

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

Marcelo Hansen

PROPOSIÇÃO DE UM MÉTODO PARA
AVALIAÇÃO DO ADICIONAL DE EMISSÕES
VEICULARES EM PARTIDA A FRIO

Porto Alegre
2008

Marcelo Hansen

**PROPOSIÇÃO DE UM MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DO ADICIONAL DE
EMISSIONES VEICULARES EM PARTIDA A FRIO**

Dissertação 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 Mestre em Engenharia de Produção, modalidade Acadêmica, na área de concentração em Sistemas de Transportes.

Orientadora: Professora Helena Beatriz Bettella Cybis, *Ph.D.*

Porto Alegre

2008

Marcelo Hansen

**PROPOSIÇÃO DE UM MÉTODO PARA AVALIAÇÃO DO ADICIONAL DE
EMISSÕES VEICULARES EM PARTIDA A FRIO**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção na modalidade Acadêmica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof^a. Orientadora Helena Beatriz Bettella
Cybis, *Ph.D.*
Orientadora PPGE/UFGRS

Prof. Flávio Sanson Fogliatto, *Ph.D.*
Coordenador PPGE/UFGRS

Banca Examinadora:

Professor João Fortini Albano, Dr. (PPGE/UFGRS)

Professor Luis Antonio Lindau, *Ph.D.* (PPGE/UFGRS)

Professor Marcio de Almeida D'Agosto, Dr. (COPPE/UFRJ)

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, Helena Beatriz Bettella Cybis, por ter acreditado e confiado no meu trabalho;

Em especial aos meus pais, Afonso e Nádía, e minha irmã, Mariana, por sempre estarem ao meu lado, me incentivaram e proporcionarem as condições necessárias à conclusão desta etapa importante da minha vida;

À Natália, por todo seu amor, incentivo, paciência, ajuda e compreensão pelas minhas ausências;

Aos professores Albano, Lindau e Márcio D'Agosto pelas considerações a respeito da dissertação;

À todos os colegas do LASTRAN e demais amigos que sempre me apoiaram e incentivaram durante todo o período de realização deste trabalho;

Aos professores do LASTRAN/PPGEP pela contribuição para minha formação pessoal e profissional em transportes;

Ao PPGEP pela oportunidade concedida para a realização do curso de Mestrado;

À CAPES pelo apoio financeiro concedido.

RESUMO

As emissões de poluentes atmosféricos decorrentes de veículos automotores representam um grave problema ambiental. O modo de operação do veículo influencia diretamente a quantidade de poluentes emitidos. Quando um veículo inicia sua operação com motor frio, efeito denominado de partida a frio, a quantidade de poluentes emitidos torna-se consideravelmente maior em comparação às condições estabilizadas de temperatura do motor. O efeito da partida a frio é bastante representativo em viagens de curta duração, como é o caso dos deslocamentos urbanos. Este estudo propõe um método para a determinação e distribuição espacial do adicional de emissões de poluentes em partida a frio. Este método foi aplicado em Porto Alegre, utilizando informações de tráfego e da frota local coletados na pesquisa de entrevistas domiciliares, realizada no ano de 2003. Os fatores de emissão utilizados embasaram-se em um estudo realizado com veículos brasileiros. Os resultados da aplicação do método indicaram que a maior parte das partidas a frio ocorre na região central de Porto Alegre e suas adjacências, sendo maior no período matinal. Observou-se também que os maiores responsáveis pelo adicional por partida a frio são os veículos equipados com conversores catalíticos e injeção eletrônica de combustível. Entretanto, os veículos mais antigos, sem conversor catalítico e equipados com carburador, são os maiores responsáveis pela emissão total, adicional por partida a frio e emissão estabilizada de CO e HC nos períodos analisados. Através do método proposto neste estudo foi possível identificar áreas críticas que necessitam de ações de controle de emissões em partida a frio. Os resultados deste estudo podem subsidiar o planejamento e gerenciamento das condições ambientais provocadas pelas emissões veiculares em áreas urbanas.

Palavras-chave: Emissão veicular. Partida a frio. Estimativa de emissões. Poluição do ar.

ABSTRACT

Atmospheric pollution from vehicle emissions is a serious environmental problem. The vehicle operation mode influences directly in the amount of emitted pollutants. When a vehicle begins its operation with the cold engine, called as cold start effect, the amount of emitted pollutant becomes considerably higher than when in stabilized conditions of engine's temperature. Cold start effect are very representative in short travels, such as urban trips. This study proposes a method to estimate the amount and spacial distribution of the additional cold start pollutant emissions. This method was applied to Porto Alegre, Brazil, using traffic and local fleet data from a household travel survey of 2003. Emissions factors were based on a study of Brazilian fleet. The results from the method application showed that cold start emissions in Porto Alegre are higher in the morning peak and most of the cold start emissions are concentrated in the town center and its adjacencies. The results also showed that the catalyst fuel injection vehicles are the main responsible for the additional cold start emissions. However, old vehicles, without catalyst and equipped with carburetor, are the main responsible for the total, cold start and running emissions, CO and HC emissions in both analyses periods. Through the proposed method, it was possible to identify critical areas that need control actions of cold start emissions. The results from this study can assist planning and management of the environmental conditions deriving from vehicular emissions in urban areas.

Key words: Vehicular emission. Cold start. Emission estimate. Air pollution.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fontes de emissões de poluentes veiculares	21
Figura 2 – Funcionamento de um sistema de controle de emissão de poluentes equipado com sensor de oxigênio e catalisador de três vias	32
Figura 3 - Causa e efeito na variabilidade do padrão de condução	38
Figura 4 – Obtenção de emissões veiculares através de sensoriamento remoto	42
Figura 5 – Veículos equipados com instrumentos de medição a bordo de emissão de poluentes	43
Figura 6 – Ensaio de dinamômetro de chassi para a medição de poluentes	45
Figura 7 – Ciclo de direção FTP75	47
Figura 8 – Ciclo de direção NEDC	48
Figura 9 – Ciclo de direção 10-15 Mode	49
Figura 10 – Ciclos de direção Artemis	50
Figura 11 – Ciclo curto de direção IULC	51
Figura 12– Ciclo curto de direção IUFC	51
Figura 13– Ciclo curto de direção IRC	52
Figura 14 – Ciclo de direção desenvolvido por Melchiors	53
Figura 15 - Emissão veicular ao longo da viagem	55
Figura 16 – Estimativa de emissões de poluentes através de fator de emissão total	56
Figura 17 – Estimativa de emissões de poluentes de forma desagregada	57
Figura 18 – Classificação dos modelos de emissão	63
Figura 19 – Fluxograma do método para a determinação do adicional por partida a frio	73
Figura 20 - Delimitação da área de estudo e pontos de origem de viagens	79

Figura 21 – Determinação do tamanho da célula de análise	81
Figura 22 – Área de estudo dividida em células de análise	82
Figura 23 – Partidas a frio no pico da manhã	89
Figura 24 – Partidas a frio no pico da tarde	89
Figura 25 – Adicional de CO em partida a frio no pico da manhã	91
Figura 26 – Adicional de CO em partida a frio no pico da tarde	92
Figura 27 – Adicional de HC em partida a frio no pico da manhã	93
Figura 28 – Adicional de HC em partida a frio no pico da tarde	93
Figura 29 – Adicional de NO_x em partida a frio no pico da manhã	94
Figura 30 – Adicional de NO_x em partida a frio no pico da tarde	95
Figura 31 – Adicional de CO₂ em partida a frio no pico da manhã	96
Figura 32 – Adicional de CO₂ em partida a frio no pico da tarde	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação veicular de acordo com limites máximos de emissão regulamentados e o ano de fabricação do veículo _____	37
Tabela 2 - Propriedades dos ciclos de direção desenvolvidos durante o projeto Artemis50	
Tabela 3 – Classificação veicular de São Paulo em função da tecnologia empregada na fabricação _____	61
Tabela 4 - Adicional por partida a frio medido nos primeiros 200 segundos _____	61
Tabela 5 - Características da influência da partida a frio nas emissões veiculares ____	62
Tabela 6 – Classificação veicular utilizada na estimativa do adicional por partida a frio _____	84
Tabela 7 - Fatores de emissão do adicional por partida a frio. _____	85
Tabela 8 - Fatores médios de emissão em condições estabilizadas. _____	86
Tabela 9 – Células com mais viagens iniciadas em partidas a frio _____	90
Tabela 10 – Adicional por partida a frio dividido em classes veiculares no período da manhã _____	97
Tabela 11 – Adicional por partida a frio dividido em classes veiculares no período da tarde _____	97
Tabela 12 – Emissões totais divididas em classes veiculares no período da manhã ____	98
Tabela 13 – Emissões totais divididas em classes veiculares no período da tarde ____	99
Tabela 14 – Percentual de emissões estabilizada e adicional por partida a frio divididos em classes no período matinal _____	100
Tabela 15 – Percentual de emissões estabilizada e adicional por partida a frio divididos em classes no período vespertino _____	100

Tabela 16 – Percentual em relação ao total emitido na área de estudo no período da manhã	101
Tabela 17 – Percentual em relação ao total emitido na área de estudo no período da tarde	101
Tabela 18 – Adicional por partida a frio e comparação com as condições realísticas no período matinal	102
Tabela 19 – Adicional por partida a frio e comparação com as condições realísticas no período vespertino	103
Tabela 20 – Emissão total e comparação com as condições realísticas no período matinal	103
Tabela 21 – Emissão total e comparação com as condições realísticas no período vespertino	103

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	TEMA E SUA IMPORTÂNCIA.....	16
1.2	OBJETIVOS.....	17
1.2.1	Objetivo geral.....	17
1.2.2	Objetivos específicos	17
1.3	MÉTODO DE TRABALHO.....	18
1.4	DELIMITAÇÃO DO ESTUDO.....	19
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2	AS EMISSÕES VEICULARES.....	21
2.1	FORMAÇÃO DAS EMISSÕES VEICULARES	21
2.1.1	Emissões evaporativas.....	22
2.1.2	Emissões de descarga	22
2.1.3	Compostos emitidos pelos veículos	24
2.2	FATORES INTERVENIENTES NAS EMISSÕES VEICULARES	28
2.2.1	Características da frota	29
2.2.2	Aspectos tecnológicos	30
2.2.3	Regulagem e manutenção dos veículos.....	33
2.2.4	Característica do sistema viário e do tráfego local	34
2.2.5	Características ambientais.....	34
2.2.6	Características da viagem e demanda de transporte	35
2.2.7	Características socioeconômicas.....	35
2.2.8	Aspectos da regulamentação.....	36
2.2.9	Modo de condução do veículo.....	37
2.2.10	Modo de operação do veículo.....	39
2.3	MEDIÇÃO DE EMISSÕES VEICULARES.....	41
2.3.1	Sensoriamento remoto	41
2.3.2	Medições a bordo	43
2.3.3	Medições em laboratório.....	44

2.3.4 Ciclos de direção	45
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
3 EMISSÕES DEVIDO À PARTIDA A FRIO E ESTIMATIVA DE EMISSÕES.....	54
3.1 EMISSÕES EM PARTIDA A FRIO.....	54
3.2 ESTIMATIVAS DE EMISSÕES VEICULARES.....	62
3.2.1 Modelos de emissão estáticos	63
3.2.2 Modelos de emissão dinâmicos	67
3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
4 MÉTODO PARA A DETERMINAÇÃO DO ADICIONAL DE EMISSÕES EM PARTIDA A FRIO.....	72
4.1 DETERMINAÇÃO DO ADICIONAL DE EMISSÃO EM PARTIDA A FRIO.....	72
4.1.1 Descrição das etapas	73
4.2 AVALIAÇÃO DO ADICIONAL DE EMISSÕES POR PARTIDA A FRIO EM PORTO ALEGRE	77
4.2.1 Etapa 1 – Delimitação da área de estudo e do período de análise	78
4.2.2 Etapa 2 – Determinação da distância de partida a frio	80
4.2.3 Etapa 3 – Divisão da área de estudo em células de análise	81
4.2.4 Etapa 4 – Determinação das classes de veículos e dos compostos quantificados ..	81
4.2.5 Etapa 5 – Determinação dos pontos de origem, do número de partidas a frio e fatores de emissão	84
4.2.6 Etapa 6 – Cálculo do adicional de emissões por partida a frio.....	85
4.2.7 Etapa 7 – Análise dos resultados	85
4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS	88
5.1 NÚMERO DE PARTIDAS A FRIO E ORIGEM DAS PARTIDAS	88
5.2 ANÁLISE DO ADICIONAL DE EMISSÕES POR PARTIDA A FRIO.....	90
5.2.1 Adicional por partida a frio de CO	90
5.2.2 Adicional de partida a frio para HC	92
5.2.3 Adicional de partida a frio para NO_x	94
5.2.4 Adicional de partida a frio para CO₂	95

5.2.5	Adicional de emissões por partida a frio.....	97
5.3	EMISSÕES TOTAIS.....	98
5.4	INFLUÊNCIA DO ADICIONAL POR PARTIDA A FRIO.....	99
5.5	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	101
5.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	104
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	105

1 INTRODUÇÃO

O controle da poluição atmosférica tem sido um tema bastante pesquisado nas últimas décadas, pois esse controle se configura como um fator importante na busca da preservação do meio ambiente e na condução de um desenvolvimento sustentável. Isso ocorre por que os efeitos da poluição atmosférica afetam de diversas formas a saúde humana e os ecossistemas.

Normalmente, os poluentes emitidos na atmosfera terrestre possuem origem em dois tipos de fontes: naturais e antropogênicas (LOUREIRO, 2005). Os poluentes emitidos por fontes naturais são decorrentes de processos de emissão em que não ocorre interferência humana. As fontes naturais emitem poluentes como compostos orgânicos voláteis (COVs), óxidos de nitrogênio (NO_x) e gases de efeito estufa, como dióxido de carbono (CO_2). A emissão destes gases ocorre por fenômenos naturais decorrentes de processos biológicos em solos, vegetais, animais, como ruminantes e cupins, ecossistemas marinhos, atividades geológicas, como gêiser e vulcões, e atividades meteorológicas, como relâmpagos (EPA, 1996).

As fontes antropogênicas são responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa e poluentes a partir de processos que sofrem influência da ação do homem. As fontes antropogênicas de maior relevância são a queima de combustíveis fósseis ou de biomassa na geração de energia, operações na agricultura e queimadas em florestas. As fontes antropogênicas ainda podem ser divididas em móveis e fixas, também chamadas de estacionárias.

As fontes fixas são referentes aos locais fixos que geram poluição e caracterizam-se por serem bastante poluidoras em determinadas áreas, como indústrias e outras atividades, como lavanderias, padarias, hotéis, hospitais e outros setores de atividades não industriais. Os setores de atividades não industriais são considerados pouco poluidores quando analisados isoladamente, porém uma concentração alta destas atividades em uma região pode tornar estes processos de emissão bastante poluidores (SZWARCFITER, 2004).

As fontes móveis correspondem a máquinas, equipamentos e veículos que geram poluição e podem se mover ou serem movidos de um lugar para outro. Estas fontes podem envolver equipamentos agrícolas, máquinas utilizadas na construção civil, na pavimentação e veículos utilizados como meio de transporte terrestre, ferroviário, aéreo e hidroviário. Os principais poluentes emitidos pelas fontes móveis compreendem monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC), óxidos de nitrogênio (NO_x), material particulado (MP), óxidos de enxofre (SO_x), além do dióxido de carbono (CO₂) que é um dos principais gases de efeito estufa.

Pensava-se no princípio da era industrial que a atmosfera era suficientemente grande e que os problemas de poluição do ar de origem antropogênica ficariam restritos aos ambientes fechados ou áreas muito próximas das fontes de poluição (CETESB, 2006). Porém, hoje se sabe que os efeitos da poluição não ficam restritos apenas aos grandes centros urbanos ou às áreas industriais, mas provocam a contaminação do meio ambiente em escala global.

Uma das principais fontes de emissão de poluentes de origem antropogênica é o setor de transportes. No Brasil, os veículos automotores produzem mais poluição atmosférica do que qualquer outra atividade humana isolada em áreas urbanas (MONTEIRO, 1998). Entre os principais problemas ambientais produzidos pelo transporte estão: a emissão de poluentes atmosféricos, poluição sonora, segurança viária e disputa do espaço urbano. Porém, o desenvolvimento da economia está diretamente ligado à mobilidade proporcionada pelos transportes, sendo assim, este setor é considerado importante para a sociedade.

As formas de poluição atmosférica ocasionadas pelos transportes são emissões veiculares expelidas pela descarga e pela evaporação do combustível presente no tanque de armazenamento. A principal responsável pela degradação da qualidade do ar é a emissão veicular gerada através de reações químicas que ocorrem no interior dos motores de combustão interna. Os compostos expelidos pelos veículos provocam perda da qualidade de vida da população, principalmente, nos grandes centros urbanos, através do aumento da incidência de problemas respiratórios e da degradação das estruturas do espaço urbano.

Diversos fatores interferem na formação das emissões veiculares, como a existência de conversor catalítico e injeção eletrônica, o modo de condução, o tipo de ignição do motor, e o modo de operação do veículo. O modo de operação do veículo pode ser dividido em

condições estabilizadas, em partida a frio ou em partida a quente, de acordo com a temperatura do motor e/ou catalisador. Ainda, o veículo pode operar em aceleração, em desaceleração, em velocidade constante ou parado.

A partida a frio refere-se ao período inicial de funcionamento do veículo, onde motor ou catalisador ainda não atingiram a temperatura de operação. As emissões veiculares em partida a frio, normalmente, são maiores do que as emissões em condições estabilizadas de operação, chegando a ser até 40 vezes superior em veículos europeus, com injeção eletrônica e catalisador, movidos a gasolina (DE VLIEGER, 1997).

As emissões veiculares são estimadas através de modelos de emissões estáticos ou dinâmicos. Os modelos dinâmicos, normalmente, são modelos complexos que necessitam grande quantidade de parâmetros de entrada, e realizam análises detalhadas através de dados desagregados de tráfego e de emissão. Os modelos estáticos são modelos simples de estimativa de emissões, que utilizam um número reduzido de informações. Geralmente, as informações para estes modelos correspondem a variáveis agregadas de tráfego e de emissões. Estes modelos desconsideram alguns efeitos formadores de emissão veicular, como o efeito da partida a frio.

1.1 TEMA E SUA IMPORTÂNCIA

O aumento da frota, principalmente de veículos de passeio, e o crescimento econômico têm contribuído para o aumento do número de viagens, da distância de deslocamento e, conseqüentemente, das emissões de poluentes veiculares, especialmente em áreas urbanas. A redução das emissões veiculares tende a melhorar a qualidade de vida e o bem-estar das pessoas através da redução de doenças respiratórias e da degradação ambiental, como a extinção de espécies da flora e da fauna.

Sendo o transporte algo imprescindível para a sociedade mundial e a necessidade de conservação e melhoria das condições ambientais, é necessária a adoção de medidas que racionalizem as viagens realizadas e reduzam os poluentes emitidos pelos veículos. Assim, é importante considerar fatores ambientais no planejamento e gerenciamento do tráfego e de sistemas de transportes de determinadas regiões.

A utilização de modelos dinâmicos para a estimativa de emissões veiculares exige grande quantidade de dados, o que pode ser um fator limitante em países onde não há uma sistematização de coleta de informações. Por outro lado, modelos estáticos, que utilizam variáveis agregadas, apresentam-se como uma forma mais acessível para realizar tais estimativas. No entanto, alguns dos modelos desse tipo não consideram os efeitos decorrentes da operação dos veículos em partida a frio.

A motivação desse trabalho está vinculada à necessidade de aprimorar a estimativa de poluentes. Como a partida a frio exerce influência na quantidade de emissões totais, deve-se entender qual o percentual das emissões totais é devido ao adicional de emissões nesse modo de operação. Em função da indisponibilidade de dados detalhados acerca da caracterização da frota dos veículos e padrões de emissões, no Brasil, deve-se então buscar alternativas que utilizem variáveis agregadas nas análises dessas emissões.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 **Objetivo geral**

Propor e aplicar um método de avaliação do adicional de emissões veiculares provenientes do modo de operação dos veículos em partida a frio.

1.2.2 **Objetivos específicos**

Como objetivos específicos, esta pesquisa pretende:

- a) identificar os fatores intervenientes nas emissões veiculares a partir da revisão teórica;
- b) mapear as regiões onde ocorre o maior número de partidas a frio na área de estudo;
- c) determinar o adicional de poluentes emitidos em cada região da área de estudo;
- d) estimar a emissão total na área de estudo;

- e) realizar análises comparativas entre o adicional de emissões por partida a frio e o total de emissões;
- f) realizar análises de sensibilidade enfatizando a influência das classes de veículos.

1.3 MÉTODO DE TRABALHO

A pesquisa desse estudo pode ser classificada como de natureza aplicada, com abordagem mista. No que se refere ao objetivo, a pesquisa se caracteriza tanto por um caráter exploratório como explicativo, pois as etapas metodológicas empregadas envolvem levantamentos bibliográficos, avaliação do padrão de emissões e o cálculo de emissões veiculares.

De uma forma geral, a pesquisa consiste de cinco etapas principais. A primeira etapa do desenvolvimento do trabalho consiste na revisão teórica acerca das emissões veiculares. Nesta etapa são abordados temas como a formação das emissões e fatores intervenientes no processo de formação. Ainda, são estudados os tipos de modelos existentes para a estimativa do adicional de emissões em partida a frio.

A segunda etapa envolve a obtenção e tratamento dos dados necessários para a realização da estimativa do adicional de emissões em partida a frio. Os dados referentes às viagens e características dos veículos são obtidos do banco de dados de entrevistas domiciliares realizadas em Porto Alegre, no ano de 2003. Este banco de dados possui informações dos deslocamentos realizados em Porto Alegre, como pontos de origem e destino das viagens, modelo, ano e motorização dos veículos utilizados nas viagens. As informações sobre emissões de poluentes correspondem aos dados do estudo realizado em São Paulo por Lents et al. (2005).

A terceira etapa consiste na aplicação do método de estimativa das emissões em partida a frio e a distribuição espacial destas emissões na área de estudo. A quarta etapa compreende a análise dos resultados obtidos na aplicação do método de determinação das emissões de poluentes em partida a frio. A quinta etapa apresenta as conclusões do estudo e recomendações para trabalhos futuros.

1.4 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

O modelo utilizado estima as emissões veiculares através de variáveis agregadas, não considerando variações de velocidade e acelerações. Neste trabalho são utilizados dados provenientes de entrevistas domiciliares realizadas em Porto Alegre (EDOM, 2004). A pesquisa, realizada em 2003, gerou um banco de dados rico em informações sobre viagens realizadas no município que possibilitaram a realização deste estudo.

É importante salientar que os veículos bicompostíveis começaram a ser comercializados apenas em 2003, ano de realização das entrevistas domiciliares. Assim, a presença de veículos bicompostíveis foi desconsiderada durante a análise. Com o avanço da comercialização destes veículos, torna-se mais difícil o conhecimento do combustível utilizado pelo veículo, e conseqüentemente o comportamento das emissões veiculares, durante o deslocamento.

Não foi possível obter fatores de emissão para veículos medidos no município de Porto Alegre. Os fatores de emissão utilizados neste trabalho são baseados em medições realizadas em veículos de São Paulo. Apesar da origem destas informações serem de outro município, acredita-se que as características da frota circulante no município de São Paulo sejam semelhantes às da frota de Porto Alegre. Portanto estes dados são aceitáveis, e mais adequados que informações de emissões veiculares originadas em outros países como Estados Unidos e países europeus.

Ainda, foram considerados apenas os veículos ciclo Otto movidos a gasolina na análise das emissões em partida a frio. Embora a metodologia utilizada neste trabalho possa ser aplicada a outros contextos, os resultados obtidos são restritos ao ambiente e às condições modeladas.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O Capítulo 2 apresenta a revisão teórica, abordando a formação, os fatores que intervêm e as maneiras de estimar e medir as emissões de poluentes veiculares, destacando o comportamento das emissões no período de partida a frio.

No Capítulo 3 é descrito o método utilizado na estimativa e distribuição espacial do adicional de emissão veicular decorrente do período de partida a frio.

O Capítulo 4 apresenta a aplicação do método utilizado na estimativa das emissões em partida a frio, apresentando os resultados obtidos e as análises das emissões veiculares em partida a frio em uma área de Porto Alegre-RS. Ainda, é realizada a análise de sensibilidade das variáveis do modelo.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas neste trabalho e recomendações para a realização de trabalhos futuros.

2 AS EMISSÕES VEICULARES

Este capítulo está dividido em três seções. A primeira seção aborda a formação das emissões veiculares e os poluentes emitidos pelos veículos. Em seguida, são descritos os fatores intervenientes na formação das emissões veiculares. Finalizando, são abordados os métodos de medição de emissão veicular.

2.1 FORMAÇÃO DAS EMISSÕES VEICULARES

As emissões de poluentes veiculares são provenientes de diversas fontes, entre as quais decorrentes da evaporação de combustível, seja por resfriamento do motor, reabastecimento, em movimento, parado ou pela variação de temperatura ambiente ao longo do dia, e da emissão de descarga, conforme ilustrado na Figura 1. Além dessas fontes, alguns autores ainda incluem como fonte de emissão de poluentes as emissões de partículas provenientes do desgaste de pneus, freios e embreagem, a suspensão de partículas de poeiras presentes no solo e a emissão de gases oriundos da combustão que passam para o cárter do motor (HEYWOOD, 1988).

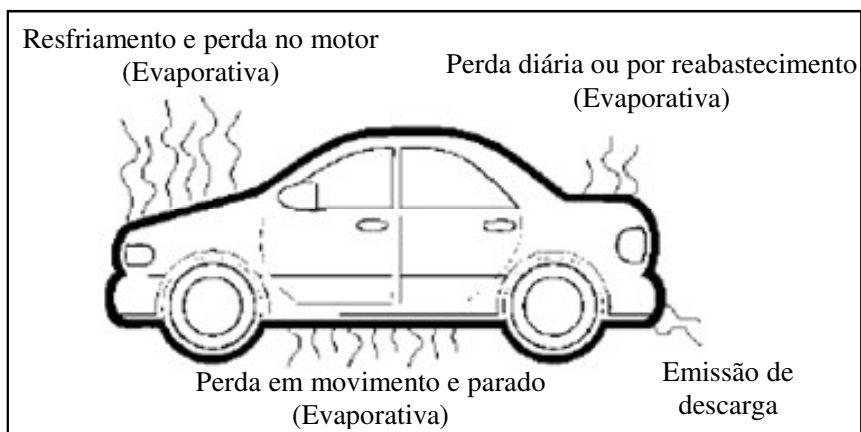


Figura 1 - Fontes de emissões de poluentes veiculares

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

No que se refere às fontes de emissões veiculares, essas geralmente são categorizadas em dois tipos, as emissões de escapamento ou descarga e emissões evaporativas. As emissões

evaporativas são referentes à evaporação do combustível, enquanto as de descarga à queima do combustível.

2.1.1 Emissões evaporativas

A emissão evaporativa é originada a partir da evaporação do combustível, tendo sua formação vinculada à variação de temperatura ambiente ou do próprio veículo. Este tipo de emissão é composto basicamente por hidrocarbonetos. As emissões evaporativas podem ser classificadas em (MEHTA et al., 2003):

- a) Perdas por resfriamento, oriunda do combustível presente no carburador ou no sistema de injeção eletrônica após o veículo ser desligado;
- b) Perdas diárias pelo respiro do tanque, exceto em veículos estanques, ou pela variação da temperatura ambiente durante as 24 horas do dia;
- c) Perdas por operação, através do combustível evaporado durante o funcionamento do motor;
- d) Perdas no reabastecimento do veículo.

As emissões evaporativas provenientes do resfriamento do motor, da operação do veículo, da variação da temperatura ambiente ao longo do dia e do respiro do tanque de combustível tendem a ser minimizadas a partir do emprego de novas tecnologias de sistemas alimentação estanques na produção veicular.

2.1.2 Emissões de descarga

As emissões de descarga são formadas pelos produtos da queima da mistura ar-combustível nos motores de combustão interna, e representam cerca de 80% das emissões totais (FEAM, 2006). A classificação dos motores de combustão interna pelo método de ignição apresenta grande influência na formação das emissões veiculares de descarga (HEYWOOD, 1988).

Os motores alternativos de combustão interna podem ser classificados de acordo com o método de ignição em duas categorias: ignição por centelha e ignição por compressão. Nos motores de ignição por centelha de 4 tempos, também chamados de motores ciclo Otto, a combustão da mistura ar/combustível, após ser submetida à compressão nos cilindros, é iniciada por uma centelha. Os combustíveis utilizados por estes motores são normalmente hidrocarbonetos leves de alto poder calorífico, como a gasolina e o gás natural, alcoóis, como o álcool anidro, ou misturas semelhantes, apresentando boa resistência à detonação. No Brasil, normalmente este tipo de motor equipa os veículos de passeio, comerciais leves e motocicletas. Os principais poluentes emitidos por motores ciclo Otto são hidrocarbonetos (HC), monóxido de carbono (CO) e óxidos de nitrogênio (NO_x) (FAIZ et al., 1996).

Nos motores de ignição por compressão, ou motores de ciclo Diesel, a combustão ocorre com a auto-ignição do combustível. A auto-ignição acontece quando o combustível é injetado e misturado com o ar aquecido pela compressão no interior dos cilindros. Os combustíveis utilizados neste tipo de motor, em geral, são hidrocarbonetos mais pesados e menos voláteis, como o óleo diesel (FAIZ et al., 1996).

