



**CIBIM 8**

8º Congreso Iberoamericano  
de Ingeniería Mecánica



90  
AÑOS

PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ

Federación  
Iberoamericana  
de Ingeniería  
Mecánica



## 8º CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ENGENHARIA MECANICA

Cusco, 23 a 25 de Outubro de 2007  
(Livro Virtual: ISBN 978-9972-2885-3-1)

### METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DE FATORES DE DETERIORAÇÃO DAS EMISSÕES DE POLUENTES PARA VEÍCULOS LEVES

Elisete Gomides Dutra<sup>1</sup>, Edwan Fernandes Fioravante<sup>1</sup>, Ramón Molina Valle<sup>2</sup>, Roberto Márcio de Andrade<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Fundação Estadual de Meio Ambiente de Minas Gerais – Rua Espírito Santo, 495 - Centro - CEP: 30160-030 - Belo Horizonte - MG - - E-mail: [eliseteg@feam.br](mailto:eliseteg@feam.br)

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG, Ave. Antônio Carlos, 6.627, Campus Pampulha, CEP: 31.270-901, Belo Horizonte – MG, Brasil, e-mail [ramon@demec.ufmg.br](mailto:ramon@demec.ufmg.br); [rma@ufmg.br](mailto:rma@ufmg.br)

#### RESUMO

As concentrações de monóxido de carbono (*CO*) e de hidrocarbonetos (*HC*) no escapamento de 900 automóveis de Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, foram medidas para obter parâmetros básicos para quantificar as emissões desses poluentes. Após agrupá-los por ano de fabricação, as razões entre os fatores médios de emissão de *CO* e de *HC* dos veículos em uso (concentrações observadas) e os originalmente permitidos para os veículos novos nacionais (concentrações estimadas) foram calculadas e analisadas pela técnica de suavização exponencial de Holt. Dessa forma foram determinados os fatores de deterioração das emissões (*FD*) de *CO* e de *HC* em função do tempo de uso dos automóveis de Belo Horizonte. Os *FD* são consistentes com o desenvolvimento das tecnologias automotivas para a última década. Os *FD* de *CO* e de *HC* dos veículos com 1 ano de uso são, em média, inferiores a 1,01 e 1,03, respectivamente. Os acréscimos nas emissões de *CO* e de *HC*, após 10 anos de uso dos veículos, são de cerca de 26% e 45%, respectivamente. A metodologia desenvolvida mostrou-se eficiente e pode ser usada para estimar *FD* em regiões com Programas de Inspeção de Emissão Veicular implantados.

**PALAVRAS CHAVES:** emissão veicular, veículo leve, fator de deterioração, poluição atmosférica, inventário de emissão.

## 1 - INTRODUÇÃO

A emissão de poluentes por veículos automotores é a principal responsável pela degradação da qualidade do ar nos grandes centros urbanos. Os gases poluentes, que são emitidos pelo escapamento dos veículos leves do ciclo Otto, objeto dessa pesquisa, são produtos das reações químicas associadas ao processo de combustão que ocorrem nos motores. Dentre os principais poluentes têm-se o monóxido de carbono (*CO*) e os hidrocarbonetos (*HC*) que são produtos de combustão incompleta.

Para quantificar essas emissões mediante elaboração de Inventários de Emissão Veicular – IEV, é necessário conhecer os fatores médios de emissão originalmente permitidos para os veículos novos, os fatores de deterioração das emissões (*FD*) com o tempo de uso dos veículos, as quilometragens médias anuais percorridas e a caracterização da frota em estudo.

Os fatores médios de emissão (*FE*) dos veículos leves novos nacionais são determinados através de ensaios padronizados realizados conforme a norma brasileira NBR N° 6601 [1]. Para os automóveis fabricados a partir de 1986, em atendimento ao Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores - PROCONVE, a indústria automobilística passou a certificar os *FE* de todos os modelos produzidos. São então calculadas as médias ponderadas dos fatores de emissão para cada modelo determinando-se os *FE* dos veículos novos para cada ano de fabricação [2].

Os fatores médios de emissão de *CO* e de *HC* tendem a aumentar ao longo dos anos em decorrência do uso do veículo, mesmo sob manutenção adequada. Dessa forma, para os veículos em uso, esses fatores são obtidos multiplicando-se os *FE* dos veículos novos por *FD*. Para quantificar as emissões de *CO* e de *HC* de veículos leves nacionais, geralmente são utilizados *FD* definidos pela USEPA [3], para os veículos dos Estados Unidos, considerando uma defasagem tecnológica de cerca de 10 anos. Entretanto, esses *FD* não refletem a realidade do nosso país quanto à qualidade de combustível, condição de estradas e vias, clima e manutenção dos veículos. Portanto, para melhorar a representatividade das estimativas das emissões obtidas pelos IEV é necessário definir fatores de deterioração locais ou regionais representativos dos veículos leves nacionais.

