

# **ADAPTAÇÃO DO MODELO DE EMISSÃO MODAL CMEM PARA A FROTA DA CIDADE DE MARINGÁ – PARANÁ**

Definição de estilo: Título 3:  
Fonte: Negrito, Não Itálico

**Ed Pinheiro Lima**

**Marcelino Luiz Gimenes**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

Universidade Estadual de Maringá

**Sergio Henrique Demarchi**

Departamento de Engenharia Civil

Universidade Estadual de Maringá

## **RESUMO**

Neste artigo o modelo de emissão CMEM é adaptado para a frota da cidade de Maringá – Paraná, adotando como parâmetros de comparação os fatores médios ponderados de emissão de poluentes determinados para a cidade. Estes fatores ponderados foram obtidos através dos fatores médios de emissão, corrigidos segundo a metodologia da CETESB, e com as frações da frota considerada correspondentes às quatro fases do PROCONVE. Para cada fase do PROCONVE adotou-se um veículo composto, cujas características foram inseridas no CMEM para o cálculo dos fatores médios utilizando o ciclo FTP em condições similares as do teste padronizado pela NBR-6601. Os parâmetros do modelo foram ajustados para aproximar os fatores de emissão do CMEM aos fatores médios ponderados calculados para a frota da cidade. Após os ajustes dos parâmetros, foram obtidos valores dos fatores médios similares aos fatores médios ponderados da frota.

## **ABSTRACT**

In this article the CMEM modal emission model is adapted for the city of Maringá – Paraná fleet by comparing the average factors of pollutants emission determined for the city. These average factors were obtained by weighting the corrected emissions factors, calculated according to CETESB's methodology, with the corresponding fleet fractions, classified according to the four phases of PROCONVE program. For each of PROCONVE's phase a composite vehicle was attributed. Characteristics of composite vehicles were inserted in the CMEM and the average factors for the FTP cycle were calculated in similar conditions to those of the test standardized by NBR-6601. As result of the adjustments of the CMEM's parameters, adapted average factors were obtained, and their values are similar to the fleet's average weighed factors.

## **1. INTRODUÇÃO**

O crescimento das cidades e a conseqüente industrialização têm trazido, além da desejável modernização, a degradação ao meio ambiente. Dentre as fontes poluidoras dos grandes centros, as emissões de poluentes devido à queima de combustíveis fósseis têm desempenhado um papel principal, sendo que os veículos de combustão interna representam uma das maiores preocupações. Os principais poluentes emitidos pelos veículos de combustão interna são o monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC), óxidos de nitrogênio (NOx), materiais particulados (MP) e, em menor quantidade, o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), além dos aldeídos (RCHO), associados principalmente ao álcool hidratado e ao anidro, que é adicionado a gasolina brasileira. Segundo dados da CETESB (2005), a contribuição dos veículos leves, pesados, motocicletas e similares nas emissões de HC, CO e NOx na Região Metropolitana de São Paulo em 2004 foi, respectivamente, 98%, 97% e 96%, sendo que a contribuição dos veículos leves de ciclo Otto foi de 59%, 67% e 16%.

Por estes motivos, existe o interesse na quantificação das emissões veiculares, para se ter noção do impacto dessa poluição na qualidade do ar. Para que as emissões destes poluentes possam ser estimadas, pode-se adotar duas abordagens distintas: modelagem baseada na velocidade média e modelagem dinâmica. A primeira, destinada a elaboração de inventários, se baseia em dados como as médias de quilometragem e os fatores de emissão. A segunda

determina as emissões, a cada segundo, de um veículo ou de uma frota, sendo destinada à avaliação do impacto na variação de certos cenários, utilizando como dados de entrada, geralmente, as informações de simuladores de tráfego.

A vantagem de se utilizar modelos de emissão dinâmicos é a possibilidade de se estimar as emissões de uma pequena frota em determinado período de tempo. Entretanto, a aplicação desta modelagem se torna inviável em maior escala, tendo como desvantagem a grande demanda computacional. Os modelos de emissão modais têm sua utilização restrita no Brasil devido à serem desenvolvidos para veículos de outros países, com características muito distintas das da frota nacional. Além disso, para o caso de veículos leves, esses modelos não são prontamente adaptáveis às diferenças entre os combustíveis, principalmente a adição de álcool anidro à gasolina e ao álcool hidratado, os quais apresentam diferentes impactos no consumo e nas emissões.

Jacondino e Cybis (2002) avaliaram dois modelos de emissão acoplados a simuladores de tráfego, os modelos de emissão do SATURN e do DRACULA. Utilizando estes dois modelos e o modelo de emissão CMEM, os mesmos autores apresentaram em Jacondino e Cybis (2003) uma análise nos efeitos de se agregar as variáveis do tráfego na estimativa das emissões. Em Lima *et al.* (2004a), é feita uma análise do comportamento das emissões e do consumo de um veículo, a cada segundo, em quatro cenários diferentes de um trecho urbano de uma rodovia com auxílio do CMEM. Em Lima *et al.* (2004b), é feita uma adaptação do modelo de emissão VT-Micro, acoplado ao Integration, à frota nacional. No entanto, neste último trabalho, as adaptações para a frota nacional ficaram restritas às características dos veículos, sem que houvesse uma adaptação mais completa para a frota local.

