



Acta Scientiarum. Technology

ISSN: 1806-2563

eduem@uem.br

Universidade Estadual de Maringá
Brasil

Pinheiro Lima, Ed; Henrique Demarchi, Sergio; Luiz Gimenes, Marcelino
Adaptação do modelo de emissão modal CMEM para a frota da cidade de Maringá, Estado do
Paraná, Brasil

Acta Scientiarum. Technology, vol. 33, núm. 1, 2011, pp. 17-25
Universidade Estadual de Maringá
Maringá, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=303226530003>

- ▶ Como citar este artigo
- ▶ Número completo
- ▶ Mais artigos
- ▶ Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe , Espanha e Portugal
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

Adaptação do modelo de emissão modal CMEM para a frota da cidade de Maringá, Estado do Paraná, Brasil

Ed Pinheiro Lima^{1*}, Sergio Henrique Demarchi² e Marcelino Luiz Gimenes¹

¹Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, 87020-900, Maringá, Paraná, Brasil. ²Logit Engenharia Consultiva, São Paulo, São Paulo, Brasil. *Autor para correspondência.
E-mail: ed_p_lima@yahoo.com.br

RESUMO. Este artigo descreve a adaptação do modelo de emissão modal CMEM à frota da cidade de Maringá, Estado do Paraná, Brasil. Foram adotados como parâmetros de referência os fatores médios ponderados de emissão e de consumo determinados para a cidade. Esses fatores ponderados foram obtidos para cada fase do Proconve por meio dos fatores médios de emissão, corrigidos pelos fatores de deterioração do AP-42 da EPA e de consumo. Para cada fase do Proconve, foi associado um veículo representativo. Para cada veículo representativo, os parâmetros do modelo CMEM foram ajustados para aproximar-se aos fatores de emissão e consumo de referência. Observou-se que os fatores do AP42 tendem a representar melhor a deterioração da frota, principalmente para veículos mais antigos. A comparação com resultados do ciclo FTP, desagregados por fase, demonstrou variações percentuais mais significativas do que no valor total do ciclo.

Palavras-chave: emissões veiculares, modelos de emissão.

ABSTRACT. **Adaptation of CMEM modal emission model to the fleet of the city of Maringá, Paraná State, Brazil.** This paper describes the CMEM modal emission model adaptation to the fleet of the city of Maringá, Paraná state, Brazil. Weighted average factors of determined emission and consumption for the city were adopted as reference parameters. These weighed factors were obtained for each PROCONVE phase through consumption and emission average factors, the latter corrected by AP-42 deterioration factors. For each Proconve phase a composite vehicle was associated. For each composite vehicle, the CMEM model parameters were adjusted to approach emission and consumption reference factors. It was observed AP42 deterioration factors tend to better represent the deterioration of the fleet, especially old vehicles. The comparison with FTP cycle results, disaggregated by phase, demonstrated more significant percentile variations than the total value of the cycle.

Keywords: vehicular emissions, emission models.

Introdução

Os motores de combustão interna têm participação significativa na emissão de vários poluentes, dentre eles, monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC) e óxidos de nitrogênio (NOx). Apesar de esses poluentes também se formarem em outros processos de combustão, a produção de poluente por unidade de combustível queimado é maior nos motores dos veículos. Esta maior produção se deve a vários fatores: operação sempre com deficiência de oxigênio; combustão não-permanente; atomização insuficiente do combustível; e o sistema de refrigeração do motor, que impede a queima por igual da mistura comburente.

Com o objetivo de se estimar as emissões desses poluentes, vários modelos de emissão veiculares têm sido desenvolvidos. Esses modelos de emissão podem ter uma aproximação macroscópica, baseada

na velocidade média da frota, e microscópica, na qual as emissões são estimadas a cada segundo para cada veículo. A modelagem baseada na velocidade média se destina à elaboração de inventários em grande escala e utiliza dados como as médias de quilometragem e os fatores de emissão. No entanto, por se basearem na velocidade média, esses modelos são incapazes de estimar as emissões resultantes de dados em nível operacional (RAKHA et al., 2003). Apesar de demandar maior capacidade de processamento, a aproximação microscópica tem a vantagem de considerar as variações na velocidade e na aceleração, permitindo análises de variações de cenários em pequenos trechos da malha viária de uma cidade. Assim, modelos de emissão microscópicos podem ser acoplados a simuladores de tráfego e, em alguns, o modelo de emissão é parte integrante do software, o que permite a análise em qualquer tempo de simulação das emissões de toda a frota ou de um único veículo.

Dentre os trabalhos desenvolvidos sobre modelos microscópicos, destacam-se alguns a seguir. Washburn et al. (2001) desenvolvem um modelo de emissão estatístico a partir de dados de inspeção e manutenção. Rakha et al. (2003) compararam os modelos modais VT-Micro e CMEM e as versões 5 e 6 do MOBILE. Rakha et al. (2004) demonstram o desenvolvimento da versão 2 do modelo VT-Micro para estimação das emissões em fase estabilizada a quente. O mesmo VT-Micro foi validado a partir de dados de emissão coletados por um equipamento acoplado a um veículo-teste em situações reais de tráfego por El-Shawarby et al. (2005). Noland e Quddus (2006) usam o modelo CMEM para analisar os efeitos na melhora do fluxo de veículos nas emissões.