## 2 - METODOLOGIA

A primeira etapa do estudo constou da medição das concentrações de *CO* e de *HC* no gás de escapamento de uma amostra representativa dos veículos leves do ciclo Otto de Belo Horizonte. Na segunda etapa, os dados experimentais foram analisados com a finalidade de determinar os fatores de deterioração das emissões de *CO* e de *HC* com o tempo de uso dos veículos.

### 2.1 - Medição das concentrações de *CO* e *HC* no escapamento dos veículos

O planejamento amostral baseou-se na técnica de amostragem estratificada, uma vez que as emissões de *CO* e de *HC* são heterogêneas em função do ano de fabricação dos veículos. Para cada estrato assim definido, para no período de 1994 a 2004, utilizou-se, de forma aproximada, o método de Amostragem Aleatória Simples (AAS) sem reposição para o cálculo do tamanho da amostra.

O tamanho da amostra foi calculado considerando, para cada estrato (*h*), população normalmente distribuída, nível de confiança de 95% e erro de estimação  $B_h$  mediante utilização da Equação (1), proposta por Scheaffer, [4]:

$$n_h = \frac{N_h s_{\bar{y}_h}^2}{(N_h - 1)(B_h / 1,96)^2 + s_{\bar{y}_h}^2} \quad (1)$$

onde  $N_h$  é o número de veículos leves do ciclo Otto da frota de Belo Horizonte por estrato,  $n_h$  o número de veículos da amostra por estrato,  $s_{\bar{y}_h}^2$  é a variância da média para cada estrato da amostra.

O tamanho total da amostra ( $n$ ) foi obtido a partir da soma do número de veículos calculados para cada estrato ( $n_h$ ). Os erros de estimação para cada estrato ( $B_h$ ) foram definidos como sendo iguais a 25% dos limites de máximos de emissão de *CO* permitidos para os veículos em uso.

Assim, para os estratos dos veículos fabricados de 1994 a 1996, com limite máximo permitido para *CO* de 3% v/v, o erro de estimação foi de 0,75% v/v e para os estratos dos veículos fabricados de 1997 a 2004, com limite máximo permitido para *CO* de 1% v/v, foi de 0,25% v/v [5]. O tamanho de cada estrato populacional por ano de fabricação foi disponibilizado pelo DETRAN/MG [6], mas somente durante a realização das medições, as unidades amostrais, selecionadas aleatoriamente nas vias públicas de Belo Horizonte, foram classificadas dentro dos estratos. A amostra foi, portanto, pós-estratificada. A Tabela 1 mostra o número de veículos leves do ciclo Otto de Belo Horizonte, o tamanho amostral calculado e o número de veículos da amostra.

Tabela 1 - Veículos leves de Belo Horizonte, tamanho amostral calculado e o número de veículos da amostra por estratos e total

Ano de fabricação	<sup>(1)</sup> Veículos leves de Belo Horizonte	<sup>(2)</sup> Tamanho amostral	<sup>(2)</sup> Veículos da amostra
<1994	237.229	66	259
1994	28.175	55	55
1995	38.411	30	79
1996	35.171	14	50
1997	44.316	56	75
1998	35.155	76	80
1999	26.256	48	58
2000	33.789	27	57
2001	40.356	36	65
2002	38.902	52	61
2003	40.323	15	32
2004	56.887	2	29
Total	655.240	426	900

<sup>(1)</sup> [6] <sup>(2)</sup> [7]

Verifica-se, na Tabela 1, que o número mínimo de veículos calculado para compor cada estrato da amostra foi alcançado. Como o número de veículos analisados foi pós-estratificação, o total de veículos analisados ultrapassou o tamanho amostral para a maioria dos estratos.

As concentrações de CO e de HC no escapamento dos veículos foram obtidas utilizando duas unidades de medição, uma fixa e outra móvel, equipadas com analisadores de gases, sensores de rotação e de temperatura do motor, microcomputadores e impressoras. A Figura 1 (a) mostra o rack dos equipamentos da Unidade Fixa do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG e a Figura 2 mostra os equipamentos instalados no veículo da Unidade Móvel.