Neste trabalho é desenvolvido um método para adaptar o modelo CMEM à frota da cidade de Maringá, similar ao utilizado em Lima *et al.* (2004b) com o VT-Micro, mas com a ampla possibilidade de ajuste oferecida pelo CMEM. Entretanto, esta ampla possibilidade de ajustes oferece também uma maior complexidade, já que, por ser um modelo paramétrico que representa os comportamentos físicos e químicos das emissões, cada um de seus 55 parâmetros também têm um significado físico ou químico. A escolha do CMEM se deve à este ser um modelo conceituado e com ampla utilização, além de ser um modelo de emissão gratuito. Este artigo apresenta, primeiramente, uma breve introdução às emissões veiculares (item 2) e aos modelos de emissão (item 3). Em seguida, será apresentada a metodologia (item 4), seguida dos resultados e discussões (item 5) e as considerações finais (item 6).

## **2. EMISSÕES VEICULARES**

Durante a operação, os veículos estão submetidos aos eventos característicos do tráfego, como as situações de ultrapassagens, conversão em interseções e paradas causadas pelos semáforos e/ou congestionamentos. Estes eventos têm um impacto significativo no consumo e na emissão de poluentes, pois provocam alterações na forma de operação do motor do veículo, onde cada poluente, para cada evento, tem um comportamento distinto de emissão. Além disso, motores operando em baixas temperaturas, como no caso da partida a frio, tendem a emitir uma quantidade significativamente maior do que numa situação de motor já aquecido.

De acordo com a origem, as emissões veiculares podem ocorrer pelo escape e pela

evaporação (cárter, carburador e tanque de combustível). As emissões de escape ocorrem tanto nos motores de ciclo Otto quanto nos de ciclo Diesel. As emissões evaporativas, que se constituem de hidrocarbonetos (HC), ocorrem somente nos motores de ciclo Otto, sendo praticamente nulas nos de ciclo Diesel. No entanto, nos modelos mais recentes dos motores de ciclo Otto, as emissões evaporativas são também praticamente nulas (La Rovere *et al.*, 2002).

Dentre as emissões de escape, destacam-se o monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC), óxidos de nitrogênio (NOx) e, no caso dos veículos de ciclo Diesel, material particulado (MP). Estes poluentes são formados em todos os processos de combustão mas, especificamente, nos motores dos veículos são produzidos mais de cada poluente por unidade de combustível queimado. Esta maior produção se deve à vários fatores, tais como a operação sempre com deficiência de oxigênio, o pré-aquecimento das misturas ar/combustível, a combustão não permanente, a atomização insuficiente do combustível e o sistema de refrigeração do motor, que impede a queima por igual da mistura comburente (De Nevers, 1995; Baumbach, 1996).

O monóxido de carbono (CO) é o produto intermediário no processo de combustão do carbono em dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) mas, no caso de haver um déficit de oxigênio na relação ar/combustível, será produto final. Em situações de enriquecimento da mistura (com déficit de oxigênio), a combustão não é completa e o excesso de carbono presente no combustível é parcialmente oxidado em CO. No entanto, mesmo que exista uma quantidade suficiente de O<sub>2</sub>, existirão emissões de CO devido à possível oxidação parcial dos hidrocarbonetos (HC) (Cappiello, 2002). Mesmo com a oxidação completa do CO, a emissão do CO<sub>2</sub> representa um problema. Embora o dióxido de carbono seja encontrado naturalmente na atmosfera e não seja considerado um poluente, a sua presença de forma não natural contribui com o problema de aquecimento global devido a este ser um dos Gases de Efeito Estufa (GEE). Diferente dos outros gases principais da exaustão dos veículos, as emissões de CO<sub>2</sub> não diminuíram com avanços tecnológicos. Na verdade, as melhorias no processo de combustão e na eficiência do catalisador aumentam as emissões de CO<sub>2</sub>.

Segundo De Nevers (1995), os hidrocarbonetos (HC) podem ser encontrados sem ser queimados na exaustão dos motores de combustão interna de ciclo Otto em todas as situações de mistura ar/combustível. Em condições estequiométricas e de mistura rica as emissões de HC são geralmente proporcionais ao consumo de combustível e, em condições de mistura pobre, pode haver uma quantidade remanescente de combustível em longos períodos de desaceleração, onde a queda acentuada de combustível resulta numa interrupção na combustão, algo que afeta as emissões, mas de forma menos significativa que as acelerações (Cappiello, 2002). Contudo, parte destes HC remanescentes pode ser retida como gás residual no cilindro e parte pode ser oxidada no pelo catalisador (Manahan, 1994).

O termo genérico óxidos de nitrogênio (NOx) é utilizado para descrever a soma dos gases monóxido e dióxido de nitrogênio (NO e NO<sub>2</sub>), dois dos componentes de nitrogênio mais emitidos em processos de combustão. Normalmente, as quantidades de NO formadas na combustão são muito maiores que as de NO<sub>2</sub> mas, quando entra em contato com o ambiente após a combustão, o NO se transforma rapidamente em NO<sub>2</sub> (Carvalho e Lacava, 2003). Em condições de empobrecimento da mistura os NOx tendem a ser formados devido ao excesso de oxigênio e em condições estequiométricas a temperatura de combustão e, conseqüentemente, a emissão de NOx, aumentam com a queima de combustível em altas

taxas.

### **3. MODELOS DE EMISSÃO VEICULAR**

Com o objetivo de estimar as emissões dos poluentes de origem veicular, vários modelos de emissão têm sido desenvolvidos. Estes modelos de emissão podem ser obtidos por modelagem baseada na velocidade média ou modelagem dinâmica. Em ambos os casos o modelo é calibrado utilizando, geralmente, medidas de dinamômetros de chassi nos testes de ciclos de condução. Capiello (2002) menciona que na modelagem baseada na velocidade média, no teste do dinamômetro, as emissões podem ser medidas ou como sendo o total gerado durante o ciclo de condução ou durante uma única amostra (balão) e na modelagem dinâmica as emissões são medidas continuamente, geralmente a cada segundo.