Para o uso de modelos microscópicos, é necessário que estes sejam calibrados para a frota local. No Brasil, modelos de emissão microscópicos, como o VT-Micro e o CMEM, têm sua utilização restrita por serem desenvolvidos para veículos com motorização e, principalmente, combustíveis com características distintas daquelas do país de origem. Apesar dessas limitações, alguns trabalhos abordam os modelos de emissão microscópicos no Brasil. Os modelos de emissão acoplados aos simuladores de tráfego Saturn e Dracula foram avaliados por Jacondino e Cybis (2002). Estes dois modelos de emissão e o modelo CMEM foram usados na análise dos efeitos da agregação das variáveis do tráfego na estimativa das emissões por Jacondino e Cybis (2003). Lima et al. (2004) analisaram qualitativamente o comportamento das emissões e do consumo de um veículo, a cada segundo, com auxílio do CMEM acoplado ao simulador de tráfego Integration. Lima et al. (2005) desenvolveram uma metodologia simplificada de adaptação do modelo CMEM à frota local da cidade de Maringá, Estado do Paraná.

Para minimizar essa restrição no uso de modelos microscópicos, o presente trabalho tem por objetivo a adaptação do modelo CMEM. A adoção do CMEM se deve ao fato de ser um modelo conceituado, com ampla utilização e gratuito. A adaptação se baseia nos fatores de emissão de veículos novos da Cetesb e na participação de veículos com diversas tecnologias de controle de emissão na frota da cidade. Para melhor aproximação às emissões da frota, neste trabalho foram adotados os fatores de deterioração do AP-42 (EPA, 1985) da EPA, que consideram a deterioração dos equipamentos de redução de emissões, diferente dos fatores de deterioração da Cetesb, que somente considera se o veículo é fabricado antes ou depois de 1977. O fator consumo foi considerado como

parâmetro de comparação para se verificar se as emissões obtidas no CMEM estão compatíveis por meio da equação de balanço de carbono.

O modelo de emissão modal CMEM

O CMEM – Comprehensive Modal Emission Model (BARTH et al., 2000) é um modelo de emissão modal desenvolvido com o objetivo de representar com precisão as emissões produzidas por veículos e caminhões leves como função do modo de operação. Para o seu desenvolvimento, uma intensiva coleta de dados foi realizada, tanto na saída do motor quanto do escape, para mais de 300 veículos, destes, 30 grandes emissores. Esses veículos foram categorizados no CMEM com base na contribuição total nas emissões de cada veículo, constituindo, no total, 24 categorias de veículos de emissão normal e quatro de grandes emissores (BARTH et al., 2000).

O CMEM apresenta uma aproximação parametrizada física simples, em que o processo de emissão é decomposto em parâmetros que correspondem ao fenômeno físico associado à operação do veículo e à emissão de poluentes (RAKHA et al., 2003). As emissões de escape a cada segundo no CMEM são modeladas como o produto de três componentes, apresentados na equação (1): taxa de consumo de combustível em gramas por segundo (*FR*); índice de emissão de saída ($\frac{g_{\text{emissão}}}{g_{\text{combustível}}}$); e fração passante do catalisador em função do tempo (*CPF*).

$$\text{emissões de escape} = \text{FR} \cdot \left(\frac{g_{\text{emissão}}}{g_{\text{combustível}}} \right) \cdot \text{CPF} \quad (1)$$

Para cada categoria de veículo, o CMEM utiliza um submodelo que corresponde a um veículo representativo das características de um grupo de veículos ou de tecnologias similares. Esses submodelos apresentam estruturas análogas, mas com parâmetros diferentes usados na calibração. Cada submodelo do CMEM usa, como entrada, três variáveis operacionais dinâmicas, que incluem velocidade a cada segundo, inclinação longitudinal da via (greide) e uso de acessórios, como ar-condicionado. Além dessas variáveis de operação, cada submodelo do CMEM usa 55 parâmetros estáticos de forma a caracterizar as emissões do escape para a categoria apropriada (BARTH ET al., 2000).

Os parâmetros do modelo se dividem em dois grandes grupos: parâmetros disponíveis e parâmetros de calibração. O grupo dos parâmetros disponíveis é composto por 13 parâmetros relacionados às

características da mecânica do motor do veículo, agrupados em parâmetros gerais e específicos do veículo.

Os parâmetros de calibração compreendem 42 parâmetros, agrupados em insensíveis e sensíveis. O grupo de parâmetros insensíveis compreende 23 parâmetros do funcionamento do motor que já são conhecidos com antecedência e têm impacto relativamente pequeno nas emissões em geral. Os 19 parâmetros do grupo sensíveis devem ser determinados com cautela por terem grande influência nas emissões e se dividem em três subgrupos (BARTH et al., 2000): sete parâmetros de entrada do modelo que descrevem o processo de partida a frio; dez parâmetros que modelam a condição estabilizada do catalisador a quente; e dois parâmetros que modelam a mistura rica.

Para a execução do CMEM, são necessários dois arquivos de entrada: controle e atividade. No arquivo de controle, são inseridos os parâmetros específicos do modelo para cada categoria, informações sobre a partida (a frio ou a quente) e umidade específica do ar e o número de identificação de cada veículo é associado a uma categoria. O arquivo de atividades contém as variáveis operacionais de entrada, com os valores de velocidade, aceleração e greide da via para cada veículo em função do tempo. As informações de saída do CMEM compreendem a estimativa das emissões de CO, HC, NOx e CO₂ e do consumo de combustível. Estas informações são divididas em dois arquivos, um fornecendo as emissões e o consumo a cada segundo para cada número de identificação do veículo (ID) e outro fornecendo um resumo da simulação, com os fatores médios de emissão por ID do veículo em gramas por quilômetro e a distância total percorrida.

Material e métodos

A calibração do modelo CMEM é um processo complexo de determinação dos parâmetros executados separadamente, em que são necessários os dados a cada segundo de vários veículos em três ciclos de condução distintos (BARTH et al., 2000). No Brasil, dados de emissão abrangentes de veículos leves ficam restritos a valores médios determinados pelo ciclo FTP (ABNT, 2001). Em função desta restrição de dados para a calibração, a metodologia adotada consiste em se usar os fatores médios nacionais como referência para a adaptação do modelo por meio do ajuste de seus parâmetros.