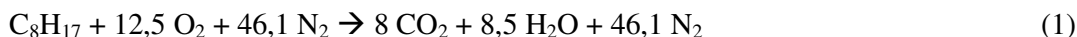
Os motores de ciclo Diesel são mais robustos que os motores de ciclo Otto, e utilizados, na sua grande maioria, em veículos pesados, de passageiros e de cargas, que necessitam de alto valor de torque. Os motores a Diesel possuem um rendimento termodinâmico superior ao dos motores de ciclo Otto, por trabalharem com maiores temperatura e pressão. Ainda, estes motores sempre operam com excesso de ar, contribuindo para uma queima mais completa do combustível. Motores ciclo Diesel são os principais responsáveis pela emissão de material particulado (MP) e óxidos de nitrogênio (NO_x) no setor de transportes. Ainda, possuem grande contribuição na poluição sonora e emissão de óxidos de enxofre (SO_x) (FAIZ et al., 1996).

As emissões de escapamento estão diretamente ligadas à relação ar/combustível (A/F). Quando o motor opera com mais combustível que o ar consegue oxidar, diz-se que é uma mistura rica de ar e combustível. Na ocorrência de excesso de ar, a mistura é chamada de pobre. A relação A/F é extremamente dependente do modo de operação do veículo.

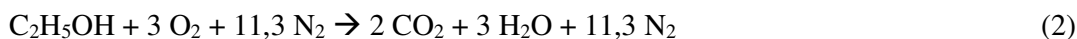
Durante o processo de combustão, o carbono e o hidrogênio reagem com o oxigênio do ar liberando energia e compostos químicos, os produtos da reação. Em uma situação

perfeita, o resultado da combustão seria apenas dióxido de carbono (CO₂) e água. É importante ressaltar que o CO₂ não é considerado um poluente local, apesar de ser o principal gás de efeito estufa, contribuindo para o aquecimento global.

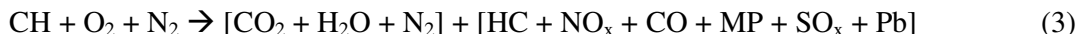
Admitindo a gasolina com composição média de hidrocarbonetos, representada por C₈H₁₇, e supondo o ar composto em volume de 21% de O₂ e 79% de N₂, tem-se em uma relação estequiométrica apresentada na Equação (1) (GARCIA apud MILHOR, 2002):



Para o álcool etílico, C₂H₅OH a reação ocorre conforme demonstrado na Equação (2):



Como a combustão não é perfeita, além de dióxido de carbono e água, podem ser emitidos monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos não queimados (HC), óxidos de nitrogênio (NO_x), material particulado (MP), óxidos de enxofre (SO_x) e chumbo (Pb) (MILHOR, 2002). Em condições realísticas, a emissão veicular de descarga é a apresentada na Equação (3):



Os veículos ciclo Otto normalmente operam próximos da relação estequiométrica, enquanto que veículos com motor de ciclo Diesel operam com excesso de ar, reduzindo assim as emissões de CO e aumentando as emissões de NO_x nos veículos com motor de ciclo Diesel. As emissões de chumbo ocorrem apenas na existência deste composto no combustível utilizado pelo veículo, o que não ocorre mais no Brasil.

2.1.3 Compostos emitidos pelos veículos

Os poluentes relacionados ao uso de veículos automotores podem ser de origem primária ou secundária. Os compostos primários são emitidos diretamente pelo veículo. Os poluentes secundários são formados na atmosfera a partir de reações químicas ou fotoquímicas entre dois ou mais poluentes.

2.1.3.1 Monóxido de carbono

A produção de monóxido de carbono (CO) é diretamente ligada à relação ar/combustível da mistura no motor do veículo. O CO é um produto da combustão incompleta do combustível, derivado da insuficiência de oxigênio (O₂) para a queima de todo o carbono (C) contido no combustível. As emissões veiculares de CO são muito altas quando a mistura é rica, caso das partidas a frio e em eventos de aceleração. (VILANOVA, 1998).

O CO é um gás incolor, inodoro e altamente tóxico ao ser humano. O monóxido de carbono reage com a hemoglobina presente no sangue, causando uma redução do oxigênio transportado para as células. Desta forma, a exposição do ser humano por tempo prolongado a esta substância pode causar tonturas, dores de cabeça e até a morte por asfixia. Crianças e idosos podem ter problemas cardíacos e respiratórios, quando expostos a alta concentração do gás. Ainda, o monóxido de carbono contribui, de forma indireta, na formação do ozônio troposférico.

2.1.3.2 Hidrocarbonetos

Os hidrocarbonetos (HC) são formados pela evaporação ou pela combustão incompleta do combustível. A emissão de HC ocorre na faixa de mistura rica e em condições de empobrecimento, quando ocorrem longos eventos de desaceleração. Atualmente, com a utilização de controles eficientes de emissões através de descarga, as perdas evaporativas contribuem, em dias quentes, com a maior parte dos HC emitidos pelos veículos (AHN, 1998).

Os HC's reagem à presença de NO_x e luz do sol formando o ozônio pesado, o principal responsável pelo *smog* fotoquímico. Ainda, hidrocarbonetos também são tóxicos e podem causar câncer ao longo do tempo.

2.1.3.3 Óxidos de Nitrogênio

Os óxidos de nitrogênio (NO_x) são produtos da reação química entre o nitrogênio, presente no ar atmosférico, e o oxigênio em temperatura elevada, formados na combustão. Os

NO_x emitidos pelos veículos equipados com motores de combustão interna são compostos basicamente de óxido nítrico (NO), cerca de 90% dos NO_x , e dióxido de nitrogênio (NO_2). A temperatura ambiente influencia muito a formação deste composto químico (HEYWOOD, 1988). Por trabalharem em condições de temperatura e pressão superiores aos motores de ciclo Otto, os motores de ciclo Diesel emitem quantidades superiores de NO_x (BRANCO E MURGEL, 1995).

O óxido nítrico é incolor e prejudicial ao ser humano, pois, a sua combinação com a hemoglobina pode causar paralisia cerebral. Na presença do ar, o NO se oxida e forma o NO_2 . O dióxido de nitrogênio é um gás castanho avermelhado e com um odor pungente bem característico. O NO_2 pode causar irritação ao sistema respiratório e danos aos tecidos pulmonares. Ainda, os NO_x contribuem para a formação de chuva ácida.

2.1.3.4 Óxidos de enxofre

A oxidação do enxofre (S) contido no combustível, especialmente no óleo diesel, é responsável pela emissão dos óxidos de enxofre (SO_x). O produto da combustão do enxofre presente no combustível normalmente aparece como SO_2 e SO_3 . A emissão de SO_2 depende da quantidade de enxofre contido no combustível, condições de operação do motor e tipo de catalisador utilizado. Existem duas formas de reduzir o nível de emissões veiculares de SO_x . Uma delas é reduzir a quantidade de enxofre no combustível, e a outra é reduzir a quantidade de SO_x emitidos pela descarga do veículo (VILANOVA, 1998; LOUREIRO, 2005).

A produção de óleo diesel com baixo teor de enxofre tem contribuído para a redução das emissões de SO_2 . No Brasil, a criação do óleo diesel metropolitano reduziu o nível de enxofre no óleo diesel de 2000 ppm para 500 ppm. Entretanto, o diesel empregado no Brasil ainda está longe de ser um produto não poluente se comparado ao diesel empregado em países da Europa e nos EUA, com 50 ppm de enxofre.

A combinação da umidade do ar com os SO_x pode gerar ácidos como o H_2SO_4 , proporcionando chuva ácida. Na presença da luz solar, os SO_x reagem e podem contribuir para a formação do *smog* fotoquímico. Ainda, a concentração dos óxidos de enxofre pode causar nos seres humanos doenças pulmonares e respiratórias e irritação nos olhos.

2.1.3.5 Material particulado

O material particulado (MP) consiste de substâncias sólidas ou líquidas (partículas não queimadas de carbono do combustível) expelidas pela descarga dos motores ou levantadas pelo deslocamento de veículos. A maior parte deste material é gerada nos motores de ciclo Diesel. Nos motores de ciclo Otto a emissão de MP é insignificante. O material particulado pode ser classificado de acordo com o seu tamanho em: grosso, partículas finas e partículas inaláveis.

O material particulado é admitido no sistema respiratório dos seres humanos pelos canais de respiração e absorvidos pelos pulmões. A acumulação destas partículas no organismo pode causar distúrbios no sistema respiratório. A circulação intensa de veículos, especialmente os veículos de transporte coletivo de passageiros, aumenta a concentração destes materiais. Uma das formas de reduzir bastante a emissão de material particulado em veículos equipados com motores a Diesel é a adoção de filtros de partículas (VILANOVA, 1998).

2.1.3.6 Chumbo

A emissão de chumbo (Pb) ocorre em motores abastecidos com gasolina que contém este metal pesado na sua composição. Em 1991, os aditivos antidetonantes à base de chumbo foram removidos da gasolina brasileira, e o álcool anidro passou a ser misturado à gasolina, fazendo o papel do aditivo. A retirada do chumbo na gasolina também é responsável pela implantação dos sistemas de controle de emissões, em particular os catalisadores. O chumbo afeta a saúde humana de diversas formas, como, por exemplo, alterações no nível de algumas enzimas, problemas nos rins e efeitos carcinogênicos (capazes de promover dano genético) (SZWARCFITER, 2004).

2.1.3.7 Dióxido de carbono

O dióxido de carbono (CO₂) é o principal produto da queima do combustível em motores de combustão interna. O CO₂ não é um gás poluente, embora seja um dos principais

gases do efeito estufa. Até meados da década de 70, sua emissão não era alvo de preocupação de autoridades, assim como não era submetida a controles rigorosos de emissão.

A recente preocupação com o aquecimento global levou a um maior controle dos gases de efeito estufa, entre eles o CO₂. Um dos esforços mais recentes e conhecidos visando à redução dos gases de efeito-estufa é o Tratado de *Kyoto*. O Tratado de *Kyoto* instituiu o mercado de créditos de carbono, unidade métrica utilizada para comparar as emissões de diferentes gases de efeito estufa, entre eles o CO₂, com base no seu potencial de aquecimento global (SZINVELSKI, 2005; OSTERMAYER, 2004).

2.1.3.8 Ozônio

Usualmente o ozônio (O₃) não é emitido diretamente na atmosfera. O O₃ é criado por reações fotoquímicas complexas que envolvem principalmente óxidos de nitrogênio, oxigênio e hidrocarbonetos na presença da luz do sol. O ozônio é benéfico em camadas mais altas da atmosfera bloqueando parte da radiação ultravioleta. Entretanto, em camadas mais baixas provoca problemas de saúde, tais como inflamação nos olhos, problemas respiratórios crônicos e pulmonares.

2.2 FATORES INTERVENIENTES NAS EMISSÕES VEICULARES

As emissões veiculares possuem uma grande variabilidade e dependem de uma série de fatores. A variabilidade das emissões pode ocorrer entre veículos distintos ou entre as emissões formadas por um mesmo veículo. A variação das emissões entre veículos distintos é consequência de fatores tecnológicos, como desgaste e manutenção dos veículos, e é altamente significativa. As variações das emissões no mesmo veículo são dependentes de condições ambientais, operacionais e manutenção do veículo (WENZEL et al., 2000). Entre os principais fatores que interferem na variabilidade das emissões destacam-se:

- a) características da frota;
- b) aspectos tecnológicos;
- c) regulação e manutenção veicular;

- d) características do sistema viário e tráfego local;
- e) características ambientais;
- f) características da viagem e demanda por transporte;
- g) aspectos socioeconômicos;
- h) aspectos da regulamentação;
- i) modo de condução do veículo;
- j) modo de operação do veículo.

2.2.1 Características da frota

Características como modelo, peso e idade do veículo e tipo e tamanho do motor interferem na quantidade emitida de poluentes. Os veículos novos, por serem mais modernos e normalmente não apresentarem deterioração são em geral menos poluidores. Na medida em que o veículo envelhece e a sua quilometragem acumulada aumenta, a emissão de poluentes tende também a aumentar. A degradação natural dos equipamentos de controle de emissão de poluentes (ECEP) em veículos com bom estado de conservação resulta em incrementos moderados de emissões de poluentes. Os veículos onde os ECEP's apresentam mal funcionamento ou falha total resultam em um grande aumento nas emissões de CO e HC (WENZEL et al., 2000).

Com relação ao peso, observou-se que os veículos sofreram reduções de tamanho no final dos anos 70 e início dos anos 80, especialmente no porta-malas, compartimento do motor e assentos traseiros. Além disso, ocorreram mudanças nos materiais utilizados na fabricação dos carros, como a adoção de plástico, alumínio e aços leves pelos fabricantes, reduzindo o peso dos veículos. Essas modificações contribuíram para a redução de emissão de poluentes, uma vez que veículos mais leves normalmente emitem menor quantidade de poluentes. Outra mudança ocorrida no desenho dos veículos que contribuiu para menor emissão de poluentes foi a introdução de formatos aerodinâmicos que visam a redução do consumo de combustíveis (AZUAGA, 2000).

A emissão veicular ainda é influenciada pelo tipo de motorização adotada. Os veículos normalmente são equipados com motores ciclo Otto ou ciclo Diesel. Veículos equipados com motores ciclo Diesel emitem grandes quantidades de NO_x e MP, enquanto que veículos com motor ciclo Otto são os principais responsáveis pela emissão de CO e HC. Ainda, motores de maior volume dos cilindros de compressão tendem a gerar mais poluentes, se comparados com motores de menor volume (AHN, 1998).

A distribuição de emissões entre os veículos é muito distorcida. Os veículos que apresentam defeitos nos ECEP ou falta de regulagem e manutenção são responsáveis por uma grande parte dos poluentes emitidos e representam uma parcela pequena dos veículos em circulação. A maioria dos veículos, aqueles em boas condições de conservação e manutenção, emite uma quantidade baixa de poluentes (WENZEL et al., 2000).

2.2.2 Aspectos tecnológicos

O tipo de tecnologia utilizada pelo veículo interfere na quantidade de poluentes emitidos na atmosfera. Os fatores tecnológicos podem ser agrupados em: combustíveis, características do motor e equipamentos de controle de emissão de poluentes.

2.2.2.1 Combustíveis

O tipo de combustível utilizado define a qualidade da queima da mistura ar-combustível dentro do motor, influenciando diretamente na formação das emissões veiculares. A redução, ou até mesmo a eliminação, de chumbo (Pb) e enxofre (S) nos combustíveis, têm grande influência na redução das 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.

No Brasil os principais combustíveis utilizados em motores ciclo Otto são o gasool e o álcool hidratado. O gasool é a mistura de gasolina com álcool anidro. A percentagem de álcool anidro é estabelecida por decreto federal. O álcool hidratado é composto por 96% de etanol, também chamado de álcool etílico, e 4% de água. A gasolina é uma mistura de

hidrocarbonetos e suas propriedades podem ser ajustadas para fornecer características operacionais desejadas. Já o álcool etílico é uma substância pura (MILHOR, 2002).

2.2.2.2 Motores

Os cilindros dos motores podem ser alimentados com combustível através de carburadores ou injeção eletrônica. A grande vantagem da injeção eletrônica é um controle mais efetivo do processo de alimentação, proporcionando maior economia de combustível, maior potência do motor e taxa de emissão mais baixa (VILANOVA, 1998).

As injeções eletrônicas podem ser divididas em sistemas monoponto e sistemas multiponto. A injeção eletrônica multiponto possui um injetor para cada cilindro, gerando uma distribuição de combustível mais homogênea que a injeção monoponto. A injeção monoponto possui um injetor para todos os cilindros. A injeção eletrônica multiponto reduz o consumo de combustível e a emissão de poluentes (VILANOVA, 1998).

Outro fator que contribui para a redução das emissões é o desenho do motor. Melhorias no projeto do motor podem reduzir até 80% de emissão de material particulado e entre 50 e 70% de emissão de NO_x em motores Diesel (FAIZ et al., 1996).

2.2.2.3 Equipamentos de controle de emissão de poluentes (ECEP)

Os conversores catalíticos, ou simplesmente catalisadores, são os equipamentos de controle de emissão mais utilizados nos veículos leves e de maior eficiência no tratamento das emissões de poluentes de descarga. Os catalisadores consistem basicamente em uma colméia com células recobertas com metais nobres ativos por onde os gases de escapamento são obrigados a passar. Estes metais nobres ativos normalmente são platina, ródio ou paládio. Os primeiros conversores catalíticos utilizados eram conhecidos como de duas vias (*two-way*) e oxidavam apenas CO e HC. Em 1979 surgiram os catalisadores de três vias (*three-way*) nos Estados Unidos. Os catalisadores de três vias, além de oxidar os HC e CO, reduzem as emissões de NO_x (FAIZ et al., 1996).

Para um funcionamento adequado, os veículos com catalisadores necessitam de combustíveis sem chumbo. O chumbo se deposita no catalisador, impedindo que os gases de

escape reajam com o catalisador. O fósforo e o enxofre presentes nos combustíveis ou nos óleos lubrificantes também podem atacar e reduzir a eficiência do catalisador. Ainda, para que o catalisador comece a operar efetivamente, é necessário que ele atinja a temperatura de trabalho, entre 200 e 400 °C. Nos motores ciclo Diesel, o grande problema da oxidação é a possível formação de ácido sulfúrico e sulfatos a partir do dióxido de enxofre da exaustão. O uso de catalisadores nos veículos automotores pode reduzir em 95% a quantidade de poluentes emitidos (SINGER et al., 1999).

Para o veículo equipado com motor ciclo Otto trabalhar na faixa estequiométrica a maior parte do tempo, foi desenvolvido um sensor de oxigênio, também chamado de “sonda λ ”. A quantidade de oxigênio livre nos gases de escapamento gera uma diferença de potencial no sensor, que é comparado a um padrão de mistura estequiométrica. Com o auxílio de um computador, o sistema de injeção eletrônica, corrige a taxa ar/combustível para o nível estequiométrico (FAIZ et al., 1996; VILANOVA, 1998). A Figura 2 ilustra o funcionamento de um sistema de controle de emissão de poluentes equipados com catalisador de três vias e sensor de oxigênio.

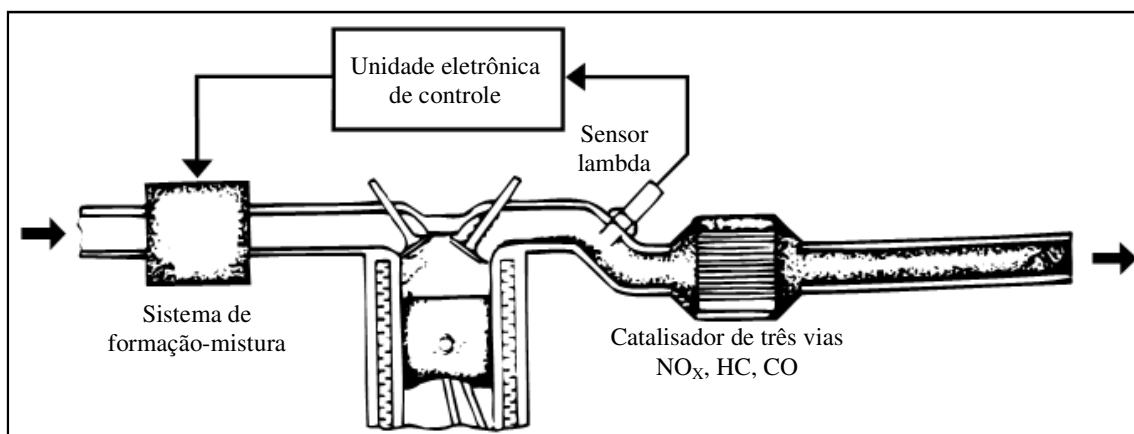


Figura 2 – Funcionamento de um sistema de controle de emissão de poluentes equipado com sensor de oxigênio e catalisador de três vias

Fonte: Faiz et al. (1996).

Outra melhoria tecnológica incluída nos veículos para a redução NO_x foi a circulação de gases do motor. Admite-se que até 30% dos gases possam ser recirculados, alcançando reduções de NO_x na faixa de 15 a 25% (WENZEL et al., 2000).

Para o tratamento das emissões por evaporação, podem ser utilizados separadores de vapor e cânisters. O separador de vapor é localizado entre a bomba de combustível e o carburador, e sua função é a de separar os vapores formados por aquecimento e reconduzi-los ao reservatório. O cânister tem a função de armazenar os hidrocarbonetos emitidos em um filtro de carvão ativado, liberando-os apenas quando expostos a um fluxo de ar. Ainda, o uso de filtros é um dos principais meios de reduzir a emissão de material particulado em veículos com motor ciclo Diesel (FAIZ et al., 1996; WENZEL et al., 2000).

Normalmente, os avanços tecnológicos verificados nos países desenvolvidos, especialmente países da Europa e Estados Unidos, não são verificados nos motores e combustíveis brasileiros. De forma geral, os combustíveis e motores produzidos na Europa e Estados Unidos tendem a produzir menos emissões do que os similares brasileiros. Isto ocorre porque em países desenvolvidos existe um maior rigor no controle de emissões veiculares pela população e pelos governantes.

2.2.3 Regulagem e manutenção dos veículos

A regulagem adequada dos veículos mantém 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 correta 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 (WENZEL et al., 2000).

A manutenção veicular pode ser um fator mais crítico do que a idade do veículo na determinação no nível das emissões. Porém, é importante lembrar que a manutenção ou reparo incorreto pode ampliar a quantidade de poluentes emitidos pelo veículo. Veículos novos sem manutenção ou com manutenção inadequada podem poluir tanto quanto veículos velhos com manutenção adequada (GOYAL et al., 2006).

2.2.4 Característica do sistema viário e do tráfego local

A emissão de poluentes veiculares é dependente das condições de tráfego, onde as características podem variar consideravelmente de uma área para outra. As características de controle nas interseções, programações semaforicas e praças de pedágio geram um aumento nas emissões veiculares. O nível de emissões nestes locais ocorre pela necessidade do condutor reduzir a velocidade, ou até mesmo parar o veículo, e em seguida acelerar novamente o veículo (AHN, 1998).

Número de faixas de tráfego, largura da via, facilidades para estacionamento e permissividade de conversões também são fatores relacionados ao sistema de tráfego local com conseqüências indiretas na emissão veicular. Estes fatores exercem influência sobre a liberdade do fluxo de veículos. Ainda, a inclinação positiva da via leva a uma maior demanda de potência do veículo, ocasionando o enriquecimento da mistura (redução da relação ar/combustível). As condições do pavimento também têm influência sobre o nível de emissões.

2.2.5 Características ambientais

As variações diárias de temperatura fazem com que o combustível no tanque do veículo evapore, liberando hidrocarbonetos na atmosfera. 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 conversores catalíticos ocorre mais rapidamente, fazendo com que uma nova partida do motor ocorra em temperaturas mais baixas e que demore mais para o veículo atingir a temperatura de trabalho (WENZEL et al., 2000; EPA, 2006).

A umidade do ar pode elevar o nível de emissões de NO_x , principalmente em veículos antigos e/ou com problemas no funcionamento. Em veículos mais modernos, o auxílio dos computadores no controle dos motores tende a minimizar a influência da umidade nas emissões de NO_x . (WENZEL et al., 2000). A altitude influencia as emissões de poluentes em veículos equipados com motores ciclo Diesel. O ar torna-se rarefeito em cotas elevadas, provocando enriquecimento da mistura.

A precipitação pode influenciar o modo de conduzir o veículo, o que influencia as emissões de poluentes. Em vias locais na França, a velocidade pode ser cerca de 6 km/h inferior em dias de chuva (ANDRÉ; HAMMARSTRÖM, 2000). Ainda, a ação do vento é um dos principais fatores na dispersão dos poluentes emitidos pelos veículos, podendo transportar compostos emitidos para quilômetros de distância (DAVAKIS et al., 2007).

2.2.6 Características da viagem e demanda de transporte

A quantidade de emissões e o consumo de combustíveis dependem da quantidade de veículos por quilômetro rodado e pela quantidade de emissões que cada veículo emitiu. O tempo e a distância percorrida na viagem também possuem forte ligação ao nível de poluentes emitidos pelos veículos. As viagens em áreas urbanas normalmente são de curta duração, com isto, o conversor catalítico e o motor podem não atingir a temperatura de trabalho, causando o efeito chamado de partida a frio. O trajeto que o veículo trafega em partida a frio é responsável por um alto índice de emissão de poluentes. Ainda, a tecnologia empregada no combate à emissão de poluentes é focada nas emissões em condições estabilizadas.

A principal razão da utilização de combustíveis e das emissões veiculares é a demanda por transportes. Esta demanda é influenciada por fatores como o desenvolvimento econômico, a utilização do solo e o planejamento de tráfego. Com um número maior de veículos circulando, além do aumento do número de fontes de emissão, o acréscimo da demanda por transporte pode acarretar em congestionamentos no sistema viário, gerando mais poluentes emitidos por veículo.

2.2.7 Características socioeconômicas

Wenzel et al. (2000) encontraram correlação entre o nível de poluentes emitidos e a renda familiar. Em regiões onde a renda familiar é baixa, as emissões de poluentes são maiores que em regiões onde a renda familiar é alta. Isto pode ocorrer por três motivos:

- a) As pessoas de renda mais baixa compram veículos mais baratos. Estes veículos normalmente possuem uma fabricação menos focada no controle das emissões de poluentes e mais focada na redução de custos;

- b) Veículos mais antigos e com quilometragem alta são mais fáceis de serem comprados por pessoas de renda baixa; e
- c) As pessoas das regiões com renda menor gastam menos dinheiro em manutenção ou reparos dos veículos.

2.2.8 Aspectos da regulamentação

As primeiras evidências científicas de que os veículos automotores representavam uma fonte de poluição do ar e causavam efeitos negativos sobre a saúde humana e o bem estar da população foram obtidas em estudos realizados na Califórnia, Estados Unidos, na década de 1950. Assim, foi constatado que as emissões veiculares necessitavam de medidas de controle (MENDES, 2004).

O Estado da Califórnia estabeleceu sua primeira regulamentação das emissões dos gases de escapamento em 1966. Em 1970 o governo norte americano estabeleceu a regulamentação federal sobre as emissões veiculares, através da publicação do *Clean Air Act*. Ainda, países da Comunidade Econômica Européia, Japão e Austrália estabeleceram limites de emissão de poluentes veiculares nas décadas de 1960 e 1970.

No Brasil, a regulamentação das emissões veiculares teve início em 1986 com a criação do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores, o PROCONVE. A Tabela 1 apresenta a classificação dos veículos de acordo com o ano de fabricação e os limites máximos de emissão regulamentados pelo PROCONVE (BRASIL, 2004).

O procedimento de certificação dos veículos de acordo com os limites de emissão de poluentes é realizado com base em ensaios de laboratório. O veículo é posicionado em um dinamômetro de chassi e conduzido conforme o ciclo de direção estabelecido pela legislação. Ciclo de direção é um perfil de velocidade em função do tempo que busca simular as condições médias de tráfego real em uma determinada localidade. As emissões veiculares, normalmente, são determinadas em g/km e comparadas com os limites estabelecidos.

Tabela 1 – Classificação veicular de acordo com limites máximos de emissão regulamentados e o ano de fabricação do veículo

Classe veicular	Ano de fabricação do veículo	Fase equivalente do PROCONVE	Limite máximo de CO (g/km)	Limite máximo de HC (g/km)	Limite máximo de NO _x (g/km)
A	Anterior a 1989	Anterior ao PROCONVE	-	-	-
B	1989-1991	I	24	2,1	2
C	1992-1996	II	12	1,2	1,4
D	1997-2004	III	2	0,3	0,6
E	2005-2008	IV	2	0,3	0,25 (ciclo Otto) 0,6 (ciclo Diesel)
F	A partir de 2009	V	2	0,3	0,12 (ciclo Otto) 0,25 (ciclo Diesel)

Em geral, o limite de emissão estabelecido em medidas regulatórias é atendido com a implantação de inovações tecnológicas, como o uso de tecnologias de combustão mais limpas, o uso de equipamentos para reduzir a emissão de poluentes, a produção de combustíveis mais limpos e programas de inspeção e manutenção de veículos. Nos países onde o limite de emissão veicular não é regulamentado, a redução das emissões veiculares depende do interesse dos fabricantes de veículos em adotar novas tecnologias de controle das emissões veiculares.

2.2.9 Modo de condução do veículo

O padrão de condução está correlacionado com duas variáveis: as condições de operação do veículo, influenciado pelas características operacionais e físicas do sistema viário, e pelo comportamento do condutor. Segundo Ericsson (2000), o isolamento destas características é impossível, pois as condições do ambiente influenciam a atitude do condutor e vice-versa. A Figura 3 ilustra a relação entre as características do ambiente viário e o comportamento do condutor.

Ericsson (2001) realizou um trabalho com o propósito de identificar quais parâmetros tem grande influência no padrão de viagens dos automóveis, e investigar quais características tem maior influência nas emissões de poluentes e consumo de combustível. Foram coletados dados de cinco veículos que percorreram 18.945 km em uma cidade de médio porte na Suécia.

Os veículos eram equipados com GPS (*Global Positioning System*), o que permitiu relacionar o modo de condução com as características da via. Para cada padrão de condução, foram coletados 62 parâmetros. Estes parâmetros incluíam características de velocidade, aceleração e desaceleração do veículo, número de paradas, rotação do motor e mudanças de marcha. O cálculo de emissões foi realizado através de dois modelos de emissão: Rototest AB e VETO.

