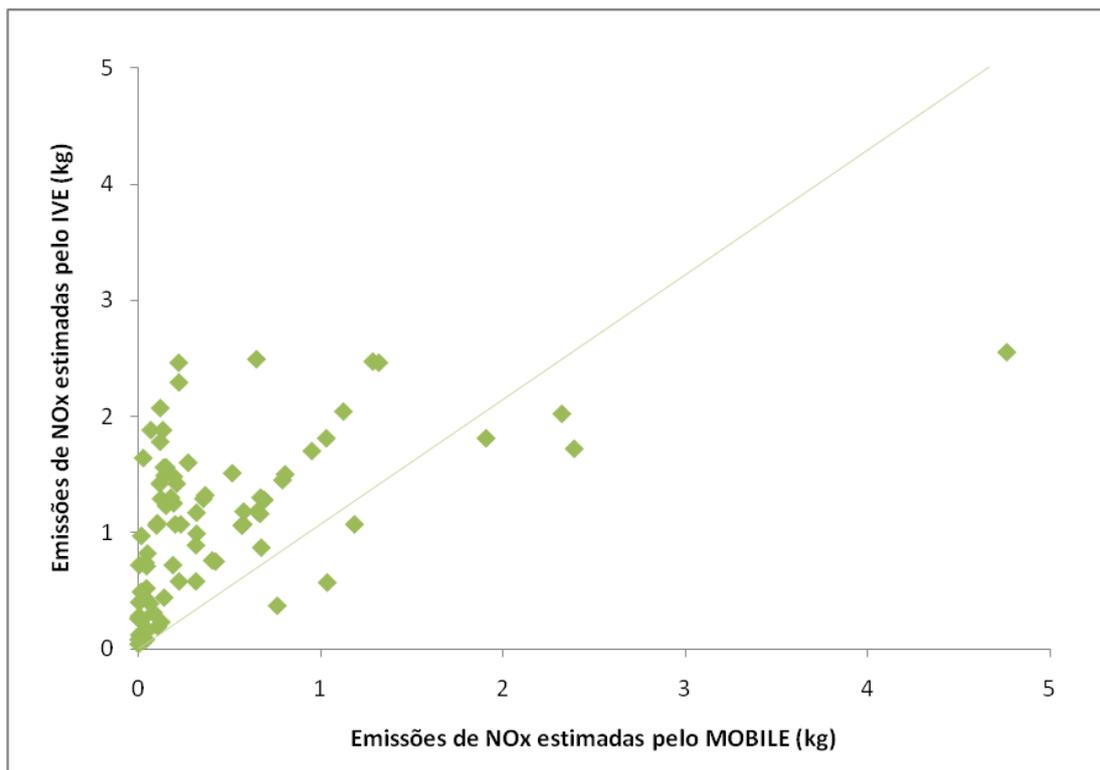


Figura 36 – Comparação das estimativas de NOx pelos dois modelos de emissões

É possível observar nas Figuras 34, 35 e 36 uma grande dispersão dos resultados nas estimativas dos três poluentes avaliados. No entanto, há uma tendência dos valores estimados pelo IVE serem maiores do que os estimados pelo MOBILE.

6.3.1 Comparação dos TAEs com baixo nível de carregamento viário

As Figuras 37, 38 e 39 apresentam a comparação dos resultados das emissões de CO, HC e NOx, respectivamente, para os TAEs com baixo nível de carregamento viário. As barras das figuras representam cada um dos TAEs identificadas por um código e são ordenadas por ordem crescente do volume de tráfego estimado pelo VISSIM para o trecho em análise.

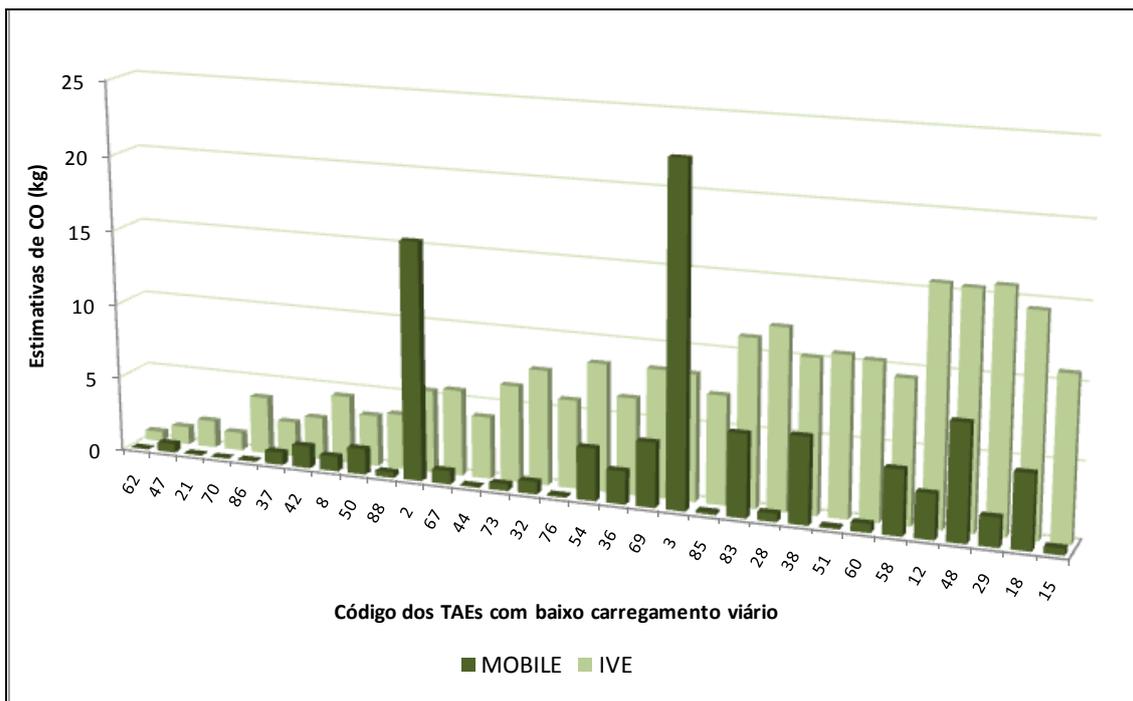


Figura 37 – Estimativas de CO para TAEs com baixo carregamento viário

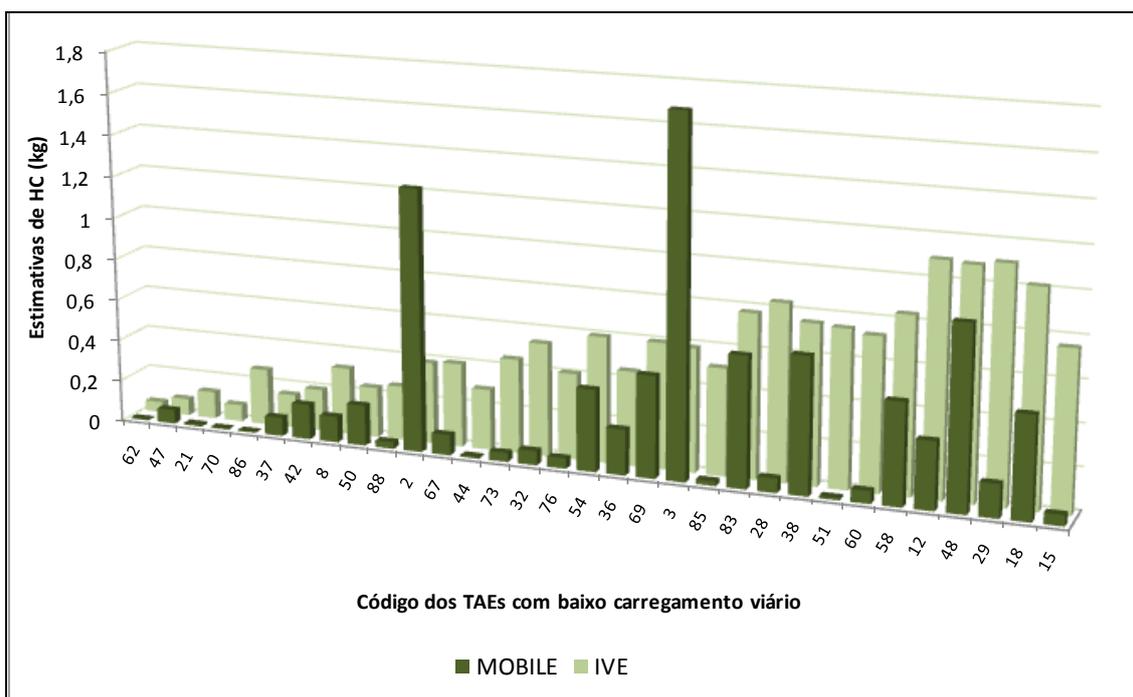


Figura 38 – Estimativas de HC para TAEs com baixo carregamento viário

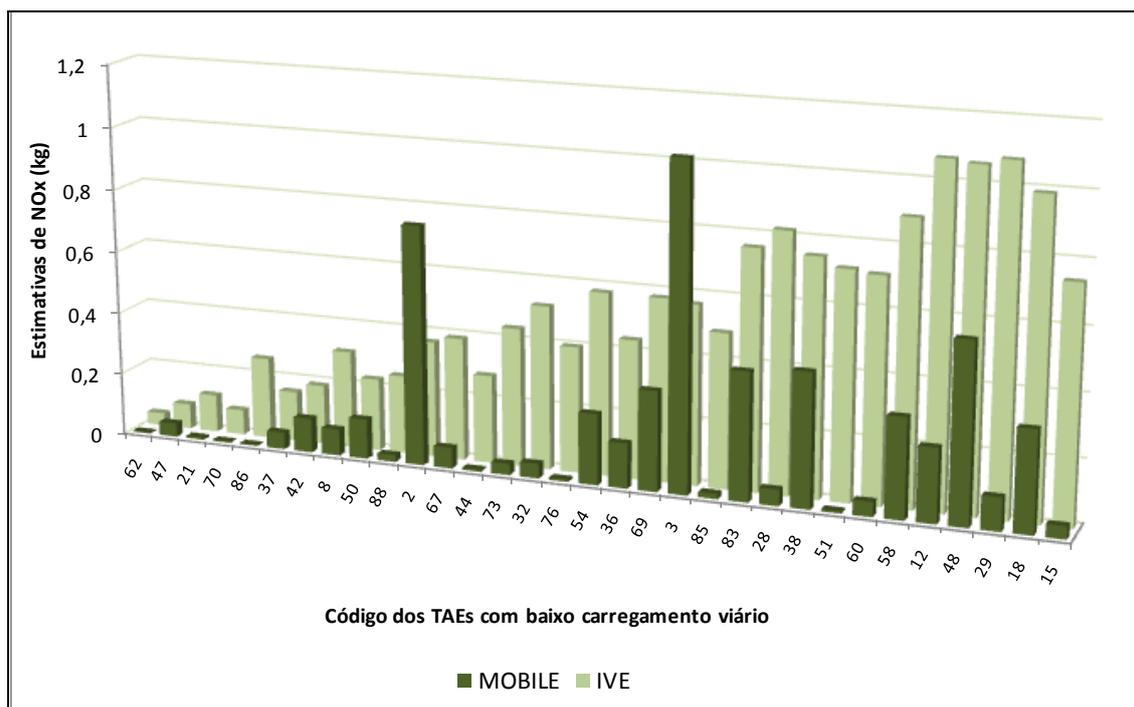


Figura 39 – Estimativas de NOx para TAEs com baixo carregamento viário

Através da análise das Figuras 37, 38 e 39 foi possível verificar que os TAEs 2 e 3 apresentaram grandes picos de emissões nas estimativas do MOBILE, possivelmente devido à velocidade média estimada no SATURN ser maior do que 50 km/h. As diferenças percentuais médias entre as estimativas de CO, HC e NOx, considerando todos os TAEs com baixo carregamento viário, foram, respectivamente, 61%, 48% e 66%.