Na adaptação do CMEM, são associados veículos relativos à frota considerada, agregada de acordo com as fases do Proconve. Para cada fase do Proconve, são calculados os fatores médios ponderados de emissão de HC, CO, NOx, CO₂ e de consumo, usando-se os fatores médios de consumo e os fatores de emissão da Cetesb (2006), corrigidos pelos fatores de deterioração do AP-42 da EPA. Esses fatores médios ponderados são usados para a seleção das categorias de veículos do CMEM para cada veículo representativo e na adaptação desse veículo representativo, por meio do ajuste dos parâmetros do CMEM.

Composição da frota

A frota considerada para Maringá consiste nos veículos leves cadastrados no Detran-PR, com ano de fabricação de 1980 a 2005 (DETRAN, 2006), sendo desconsiderados os veículos anteriores a 1980 e os bicompostíveis. Os veículos com ano de fabricação anterior a 1980 foram desconsiderados, já que o Detran-PR forneceu dados dos veículos desagregados por ano de fabricação somente a partir de 1980. Foram desconsiderados os veículos bicompostíveis por não haver um estudo para a cidade a respeito do percentual de uso de cada combustível nesse tipo de veículo.

Na Tabela 1 é apresentada a frota considerada agregada por fase do Proconve. Para cada fase, foi associado um veículo representativo, sendo VR1 referente aos veículos pertencentes à primeira fase do Proconve (1988-1991), VR2 à segunda fase (1992-1996) e VR3 à terceira fase (após 1997). Como a participação de veículos movidos a álcool é significativa na fase anterior ao Proconve (48,8%), o veículo representativo VR0 foi desagregado por combustível, resultando nos veículos representativos VR0a (álcool hidratado) e VR0g (gasolina).

Tabela 1. Frota considerada agregada nas fases do Proconve.

| Combustível | Frota considerada | Veículos representativos | | | | |
|-------------------------|----------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | | VR0a (16%) ² | VR0g (48,8%) ³ | VR1 (10%) ² | VR2 (21%) ² | VR3 (53%) ² |
| Álcool | 18.739 | 9.231 (48,8%) ³ | - | 3.994 (35,3%) ³ | 2.524 (10,4%) ³ | 2.990 (4,5%) ³ |
| Gasolina C ¹ | 100.635 | - | 9.693 (51,2%) ³ | 7.319 (64,7%) ³ | 21.662 (89,6%) ³ | 61.961 (95,5%) ³ |
| Total | 119.374 | | 18.924 | 11.313 | 24.196 | 70.006 |

¹Adição de 22% de álcool anidro; ²Participação na frota considerada; ³Participação na fase do Proconve.

Determinação dos fatores de emissão e consumo ponderados

Para cada veículo representativo, são determinados os respectivos fatores médios ponderados de emissão e de consumo. Esses fatores serão referências no

ajuste do modelo CMEM. Foram adotados os fatores médios de emissão e de consumo para veículos novos da Cetesb (2006) e Brasil (2002). Para os fatores de emissão ponderados, foram calculados os fatores médios de emissão para HC, CO, NOx e CO₂ para cada fase do Proconve e combustível, por meio da equação (2), sendo obtidos os fatores médios apresentados nas Tabelas 2 e 3 para gasolina C e álcool hidratado, respectivamente.

$$FM_{f,p}^{Cb} = \frac{\sum_{i=ai}^{af} FEC_{i,p}^{Cb} \cdot NV_i^{Cb}}{\sum_{i=ai}^{af} NV_i^{Cb}} \quad (2)$$

em que:

$FM_{f,p}^{Cb}$: fator médio de emissão de p para a fase f e combustível Cb ;

$FEC_{i,p}^{Cb}$: fator de emissão corrigido de p para o combustível Cb para o ano i ;

NV_i^{Cb} : número de veículos a álcool e gasolina Cb com ano de fabricação i ;

ai , af : anos inicial e final da fase f ;

f : fase do Proconve; e

p : espécie de poluente emitida.

Tabela 2. Fatores médios de emissão – gasolina C.

| Fase (f) | Participação na fase (%V _f) | HC (g km ⁻¹) | CO (g km ⁻¹) | NOx (g km ⁻¹) | CO ₂ (g km ⁻¹) |
|-----------------|--|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|--|
| Pré | 51,22% | 3,605 | 43,364 | 1,630 | 174,72 |
| Fase I | 64,70% | 2,601 | 19,150 | 1,636 | 176,63 |
| Fase II | 89,56% | 1,435 | 15,173 | 0,880 | 193,91 |
| Fase III | 95,45% | 0,416 | 3,361 | 0,489 | 195,17 |

Tabela 3. Fatores médios de emissão – álcool hidratado.

| Fase (f) | Participação na fase (%V _f) | HC (g km ⁻¹) | CO (g km ⁻¹) | NOx (g km ⁻¹) | CO ₂ (g km ⁻¹) |
|-----------------|--|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|--|
| Pré | 48,78% | 2,199 | 24,652 | 1,512 | 164,180 |
| Fase I | 35,30% | 1,939 | 16,708 | 1,354 | 163,995 |
| Fase II | 10,44% | 1,855 | 12,551 | 0,865 | 165,921 |
| Fase III | 4,55% | 0,409 | 2,671 | 0,248 | 175,780 |

Para seleção dos fatores de deterioração, foi adotado o mesmo procedimento de Mendes (2004), em que os fatores de emissão de HC, CO e NOx para gasolina C foram comparados aos valores de ZML (emissão a zero milha) do AP-42, selecionando-se os mais próximos (em km g⁻¹), como pode ser visto nas Tabelas 4, 5 e 6. Os fatores de deterioração foram escolhidos de forma a coincidir com as fases do Proconve. A partir dos valores de ZML, DR1 e DR2 obtém-se o valor da taxa de emissão básica BER pela equação (3) e o fator de deterioração (FD) é determinado pela equação (4).

$$BER = \begin{cases} ZML + DR1 \cdot M, & \text{se } M \leq 5 \\ ZML + DR1 \cdot 5 + DR2 \cdot (M - 5), & \text{se } M > 5 \end{cases} \quad (3)$$

$$FD = \frac{BER}{ZML} \quad (4)$$

em que:

FD : fator de deterioração;

BER : taxa de emissão básica da exaustão [g mi⁻¹];

ZML : emissão a zero milha [g mi⁻¹];

$DR1$: taxa de deterioração milhagem acumulada ≤ 50 k milhas [g mi⁻¹ 10 k mi⁻¹]; e

$DR2$: taxa de deterioração milhagem acumulada > 50 k milhas [g mi⁻¹ 10 k mi⁻¹].