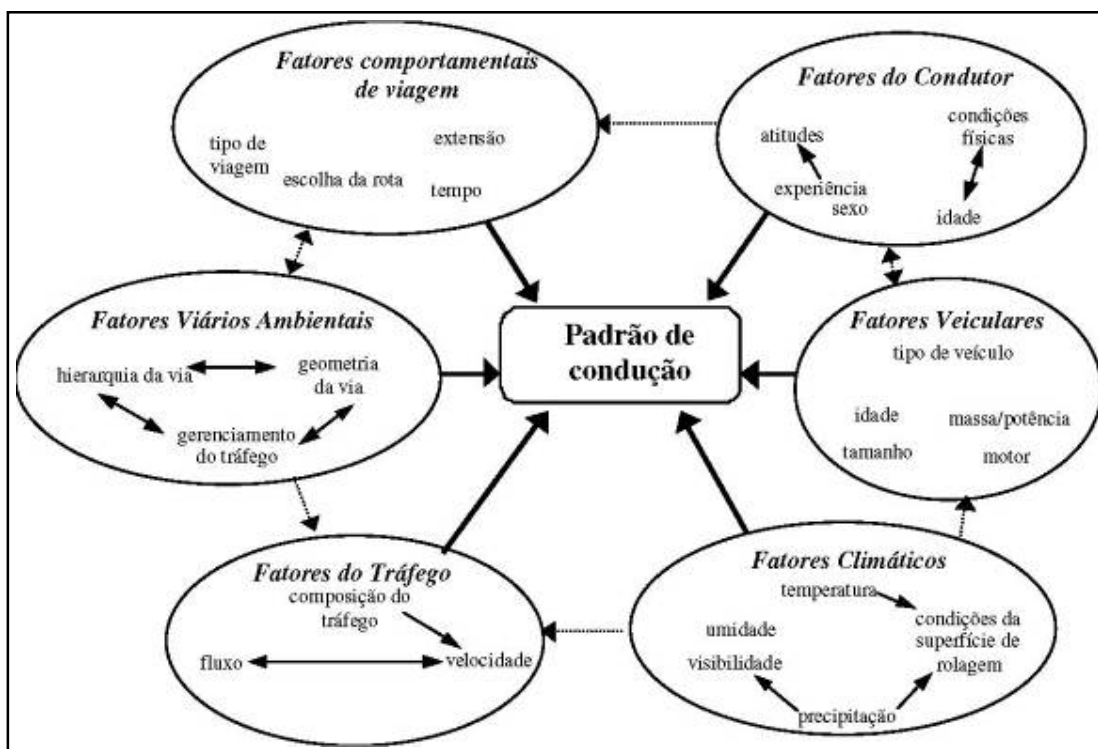


Figura 3 - Causa e efeito na variabilidade do padrão de condução

Fonte: Ericsson (2000).

Ainda, no estudo de Ericsson (2001), a análise do padrão de condução com as emissões veiculares e o consumo de combustível, permitiu a constatação de que acelerações súbitas, acelerações com grande demanda de potência e a rotação alta do motor, maiores que 3.500 rpm, tendem a gerar mais emissões de hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio. O consumo de combustível e as emissões de dióxido de carbono tendem a serem maiores quando o veículo é acelerado de maneira súbita e/ou com grande demanda de potência, oscilações na velocidade e em paradas durante o deslocamento. Quando o veículo está com o motor em rotações moderadas, entre 1.500 e 2.500 rpm, e/ou em velocidade entre 50 e 70 km/h, as emissões de dióxido de carbono e o consumo de combustível tendem a ser menores.

A partir do estudo realizado por Ericsson (2001), Brundell-Freij & Ericsson (2005) compararam os principais parâmetros do padrão de condução de veículos que influenciam nas emissões e no consumo de combustível, com fatores que também poderiam influenciar nas emissões. Estes outros fatores compreendem características do condutor, como idade e gênero, a relação potência/massa do veículo, uso do solo nas regiões por onde os veículos trafegam e características do sistema viário, como o controle das interseções, número de faixas de tráfego, limite de velocidade e fluxo de veículos.

O principal efeito no modo de condução encontrado foi a densidade de interseções semaforizadas. Uma alta densidade causa baixa velocidade média, grande oscilação na velocidade e grande número de acelerações súbitas e com grande demanda de potência, o que gera grande quantidade de emissão de poluentes. O limite de velocidade, a hierarquia da via, a ocupação do solo e a relação potência/massa do carro também têm grande influência no modo de condução e na emissão de poluentes. Com relação aos condutores, apenas os motoristas acima de 60 anos diferem dos outros condutores, dirigindo em velocidades médias inferiores e permanecendo mais tempo parados em vias arteriais. O número de faixas da via, gênero do condutor e condutores mais jovens e de meia-idade não tem influência significativa no modo de condução (Brundell-Freij & Ericsson, 2005).

O modo de condução de cada motorista pode influenciar consideravelmente a emissão de poluentes, principalmente de CO e HC. Acelerações mais bruscas e que exigem mais potência do motor tendem a emitir mais poluentes do que acelerações mais suaves. Em um padrão de direção mais agressivo, o veículo pode emitir dez vezes mais poluentes que em um padrão de direção calmo e duas (HC e NO_x) a três vezes (CO) mais do que em um padrão de condução normal. Um condutor agressivo é caracterizado por dirigir o veículo com acelerações e desacelerações mais bruscas (De Vlieger, 1997; De Vlieger et al. 2000).

2.2.10 Modo de operação do veículo

Os modos de operação do veículo são classificados em: condições estabilizadas, partida a quente e partida a frio. Dentro de cada um desses modos, o veículo pode operar em velocidade constante, parado, em aceleração ou desaceleração. A maior parte dos poluentes é emitida em pequenos episódios de aceleração e desaceleração que acarretam elevados níveis de emissão (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 o nível de emissões tende a ser maior que em condições estabilizadas.

A partida a frio refere-se ao período inicial de funcionamento do veículo, onde o motor e/ou os equipamentos de controle de emissão de poluentes, em especial o catalisador, ainda não atingiram a temperatura de trabalho. No período de partida a frio, a quantidade de poluentes emitidos é maior do que em partida a quente e em condições estabilizadas de operação do veículo. As emissões em partida a frio serão discutidas na seção 3.1.

O comportamento das emissões durante a partida a quente é semelhante ao período de partida a frio. A diferença entre a partida a frio e a partida a quente refere-se ao tempo transcorrido entre o desligamento e o religamento do veículo, ao tempo necessário até que o motor e o catalisador atinjam a temperatura de trabalho e a quantidade de poluentes emitidos (MEHTA et al., 2003), que são inferiores em relação a partida a frio.

Emissões em condições estabilizadas correspondem ao período após a partida a frio ou partida a quente. É o período que o motor e os equipamentos de controle de emissão de poluentes operam em condições estabilizadas de temperatura. Neste modo de operação do veículo, as emissões variam em função da ocorrência de eventos de aceleração e desaceleração. A principal influência na variação de emissões durante este período é o modo de condução do veículo.

A variável mais empregada para descrever o nível de poluentes emitidos no setor de transportes é a velocidade média. Esta variável é uma combinação de velocidade e aceleração para cada tipo de rodovia. Por exemplo, uma velocidade média de 50 km/h em uma rodovia indica um fluxo congestionado com freqüentes acelerações e desacelerações, emitindo um número maior de poluentes do que em uma via urbana na mesma velocidade média, onde passa a idéia de fluxo livre.

As acelerações, período onde o motor sofre maior carregamento, desempenham um papel importante na formação das emissões veiculares. A maior parte dos poluentes emitidos ocorre em pequenos episódios de grande emissão. Estes pequenos episódios ocorrem em eventos de aceleração (ROUPHAIL et al., 2000). Em períodos de desaceleração também podem ser notados acréscimo de poluentes emitidos. O nível de emissão de HC em períodos

de aceleração pode ser 100% maior que a quantidade de poluentes emitidos em velocidade de cruzeiro (RAKHA; DING, 2003). Ainda, veículos parados possuem um nível muito baixo de emissão.

A aceleração possui uma forte correlação com a agressividade do condutor. Um condutor com estilo agressivo de direção emite até 8 vezes mais emissões que um condutor moderado, em veículos equipados com catalisador. Os efeitos das acelerações nas emissões são mais notados em vias urbanas. Nas vias rurais o tráfego é mais suave. (DE VLIEGER et al., 2000; ROUPHAIL et al., 2000; RAKHA; DING 2003).

2.3 MEDIÇÃO DE EMISSÕES VEICULARES

A medição das emissões de escapamento é utilizada na certificação de veículos novos, verificação da conformidade dos veículos com os programas de inspeção e manutenção (I/M), e criação de fatores de emissão, utilizados na criação e calibração de modelos de estimativa de emissões veiculares (MOREY et al. 2000). Os primeiros testes para medições de emissões veiculares foram realizados com o propósito de certificar novos veículos de acordo com os padrões de emissões estabelecidos pelo órgão regulamentador (WENZEL et al., 2000).

Os métodos normalmente utilizados para a medição dos poluentes emitidos são: testes em laboratórios, compreendidos por testes dinâmicos e estáticos, em veículos instrumentados e sensoriamento remoto, muito utilizado em medições em túneis (KEAN et al., 2003).

2.3.1 Sensoriamento remoto

O sensoriamento remoto consiste em medir os gases emitidos pela descarga do veículo a partir de sensores remotos que emitem raios infravermelhos ou ultravioletas e medem as modificações na intensidade de fecho de luz apontado para a via. A modificação da intensidade da luz é provocada pela pluma de exaustão do automóvel. Junto com o sensor acopla-se uma câmara de vídeo para identificação da placa do veículo e, através do acesso aos registros de licenciamento, determina-se a idade, o tipo e eventualmente a quilometragem do

veículo. Estes sensores podem medir CO, HC, CO₂ e NO_x (YU, 1998; FREY E UNAL, 2002).

Este tipo de medição tem como vantagem a necessidade de ter apenas um equipamento capaz de medir as emissões de um grande número de veículos em um único dia, com um custo muito inferior aos outros procedimentos de medição. Ainda, fornecem dados reais de emissões de campo. O sensoriamento remoto serve para fornecer dados sobre emissões médias da frota ou as emissões típicas de um determinado tipo de veículo. Este método ainda auxilia na identificação de veículos com altos níveis de emissão (FAIZ et al., 1996; WENZEL et al., 2000).

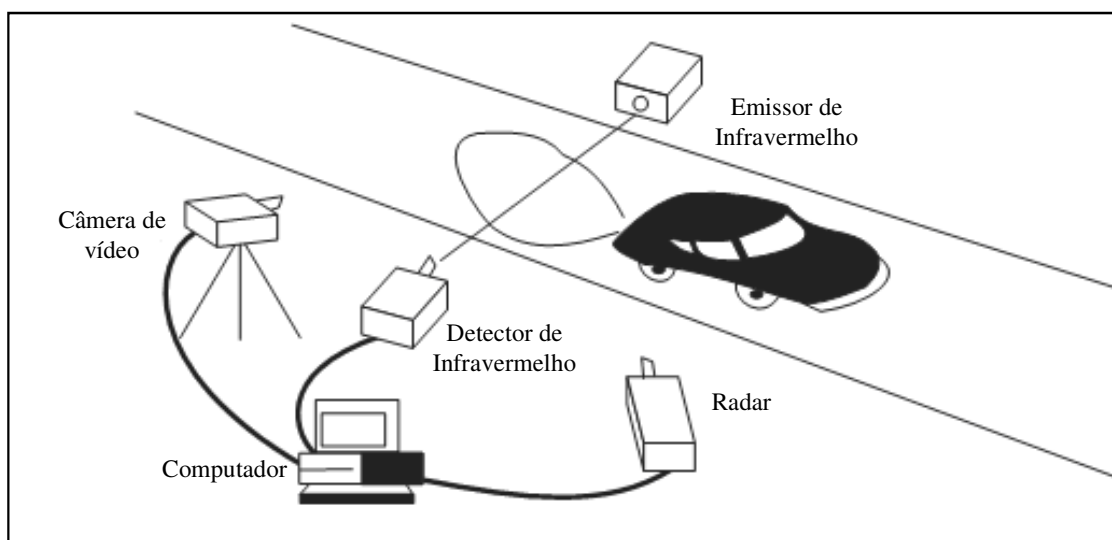


Figura 4 – Obtenção de emissões veiculares através de sensoriamento remoto

Fonte: Faiz et al., 1996.

A desvantagem do sensoriamento remoto é a medição das emissões de cada veículo em uma fração de segundo apenas. Como as emissões totais deste veículo podem variar consideravelmente daquelas obtidas pela medição através do sensoriamento remoto, a medição pode não representar indicadores confiáveis. Outro aspecto é o desconhecimento das condições de operação dos veículos, se ele está operando em partida a frio, partida quente ou condições estabilizadas, acelerando ou desacelerando o veículo. Esta dificuldade pode ser minimizada aplicando os conceitos de cinemática no cálculo do carregamento físico do veículo, a partir de algumas informações como a inclinação do greide e da velocidade e aceleração dos veículos (FAIZ et al., 1996; WENZEL et al., 2000). A Figura 4 ilustra o

funcionamento do sensoriamento remoto na medição de poluentes emitidos por veículos automotores.

2.3.2 Medições a bordo

As medições a bordo realizadas nos veículos em operação nas vias permitem a coleta simultânea de velocidade, aceleração e emissões de veículos a cada segundo em condições reais de operação. As medições são realizadas da coleta dos gases do escapamento e analisadas por um dispositivo portátil nos veículos. Não é necessário modificar o veículo para a instalação do equipamento (ROUPHAIL et al., 2000).

As medições realizadas nos veículos em operação nas vias são conduzidas em um ambiente de condições não controladas, apresentando variabilidade em seus resultados. A grande vantagem das medições a bordo do veículo é a representação das emissões em condições realísticas, eliminando a possível falta de representatividade dos ciclos de direção utilizados nos ensaios com dinamômetros de chassi (FREY E UNAL, 2002). A Figura 5 ilustra dois exemplos de veículos equipados com dispositivos para medição a bordo das emissões veiculares.



Figura 5 – Veículos equipados com instrumentos de medição a bordo de emissão de poluentes

Fonte: Roupail et al. (2000) e De Vlieger (2000).

2.3.3 Medições em laboratório

A técnica mais utilizada para a medição das emissões de poluentes veiculares é o teste dos veículos em laboratório. Este tipo de teste fornece resultados com maior controle das condições do ambiente. Os testes em laboratório são padronizados por órgãos reguladores e podem ser dinâmicos, onde há carregamento no motor através de ciclos de condução em dinamômetros de chassi, ou estáticos, sem carregamento do motor (FAIZ et al., 1996; WENZEL et al., 2000).

2.3.3.1 Teste estático

No teste estático medem-se as concentrações de poluentes emitidos pelo cano de descarga de um veículo estacionado em ponto morto. O teste foi proposto, inicialmente pelo *Clean Air Act* e, no Brasil, foi adotado pelo CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), devido ao baixo custo e rapidez do método, para identificar veículos com padrões irregulares de emissão. Uma variante deste ensaio consiste em testar o veículo em ponto morto e aumentar a rotação do motor até 2500 rpm. O objetivo da alteração na rotação é simular as condições de operação do veículo em condições de carregamento. O teste estático é muito empregado em programas de inspeção e manutenção (BRASIL, 2004).

2.3.3.2 Teste dinâmico

O veículo é disposto em um dinamômetro de chassi, que simula as forças de inércia e atrito que o veículo enfrentaria em uma via comum. O veículo é conduzido por um homem ou uma máquina seguindo o mais próximo possível as velocidades especificadas por um ciclo de condução estabelecido.

As emissões podem ser medidas de duas formas durante o teste com dinamômetro de chassi: total gerado durante todo o teste ou de forma contínua, geralmente, segundo a segundo. A quantificação do combustível evaporado, proveniente de respiros e conexões do sistema de alimentação de combustível, é realizada em uma câmara hermeticamente fechada. A concentração de HC é medida em duas condições, simulação do aquecimento do veículo

pelo sol e aquecimento pela sua utilização (MENDES, 2004). A Figura 6 ilustra o funcionamento das medições de emissões em dinamômetros de chassi.

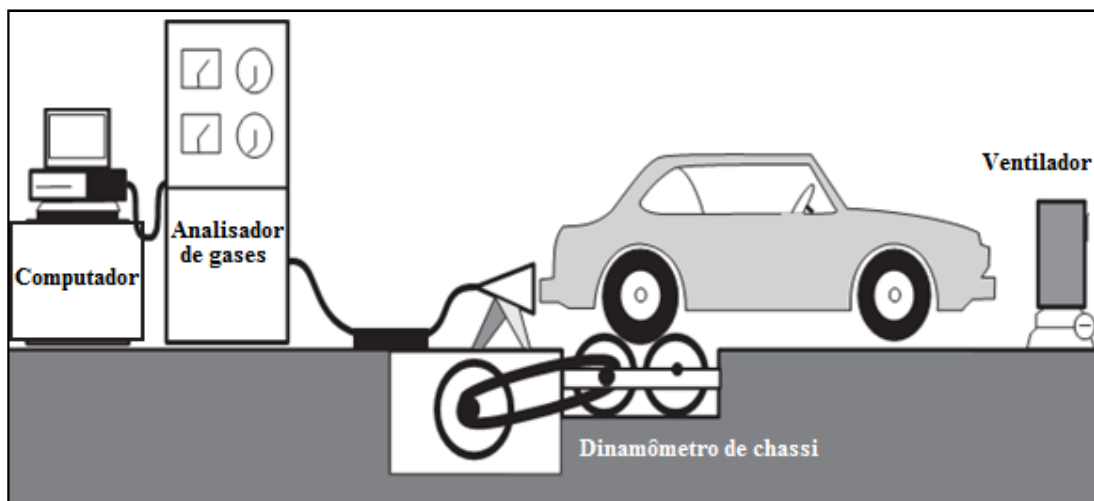


Figura 6 – Ensaio de dinamômetro de chassi para a medição de poluentes

Fonte: Faiz et al. (1996).

2.3.4 Ciclos de direção

O ciclo de direção, também chamado de ciclo de operação ou ciclo de condução, é um perfil de velocidade em função do tempo que busca simular as condições médias de tráfego real em uma determinada localidade. Existem diversos ciclos de condução padronizados pelos órgãos oficiais de transporte de todo o mundo. Estes ciclos possuem o propósito de medir e regulamentar as emissões de escapamento e monitorar o consumo de combustível (MONTAZERI-GH; NAGHIZADEH, 2003).

Os ciclos de direção são desenvolvidos de duas formas: (i) através de vários modos de condução, aceleração, desaceleração e velocidade constante, elaborados de forma artificial, ou (ii) derivados de medições do padrão de condução em condições realísticas. Através da instrumentação e monitoração de uma amostra representativa de veículos são observadas as características de uso dos veículos, como velocidades, acelerações e desacelerações, e de suas viagens, como extensão da viagem e tipo de via, em condições reais. Os ciclos de direção baseados em condições realísticas são mais dinâmicos, refletindo o padrão mais rápido de aceleração e desaceleração presente na condução dos veículos nas vias. Este maior dinamismo

dos ciclos de direção em condições realísticas resulta em maiores emissões, se comparado aos ciclos artificiais (BOULTER et al., 2006).

Os ciclos de direção podem ser divididos em legislativos ou regulatórios, e em não legislativos:

2.3.4.1 Ciclos de direção legislativos

Os ciclos legislativos têm a função de certificar os veículos novos e de verificar a conformidade dos veículos com os limites impostos nos programas de inspeção e manutenção. Os principais ciclos de direção foram desenvolvidos nos EUA, União Européia e Japão.

Ciclo FTP: O ciclo de direção FTP75, ou simplesmente FTP (*Federal Test Procedure*), foi desenvolvido a partir de dados de padrão de condução de tráfego real da cidade de Los Angeles, Estados Unidos, no início dos anos 1970 (FÄRNLUND; ENGSTRÖM, 2001). O teste possui duração total de 1874 segundos e uma distância percorrida de 17,77 km, com velocidade média de 34,1 km/h. As emissões de descarga geradas durante o ensaio são armazenadas em três recipientes distintos, um para cada porção do ciclo de condução, permitindo a comparação de diferentes modos de operação, como partida a quente e partida a frio. A primeira etapa do ciclo tem duração de 505 segundos e representa a partida a frio. A segunda parte tem duração de 864 segundos e representa as emissões em condições estabilizadas. A terceira parte do ciclo é idêntica a primeira parte e representa o efeito da partida a quente. O veículo fica parado por 10 minutos entre a segunda e terceira etapa. (DIESELNET, 2007). A Figura 7 ilustra o ciclo de direção FTP75.

A execução apenas das duas primeiras etapas do ciclo FTP75 também é conhecido como ciclo FTP72, *Urban Dynamometer Driving Schedule* (UDDS) ou ciclo LA-4. O ciclo FTP72 tem duração de 1389 segundos e percorre uma distância de 12,1 km, com velocidade média de 31,5 km/h. (DIESELNET, 2007; OTTOSSON, 2007). Ainda, foram desenvolvidos complementos para o ciclo de direção FTP, os SFTP (*Supplemental Federal Test Procedure*), para abordar falhas ou representar itens faltantes no ciclo. O complemento US06 foi desenvolvido para tratar das deficiências do ciclo FTP75 em representar a agressividade, alta velocidade e/ou comportamento de direção com aceleração elevada, rápidas flutuações de velocidade e o comportamento do condutor após a partida. O suplemento SC03 foi

introduzido para representar o carregamento e o efeito nas emissões de poluentes pelo uso de ar condicionado nos veículos certificados pelo ciclo de direção FTP75 (DIESELNET, 2007; BARTH et al., 2000).

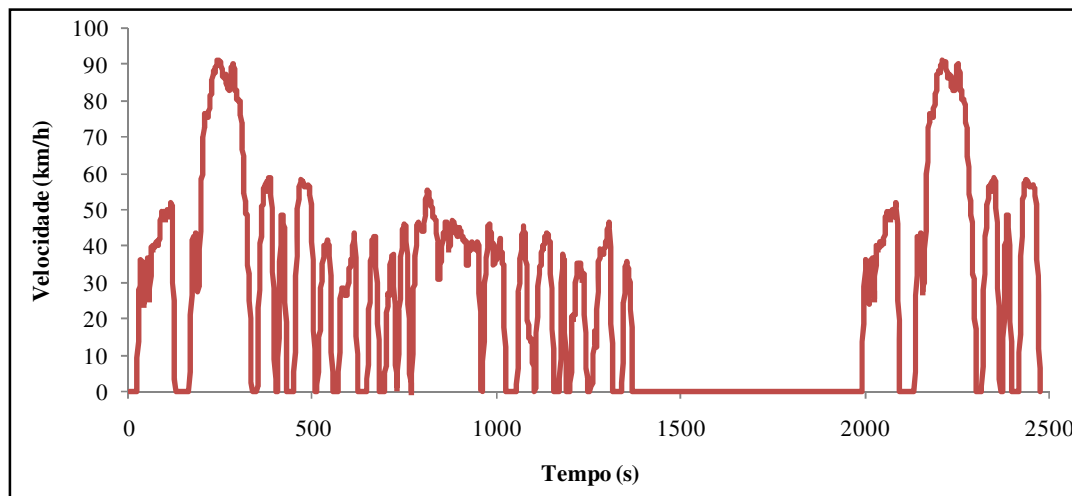


Figura 7 – Ciclo de direção FTP75

Ciclos ECE+EUDC e NEDC: O ciclo de direção ECE+EUDC, também conhecido como MVEG-A, é uma combinação de testes de dinamômetro de chassi utilizados para a certificação de veículos na União Européia. Este ciclo é composto por duas partes. Na primeira parte, o veículo permanece 20 segundos em ponto morto e em seguida é executado o ciclo chamado ECE (*Economic Commission for Europe Test Cycle*) ou UDC (*Urban Driving Cycle*), que simula o ambiente urbano típico europeu, como por exemplo, Paris e Roma. A segunda parte, chamada de EUDC (*Extra Urban Driving Cycle*), corresponde a um trajeto rural, que simula modos de condução mais agressivos e com maior velocidade. A parte urbana do teste é simulada através da repetição do “sub-ciclo” ECE-15 por quatro vezes consecutivas. As duas partes do ensaio são executadas sem interrupção (TZIRAKIS et al. 2006).

Os 20 segundos iniciais onde o veículo ficava em ponto morto foram excluídos do ciclo de direção no início do ano 2000. Assim, o ciclo passou a ser chamado de NEDC (*New European Driving Cycle*) (DIESELNET, 2007). Ainda, o ciclo de direção utilizado na União Européia é um ciclo artificial, não composto por dados registrados por seqüências de direção. Assim, a concordância deste ciclo com o padrão de condução em condições realistas pode ser

relativamente baixo (FÄRNLUND; ENGSTRÖM, 2001). A Figura 8 ilustra o ciclo de direção NEDC.

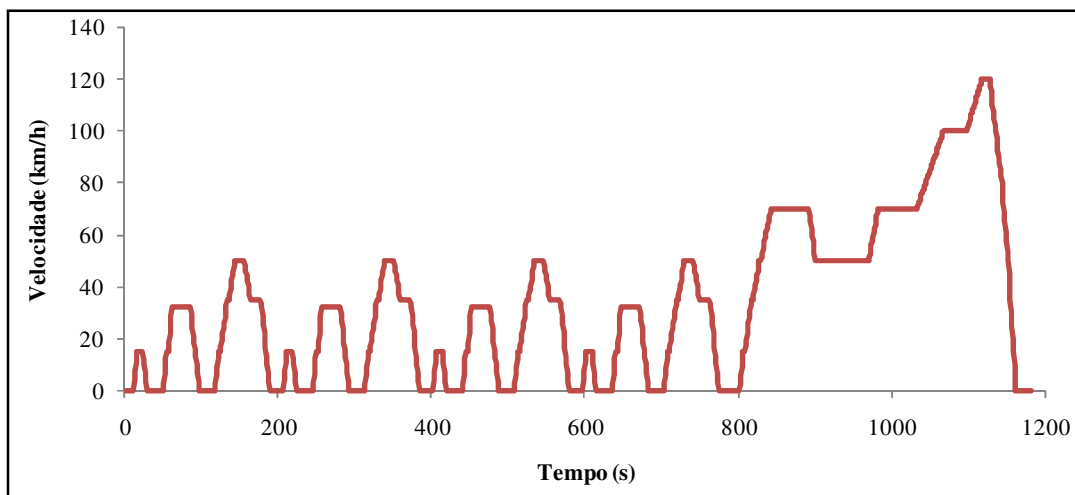


Figura 8 – Ciclo de direção NEDC

Ciclo 10-15 Mode: É o ciclo de direção utilizado na regulamentação dos veículos japoneses. Consiste de um período de aquecimento composto por 15 minutos a 60 km/h, um teste em ponto morto, 5 minutos a 60 km/h e um ciclo 15-mode. Após o período de aquecimento, o teste é realizado com a repetição de três vezes o ciclo 10-mode e uma vez o ciclo 15-mode. As emissões não são medidas durante o período de aquecimento (DIESELNET, 2007). A Figura 9 ilustra o ciclo de direção 10-15 Mode.

Os ciclos de direção FTP, NEDC e 10-15 Mode também são adotados para a regulamentação em outros países do mundo, como, por exemplo, Colômbia, Austrália e China. No Brasil, o ciclo de condução utilizado para o teste de medição de emissões é definido pela NBR 6601. O ciclo estabelecido pela norma é semelhante ao ciclo FTP. BARTH et al., (2000) e MOREY et al. (2000) afirmam que o FTP não representa adequadamente o padrão de direção verificado em condições reais. Ainda, sabe-se que o ciclo europeu ECE também possui deficiências para representar as condições de condução reais (MONTAZERI-GH & NAGHIZADEH, 2003).

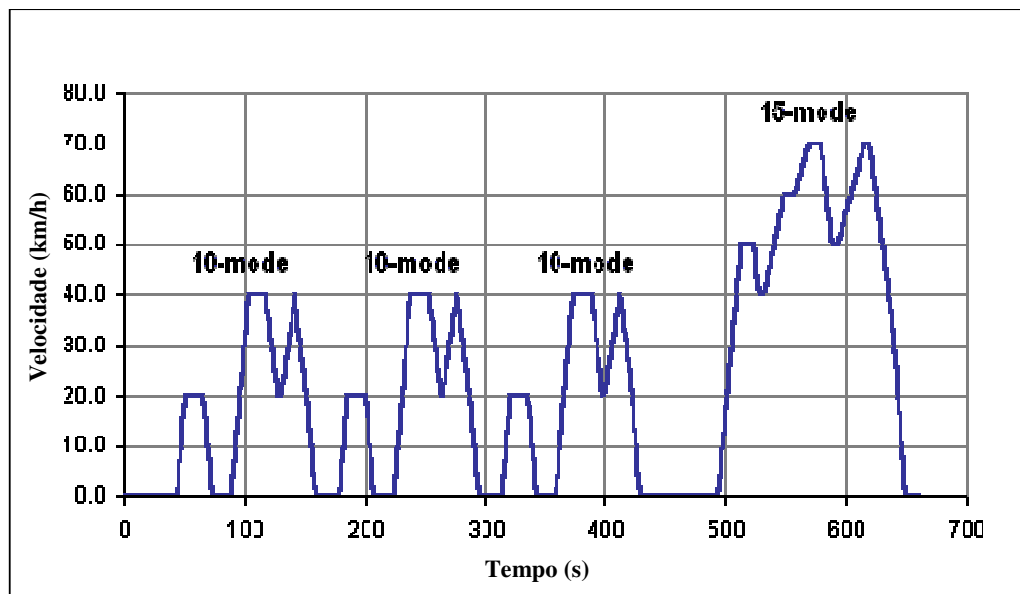


Figura 9 – Ciclo de direção 10-15 Mode

Fonte: DIESELNET (2007).