A Figura 40 representa as diferenças percentuais entre as estimativas dos modelos MOBILE e IVE divididas pela distância do trecho de cada TAE, considerando as estimativas do IVE como referência. A Equação 5 apresenta a expressão utilizada para o cálculo.

$$Dif = \frac{E_{(poluente)IVE} - E_{(poluente)MOBILE}}{E_{(poluente)IVE}} \times \frac{1}{L} \quad (5)$$

Em que:

Dif: Diferença percentual de emissões em relação às estimativas do IVE

$E_{(poluente)IVE}$: Emissões do poluente *i* estimadas pelo IVE

$E_{(poluente)MOBILE}$: Emissões do poluente i estimadas pelo MOBILE

L : comprimento do trecho que compõe o TAE

Assim, é possível avaliar a diferença percentual por unidade de comprimento, neste caso, por metro. A análise indicou que as maiores diferenças foram observadas nos TAEs 83, 85, 67, 88, 21, 86, 62, 73, 76, 48, 47, 44, 60 e 51, além dos já citados 2 e 3. Com exceção desses e dos TAEs 21 e 44, os demais representam trechos de arcos externos da rede viária e de comprimento curto. Em geral, estes TAEs representam pontos da rede viária onde entram e saem as viagens, ou seja, correspondem às conexões das zonas de tráfego com a rede viária. O Apêndice C apresenta as características dos TAEs com baixo carregamento representados na Figura 40.

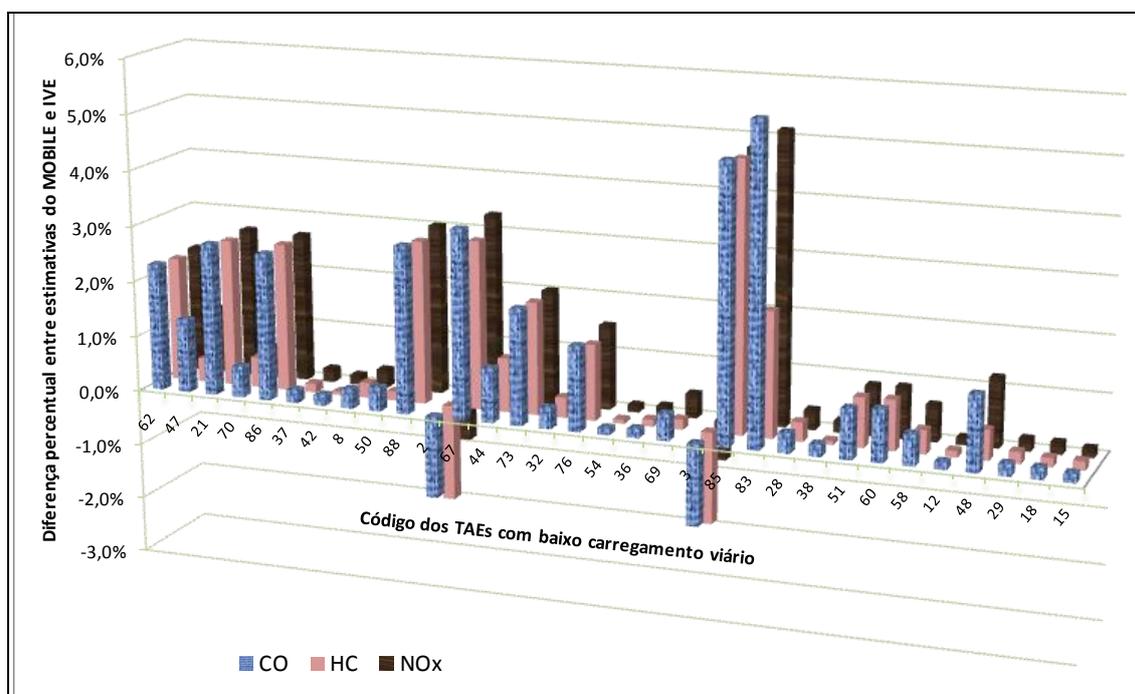


Figura 40 – Diferenças percentuais de estimativas de emissões para TAEs com baixo carregamento viário

A Tabela 11 sintetiza as características dos TAEs com baixo carregamento viário, excluídos os arcos externos, que apresentaram maiores diferenças relativas nas estimativas de CO entre os dois modelos. É importante ressaltar que os mesmos TAEs tiveram diferenças de ordem semelhante em relação às estimativas de HC e NOx, e por isso, não são apresentados nesta tabela.

A coluna referente ao tamanho do trecho segue uma classificação de três níveis, sendo curto, para trechos com até 130m; médio, para trechos de comprimento entre 131 m e 650 m, e longo para trechos maiores do que 650 m. A coluna que indica a classificação viária corresponde à classificação hierárquica das vias em arteriais ou coletoras. A última coluna da tabela indica se ao final do trecho os veículos necessitam esperar por uma brecha na corrente de tráfego oposta para realizar o movimento desejado.

É possível observar na Tabela 11 que, desconsiderando os TAEs 2 e 3 que possivelmente obtiveram diferenças significativas em função da velocidade média estimada pelo SATURN, a característica comum entre os TAEs com maiores diferenças percentuais nas emissões refere-se à presença de semáforo à jusante do trecho de análise. Ainda, houve diferenças significativas quando os veículos necessitam esperar brechas na corrente de tráfego para inserir-se em via prioritária. Essas características indicam possivelmente mudanças no ciclo de condução dos veículos.

Tabela 11 – Características dos TAEs com baixo carregamento viário e maiores diferenças relativas nas emissões de CO

Código do TAE	Diferença relativa de CO	Tamanho do trecho	Classificação viária	Nº de interseções no trecho	Nº de semáforos por trecho	Semáforo no final do trecho	Espera brecha?
2	-189,8%	curto	coletora	1	0	não	sim
3	-168,8%	curto	coletora	1	0	não	sim
44	97,7%	curto	coletora	1	1	sim	-
70	96,1%	médio	arterial	1	1	sim	-
15	95,8%	médio	coletora	2	2	sim	-
21	95,7%	curto	arterial	1	1	sim	-
28	95,4%	médio	coletora	1	2	sim	-
62	91,4%	curto	arterial	1	1	sim	-
32	89,2%	médio	coletora	1	1	sim	-
29	87,8%	médio	coletora	3	0	não	sim
12	81,0%	médio	coletora	3	1	sim	-
8	77,9%	médio	coletora	2	0	não	sim
18	65,9%	médio	coletora	2	0	não	-
36	65,7%	médio	coletora	2	0	não	sim
37	63,7%	médio	coletora	1	0	não	sim
54	58,8%	médio	coletora	2	1	sim	-

6.3.2 Comparação dos TAEs com nível médio de carregamento viário

As Figuras 41, 42 e 43 apresentam a comparação dos resultados das emissões de CO, HC e NOx, respectivamente, para os TAEs com nível médio de carregamento viário. As barras das figuras representam cada um dos TAEs identificados por um código e são ordenadas em ordem crescente do volume de tráfego estimado pelo VISSIM para o trecho em análise.

Com exceção do TAE 24, as estimativas de emissões dos três poluentes realizadas pelo IVE foram maiores do que as do MOBILE. Em média, a diferença percentual entre as estimativas de CO pelos dois modelos foi de 68%, das emissões de HC foi 51% e das estimativas de NOx foi de 67%. A maior diferença percentual se deu no TAE 49 e aproximou-se de 98% para os três poluentes analisados. Por outro lado, a menor diferença foi observada no TAE 77, onde as diferenças relativas para CO, HC e NOx foram, respectivamente, 43%, 13% e 22%.