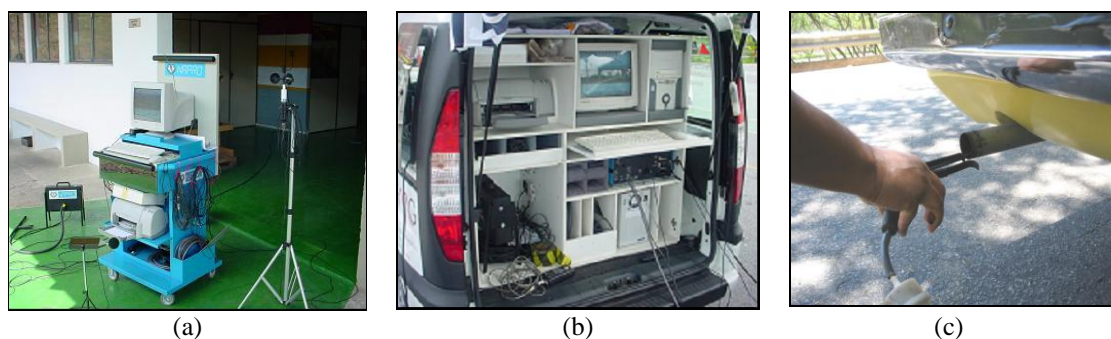


Figura 1 - Equipamentos de medição de emissões veiculares das unidades Fixa (a) e Móvel (b) e colocação da sonda de captação de gases no escamento de um automóvel

As concentrações de CO e de HC no escapamento dos veículos foram medidas usando analisadores do tipo PC-Multigás [8] aprovados pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Relatório de Verificação Inicial N°169/2002). Nesses analisadores, as concentrações de CO e de HC são determinadas pela medição da intensidade de luz absorvida para cada gás para comprimentos de ondas específicos na faixa de radiação do infravermelho. As exatidões dos analisadores para as faixas de concentração de CO de 0 a 2% v/v e de 2 a 5% v/v correspondem a  $\pm 0,06\%$  v/v e  $\pm 0,15\%$  v/v, respectivamente. Para faixas de concentração de HC de 0 a 400 ppm e de 400 a 1000 ppm, esses valores são  $\pm 20$  ppm e  $\pm 40$  ppm, respectivamente [9].

As medições foram realizadas com os veículos nas condições de operação estabelecidas pelo CONAMA [5], em marcha lenta e a 2.500 rpm, na temperatura normal de trabalho do motor. Os gases de exaustão foram coletados por sondas colocadas no interior do escapamento dos veículos e levados até o analisador de gases. foram

Para medição da velocidade angular do motor, foram utilizados medidores de rotação indutivo ou universal com tempo de resposta de 0,5 segundos e exatidão de  $\pm 50$  rpm. As informações: ano de fabricação, ano-modelo,

combustível, tipo de veículo e município onde foi licenciado foram obtidas por consulta aos documentos dos veículos.

As médias dos resultados das medições das emissões de *CO* e de *HC* da amostra de 900 veículos licenciados em Belo Horizonte, em marcha lenta e a 2500 rpm, correspondem aos fatores médios de emissão desses gases ( $FE_{CO}$  e  $FE_{HC}$ ) por estratos, ou seja, por ano de fabricação dos veículos leves do ciclo Otto **em uso** de Belo Horizonte.

Os intervalos de confiança para as médias do  $FE_{CO}$  e do  $FE_{HC}$  para a população de cada estrato  $h$  ( $\mu_h$ ) foram calculados, assumindo distribuição de probabilidade normal, conforme equação apresentada por Scheaffer [4], página 102. Os  $FE$  de *CO* e de *HC*, em marcha lenta e a 2500 rpm, para os veículos leves de Belo Horizonte e os respectivos intervalos de confiança são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Fatores médios de emissão de *CO* e de *HC* e intervalos de confiança por ano de fabricação dos veículos leves do ciclo Otto **em uso** de Belo Horizonte - 2005