#### **3.1. Modelagem baseada na velocidade média**

Os modelos baseados na velocidade média utilizam como dados de entrada, geralmente, os dados de saída de modelos de tráfego estáticos macroscópicos ou de previsões da quilometragem ou milhagem totais (Capiello, 2002). Este tipo de modelagem tem a vantagem de possibilitar a realização de comparações com estudos anteriores mas, devido à predição de emissões em níveis mais agregados, estes modelos não conseguem estimar de forma adequada as variações nas emissões devido às fases de aceleração e desaceleração dos veículos. Em situações de tráfego urbano, em muitos casos, a mesma velocidade média pode corresponder às condições de operação dos veículos que diferem de entre si. Sendo assim, esta aproximação pode subestimar as emissões de forma significativa. Desta forma, estes modelos são tipicamente aplicados em análises em larga escala e em casos onde a velocidade média caracteriza adequadamente o fluxo de veículos (Capiello, 2002).

#### **3.2. Modelagem dinâmica**

Modelos de emissão dinâmicos, ou modais, segundo Ahn (2002), apresentam uma relação entre as taxas instantâneas de emissão e as medidas instantâneas de variáveis explicativas, como as medidas da velocidade, e medidas mais abrangentes, como velocidade do motor, marcha atual e da condição de uso do ar-condicionado. As características do veículo, do tráfego, do ambiente e da via, a cada segundo, são necessárias para a estimativa do consumo de combustível e as emissões (Rakha *et al.*, 2003). Estes modelos de emissão dinâmicos podem ser classificados em três grupos principais: modelos baseados em tabelas de busca, modelos estatísticos baseados em regressão e modelos paramétricos.

As tabelas de busca têm a forma de matrizes multidimensionais onde, para cada categoria de veículo e cada poluente, estas matrizes armazenam em cada célula o valor da emissão instantânea, de acordo com os dados sobre a velocidade e a aceleração no mesmo instante de tempo. Segundo Capiello (2002), as vantagens desta aproximação são sua fácil implementação e a baixa demanda computacional, sendo utilizados em larga escala, principalmente na Europa. No entanto, esta aproximação apresenta vários problemas, como a flexibilidade insuficiente em levar em consideração fatores como o greide da via, uso de acessórios e o histórico dos modos de operação, sendo que alguns destes fatores podem ser representados por meio de uma biblioteca de mapas de emissão ou fatores de correção (Teng *et al.*, 2001).

Os modelos estatísticos baseados em regressão utilizam funções instantâneas da velocidade e da aceleração do veículo, ou então variáveis modais, como variáveis explicativas. Segundo

Capiello (2002), apesar desta aproximação não apresentar os problemas de discretização e esparsamento, comuns nos modelos baseados em tabelas de busca, a interpretação física pode ser difícil. Dois exemplos de modelos de regressão são o POLY (Teng *et al.*, 2001) e o VT-Micro (Ahn, 2002).

Os modelos paramétricos representam os fenômenos físicos e químicos que geram as emissões, sendo usualmente compostos de módulos que simulam, passo a passo, o processo, sendo cada módulo calibrado com medidas de laboratório, assim como com dados das especificações dos veículo (Capiello, 2002). Estes modelos têm como variável primária o consumo de combustível e, como variável alternativa, a potência específica do veículo. Segundo Barth *et al.* (2000) os modelos paramétricos podem ser adaptados, em teoria, a qualquer tipo de veículo com tecnologias similares e a qualquer modo de operação ou condição do veículo, bastando para isso o ajuste de seus parâmetros. O autor cita que estes modelos possuem uma base física detalhada e flexível, que define as variáveis e os parâmetros a serem incluídos ao se modelar emissões, podendo levar em consideração o histórico dos modos de operação do veículo e o greide da via. Contudo, devido ao alto nível de detalhamento, estes modelos necessitam do conhecimento de várias especificações do veículo e uma modelagem relativamente complexa dos processos envolvidos (Capiello, 2002). Além disso, a alta demanda computacional pode restringir à modelagem as emissões de somente um veículo, um trecho ou uma interseção. Um dos modelos de emissão paramétricos é o CMEM, que será tratado em detalhes no item 3.2.1.

### **3.2.1. CMEM – Comprehensive Modal Emission Model**

O CMEM (Barth *et al.*, 2000) foi desenvolvido por pesquisadores da Universidade da Califórnia em Riverside com o propósito de representar com precisão as emissões produzidas por veículos e caminhões leves como função do modo de operação. Com esta aproximação, Capiello (2002) afirma que o modelo evita os problemas relacionados a certos modelos modais, como os baseados em tabelas de busca, que se baseiam nas emissões em condições de equilíbrio. No desenvolvimento do modelo, as emissões do motor e do escape de mais de 300 veículos, destes 30 grandes emissores, foram medidas em laboratório em um nível de resolução a cada segundo em três ciclos de condução, FTP-75, US06 e MEC (Modal Emission Cycle) (Rakha *et al.*, 2003). Estes veículos foram agrupados em categorias, sendo então representadas por veículos compostos, para os quais foram determinados os *parâmetros de calibração*.