2.3.4.2 Ciclos de direção não legislativos

Como o padrão de condução varia entre as cidades, os ciclos disponíveis obtidos em algumas regiões normalmente não são aplicáveis para outras localidades. Conseqüentemente, vários pesquisadores trabalham na busca do desenvolvimento de ciclos de direção usando dados de testes de direção em condições realísticas (MONTAZERI-GH & NAGHIZADEH, 2003). Os ciclos não legislativos encontram uma grande aplicação em pesquisas sobre conservação de energia e medição de poluição veicular (TZIRAKIS et al. 2006). Alguns exemplos de ciclos não legislativos são descritos a seguir.

Ciclos Artemis: Os dados utilizados na criação dos ciclos de direção Artemis foram coletados durante o projeto DRIVE-MODEM e HYZEM. Durante o projeto DRIVE-MODEM, foram coletados dados de 60 veículos particulares na França, Reino Unido e Alemanha. Estes veículos portavam equipamentos de medição a bordo e eram conduzidos de maneira normal pelos seus proprietários. Durante o projeto HYZEM, foram coletados dados de 20 veículos na Grécia, utilizando a mesma metodologia. Nos dois projetos, foram percorridos mais de 160.000 km em 10.500 viagens monitoradas. Ainda, foram utilizados dados complementares de informações obtidas em Nápoles e na Suíça (ANDRÉ, 2004a;

2004b). Os ciclos Artemis foram divididos em três tipos: (i) urbano, (ii) rural e (iii) para vias expressas. A Tabela 2 apresenta as principais características dos ciclos desenvolvidos durante o projeto Artemis e a Figura 10 ilustra os ciclos de direção desenvolvidos durante o projeto Artemis.

Tabela 2 - Propriedades dos ciclos de direção desenvolvidos durante o projeto Artemis

Ciclo	Distância percorrida (m)	Tempo (s)	Velocidade média (km/h)
Artemis Urbano	4472	920	17,5
Artemis Rural	17272	1081	57,5
Artemis Via Expressa	29545	1067	99,7

Fonte: André (2004a).

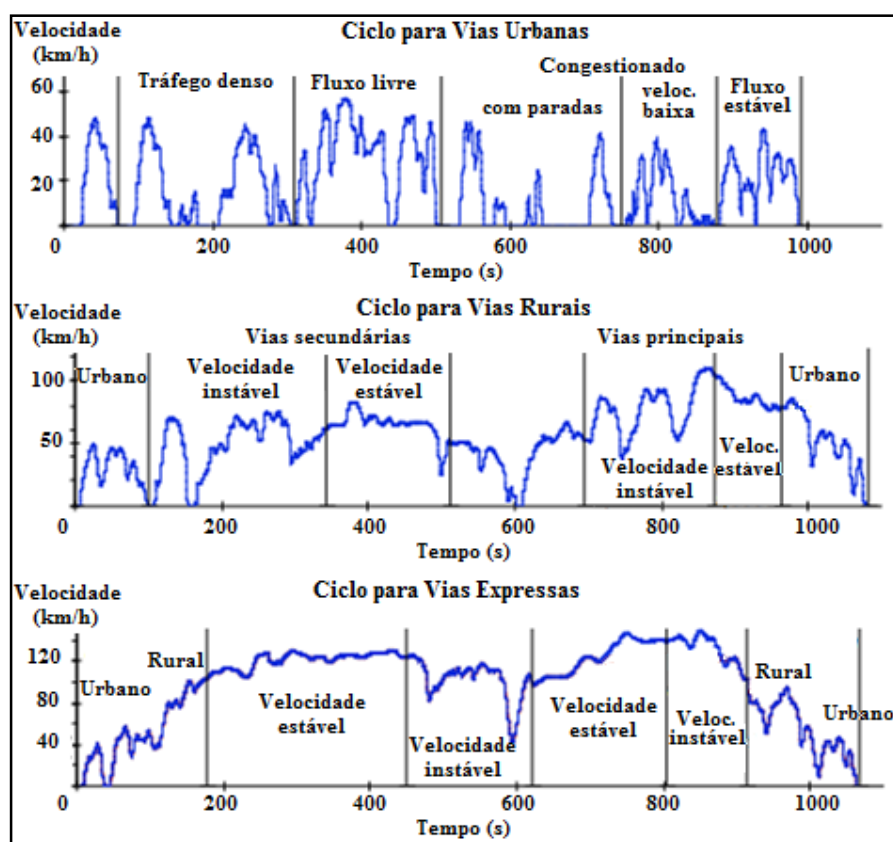


Figura 10 – Ciclos de direção Artemis

Fonte: André, 2004a.

Ciclos curtos de direção Inrets: os ciclos curtos são ciclos de direção com curta duração, também chamados de sub-ciclos, normalmente variando entre 100 e 300 segundos. O laboratório francês INRETS desenvolveu três tipos de ciclos curtos de direção: (i) *Inrets*

urban lent court (IULC), com duração de 208 segundos, (ii) *Inrets urban fluide court* (IUFC), que possui 189 segundos de duração e velocidade máxima de 44 km/h, e (iii) *Inrets route court* (IRC), possuindo 126 segundos de duração (JOURMARD et al., 1995). Estes ciclos curtos foram criados com base em 23.000 km percorridos e registrados em toda a França por 35 veículos particulares. Estes ciclos são bastante empregados em medições para a determinação do excesso de emissão por partida a frio. Nas medições de excesso de poluentes por partida a frio, estes ciclos curtos são repetidos 15 vezes seguidas no mesmo ensaio. (JOURMARD; SERIÉ, 1999; WEILENMANN et al., 2005). Entre a Figura 11 e a Figura 13 são ilustrados os ciclos curtos de direção desenvolvidos pelo Inrets.

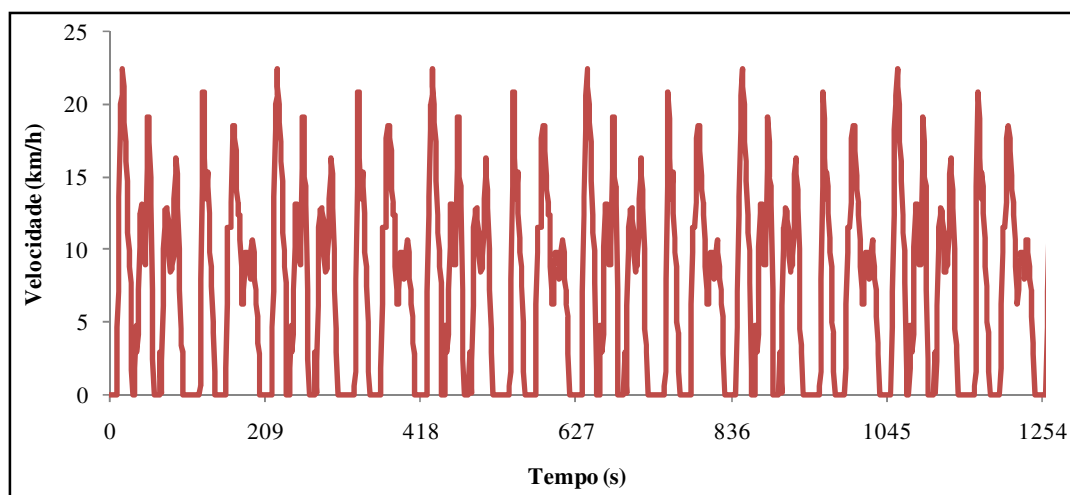


Figura 11 – Ciclo curto de direção IULC

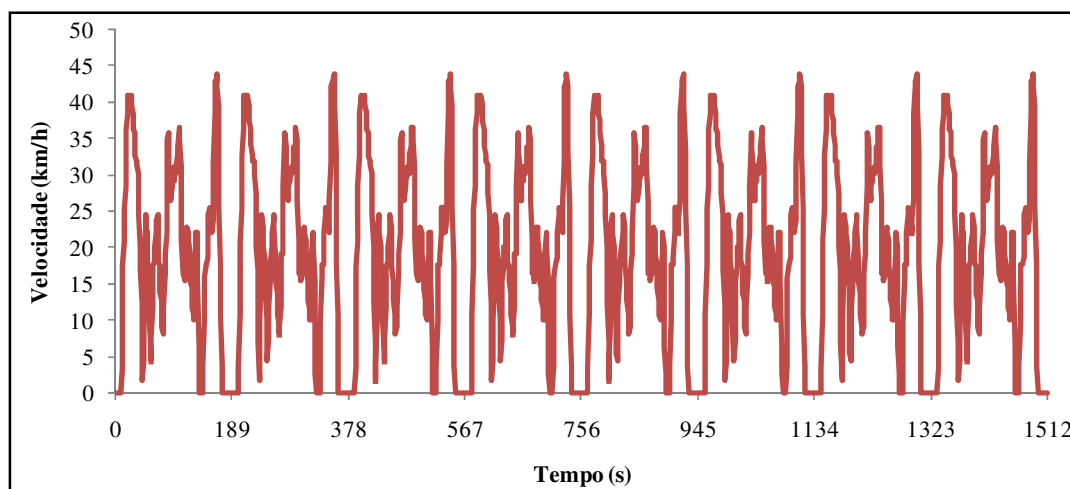


Figura 12– Ciclo curto de direção IUFC

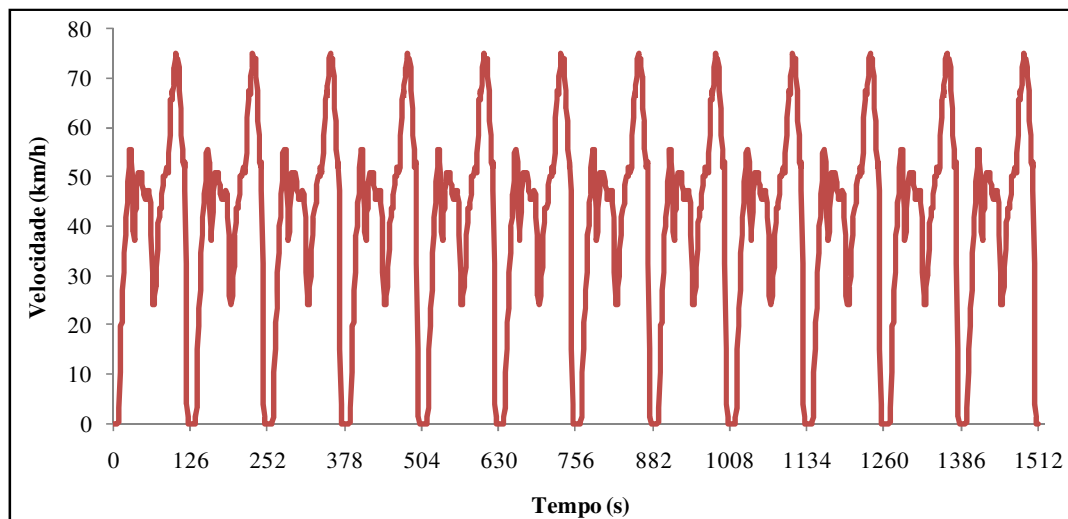


Figura 13– Ciclo curto de direção IRC

Ciclo de direção desenvolvido por Melchiors: Com o objetivo de verificar a representatividade do ciclo FTP na cidade de Porto Alegre, Melchiors (2007) percorreu cerca de 950 km, divididos em 43 trechos formados por vias de diferentes características em Porto Alegre. As informações de velocidade foram coletadas a cada segundo, por meio de um *datalogger*. O ciclo de direção desenvolvido por Melchiors tem duração de 1258 segundos, equivalente a aproximados 10 quilômetros percorridos e velocidade média de 28,6 km/h. Após desenvolver o ciclo, o autor realizou ensaios em dinamômetros de chassi para comparar as emissões veiculares entre o ciclo de condução de Porto Alegre e o ciclo FTP, adotado para a certificação dos veículos brasileiros. O autor observou que no ciclo que representa o modo de condução de Porto Alegre as emissões de HC, CO e NO_x são entre 25 e 30% maiores, e as emissões de CO₂ e consumo de combustível 5% maiores. A Figura 14 exibe o ciclo de direção desenvolvido em Porto Alegre por Melchiors (2007).

Embora não seja possível definir apenas um ciclo de direção que represente todas as condições de tráfego, a caracterização do comportamento médio de condução é um elemento importante na descrição do total de poluentes emitidos pela frota.

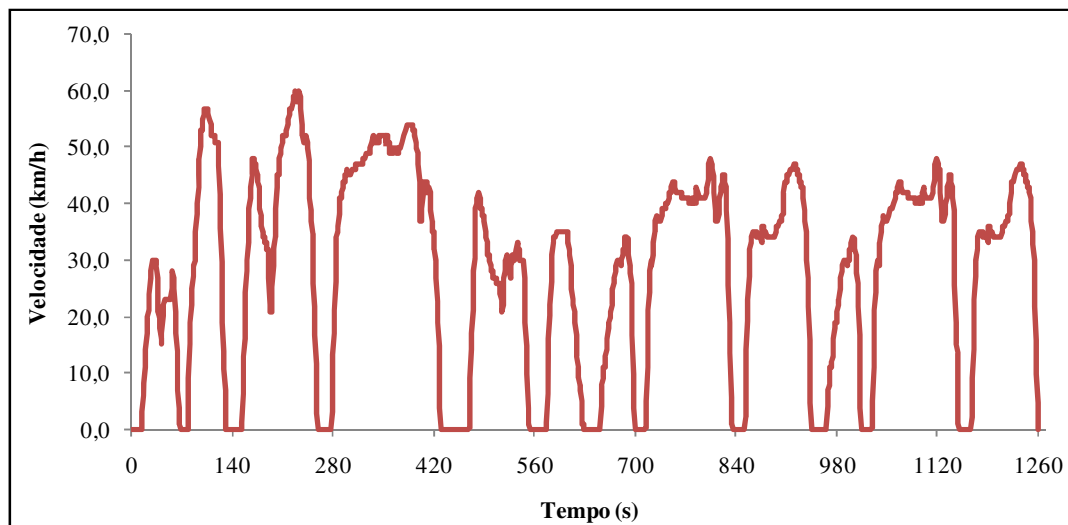


Figura 14 – Ciclo de direção desenvolvido por Melchiors

Fonte: Melchiors (2007).

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão descrita neste capítulo abordou as principais informações sobre as emissões veiculares, incluindo a descrição da formação, os poluentes que as compõe, os fatores intervenientes e os métodos de medição destas emissões. É importante destacar que os fatores intervenientes no processo de emissões veiculares são dependentes e interligados (ERICSSON, 2000; BRUNDELL-FREIJ E ERICSSON 2005). No próximo capítulo são descritos o comportamento das emissões em partida a frio e os métodos de estimativas das emissões veiculares.

3 EMISSÕES DEVIDO À PARTIDA A FRIO E ESTIMATIVA DE EMISSÕES

Este capítulo apresenta a revisão teórica referente à partida a frio e estimativa de emissões. Inicialmente será descrito como as emissões se comportam em relação ao modo de partida a frio, ressaltando como elas são representadas. Em seguida, são apresentadas as formas de estimar as emissões veiculares em diferentes níveis de detalhamento.

3.1 EMISSÕES EM PARTIDA A FRIO

A partida a frio refere-se ao período inicial de funcionamento do veículo, onde o motor e/ou os equipamentos de controle de emissão de poluentes, em especial o catalisador, ainda não atingiram a temperatura de trabalho. No período de partida a frio, a quantidade de poluentes emitidos é maior do que em partida a quente e em condições estabilizadas de operação do veículo.

A temperatura de funcionamento do motor determina o tempo de partida a frio e o excesso de poluentes emitidos pelos veículos sem catalisador. Já em veículos equipados com catalisadores, além da temperatura do motor, a temperatura do catalisador também influencia no adicional de poluentes emitidos e o tempo de partida a frio. A temperatura do motor e do catalisador é influenciada pela temperatura ambiente, modo de condução do veículo, distância viajada, características veiculares, como o tamanho do motor e a tecnologia empregada na produção do veículo, e o combustível utilizado (ANDRÉ; JOURMARD, 2005).

O veículo precisa ficar um determinado tempo desligado para a viagem ser considerada como de partida a frio. Esse tempo é chamado, na análise de partida a frio, de tempo de estacionamento. Jourmard e Sérié (1999) investigaram esse tempo necessário para classificar as viagens como partida a frio. Foram realizados ensaios em dinamômetros de chassi com oito veículos movidos a gasolina, cinco equipados com catalisador e três sem catalisador. Os ensaios foram realizados a uma temperatura de 20 °C e os veículos permaneciam 0,5, 1, 2, 4, 8, 10, 12 ou 16 horas desligados antes dos ensaios. Os autores verificaram que para considerar como partida a frio, os veículos devem permanecer desligados entre 5 e 12 horas antes da viagem. O tempo de estacionamento varia em função

do poluente analisado e do tipo de veículo. As viagens que iniciam antes deste tempo são consideradas partidas a quente.

A emissão de poluentes devido à partida a frio não varia linearmente com o tempo, mas de maneira semelhante a uma curva logarítmica. Assim, a emissão por partida a frio nos primeiros instantes é bem maior, se comparada com o período próximo às condições estabilizadas.

A partir de um gráfico de emissão contínua de poluentes de um determinado veículo ao longo da distância percorrida, é possível verificar o comportamento da emissão de poluentes. A emissão de poluentes vai diminuindo durante o início da viagem, conforme a temperatura do motor e do catalisador aumenta, até atingirem as condições estabilizadas de operação do veículo. A Figura 15 ilustra o comportamento da emissão de poluentes ao longo da distância percorrida.

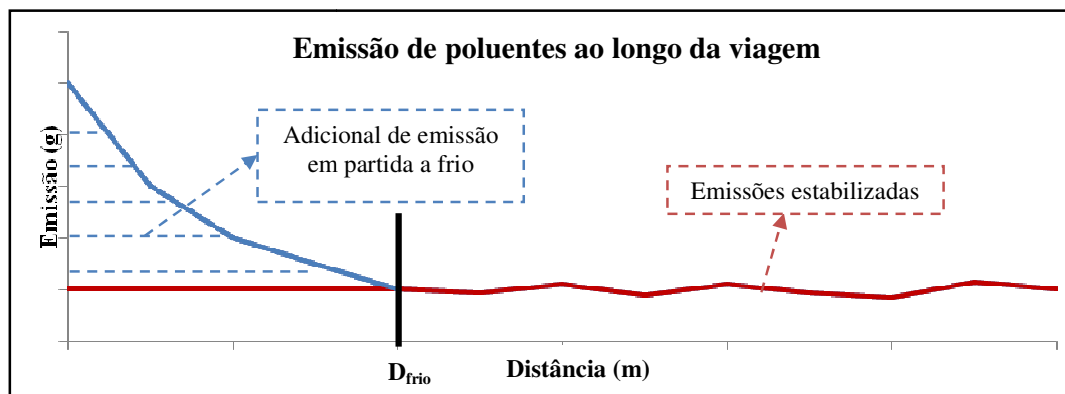


Figura 15 - Emissão veicular ao longo da viagem

Fonte: Adaptado de André e Joumard (2005).

A distância necessária para estabilizar as emissões é chamada de distância de partida a frio (D_{frio}). A análise das emissões veiculares também pode ser realizada em função do tempo, assim, o período em que o veículo trafega até atingir as condições estabilizadas é chamado de tempo de partida a frio (t_{frio}). É possível converter o tempo de partida a frio em distância de partida a frio através da velocidade média do veículo.

As emissões, normalmente, são representadas de forma agregada, sem diferenciação entre emissões em partida a frio ou emissões em condições estabilizadas. Geralmente, a estimativa das emissões por modelos estáticos utiliza um fator de emissão único ou fator de

emissão total (FE_{TOT}). Através desta representação, as emissões, inclusive as provenientes de partida a frio, são distribuídas igualmente durante toda a viagem. Fator de emissão é a quantidade média de um poluente que uma determinada categoria veicular emite em uma certa distância, freqüentemente expresso em gramas por quilômetro (g/km). Na Figura 16, o retângulo na cor cinza ilustra a representação da estimativa de emissões de poluentes através de um fator de emissão total. Os modelos de emissão estáticos e fatores de emissão serão descritos no item 3.2.

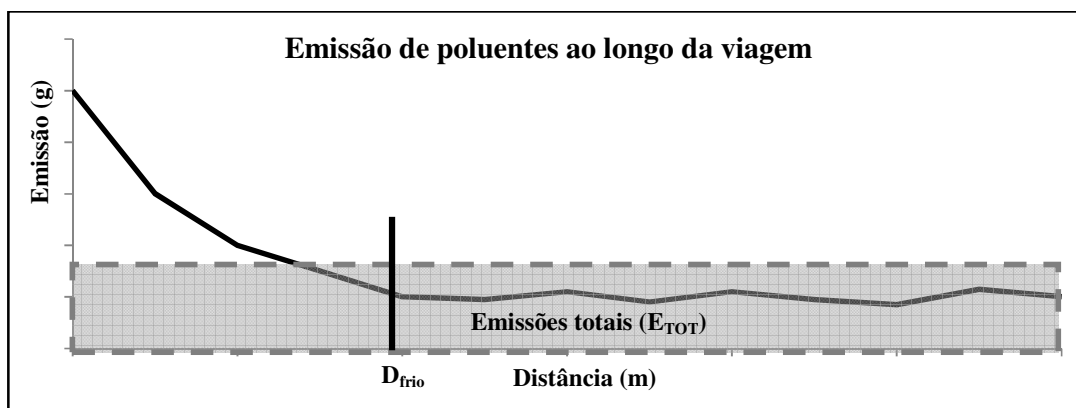


Figura 16 – Estimativa de emissões de poluentes através de fator de emissão total

A representação das emissões em partida a frio através de um fator de emissão total mascara a distribuição da emissão por partida a frio ao longo da viagem, pois esta última ocorre apenas nos instantes iniciais da viagem. Através desta representação, as emissões veiculares são subestimadas, durante a distância de partida a frio (D_{frio}), e superestimadas, no restante da viagem. Representar as emissões por partida a frio e as emissões estabilizadas de forma separada é uma maneira de aprimorar a distribuição das emissões ao longo das viagens. A Figura 17 ilustra a representação da estimativa de emissões totais com fatores de emissão desagregados, divididas em emissão estabilizada, representada pelos retângulos de cor laranja e vermelha, e adicional por partida a frio, representado pelo retângulo de cor azul.

Comparando as duas maneiras de representar as emissões ao longo da viagem, pode se observar que durante o período de partida a frio a emissão de poluentes é inferior na representação através de um FE_{TOT} , e no restante da viagem ocorre o inverso. Assim, a determinação da emissão veicular com fatores de emissão desagregados representa a distribuição dessas emissões ao longo da viagem de forma mais próxima das condições realísticas.

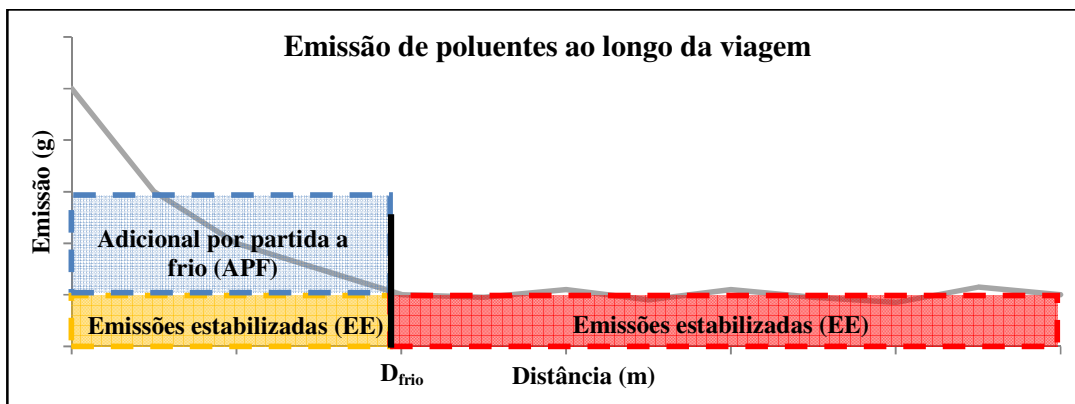


Figura 17 – Estimativa de emissões de poluentes de forma desagregada

As emissões em partida a frio são representadas de cinco maneiras: (i) adicional por partida a frio, (ii) emissão absoluta durante o período de partida a frio, (iii) fator de ajuste da emissão por partida a frio, (iv) fator de emissão durante o período de partida a frio, e (v) fator de emissão do adicional por partida a frio.

O adicional de emissão no período de partida a frio ou, simplesmente, adicional por partida a frio (APF) é a quantidade de poluentes emitidos em excesso durante a D_{frio} , quando comparado à mesma distância com o veículo operando em condições estabilizadas. O adicional por partida a frio é expresso em gramas (g) e representado pela cor azul na Figura 17.

A emissão absoluta durante o período de partida a frio, expresso em gramas (g), é a quantidade total de poluentes que o veículo emite durante a distância de partida a frio, e está representado na Figura 17 pelo retângulo de cor azul mais o retângulo de cor laranja.

O fator de ajuste da partida a frio (FPF), razão entre as emissões frias e quentes ou emissão fria relativa, é a razão do adicional por partida a frio sobre a emissão estabilizada no mesmo período. Este fator de ajuste representa quantas vezes mais o veículo emite durante a partida a frio, em comparação às emissões estabilizadas, em condições de operação semelhantes. Na Figura 17, é representado pela divisão entre a emissão do retângulo de cor azul pela emissão do retângulo de cor laranja.

O fator médio de emissão durante o período de partida a frio, representado em gramas por quilômetro (g/km), é a quantidade média de poluentes que o veículo emite no período de partida a frio pela distância viajada durante o período em partida a frio. Na Figura

17, é representado pela soma da emissão do retângulo azul mais o retângulo laranja, divididos pela distância que o veículo percorre até atingir as condições estabilizadas (D_{frio}).

O fator de emissão do adicional por partida a frio (FE_{APF}) representa o adicional por partida a frio dividido pela distância de partida a frio. Este fator é expresso em gramas por quilômetro (g/km). Na Figura 17, representa a razão entre a emissão do retângulo de cor azul sobre a distância de partida a frio.

Uma forma de estimar o adicional por partida a frio é realizada em função de fatores de emissão em condições estabilizadas (FE_{CE}) e um fator de ajuste para partida a frio (FPF). Um fator de ajuste três, por exemplo, significa que o veículo emite três vezes mais poluente em partida a frio do que em condições estabilizadas. O adicional de emissão por partida a frio é definido pela Equação (4) (HANSEN et al., 2007).

$$APF_{ij} = FE_{CE_{ij}} * N_{PFj} * D_{frio} * (FPF_{ij} - 1) \quad (4)$$

Onde:

APF_{ij} = Adicional de emissão por partida a frio do poluente i emitido pela classe veicular j (g).

$FE_{CE_{ij}}$ = Fator de emissão em condições estabilizadas da classe veicular j para o poluente i (g/km);

N_{PFj} = Número de partidas a frio de veículos classe j (viag);

D_{frio} = Distância percorrida pelo veículo com o motor frio (km/viag);

FPF_{ij} = Fator de Ajuste de Partida a Frio para o poluente i da classe veicular j.

Alguns pesquisadores desenvolveram trabalhos com o intuito de caracterizar o comportamento das emissões de poluentes durante o período de partida a frio. A seguir são descritos alguns destes trabalhos.

Kelly e Groblicki (1993) realizaram uma pesquisa com medição de poluentes em um veículo com injeção eletrônica e catalisador de três vias. A medição foi realizada com registro de dados a cada segundo, utilizando o ciclo de direção FTP. Foi observado pelos autores que

o tempo de partida a frio do motor variou entre 100 e 180 segundos e, o tempo de partida a quente foi de 50 segundos. Em relação ao teste com partida frio, os autores observaram que o período crítico correspondeu aos primeiros 100 segundos de operação do veículo, onde as emissões representaram 60% do total de HC e CO emitidos no período de 505 segundos.

Jensen (1995) realizou um estudo em Roskilde, Dinamarca, para identificar o padrão de viagem em cada seção de via. Um veículo, portando um equipamento de coleta de velocidade a cada segundo, percorria as vias seguindo os demais veículos. A emissão de poluentes foi estimada através de um modelo de emissões desenvolvido pelo *Laboratory of Energetics* da *Technical University of Denmark*. O autor afirmou que o período de partida a frio representou 9% do tempo que o veículo viajou, e gerou cerca de 60% do total de CO e HC emitidos, para veículos com catalisador. As emissões de poluentes em partida a frio, nos veículos sem catalisador, foram 3 a 4 vezes maiores que em condições estabilizadas, e entre 10 e 20 vezes maiores para veículos com catalisador.

De Vlieger (1997) realizou medições com seis veículos equipados com injeção eletrônica e catalisador de três vias e, um veículo equipado com carburador e sem catalisador. Para o veículo equipado com carburador e sem catalisador, o autor observou que o tempo de partida a frio variou entre 130 e 180 segundos. As emissões de HC e CO medidas neste estudo foram entre 4 e 6 vezes maiores que em condições estabilizadas. Para os testes com os veículos com catalisador e injeção eletrônica, o tempo de partida a frio variou entre 130 e 280 segundos. As emissões de HC e CO com partida a frio foram entre 4 e 40 vezes maiores que em condições estabilizadas.