Ano de fabricação	Fator de emissão de <i>CO</i> (% v/v)		Fator de emissão de <i>HC</i> (ppm)	
	Marcha lenta	2500 rpm	Marcha lenta	2500 rpm
<1994	4,23 ± 0,37	3,49 ± 0,32	570,9 ± 77,9	332,3 ± 67,0
1994	2,08 ± 0,74	1,80 ± 0,61	365,3 ± 101,8	215,4 ± 68,3
1995	1,30 ± 0,46	0,90 ± 0,34	248,2 ± 54,4	149,6 ± 30,1
1996	0,79 ± 0,38	0,47 ± 0,16	225,4 ± 42,4	133,1 ± 24,9
1997	0,50 ± 0,21	0,54 ± 0,21	163,1 ± 28,9	119,5 ± 18,7
1998	0,37 ± 0,25	0,44 ± 0,24	143,5 ± 31,5	102,9 ± 20,7
1999	0,37 ± 0,23	0,38 ± 0,10	165,5 ± 83,5	94,3 ± 18,7
2000	0,28 ± 0,17	0,30 ± 0,12	144,8 ± 30,8	98,5 ± 18,4
2001	0,26 ± 0,10	0,38 ± 0,18	139,8 ± 23,8	119,5 ± 31,3
2002	0,19 ± 0,12	0,38 ± 0,23	165,7 ± 60,1	134,1 ± 48,4
2003	0,13 ± 0,17	0,05 ± 0,02	91,7 ± 32,9	75,9 ± 25,6
2004	0,02 ± 0,02	0,05 ± 0,05	74,93 ± 18,9	69,8 ± 17,1

Os intervalos de confiança correspondem a uma estimativa para as médias dos fatores de emissão de cada estrato da frota de veículos leves do ciclo Otto de Belo Horizonte, que somente seriam obtidas se todos os veículos da frota fossem analisados. Os fatores médios de emissão de *CO* e de *HC*, em marcha lenta e a 2500 rpm, são em geral decrescentes com a diminuição da idade dos veículos, conforme esperado. Fatores médios de emissão ( $FE$ ) mais altos em marcha lenta, (regime mais crítico de emissão do motor quando comparados aos valores obtidos a 2500 rpm) também foram observados.

A redução dos  $FE$  de *CO* para os veículos fabricados em 2004, em relação aos veículos fabricados antes de 1994, foi cerca de 99%, em marcha lenta, e 98% a 2500 rpm. Para *HC*, as reduções foram de aproximadamente 90% em marcha lenta e 80% a 2500 rpm, para o mesmo período. Para os veículos fabricados a partir de 1994, os  $FE$  de *CO* são inferiores aos limites máximos de emissão desses poluentes para fins de fiscalização de veículos em uso. Esses limites correspondem a 3%v/v, para os fabricados no período de 1994 a 1996, e a 1%v/v, para os fabricados de 1997 a 2004. Para *HC*, os  $FE$  obtidos foram todos muito inferiores ao limite máximo de emissão único de 700 ppm.

Os  $FE$  de emissão de *CO* e de *HC* para toda frota de Belo Horizonte foram calculados pela média ponderada das médias de cada estrato. Os intervalos de confiança foram construídos considerando a aleatoriedade dos tamanhos dos estratos ( $n_h$ ), conforme proposto por Sheaffer [4].

Os fatores médios de emissão de *CO* e os respectivos intervalos de confiança, em marcha lenta e a 2500 rpm, para toda a frota de veículos leves do ciclo Otto de Belo Horizonte corresponderam a 1,86% v/v ( $\pm 0,13\%$  v/v) e 1,56% v/v ( $\pm 0,12\%$  v/v), respectivamente. Para a emissão de *HC*, esses valores foram a 312,46 ppm ( $\pm 27,10$ ) e 194,00 ppm ( $\pm 22,61$  ppm), respectivamente.

Pode-se afirmar, com 95% de confiança, que os fatores médios de emissão de *CO* para toda a frota de veículos leves do ciclo Otto de Belo Horizonte estão entre 1,73%v/v e 1,99%v/v em marcha lenta e entre 1,44%v/v e 1,68%v/v a 2500 rpm. Da mesma forma, pode-se afirmar, com 95% de confiança, que os fatores médios de emissão de *HC* para essa frota estão entre 285,36 ppm e 339,56 ppm, em marcha lenta, e entre 171,39 ppm e 216,1 ppm, a 2500 rpm.

## 2.2 - Determinação dos Fatores de Deterioração das emissões de *CO* e de *HC*

Os fatores de deterioração das emissões de *CO* e de *HC* com a idade dos veículos leves do ciclo Otto de Belo Horizonte foram determinados mediante análise da relação entre os fatores médios de emissão de *CO* e de *HC* desses

veículos e os obtidos nos processos de certificação de veículos novos nacionais disponibilizados pelo IBAMA [2]. Os primeiros foram medidos em unidade de concentração (CO em %v/v e HC em ppm) e os segundos fornecidos em gramas por quilômetro.