Com uma aproximação parametrizada física simples, o modelo CMEM decompõe todo o processo de emissão em componentes que correspondam ao fenômeno físico associado à operação do veículo e à emissão de poluentes (Rakha *et al.*, 2003). Ao todo, o modelo consiste de seis módulos (Barth *et al.*, 2000): demanda de força, velocidade do motor, taxa ar/combustível, consumo de combustível, emissões na saída do motor e fração passante no catalisador. O modelo representa quatro diferentes modos de operação do motor do veículo, partida a frio, mistura estequiométrica, mistura rica e mistura pobre. Barth *et al.* (2000) ressaltam que o modelo geral se aplica a todas as categorias de veículos do modelo, sendo que diferenças entre os sub-modelos só são perceptíveis em seus parâmetros. Cada sub-modelo utiliza como entrada três variáveis dinâmicas de operação, que incluem velocidade a cada segundo, greide e uso de acessórios, como ar-condicionado, sendo que estes dois últimos podem ser especificados, muitas vezes, como entradas estáticas ou parâmetros.

Além destas variáveis de operação, cada sub-modelo do CMEM utiliza 55 parâmetros estáticos de forma a caracterizar as emissões do escape para a categoria apropriada (Barth *et al.*, 2000). Estes parâmetros se dividem, primeiramente, em dois grandes grupos, 13 *parâmetros disponíveis* e 42 *parâmetros de calibração*. Os *parâmetros disponíveis* são os que se referem às características da mecânica dos motores dos veículos e se dividem em dois tipos, *parâmetros específicos do veículo* e *parâmetros gerais do veículo*. Em relação aos *parâmetros de calibração*, estes devem ser deduzidos a partir de dados de medidas de testes e se sub-dividem em *insensíveis* (23 parâmetros) e *sensíveis* (19 parâmetros). Segundo os autores do modelo, no grupo *insensíveis*, os parâmetros do modelo ou já são conhecidos com antecedência ou têm um impacto relativamente pequeno nas emissões em geral. Os parâmetros do grupo *sensíveis* devem ser determinados, segundo os autores, com cautela e se dividem em partida à frio (7 parâmetros), estabilização à quente do catalisador (10 parâmetros) e mistura rica (2 parâmetros).

Para o cálculo das emissões, o CMEM, em sua versão de execução de lote, utiliza três arquivos de entrada: controle, definições e atividade. No arquivo de controle são inseridos os parâmetros de cada categoria adotada. No arquivo de definições, o ID de cada veículo é associado a uma categoria, assim como as informações de sobre a partida (a frio ou a quente) e umidade específica do ar. No arquivo de atividades são inseridos os valores de velocidade, aceleração e greide de cada veículo em função do tempo. Como resultado, o CMEM fornece a estimativa das emissões (CO, HC, NOx e CO<sub>2</sub>) e o consumo de combustível, em dois arquivos, um fornecendo as emissões e o consumo a cada segundo por ID do veículo e o outro fornecendo um resumo da simulação, com os fatores médios de emissão por ID do veículo em g/km e a distância total percorrida.

#### 4. METODOLOGIA

A calibração do CMEM é um processo complexo, onde os parâmetros são determinados em processos separados (Barth *et al.*, 2000). Além disso, o processo de calibração necessita dos dados de vários veículos, a cada segundo, em três ciclos de condução distintos. No Brasil, a determinação das emissões dos veículos leves se dá somente por um ciclo, o FTP, segundo a NBR-6601, e estão disponíveis somente dados dos fatores médios, sendo que as emissões a cada segundo, desagregadas por veículo, não estão disponíveis. Sendo assim, na metodologia adotada, a frota considerada é subdividida de forma a obter veículos compostos, representativos das fases do PROCONVE (item 4.1). Em seguida, são calculados os fatores médios ponderados de emissão (HC, CO, NOx e CO<sub>2</sub>) para a frota considerada utilizando-se os fatores de emissão da CETESB para servirem de parâmetro (objetivo) no ajuste do CMEM (item 4.2). A partir dos fatores médios ponderados são determinadas as categorias a serem utilizadas usando os *parâmetros específicos* de modelos nacionais (item 4.3) para a adaptação dos *parâmetros de calibração* do CMEM (item 4.4).

##### 4.1. Composição da frota

Para este estudo, serão utilizados os dados da frota da cidade fornecido pelo DETRAN do Paraná. Serão considerados somente os veículos com ano de fabricação igual ou superior a 1975, pois poucos veículos com mais de 30 anos foram observados nas filmagens realizadas em cruzamentos da cidade. Na tabela 1 é apresentada a frota considerada do ano de 2004 e as porcentagens dos veículos desconsiderados. A frota foi agregada por fase do PROCONVE, sendo que VC0 se refere a um veículo composto representativo da classe de veículos pertencentes à fase anterior ao PROCONVE (1988) e, sucessivamente, VC3 à terceira fase

(após 1997).

**Tabela 1:** Frota considerada agregada pelos veículos compostos

Combustível	Frota cadastrada	Veículos desprezados	Frota considerada			
			VC0 (22%) <sup>2</sup>	VC1 (10%) <sup>2</sup>	VC2 (21%) <sup>2</sup>	VC3 (47%) <sup>2</sup>
Álcool	19.018	11 (0,06%)	9.712 (36%)	4.134 (35%)	2.573 (10%)	2.588 (5%)
Gasolina C <sup>1</sup>	106.003	4.000 (3,77%)	17.378 (64%)	7.624 (65%)	22.214 (90%)	54.787 (95%)
Total	125.021	4.011 (3,20%)	27.090	11.758	24.787	57.375

<sup>1</sup> Adição de 22% de álcool anidro <sup>2</sup> Participação em relação à frota considerada

fonte: elaborada a partir de dados do DETRAN-PR (2005).