Na equação (5), M representa a quilometragem acumulada em mil milhas. Segundo Brasil (2002), o valor de M é limitado a 6,21 porque, após 100.000 km, o efeito da degradação nas emissões se estabelece. Sendo assim, o valor de M é dado por:

$$M = \begin{cases} \frac{km_{acum}}{1,61 \cdot 10000}, & \text{se } km_{acum} \leq 100.000 \\ 6,21, & \text{se } km_{acum} > 100.000 \end{cases} \quad (5)$$

Tabela 4. Fatores de deterioração da EPA – HC.

| Ano de fabricação | Cetesb | | AP-42 | | | |
|----------------------|--------------------------------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|-------|-------|
| | Fator médio (g km ⁻¹) | Ano de fabricação | ZML (g mi ⁻¹) | ZML (g km ⁻¹) | DR1 | DR2 |
| 1980-1987 | 2,600 | 1968-1969 | 4,43 | 2,75 | 0,250 | 0,250 |
| 1988-1991 | 1,500 | 1970-1971 | 3,00 | 2,86 | 0,370 | 0,370 |
| 1992-1996 | 0,560 | 1975-1979 | 1,06 | 0,66 | 0,280 | 0,280 |
| 1997-2000 | 0,153 | 1994 | 0,25 | 0,15 | 0,074 | 0,279 |
| 2001-2004 | 0,110 | 1998+ | 0,18 | 0,11 | 0,072 | 0,273 |

Fonte: elaborada a partir de dados de EPA (1985).

Tabela 5. Fatores de deterioração da EPA – CO.

| Ano de fabricação | Cetesb | | AP-42 | | | |
|----------------------|--------------------------------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|-------|-------|
| | Fator médio (g km ⁻¹) | Ano de fabricação | ZML (g mi ⁻¹) | ZML (g km ⁻¹) | DR1 | DR2 |
| 1980-1983 | 33,000 | 1968-1969 | 56,34 | 35,02 | 2,550 | 2,550 |
| 1984-1987 | 25,000 | 1970-1971 | 42,17 | 26,21 | 3,130 | 3,130 |
| 1988-1991 | 14,625 | 1975-1979 | 17,72 | 11,01 | 2,460 | 2,460 |
| 1992-1996 | 5,400 | 1980 | 6,09 | 3,78 | 1,958 | 1,958 |
| 1997-2004 | 0,640 | 1992+ | 2,15 | 1,33 | 1,448 | 3,434 |

Fonte: elaborada a partir de dados de EPA (1985).

Tabela 6. Fatores de deterioração da EPA – NOx.

| Ano de fabricação | Cetesb | | AP-42 | | | |
|----------------------|--------------------------------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|-------|-------|
| | Fator médio (g km ⁻¹) | Ano de fabricação | ZML (g mi ⁻¹) | ZML (g km ⁻¹) | DR1 | DR2 |
| 1980-1983 | 1,400 | 1968-1972 | 4,35 | 2,70 | 0,000 | 0,000 |
| 1984-1987 | 1,750 | 1973-1974 | 2,86 | 1,78 | 0,050 | 0,050 |
| 1988-1991 | 1,525 | 1975-1976 | 2,44 | 1,52 | 0,040 | 0,040 |
| 1992-1996 | 0,640 | 1980 | 1,50 | 0,93 | 0,102 | 0,102 |
| 1997-2000 | 0,243 | 1994 | 0,37 | 0,23 | 0,083 | 0,189 |
| 2001-2004 | 0,118 | 1996+ | 0,18 | 0,11 | 0,083 | 0,195 |

Fonte: elaborada a partir de dados de EPA (1985).

Os fatores de deterioração do AP-42 foram adotados por serem mais abrangentes do que os adotados pela Cetesb. Os fatores de deterioração

adotados pela Cetesb se baseiam em fatores de deterioração determinados para automóveis americanos com mais de 30 anos e sem dispositivos de controle de poluição. Esse perfil está muito distante dos padrões de emissão e deterioração dos veículos nacionais mais recentes. Além disso, os fatores de deterioração da Cetesb são divididos para veículos antes e depois de 1977, o que, no caso da frota considerada (a partir de 1980), demonstra que a deterioração seria igual para todos os veículos, algo improvável visto que a deterioração dos veículos mais recentes incorpora também a degradação dos sistemas de redução de emissões, em especial a do catalisador.

Os fatores de emissão médios das Tabelas 2 e 3 foram então ponderados para cada fase do Proconve, incorporando-se a participação de álcool hidratado (*a*) e gasolina C (*gc*), conforme a equação (6).

$$FP_{f,p} = \%V_f^a \cdot FM_{f,p}^a + \%V_f^{gc} \cdot FM_{f,p}^{gc} \quad (6)$$

em que:

$FP_{f,p}$: fator de emissão ponderado de *p* para a fase *f*;
 $\%V_f^a$ e $\%V_f^{gc}$: participação da frota a álcool (*a*) e à gasolina C (*gc*) na fase *f*;

$FM_{i,p}$ e $FM_{i,p}^c$: fator médio de emissão de álcool e gasolina C para o ano *i*;

f: fase do Proconve; e

p: espécie de poluente emitida.