Para análise da relação entre esses fatores de emissão, foi necessário padroniza-los. Para tal foi utilizada a técnica dos números índices ou simplesmente índices. Para cada uma das séries temporais dos fatores médios de emissão dos veículos em uso e dos veículos novos, para o período de 1994 a 2003, os *índices* foram obtidos dividindo os fatores médios de emissão de cada ano de fabricação dos veículos pelo fator médio de emissão do ano base. O ano base escolhido foi 2003 uma vez que esses veículos tinham, na época da pesquisa, cerca de um ano de uso e considerou-se que ainda mantinham os fatores médios de emissão de CO e de HC conforme saíram de fábrica. Dessa forma criou-se um elo de ligação entre as séries dos fatores médios de emissão dos veículos em uso e novos, pois para os veículos fabricados nesse ano os *FD* de CO e de HC foram definidos como sendo iguais a um.

A análise dos *FE* dos veículos leves em uso e novos foi realizada para cada ano de fabricação para o período correspondente aos 10 anos mais recentes, período mínimo para utilização na elaboração de inventários de emissão veicular de Belo Horizonte. Também foi considerado que a definição de um modelo para a variação dos *FD* para os veículos leves só se justifica a partir da implementação de tecnologias para redução das emissões para atendimento às metas do PROCONVE que tiveram início em 1992. Considerou-se também que depois de percorridos 100.000 km, o que equivale a cerca de 7 anos de uso do veículo, os *FD* de CO e de HC tendem a ficar constantes [3]. Portanto a definição dos *FD* para os 10 anos mais recentes possíveis atendeu aos objetivos da pesquisa.

As séries temporais dos fatores de emissão de veículos novos nacionais foram utilizadas como referência por estarem sob influência apenas da evolução tecnológica ao longo dos anos. Os índices de CO e de HC dos veículos em uso de Belo Horizonte ( $ICO_{uso}$  e  $IHC_{uso}$ ) e dos veículos novos nacionais ( $ICO_{novo}$  e  $IHC_{novo}$ ) são apresentados nos gráficos (a) e (b) da Figura 2.

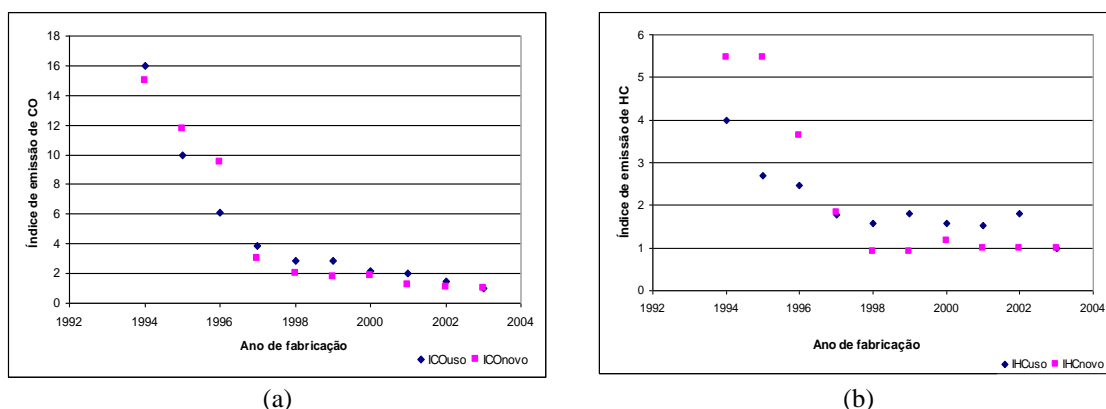


Figura 2 - Índices de emissão de CO (a) e de HC (b) dos veículos em uso de Belo Horizonte (concentrações observadas) e dos veículos novos nacionais [2].

A Figura 2 (a) mostra a tendência de redução significativa dos índices de emissão de CO, sendo mais acentuada antes de 1997, tanto para as emissões dos veículos novos, quanto para os veículos em uso. Interessante observar que em 1997 teve início a Fase L-III do PROCONVE que reduziu o limite máximo de emissão de CO dos veículos novos de 12g/km para 2g/km [10]. Nesse ano, as montadoras tiveram de empregar, além de catalisadores, tecnologias para formação de mistura e controle eletrônico do motor. Pode-se verificar uma influência mais direta na degradação das emissões com o tempo de uso dos veículos os fabricados até 1996, ou seja, aqueles com mais de 7 anos de uso. Para esses veículos há maiores diferenças entre os *ICO* dos veículos em uso e os *ICO* dos veículos novos. Esse fato sugere uma maior influência do uso/manutenção com o aumento da idade dos veículos que se mostra mais acentuada para os veículos fabricados até 1996.