Singer et al. (1999) realizaram um estudo para medir o adicional por partida a frio. Os testes foram realizados através do monitoramento do ar em uma garagem subterrânea nos períodos de chegada e saída dos veículos. Os veículos que estacionaram no turno da manhã foram considerados em condições estabilizadas de operação do motor. Ao final do dia, quando os veículos deixaram a garagem, considerou-se que os veículos estavam com motores frios. Além do monitoramento, foi realizado o teste FTP para o período de partida a frio para vinte veículos.

Singer et al. (1999) observaram no teste FTP que o tempo de estabilização da temperatura do motor e do catalisador variou entre 200 a 220 segundos e, o tempo medido de

aumento acentuado das emissões variou de 80 a 100 segundos. As emissões com partida a frio foram 3 vezes maiores para CO, 4 vezes maiores para HC e 2 vezes maiores para NO_x nos primeiros 200 segundos, em relação às emissões em condições estabilizadas de operação do motor. Dos poluentes emitidos nos 200 segundos iniciais, mais de 80% de HC e CO e 70% de NO_x foram emitidos nos primeiros 100 segundos. Estes resultados foram obtidos a uma temperatura variando entre 18°C e 24°C.

André e Joumard (2005) desenvolveram um modelo empírico de estimativa do adicional de emissão por partida a frio baseado nas informações disponíveis na Europa. O modelo foi desenvolvido empiricamente com base em informações de veículos de passageiros, como adicional de emissões por partida a frio, temperatura ambiente e estatística sobre o comportamento dos motoristas. O objetivo do modelo desenvolvido era determinar o adicional por partida a frio em função do tipo de veículo e de poluente.

Foram coletadas informações sobre as emissões de poluentes regulamentados, CO, HC e NO_x, o gás de efeito estufa CO₂, e os poluentes não regulamentados, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAH) e compostos orgânicos voláteis (VOC). A temperatura dos ensaios variou entre -20°C, em ensaios nos laboratórios EMPA (*Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research*) e VTT (*Technical Research Centre of Finland*), e 28°C, em ensaios no laboratório INRETS (*Institut National de Recherche sur les Transports et leur Securite*). A amostra de veículos testados foi escolhida pelos diferentes laboratórios, com o propósito de ser representativa à frota de cada país onde ocorreram os ensaios. Os veículos estudados foram classificados de acordo com o limite de emissão de poluentes para os veículos europeus (ANDRÉ; JOUMARD, 2005).

Cada veículo foi ensaiado com ciclos de direção padrão ou legislativo, ECE-15 ou FTP72-1, ciclos curtos desenvolvidos pelo laboratório INRETS, ciclo para vias urbanas (IUFC) ou ciclo para vias rurais (IRC), ou ciclo de direção que representam o padrão de condução realístico, Artemis Urbano. Os ciclos curtos de direção eram repetidos 15 vezes consecutivos. O modelo de estimativa do adicional de emissão de poluentes em partida a frio foi desenvolvido como parte do projeto Artemis (*Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems*) (ANDRÉ; JOUMARD, 2005).

Lents et al. (2004) coletaram informações referentes à frota e atividade veicular em cidades de países em desenvolvimento. Uma das cidades escolhidas para a coleta destas informações foi São Paulo. Nesse estudo, os veículos foram classificados de acordo com a tecnologia de injeção de combustível e a presença de catalisador. Os dados coletados em São Paulo foram utilizados para calibrar o modelo IVE e serviram como base para coleta de emissões veiculares. A Tabela 3 demonstra a classificação veicular em função da tecnologia empregada na fabricação e a representatividade de cada classe na frota de São Paulo.

Tabela 3 – Classificação veicular de São Paulo em função da tecnologia empregada na fabricação

Característica veicular	% da frota
Carburador sem catalisador	9,5
Carburador com catalisador	1,7
Injeção eletrônica monoponto sem catalisador	3,9
Injeção eletrônica monoponto com catalisador	6,7
Injeção eletrônica multiponto sem catalisador	0,5
Injeção eletrônica multiponto com catalisador	77,6

Fonte: Adaptado de Lents et al. (2004).

Em um estudo posterior, Lents et al. (2005) realizaram coleta de dados sobre a emissão de poluentes em medições a bordo de veículos e através de ensaios com dinamômetro de chassi, utilizando o ensaio FTP, em São Paulo. Foi observado que o período que o veículo trafega em partida a frio é de aproximadamente 200 segundos. Os veículos foram divididos pelo tipo de injeção de combustível, em veículos carburados ou com injeção eletrônica. O adicional por partida a frio é a diferença entre o total emitido nos primeiros 200 segundos de operação e as emissões estabilizadas no mesmo período. A Tabela 4 apresenta o adicional de poluentes em partida a frio nos primeiros 200 segundos de operação do veículo.

Tabela 4 - Adicional por partida a frio medido nos primeiros 200 segundos

Tecnologia utilizada	CO (g)	CO₂ (g)	HC (g)	NO_x (g)
Carburador	9	81	5,9	0,6
Injeção Eletrônica	21	57	4,1	0,7

Fonte: Adaptado de Lents et al. (2005).

A Tabela 5 apresenta um resumo dos estudos supracitados em relação ao tempo de partida a frio e aos fatores de ajuste para o monóxido de carbono (CO) e os hidrocarbonetos (HC), considerados principais poluentes emitidos na combustão de gasolina.

Tabela 5 - Características da influência da partida a frio nas emissões veiculares

Autor	Local do estudo	Temperatura ambiente (°C)	Tempo de partida a frio (segundos)	Fator de ajuste de partida a frio na emissão de CO	Fator de ajuste de partida a frio na emissão de HC
Kelly e Groblicki (1993)	Califórnia (USA)	22	100 a 180	-	-
Jensen (1995)	Roskilde (Dinamarca)	-	-	3 a 4 vezes (sem catalisador); 10 a 20 vezes (com catalisador)	3 a 4 vezes (sem catalisador); 10 a 20 vezes (com catalisador)
De Vlieger (1997)	Turnhout (Bélgica)	0 a 15	130 e 180 (sem catalisador); 130 e 280 (com catalisador)	4 a 6 vezes (sem catalisador); 4 a 40 vezes (com catalisador)	4 a 6 vezes (sem catalisador); 4 a 40 vezes (com catalisador)
Singer et al. (1999)	Califórnia (USA)	18 a 24	80 a 100 (picos de emissão); 200 – 220 (estabilização da temperatura)	3 vezes	4 vezes
ARTEMIS – André e Joumard (2005)	Países da Europa	-20 a 28	Calculado em função da temperatura e velocidade	Estudo determina método para cálculo do adicional	Estudo determina método para cálculo do adicional
Lents et al. (2005)	São Paulo (Brasil)	-	200	1,1 vezes (carburador); 3 vezes (injeção eletrônica)	1,3 vezes (carburador); 3 a 5 vezes (injeção eletrônica)

3.2 ESTIMATIVAS DE EMISSÕES VEICULARES

Modelos de emissão veicular são utilizados para estimar a emissão de poluentes do tráfego, em função da dificuldade de se medir estas emissões. Estes modelos podem ser classificados em dois tipos: estáticos e dinâmicos (CAPIELLO, 2002). A calibração dos modelos é realizada através de testes em dinamômetros de chassis, realizados em laboratório, ou por medições a bordo, realizados em condições reais.

A necessidade de modelos mais sensíveis ao modo de operação dos veículos resultou em uma série de pesquisas visando o desenvolvimento de modelos de emissão mais desagregados, ou chamados modelos modais. Estes modelos mais desagregados podem modelar de forma explícita as emissões resultantes de uma vasta gama de modos de operação. Entretanto, os modelos desagregados necessitam de uma variedade e quantidade de dados superior aos modelos agregados. A Figura 18 ilustra o detalhamento dos dados de entrada dos modelos de emissão, desde dados agregados até mais desagregados.

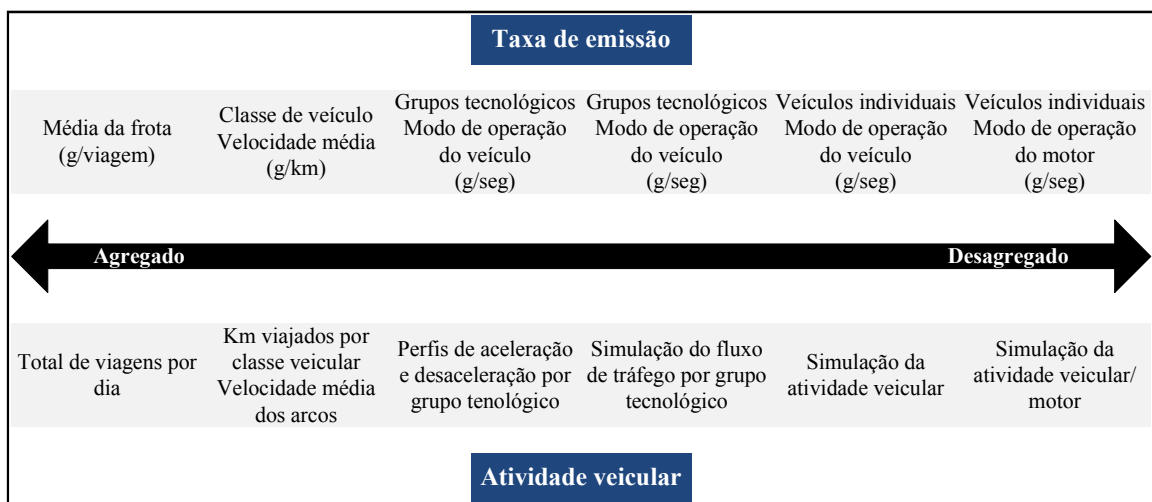


Figura 18 – Classificação dos modelos de emissão

Fonte: Adaptado de Bachman (1997).

3.2.1 Modelos de emissão estáticos

Modelos baseados na velocidade média, também chamados de modelos estáticos ou modelos de inventário, são mais comumente utilizados na estimativa de emissões do tráfego rodoviário (STURM et al., 1998). Este tipo de modelo considera valores médios das variáveis de tráfego e distribui as emissões uniformemente por toda a rede. Basicamente, a distância percorrida pelos veículos em um determinado período em uma determinada área e fatores específicos de emissão para cada tipo de veículo ou tecnologia do motor são utilizados na estimativa da emissão de poluentes. É comum que esses modelos formem a base para o cálculo da qualidade do ar em escala local e assumem a forma da Equação (5).

$$E_i = \sum_c \sum_l KVV_l * f_c * FE(\bar{v}_l, c) \quad (5)$$

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);

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

f_c = proporção de veículos da categoria c ;

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

Fator de emissão (FE) é uma estimativa média das emissões de certo poluente para uma classe veicular em uma determinada condição de operação. Os fatores de emissão são medidos em condições reais, através de veículos instrumentados, e em condições controladas, em laboratórios. Ainda, uma forma de se obter o FE é através do total de poluentes emitidos em uma determinada área sobre a atividade veicular, como número de viagens, partidas ou distância percorrida, realizada na área. A obtenção do FE é apresentada na Equação (6) (HANSEN et al. 2007).

$$FE_i = \frac{E_i}{N_T * DMVV} \quad (6)$$

Onde:

FE_i = Fator de emissão do poluente i em gramas por quilômetro (g/km);

E_i = Emissão do poluente i em uma determinada área (g);

N_T = Número total de partidas (part) ou viagens (viag) em uma determinada área;

$DMVV$ = Distância média percorrida por viagem ou partida (km/viag).

Os fatores de emissão podem representar as emissões totais, as emissões por partida a frio ou apenas as emissões estabilizadas. O fator de emissão total (FE_{TOT}) representa um valor médio de poluentes emitidos por uma determinada distância ou determinado tempo. Um FE_{TOT} de 5 g/km, por exemplo, indica que o veículo emite 5 gramas de poluente a cada quilômetro percorrido, independente do modo de operação do veículo.

O fator de emissão em condições estabilizadas (FE_{CE}) equivale a um valor médio de emissão por uma determinada distância ou tempo quando o veículo opera em condições estabilizadas. Por exemplo, um FE_{CE} de 4 g/km indica que o veículo emite 4 gramas a cada quilômetro percorrido, quando operando em condições estabilizadas. O veículo operando em partida a frio, emite as 4 gramas a cada quilômetro, referentes ao FE_{CE} , mais o adicional de emissão em partida a frio.

O fator de emissão do adicional em partida a frio, FE_{APF} , representa o adicional emitido pelo veículo durante a partida a frio (g/km). Um FE_{APF} com valor de 3 g/km, por exemplo, indica que o veículo emite 3 gramas por quilômetro trafegando em partida a frio, mais a emissão em condições estabilizadas.

Os fatores de emissão são criados para representar condições semelhantes as que foram realizadas no ensaio da determinação do FE. Assim, não é o principal objetivo dos fatores de emissão estimar as emissões quando o comportamento de condução for bastante diferente do que o comportamento do qual foi derivado o fator de emissão (STURM et al., 1998).

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 das quantidades de poluentes emitidos pode ser subestimada (LIN; NIEMEIER, 2003).

Estes modelos, normalmente, não consideram fatores como os eventos de aceleração e de desaceleração ou as partidas a frio do motor, que exercem grande influência na emissão de poluentes, especialmente em áreas urbanas. A identificação dos locais onde ocorrem as viagens com partida a frio permite que o adicional de poluentes emitidos nesta situação seja

contabilizado separadamente, melhorando a qualidade da estimativa total de poluentes (HANSEN et al. 2007).

Os modelos estáticos mais utilizados compreendem: o modelo MOBILE6 (EPA, 2007), o modelo EMFAC (*EMission FACTor*) (CARB, 2007) e o modelo COPERT 4 (*COmputer Programme to calculate Emissions from Road Transport Model*) (EEA, 2007).

Modelo MOBILE: O modelo MOBILE6.2 (EPA, 2007) é o último da série de modelos MOBILE. A primeira versão data de 1978. Esse modelo calcula as emissões médias da frota para HC, CO e NO_x e emissões evaporativas. A estimativa das emissões pode ser realizada para veículos particulares, caminhões, ônibus e motocicletas, movidos a gasolina, óleo diesel ou gás natural veicular. O período de estimativa do modelo compreende os anos entre 1952 e 2050. O MOBILE6.2 considera ciclos de direção associados ao tipo de via, expressa, arterial, coletora ou local, com diferentes níveis de congestionamento. Este modelo vem sendo aplicado em diversos países e adaptado de acordo com as características locais.

Modelo EMFAC: O modelo EMFAC foi desenvolvido pelo *California Air Resource Board* para estimar taxas de emissões para HC, CO, NO_x, PM, SO₂, Pb, e CO₂, bem como o consumo de combustível. O EMFAC fornece fatores de emissão separadamente para partidas a frio, partidas a quente e em condições estabilizadas (CARB, 2007).

Modelo COPERT: O modelo COPERT 4 (BEL et al., 2005; EEA, 2007) calcula as emissões produzidas por um ou mais veículos em um ano. Para isso, a metodologia COPERT calcula os fatores de emissões que descrevem a quantidade de poluentes produzida por um veículo por km. Basicamente, considera dois fatores de emissões: (i) fatores de emissões quentes e (ii) 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.

Para alcançar resultados mais satisfatórios, o COPERT calcula e utiliza dois fatores de correção: um fator de degradação de quilometragem e um fator real de combustível. A degradação da quilometragem considera a idade dos veículos, assumindo que veículos antigos emitem mais poluentes que veículos novos. O fator de combustível considera os efeitos de

combustíveis melhorados utilizados por veículos antigos, adotando que esses veículos produzem menos poluição que veículos antigos com combustíveis comuns.

3.2.2 Modelos de emissão dinâmicos

Na abordagem dinâmica, as emissões são medidas continuamente em testes de dinamômetros de chassis e armazenadas em intervalos de tempo, geralmente, a cada segundo (CAPIELLO, 2002). As condições operacionais dos veículos em um determinado tempo, associadas a um valor de velocidade, são registradas simultaneamente com a quantidade de poluentes emitida. Assim, é possível gerar funções de emissão para cada condição de operação do veículo (STURM et al., 1998). Outras variáveis também podem ser consideradas, como a rotação do motor, a posição do acelerador, o uso do ar condicionado, ou ainda, a transição de marchas no câmbio.

Medidas instantâneas 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 dinâmicos assumem a forma da Equação (7).

$$E_i(t) = \sum_j e_i(c_j, x_j(t)) \quad (7)$$

Em que:

$E_i(t)$ = 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).

j = identificação do veículo;

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

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.

A seguir são apresentados os principais modelos de emissões dinâmicos citados na literatura.

O modelo IVE: O modelo IVE – *International Vehicle Emissions* (DAVIS et al., 2005), foi desenvolvido pelo *International Sustainable Systems Research Center* (ISSRC) e a *University of California em Riverside* (UCR) com financiamento da U.S. EPA. O modelo estima as emissões veiculares para veículos de passeio, motocicletas, caminhões e ônibus. O modelo IVE estima as emissões por área a partir: (i) da tecnologia dos veículos e distribuição de veículos na frota, considerando dados de manutenção, (ii) do comportamento dos motoristas em diferentes tipos de vias, e (iii) dos fatores médios de emissão para cada tipo de veículo.

O modelo foi desenvolvido com base em informações de estudos realizados nos Estados Unidos. Com o objetivo de criar uma ferramenta adaptável para qualquer nação, este modelo foi adequado para a realidade de países em desenvolvimento através de fatores de correção de fatores de emissão. Ainda, mais de 700 tecnologias de veículos foram incorporadas no modelo (LENTS et al., 2004).

O IVE foi aplicado no Brasil, em São Paulo, com o objetivo de representar a distribuição dos tipos de veículos, tamanhos e idades da frota operante em São Paulo, em vias distintas. A distribuição tecnológica dos veículos foi realizada através da combinação de duas abordagens de coleta de dados: observação de vídeo e entrevistas em áreas de estacionamento (LENTS et al., 2004). Os resultados indicaram que a quantidade de veículos de passeio que circulam em São Paulo (75,6%) é similar às frações observadas na Cidade do México (74%) e Santiago, no Chile (79%), cidades onde também foram coletadas informações referentes a frota veicular.

Lents et al. (2005) realizaram medições de emissão veicular em dinamômetro de chassi, utilizando o ciclo FTP, e a bordo de 324 veículos em três cidades, incluindo São Paulo. O modelo foi calibrado através dos dados obtidos na medição das emissões de poluentes. Foi observado que, antes da calibração, as emissões de partida a frio, normalmente, eram superestimadas pelo modelo em São Paulo, variando de 2 até 40 vezes o valor medido, enquanto as emissões em condições estabilizadas estavam sendo subestimadas.

O modelo MODEM: O MODEM (TRL, 1999) é um software especializado que permite calcular as emissões de poluentes atmosféricos gerados pela atividade veicular em áreas urbanas. Este cálculo é realizado com alto grau de interação entre modelos de transporte terrestre e sistemas de informações geográficas (SIG).

A metodologia de cálculo do MODEM considera as emissões provenientes de três fontes: as derivadas de motores em condições estabilizadas, em partidas a frio e as denominadas evaporativas. As emissões totais são representadas pela soma dos três tipos de emissões.

Modelo ARTEMIS: O projeto Artemis (*Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems*) abrange laboratórios que estudam as emissões de poluentes veiculares de vários países europeus, como Inglaterra, Alemanha, Áustria, Dinamarca, França, Suécia, Suíça, Finlândia, Itália, Hungria, Grécia, Polónia, Bélgica e Holanda, e um país asiático Israel. O projeto Artemis foi criado para desenvolver um modelo de emissão harmônico para o transporte rodoviário, ferroviário, aeroviário e hidroviário (ARTEMIS, 2007).

O modelo ARTEMIS possui uma base de dados de fatores de emissão e, além disso, 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:

- a) uma base de dados de fatores de emissão: esses fatores de emissão estão baseados em medidas de emissões realizadas no Projeto ARTEMIS e de bases de dados de países europeus;
- b) 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;
- c) 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;

- d) 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 links. Para esse cálculo, o modelo novamente busca a descrição do tráfego especificada pelo usuário e os fatores de emissão incorporados no modelo de frota.

Modelo VT-Micro: O modelo de emissões VT-Micro (AHN, 1998; AHN et al., 2002) desenvolvido na Virginia Tech, Estados Unidos, é integrado ao modelo de tráfego INTEGRATION. O VT-Micro é um modelo estatístico instantâneo que estima CO, HC e NO_x. O modelo é constituído por regressões lineares, desenvolvidas a partir de uma base de dados derivada de testes realizados em oito veículos no *Oak Ridge 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, versão 2.0 (RAKHA et al., 2005), expandiu os testes de dinamômetros de chassi para 60 veículos, que foram classificados em cinco categorias de veículos leves e duas categorias de caminhões leves. O VT-Micro 2.0 foi validado por comparação com medidas obtidas em laboratório, com uma previsão de erro de 17%.

Modelo CMEM: O CMEM (*Comprehensive Modal Emissions Model*) é um modelo de emissão modal físico, baseado na demanda por potência, desenvolvido na Universidade da Califórnia em Riverside e na Universidade de Michigan (BARTH et al., 2000) patrocinado pelo *National Cooperative Research Project*. O modelo estima as emissões de CO, HC, NO_x e CO₂ a cada segundo, além do consumo de combustíveis em função do modo de operação de automóveis e veículos comerciais leves. O modelo foi calibrado usando uma base de dados de testes em 300 veículos.

O modelo CMEM é composto por 6 módulos e é capaz de estimar a emissão de poluentes de 26 categorias de veículos, entre automóveis e veículos comerciais leves. A base de dados inclui medidas em dinamômetro de chassi segundo a segundo da velocidade, as

emissões do motor e as emissões de descarga em três diferentes ciclos de condução. Os veículos usados para compor a base de dados do CMEM são representativos da frota encontrada no condado de Riverside, Califórnia em 1997. A categoria, a aceleração e a variação da velocidade segundo a segundo do veículo, a inclinação do greide e a presença de equipamentos no veículo, como o ar-condicionado, podem ser especificados pelo usuário.

3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi descrito o comportamento das emissões por partida a frio e os modelos de emissões veiculares. Observa-se que a influência da partida a frio tem grande representatividade nessas emissões, especialmente em áreas urbanas. Conforme visto, as emissões veiculares sofrem influência de diversos fatores como, o tipo de motor, a presença de dispositivos de controle de emissões, a temperatura ambiente, entre outros.

A estimativa de emissões veiculares pode ser realizada através de modelos de emissões. De forma geral, esses modelos podem ser classificados em estáticos e dinâmicos. Modelos dinâmicos normalmente possibilitam uma análise mais detalhada das emissões veiculares distribuídas em toda a rede viária. Entretanto, esses modelos necessitam de um volume de informações elevado, muitas vezes indisponíveis, e sua aplicação para grandes áreas é limitada.

Já os modelos de emissões estáticos utilizam variáveis agregadas e são apropriados para análises em maior escala. Porém, esses modelos normalmente desconsideram o efeito da partida a frio. No entanto, quando esse aspecto é considerado, o efeito da partida a frio é distribuído ao longo de toda a viagem, distorcendo a distribuição espacial das emissões totais. Nesse contexto, o capítulo seguinte apresenta um método para a estimativa e distribuição espacial da porção das emissões veiculares referentes ao período de partida a frio.

4 MÉTODO PARA A DETERMINAÇÃO DO ADICIONAL DE EMISSÕES EM PARTIDA A FRIO

Este capítulo apresenta o método proposto para a determinação e distribuição espacial do adicional de emissões por partida a frio (APF) em relação às emissões em condições estabilizadas. Este APF é determinado de maneira estática, utilizando variáveis agregadas de tráfego e fatores de emissão. Os fatores de emissão são desagregados em fatores que representam o adicional em partida a frio e em fatores de emissão em condições estabilizadas.

4.1 DETERMINAÇÃO DO ADICIONAL DE EMISSÃO EM PARTIDA A FRIO

Como apresentado nos capítulos anteriores, a quantidade de emissões veiculares provenientes dos escapamentos dos veículos depende do modo de operação destes. A literatura reporta que no modo de operação em partida a frio, os veículos emitem quantidades consideravelmente maiores que em condições estabilizadas. Assim, o total de emissões de um poluente equivale à quantidade de poluentes emitidos em condições estabilizadas mais o adicional emitido durante o período de partida a frio, como mostra a Equação (8).

$$E_{TOTi} = EE_i + APF_i \quad (8)$$

Onde:

E_{TOTi} = Emissões totais do poluente i (g);

EE_i = Emissões em condições estabilizadas do poluente i (g);

APF_i = Adicional por partida a frio do poluente i (g).

O método de determinação do adicional de emissões por partida a frio está composto de sete etapas. A Figura 19 ilustra as etapas necessárias para a determinação do adicional por partida a frio. A descrição das etapas do método é realizada a seguir.

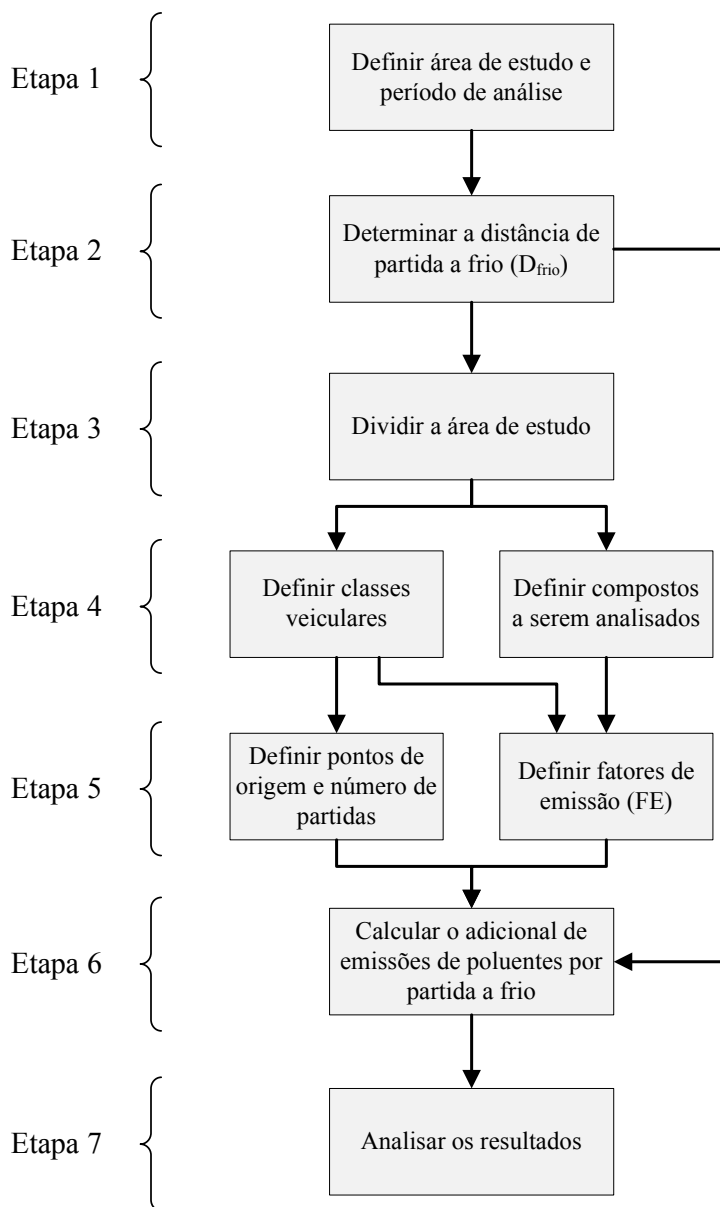


Figura 19 – Fluxograma do método para a determinação do adicional por partida a frio

4.1.1 Descrição das etapas

4.1.1.1 Etapa 1 – Delimitar a área de estudo e o período de análise

A principal região afetada pelo adicional de emissões por partida a frio é a área urbana. A escolha da área de estudo dentro da região urbana envolve a análise da concentração das viagens iniciadas com partida a frio (HANSEN et al., 2007), pois regiões

que possuem maior número de viagens iniciadas com veículos em partida a frio possuem maior potencial de emissão de poluentes. Assim como a área de estudo, o período de análise é definido pelo horário em que ocorre maior número de viagens em partida a frio.

4.1.1.2 Etapa 2 – Determinar a distância de partida a frio

A distância de partida a frio (D_{frio}) é determinada em medições de emissões a bordo de veículos em tráfego real ou em dinamômetros de chassis. Essa distância é medida quando as emissões de escapamento se estabilizam, variando apenas em eventos de aceleração. É importante ressaltar que a distância em partida a frio pode também ser obtida em função do tempo de partida a frio e da velocidade média na área de estudo, quando o dado disponível é referente apenas ao tempo de partida a frio.

4.1.1.3 Etapa 3 – Dividir a área de estudo em células de análise

O método proposto sugere a divisão da área de estudo em células de análise para a distribuição espacial do adicional por partida a frio e identificação de regiões com maiores adicionais de emissão nesse tipo de partida. As células de análise são de formato quadrado e o tamanho é determinado em função da distância média que o veículo percorre até atingir as condições estabilizadas. Assim, a célula compreende toda a área de influência da emissão por partida a frio para cada viagem iniciada na célula.

4.1.1.4 Etapa 4 – Determinar as classes de veículos e os compostos a serem analisados

Cada veículo possui um fator de emissão que pode variar em função da tecnologia empregada na produção do motor, equipamentos de controle de emissão de poluentes, potência do motor, tipo de combustível, frequência e tipo de manutenção realizada, idade e quilometragem acumulada do veículo. Por isso, é conveniente classificar os veículos de acordo com suas características, agrupando-os em classes que correspondam aos fatores de emissão similares. A análise do adicional de emissões por partida a frio é realizada para as diferentes classes de veículos.