O fator de consumo da Cetesb para anos anteriores a 2002 é calculado por meio do balanço de carbono segundo a NBR-7024 (ABNT, 2002), apresentado na equação (7).

$$C = \frac{[(0,8656 \cdot m_{HC}) + (0,5214 \cdot m_{ETOH}) + (0,4288 \cdot m_{CO}) + (0,2729 \cdot m_{CO_2})] \cdot (100 + \%V_{H_2O})}{6,4487 \cdot \%V_{gás} + 4,1102 \cdot \%V_{ETOH}} \quad (7)$$

em que:

C: consumo de combustível [L 100 km⁻¹];

m_{HC} : massa de HC emitida [g km⁻¹];

m_{ETOH} : massa de etanol emitida [g km⁻¹];

m_{CO} : massa de CO emitida [g km⁻¹];

m_{CO_2} : massa de CO₂ emitida [g km⁻¹];

$\%V_{gás}$: porcentagem, em volume a 20°C, de gasolina no combustível usado;

$\%V_{ETOH}$: porcentagem, em volume a 20°C, de etanol no combustível usado; e

$\%V_{H_2O}$: porcentagem, em volume a 20°C, de água no combustível usado.

De acordo com a equação (7), alterações nas emissões de HC, CO e CO₂ têm impacto no consumo calculado. Como os fatores de emissão

são corrigidos por fatores de deterioração, o novo consumo foi calculado para os valores dos fatores de emissão corrigidos de HC e CO por meio do balanço de carbono. Como não existe um fator de deterioração que indicaria o quanto modificariam as emissões de CO₂, considerou-se, por simplificação, que, para uma mesma distância percorrida, a degradação no desempenho do motor resultaria em um aumento no consumo e nas emissões de HC e CO, mas com a emissão de CO₂ constante em relação ao veículo novo.

Como o combustível ao qual o CMEM foi projetado é diferente dos combustíveis nacionais, tanto o fator consumo quanto o fator emissão de CO₂ devem ser ajustados para se obter os valores equivalentes para a gasolina C (com 22% de álcool anidro) e para o álcool hidratado para a comparação. A determinação do consumo equivalente foi feita para cada fase do Proconve, comparando-se o consumo médio ponderado para cada fase em relação ao consumo de gasolina A (pura), calculado por meio da equação (7) e a participação por combustível, conforme equação (8).

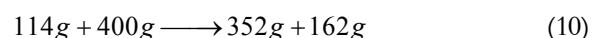
$$Ceq_f = \%V_f^a \cdot \left(\frac{Cm_f^a}{Cm_f^{ga}} \right) + \%V_f^{gc} \cdot \left(\frac{Cm_f^{gc}}{Cm_f^{ga}} \right) \quad (8)$$

em que:

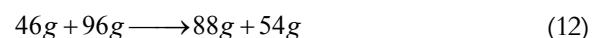
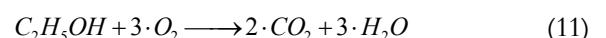
Ceq_f: consumo equivalente para a fase *f*; e

Cm_f^a , Cm_f^{gc} , Cm_f^{ga} : consumo médio ponderado para álcool e gasolinas C e A.

No caso do CO₂, o ajuste do fator de emissão foi feito, estimando-se a massa de CO₂ emitida por litro de combustível para se obter a relação entre a emissão de CO₂ da gasolina A e o combustível adotado. Para isto, é necessário determinar a quantidade de CO₂ por litro de cada combustível. A relação estequiométrica da queima de um mol de gasolina pura é apresentada nas equações químicas (9) e (10).



No caso do etanol, a relação estequiométrica da queima de um mol é apresentada nas equações químicas (11) e (12).



Com base nas equações 10 e 12, tem-se que a queima de 114 g de gasolina resulta em 352 g de CO₂ e que a queima de 46 g de etanol resulta em 88 g de CO₂. Para se determinar a quantidade por litro de combustível, foram adotados os valores de densidade da gasolina, álcool anidro e hidratado como sendo 0,735; 0,7915 e 0,808 kg L⁻¹ (BRASIL, 2002), respectivamente. Dessa forma, para a combustão de um litro de combustível, tem-se para gasolina A 2.269 g de CO₂, gasolina C 2.103 g de CO₂ e para álcool hidratado 1.546 g de CO₂. Usando-se a gasolina A como referência, foram obtidos os fatores de emissão ponderados equivalentes de CO₂ (*FPeq_{f,CO₂}*) para cada fase (f) pela equação (13).

$$FPeq_{f,CO_2} = FP_{f,CO_2}^a \cdot \left(\frac{2.269}{1.546} \right) + FP_{f,CO_2}^{gc} \cdot \left(\frac{2.269}{2.103} \right) \quad (13)$$

A Tabela 7 ilustra os fatores de emissão ponderados de HC, CO, NOx e CO₂ e o fator de consumo obtidos para cada fase do Proconve por meio dos fatores médios das Tabelas 2 e 3 e do consumo corrigido. Esses valores foram usados como referência para cada veículo representativo.