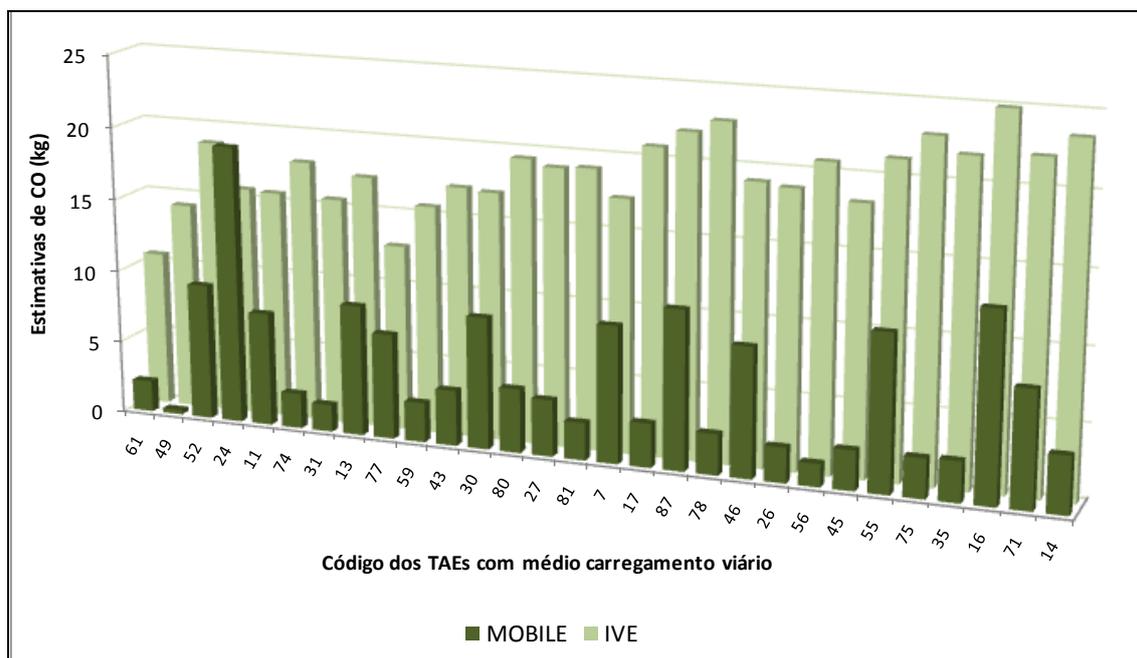


Figura 41 – Estimativas de CO para TAEs com médio carregamento viário

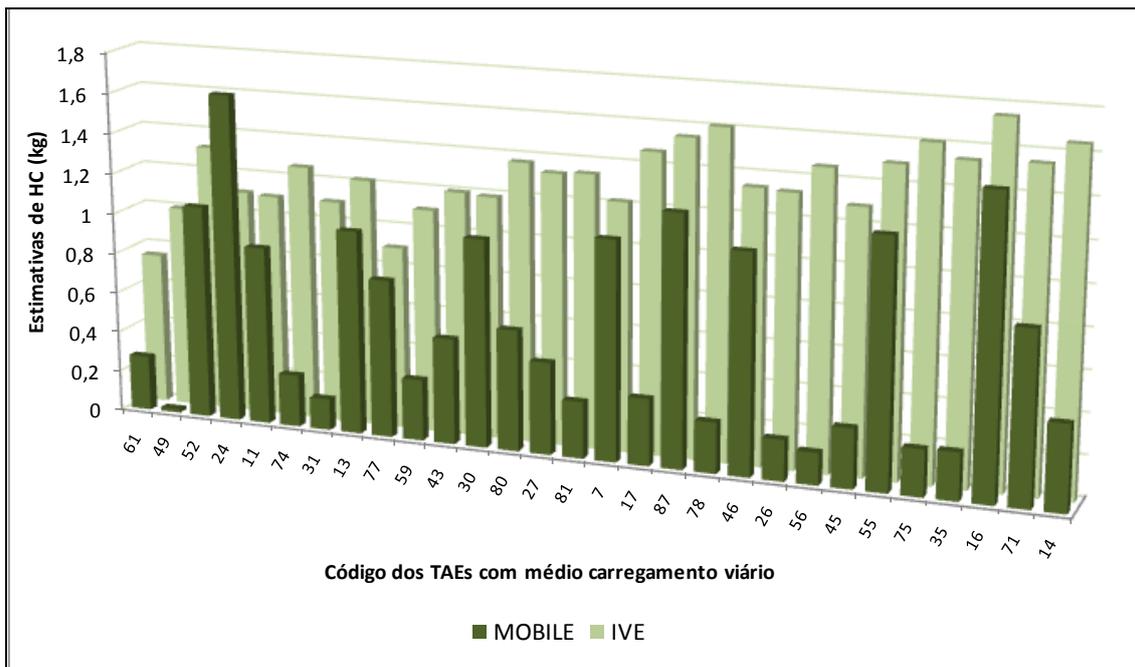


Figura 42 – Estimativas de HC para TAEs com médio carregamento viário

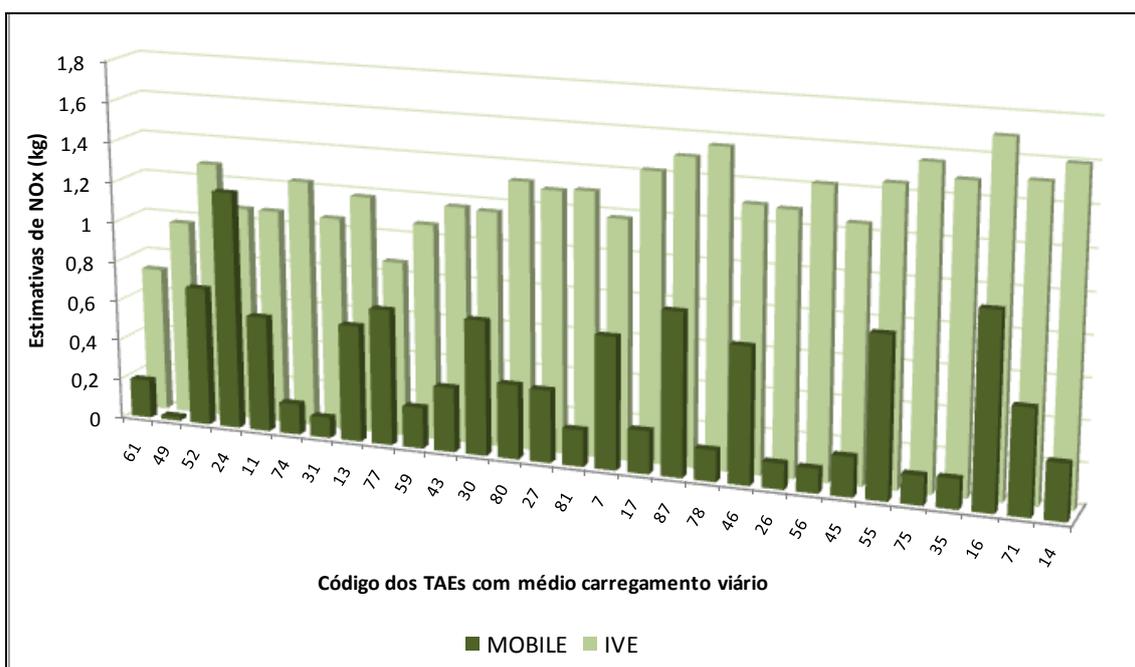


Figura 43 – Estimativas de NOx para TAEs com médio carregamento viário

A Figura 44 mostra as diferenças percentuais entre os dois modelos, tomando como referência as estimativas do IVE. As diferenças relativas foram divididas pela distância do trecho de cada TAE e desta forma, representam as diferenças na estimativa de emissões por unidade de comprimento.

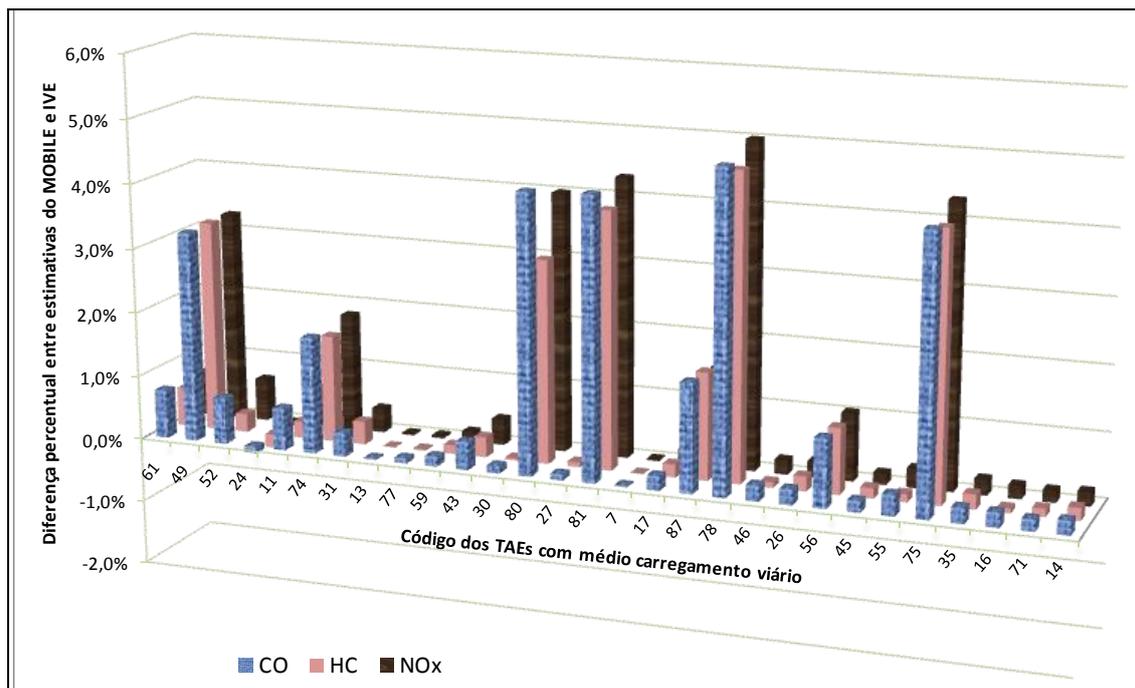


Figura 44 – Diferenças percentuais de estimativas de emissões para TAEs com médio carregamento viário

A análise da Figura 44 permite identificar que os TAEs com maior diferença relativa entre as emissões dadas pelo MOBILE e IVE por unidade de comprimento são 78, 81, 80, 75, 49, 74, 87, 56, 61, 52 e 11. Todos esses TAEs correspondem a trechos curtos, ou seja, de comprimento até 130 m. Além disso, com exceção dos TAEs 56 e 11, esses trechos referem-se a arcos externos da rede viária utilizados para a conexão com as zonas de tráfego. As características dos TAEs com médio carregamento viário são detalhadas no Apêndice C.

A Tabela 12 resume as características dos TAEs com médio carregamento viário, excluídos os arcos externos, que apresentaram maiores diferenças relativas nas estimativas de CO entre os dois modelos. É importante salientar que as mesmos TAEs tiveram diferenças de ordem semelhante em relação às estimativas de HC e NOx, e por isso, não são apresentadas nesta tabela.

Tabela 12 – Características dos TAEs com médio carregamento viário e maiores diferenças relativas nas emissões de CO

Código do TAE	Diferença relativa de CO	Tamanho do trecho	Classificação viária	Nº de interseções no trecho	Nº de semáforos por trecho	Semáforo no final do trecho	Espera brecha?
56	92,4%	curto	coletora	1	0	não	sim
35	87,2%	médio	coletora	2	0	não	sim
26	87,2%	médio	coletora	2	0	não	sim
17	85,5%	médio	coletora	2	0	não	sim
45	85,0%	médio	coletora	2	1	sim	-
14	83,3%	médio	coletora	2	0	não	sim
59	82,6%	médio	coletora	3	1	sim	-
27	79,5%	longo	coletora	3	3	não	-
43	77,7%	médio	coletora	1	0	não	sim
71	63,9%	médio	arterial	1	1	não	-
46	53,5%	médio	coletora	1	0	não	sim
11	50,2%	curto	coletora	1	0	não	sim

Observa-se na Tabela 12 que a principal característica dos TAEs com médio carregamento viário que apresentaram maiores diferenças relativas nas emissões refere-se à necessidade de espera por uma brecha na corrente de tráfego. Ainda, no caso dos TAEs 45 e 59, a existência de um semáforo ao final do trecho de análise possivelmente tenha contribuído para as diferenças observadas. Em relação ao TAE 27, as diferenças provavelmente são relacionadas à quantidade de semáforos dispostos ao longo do trecho de análise. O TAE 71 representa um segmento de via arterial que possui um semáforo no meio do trecho e que no final deste ocorre a redução do número de faixas, o que acredita-se estar relacionado à mudança no padrão de condução dos veículos.

6.3.3 Comparação dos TAEs com alto nível de carregamento viário

As Figuras 45, 46 e 47 apresentam a comparação dos resultados das emissões de CO, HC e NO_x, respectivamente, para os TAEs com alto nível de carregamento viário. As barras das figuras representam cada um dos TAEs identificados por um código e são ordenadas por ordem crescente do volume de tráfego estimado pelo VISSIM para o trecho analisado.