A análise pode compreender distintos poluentes em função do objetivo de cada estudo e pela disponibilidade de dados. Os compostos emitidos por veículos dependem do tipo de motor e combustível utilizado. São comumente quantificados os poluentes que possuem regulamentação, como o monóxido de carbono (CO), os hidrocarbonetos (HC) e os óxidos de nitrogênio (NO_x), o gás de efeito estufa CO_2 e o material particulado (MP). O tipo de veículo analisado pode interferir na escolha dos poluentes a serem analisados. Para veículos com motores ciclo Otto, os principais poluentes emitidos são CO e HC, enquanto que nos veículos ciclo Diesel, NO_x e MP correspondem às principais emissões.

4.1.1.5 Etapa 5 – Determinar pontos de origem, número de partidas a frio e fatores de emissão

A emissão por partida a frio ocorre no início da viagem. Assim, a determinação dos pontos de origem e do número de partidas a frio envolve a utilização de dados georreferenciados sobre os locais onde são iniciadas as viagens por veículos motorizados. A partir desses dados é possível alocar os pontos de origem em cada célula de análise e então contar quantas partidas a frio ocorre em cada célula.

Os fatores de emissão representam a quantidade média de poluentes que uma categoria de veículo emite em uma determinada distância percorrida. Os fatores de emissão são obtidos em medições de poluentes em dinamômetros de chassi ou em medições a bordo do veículo. O adicional por partida a frio é determinado a partir do fator de emissão do adicional por partida a frio (FE_{APF}).

O fator de emissão em partida a frio FE_{APF} pode ser obtido de três maneiras: (i) diretamente dos ensaios em dinamômetros de chassi ou de medição a bordo, (ii) dividindo o adicional de poluentes em partida a frio pela distância percorrida em partida a frio, ou (iii) convertendo o fator de emissão total em fator de emissão em partida a frio, em função da distância percorrida pelo veículo e pelo fator de ajuste de partida a frio (FPF).

4.1.1.6 Etapa 6 – Calcular o adicional de emissões por partida a frio

O adicional de emissões por partida a frio é determinado através do fator de emissão do adicional por partida a frio (FE_{APF}), número de partidas a frio e a distância de partida a frio. A estimativa do adicional de poluentes em partida a frio é obtida através da Equação (9).

$$APF_{ij} = FE_{APFij} * N_{PFj} * D_{PF} \quad (9)$$

Onde:

APF_{ij} = Adicional por partida a frio do poluente i emitido pela classe veicular j (g).

FE_{APFij} = Fator de emissão do adicional por partida a frio da classe veicular j para o poluente i (g/km);

N_{PFj} = Número de partidas a frio da classe j (viag);

D_{frio} = Distância de partida a frio (km/viag).

O adicional de emissões por partida a frio é determinado individualmente para cada viagem, de acordo com o fator de emissão correspondente à classe veicular, e agrupado nas células de análise. Em seguida, a distribuição espacial do adicional por partida a frio é mapeada na área de estudo, utilizando os Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

4.1.1.7 Etapa 7 – Analisar os resultados

A avaliação das emissões por partida a frio compreende três análises. As análises são realizadas para cada período de estudo e tipo de poluente, e englobam a divisão das emissões veiculares em função da classe veicular.

Comparação do adicional por partida a frio nas células de análise: Nesta comparação são identificadas as células com maiores emissões provenientes da partida a frio e o quanto cada célula representa no total das emissões por partida a frio.

Comparação do adicional de emissões por partida a frio com as emissões totais: Nessa análise, verifica-se quanto o adicional por partida a frio é representativo nas emissões

veiculares totais. A estimativa das emissões totais é realizada de maneira estática, através da soma das emissões estabilizadas e do adicional por partida a frio, conforme apresentado na Equação (8). As emissões estabilizadas são estimadas a partir de fatores de emissão em condições estabilizadas (FE_{CE}), da distância da viagem e do número de viagens. A Equação (10) apresenta a forma de estimar as emissões em condições estabilizadas.

$$EE_{ij} = FE_{CEij} * N_j * D \quad (10)$$

Onde:

EE_{ij} = Emissão estabilizada da classe j e poluente i (g).

FE_{CEij} = Fator de emissão em condições estabilizadas da classe j para o poluente i (g/km);

N_j = Número de viagens de veículos classe j (viag);

D = Distância percorrida pelo veículo durante a viagem (km/viag).

Análise de sensibilidade: Essa análise pressupõe alterar valores de um dado de entrada particular e, então, avaliar o respectivo impacto nos parâmetros de saída de interesse, no caso as emissões de CO, HC, NO_x e CO₂. Nessa análise, verifica-se a influência da tecnologia veicular nas emissões de poluentes.

4.2 AVALIAÇÃO DO ADICIONAL DE EMISSÕES POR PARTIDA A FRIO EM PORTO ALEGRE

A determinação e a distribuição espacial do adicional por partida a frio foram realizadas neste estudo através de uma aplicação na cidade de Porto Alegre. As informações da atividade veicular foram obtidas do banco de dados da pesquisa de entrevistas domiciliares (EDOM, 2004), realizada no ano de 2003. Esse banco de dados pode ser considerado uma fonte rica de informações sobre as viagens de Porto Alegre, pois possui informações de caracterização dos domicílios, indicadores econômicos, indicadores sociais e deslocamentos realizados. É importante ressaltar que apenas uma amostra dos domicílios de Porto Alegre foi

entrevistada. A expansão dos resultados desses domicílios para toda a região analisada foi baseada no peso atribuído para cada entrevista realizada.

Nos deslocamentos realizados com automóveis podem ser encontradas informações como origem e destino das viagens, e modelo, marca, ano de fabricação, tamanho do motor e tipo de combustível utilizado pelo veículo no deslocamento. Apesar do banco de dados das entrevistas domiciliares possuir horário de saída e de chegada, e tempo de duração de cada viagem, na análise do adicional por partida a frio foi adotada a distância percorrida, ao invés do tempo de viagem. Esta escolha ocorreu em função da confiabilidade dos dados. Normalmente, o entrevistado não sabe exatamente o tempo utilizado no deslocamento, já os pontos de origem e destino, utilizados para a determinação da distância percorrida na viagem, são lembrados facilmente na hora da entrevista e estão referenciados geograficamente no banco de dados.

Os fatores de emissão são originados de medições de emissões em veículos nacionais, em um estudo realizado em São Paulo (LENTS et al., 2005). O adicional por partida a frio foi representado através de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) que auxiliou a análise dos resultados.

4.2.1 Etapa 1 – Delimitação da área de estudo e do período de análise

A aplicação do método de estimativa do adicional por partida a frio ocorreu no município de Porto Alegre, capital do Rio Grande do Sul. Essa cidade possui uma população de aproximadamente 1,5 milhões de habitantes (IBGE, 2008). A frota de Porto Alegre em dezembro de 2003, ano que foram realizadas as entrevistas domiciliares, era constituída por 518.351 veículos, dentre eles, 403.449 automóveis, representando 77,8% da frota municipal (BRASILa, 2008).

A área de estudo analisada envolve a região que concentra a maior quantidade de pontos de origem de viagens, já que se acredita que nesses pontos ocorre uma maior quantidade de emissão de poluente por partida a frio. Já os períodos de análise escolhidos correspondem aos horários de picos de tráfego matinal e vespertino, ou seja, entre 7:30 e 8:30 horas e entre 18:00 e 19:00 horas, respectivamente.

Durante o período de pico da manhã foram realizadas 43.464 partidas, representando aproximadamente 12% do total de partidas no dia inteiro, enquanto que no período da tarde foram realizadas 38.259 partidas, cerca de 10% do total. Para análise foram consideradas apenas aquelas viagens cujas informações acerca do tipo do veículo e da origem estavam disponíveis. Portanto, para o período de pico matinal, só foram incluídas na análise 81,1 % das viagens realizadas e, no pico vespertino, 86,7%. O banco de dados permite identificar, dentre os veículos pertencentes ao domicílio, o veículo utilizado na viagem e suas características. Dessa forma, é possível identificar se esse veículo utilizado no deslocamento foi utilizado recentemente ou se está em condições de partida a frio.

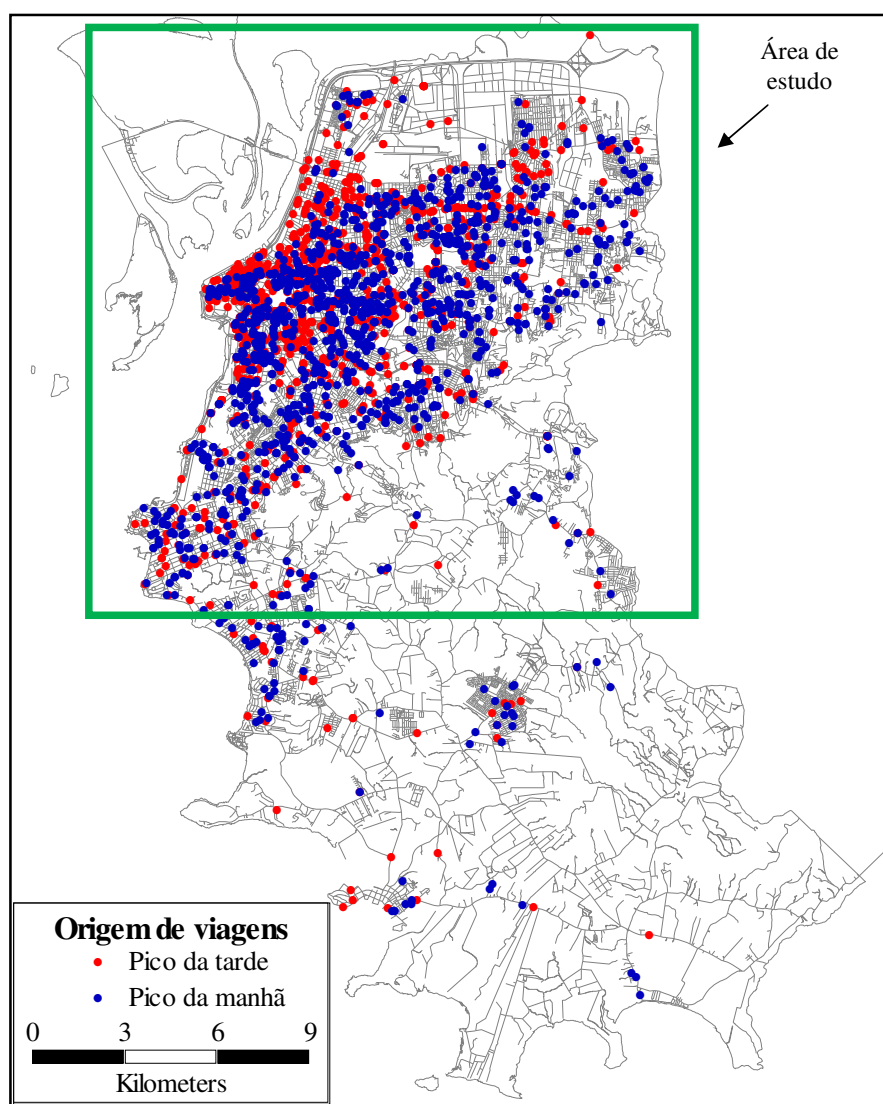


Figura 20 - Delimitação da área de estudo e pontos de origem de viagens

Para melhor visualização dos pontos de origem durante o pico matinal e vespertino, esses foram alocados no mapa de Porto Alegre, com o auxílio de uma ferramenta SIG, Transcad 3.6. A Figura 20 apresenta a área de estudo e a concentração de pontos de origem das viagens durante os períodos de pico matinal e vespertino.

4.2.2 Etapa 2 – Determinação da distância de partida a frio

A distância de partida a frio (D_{frio}) é utilizada na divisão da área de estudo em células de análise e na determinação do adicional de emissões por partida a frio. A D_{frio} foi determinada através do tempo de partida a frio (t_{frio}) e da velocidade média na área de estudo durante o período de análise.

O tempo de partida a frio foi baseado em indicações de Lents et al. (2005) e em dados de emissão coletados por Melchiors (2007). Os dados de emissões veiculares coletados por Melchiors foram cedidos para análises do comportamento das emissões veiculares. Com base nos dados cedidos por Melchiors, foi possível determinar o tempo de partida a frio através do método do desvio padrão, desenvolvido por Joumard e Serié (1999). Segundo este método, são calculados uma série de desvios padrão referentes aos dados de emissão de poluentes. Primeiramente, é calculado o desvio padrão de todos os dados de emissão. Na seqüência é calculado o desvio padrão de todos os dados, excluído o primeiro valor, em seguida excluindo os dois primeiros valores, e assim por diante, até restar apenas os dois últimos valores de emissão. Finalizando, os valores de desvio padrão são plotados no gráfico de emissões ao longo da distância percorrida. A distância ou o tempo de partida a frio é definido como o ponto no qual o desvio padrão se torna mínimo.

No estudo conduzido por Lents et al. (2005) foi determinado que o tempo médio de partida a frio (t_{frio}) para todas as classes veiculares era de aproximadamente 200 segundos. A análise dos dados cedidos por Melchiors apontaram que o t_{frio} era próximo aos 200 segundos. Dessa forma, foi adotado na análise o tempo de partida a frio médio de 200 segundos para todas as classes de veículos. Com base em informações de técnicos da Empresa Pública de transporte e Circulação de Porto Alegre, adotou-se 22 km/h como velocidade média na área em estudo durante os períodos de análise. A conversão do tempo de partida a frio em distância de partida a frio, através da velocidade média, resultou em uma distância de partida a frio (D_{frio}) média de aproximadamente 1,2 quilômetros.

4.2.3 Etapa 3 – Divisão da área de estudo em células de análise

A área de estudo foi dividida em células de formato quadrado e de mesma área. A determinação do tamanho da célula considerou a distância de partida a frio em linha reta. Esta distância é equivalente ao raio de um círculo imaginário e representa a área que o veículo pode percorrer até atingir as condições estabilizadas. Através da área deste círculo imaginário, obteve-se um quadrado equivalente de mesma área. A partir da área do quadrado equivalente, foi obtida a dimensão da aresta da célula. A Figura 21 ilustra a representação do processo de determinação do tamanho da célula de análise.

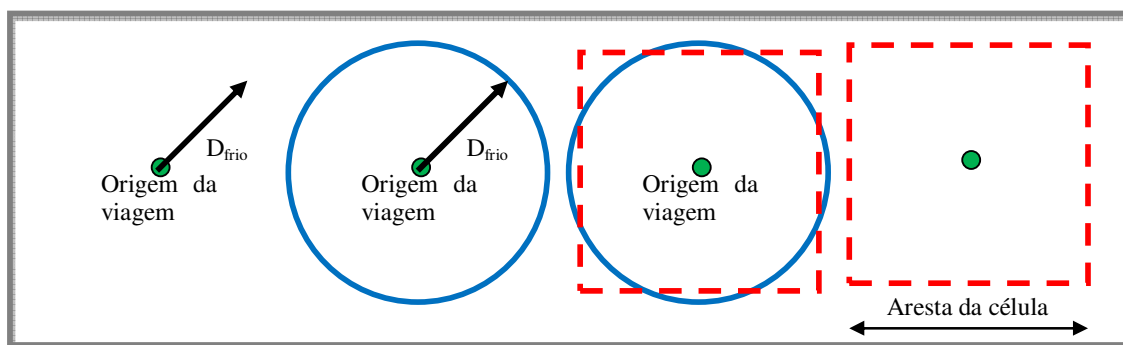


Figura 21 – Determinação do tamanho da célula de análise

Como os veículos não realizam as viagens em linha reta, foi aplicado um fator de correção de distância de 1,4 na distância de partida a frio, determinada na Etapa 2, para definir o tamanho das células. Esse fator foi sugerido por Novaes (2004) e visa considerar os efeitos da trama viária, a presença de vias de mão única, restrições de cruzamentos e restrições de conversões à esquerda na transformação da distância em condições realísticas em distância em linha reta. Assim, a D_{frio} em linha reta é de aproximadamente 850 metros, equivalente ao raio do círculo imaginário. Dessa forma, o tamanho da célula de análise adotado foi de 1,5 x 1,5 km. A divisão da área de estudos é apresentada na Figura 22.

4.2.4 Etapa 4 – Determinação das classes de veículos e dos compostos quantificados

A partir dos dados das entrevistas domiciliares, observou-se que os veículos ciclo Otto representam 98% das viagens domiciliares realizadas em Porto Alegre. No que se refere ao tipo de combustível, os veículos ciclo Otto movidos a álcool e a GNV representam apenas 3% das viagens domiciliares realizadas. Por esse motivo, na aplicação do método proposto

foram analisados apenas os veículos equipados com motores do tipo ciclo Otto, cujo combustível é a gasolina, desconsiderando a existência de veículos bicompostíveis.

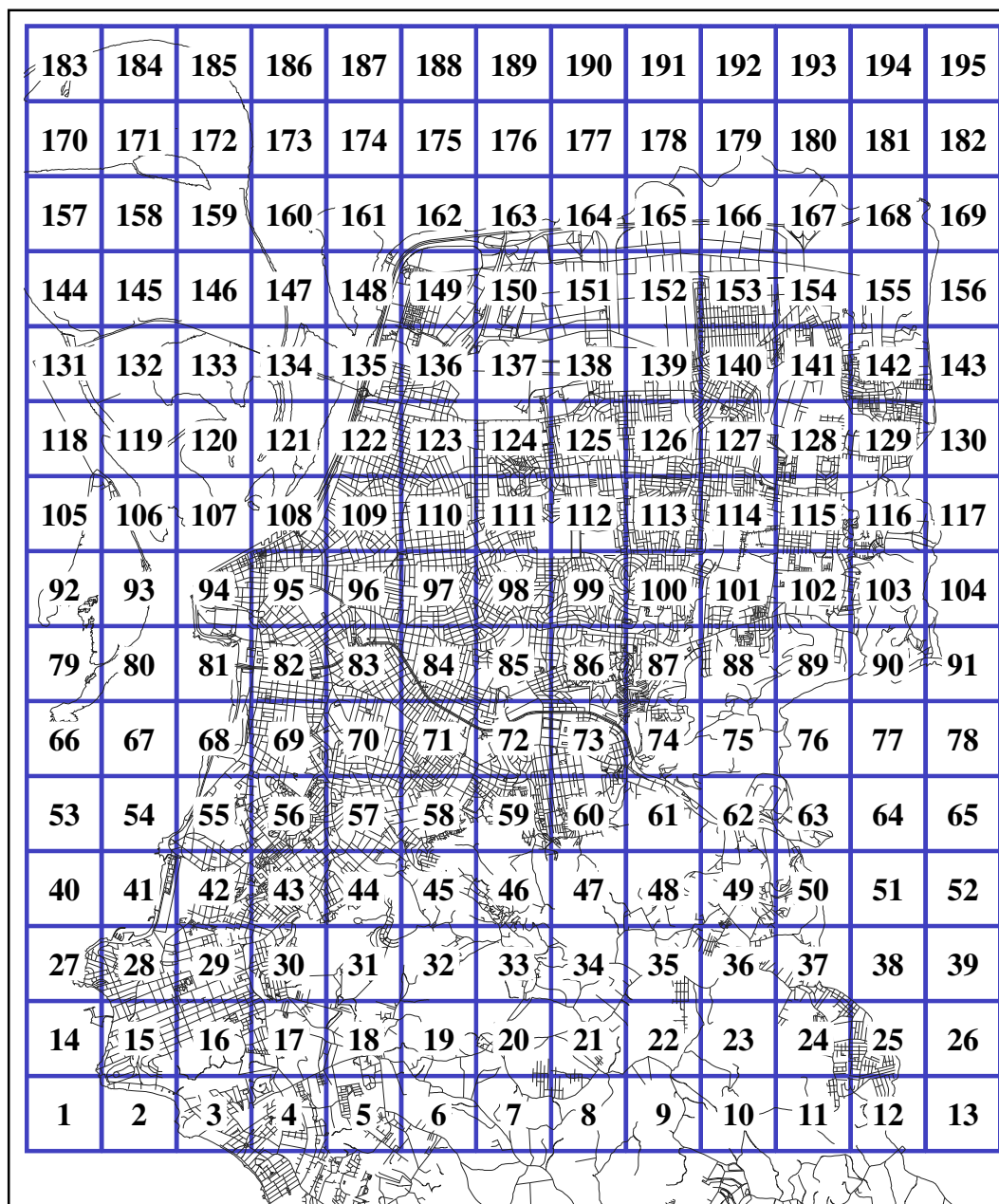


Figura 22 – Área de estudo dividida em células de análise

Ainda, as viagens por táxi foram desconsideradas na análise das emissões veiculares em partida a frio, visto a dificuldade em determinar se o veículo realizado no deslocamento estava em partida frio ou não, e também por acreditar que a maior parte dessas viagens inicia em partida a quente.

Os veículos foram agrupados em três classes, de acordo com o ano de fabricação do veículo, obtido nos dados da pesquisa de entrevistas domiciliares, o ano de implantação dos limites máximos de emissão estabelecidos pelo PROCONVE e a tecnologia empregada na produção do veículo, como o tipo de injeção do combustível e os equipamentos de controle de emissão de poluentes, baseado em Lents et al. (2005).

No estudo realizado por Lents et al. (2005), foram analisados veículos do município de São Paulo, verificando a presença de catalisadores e o sistema de injeção de combustível. Por serem veículos oriundos de uma cidade brasileira, foi considerado que os veículos utilizados em Porto Alegre possuem características tecnológicas de produção semelhantes aos veículos que circulam em São Paulo.

Foi observado que os veículos começaram a sair de fábrica com catalisadores a partir de 1991, porém, até o ano de 1996 alguns veículos ainda eram fabricados sem catalisador. Veículos equipados com injeção eletrônica monoponto começaram a ser fabricados em 1993, e em 1996 começaram a ser produzidos os veículos com injeção eletrônica multiponto.

A classificação veicular considerou que o avanço tecnológico incorporado na produção dos veículos, baseado no estudo de Lents et al. (2004) e representados pela utilização de conversores catalíticos e sistema de injeção eletrônica de combustível, está associado aos limites máximos de emissão estabelecidos pelo PROCONVE. Assim, os veículos produzidos até o ano de 1991, período pré-PROCONVE e Fase I do PROCONVE, correspondem aos veículos produzidos sem catalisadores e com carburador. Os veículos fabricados durante a Fase II do PROCONVE, entre 1992 e 1996, foram agrupados por possuírem catalisador ou injeção eletrônica de combustível. Ainda, os veículos produzidos a partir de 1997, Fase III do PROCONVE, foram considerados com catalisador e injeção eletrônica de combustível. A classificação veicular adotada na estimativa do adicional de emissões por partida a frio é apresentada na Tabela 6.

No que se refere aos poluentes avaliados, foi determinado que neste estudo seriam quantificadas as emissões dos poluentes regulamentados, monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC) e óxidos de enxofre (NO_x), e o gás de efeito estufa, dióxido de carbono (CO₂). Esses poluentes foram escolhidos por representarem as principais emissões dos

veículos com motor ciclo Otto e existirem fatores de emissão para veículos nacionais disponíveis.

Tabela 6 – Classificação veicular utilizada na estimativa do adicional por partida a frio

Classe	Ano de fabricação	Tecnologia utilizada	Fase do PROCONVE
A	Até 1991	Carburador sem catalisador	I e anterior
B	1992-1996	Carburador com Catalisador Ou Injeção Eletrônica sem Catalisador	II
C	1997-2004	Injeção Eletrônica com Catalisador	III

4.2.5 Etapa 5 – Determinação dos pontos de origem, do número de partidas a frio e fatores de emissão

Os pontos de origem das viagens e o número de partidas a frio foram obtidos do banco de dados das entrevistas domiciliares. Foram utilizadas apenas as viagens que possuíam informação veicular, como ano de fabricação e combustível utilizado, e de origem e de destino. Foram consideradas partidas a frio: (i) a primeira viagem realizada pelo veículo no dia da entrevista; e (ii) todas as viagens que o veículo permaneceu mais de 12 horas estacionado antes da realização do deslocamento. As partidas a frio foram agrupadas nas células de análise e, por simplificação, considerou-se que as viagens iniciaram no centro geométrico da célula.

Os fatores de emissão em partida a frio foram embasados pelo estudo realizado por Lents et al. (2005) em São Paulo. A adoção desses fatores de emissão só foi possível considerando que o nível tecnológico empregado na produção dos veículos e a manutenção veicular não diferem de São Paulo para Porto Alegre.

No estudo realizado por Lents et al. (2005), o adicional por partida a frio de CO, HC, NO_x e CO₂ está dividido em duas classes veiculares, veículos equipados com carburador e veículos equipados com injeção eletrônica. Estes valores do adicional por partida a frio foram apresentados na Tabela 4.

O fator de emissão do adicional por partida a frio (FE_{APF}) foi obtido dividindo o adicional de poluentes emitidos por partida a frio, em gramas, pela distância percorrida durante os primeiros 200 segundos do ensaio FTP, equivalente a 1,77 quilômetros. Os veículos equipados com carburador foram considerados semelhantes aos veículos classe A e os veículos com injeção eletrônica, semelhantes aos veículos classe C. O FE_{APF} para a classe B, veículos com carburador e catalisador ou injeção eletrônica sem catalisador, foi obtido através da média do FE_{APF} das classes A e C. Os fatores de emissão que expressam o adicional de poluentes durante a partida a frio são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Fatores de emissão do adicional por partida a frio.

Classe veicular	Ano de fabricação	Tecnologia utilizada	FE_{APF} CO (g/km)	FE_{APF} CO ₂ (g/km)	FE_{APF} HC (g/km)	FE_{APF} NO _x (g/km)
A	Até de 1991	Carburador sem catalisador	5,1	45,8	3,3	0,3
B	1992-1996	Carburador com Catalisador Ou Injeção Eletrônica sem Catalisador	8,5	39,1	2,8	0,4
C	1997-2004	Injeção Eletrônica com Catalisador	11,9	32,3	2,3	0,4

Fonte: Adaptado de Lents et al. (2005).

4.2.6 Etapa 6 – Cálculo do adicional de emissões por partida a frio

O cálculo do adicional de emissão por partida a frio foi baseado em fatores de emissão do adicional de emissões por partida a frio (FE_{APF}), número de viagens que iniciam em partida a frio e a distância que o veículo percorre em partida a frio. A estimativa do adicional de emissões em partida a frio foi realizada para cada classe de veículos, em cada período de estudo e para cada poluente. O adicional por partida a frio foi agrupado nas células de análise e representado com o auxílio de um Sistema de Informação Geográfica.

4.2.7 Etapa 7 – Análise dos resultados

As emissões totais foram determinadas para verificar a influência do adicional de poluentes por partida a frio nas emissões totais, qualificando a análise do adicional por partida a frio. As emissões totais foram obtidas através da soma das emissões estabilizadas e do

adicional por partida a frio. As emissões estabilizadas foram estimadas a partir de fatores de emissão em condições estabilizadas (FE_{CE}), distância da viagem e número de viagens.

O fator de emissão em condição estabilizada para as classes veiculares foi embasado no estudo realizado por Lents et al. (2005). Nesse estudo, os fatores de emissão em condições estabilizadas de CO, HC, NO_x e CO_2 estão divididos em função do tipo de injeção de combustível, a presença ou não de conversor catalítico, tamanho do veículo e quilometragem acumulada. O Anexo apresenta os fatores de emissão determinados por Lents et al. (2005).

No presente estudo, os veículos com tecnologia de injeção e de controle de emissão, representado pelo catalisador, semelhantes foram agrupados nas classes A, B e C, determinadas na Tabela 6. A obtenção do fator de emissão em condições estabilizadas foi realizada através da média ponderada dos fatores de emissão, determinados por Lents et al. (2005), em função do percentual de veículos existentes com as mesmas características. O percentual de veículos com características semelhantes foi baseado em Lents et al. (2004) e descrito na Tabela 3. A Tabela 8 apresenta os fatores de emissão em condições estabilizadas utilizados no presente trabalho.

Apenas as viagens que tem início de deslocamento dentro da área de estudo e nos períodos analisados foram contabilizadas na estimativa das emissões estabilizadas. Portanto, a estimativa destas emissões pode estar subestimada, pois não considera as emissões referentes ao tráfego de passagem e às viagens iniciadas antes dos períodos de análise.

Tabela 8 - Fatores médios de emissão em condições estabilizadas.

Classe veicular	Ano de fabricação	Tecnologia utilizada	FE_{CE} CO (g/km)	FE_{CE} CO_2 (g/km)	FE_{CE} HC (g/km)	FE_{CE} NO_x (g/km)
A	Até de 1991	Carburador sem catalisador	78,0	166,0	10,2	1,7
B	1992-1996	Carburador com Catalisador Ou Injeção Eletrônica sem Catalisador	38,3	211,1	4,5	0,9
C	1997-2004	Injeção Eletrônica com Catalisador	6,5	218,9	0,8	0,8

Fonte: Embasado em Lents et al. (2005).

As distâncias das viagens realizadas no período de análise foram determinadas através das coordenadas dos pontos de origem e destino, obtidas do banco de dados das

entrevistas domiciliares. Primeiro foi calculada a distância euclidiana de cada viagem, e em seguida aplicado um fator de correção de distância de 1,4, sugerido em Novaes (2004). Destaca-se que a distância média de viagem corresponde à aproximadamente 6,0 km, no período de pico matinal, e a 6,5 km, no período de pico vespertino.