Tabela 7. Fatores de emissão médios ponderados de referência para a adaptação.

| Veículo composto | HC (g km ⁻¹) | CO (g km ⁻¹) | NOx (g km ⁻¹) | CO ₂ (g km ⁻¹) | Consumo (g km ⁻¹) |
|------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|--|----------------------------------|
| VR0a | 2,199 | 24,652 | 1,512 | 241,051 | 87,639 |
| VR0g | 3,605 | 43,364 | 1,630 | 188,523 | 81,069 |
| VR1 | 2,367 | 18,288 | 1,536 | 209,426 | 72,684 |
| VR2 | 1,478 | 14,900 | 0,878 | 213,832 | 71,685 |
| VR3 | 0,416 | 3,329 | 0,478 | 213,082 | 64,413 |

Determinação das categorias e parâmetros específicos do CMEM

Os parâmetros específicos do CMEM compreendem os parâmetros do motor e do veículo. A motorização adotada foi a de motor 1.6 para os veículos representativos VR0a, VR0g e VR1 e motor 1.0 para VR2 e VR3. Além desses veículos representativos, foi usado também o veículo VZM, equivalente ao veículo usado no ciclo FTP no trabalho de Vaz de Melo (2004). A Tabela 8 mostra os principais parâmetros específicos do CMEM e os valores usados.

Foi escolhida a categoria, determinando-se os fatores médios obtidos, tendo-se o ciclo FTP como arquivo de atividades e comparando-se com os fatores médios ponderados apresentados na Tabela 7 para os veículos representativos e o valor no ciclo FTP de Vaz de Melo (2004). Dos parâmetros da Tabela 8, todos foram obtidos diretamente das especificações do veículo, com exceção da relação rotação do motor/velocidade do veículo (S) pela

equação (14). Este parâmetro foi obtido por meio da equação de determinação da velocidade do veículo (equação 15).

$$S = \frac{N}{V} = \frac{1609 \cdot g_t \cdot g_d}{60 \cdot \pi \cdot D} \quad (14)$$

$$V = \frac{60 \cdot N \cdot \pi \cdot D}{1609 \cdot g_t \cdot g_d} \quad (15)$$

em que:

V: velocidade do veículo [m h⁻¹];

N: número de revoluções por minuto do virabrequim [rpm];

D: diâmetro do pneu [m];

g_t: fator de redução da caixa de câmbio; e

g_d: fator de redução do diferencial.

Tabela 8. Principais parâmetros específicos e categorias adotadas.

| Parâmetro | Descrição | Veículo representativo | | | | | VZM |
|---|-----------------------------------|------------------------|---------------|---------------|--------------|--------------|---------------|
| | | VR0g | VR0a | VR1 | VR2 | VR3 | |
| Ed (L) masskg (kg) ^{1,3} | Volume Massa | 1,596 1022 | 1,596 1024 | 1,596 1023 | 0,999 948 | 0,999 948 | 1,000 1040 |
| S (rpm mph ⁻¹) ^{2,3} | Relação rpm vel. ⁻¹ | 45,33 | 45,33 | 44,54 | 57,98 | 58,34 | 57,79 |
| Qm (ft.lb) ³ | Torque máximo | 100,54 | 104,16 | 101,82 | 66,27 | 66,01 | 69,44 |
| Nm (rpm) ³ | Rotação (Qm) | 4500 | 3500 | 4147 | 4396 | 4457 | 4000 |
| Zmax (hp) ³ | Potência máxima | 67,07 | 72,00 | 68,81 | 63,72 | 63,95 | 69,04 |
| Np (rpm) ³ | Rotação (Zmax) | 5500 | 5500 | 5500 | 5896 | 5957 | 5750 |
| Categoria adotada | | 1 | 1 | 2 | 2 | 4 | 10 |

Fonte: adaptado de Volkswagen (2003) e Vaz de Melo (2004). ¹Adicionada à massa do motorista – padrão do brasileiro: 75 kg (IBGE, 2006), ²Calculada para pneus 175/70 R13 com exceção do veículo VZM – pneus 175/65 R14, ³Ponderados pela distribuição por combustível, conforme Tabela 1.

Ajuste dos parâmetros de calibração

O ajuste dos parâmetros do CMEM é feito de forma manual. Isto é possível pelo fato de o CMEM ser um modelo que representa o comportamento químico e físico do motor e de que cada um de seus parâmetros de calibração representa um parâmetro de funcionamento do motor, como a relação ar/combustível. Cada veículo representativo é adaptado individualmente, tendo-se como objetivo os fatores médios ponderados da Tabela 7. Para se compor o arquivo de atividades, foram usados os dados do ciclo de condução FTP, apresentado na Figura 1. Foram criados três arquivos de atividades, dois para a partida a frio (fase transitória a frio e fase estabilizada) e o terceiro com a partida após uma pausa de 10 min. (fase transitória a quente). Como limites para a variação percentual entre os valores dos fatores de emissão médio ponderados de referência e os obtidos no CMEM foram adotados

os valores $\pm 2,5\%$ para HC, CO, NOx e consumo e $\pm 5,0\%$ para o CO₂.

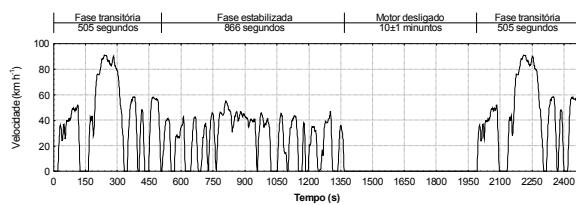


Figura 1. Ciclo de condução FTP.

Na adaptação do modelo, os parâmetros da eficiência do motor e do coeficiente de fricção foram ajustados de forma a se aproximar o consumo. Os ajustes da eficiência do motor e do coeficiente de fricção alteram o consumo e todas as emissões e as alterações nos parâmetros de ajuste de HC e CO têm influência entre si e com as emissões de CO₂. As emissões de HC foram ajustadas em seguida, usando-se os parâmetros de emissão de saída do motor referentes a esse poluente e dois parâmetros de mistura pobre para, em seguida, proceder-se ao ajuste das emissões de CO. Em relação a emissões dos NOx, os ajustes em seus parâmetros não provocam alterações nas outras emissões. Por não ser recomendado, o ajuste por meio dos parâmetros sensíveis foi feito somente nos casos em que o ajuste pelos parâmetros insensíveis se tornava difícil.