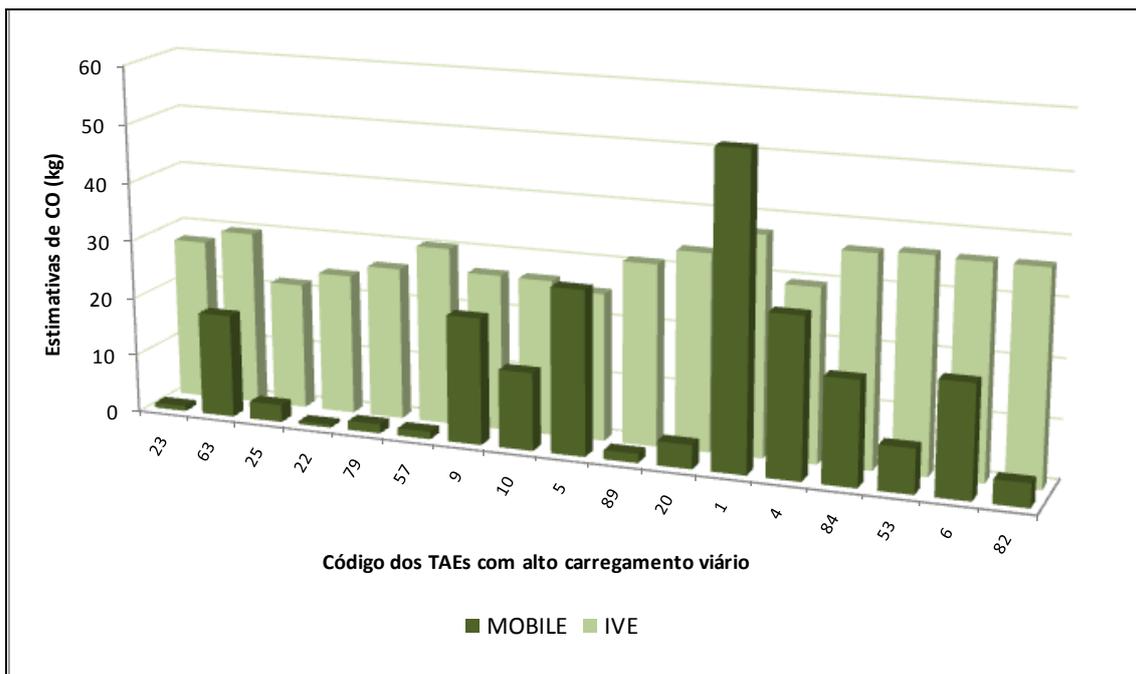


Figura 45 – Estimativas de CO para TAEs com alto carregamento viário

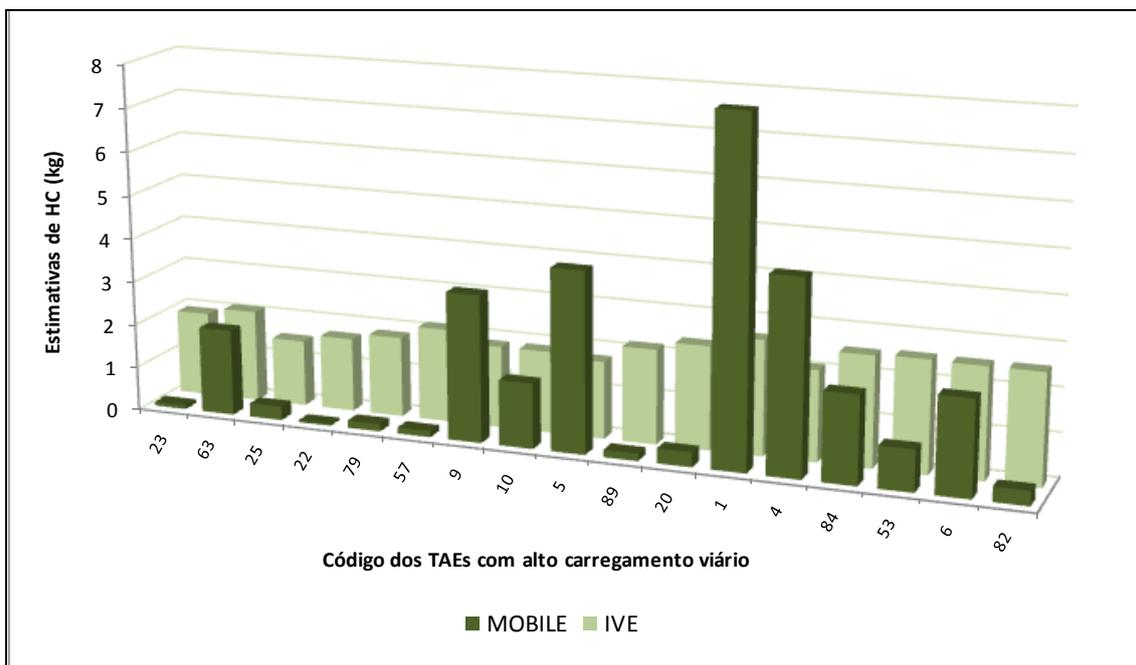


Figura 46 – Estimativas de HC para TAEs com alto carregamento viário

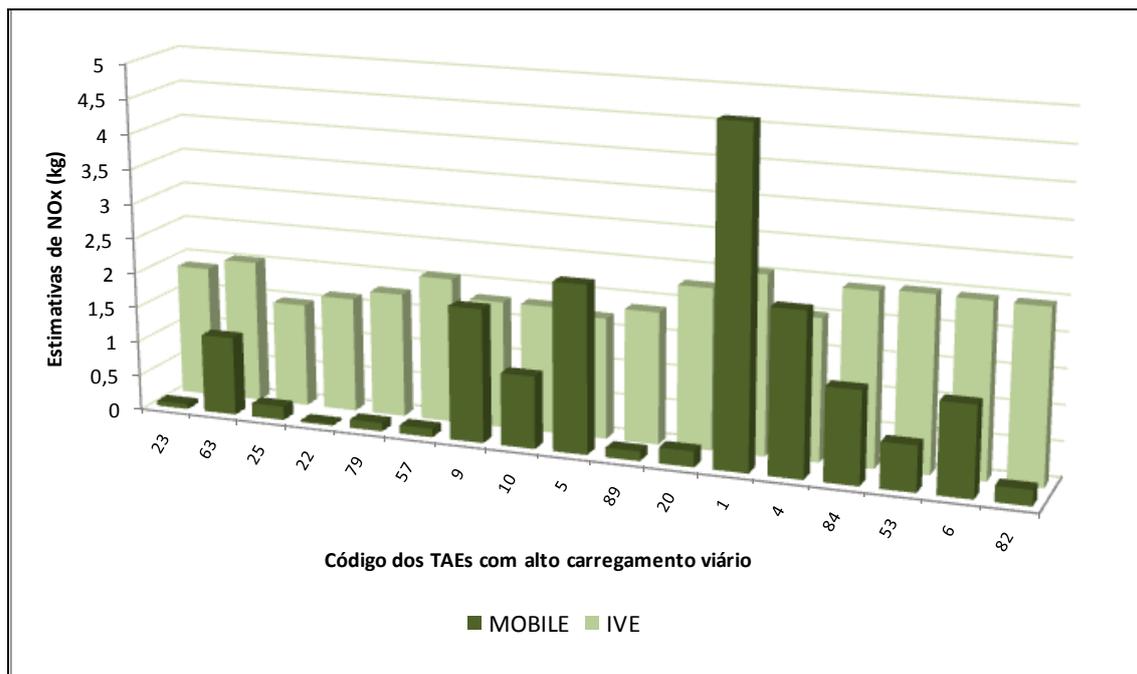


Figura 47 – Estimativas de NOx para TAEs com alto carregamento viário

Neste grupo de trechos de análise de emissões, apenas os TAEs 1 e 5 apresentaram estimativas do MOBILE maiores do que as do IVE. As diferenças percentuais observadas nas emissões do TAE 1 para CO, HC e NOx, foram, respectivamente, iguais a 42%, 199% e 87%. As diferenças percentuais médias das estimativas de CO, HC e NOx, considerando todos os TAEs com alto carregamento viário, foram, respectivamente, 58%, 19% e 50%.

A Figura 48 apresenta as diferenças percentuais entre os dois modelos, tomando como referência as estimativas do IVE. As diferenças relativas foram divididas pela distância do trecho de cada TAE e desta forma, representam as diferenças na estimativa de emissões por unidade de comprimento.

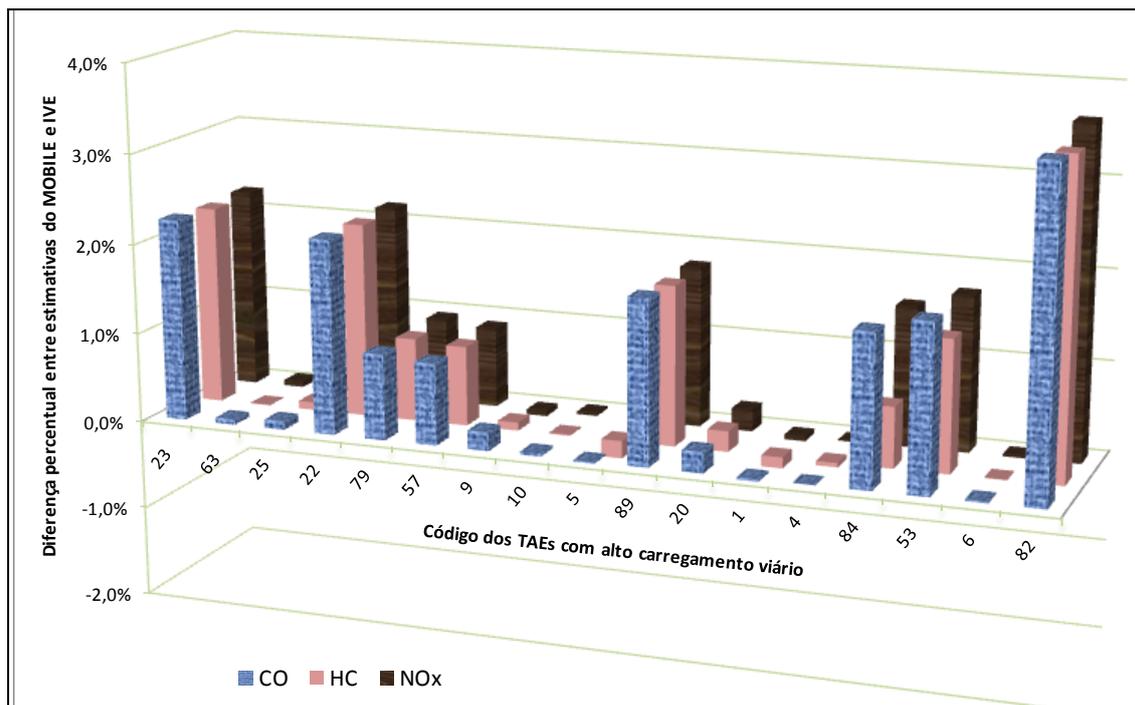


Figura 48 – Diferenças percentuais de estimativas de emissões para TAEs com alto carregamento viário

Observa-se que os TAEs com maior diferença relativa entre as emissões dadas pelo MOBILE e IVE são 82, 23, 22, 53, 89, 84, 79 e 57. Todos esses TAEs correspondem a trechos curtos de comprimento até 130 m. Além disso, com exceção dos TAEs 22, 23 e 89, esses trechos referem-se a arcos externos que conectam as zonas de tráfego à rede viária. As características dos TAEs representados na Figura 48 são detalhadas no Apêndice C.

A Tabela 13 descreve as características dos TAEs com alto carregamento viário que apresentaram maiores diferenças relativas nas estimativas de CO entre os modelos MOBILE e IVE. Não são considerados para essa análise os TAEs que representam arcos externos da rede viária.

Tabela 13 – Características dos TAEs com alto carregamento viário e maiores diferenças relativas nas emissões de CO

Código do TAE	Diferença relativa de CO	Tamanho do trecho	Classificação viária	Nº de interseções no trecho	Nº de semáforos por trecho	Semáforo no final do trecho	Espera brecha?
22	97,8%	curto	arterial	1	1	sim	-
23	96,8%	curto	arterial	1	1	sim	-
89	94,9%	curto	arterial	1	0	não	sim
25	86,2%	longo	arterial	5	3	sim	-
10	49,8%	longo	arterial	8	5	não	-
6	46,8%	longo	arterial	12	6	sim	-
1	-42,3%	longo	arterial	8	3	não	-

Através das informações da Tabela 13, percebe-se que em relação aos trechos curtos, a principal característica que possivelmente tenha gerado diferenças significativas refere-se à presença de semáforo no final do trecho. Ainda, o TAE 89, pode ter associada à variação das emissões a espera por uma brecha na corrente de tráfego oposto.

No caso dos trechos de longa distância, as possíveis características responsáveis pelas diferenças significativas nos níveis de emissões podem estar relacionadas ao elevado número de interseções e de semáforos ao longo dos trechos. Essas características podem contribuir para padrões de condução com elevados eventos de desaceleração e aceleração. Além disso, grandes distâncias permitem que os veículos possam desenvolver velocidades mais altas, gerando maiores níveis de emissões.

6.4 ESTIMATIVA TOTAL DE EMISSÕES NA ÁREA DE ESTUDO

A estimativa total de emissões para a área de estudo foi calculada através da soma das emissões estimadas por cada um dos modelos de emissões estático e dinâmico, considerando os TAEs dos três níveis de carregamento viário. A Tabela 14 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 14 – Estimativas totais de emissões dos modelos MOBILE e IVE

Níveis de carregamento viário	MOBILE			IVE		
	CO (kg)	HC (kg)	NOx (kg)	CO (kg)	HC (kg)	NOx (kg)
Baixo	92,11	8,86	5,66	235,64	16,80	16,37
Médio	168,47	18,27	12,05	542,12	38,16	36,99
Alto	223,09	30,07	17,92	514,26	36,16	34,85
TOTAL	483,68	57,20	35,64	1292,02	91,12	88,21

É possível observar que a estimativa de monóxido de carbono (CO) realizada pelo IVE foi 267% maior do que a estimativa dada pelo MOBILE. Ainda, as estimativas de hidrocarbonetos (HC) e óxidos de nitrogênio (NOx) derivadas no IVE correspondem, respectivamente, a 159% e 248% a mais do que as realizadas pelo MOBILE.

Como propõe o método deste trabalho, foram substituídas da estimativa total do modelo estático as emissões dos TAEs que apresentaram maiores diferenças em cada nível de carregamento analisado. Estes TAEs são sumarizadas nas Tabelas 11, 12 e 13. Desta forma, a Tabela 15 apresenta as emissões estimadas para a área de estudo após a substituição das estimativas do modelo estático pelas aprimoradas pelo modelo dinâmico nos TAEs que apresentaram maiores diferenças.