A apresentação dos resultados obtidos nesse trabalho e suas respectivas análises são descritas no Capítulo 5, apresentando a estimativa das emissões veiculares, a distribuição espacial do adicional por partida a frio e dos pontos de origem de viagens em partida a frio, a comparação entre o adicional por partida a frio e as emissões totais, e a análise de sensibilidade.

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou um método que utiliza variáveis agregadas para a estimativa e distribuição espacial do adicional de emissão veicular no período de partida a frio. A viabilidade de aplicação deste método exige a utilização de variáveis representativas das emissões veiculares e do perfil de partidas a frio na área em análise.

Finalizando o capítulo, foi descrito o procedimento realizado na estimativa do adicional por partida a frio e das emissões estabilizadas para uma área de estudo localizada em Porto Alegre. O próximo capítulo descreve os resultados obtidos nesses procedimentos e as análises dos resultados.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos da aplicação do método proposto no trabalho para a determinação da emissão de partida a frio de veículos de ciclo Otto. É também apresentada a distribuição espacial do adicional de emissões por partida a frio (APF). Ainda nesse capítulo são feitas as análises desses resultados destacando a comparação das emissões por partida a frio em relação às emissões totais.

5.1 NÚMERO DE PARTIDAS A FRIO E ORIGEM DAS PARTIDAS

Durante o horário de pico da manhã ocorreram 33.765 partidas na área de estudo. Destas partidas, apenas 28.879 (85,5% do total) são caracterizadas como partidas a frio. Os veículos classificados como classe A, B e C iniciaram 3.085, 5.177 e 20.617 viagens em partidas a frio, respectivamente.

As viagens em partida a frio representam 26,2% do total de partidas realizadas no horário de pico vespertino, o que totaliza 8410 viagens. No período da tarde, os veículos classe A, B e C iniciaram 1.104, 1.391, 5.915 viagens em partida a frio, respectivamente. A Figura 23 e a Figura 24 ilustram as partidas a frio distribuídas espacialmente nas células de análise durante o período de pico da manhã e da tarde, respectivamente.

Observa-se que existe uma maior concentração de viagens com partida a frio na região central da cidade de Porto Alegre e suas áreas adjacentes. Ao comparar os mapas da Figura 23 e da Figura 24, verifica-se que há uma maior distribuição espacial das viagens no pico da manhã.

Para maior detalhamento, a Tabela 9 mostra as células que possuem mais viagens iniciadas em partida a frio nos dois períodos analisados.

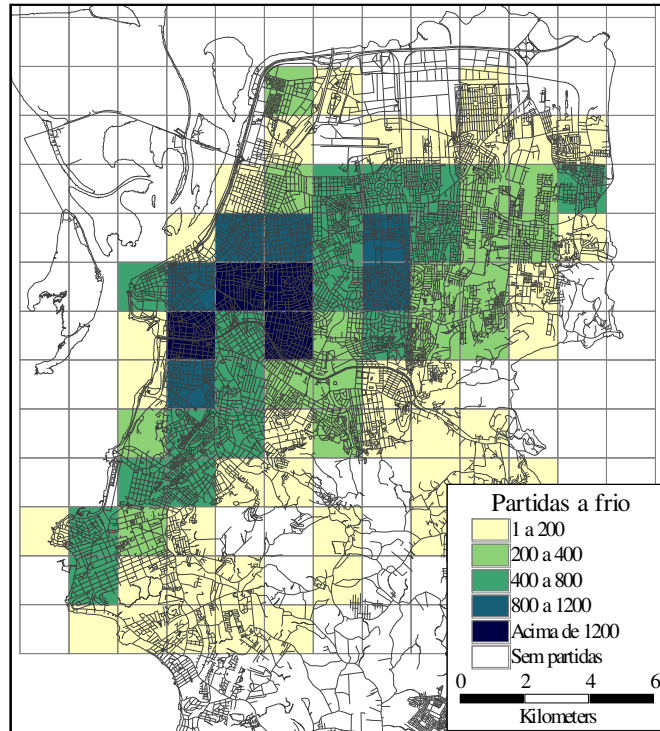


Figura 23 – Partidas a frio no pico da manhã

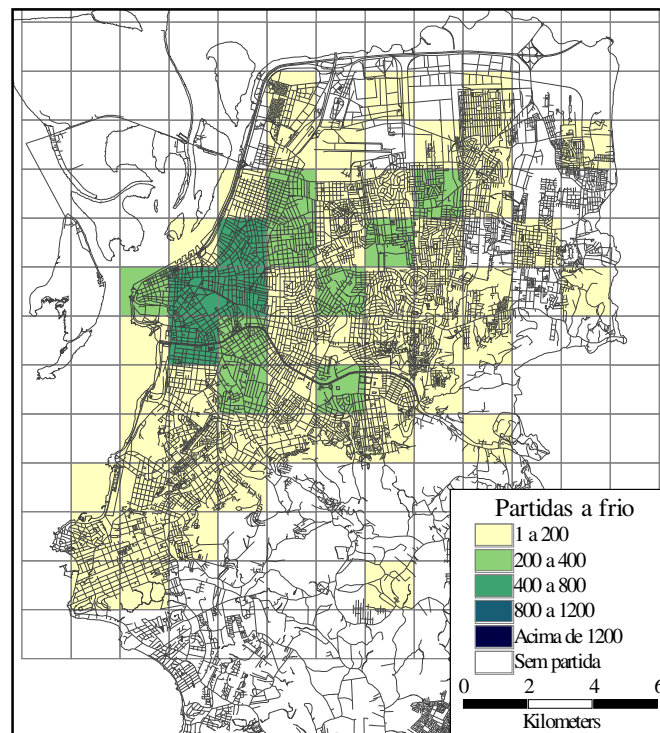


Figura 24 – Partidas a frio no pico da tarde

Tabela 9 – Células com mais viagens iniciadas em partidas a frio

Manhã				Tarde			
Célula de Análise	Partidas a frio	% em relação ao total	% acumulado	Célula de Análise	Partidas a frio	% em relação ao total	% acumulado
96	1562	5,4%	5,4%	95	545	8,3%	8,3%
97	1469	5,1%	10,5%	109	384	7,3%	15,6%
84	1392	4,8%	15,3%	82	329	5,5%	21,1%
82	1230	4,3%	19,6%	96	295	5,2%	26,2%
69	997	3,5%	23,0%	112	299	4,5%	30,7%
112	987	3,4%	26,4%	110	227	3,7%	34,4%
95	960	3,3%	29,8%	94	201	3,3%	37,7%
99	947	3,3%	33,0%	98	213	2,9%	40,7%
109	830	2,9%	35,9%	123	242	2,9%	43,5%
110	830	2,9%	38,8%	126	182	2,9%	46,4%

5.2 ANÁLISE DO ADICIONAL DE EMISSÕES POR PARTIDA A FRIO

É importante ressaltar que os valores descritos a seguir referem-se apenas ao adicional de emissão por partida a frio, em comparação às emissões estabilizadas. A emissão total na região é obtida através da soma deste adicional com as emissões em condições estabilizadas. Ainda, o adicional por partida a frio nas células representa a soma das três classes A, B e C.

5.2.1 Adicional por partida a frio de CO

Durante o período de pico matinal, o adicional de emissões por partida a frio em toda a área de estudo foi de 354,2 kg, e no pico vespertino 102,7 kg. Os veículos da classe C contribuem com 80,7% (285,7 kg) do adicional por partida a frio, no período de pico da manhã, e 79,9% (82,0 kg) no período de pico da tarde. Os veículos da classe A são os que contribuem menos nas emissões em partida a frio, com 5% (17,8 kg) no horário de pico matinal e 6,5% (6,7 kg) no vespertino.

No período de pico matinal, a célula número 97 teve a maior contribuição por partida a frio com 20,3 kg. Este valor equivale a 5,7% do adicional no período. Já no período da tarde foi a célula 95 que apresentou a maior contribuição de poluentes em partida a frio, com 8,7 kg, equivalente a 8,5% do total por partida a frio no período. A célula 97 representa a região

com maior número de partidas a frio por veículos classe C no período da manhã e a célula 95 no período da tarde. O adicional de CO em partida a frio é apresentado na Figura 25 e na Figura 26.

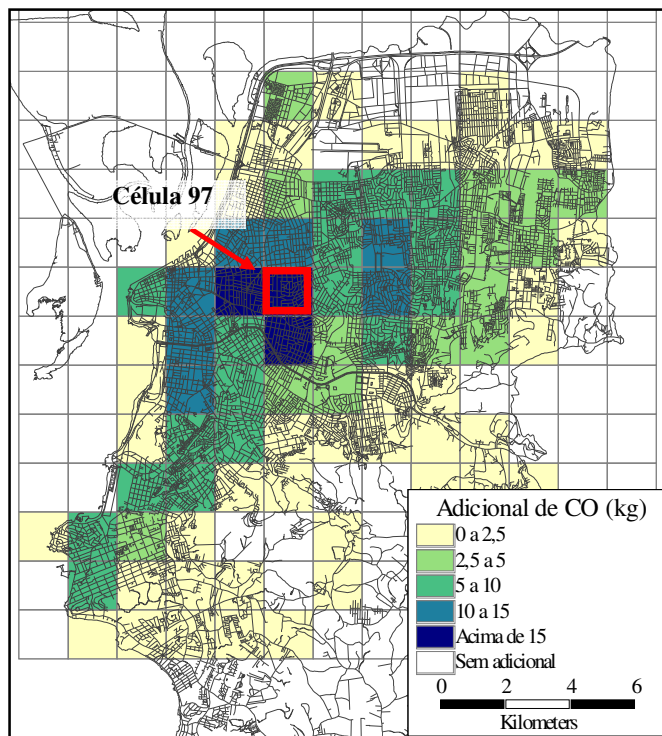


Figura 25 – Adicional de CO em partida a frio no pico da manhã

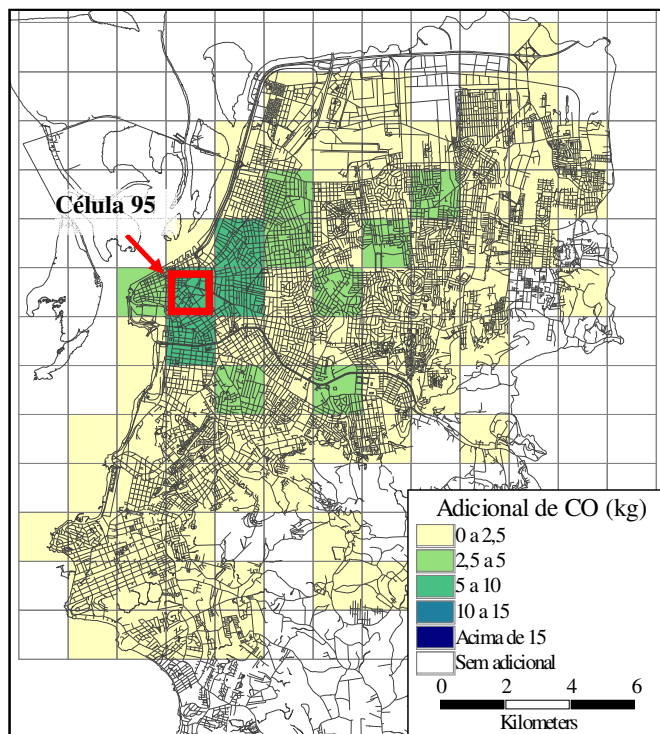


Figura 26 – Adicional de CO em partida a frio no pico da tarde

5.2.2 Adicional de partida a frio para HC

Durante o período da manhã, em toda a área de estudo, o adicional de partida a frio de HC corresponde a 84,3 kg, e no período da tarde 25,1 kg. A classe veicular C foi responsável por 66,2% (55,8 kg), no período da manhã, e 63,7%, no período da tarde, do adicional por partida a frio.

No período matutino, a célula 96 apresentou o maior adicional de emissão de HC devido à partida a frio, contribuindo 5,1% (4,3 kg) do total de adicional por partida a frio no período. Já a célula 95 apresentou o maior adicional por partida a frio no período da tarde, com 2,0 kg, representando 8,0% do adicional no período.

A contribuição da partida a frio nas emissões de HC para cada classe de veículos é apresentada na Figura 27 e na Figura 28, para o período matinal e vespertino, respectivamente.

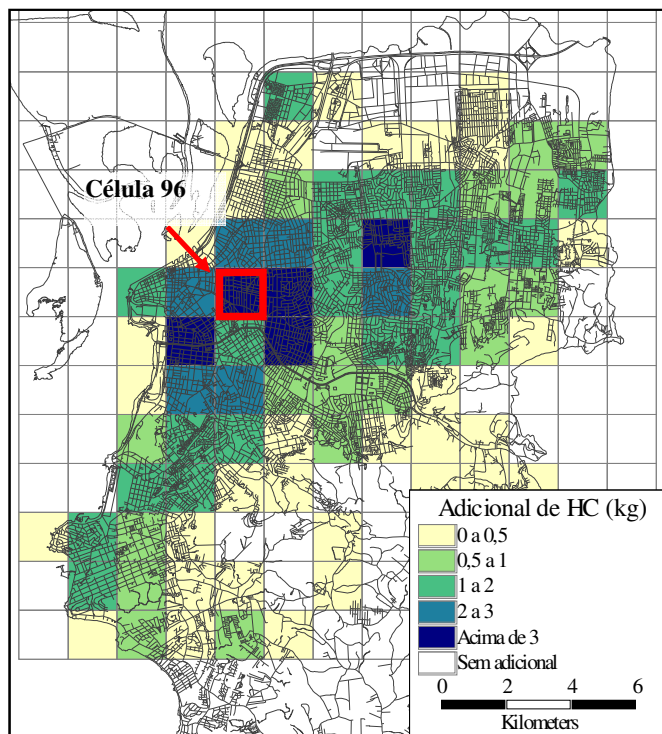


Figura 27 – Adicional de HC em partida a frio no pico da manhã

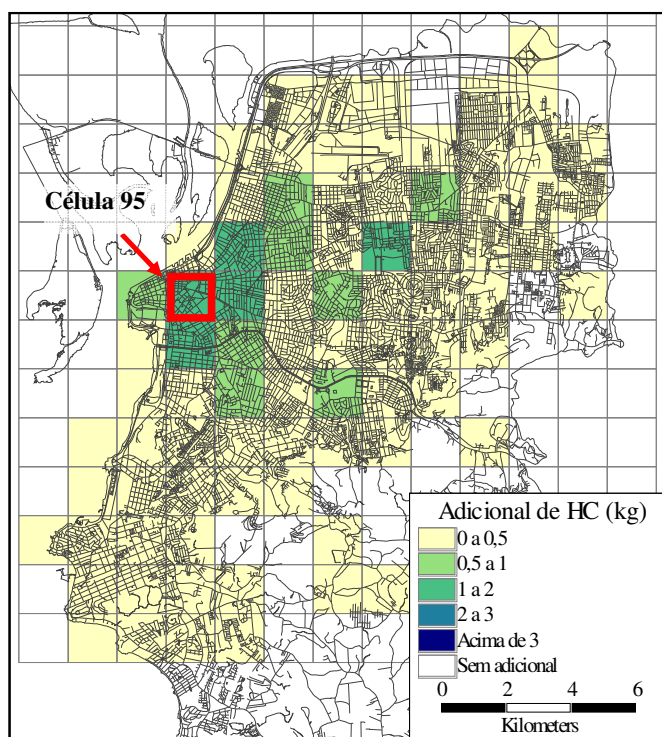


Figura 28 – Adicional de HC em partida a frio no pico da tarde

5.2.3 Adicional de partida a frio para NO_x

O adicional por partida a frio no período de pico matinal foi de 12,9 kg. Já no período de pico vespertino esse adicional foi de 3,8 kg. A classe veicular C é a maior responsável pelo adicional por partida a frio no período da manhã, representando 73,6% (9,5 kg), e no período da tarde 71,1% (2,7 kg).

As células que mais contribuem com o adicional por partida a frio no período matinal são as 96 e 97, com 5,4 % (0,7 kg) do total, cada uma. No período vespertino, a célula 95 representa 8,2% (0,3 kg) do total no período. A Figura 29 ilustra a contribuição por partida a frio das emissões de NO_x distribuídos em toda a área de estudo durante o período de pico matinal. O adicional de emissão de NO_x por partida a frio durante o horário de pico vespertino é apresentado na Figura 30.

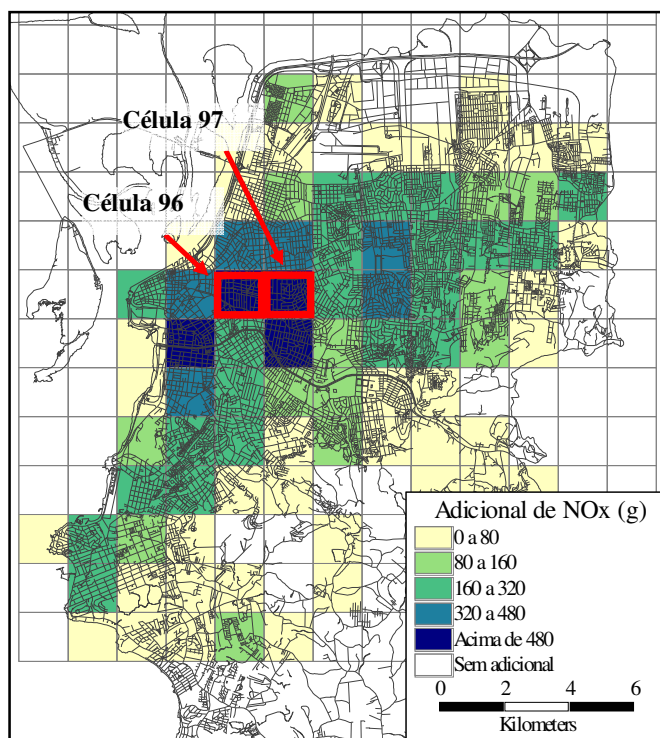


Figura 29 – Adicional de NO_x em partida a frio no pico da manhã

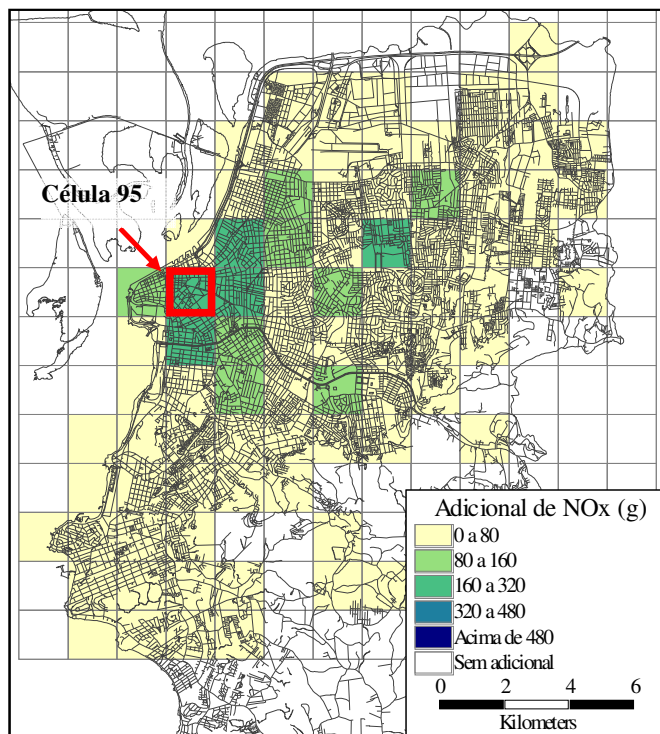


Figura 30 – Adicional de NO_x em partida a frio no pico da tarde

5.2.4 Adicional de partida a frio para CO₂

Em toda a área analisada, o adicional por partida a frio de CO₂ foi de 1.168,6 kg no horário de pico da manhã e de 347,3 kg, no da tarde. A classe C contribuiu em 66,4% do adicional por partida a frio de CO₂ emitido na manhã e 64,1% no período da tarde. A Figura 31 mostra o adicional de CO₂ no período da manhã e a Figura 32 para o período da tarde.

A célula de análise 96 corresponde à maior contribuição de CO₂ em partida a frio durante o período da manhã, com 5,1% (59,4 kg). No período da tarde, a célula 95, que possui maior número partidas a frio, contribuiu com 27,7 kg, 8,0% do adicional por partida a frio no período.

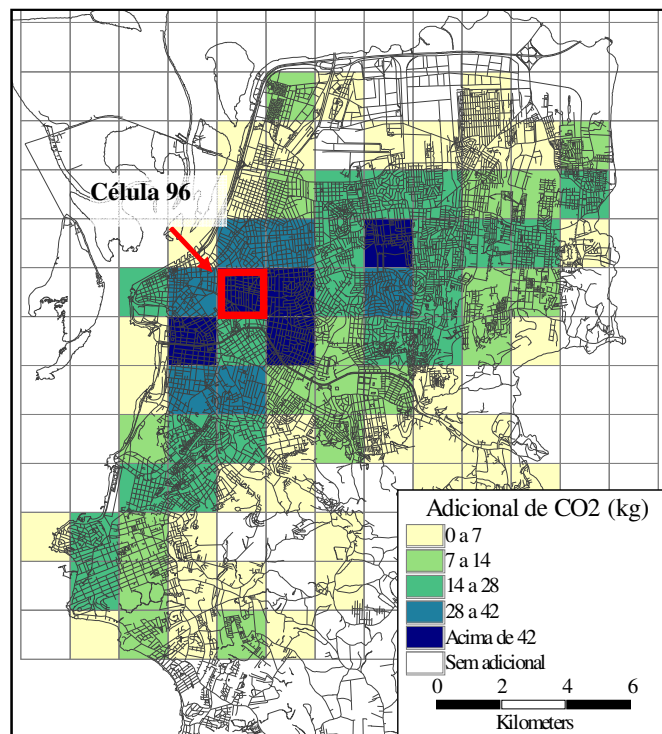


Figura 31 – Adicional de CO₂ em partida a frio no pico da manhã

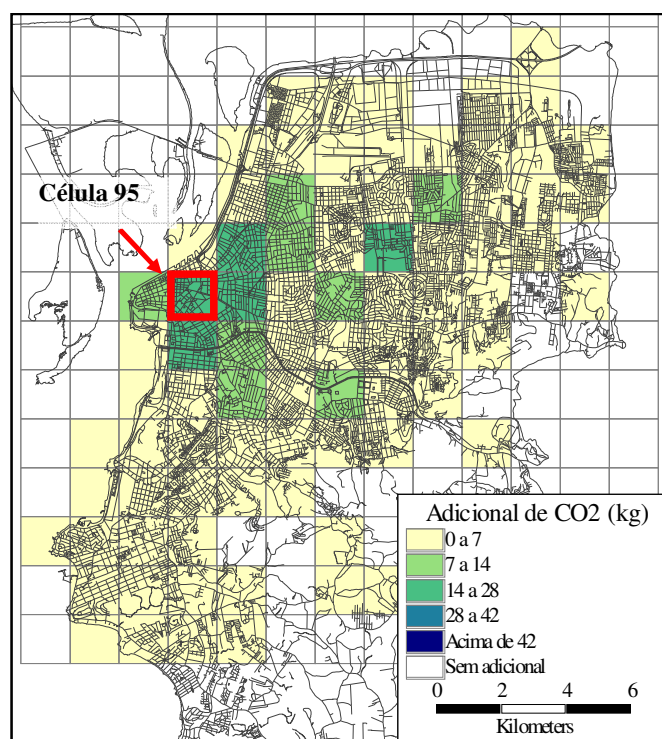


Figura 32 – Adicional de CO₂ em partida a frio no pico da tarde

5.2.5 Adicional de emissões por partida a frio

Observa-se que o adicional por partida a frio no período da manhã foi maior que no período da tarde, em virtude do número de partidas a frio ser maior. Ainda, verificou-se que a classe veicular C, correspondente aos veículos com injeção eletrônica e catalisador, apresentou a maior contribuição do adicional por partida a frio, pois também é responsável pelo maior número de partidas a frio. Para melhor visualização desses resultados, a Tabela 10 e a Tabela 11 apresentam um resumo do adicional de emissão por partida a frio, divididos pelas classes veiculares.

Tabela 10 – Adicional por partida a frio dividido em classes veiculares no período da manhã

Poluente	Classe veicular A		Classe veicular B		Classe veicular C		Total
	Adicional (kg)	% em relação ao adicional total	Adicional (kg)	% em relação ao adicional total	Adicional (kg)	% em relação ao adicional total	Adicional (kg)
CO	17,8	5,0%	50,7	14,3%	285,8	80,7%	354,2
HC	11,6	13,8%	16,9	20,0%	55,8	66,2%	84,3
NO _x	1,2	9,3%	2,2	17,1%	9,5	73,6%	12,9
CO ₂	159,8	13,7%	233,2	20,0%	775,6	66,4%	1168,6

Tabela 11 – Adicional por partida a frio dividido em classes veiculares no período da tarde

Poluente	Classe veicular A		Classe veicular B		Classe veicular C		Total
	Adicional (kg)	% em relação ao adicional total	Adicional (kg)	% em relação ao adicional total	Adicional (kg)	% em relação ao adicional total	Adicional (kg)
CO	6,7	6,5%	13,9	13,5%	82	79,8%	102,7
HC	4,4	17,5%	4,6	18,3%	16	63,7%	25,1
NO _x	0,4	10,5%	0,6	15,8%	2,7	71,1%	3,8
CO ₂	60,7	17,5%	64	18,4%	222,7	64,1%	347,3

Destaca-se que as regiões mais escuras dos mapas apresentados entre a Figura 25 e Figura 32 apresentam maior emissão de poluentes em função da partida a frio. Estas regiões apresentam maior potencial de danos à saúde das pessoas que habitam ou frequentam estas áreas durante os períodos analisados, especialmente no período da manhã. A partir do mapeamento destas áreas com maior contribuição do adicional de emissões por partida a frio

podem ser realizadas análises mais detalhadas destas áreas, como, por exemplo, através de modelos microscópicos de estimativa de emissões veiculares, para verificar a representatividade destas emissões por partida a frio em relação ao total emitido nestas regiões.

5.3 EMISSÕES TOTAIS

As emissões totais (estabilizadas mais adicional por partida a frio) no período da manhã correspondem a 4305,2 kg de CO, 573,9 kg de HC, 195,6 kg de NO_x e 42502,2 kg de CO₂ em toda a área analisada. A classe veicular A, apesar de possuir o menor número de viagens, corresponde a 38,2% e 39,1% das emissões totais de CO e HC, respectivamente, no horário de pico matinal. A classe veicular C é responsável por 64,1% e 72,4% do total emitido de NO_x e CO₂, respectivamente, no período de pico matinal. A Tabela 12 apresenta o total de poluentes emitidos no período de pico matinal, distribuídos em classes veiculares.

As emissões totais (estabilizadas mais adicional) em toda a região de estudo correspondem a 4.486,7 kg de CO, 560,4 kg de HC, 193,8 kg de NO_x e 42.241,1 kg de CO₂, no período da tarde. A classe veicular A, apesar de possuir o menor número de viagens, corresponde a 48,5% e 50,3% das emissões totais de CO e HC, respectivamente, no horário de pico vespertino. A classe veicular C é responsável por 59,8% e 70,8% do total emitido de NO_x e CO₂, respectivamente, no período de pico vespertino. A Tabela 13 apresenta o total de poluentes emitidos no período de pico matinal, distribuídos em classes veiculares.

Tabela 12 – Emissões totais divididas em classes veiculares no período da manhã

Poluente	Classe veicular A		Classe veicular B		Classe veicular C		Total
	Emissão total (kg)	% em relação ao total	Emissão total (kg)	% em relação ao total	Emissão total (kg)	% em relação ao total	Emissão total (kg)
CO	1645,8	38,2%	1478,9	34,4%	1180,5	27,4%	4305,2
HC	224,5	39,1%	184	32,1%	165,5	28,8%	573,9
NO _x	35,6	18,2%	34,7	17,7%	125,3	64,1%	195,6
CO ₂	3624,5	8,5%	8101	19,1%	30776,7	72,4%	42502,2

Tabela 13 – Emissões totais divididas em classes veiculares no período da tarde

Poluente	Classe veicular A		Classe veicular B		Classe veicular C		Total
	Emissão total (kg)	% em relação ao total	Emissão total (kg)	% em relação ao total	Emissão total (kg)	% em relação ao total	Emissão total (kg)
CO	2223,9	48,5%	1390,5	30,3%	974,9	21,2%	4589,4
HC	294,3	50,3%	165,6	28,3%	125,4	21,4%	585,5
NO _x	47,3	23,9%	31,9	16,1%	118,2	59,8%	197,6
CO ₂	4779,3	11,2%	7647,5	18,0%	30161,8	70,8%	42588,5

Os resultados observados demonstram que apesar de no período da manhã serem realizadas mais viagens do que à tarde, esse apresenta uma menor quantidade de emissão de poluentes. Uma possível explanação para este fato está vinculada ao fato de ocorrerem à tarde mais viagens com veículos classificados como classe A, sem catalisador e com carburador. Esses veículos emitem mais CO e HC em condições estabilizadas do que as outras duas classes. As emissões de CO₂ apresentaram pouca diferença entre as classes, variando apenas conforme o número de viagens. Além disso, a distância média percorrida pelos veículos durante o pico da tarde é maior do que durante o pico da manhã. Ainda, observa-se que as emissões de CO e HC são mais influenciáveis pela tecnologia empregada na produção veicular do que as emissões de NO_x e CO₂.