Pode-se verificar na Figura 2 (b) que os *IHC* dos veículos em uso de Belo Horizonte e dos veículos novos nacionais, decrescem com a diminuição da idade dos veículos. Verifica-se para *HC*, da mesma forma que para *CO*, uma aproximação entre os índices de emissão de veículos em uso e novos para os veículos fabricados a partir de 1997.

Foi considerado que as reduções nos valores dos *FE* dos veículos novos a cada ano ocorreram exclusivamente devido às melhorias no processo de fabrica. Dessa forma, as variações percentuais dos *FE* de CO e de HC dos veículos novos fabricados no ano (*t*) em relação aos veículos novos fabricados ano seguinte (*t* + 1), tendo o ano 2003 como base para essa análise, foram calculadas pela Equação (2):

$$Var_{novo} = (FE_{novot} - FE_{novot+1})/FE_{novot+1} \quad (2)$$

onde,  $Var_{novo}$  é a variação anual dos  $FE$  dos veículos novos,  $FE_{novot}$  é o  $FE$  dos veículos novos no ano  $t$  e  $FE_{novot+1}$  é o  $FE$  dos veículos novos no ano seguinte ( $t + 1$ ).

Considerou-se ainda que o  $FE$  dos veículos em uso de Belo Horizonte, fabricados no ano ( $t$ ), é igual ao  $FE$  desses veículos fabricados no ano seguinte ( $t + 1$ ), acrescido das emissões correspondentes às alterações no projeto de fabricação e à deterioração das emissões com o tempo de uso dos veículos, a cada ano, conforme representado pela Equação (3):

$$FE_{usot} = FE_{usot+1} + E_{fab} + E_{det} \quad (3)$$

sendo  $FE_{usot}$  e  $FE_{usot+1}$  os  $FE$  dos veículos em uso de Belo Horizonte no ano  $t$  e no ano seguinte  $t+1$ , respectivamente, e  $E_{fab}$  e  $E_{det}$  as parcelas de emissão correspondentes às alterações de fábrica e à deterioração das emissões, a cada ano, respectivamente.

Desconsiderando o último termo da Equação (3), que corresponde às emissões causadas por deterioração/manutenção dos veículos ( $E_{det}$ ), tem-se o fator de emissão estimado para os veículos em uso ( $FE_{est}$ ), quando novos, em unidade de concentração (%v/v). Considerando que a parcela de alteração da emissão de fábrica ( $E_{fab}$ ) pode ser obtida aplicando-se a variação percentual dos fatores médios de emissão de veículos novos a cada ano ( $Var_{novo}$ ) aos fatores médios de emissão dos veículos em uso fabricados no ano seguinte ( $FE_{usot+1}$ ) chega-se à Equação (4):

$$FE_{est} = FE_{usot+1} + Var_{novo} \cdot FE_{usot+1} \quad (4)$$

Assim, para o cálculo do  $FE_{est}$  foi considerado apenas o aumento das emissões dos veículos em um determinado ano ( $t$ ) em relação ao veículo mais novo, fabricado no ano seguinte ( $t+1$ ), devido as alterações de fábrica, ou seja, é o fator de emissão que o veículo teria caso não houvesse deterioração do motor e do sistema de exaustão com o tempo de uso. Dessa forma, foram geradas duas séries temporais de  $FE$  estimados para  $CO$  e para  $HC$  para os veículos quando novos em unidades de concentração. As variações anuais dos  $FE$  de  $CO$  e de  $HC$  dos veículos novos e os  $FE$  estimados para  $CO$  e para  $HC$  para os veículos quando novos são mostrados na Tabela 3.

Os fatores de deterioração das emissões ( $FD$ ) são definidos como sendo os valores, em porcentagem, relativos aos aumentos dos  $FE$  de um poluente com o tempo de uso dos veículos em relação aos fatores médios de emissão dos veículos quando novos. Portanto, podem ser obtidos através da razão entre os fatores médios de emissão de veículos em uso, fabricado no ano  $t$ , e os fatores médios de emissão desses veículos quando novos, ao sair da fábrica no ano  $t$  [10].