Tabela 15 – Estimativas totais de emissões dos modelos MOBILE e calculadas através do método proposto

Níveis de carregamento	MOBILE			MÉTODO PROPOSTO		
	CO (kg)	HC (kg)	NOx (kg)	CO (kg)	HC (kg)	NOx (kg)
Baixo	92,11	8,86	5,66	153,89	12,31	10,70
Médio	168,47	18,27	12,05	349,44	48,79	49,14
Alto	223,09	30,07	17,92	335,73	32,26	24,12
TOTAL	483,68	57,20	35,64	839,06	93,36	83,96

Os resultados mostram que as relações percentuais entre as estimativas de CO, HC e NOx do modelo estático, após a substituição dos valores previstos pelo modelo dinâmico nos TAEs com maiores diferenças, foram, respectivamente, iguais a 173%, 163% e 236%. No caso deste estudo, aprimorar a estimativa de emissões em trechos específicos permitiu chegar a uma estimativa global de CO próxima a 65% da estimativa realizada considerando apenas a simulação desagregada. Para as emissões

de HC e NO_x, a adoção das premissas do método proposto aproximou-se dos resultados obtidos com o modelo de emissões dinâmico.

6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados do estudo de caso apresentados neste capítulo permitiram a identificação de características importantes para a elaboração e detalhamento do método proposto. As análises da modelagem de tráfego e de emissões basearam a formulação dos cuidados que devem ser adotados para a adequada associação de modelos agregados e desagregados e a compatibilização dos resultados. O próximo capítulo relata as conclusões desta pesquisa, assim como sugestões para estudos futuros.

7 CONCLUSÃO

Este trabalho permitiu a estruturação de um método sistemático para aprimorar a estimativa de emissões veiculares em áreas urbanas através da utilização de modelagem híbrida de tráfego associada a modelos de emissões. O método busca melhorar a estimativa de poluentes através da integração de níveis distintos de análise de tráfego, associando-os a modelos de emissões compatíveis com o nível de detalhamento das variáveis de fluxo viário.

A revisão teórica deste estudo possibilitou identificar os diferentes níveis de modelagem de tráfego e de emissões, e as relações entre modelos com distintos graus de detalhamento das variáveis. Os modelos existentes vêm sendo cada vez mais aperfeiçoados com o objetivo de melhor representar o comportamento do tráfego e de estimar os volumes de poluentes lançados na atmosfera de maneira mais precisa e confiável.

A adequação da aplicação de cada tipo de modelo está fundamentalmente relacionada aos objetivos da análise. Em geral, em estudos que abrangem áreas extensas e análises estratégicas considera-se mais adequada a utilização de ferramentas de modelagem macroscópicas, cujos resultados agregados satisfazem os objetivos da avaliação. Por outro lado, a modelagem microscópica é melhor utilizada em áreas menos abrangentes, onde os detalhes da simulação são importantes para atender os objetivos.

Para a análise de emissões em grandes áreas urbanas com características heterogêneas de infraestrutura e operação, modelos agregados não são capazes de representar de forma adequada as particularidades do tráfego responsáveis pelas maiores variações nos níveis de emissões, como eventos de acelerações e desacelerações. Por outro lado, os modelos microscópicos, que possuem tal capacidade, demandam grande quantidade de dados, e para apresentar estimativas

confiáveis necessitam ser adequadamente calibrados. Assim, a modelagem híbrida de tráfego proposta neste estudo mostrou-se adequada, uma vez que mantém as vantagens individuais de cada abordagem e pode aumentar a qualidade dos resultados.

Em relação aos modelos de emissões, os modelos estáticos são adequados para estudos estratégicos, como a elaboração de inventários de emissões em grandes áreas, onde as condições médias são satisfatórias. Os modelos dinâmicos, por outro lado, permitem a avaliação de emissões de pequenas áreas ou de projetos específicos onde a variação dos ciclos de condução tem maior relevância.

O estudo de caso desenvolvido neste trabalho teve como objetivo fundamentar a proposição do método e permitir o detalhamento de suas etapas. No estudo de caso foi avaliada uma região da cidade de Porto Alegre. A definição da área de estudo considerou a existência de características distintas de infraestrutura e operação do tráfego para que fosse possível relacionar essas características com os níveis de emissões estimados.

A rede modelada no estudo de caso apresentou boas condições de circulação viária, sem apresentar locais em que as vias operavam próximas da saturação. Isso contribuiu para que os resultados da análise de tráfego e as estimativas de emissões não estivessem vinculados a condições instáveis de operação decorrentes da alta demanda de tráfego.

Os resultados do estudo de caso permitiram a identificação de trechos da rede viária nos quais as estimativas de emissões provenientes de modelos agregados foram significativamente diferentes das estimativas derivadas de modelos microscópicos. Para orientar as análises, os trechos de análise de emissões, TAEs, que se referem aos trechos de análise, foram divididos em três níveis de carregamento viário: baixo, médio e alto.

De forma geral, as diferenças mais significativas entre as estimativas de emissões dos TAEs de baixo carregamento viário ocorreram em trechos onde há presença de

semáforo ao final do trecho. Em relação aos TAEs de médio carregamento viário, as maiores diferenças foram observadas em locais onde, ao final do trecho, houve a necessidade de aguardar uma brecha para inserção na corrente de tráfego concorrente. No caso dos TAEs com alto carregamento viário, que representam os principais eixos viários da rede modelada, as características que possivelmente tenham contribuído para grandes diferenças nas estimativas de emissões referem-se ao elevado número de interseções e de semáforos ao longo dos trechos.

Ainda, foram observadas diferenças significativas nos níveis de emissões em TAEs que representam arcos externos da rede viária, considerando os três níveis de carregamento viário. Os arcos externos da rede viária são, em geral, arcos curtos e têm a função de fazer a ligação das zonas de tráfego com a rede modelada. Assim, estes arcos concentram a demanda de veículos que entra e sai da rede viária. Por isso, é importante que trechos desse tipo não sejam o foco da análise de emissões, uma vez que nesses locais a representação do tráfego pode não refletir as reais condições de operação.

Dentre as etapas propostas no método, a adequada compatibilização das abordagens agregada e desagregada de tráfego, que se refere à modelagem híbrida, mostrou-se um ponto essencial para a confiabilidade dos resultados. Os principais cuidados a serem observados na utilização da abordagem híbrida referem-se à consistência da representação da rede viária, dos fluxos, e das condições dinâmicas do tráfego. A calibração dos modelos também consiste em um aspecto de grande importância para qualidade dos resultados.

Em relação à utilização associada dos modelos de emissões estático e dinâmico e à compatibilização dos resultados, o principal aspecto que deve ser observado diz respeito à compatibilidade das taxas básicas de emissões, da caracterização da frota e das variáveis ambientais consideradas nos dois modelos de emissões. No entanto, mesmo atendidas essas recomendações, é importante observar que modelos estáticos podem apresentar discrepâncias entre os ciclos de condução padronizados inseridos no modelo e os ciclos reais de operação e, por isso, estimar níveis de emissões com valores distorcidos. No caso dos modelos dinâmicos, que dependem

fundamentalmente da representação dos ciclos de condução reais ou provenientes de modelos de micro-simulação, as estimativas de emissões são potencialmente mais confiáveis, desde que assegurada uma adequada calibração dos parâmetros microscópicos.

É importante ressaltar que este trabalho não teve como objetivo avaliar os valores absolutos das emissões, mas a variabilidade nas estimativas decorrente das diferenças da modelagem de tráfego. No entanto, é importante destacar que as taxas de emissões utilizadas pelos modelos de emissões na utilização deste método deveriam ser baseadas em medições de veículos utilizados na área de estudo. Porém, reconhece-se que a obtenção de medições precisas de fatores de emissão representa um processo complexo e de elevado custo.

A estrutura metodológica proposta nesta pesquisa permite a utilização de diferentes modelos de tráfego e de emissões. No caso dos modelos de tráfego, que compõem a abordagem híbrida de modelagem, a utilização de modelos com interfaces semelhantes pode facilitar a troca de informações e reduzir os esforços de codificação das informações.

O método desenvolvido nesta tese apresenta alto potencial de utilização tanto para a elaboração de diagnósticos de emissões em áreas urbanas, quanto para a avaliação de diferentes cenários de desempenho viário. Por fim, acredita-se que o método proposto neste trabalho possa alavancar outras pesquisas neste tema e que resultados de estudos específicos possam contribuir para o seu aprimoramento.

7.1 RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como recomendação para futuros trabalhos coloca-se a aplicação do método proposto sob diferentes contextos, envolvendo áreas urbanas com características distintas de infraestrutura e operação viárias. Ainda, embora esta pesquisa tenha sido delimitada ao estudo de emissões de veículos leves usando gasolina como combustível, diferentes composições de frota veicular e tipos de combustíveis podem ser incorporados ao método.

Outro aspecto importante que deve ser aprimorado no método envolve a definição de critérios para seleção dos trechos de análise de emissões (TAEs). Nesse sentido, análises de sensibilidade das estimativas de emissões frente a distintos parâmetros de modelagem de tráfego poderiam ser realizadas.

A melhoria dos resultados da aplicação do método poderia ocorrer através de modelos de emissões calibrados com ciclos de condução dos veículos nas vias urbanas brasileiras e taxas básicas de emissões obtidas de veículos brasileiros. Ainda, como sugestão para trabalhos futuros, o método proposto poderia ser ampliado com a consideração de modelos de dispersão de poluentes para avaliar a qualidade do ar nas regiões de estudo.

REFERÊNCIAS

AHN K. Microscopic Fuel Consumption and Emission Modeling. **PhD. Dissertation.** Blacksburg, Virginia. 1998.

AHN, K.; TRANI, A.; RAKHA, H.; VAN AERDE, M. Microscopic Fuel Consumption and Energy Emission Models. **78th Annual Meeting of the Transportation Research Board.** 1999.

AHN, K.; RAKHA, H.; TRANI, A.; VAN AERDE, M. Estimating vehicle fuel consumption and emissions based on instantaneous speed and acceleration levels. **Journal of Transportation Engineering**, 128(2), 182-190. 2002.

ANDRÉ, J. M. The ARTEMIS European Driving Cycles for Measuring Car Pollutant Emissions. **Science of Total Environment**, V. 334-335, p. 73-84, 2004.

ANDRÉ, J.M. Vehicle Emission Measurement Collection of the Artemis Database. **Artemis 3312 Report n° LTE 0504.** 2005.

ANDRÉ, M.; RAPONE, M.; JOUMARD, R. Analysis of the cars pollutant emissions as regards driving cycles and kinematic parameters. **Report INRETS-LTE 0607.** 2006.

ARIOTTI, P.; ARAÚJO, D. R. C.; MOSCARELLI, F. C.; CYBIS, H. B. B. Associação de Modelos Macroscópicos e Microscópicos de Tráfego para Estudo de Circulação. XVIII ANPET. XVIII Congresso da Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, Florianópolis, V. 1, p. 478-489. 2004.

ARIOTTI, P.; OBELHEIRO, M.; CYBIS, H. B. B. Análise da Influência da Inclinação Ascendentes da Via na Estimativa de Emissões Veiculares em Áreas Urbanas. In: XXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Fortaleza, 2008.

BACHMAN, W. H. Towards a GIS Based Modal Model of Automobile Exhaust Emissions, PhD Thesis, Georgia Institute of Technology, 1997.

BAIRD, C. Química Ambiental. 2 ed., Bookman, Porto Alegre. 2002.

BARCELO, J.; FERRER, J.; GRAU, R. Microscopic traffic simulation for ATT systems analysis. Barcelona, Universitat Politecnica de Catalunya. 1997.

BARTH, M.; AN, F.; YOUNGLOVE, T.; SCORA, G.; LEVINE, C.; ROSS, M.; WENZEL, T. The Development of a Comprehensive Modal Emissions Model. **Final report to the National Cooperative Highway Research Program**. 2000.

BARTH, M.; DAVIS, N.; LENTS, J.; NIKKILA N. Vehicle Activity Patterns and Emissions in Pune, Índia. **TRB Annual Meeting CD-ROM**. 2007

BEEVERS, S.D.; CARSLAW, D.C. The Impact of Congestion Charging on Vehicle Speed and its Implications for Assessing Vehicle Emissions. **Atmospheric Environment** n. 39, p. 6875–6884. 2005.