#### 4.2. Determinação dos fatores de emissão ponderados

Os fatores de emissão são ponderados para cada fase do PROCONVE. Para cada fase, a ponderação foi feita primeiramente considerando o número de veículos com mesmo ano de fabricação e os fatores de emissão corrigidos de HC, CO, NOx e CO<sub>2</sub>, para depois ser considerada a participação por combustível. Os fatores de emissão utilizados são os encontrados em CETESB (2005) e MCT (2002), corrigidos pelos respectivos fatores de deterioração, adotados também pela CETESB. No caso do NOx, o fator de deterioração utilizado foi 1, conforme recomendado em MCT (2002). Para o CO<sub>2</sub>, utilizou-se também o fator de deterioração igual a 1, por não ter sido encontrado este valor na literatura. A obtenção dos fatores de emissão ponderados para o CO<sub>2</sub> se faz necessária porque estes permitem um ajuste dos parâmetros de forma mais precisa, já que no CMEM alterações nas emissões de CO<sub>2</sub> e/ou no consumo se refletem nas emissões de HC, CO e NOx. Estes fatores de emissão ponderados obtidos para cada fase do PROCONVE, vistos na tabela 2, servirão de referência para o ajuste de parâmetros do CMEM. Para a determinação do fator de consumo do veículo composto VC3, adotou-se o valor médio dos valores de consumo disponíveis em CETESB (2005).

**Tabela 2:** Fatores médios ponderados determinados para a frota considerada.

Veículo composto	HC (g/km)	CO (g/km)	NOx (g/km)	CO <sub>2</sub> (g/km)	Consumo (g/km)
VC0	3,761	40,142	1,397	170,941	–
VC1	1,808	17,261	1,393	171,904	–
VC2	0,754	6,348	0,616	191,021	–
VC3	0,172	0,823	0,182	194,734	68,61 <sup>1</sup> (63,07) <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Densidade: gasolina A 735 g/L – álcool anidro 791,5 g/L – álcool hidratado 808 g/L

<sup>2</sup> Fator de consumo para gasolina A equivalente ao fator de emissão de CO<sub>2</sub>

#### 4.3. Determinação das categorias e parâmetros específicos

Para os veículos compostos VC0 e VC1 adotou-se um motor 1.6, enquanto que para os demais adotou-se um motor 1.0. Foram utilizados como *parâmetros específicos* as características do motor de veículos 1.6 e 1.0, conforme a tabela 3, que mostra os principais parâmetros. Para a obtenção destes *parâmetros específicos*, para cada veículo composto foram ponderados os parâmetros das versões a álcool e a gasolina, de acordo com a participação mostrada na tabela 1. Para cada veículo composto, a categoria foi selecionada com a substituição das especificações do motor em cada categoria do CMEM onde, utilizando o ciclo FTP como arquivo de atividades, foi selecionada a categoria em que os fatores de emissão resultantes ficassem mais próximos em relação aos fatores médios ponderados mostrados na tabela 3.

**Tabela 3:** Principais *parâmetros específicos* e categoria adotada por veículo composto

Parâmetro	Descrição	VC0	VC1	VC2	VC3
Ed (L)	Volume	1,596	1,596	0,999	0,999
masskg (kg) <sup>1,3</sup>	massa	1024	1023	948	948
S (rpm/mph) <sup>2,3</sup>	Relação rpm/vel.	44,54	44,54	56,97	57,35
Qm (ft.lb) <sup>3</sup>	torque máximo	101,92	101,50	66,27	65,99
Nm (rpm) <sup>3</sup>	Rotação @ Qm	4118	4233	4396	4461
Zmax (hp) <sup>3</sup>	potência máxima	68,95	68,39	63,72	63,96
Np (rpm) <sup>3</sup>	Rotação @ Zmax	5500	5500	5896	5961
Categoria adotada		1	2	3	8

<sup>1</sup> Adicionada a massa do motorista – padrão do brasileiro: 75 kg (IBGE, 2005).

<sup>2</sup> Calculada para pneus 175/70 R13. <sup>3</sup> Ponderados pela distribuição por combustível, conforme tabela 1.

fonte: adaptado de Volkswagen (2003).

#### 4.4. Ajuste dos parâmetros de calibração

Para ajustar os *parâmetros de calibração* do CMEM para a frota da cidade, foram calculadas as emissões utilizando os parâmetros específicos de cada veículo composto da tabela 3, utilizando como arquivo de atividades os dados do ciclo de condução FTP. Para representar o teste FTP, o CMEM foi configurado para partida a frio e umidade específica de 60%.

O procedimento de ajuste, devido ao comportamento químico e físico do modelo, foi manual, necessitando de várias execuções para cada categoria para a aproximação dos fatores médios obtidos no CMEM aos fatores médios ponderados da tabela 2. De forma geral, este procedimento seguiu vários passos. Primeiramente, ajustando os *parâmetros insensíveis*, começando com a eficiência do motor e o coeficiente de fricção, que foram ajustados de forma a reproduzir as emissões de CO<sub>2</sub>. As emissões de HC foram ajustadas em seguida, utilizando os parâmetros de emissão de saída do motor referentes a este poluente e dois parâmetros de mistura pobre para, em seguida, proceder o ajuste das emissões de CO. O ajuste da eficiência do motor e do coeficiente de fricção altera todas as emissões e as alterações nos parâmetros de ajuste de HC e CO têm influência entre si e com as emissões de CO<sub>2</sub>. Em relação à emissões dos NO<sub>x</sub>, os ajustes em seus parâmetros não provocam alterações nas outras emissões. O ajuste através dos *parâmetros sensíveis* só foi feito nos casos onde o ajuste não era possível somente pelos *parâmetros insensíveis*.