Tabela 3 - Variações anuais dos fatores médios de emissão de  $CO$  e de  $HC$  dos veículos novos e respectivos fatores médios de emissão estimados para os veículos em uso ao sair de fábrica

Ano de fabricação	$Var_{FE_{CO\ novo}}$	$FE_{CO\ est}$ (% v/v)	$Var_{FE_{HC\ novo}}$	$FE_{HC\ est}$ (ppm)
1994	0,28	1,66	0,00	248,2
1995	0,24	0,98	0,50	338,1
1996	2,17	1,58	1,00	326,1
1997	0,50	0,56	1,00	289,3
1998	0,14	0,42	0,00	165,5
1999	-0,04	0,27	-0,23	111,4
2000	0,52	0,40	0,18	165,2
2001	0,12	0,21	0,00	165,7
2002	0,08	0,14	0,00	91,7
2003		0,13		91,7

<sup>(1)</sup> IBAMA, 2006

Inicialmente foram calculados os valores correspondentes às razões entre os fatores médios de emissão de  $CO$  e de  $HC$  dos veículos em uso ( $FE_{uso}$ ) e os fatores de emissão estimados para  $CO$  e  $HC$  para esses veículos quando novos ( $FE_{est}$ ) em função da idade dos veículos. Como o objetivo da pesquisa é avaliar a tendência principal de comportamento da deterioração das emissões com a idade dos veículos, esses valores foram suavizados. O método de Suavização Exponencial de Holt foi utilizado por ser indicado para séries curtas que apresentam tendências. Os

valores obtidos para  $FE_{uso}/FE_{est}$  para  $CO$  e para  $HC$ , em função da idade dos veículos, e os valores suavizados que definiram os fatores de deterioração das emissões ( $FD$ ) de  $CO$  e de  $HC$  para os veículos leves de Belo Horizonte são apresentados nos gráficos da Figura 3 e na Tabela 4.

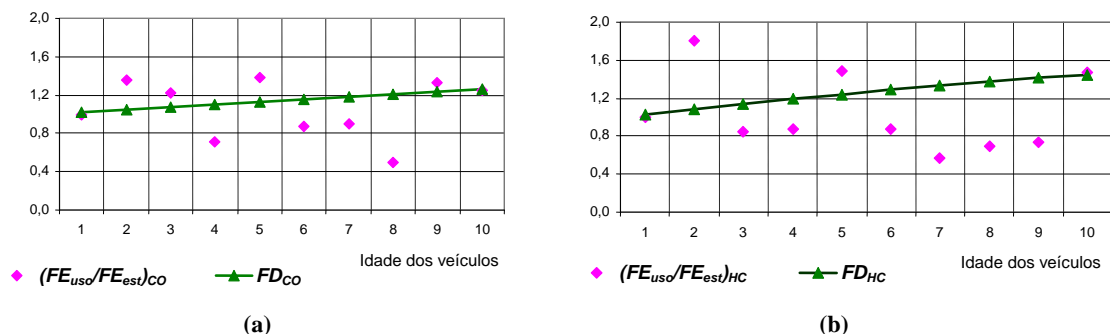


Figura 3 - Razão entre  $FE_{uso}$  e  $FE_{est}$  para  $CO$  (a) e para  $HC$  (b) e os respectivos  $FD$  definidos para os veículos leves de Belo Horizonte

Tabela 4 – Fatores de deterioração ( $FD$ ) de  $CO$  e de  $HC$  em função da idade dos veículos leves de Belo Horizonte

Idade (anos)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$FD_{CO}$	1,01	1,04	1,06	1,10	1,12	1,15	1,18	1,21	1,24	1,26
$FD_{HC}$	1,03	1,10	1,14	1,19	1,24	1,29	1,34	1,37	1,41	1,45

Para correlacionar o ano de fabricação com o tempo de uso dos veículos considerou-se que os fabricados em 2004 tinham menos de 1 ano de uso e os fabricados em 2003, em média, 1 ano de uso. Assim, os fatores de deterioração das emissões de  $CO$  com a idade dos veículos leves do ciclo Otto de Belo Horizonte, apresentados na Figura 3(a) e na Tabela 4 mostram que os  $FD_{CO}$  são, em média, iguais a 1,01 para os veículos com 1 ano de uso, 1,10 para os com 4 anos de uso e 1,26 para os com 10 anos de uso. Os  $FD_{CO}$  dos veículos com até 2 anos de uso são, em média, inferiores a 1,04, ou seja, o aumento médio das emissões de  $CO$  por esses veículos é inferior a 4%. Os veículos com 10 anos de uso emitem, em média, 26% a mais do que quando foram fabricados. Quanto aos  $FD$  das emissões de  $HC$ , verifica-se, na Figura 3(b) e na Tabela 4, um aumento nas emissões de cerca de 3% para os veículos com 1 ano de uso, 19% com 4 anos de uso e atingem 45% para os com 10 anos de uso. O  $FD_{HC}$  (1,45) foi 15% maior que o  $FD_{CO}$  (1,26) para os veículos com cerca de 10 anos de uso.