BEL, S.; KOURIDIS, C.; NTZIACHRISTOS, L. COPERT 4 - Beta Version Software Description. Laboratory of Applied Thermodynamics, Mechanical Engineering Department, Aristotle University Thessaloniki, Greece. 2005.

BEN-AKIVA, M.; BIERLAIRE, M.; KOUTSOPOULOS, H. N.; MISHALANI, R. Real-time simulation of traffic demand-supply interactions within DynaMIT. **Transportation and network analysis: current trends**. Kluwer Academic Publishers: Boston/Dordrecht/London. 2002.

BOURREL, E.; LESORT, J.-B. Mixing Micro and Macro Representations of Traffic Flow: a Hybrid Model Based on the LWR Theory. **Transportation Research Board**, Washington DC. 2003.

BRABAN-LEDOUX, C. METACOR – A Macroscopic Modelling Tool for Corridor Application to the Stockholm test site KFB Contract - 1998-0547. Center for Traffic Engineering & Traffic Simulation. **Final Report**. 2000.

BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J. G. L.; BARROS, M. T. L.; VERAS JUNIOR, M. S. O meio atmosférico. In: **Introdução à Engenharia Ambiental**. São Paulo: Editora Printice Hall. 2002.

BRASIL. Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE. Ministério do Meio Ambiente dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal, Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. 2 ed. **Coleção Meio Ambiente. Série Diretrizes – Gestão Ambiental**; n.2. Brasília. 1998.

BRUNDELL-FREIJ, K.; ERICSSON, E. Influence of Street Characteristics, Driver Category and Car Performance on Urban Driving Patterns. **Transportation Research Part D**, No. 10, p. 213-229. 2005.

BUISSON, C.; LEBACQUE, J.P.; LESORT, J.B. STRADA: a Discretized Macroscopic Model of Vehicular Traffic Flow in Complex Networks based on the Godunov scheme. In: Proceedings of the CESA'96 IMACS Multiconference, **Computational Engineering in Systems Applications**, pp. 976–981. 1996a.

BUISSON, C.; LEBACQUE, J.P.; LESORT, J.B.; MONGEOT H. The STRADA model for dynamic assignment. In **Proceedings of the 1996 ITS Conference**, Orlando, USA. 1996b.

BURGHOUT, W. Hybrid Microscopic-Mesosopic Traffic Simulation Modelling. Department of Infrastructure. Stockholm, Royal Institute of Technology: 210. 2004.

BURGHOUT, W. Mesoscopic Simulation Models for Short-Term Prediction. PREDIKT project report CTR2005:03, Centre for Traffic Research (CTR) of Royal Institute of Technology (KTH), Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI), and University of Linköping, Stockholm, Sweden. 2005.

BURGHOUT, W.; KOUTSOPOULOS, H.; ANDREASSON, I. Hybrid mesoscopic-microscopic traffic simulation. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. No. 1934, p. 218-225. 2005.

CAPPIELLO, A. Modeling traffic flow emissions. **Thesis - Master of Science in Transportation** – Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, EUA. 2002.

CARB (California Air Resources Board). EMFAC 2007 version 2.30 - Calculating emission inventories for vehicles in California - User's Guide. 2007.

CASTRO, C. F. C. Avaliação de fatores intervenientes nas emissões veiculares em corredores de ônibus. **Dissertação de Mestrado**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2008.

CHEN K.; YU L. Microscopic Traffic-Emission Simulation and Case Study for Evaluation of Traffic Control Strategies. **Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology**. Vol. 7(1), pp. 93–100. 2007.

COLVILLE, R. N., HUTCHINSON, E. J., MINDELL, J. S., WARREN, R. F. The transport sector as a source of air pollution. **Atmospheric Environment**, No.35, p. 1537–1565. 2001.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB) Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo 2000, São Paulo, 2001.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB) Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo 2005, São Paulo, 2006.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB) Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo 2007, São Paulo, 2008.

CUMBERWORTH, M.; KOUPAL, J.; MICHAELS, H.; BRZEZINSKI, D.; BAILEY, C. MOVES2004 Software Design Reference Manual. Publication EPA420-P-04-017, Office of Transportation and Air Quality, U.S. EPA 2004.

DAGANZO, C. The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory. **Transportation Research Part B** 28B(4). 1994.

DAGANZO, C. The cell-transmission model, part II: Network traffic. **Transportation Research Part B** 29B(2), pp. 79-93. 1995.

DAGANZO, C. The lagged cell-transmission model. International Symposium on **Transportation and Traffic Theory**, New York, Pergamon. 1999.

DAVIS, N.; LENTS, J.; OSSES, M.; NIKKILA, N. BARTH, M. Development and Application of an International Vehicle Emissions Model. **Transportation Research Board 81st Annual Meeting**. Washington, D.C. 2005.

De VLIEGER, I. On Board Emission and Fuel Consumption Measurement Campaign on Petrol-Driven Passenger Cars. **Atmospheric Environment**, Vol. 31, No. 22, p. 3753-3761. 1997.

DE VLIEGER, I.; KEUKELEERE, D. ;KRETZSCHMAR, J.G. Environmental Effects of Driving Behaviour and Congestion Related to Passenger Cars. **Atmospheric Environment** 34, p. 4649-4655. 2000.

EEA - European Environment Agency. COPERT 4 – Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport – User manual (Version 5.0). 2007.

ELLOUMI, N.; HAJ-SALEM, H.; PAPAGEORGIOU, M. METACOR: A macroscopic Modelling Tool for Urban Corridor. **Triennial Symposium on Transport Analysis**. Capri, 1994.

EL-SHAWARBY I.; AHN, K.; RAKHA, H. Comparative Field Evaluation of Vehicle Cruise Speed and Acceleration Level Impacts on Hot Stabilized Emissions. **Transportation Research Part D**, No.10, p. 13–30, 2005.

EPA (Environmental Protection Agency). User's Guide to MOBILE6.1 and MOBILE6.2 - Mobile Source Emission Factor Model. 2003.

EPA (Environmental Protection Agency). Mobile Source Emissions – Past, Present and Future. Disponível em: www.epa.gov/otaq/invtory/overview/examples.htm. 2007

ERICSSON, E. Variability in urban driving patterns. **Transportation Research Part D**, No. 5, p. 337-354. 2000.

ERICSSON, E. Independent Driving Pattern Factors and their Influence on Fuel-use and Exhaust Emission Factors. **Transportation Research Part D**, V. 6, p. 325-345. 2001.

ESPIE, S.; GATTUSO, D.; GALANTE, F. A Hybrid Traffic Model Coupling Macro and Behavioural Micro Simulation. **85th Meeting of Transportation Research Board** CD-ROM, Washington DC, 2006.

FAIZ, A. Automotive emissions in developing countries—relative implications for global warming, acidification and urban air quality. **Transportation Research Part A** 27, p. 167–186. 1993.

FAIZ, A.; C.S. WEAVER; M.P. WALSH. Air Pollution from Motor Vehicles: Standards and Technologies for Controlling Emissions. **The World Bank**, Washington, D.C, EUA, 1996.

FEAM. Poluição Veicular. Disponível em: www.feam.gov.br. 2004.

FEEMA. Inventário de Fontes Emissoras de Poluentes Atmosféricos da Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Disponível em: www.feema.rj.gov.br. 2004.

FELLENDORF, M. VISSIM for traffic signal optimisation. **Traffic Technology International**, Dorking, UK. 1996.

GIPPS, P. G. A behavioural car-following model for computer simulation. **Transportation Research Part B**, V. 15, No. 2, p. 105-111, 1981.

GKATZOFLIAS, D.; KOURIDIS, C.; NTZIACHRISTOS, L.; SAMARAS, Z. COPERT 4 – Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport. User Manual (version 5.0). European Environment Agency. 2007.

GODUNOV, S. K. A Difference Scheme for Numerical Solution of Discontinuous Solution of Hydrodynamic Equations, *Math. Sbornik*, No. 47, pp. 271-306, 1959.

GREENSHIELDS, B. D. A Study of Traffic Capacity. **Proceedings of the Highway Research Board**, 14, 468. 1935.

HANSEN, M.; ARIOTTI, P.; CYBIS, H. B. B. Determinação do acréscimo de emissões devido à partida a frio. In: XXI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Rio de Janeiro. 2007.

HANSEN, M. Proposição de um Método para Avaliação do Adicional de Emissões Veiculares em Partida a Frio. **Dissertação de Mestrado**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2008.

HATZOPOULOU, M., MILLER, E. J., SANTOS, B. Integrating vehicle emission modeling with activity-based travel demand modeling: a case study of the Greater Toronto Area (GTA). **TRB Annual Meeting CD-ROM**. 2007.

HEYWOOD J. **Internal combustion engine fundamentals**. McGraw-Hill, New York. 1988.

HIDAS, P. A Functional Evaluation of the AIMSUN, PARAMICS, and VISSIM Microsimulation Models, **Road and Transport Research**, No. 14(4), p. 45–59. 2005.

HUGHES, J. T. AIMSUN2 Simulation of a Congested Auckland Freeway. **Transportation Planning**, pp. 141–161. 2002.

IMASATO, T.; ARIOTTI, P.; JACONDINO, G.; CYBIS, H. B. B. Análise Comparativa de Simuladores de Tráfego para Estimativa de CO em Áreas Urbanas. In: XV Congresso

Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte, Cartagena de Índias. Actas de XV Congreso Panamericano de Tránsito y Transporte, 2008.

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

JAYAKRISHNAN, R., MAHMASSANI, H.S., HU, T.Y. An Evaluation Tool fo Advanced Traffic Information and Management Systems in Urban Networks. **Transportation Research Part C**, Vol. 2C(3): pp.129-147. 1994.

JHA, M.; GOPALAN, G.; GARMS, A.; MAHANTI, B. P.; TOLEDO, T.; E. BEN-AKIVA, M. Development and Calibration of a Large-Scale Microscopic Traffic Simulation Model. Transportation Research Record: **Journal of the Transportation Research Board**, No. 1876, TRB, National Research Council, Washington, D.C., p. 121-131. 2004.

JIMÉNEZ-PALACIOS, J. L. Understanding and quantifying motor vehicle emissions with vehicle specific power and TILDAS remote sensing. **Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering** – Massachusetts Institute of Technology, EUA. 360 p. 1999.

KASSOMENOS, P. A., KARAKITSIOS, S. P., PILIDIS, G. A. A Methodology to Estimate Benzene Concentrations in a Town Through a Traffic Model. **Science of the Total Environment**, No. 347, p. 272– 281. 2005.

KAYSI, I.; CHAZBEK, C.; EL-FADEL, M. Traveler Information Provision for Incident Management: Implications for Vehicle Emissions. **Transportation Research Board**, No. 1886, p. 59–67, 2004.

KELLER, M.; KLJUN, N. Artemis Road Emission Model - Model Description. In: Artemis: Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory

Systems. Disponível em: <http://www.inrets.fr/ur/ite/publiautresactions/fichesresultats/ficheartemis/artemis.html>. 2007.

KOUPAL, J.; MICHAELS, H.; CUMBERWORTH, M.; BAILEY, C.; BRZEZINSKI, D.. Draft Design and Implementation Plan for EPA's Multi-Scale Motor Vehicle and Equipment Emission System (MOVES). Publication EPA420- P-02-006. US EPA. 2002.

LAM, T., NIEMEIER, D. An exploratory study of the impact of common land-use policies on air quality. **Transportation Research Part D**. n. 10, p. 365–383. 2005.

LEFEBVRE, D.; THOMAS, P.; THIRIET, J. M.; MESSAI, N.; EL MOUDNI, A. Model-Based Traffic Monitoring by Means of Neural Networks. Proceedings of the 39th IEEE, Conference on Decision and Control, Sydney, Australia, 2000.

LENTS, J.; DAVIS, N.; NIKKILA, N.; OSSES, M. São Paulo Vehicle Activity Study. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), International Sustainable Systems Research Center (ISSRC), University of California at Riverside (UCR), University of Chile (UCH). 2004.

LEONARD, D. R.; GOWER, P.; TAYLOR, N. B. CONTRAM: structure of the model. Crowthorn, **Transportation Research Laboratory** NO. 178. 1989.