Para o veículo composto 3 (VC3), o ajuste foi um pouco mais detalhado, devido a estarem disponíveis as informações de consumo para os anos mais recentes em CETESB (2005). No entanto, um ajuste preliminar foi feito para que a comparação fosse possível. O CMEM é adaptado para a gasolina americana e a adição de álcool anidro ao combustível nacional, numa porcentagem em torno de 22%, altera de forma significativa as emissões. Assim, o consumo foi comparado ao consumo de gasolina A equivalente ao fator de emissão de CO<sub>2</sub> do VC3 na tabela 2. Em seguida, o ajuste ao consumo e à emissão de CO<sub>2</sub> foi feito simultaneamente, já que o ajuste obtido no consumo afeta diretamente as emissões de CO<sub>2</sub>. A partir deste ponto, os demais procedimentos de ajustes foram iguais aos dos outros veículos compostos.

#### 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os fatores de emissão finais obtidos após o ajuste dos parâmetros de calibração para cada veículo composto no CMEM estão demonstrados na tabela 4. Para permitir uma melhor

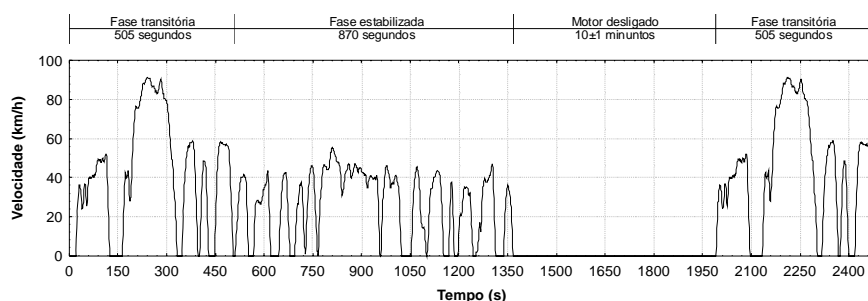
comparação com os fatores médios ponderados da tabela 3, ao lado de cada valor é mostrada a variação percentual. Deve-se observar que na aproximação ao fator de emissão ponderado do CO<sub>2</sub> para o veículo composto VC3, o fator de consumo do modelo foi aproximado simultaneamente ao fator de consumo ponderado. Este comportamento simultâneo comprova que a disponibilidade dos fatores de consumo possibilita um parâmetro adicional de comparação, bastando que sejam feitas correções nestes fatores de acordo com o combustível usado.

**Tabela 4:** Fatores de emissão após ajuste dos parâmetros de calibração do CMEM

Veículo	HC (g/km)	CO (g/km)	NOx (g/km)	CO <sub>2</sub> (g/km)	Consumo (g/km)
VC0	3,763 (0,05%)	40,264 (0,30%)	1,407 (0,71%)	170,624 (-0,19%)	—
VC1	1,828 (1,09%)	17,061 (-1,16%)	1,405 (0,89%)	174,088 (1,27%)	—
VC2	0,755 (0,15%)	6,289 (-0,92%)	0,613 (-0,40%)	189,000 (-1,06%)	—
VC3	0,174 (0,89%)	0,822 (0,28%)	0,178 (-1,13%)	197,318 (-1,14%)	63,070 (-0,50%) <sup>1</sup>

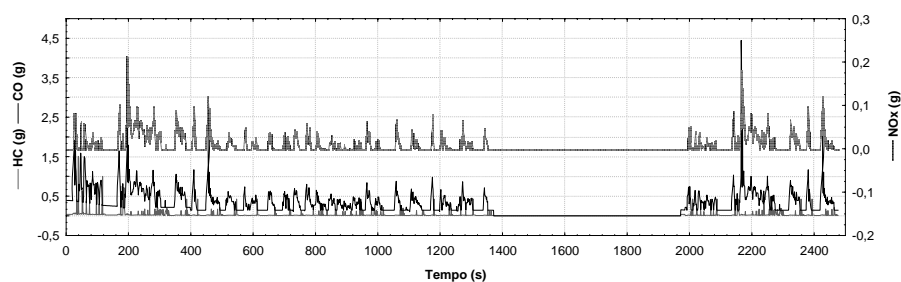
<sup>1</sup> Comparado com o fator de consumo equivalente para gasolina A.

Para analisar o comportamento das emissões de cada veículo composto no ciclo FTP, os perfis das emissões de cada poluente são mostrados nas figuras 2 à 5. Como referência, o ciclo FTP é mostrado na figura 1 (ABNT, 2002).



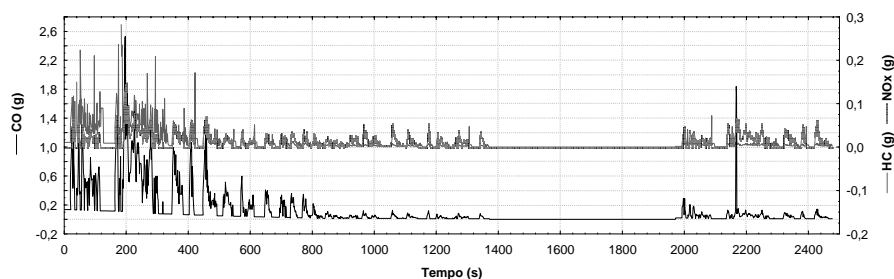
**Figura 1:** Ciclo de condução FTP

Conforme os resultados nas figuras 2 a 5, para os quatro veículos compostos, confirma-se o esperado maior nível de emissão nas duas fases transitórias do ciclo, que envolve primeiro a partida a frio e, ao final, a partida a quente. Para o veículo composto VC0 (figura 2), observa-se que os níveis de emissão de HC, CO e NOx ficam, relativamente, na mesma escala em todo o ciclo (excetuando o tempo de motor desligado), devido a ausência de sistemas de redução de poluentes.