Resultados e discussão

Após o ajuste dos parâmetros de calibração para cada veículo representativo no CMEM, foram obtidos fatores de emissão finais, mostrados na Tabela 9. Para se permitir uma melhor comparação, na Tabela 10 está a variação percentual entre os fatores de emissão da Tabela 9 e os fatores médios ponderados da Tabela 7. Em Lima et al. (2005), foi considerado que a disponibilidade do fator de consumo permitiria mais um parâmetro de comparação. Isso se confirmou no ajuste dos parâmetros no CMEM em que, em todos os casos, o fator consumo ponderado e o fator emissão de CO₂ do modelo foram aproximados simultaneamente.

Todos os valores apresentaram erro percentual pequeno, com exceção do CO₂ que esteve sempre perto do limite inferior adotado (-5,0%). Isso pode ser consequência do ajuste que foi feito no fator de consumo em função da deterioração, em que se consideraram as emissões de CO₂ constantes em relação à deterioração. Apesar de as emissões de CO₂

provavelmente variarem com a deterioração, essa simplificação foi necessária para se obter os fatores de consumo, considerando-se a deterioração.

Tabela 9. Fatores de emissão após ajuste dos parâmetros de calibração do CMEM.

| Veículo | HC (g km ⁻¹) | CO (g km ⁻¹) | NOx (g km ⁻¹) | CO ₂ (g km ⁻¹) | Consumo (g km ⁻¹) |
|---------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|--|----------------------------------|
| VR0a | 2,207 | 24,578 | 1,503 | 231,957 | 87,646 |
| VR0g | 3,606 | 43,216 | 1,656 | 179,353 | 81,783 |
| VR1 | 2,391 | 17,852 | 1,544 | 199,940 | 74,357 |
| VR2 | 1,467 | 14,794 | 0,881 | 204,818 | 73,425 |
| VR3 | 0,408 | 3,270 | 0,485 | 202,927 | 66,000 |

Tabela 10. Variação percentual após ajuste de parâmetros.

| Veículo | HC | CO | NOx | CO ₂ | Consumo |
|---------|--------|--------|--------|-----------------|---------|
| VR0a | 0,35% | -0,30% | -0,58% | -3,77% | 0,01% |
| VR0g | 0,04% | -0,34% | 1,61% | -4,86% | 0,88% |
| VR1 | 1,02% | -2,38% | 0,55% | -4,53% | 2,30% |
| VR2 | -0,79% | -0,71% | 0,29% | -4,22% | 2,43% |
| VR3 | -1,89% | -1,80% | -1,47% | -4,77% | 2,46% |

Os valores dos fatores de emissão e de consumo da Tabela 9 ficaram próximos dos valores de referência da Tabela 7. No entanto, os valores da Tabela 9 foram obtidos para valores médios do ciclo FTP e uma análise dos valores nas três fases do ciclo permitiria uma melhor avaliação da adaptação. Para isto, foram adotados como valores de referência os fatores de emissão de HC, CO, NOx e CO₂ de um ensaio de um veículo em um dinamômetro de chassis no ciclo FTP, obtidos por Vaz de Melo (2004), disagregados entre as fases do ciclo, apresentados na Tabela 11. Para a comparação das emissões de CO₂, foram estimados os valores equivalentes para gasolina A, conforme descrito anteriormente.

Tabela 11. Fatores de emissão do ensaio 1 de Vaz de Melo (2004).

| Ciclo FTP | HC (g km ⁻¹) | CO (g km ⁻¹) | NOx (g km ⁻¹) | CO ₂ (g km ⁻¹) | |
|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|---------------------------------------|---------|
| | Gasolina C | Equivalente | | | |
| Fase 1 ¹ | 0,68 | 3,20 | 1,12 | 190,560 | 205,615 |
| Fase 2 ² | 0,05 | 0,50 | 0,14 | 196,160 | 211,657 |
| Fase 3 ³ | 0,08 | 1,09 | 0,36 | 172,540 | 186,171 |
| Total ³ | 0,265 | 1,570 | 0,530 | 186,656 | 201,402 |

^{1,2}Para uma distância de 5,78 km e 6,21 km, respectivamente; ³Calculado com base nas distâncias estimadas no CMEM para cada fase.

Foram usados três arquivos de atividade, referentes a cada fase do ciclo FTP e para os parâmetros específicos do veículo VZM (Tabela 8), compatíveis com o veículo usado por Vaz de Melo (2004). Como o valor de referência é para um veículo e não para a média de vários veículos, o erro percentual foi limitado a $\pm 1\%$ para todos os fatores de emissão. A Tabela 12 apresenta os valores obtidos no CMEM, com a variação percentual em relação aos valores da Tabela 11. Comparando-se os valores

totais do ciclo FTP, todos apresentaram variações percentuais inferiores ao limite adotado ($\pm 1\%$). Contudo, a análise entre as fases revelou valores com uma variação percentual mais significativa para CO e NOx (20 e 78%, respectivamente) na fase 2 (estabilizada). Os parâmetros do CMEM foram então ajustados para se equilibrar esses valores entre as fases, reduzindo-se a variação percentual, que ficou dentro da variação de $\pm 10\%$.

Tabela 12. Fatores de emissão médios obtidos no CMEM após ajuste de parâmetros.

| Ciclo FTP | HC (g km ⁻¹) | CO (g km ⁻¹) | NOx (g km ⁻¹) | CO ₂ (g km ⁻¹) Gasolina C Equivalente |
|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|--|
| Fase 1 ¹ | 0,682 (0,29%) | 3,180 (-0,63%) | 1,090 (-2,68%) | 185,828 (-3,01%) |
| Fase 2 ² | 0,052 (-4,00%) | 0,500 (0,00%) | 0,150 (7,14%) | 203,549 (3,77%) |
| Fase 3 ³ | 0,076 (-5,00%) | 1,200 (2,75%) | 0,370 (2,78%) | 171,001 (-0,89%) |
| Total ³ | 0,265 (0,02%) | 1,573 (0,21%) | 0,527 (-0,57%) | 186,873 (0,12%) |
| | | | | 201,636 |

^{1,2}Para uma distância de 5,78 km e 6,21 km, respectivamente; ³Calculado com base nas distâncias estimadas no CMEM para cada fase.