5.4 INFLUÊNCIA DO ADICIONAL POR PARTIDA A FRIO

O adicional por partida a frio no horário de pico matinal representa 8,2% do total de poluentes emitidos de CO, 14,7% de HC, 6,6% de NO_x e 2,7% de CO₂. Os adicionais por partida a frio de CO e HC são mais representativos nos veículos denominados classe C, representando 24,2% do total de CO e 33,7% de HC emitido por essa classe no período da manhã. O adicional por partida a frio de NO_x é mais acentuado nas classes B e C, representando 6,3% e 7,6% respectivamente do total emitido por estas classes. O adicional de CO₂ é mais significativo na classe veicular A, representando 4,4% do total emitido de CO₂ por esta classe. A Tabela 14 apresenta a distribuição de emissão em adicional por partida a frio e emissão estabilizada para cada classe veicular e total emitido na área de estudo no período de pico matinal.

Tabela 14 – Percentual de emissões estabilizada e adicional por partida a frio divididos em classes no período matinal

Poluente	Classe veicular A		Classe veicular B		Classe veicular C		Total	
	% adicional	% estabilizada	% adicional	% estabilizada	% adicional	% estabilizada	% adicional	% estabilizada
CO	1,1%	98,9%	3,4%	96,6%	24,2%	75,8%	8,2%	91,8%
HC	5,2%	94,8%	9,2%	90,8%	33,7%	66,3%	14,7%	85,3%
NO _x	3,4%	96,6%	6,3%	93,7%	7,6%	92,4%	6,6%	93,4%
CO ₂	4,4%	95,6%	2,9%	97,1%	2,5%	97,5%	2,7%	97,3%

As emissões em partida a frio de CO, HC, NO_x e CO₂ durante o pico vespertino em relação ao total emitido na área de estudo estão apresentados na Tabela 15. Nessa tabela é possível notar que o adicional por partida a frio de CO e HC é mais representativo nos veículos denominados classe C. Já o adicional por partida a frio de NO_x em relação ao total emitido por estas classes é mais acentuado nas classes B e C. Ressalta-se ainda que o adicional de CO₂ é mais significativo na classe veicular A.

Tabela 15 – Percentual de emissões estabilizada e adicional por partida a frio divididos em classes no período vespertino

Poluente	Classe veicular A		Classe veicular B		Classe veicular C		Total	
	% adicional	% estabilizada	% adicional	% estabilizada	% adicional	% estabilizada	% adicional	% estabilizada
CO	0,3%	99,7%	1,0%	99,0%	8,4%	91,6%	2,2%	97,8%
HC	1,5%	98,5%	2,8%	97,2%	12,8%	87,2%	4,3%	95,7%
NO _x	0,8%	99,2%	1,9%	98,1%	2,3%	97,7%	1,9%	98,1%
CO ₂	1,3%	98,7%	0,8%	99,2%	0,7%	99,3%	0,8%	99,2%

A partir das comparações entre o adicional por partida a frio e o total de emissões foi possível estabelecer que o adicional por partida a frio é mais significativo para o HC, em seguida pelo CO e pelo NO_x. Ainda, observou-se que a categoria veicular interfere bastante no adicional por partida a frio de CO e HC, onde a classe C pode ser considerada a mais poluente no que se refere ao adicional por partida a frio. Em contrapartida, a classe C é quem menos emite esses poluentes em condições estabilizadas. O adicional por partida a frio de CO₂ aparenta ser pouco representativo, e observa-se que os veículos mais antigos emitem mais em partida a frio do que os novos.

As emissões dos poluentes analisados foram também relativizadas por tipo de classe veicular e tipo de poluente, separando em emissões estabilizada e adicional por partida a frio, tanto para o período de pico da manhã como da tarde, conforme a Tabela 16 e a Tabela 17. Observa-se que nos dois períodos de pico a maior contribuição das emissões estabilizadas de CO e HC é referente à classe veicular A, enquanto que a de NO_x e CO₂ é referente aos veículos classe C.

Tabela 16 – Percentual em relação ao total emitido na área de estudo no período da manhã

Poluente	Classe veicular A		Classe veicular B		Classe veicular C		Total % total
	% adicional	% estabilizada	% adicional	% estabilizada	% adicional	% estabilizada	
CO	0,4%	37,8%	1,2%	33,2%	6,6%	20,8%	100,0%
HC	2,0%	37,1%	2,9%	29,1%	9,7%	19,1%	100,0%
NO _x	0,6%	17,6%	1,1%	16,6%	4,9%	59,2%	100,0%
CO ₂	0,4%	8,2%	0,5%	18,5%	1,8%	70,6%	100,0%

Tabela 17 – Percentual em relação ao total emitido na área de estudo no período da tarde

Poluente	Classe veicular A		Classe veicular B		Classe veicular C		Total % total
	% adicional	% estabilizada	% adicional	% estabilizada	% adicional	% estabilizada	
CO	0,1%	48,3%	0,3%	30,0%	1,8%	19,5%	100,0%
HC	0,8%	49,5%	0,8%	27,5%	2,7%	18,7%	100,0%
NO _x	0,2%	23,7%	0,3%	15,8%	1,4%	58,6%	100,0%
CO ₂	0,1%	11,1%	0,2%	17,8%	0,5%	70,3%	100,0%

5.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade apresentada neste trabalho permite um melhor entendimento sobre o método realizado. Nesta análise de sensibilidade foi verificada a influência da categoria veicular no adicional por partida a frio e nas emissões totais de CO, HC, NO_x e CO₂.

A análise da variável fator de emissão foi feita através da construção de três cenários. O primeiro cenário considera que todos os veículos que realizaram deslocamento possuem características dos veículos denominados classe A, correspondente a veículos equipados com

carburador e sem conversor catalítico. O segundo cenário considera que todos os veículos que realizaram deslocamento possuem características dos veículos denominados classe B, equipados com carburador e catalisador ou injeção eletrônica sem catalisador. Já o terceiro cenário considera que todos os veículos que realizaram deslocamento possuíam injeção eletrônica e conversor catalítico, representando os veículos denominados classe C.

A distribuição do adicional de emissões por partida a frio nas células de análise ocorreu de acordo com a distribuição do número de viagens iniciadas em partida a frio. Assim, as células com maior número de partidas a frio possuem as maiores contribuições por partida a frio.

A variação da tecnologia empregada na fabricação veicular apresentou variação no adicional de emissões por partida a frio, em comparação as condições realísticas. Observa-se que conforme a frota é renovada e os veículos recebem melhores sistemas de controle de emissões, como conversores catalíticos e injeção eletrônica, o adicional por partida a frio de CO e NO_x aumenta, enquanto que o adicional de HC e CO₂ reduz conforme os veículos recebem melhorias tecnológicas. A Tabela 18 e a Tabela 19 apresentam a variação do adicional por partida, de acordo com a tecnologia empregada na produção do veículo no período matinal e vespertino, respectivamente.

Tabela 18 – Adicional por partida a frio e comparação com as condições realísticas no período matinal

Poluente	Cenário I		Cenário II		Cenário III		Total
	Adicional (kg)	% em relação ao real	Adicional (kg)	% em relação ao real	Adicional (kg)	% em relação ao real	Adicional real (kg)
CO	170,6	48,2%	284,4	80,3%	398,2	112,4%	354,2
HC	111,9	132,7%	94,8	112,5%	77,7	92,2%	84,3
NO _x	11,4	88,4%	12,3	95,3%	13,3	103,1%	12,9
CO ₂	1535,7	131,4%	1308,2	111,9%	1080,7	92,5%	1168,6

Tendo em vista a tendência da renovação da frota e ao aumento do adicional por partida a frio de CO e NO_x em veículos mais novos, salienta-se a necessidade de considerar a distribuição espacial do adicional por partida a frio, especialmente desses poluentes, em estudos de emissões veiculares. Pois, em virtude destes aspectos apontados, o adicional por

partida a frio nas regiões com maior número de partidas a frio tende a ser mais representativo, se comparado às emissões totais.

Tabela 19 – Adicional por partida a frio e comparação com as condições realísticas no período vespertino

Poluente	Cenário I		Cenário II		Cenário III		Total
	Adicional (kg)	% em relação ao real	Adicional (kg)	% em relação ao real	Adicional (kg)	% em relação ao real	Adicional real (kg)
CO	50,2	48,9%	83,7	81,5%	117,2	114,1%	102,7
HC	32,9	131,1%	27,9	111,2%	22,9	91,2%	25,1
NO _x	3,3	86,8%	3,6	94,7%	3,9	102,6%	3,8
CO ₂	452,2	130,2%	385,2	110,9%	318,2	91,6%	347,3

Tabela 20 – Emissão total e comparação com as condições realísticas no período matinal

Poluente	Cenário I		Cenário II		Cenário III		Total
	Emissão total (kg)	% em relação ao real	Emissão total (kg)	% em relação ao real	Emissão total (kg)	% em relação ao real	Emissão real (kg)
CO	15395,6	357,6%	7764,5	180,4%	1672,5	38,8%	4305,2
HC	2102,9	366,4%	969,9	169,0%	233,9	40,8%	573,9
NO _x	333,5	170,5%	182,6	93,4%	178,2	91,1%	195,6
CO ₂	33937,7	79,8%	42514,8	100,0%	43809,1	103,1%	42502,2

Tabela 21 – Emissão total e comparação com as condições realísticas no período vespertino

Poluente	Cenário I		Cenário II		Cenário III		Total
	Emissão total (kg)	% em relação ao real	Emissão total (kg)	% em relação ao real	Emissão total (kg)	% em relação ao real	Emissão real (kg)
CO	15737,3	342,9%	7790,8	169,8%	1430,2	31,2%	4589,4
HC	2084,3	356,0%	929,5	158,8%	183,8	31,4%	585,5
NO _x	335,1	169,6%	179	90,6%	173,8	88,0%	197,6
CO ₂	33837,5	79,5%	42842,3	100,6%	44343,2	104,1%	42588,5

No que se refere às emissões totais observa-se que quanto melhor a tecnologia empregada na produção do veículo, menor o total de poluentes emitidos, com exceção da emissão de CO₂, conforme Tabela 20 e Tabela 21. Uma possível explicação disso, é que o carbono presente no combustível deixa de ser eliminado na forma de CO e HC, e passa a ser

emitido pelo escapamento na forma de CO₂. Ainda, destaca-se que no terceiro cenário houve uma redução de cerca de 60% na emissão de CO e HC.

5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi aplicado o método de determinação do adicional de emissão por partida a frio em Porto Alegre, através de dados de entrevistas domiciliares e de informações de emissão de veículos brasileiros, originados de São Paulo.

Observou-se que as viagens no horário de pico matinal, entre 7:30h e 8:30h, e vespertino, entre 18:00h e 19:00h, partem principalmente da região central de Porto Alegre. Ainda verificou-se que o adicional por partida a frio no período da manhã é mais significativo em comparação ao período da tarde. Isto ocorre em função do maior número de viagens em partida a frio no período da manhã.

Foi observado que a melhoria da tecnologia empregada na produção dos veículos, como a adoção de injeção eletrônica e conversores catalíticos, contribuem significativamente na redução das emissões de CO, HC e NO_x, com um pouco de acréscimo nas emissões de CO₂. Porém, o adicional por partida a frio de CO e NO_x são as principais emissões dos veículos mais novos, denominados classe C.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O setor de transportes é uma importante fonte de emissão de poluentes atmosféricos de origem antropogênica e representa um grave problema ambiental. Assim, o planejamento e gerenciamento do tráfego e dos sistemas de transportes devem considerar as emissões de poluentes veiculares.

Existem poucos trabalhos no Brasil que abordam as emissões veiculares. A maioria dos estudos é realizada em países desenvolvidos, como Estados Unidos e países europeus. A aplicação de dados e de métodos de estimativas de emissões veiculares provenientes destes países em casos brasileiros, normalmente, necessita a consideração de diferenças tecnológicas, comportamentais e regulatórias entre estes países. Uma consequência desta escassez de trabalhos brasileiros é a inexistência ou pouca disponibilidade de dados referentes às emissões de veículos nacionais.

A revisão teórica permitiu identificar os principais fatores intervenientes nas emissões veiculares. Estes fatores estão relacionados à manutenção e regulagem dos veículos, ao modo de condução e operação dos veículos, à regulamentação dos limites máximos de emissão e a questões tecnológicas, sejam elas relativas aos equipamentos de controle de emissão, à qualidade dos combustíveis e ao sistema de queima do combustível. Outros fatores intervenientes na emissão veicular englobam as questões socioeconômicas, a demanda por transporte e as características do sistema viário, do tráfego, da viagem e do meio ambiente. É importante destacar que estes fatores intervenientes são vinculados e dependentes. Dentre estes fatores, o presente trabalho buscou aprofundar a análise de apenas um deles, o modo de operação.

Dentro desse contexto, foi possível estabelecer um método de avaliação do adicional de emissões veiculares em partida a frio. O método engloba sete etapas. A determinação dessas etapas buscou uma adequação à realidade brasileira, na qual não existem dados detalhados sobre características da frota veicular e os padrões de emissões dos veículos. Ainda, as etapas estão vinculadas à disponibilidade de dados e podem ser adaptadas a diferentes realidades.

A aplicação do método foi realizada na cidade de Porto Alegre. Em função da indisponibilidade de dados detalhados, optou-se por utilizar dados provenientes da pesquisa de entrevistas domiciliares de Porto Alegre feita no ano de 2003 (EDOM, 2004). Essa pesquisa contém informações sobre os veículos utilizados nos deslocamentos. Essa é uma característica importante da pesquisa, uma vez que estes dados possibilitaram uma categorização da frota e um maior detalhamento da aplicação do método. Destaca-se também, que a partir desse banco de dados foi possível identificar se o veículo estava ou não operando em partida a frio.

A partir dos dados da pesquisa de entrevistas domiciliares foi possível mapear as regiões onde ocorreu a maior concentração de viagens que iniciam com partida a frio. Dessa forma, observou-se que o Centro e áreas adjacentes apresentam maior número de viagens iniciadas em partida a frio. Ainda, salienta-se que o período da manhã possui mais viagens em partida a frio, em comparação ao período da tarde.

A determinação do adicional de poluentes emitidos em cada célula de análise na área de estudo foi realizada através de modelo estático de estimativa de emissões. Para tanto, foram utilizados os fatores de emissões correspondentes à frota veicular da cidade de São Paulo, representando valores de emissões de veículos nacionais. Observou-se que as células que apresentaram emissões por partida a frio mais elevadas caracterizam-se por possuírem o maior número de partidas a frio. Além disso, a maioria dos veículos que iniciaram suas viagens nessas células, 71%, é equipada com catalisador e injeção eletrônica. Ainda, no período da tarde, as emissões são mais concentradas em algumas células de análise, em comparação ao período da manhã.

Em relação às emissões totais, observou-se que, apesar dos veículos da classe C serem os responsáveis pela maior fração do adicional de emissões em partida a frio e pelo maior número de viagens, são os veículos da classe A responsáveis por uma maior quantidade de emissões totais de CO e HC. As emissões totais de NO_x e CO₂ sofrem pouca influência em relação à classe dos veículos, sendo mais variáveis de acordo com o número de viagens realizadas.

Através da análise de sensibilidade das classes veiculares, verificou-se que quanto melhor a tecnologia veicular, menores são as emissões totais dos poluentes analisados, que

foram reduzidos em até 60%, com exceção de CO₂, que aumentou em torno de 4%. Por outro lado, a adoção de equipamentos de controle de poluentes proporciona um aumento no adicional de emissão por partida a frio de CO e NO_x.

Frente aos resultados, conclui-se que ainda são necessárias intervenções para a redução das emissões destes poluentes durante o período que o veículo opera em partida a frio e em condições estabilizadas. Estas intervenções podem ser de caráter tecnológico, comportamental, regulamentar, e de planejamento e gerenciamento do tráfego e dos sistemas de transportes. A seguir são descritas algumas medidas que podem contribuir para a redução das emissões veiculares.

Tecnológicas: estimular pesquisas para o desenvolvimento de equipamentos de controle de emissões veiculares que busquem a redução das emissões em condições estabilizadas e por partida a frio, como catalisadores que possuam temperaturas mais baixas de operação ou equipamentos para pré-aquecer ou acelerar o aquecimento dos catalisadores. Ainda, podem ser utilizadas fontes de energia menos poluentes, com ou sem a alteração do tipo de motor comumente utilizado nos veículos.

Comportamentais: conscientizar a população no sentido de evitar acelerações que demandam grande potência do motor, especialmente durante o período de partida a frio, evitar o uso do automóvel em viagens de curta duração e estimular ao uso de veículos aquecidos, ao invés de veículos com motor ou catalisador frios.

Regulatórias: exemplos de medidas regulatórias incluem a implantação de programas de inspeção e manutenção veicular, e redução de limites máximos de emissões veiculares. Ainda, para a redução das emissões em partida a frio, pode-se considerar a imposição de limites máximos de emissões para o período inicial de operação do veículo, tendo em vista que as emissões nesse período têm grande representatividade nas emissões totais de poluentes dos veículos mais novos.

Planejamento e gerenciamento do tráfego e sistemas de transportes: incentivar o uso de modos não motorizados, de sistemas de transporte coletivo, implementação de medidas que aumentem os índices de ocupação veicular, como carona programada (*carpooling*), para os deslocamentos urbanos, ou ainda medidas de restrição ao uso do automóvel, tendem a diminuir as emissões veiculares. Ainda, estimular o desenvolvimento de regiões de uso do

solo misto, reduzindo o número e a distância de viagens, também pode contribuir para a redução das emissões veiculares.

Recomenda-se o aperfeiçoamento da metodologia através da consideração de outras variáveis pertinentes ao acréscimo de emissão. Estas variáveis podem ser consideradas através da adição de fatores específicos de emissão, ou fatores de ajuste, para a presença de semáforos ou de topografia acidentada, por exemplo. Ainda, podem ser adotadas medidas que busquem um maior detalhamento de algumas das etapas propostas.

Como forma de aprimorar a aplicação do método proposto, sugere-se a realização de medições de poluentes para frotas locais, em dinamômetros de chassi ou em medições reais, para a determinação de fatores de emissões. A consideração de outras classes de veículos, como os veículos equipados com motor ciclo Diesel, no cálculo do adicional de emissão por partida a frio pode também qualificar as análises.

REFERÊNCIAS

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

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**, v. 128, p. 182-190, 2002.

ANDRÉ, J.M.; JOUMARD, R., Modelling of cold starts excess emissions for passenger cars. **INRETS Report LTE 0509**. França. 2005

ANDRÉ, M., Real-world driving cycles for measuring cars pollutant emissions - Part A: The Artemis European driving cycles. **INRETS Report LTE 0411**. França. 2004

ANDRÉ, M., The ARTEMIS European driving cycles for measuring car pollutant emissions. **Science of Total Environment** v. 334-335, p. 73-84. 2004

ANDRÉ, M.; HAMMARSTRÖM, U., Driving speeds in Europe for pollutant emissions estimation. **Transportation Research Part D** v. 5, p. 321-335, 2000.

ARTEMIS – Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems. Disponível em: <<http://www.trl.co.uk/ARTEMIS>>. Acesso em: 5 set. 2007.

AZUAGA, D. **Danos ambientais Causados por Veículos Leves no Brasil**. Tese de Mestrado. COPPE /UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2000.

BACHMAN, W.H. **Towards a GIS-Based Modal Model of Automobile Exhaust Emissions**. Thesis – Doctor of Philosophy in Civil and Environmental Engineering. 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.

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

BOULTER, P. G.; BARLOW, T.; MCCRAE, I.S.; LATHAM, S.; OSCAR: On-board emission measurements in central London. **TRL REPORT UPR/IE/034/06**. 2006

BRANCO, S.M.; MURGEL, E. **Poluição do ar**. São Paulo: Editora Moderna, 1995.

BRASIL, Registro nacional de acidentes e estatísticas de trânsito. Departamento Nacional de Trânsito (DETRAN). Disponível em: <http://www2.cidades.gov.br/renaest> Acesso em: 12 jan. 2008.

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. 2004.

BRUNDELL-FREIJ, K.; ERICSSON, E. Influence of Street Characteristics, Driver Category and Car Performance on Urban Driving Patterns. **Transportation Research Part D**, v. 10, p. 213-229. 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.

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

DAVAKIS, E.; ANDRONOPOULOS S.; KOVALETS, I.; GOUNARIS, N.; BARTZIS, J.G.; NYCHAS, S.G., Data assimilation in meteorological pre-processors Effects on atmospheric dispersion simulations. **Atmospheric Environment**, n. 41, p. 2917-2932. 2007

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**, v. 31, n. 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** v. 34, p. 4649-4655. 2000.

DIESELNET. **Emission Test Cycles**. Disponível em: <<http://www.dieselnet.com/standards/cycles>>. Acesso em: 15 dez. 2007.

EDOM Pesquisa de Origem e Destino de Porto Alegre - Entrevista Domiciliar - EDOM 2003. Relatório Técnico. EPTC/Magna/TIS, Porto Alegre, 2004.

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

EPA (Environmental Protection Agency). Modelling and inventories. Disponível em: <<http://www.epa.gov/otaq/mobile.htm>> Acesso em: 18 dez. 2007.

EPA. Biogenic Sources Preferred Methods: Final Report. In: **Emission Inventory Improvement Program**. v. 5. Research Triangle Park, North Carolina: Radian Corporation, 1996.

EPA. Cold Temperature Effects on Vehicle HC Emissions: **Draft Report**. Office of Transportation and Air Quality, 2006.

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.

ERICSSON, E. Variability in urban driving patterns. **Transportation Research Part D**, v. 5, p. 337-354. 2000.

- 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.
- FÄRNLUND, J.; ENGSTRÖM, C. The representativeness of driving cycles in real world traffic. 2001
- FEAM. Poluição Veicular. Disponível em: <www.feam.gov.br>. Acesso em: 18 ago. 2006.
- Frey, H.C.; Unal, A. Use of On-Board Tailpipe Emissions Measurements for Development of Mobile Source Emission Factors. **International Emission Inventory Conference "Emission Inventories - Partnering for the Future"**. Atlanta, GA. 2002.
- GOYAL, S.K.; GHATGE, S.V.; NEMA, P.; TAMHANE, S.M. Understanding urban vehicular pollution problem vis-a-vis ambient air quality - Case study of a megacity (Delhi, India). **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 119, p. 557–569, 2006.
- HANSEN, M.; ARIOTTI, P.; IMASATO, T.; CYBIS, H.B.B. Determinação do acréscimo de emissões devido à partida a frio para a estimativa de poluentes veiculares em áreas urbanas. **Anais do XXI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**, ANPET, Rio de Janeiro, 2007.
- HEYWOOD J. **Internal combustion engine fundamentals**. McGraw-Hill, New York. 1988.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat>>. Acesso em: 12 jan. 2008.
- JENSEN, S.S., Driving patterns and emissions from different types of roads. **The Science of the Total Environment**, v. 169 p. 123-128. 1995.
- JOUMARD, R.; SÉRIÉ, E., Modelling of cold start emissions for passenger cars. MEET Project. **INRETS Report LTE 9931**. 1999

JOUMARD, R.; VIDON, R.; PRUVOST, C.; TASSEL, P.; DE SOETE, G. Evolution des émissions de polluants des voitures particulières lors du départ à froid. **The Science of the Total Environment**, v. 169, p. 185-193, 1995.

KEAN, A.J., HARLEY, R.A.; KENDALL, G.R. Effects of Vehicle Speed and Engine Load on Motor Vehicle Emissions. **Environment Science Technology** v.17, p. 3739 – 3746. 2003.

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/lte/publi-autresactions/fichesresultats/ficheartemis/artemis.html>>. Acesso em: 20 nov. 2007.

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

LENTS, J. et al. Measurement of In-Use Passenger Vehicle Emissions in Three Urban Areas of Developing Nations. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), International Sustainable Systems Research Center (ISSRC), University of California at Riverside (UCR), University of Chile (UCH). 2005.

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.

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

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**. Tese de Mestrado, COPPE /UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2005.

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

MELCHIORS, D.J.; **Uma comparação entre o trânsito urbano de veículos leves em Porto Alegre e o ciclo padrão de emissões.** Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2007.

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.

MILHOR, C.E. **Sistema de desenvolvimento para controle eletrônico dos motores de combustão interna ciclo Otto.** Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MONTAZERI-GH, M.; NAGHIZADEH, M. Development of car drive cycle for simulation of emissions and fuel economy. **Proceedings 15th European Simulation Symposium**, Delft, 2003.

MONTEIRO, A.G. **Estratégia de redução de emissões de poluentes no setor de transportes por meio de substituição modal na região metropolitana de São Paulo.** Tese de Doutorado. Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ, 1998

MOREY, J.E.; LIMANOND, T.; NIEMEIER, D.A. Validity of chase car data used in developing emission cycles. **Journal of Transportation and Statistics**, v. 3, n. 2, p.15-28, 2000.

NOVAES, A. G. N., **Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição.** São Paulo: Campus, 2004.

OSTERMAYER, F. **Estudo das emissões de gases formadores do efeito estufa e balanço resultante da conversão de motores à gasolina, de uma frota de veículos leves, para gás natural e álcool hidratado.** Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2004.

OTTOSSON, J. Energy Management and Control of Electrical Drives in Hybrid Electrical Vehicles. Faculty of Engineering, Lund. 2007.

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.

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

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.

SINGER B. C. et al. A Fuel-Based Approach to Estimating Motor Vehicle Cold-Start Emissions. Berkeley: University of California/Transportation Center, 1999.

STURM P.J., P. BOULTER, P. DE HAAN, R. JOUMARD, S. HAUSBERGER, J. HICKMANN, 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, Áustria. 1998.

SZINVELSKI, I.M. **A Poluição Veicular Ambiental** - Aspectos Legais. Monografia de Especialização. PPPG/Ulbra, Canoas. 2005.

SZWARCFITER, L. **Opções para o aprimoramento do controle de emissões de poluentes atmosféricos por veículos leves no Brasil: uma avaliação do potencial de programas de inspeção e manutenção e de renovação acelerada da frota**. Tese de Doutorado. Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ, 2004.

TRANSPORT RESEARCH LABORATORY (TRL). Methodology for Calculating Transportation Emission and Energy Consumption. MEET Project. **Report SE/491/98**. 1999.

TZIRAKIS, E.; PITSAS, K.; ZANNIKOS, F.; STOURNAS, S., Vehicle emissions and driving cycles: comparison of the athens driving cycle (ADC) with ece-15 and european driving cycle (EDC). **Global Nest Journal**. v. 8, n. 3,. p. 282-290. 2006.

VILANOVA, L.C. Contribuição das emissões veiculares na qualidade do ar atmosférico da região metropolitana de Porto Alegre. **Dissertação de Mestrado**. Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1998.

WEILENMANN, M.; SOLTIC, P.; SAXER, C.; FORSS, A.M.; HEEB, N. Regulated and nonregulated diesel and gasoline cold start emissions at different temperatures. In: **Atmospheric Environment**. v. 39, n. 13. Elsevier p. 2433-2441. 2005.

WENZEL, T; SINGER, B. C.; SLOTT, R. Some Issues in the Statistical Analysis of Vehicle Emissions. **Journal of Transportation and Statistics**. v. 3, p. 1-14. 2000.

YU, L. Remote vehicle exhaust emission sensing for traffic simulation and optimization models. **Transportation Research Part D**, v. 3, p. 337-347, 1998.

ANEXO - FATORES DE EMISSÃO DETERMINADOS POR LENTS ET AL. (2005)

Table V-5 Sao Paulo Average Running FTP Emissions Rates for each Technology Type Tested¹

IVE Class	Description	CO (g/km)	CO2 (g/km)	NOx (g/km)	THC (g/km)
2	light carb high mi	87	139	0.5	8.2
5	med carb high mi	69	193	2.8	12.2
28	carb 3w med mi	113	112	0.2	11.1
29	carb 3w high mi	50	157	0.5	4.9
50	med spfi high mi	26	231	0.8	3.4
58	med spfi egr med mi	13	258	1.4	2.5
81	light spfi 3w low mi	6	213	0.3	0.4
84	med spfi 3w low mi	6	235	0.4	0.6
85	med spfi 3w med mi	19	254	2.0	2.1
117	light mpfi 3w low mi	3	200	0.4	0.2
118	light mpfi 3w med mi	8	189	1.1	0.9
120	med mpfi 3w low mi	2	245	0.5	0.3
121	med mpfi 3w med mi	12	218	0.9	2.1
122	med mpfi 3w high mi	6	236	1.3	0.7
124	heavy mpfi 3w med mi	37	335	0.9	2.8
244	retrofit ng light carb 3w med mi	1	206	2.3	2.1
306	light ng fi 3w low mi	3	180	0.9	0.9
307	light ng fi 3w med mi	9	156	0.8	1.2
309	med ng fi 3w low mi	1	196	0.3	0.6
310	med ng fi 3w med mi	17	206	1.9	2.7
313	heavy ng fi 3w med mi	10	302	2.0	2.0
572	etoh retrofit med 2w high mi	17	205	1.2	6.8
575	etoh retrofit heavy 2w high mi	38	156	0.7	7.7
606	etoh retrofit med 3w low mi	1	244	0.2	0.2
635	oem etoh carb high mi	31	189	1.1	5.2
675	oem etoh light fi 3w low mi	2	230	0.3	0.1
Average of All Light Duty Vehicles Tested		11	215	0.8	1.5

[1] The measured emissions values were normalized to the FTP cycle using the IVE model for comparison purposes. It should be noted that the FTP referred to here includes only the running part of the FTP cycle (bags 2 and 3). The value was not normalized for altitude, fuel, temperature, humidity; although, the temperature and humidity were somewhat close to those called for in the standard FTP testing cycle on the days of testing.