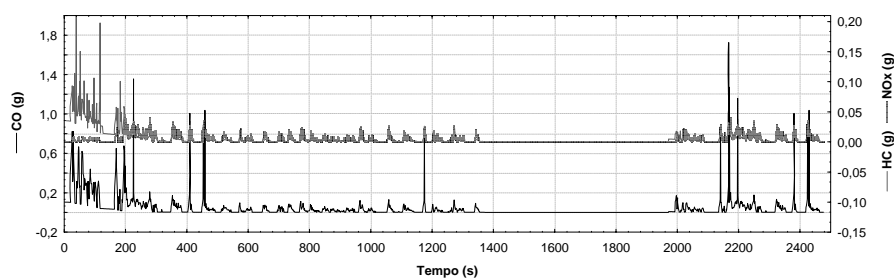
**Figura 2:** perfil de emissão para a categoria 1 (VC0)

No perfil do veículo composto VC1 (figura 3) observa-se uma quantidade relativamente grande de poluentes emitidos na primeira fase transitória e uma redução a partir da fase estabilizada no caso do CO do HC, provavelmente devido à ação do catalisador de duas vias da categoria selecionada. Apesar dos veículos da primeira fase do PROCONVE não disporem de catalisador, a categoria 2 adotada para o VC1 foi a que mais se aproximou dos fatores ponderados para a primeira fase do PROCONVE.

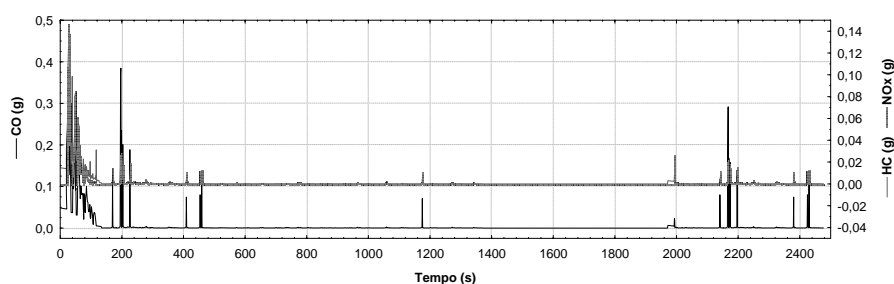


**Figura 3:** perfil de emissão para a categoria 2 (VC1)

No perfil para o veículo composto VC2 (figura 4) nota-se uma diminuição mais nítida das emissões a partir da fase estabilizada, também devido à presença do catalisador, que no caso da categoria 3 é de três vias. Para o veículo composto VC3 (figura 5), o decréscimo de emissões na fase estabilizada é muito mais acentuado e, para as fases subseqüentes, as emissões se tornam sensivelmente menores em comparação aos demais veículos compostos. Isto se deve ao fato da categoria 8 adotada, além de possuir catalisador de três vias, possuir também a injeção eletrônica, que permite uma queima mais eficiente.



**Figura 4:** perfil de emissão para a categoria 3 (VC2)



**Figura 5:** perfil de emissão para a categoria 8 (VC3)

Em relação aos quatro perfis dos veículos compostos, observam-se picos de emissão nas situações de aceleração do ciclo FTP. Na análise dos dados dos arquivos resultantes a cada segundo, para cada veículo composto, não se observou uma alteração significativa na velocidade ou no consumo que justificasse estes picos, mais significativos no caso das emissões de CO. Além destes picos nas emissões, a análise dos dados referentes à parte transiente do ciclo revelou níveis de emissão e de consumo iguais para um mesmo nível de aceleração negativo em diferentes valores de velocidade, além de não ter sido observada a típica redução nas emissões de NOx em situações de alta demanda do motor, conforme o NCR (1995 *apud* Rakha *et al.* 2003). Estes dois comportamentos foram observados por Rakha *et al.* (2003). Estes autores constataram também que, em relação aos dados de laboratório, o modelo do CMEM geralmente subestima as emissões e o consumo em situações de aceleração. Especificamente em relação ao CO, os autores observaram que estimativas das emissões apresentaram um comportamento não esperado, com quedas repentinas das emissões em baixas velocidades e em altos níveis de aceleração.

## 6. CONCLUSÕES

O modelo de emissão paramétrico CMEM foi adaptado à frota da cidade de Maringá através da comparação dos fatores de emissão ponderados obtidos para a frota da cidade. Em relação a utilização do CMEM, verificou-se que é um modelo bastante abrangente, permitindo a adaptação em detalhes. Com auxílio das emissões de CO<sub>2</sub> e do consumo, foi possível adaptar melhor o modelo de emissão, já que a resposta às alterações feitas nos parâmetros se refletem em todas as emissões e no consumo. Deve-se considerar, contudo, a observação de comportamentos atípicos nas emissões em algumas situações específicas.

Em relação aos veículos a álcool hidratado, constatou-se que a utilização de um veículo composto pelos fatores ponderados dos veículos a álcool e gasolina dificulta a adaptação, principalmente para veículos mais antigos. Esta dificuldade é devido ao combustível álcool hidratado, que apresenta variações significativas nas emissões em relação ao combustível gasolina, para o qual o modelo foi originalmente calibrado. Desta forma, é recomendada a utilização de veículos compostos desagregados por combustível quando a participação de veículos a álcool hidratado for considerável.