### 3 - CONCLUSÕES

Os resultados mostram que, para os veículos com cerca de 3 anos de uso, não ocorre degradação significativa nas emissões dos veículos leves do ciclo Otto de Belo Horizonte em relação às emissões originais de fábrica [2]. Para os veículos com cerca de 10 anos de uso os fatores de deterioração das emissões de  $CO$  chegaram a cerca de 1,26, ou seja, apresentaram, em média, 26% de aumento nos fatores médios de emissão de  $CO$  de fábrica.

Para hidrocarbonetos, os fatores de deterioração das emissões se mostraram em geral mais altos do que para monóxido de carbono. Esse fator atingiu cerca de 10% para veículos com 2 anos de uso e foi aumentando até o valor de 45% com 10 anos de uso.

A metodologia de determinação dos fatores de deterioração de  $CO$  e de  $HC$  mostrou-se eficiente, gerando valores consistentes com os esperados, e possibilita sua utilização para definição de fatores de deterioração em regiões com Programas de Inspeção de Emissão Veicular implantados.

Para determinar fatores de deterioração das emissões, melhor seria acompanhar o uso de um grupo de veículos desde o momento em que saem de fábrica e assim determinar o fator médio de deterioração das emissões após 10 anos de uso, por exemplo. Os custos e dificuldades inerentes a esse tipo de estudo (longitudinal) fazem com que sua execução seja rara. No estudo aqui apresentado, foi proposta uma abordagem alternativa ao estudo longitudinal, uma vez que os dados disponíveis para Belo Horizonte referem-se a um estudo do tipo transversal, ou seja, executado em um determinado instante do tempo. Ainda que essa abordagem, **planejamento semi-painel** [11], apresente várias aproximações, pois diferentes veículos estão sujeitos a diferentes tipos de uso e manutenção ao longo do tempo, os resultados obtidos, em termos médios, apresentaram-se coerentes com os valores encontrados na bibliografia

internacional. Acredita-se que parte da deficiência do planejamento semi-painel tenha sido compensada pela utilização de um grupo de comparação (emissões dos veículos ao sair de fábrica) e pela precisão no planejamento da amostragem, pois, em virtude do nível de confiança e erro de estimação estabelecidos previamente, obteve-se uma amostra representativa da frota de Belo Horizonte, cujo tamanho, 641 veículos, dificultaria a utilização de um experimento do tipo longitudinal.

## REFERÊNCIAS

1. 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.
2. IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. *Fatores médios de emissão de veículos leves novos*. Disponível em: [www.ibama.gov.br/proconve/home.htm](http://www.ibama.gov.br/proconve/home.htm). Acesso em: 22 de junho de 2006.
3. USEPA – United States Environmental Protection Agency -. *Mobile source emission factors*. Ann Arbor Laboratory. New York, 1985.
4. SCHEAFFER, R. L.; MENDENHALL, W.; OTTI, L. *Elementary survey sampling*. 4<sup>th</sup> ed. Boston: PWS-Kent, 1990.
5. CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Resolução número 7: Define as diretrizes básicas e padrões de emissão para o estabelecimento de Programas de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso – I/M*. Brasília, 1993.
6. DETRAN/MG – Departamento de Trânsito de Minas Gerais. *Caracterização da frota de veículos automotores de Belo Horizonte*. Belo Horizonte, 2005.
7. DUTRA, E. G. *Projeto Inspeção Veicular: capacitação e avaliação inicial*. Belo Horizonte. Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM. Belo Horizonte, 2005.
8. NAPRO Eletrônica Industrial LTDA. *Analizador de gases com inspeção veicular e software de controle: manual de operação: versão: 1.11G/2003*. São Paulo, 2003.
9. DUTRA, E. G. *Metodología teórico experimental para determinação de parâmetros básicos para elaboração de inventários de emissão de veículos leves do ciclo Otto*. 160f Tese (Doutorado em engenharia mecânica na área de calor e fluidos), Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.
10. IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA. *Programa de controle da poluição do ar por veículos automotores – PROCONVE/PROMOT*. Brasília, 2004.
11. De VAUS, D.A. Formulating and clarifying research questions. Chapter 3 IN: *Survey in Social Research*. London: George Allen & Unwin, 1986, p.27-46.