LIGHTHILL, M. H.; WHITHAM, G. B. On kinematic waves II: a theory of traffic flow on long crowded roads. **Proceedings of the Royal Society of London**. 1955.

LIN, J.; GE, Y. E. Impacts of Traffic Heterogeneity on Roadside air Pollution Concentration. **Transportation Research Part D**, No. 11, p. 166–170, 2006.

LIN, J.; NIEMEIER, D.A. Estimating regional air quality vehicle emission inventories: constructing robust driving cycles. **Transportation Science** N. 37, pp. 330–346. 2003.

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

LOUREIRO, L. N. Panorâmica sobre Emissões Atmosféricas - Estudo de Caso: Avaliação do Inventário Emissões Atmosféricas da Região Metropolitana do Rio de Janeiro para Fontes Móveis, COPPE /UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2005.

MAGNE, L.; RABUT, S.; GABARD, J.-F. Towards an Hybrid Macro-micro Traffic Simulation Model. INFORMS, Salt Lake City, USA, 2000.

MAHMASSANI, H. S. Dynamic network traffic assignment and simulation methodology for advanced system management applications. **Networks and Spatial Economics**, 1(3/4), pp. 267–292, 2001.

MAHMASSANI, H. S. Transportation Network Modeling for Predicting Emission Impacts of Traffic and Travel Management Policies. EMBARQ Project, World Resources Institute, Washington, D.C.. 2006.

MAMMAR, S.; LEBARQUE, J.-P.; HAJ-SALEM, H. A Hybrid Model Based on a Second Order Traffic Model. **85th Meeting of Transportation Research Board** CD-ROM, Washington DC, 2006.

MATZOROS, T.; VAN VLIET, D.; RANDLE, J.; WESTON, B. A Validation of the SATURN and ME2 Models using before-and-after Survey Data from Manchester. *Traffic Engineering & Control*, London, v.28, n.12, p.641-643, 1987.

MEHTA, T; A. KOTTAPALLI; H. S. MAHMASSANI; C. Assessing the Environmental Benefits of Intelligent Transportation Systems: Methodologies and Applications. CTR/University of Texas at Austin. 2003.

MENDES, F. E. Avaliação de Programas de Controle de Poluição Atmosférica por Veículos Leves no Brasil. **Tese de Doutorado**, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ. Brasil. 2004.

NESAMANI, K.S.; LIANYU, C.; MCNALLY, M. G.; JAYAKRISHNAN, R. Estimation of Vehicular Emissions by Capturing Traffic Variations. Institute of Transportation Studies, University of California, U.S.A. 2005.

NÖKEL, N.; SCHMIDT, M.; VAN VUREN, T. An Integrated Dynamic Traffic Simulation and Air Pollution Decision Support System. **8th World Conference on Transport Research**. Antwerp, 1998.

NTZIACHRISTOS, L.; SAMARAS, Z. COPERT III Computer Programme to calculate emissions from road transport. Methodology and emission factors (version 2.1). 2000. http://reports.eea.eu.int/Technical_report_No_49/en/tech49.pdf

PAPAGEORGIU, M., BLOSSEVILLE, J. M.; HABIB, H S. Macroscopic modelling of traffic flow on the Boulevard Peripherique in Paris. **Transportation Research Part B** 23B: 29-47. 1989.

PAYNE, H. J. Models of freeway traffic and control. *Simulation Council* 1: 51-61. 1971.

PIPES, L. A. Car following models and the fundamental diagram of road traffic, **Transportation Research** 1 (1), pp. 21–29. 1966.

POSCHINGER, A.; KATES, R.; MEIER, J. The Flow of Data in Coupled Microscopic and Macroscopic Traffic Simulation Models. World Congress on Intelligent Transportation Systems, Torino, 2000.

PTV (Planung Transport Verkehr). Vissim 4.20 User Manual. Karlsruhe, Germany. 2006.

QUADSTONE LTD. Paramics V5.0 Programmer Reference Manual – Version 1.0. 2004.

RAKHA, H.; DING, Y. Impact of Stops on Vehicle Fuel Consumption and Emissions. **Journal of Transportation Engineering**, V. 129, p. 23-32. 2003.

RAKHA, H.; AHN, K.; TRANI, A. Development of VT-Micro Model for Estimating Hot Stabilized Light Duty Vehicle and Truck Emissions. Department of Civil and Environmental Engineering and Virginia Tech Transportation Institute, Virginia Tech, Blacksburg, Virginia. 2005.

RATROUT, N. T.; RAHMAN, S. M. A Comparative analysis of Currently used Microscopic and Macroscopic Traffic Simulation Software. **The Arabian Journal for Science and Engineering**, V. 34, No. 1B, 2009.

RICHARDS, P. I. Shockwaves on the Highway. **Operations Research**, No.4, p. 42-51, 1956.

ROUPHAIL, N. M.; FREY, H. C.; COLYAR, J. D.; UNAL, A. Vehicle Emissions and Traffic Measures: Exploratory Analysis of Field Observations at Signalized Arterials. **80th Annual Meeting of the Transportation Research Board**. Washington D.C. 2000.

SANKETI, P. R.; ZAVALA, C.; HEDRICK J. K.; WILCUTTS, M.; KAGA, T.. A Simplified Catalytic Converter Model for Automotive Coldstart Applications with Adaptive parameter Fitting. Proceedings of AVEC '06. The 8th International Symposium on Advanced Vehicle Control, Taipei, Taiwan, 2006.

SEGARD A. Vers un modèle dynamique de prévision des émissions polluantes du trafic, D.E.A. Conception em Bâtiments & Techniques Urbaines, INRETS – ENTPE, Bron, France. 1999.

SHAW, J. W.; NAM, D. H. Microsimulation, Freeway System Operational Assessment and Project Selection in Southeastern Wisconsin: Expanding the Vision, TRB Conference, 2002.

SHI, H.; ZILIASKOPOULOS, A. A Hybrid Mesoscopic-Microscopic Traffic Simulation model: Design, Implementation and Computational Analysis. **85th Meeting of Transportation Research Board** CD-ROM. 2006.

SMITH, M.; DRUITT, S.; CAMERON, G.; MACARTHUR, D. PARAMICS Final Report. **Technical Report EPCC-PARAMICS-FINAL**, Univ. of Edinburgh, Scotland, U.K. 1994.

STURM P. J.; BOULTER, P.; DE HAAN, P.; JOUMARD, R.; HAUSBERGER, S.; HICKMANN, J.; et al. Instantaneous emission data and their use in estimating passenger car emissions. MEET Deliverable 6, **COST 319 Final Report A2**, Technische Universitaet Graz, Graz, Austria. 1998.

TRANHUU, M.; MONTGOMERY, F.; TIMMS, P. Modelling Bus Lane Priorities in a Motorcycle Environment Using SATURN. **Transportation Research Board**. Annual Meeting CD-ROM, 2007.

TSS (Transport Simulation System). Disponível em: <http://www.tss-bcn.com>. 2006.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. 1998

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. Kyoto Protocol - Reference Manual on Accounting of Emissions and Assigned Amount. 2008

VAN AERDE, M.; HELLINGA, B.; BAKER, M.; RAKHA H. INTEGRATION: An Overview of Traffic Simulation Features. **1996 Annual Meeting Transportation Research Board** Washington, D.C. 1996.

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.

VÉLEZ, E. G. Adaptation of VISSIM, a Dynamic Simulation Model, to the Traffic Behavior at Intersections in Mayagüez, Puerto Rico. **Thesis of Master of Science in Civil Engineering**. University of Puerto Rico. 2006.

WENZEL, T; SINGER, B. C.; SLOTT, R. Some Issues in the Statistical Analysis of Vehicle Emissions. **Journal of Transportation and Statistics**. No. 3, p. 1-14. 2000.

WESSELING, P. **Principles of Computational Fluid Dynamics**, Springer-Verlag. 2001.

WIEDEMANN, R. Simulation des Straßenverkehrsflusses. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Heft 8, 1974.

WILLUMSEN, L.G. Estimation of OD Matrices and Transport Models from Traffic Counts. In: Simplified Transport Demand Modelling. Proceedings... London: PTRC, p.33-43, 1992.

WU, Y. C.; TWAROSKI, C. J.; SWACKHAMER, D. L.; CHEN, L. C. Scope Study for Expanding the Great Lakes Toxic Emission Regional Inventory to include Estimated Emissions from Mobile Sources. 1996.

XIAO, H.; AMBADIPUDI, R.; HOURDAKIS, J.; MICHALOPOULOS, P. Methodology for Selecting Microscopic Simulators: Comparative Evaluation of AIMSUN and VISSIM”, Intelligent Transportation Systems Institute, Center for Transportation Studies, University of Minnesota, USA, 2005.

YANG, Q.; MORGAN, D. A Hybrid Traffic Simulation Model. **85th Meeting of the Transportation Research Board** CD-ROM, Washington DC, 2006.

YU, L; JIA, S; QIAO, F; QI, Y. Research on transportation related emissions – current status and future directions. **87th Transportation Research Board Annual Meeting**, TRB, 24 p., 2008.

ZHAI, H.; FREY, H. C.; ROUPHAIL, N. M. A Vehicle-Specific Power Approach to Speed and Facility Specific Emissions Estimates for Diesel Transit Buses. **Environmental Science Technology**, No. 42 (21), p. 7985–7991. 2008.

APÊNDICE A: ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DO MODELO MOBILE

**Tabela 16 – Estimativas de CO do MOBILE para Trechos de Análise de Emissões (TAEs)
com baixo nível de carregamento viário**

Código do TAE	Estimativa de CO (kg)
2	15,909
3	22,577
8	0,996
15	0,450
18	4,937
21	0,078
28	0,548
32	0,823
36	2,198
37	0,849
38	5,751
42	1,491
44	0,096
47	0,592
49	0,297
50	1,725
51	0,122
54	3,497
58	4,299
60	0,576
61	2,144
62	0,056
67	0,893
69	4,299
70	0,047
73	0,454
76	0,121
77	7,229
83	5,511
85	0,170
86	0,082
88	0,373

**Tabela 17 – Estimativas de CO do MOBILE para Trechos de Análise de Emissões (TAEs)
com nível médio de carregamento viário**

Código do TAE	Estimativa de CO (kg)
7	9,381
11	7,799
12	2,975
13	8,985
14	3,925
17	3,023
22	0,532
24	19,163
25	2,995
26	2,417
27	3,882
29	1,926
30	9,054
31	1,863
35	2,795
43	3,816
45	2,739
46	8,885
48	7,691
52	9,362
55	10,713
56	1,583
59	2,726
71	7,980
74	2,410
75	2,736
78	2,813
80	4,398
81	2,567
87	10,907

**Tabela 18 – Estimativas de CO do MOBILE para Trechos de Análise de Emissões (TAEs)
com alto nível de carregamento viário**

Código do TAE	Estimativa de CO (kg)
1	53,248
4	27,333
5	28,144
6	19,229
9	21,656
10	13,310
16	12,881
20	4,095
23	0,871
53	7,621
57	1,288
63	17,724
79	1,560
82	4,079
84	17,841
89	1,569

**Tabela 19 – Estimativas de HC do MOBILE para Trechos de Análise de Emissões (TAEs)
com baixo nível de carregamento viário**

Código do TAE	Estimativa de HC (kg)
2	1,26
3	1,71
8	0,13
15	0,05
18	0,49
21	0,01
28	0,07
32	0,07
36	0,22
37	0,09
38	0,65
42	0,17
44	0,01
47	0,07
49	0,02
50	0,20
51	0,01
54	0,39
58	0,49
60	0,06
61	0,27
62	0,01
67	0,10
69	0,49
70	0,01
73	0,04
76	0,05
77	0,78
83	0,62
85	0,02
86	0,00
88	0,03

**Tabela 20 – Estimativas de HC do MOBILE para Trechos de Análise de Emissões (TAEs)
com nível médio de carregamento viário**