A utilização de fatores médios como parâmetros de comparação para adaptação do modelo se caracteriza por ser uma forma simplificada e, como simplificação, apresenta um certo grau de imprecisão. A possibilidade de se comparar à valores de emissão a cada segundo de veículos pertencentes aos estágios tecnológico do PROCONVE nos ciclos de condução FTP permitiria uma verificação desta adaptação. Mais ainda, a disponibilidade de um banco de dados com os testes dos ciclos FTP de vários veículos nacionais permitiria o desenvolvimento de um modelo de emissão dinâmico nacional, realmente adaptado à frota nacional, incluindo, também, as emissões dos aldeídos.

Um banco de dados abrangente permitiria também a calibração e validação de outros modelos de emissão. No caso do modelo VT-Micro, por estar acoplado ao simulador de tráfego INTEGRATION, eliminaria a etapa de pré-processamento, que lida com um volume muito grande de dados, além de agilizar a análise dos impactos nas emissões em análises de cenários.

### Agradecimentos

Os autores de trabalho gostariam de agradecer ao CNPq pela concessão de bolsas de doutorado e de produtividade e ao DETRAN-PR.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (2002) *NBR 6601 – Veículos Rodoviários Automotores Leves – Determinação de Hidrocarbonetos, Monóxido de Carbono, Óxidos de Nitrogênio e Dióxido de Carbono no Gás de Escapamento*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- AHN, K. (2002) *Modeling Light Duty Vehicle Emissions Based on Instantaneous Speed and Acceleration Levels*. Tese de Doutorado, Department of Civil and Environmental Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- BARTH, M.; AN, F.; YOUNGLOVE, T.; SCORA, G.; LEVINE, C.; ROSS, M. e WENZEL, T. (2000) *Comprehensive Modal Emission Model (CMEM), Version 2.0 User's Guide*. University of California, Riverside.
- BAUMBACH, G. (1996) *Air Quality Control*. Springer-Verlag, Berlin.
- CAPPIELLO, A. (2002) *Modeling Traffic Flow Emissions*. Dissertação de Mestrado. Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.
- CARVALHO, J. A. e LACAVA, P. T. (2003) *Emissões em Processos de Combustão*. Editora UNESP, São Paulo.
- CETESB (2005) *Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo 2004*. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, São Paulo.
- DE NEVERS, N. (1995) *Air Pollution Control Engineering*, McGraw Hill, cap. 13, P. 403-436.
- DETRAN-PR (2005) *Frota Cadastrada no Município de Maringá – Posição Dezembro de 2004*. Departamento de Trânsito do Paraná, Divisão de Estatística, Paraná.
- IBGE (2005) *Características Médias da População Brasileira*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística <<http://www.ibge.gov.br>>
- JACONDINO, G. B. e CYBIS, H. B. B. (2002) *Avaliação de Modelos de Emissão de Poluentes em Simuladores de Tráfego*, In: Anais do XVI ANPET Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes, Natal. Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes 2002, Rio de Janeiro.
- JACONDINO, G. B. e CYBIS, H. B. B. (2003) *Análise do Efeito da Agregação das Variáveis do Tráfego na Estimativa de Emissões Veiculares*. In: Anais da III Semana de Engenharia de Produção e Transportes, Porto Alegre.
- LA ROVERE, E. L.; MENDES, F. E. (coords.) et al. (2002) *Avaliação do PROCONVE – Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores*. LIMA/COPPE/UFRJ/MMA.
- LIMA, E. P.; GIMENES, M. L.; DEMARCHI, S. H. e BERTONCINI, B. V. (2004a) *Análise da Emissão de Poluentes Automotivos em um Trecho Urbano da Rodovia BR-376*. In: Anais do XV COBEQ: Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Curitiba, Paraná.
- LIMA, E. P.; GIMENES, M. L. e DEMARCHI, S. H. (2004b) *Estudo da Emissão de Poluentes Veiculares Através do Simulador de Tráfego INTEGRATION*. In: Anais do ICTR 2004: Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável, Florianópolis, Santa Catarina.
- MANAHAN, S. E. (1994) *Environmental Chemistry*. 6ed., New York: Lewis Publishers, cap. 13, p. 381-405.
- MCT (2002) *Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa – Relatório de Referência – Emissões de Gases de Efeito Estufa por Fontes Móveis no Setor Energético*. Ministério da Ciência e Tecnologia, Brasília, Distrito Federal.
- RAKHA, R.; AHN, K. e TRANI, A. (2003) *Comparison of MOBILE5a, MOBILE6, VT-MICRO, and CMEM Models for Estimating Hot-stabilized Light-duty Gasoline Vehicle Emissions*. Canadian Journal of Civil Engineering, 30(6): 1010-1021
- TENG, H.; YU, L. e QI, Y. (2001) *Analytical Tool for Measuring Emission Impact of ACCEL/DECEL*. Transportation Research Institute, Polytechnic Institute, New York.
- Volkswagen (2003) *Gol 1.0 e 1.6 – Manual de Instruções, Manutenção e Garantia*. Volkswagen do Brasil Ltda. Edição 04/03.

### Endereço dos autores:

Universidade Estadual de Maringá – UEM

Avenida Colombo, 5790

CEP:87020-900 – Maringá, Paraná, Brasil

e-mail: ed\_p\_lima@yahoo.com.br; marcelino@deq.uem.br; shdm@terra.com.br