Conclusão

O uso do fator de consumo como valor de referência permitiu uma aproximação mais correta, já que a quantidade de combustível queimado tem grande influência nas emissões. A comparação com fatores de emissão de um veículo real no ciclo FTP demonstrou que, mesmo com uma variação percentual baixa, na análise dos fatores desagregados, a variação percentual pode ser maior. A análise dos fatores de emissão em cada fase do ciclo FTP dificulta o processo de adaptação, mas melhora a aproximação ao comportamento do veículo nas três fases distintas do ciclo. Esta adaptação foi comparada somente com valores médios de emissão, assim, o uso do CMEM fica restrito à determinação de fatores médios de emissão. A possibilidade de se comparar com valores de emissão a cada segundo de veículos, pertencentes aos estágios tecnológicos do Proconve, permitiria uma verificação desta adaptação.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, pela concessão de bolsas de doutorado e de produtividade, e ao Detran-PR.

Referências

ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6601:** veículos rodoviários automotores leves: determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono,

óxidos de nitrogênio e dióxido de carbono no gás de escapamento. Rio de Janeiro, 2001.

ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7024:** veículos rodoviários automotores leves: medição do consumo de combustível. Rio de Janeiro, 2002.

BARTH, M.; AN, F.; YOUNGLOVE, T.; SCORA, G.; LEVINE, C.; ROSS, M.; WENZEL, T. **Comprehensive modal emission model (CMEM):** version 2.0 user's guide. Riverside: University of California, 2000.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa:** emissões de gases de efeito estufa por fontes móveis no setor energético. Brasília, 2002. (Relatório de referência).

CETESB-Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Relatório de qualidade do ar no estado de São Paulo 2005.** São Paulo, 2006.

DETRAN-Departamento de Trânsito do Paraná. Divisão de Estatística. **Frota cadastrada no município de Maringá:** posição dezembro de 2005. Maringá, 2006.

EL-SHAWARBY, I.; AHN, K.; RAKHA, H. Comparative field evaluation of vehicle cruise speed and acceleration level impacts on hot stabilized emissions. **Transportation Research. Part D**, v. 10, n. 1, p. 13-30, 2005.

EPA-Environment Protection Agency. **Compilation of air pollutant emission factors:** mobile sources. Durham: US Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, 1985. v. 2. Report (AP-42).

IBGE-Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Características médias da população brasileira.** Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 18 maio 2006.

JACONDINO, G. B.; CYBIS, H. B. B. Avaliação de modelos de emissão de poluentes em simuladores de tráfego. In: CONGRESSO DE ENSINO E PESQUISA EM TRANSPORTES, 16., 2002, Natal. **Anais...** Rio de Janeiro: Lagoa Editora, 2002. v. 1, p. 211-222.

JACONDINO, G. B.; CYBIS, H. B. B. Análise do efeito da agregação das variáveis do tráfego na estimativa de emissões veiculares. In: SEMANA DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E TRANSPORTES, 3., 2003, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: UFRGS, 2003.

LIMA, E. P.; GIMENES, M. L.; DEMARCHI, S. H. Estudo da emissão de poluentes veiculares através do simulador de tráfego integration. In: ICTR 2004: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA EM RESÍDUOS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, 2004, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ICTR, 2004.

LIMA, E. P.; GIMENES, M. L.; DEMARCHI, S. H. Adaptação do modelo de emissão modal CMEM para a frota da cidade de Maringá – Paraná. In: 19., CONGRESSO DE ENSINO E PESQUISA EM TRANSPORTES, 2005, Recife. **Anais...** Rio de Janeiro: Lagoa Editora, 2005. v. 1, p. 511-522.

MENDES, F. E. **Avaliação de programas de controle de poluição atmosférica por veículos leves no Brasil.**

2004. 179f. Tese (Doutorado em Planejamento Energético)-Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- NOLAND, R. B.; QUDDUS, M. A. Flow improvements and vehicle emissions: effects of trip generation and emission control technology. **Transportation Research Part D**, v. 11, n. 1, p. 1-14, 2006.
- RAKHA, H.; AHN, K.; TRANI, A. Comparison of MOBILE5a, MOBILE6, VT-MICRO, and CMEM models for estimating hot-stabilized light-duty gasoline vehicle emissions. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 30, n. 6, p. 1010-1021, 2003.
- RAKHA, H.; AHN, K.; TRANI, A. Development of VT-Micro model for estimating hot stabilized light duty vehicle and truck emissions. **Transportation Research Part D**, v. 9, n. 1, p. 49-74, 2004.
- VAZ DE MELO, C. R. **Desenvolvimento de uma metodologia para determinar a concentração dos gases emitidos pelos veículos automotores leves de Ciclo Otto em condições reais de operação**. 2004. 118f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes)-Universidade de Brasília, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, 2004.
- VOLKSWAGEN. **Gol 1.0 e 1.6**: manual de instruções, manutenção e garantia. São Bernardo do Campo: Volkswagen, 2003. Edição 04/03.
- WASHBURN, S.; SEET, J.; MANNERING, F. Statistical modeling of vehicle emissions from inspection/maintenance testing data: an exploratory analysis. **Transportation Research Part D**, v. 6, n. 1, p. 21-36, 2001.

Received on 10 April, 2008.

Accepted on 10 September, 2009.

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.