Código do TAE	Estimativa de HC (kg)
7	1,08
11	0,88
12	0,32
13	1,01
14	0,42
17	0,33
22	0,04
24	1,62
25	0,32
26	0,20
27	0,45
29	0,16
30	1,03
31	0,15
35	0,23
43	0,52
45	0,29
46	1,08
48	0,87
52	1,06
55	1,21
56	0,16
59	0,30
71	0,85
74	0,26
75	0,23
78	0,25
80	0,60
81	0,28
87	1,23

**Tabela 21 – Estimativas de HC do MOBILE para Trechos de Análise de Emissões (TAEs)
com alto nível de carregamento viário**

Código do TAE	Estimativa de HC (kg)
1	7,86
4	4,44
5	4,14
6	2,19
9	3,38
10	1,50
16	1,46
20	0,34
23	0,09
53	0,96
57	0,14
63	0,98
79	0,17
82	0,34
84	2,02
89	0,17

Tabela 22 – Estimativa de NOx do MOBILE para Trechos de Análise de Emissões (TAEs) com baixo nível de carregamento viário

Código do TAE	Estimativa de NOx (kg)
2	0,76
3	1,04
8	0,08
15	0,04
18	0,32
21	0,01
28	0,05
32	0,05
36	0,14
37	0,05
38	0,43
42	0,11
44	0,01
47	0,04
49	0,02
50	0,13
51	0,01
54	0,23
58	0,32
60	0,05
61	0,19
62	0,00
67	0,07
69	0,32
70	0,00
73	0,04
76	0,01
77	0,68
83	0,41
85	0,02
86	0,00
88	0,02

**Tabela 23 – Estimativa de NOx do MOBILE para Trechos de Análise de Emissões
(TAEs) com nível médio de carregamento viário**

Código do TAE	Estimativa de NOx (kg)
7	0,65
11	0,58
12	0,24
13	0,58
14	0,28
17	0,21
22	0,03
24	1,19
25	0,20
26	0,13
27	0,36
29	0,11
30	0,67
31	0,10
35	0,15
43	0,32
45	0,20
46	0,67
48	0,57
52	0,69
55	0,79
56	0,12
59	0,20
71	0,52
74	0,15
75	0,14
78	0,15
80	0,37
81	0,18
87	0,81

**Tabela 24 – Estimativa de NOx do MOBILE para Trechos de Análise de Emissões
(TAEs) com alto nível de carregamento viário**

Código do TAE	Estimativa de NOx (kg)
1	4,76
4	2,32
5	2,39
6	1,29
9	1,91
10	1,03
16	0,95
20	0,22
23	0,07
53	0,65
57	0,12
63	1,13
79	0,12
82	0,22
84	1,32
89	0,14

APÊNDICE B: ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DO MODELO IVE

**Tabela 25 – Estimativas de CO do IVE para Trechos de Análise de Emissões (TAEs)
com baixo nível de carregamento viário**

Código do TAE	Estimativa de CO (kg)
2	5,49
3	8,4
8	4,51
12	15,63
15	10,77
18	14,49
21	1,81
28	11,98
29	15,81
32	7,65
36	6,41
37	2,34
38	2,21
42	2,84
44	4,12
47	1,19
48	15,51
50	3,4
51	10,6
54	8,48
58	8,48
60	10,39
62	0,65
67	5,71
69	8,48
70	1,2
73	6,41
76	5,86
83	11,12
85	7,2
86	3,83
88	3,67

**Tabela 26 – Estimativas de CO do IVE para Trechos de Análise de Emissões (TAEs)
com nível médio de carregamento viário**

Código do TAE	Estimativa de CO (kg)
7	17,28
11	15,65
13	17,27
14	23,44
16	24,94
17	20,86
24	15,75
26	18,86
27	18,97
30	16,94
31	15,56
35	21,82
43	17,11
45	18,27
46	19,1
49	14,24
52	18,78
55	21,25
56	20,74
59	15,63
61	10,62
71	22,09
74	17,95
75	22,91
77	12,73
78	22,85
80	19,41
81	19,1
87	22

**Tabela 27 – Estimativas de CO do IVE para Trechos de Análise de Emissões (TAEs)
com alto nível de carregamento viário**

Código do TAE	Estimativa de CO (kg)
1	37,43
4	29,61
5	25,13
6	36,13
9	26,6
10	26,51
20	33,62
22	24,06
23	27,62
25	21,66
53	36,45
57	30,4
63	29,87
79	26,1
82	36,1
84	35,99
89	30,98

Tabela 28 – Estimativas de HC do IVE para Trechos de Análise de Emissões (TAEs) com baixo nível de carregamento viário

Código do TAE	Estimativa de HC (kg)
2	0,39
3	0,59
8	0,32
12	1,1
15	0,76
18	1,02
21	0,13
28	0,84
29	1,11
32	0,54
36	0,45
37	0,16
38	0,16
42	0,2
44	0,29
47	0,08
48	1,09
50	0,24
51	0,75
54	0,6
58	0,6
60	0,73
62	0,05
67	0,4
69	0,6
70	0,08
73	0,45
76	0,41
83	0,78
85	0,51
86	0,27
88	0,26

Tabela 29 – Estimativas de HC do IVE para Trechos de Análise de Emissões (TAEs) com nível médio de carregamento viário

Código do TAE	Estimativa de HC (kg)
7	1,22
11	1,1
13	1,22
14	1,65
16	1,75
17	1,47
24	1,11
26	1,33
27	1,33
30	1,19
31	1,1
35	1,54
43	1,2
45	1,29
46	1,34
49	1
52	1,32
55	1,5
56	1,46
59	1,1
61	0,75
71	1,55
74	1,26
75	1,61
77	0,9
78	1,61
80	1,37
81	1,34
87	1,55

Tabela 30 – Estimativas de HC do IVE para Trechos de Análise de Emissões (TAEs) com alto nível de carregamento viário

Código do TAE	Estimativa de HC (kg)
1	2,63
4	2,08
5	1,77
6	2,54
9	1,87
10	1,87
20	2,37
22	1,69
23	1,94
25	1,52
53	2,56
57	2,14
63	2,1
79	1,84
82	2,54
84	2,53
89	2,17

**Tabela 31 – Estimativas de NOx do IVE para Trechos de Análise de Emissões (TAEs)
com baixo nível de carregamento viário**

Código do TAE	Estimativa de NOx (kg)
2	0,37
3	0,57
8	0,31
12	1,07
15	0,74
18	0,99
21	0,12
28	0,82
29	1,08
32	0,52
36	0,44
37	0,16
38	0,15
42	0,19
44	0,28
47	0,08
48	1,06
50	0,23
51	0,72
54	0,58
58	0,58
60	0,71
62	0,04
67	0,39
69	0,58
70	0,08
73	0,44
76	0,4
83	0,76
85	0,49
86	0,26
88	0,25

**Tabela 32 – Estimativas de NOx do IVE para Trechos de Análise de Emissões (TAEs)
com nível médio de carregamento viário**

Código do TAE	Estimativa de NOx (kg)
7	1,18
11	1,07
13	1,18
14	1,6
16	1,7
17	1,42
24	1,07
26	1,29
27	1,29
30	1,16
31	1,06
35	1,49
43	1,17
45	1,25
46	1,3
49	0,97
52	1,28
55	1,45
56	1,42
59	1,07
61	0,72
71	1,51
74	1,23
75	1,56
77	0,87
78	1,56
80	1,32
81	1,3
87	1,5

**Tabela 33 – Estimativas de NOx do IVE para Trechos de Análise de Emissões (TAEs)
com alto nível de carregamento viário**

Código do TAE	Estimativa de NOx (kg)
1	2,55
4	2,02
5	1,72
6	2,47
9	1,81
10	1,81
20	2,29
22	1,64
23	1,88
25	1,48
53	2,49
57	2,07
63	2,04
79	1,78
82	2,46
84	2,46
89	1,88

APÊNDICE C: CARACTERÍSTICAS DOS TRECHOS DE ANÁLISE

Tabela 34 – Características dos TAEs com baixo carregamento viário

Código do TAE	Tipo de arco (interno ou externo)	Relação com a rede viária (entrada ou saída)	Tamanho do arco* (curto, médio, longo)	Semáforo à jusante (sim ou não)	Quantidade de semáforos por trecho
62	interno	-	curto	sim	1
47	externo	entrada	curto	não	0
21	interno	-	curto	sim	1
70	interno	-	médio	sim	1
86	externo	saída	curto	não	0
37	interno	-	médio	não	0
42	externo	saída	médio	sim	1
8	interno	-	médio	não	0
50	externo	saída	curto	não	0
88	externo	entrada	curto	não	0
2	interno	-	curto	não	0
67	externo	entrada	curto	sim	1
44	interno	-	curto	sim	1
73	externo	saída	curto	não	0
32	interno	-	médio	sim	1
76	externo	entrada	curto	sim	1
54	interno	-	médio	sim	1
36	interno	-	médio	não	0
69	interno	-	curto	não	0
3	interno	-	curto	não	0
85	externo	saída	curto	não	0
83	externo	saída	curto	não	0
28	interno	-	médio	sim	2
38	interno	-	médio	não	0
51	externo	entrada	curto	sim	1
60	externo	entrada	curto	não	0
58	externo	saída	curto	não	0
12	interno	-	médio	sim	1
48	externo	entrada	curto	não	0
29	interno	-	médio	não	0
18	interno	-	médio	não	0
15	interno	-	médio	sim	2

*Foram considerados três comprimentos dos trechos de análise:

- Curto: até 130 m;
- Médio: entre 131 e 650 m;
- Longo: mais de 650 m.

Tabela 35 – Características dos TAEs com médio carregamento viário

Código do TAE	Tipo de arco (interno ou externo)	Relação com a rede viária (entrada ou saída)	Tamanho do arco* (curto, médio, longo)	Semáforo à jusante (sim ou não)	Quantidade de semáforos por trecho
61	externo	saída	curto	não	0
49	externo	entrada	curto	sim	1
52	externo	saída	curto	não	0
24	interno	-	médio	não	0
11	interno	-	curto	não	0
74	externo	entrada	curto	não	0
31	interno	-	médio	não	0
13	interno	-	longo	não	5
77	interno	-	médio	não	0
59	interno	-	médio	sim	1
43	interno	-	médio	não	0
30	interno	-	médio	não	0
80	externo	entrada	curto	não	0
27	interno	-	longo	não	3
81	externo	entrada	curto	não	0
7	interno	-	longo	sim	7
17	interno	-	médio	não	0
87	externo	saída	curto	não	0
78	externo	entrada	curto	não	0
46	interno	-	médio	não	0
26	interno	-	médio	não	0
56	interno	-	curto	não	0
45	interno	-	médio	sim	1
55	interno	-	médio	não	0
75	externo	entrada	curto	não	0
35	interno	-	médio	não	0
16	externo	saída	médio	não	0
71	interno	-	médio	não	0
14	interno	-	médio	não	0

*Foram considerados três comprimentos dos trechos de análise:

- Curto: até 130 m;
- Médio: entre 131 e 650 m;
- Longo: mais de 650 m.

Tabela 36 – Características dos TAEs com alto carregamento viário

Código do TAE	Tipo de arco (interno ou externo)	Relação com a rede viária (entrada ou saída)	Tamanho do arco* (curto, médio, longo)	Semáforo à jusante (sim ou não)	Quantidade de semáforos por trecho
23	interno	-	curto	sim	1
63	interno	-	longo	não	1
25	interno	-	longo	sim	3
22	interno	-	curto	sim	1
79	externo	entrada	curto	não	0
57	externo	entrada	curto	não	0
9	interno	-	curto	não	0
10	interno	-	longo	não	5
5	interno	-	longo	não	3
89	interno	-	curto	não	0
20	externo	entrada	médio	sim	1
1	interno	-	longo	não	3
4	interno	-	longo	não	4
84	externo	entrada	curto	não	0
53	externo	saída	curto	não	0
6	interno	-	longo	sim	6
82	externo	entrada	curto	não	0

*Foram considerados três comprimentos dos trechos de análise:

- Curto: até 130 m;
- Médio: entre 131 e 650 m;
- Longo: mais de 650 m.