

Bruno Ribeiro Mauro
Eduardo Augusto do Rosário Contani

Estudo da Emissão de Poluentes em Motor
Bi-combustível Álcool-Gasolina

Trabalho de conclusão do curso de graduação do
Departamento de Engenharia Mecânica da Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo.

Orientador: Prof. Dr.  Quenther C. Krieger Filho

São Paulo
2004

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO ESCOLA
POLITÉCNICA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA

**ESTUDO DA EMISSÃO DE POLUENTES EM MOTOR
BI-COMBUSTÍVEL ÁLCOOL-GASOLINA**

Trabalho de formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do título de
Graduação em Engenharia Mecânica

Bruno Ribeiro Mauro

Eduardo Augusto do Rosário Contani

Orientador: Prof. Dr. Guenther C. Krieger Filho

SÃO PAULO

2004



DEDALUS - Acervo - EPMN



31600011091

FICHA CATALOGRÁFICA

1420489

Mauro, Bruno Ribeiro

Estudo da Emissão de Poluentes em Motores Bi-combustíveis álcool-gasolina / B.R. Mauro, E.A.R. Contani. – São Paulo, 2004 – 69 páginas.

Trabalho de conclusão de curso - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Motores de combustão interna 2.Emissões Veiculares.

I.Mauro, Contani II.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo apresentar os principais conceitos relativos ao estudo da emissão veicular de poluentes, em motores de combustão interna bi-combustíveis movidos a etanol e gasolina. Esse estudo baseou-se na análise de resultados de teste de emissões realizados em dinamômetro de rolo. O trabalho ressalta a grande complexidade da modelagem dos processos reais de combustão que regem a formação de poluentes, onde contribuem diversos fatores para a ocorrência de resultados cuja explicação não é evidente. O trabalho pretende servir de referência para estudos mais aprofundados sobre o tema, que atualmente representa grande importância econômica e ambiental no país.

ABSTRACT

This report has as objective to approach the main concepts relatives to pollutant vehicular emissions in flexible-fuel internal combustion engines propelled by ethanol and gasoline. This study was based on chassis dynamometer emission tests results analysis. It emphasizes the complexity of modeling real combustion process which determines pollutant formation. Other external variables contribute to the unexpected occurrence of non-clear explication results. This report intends to be a reference for forward studies related to the subject, which stands for economics and environmental significance.

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 3 |
| 2. OBJETIVOS | 4 |
| 3. O PROCESSO DE COMBUSTÃO EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA DE IGNIÇÃO POR FAÍSCA..... | 5 |
| 3.1. CONCEITOS TERMODINÂMICOS..... | 5 |
| 3.2. A REAÇÃO GERAL DE COMBUSTÃO | 6 |
| 3.3. OS COMBUSTÍVEIS..... | 7 |
| 3.3.1. Etanol | 8 |
| 3.3.2. A Gasolina..... | 10 |
| 3.3.3. Diferenças mais importantes entre os combustíveis..... | 10 |
| 4. REQUISITOS DA MISTURA AR-COMBUSTÍVEL PARA MOTORES DE IGNIÇÃO POR FAÍSCA | 12 |
| 4.1. O CATALISADOR DE TRÊS VIAS | 13 |
| 4.2. O SENSOR <i>LAMBDA</i> | 14 |
| 5. FORMAÇÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS | 17 |
| 6. EMISSÕES VEICULARES DE POLUENTES | 21 |
| 6.1. FATORES QUE AFETAM OS NÍVEIS DE EMISSÕES..... | 22 |
| 6.2. O EFEITO DO AQUECIMENTO DO MOTOR | 28 |
| 7. LEGISLAÇÃO AMBIENTAL BRASILEIRA | 30 |
| 8. TESTES DE EMISSÕES GASOSAS | 32 |
| 8.1. FASES DO PROJETO: ETAPAS DE CALIBRAÇÃO | 35 |
| 8.2. O CICLO DE TESTES EPA 75 | 36 |
| 9. META DE EMISSÕES DA MONTADORA..... | 38 |
| 10. TESTE DE HOMOLOGAÇÃO DO VEÍCULO | 39 |
| 10.1. CONDIÇÕES DO TESTE..... | 39 |
| 10.2. A TRANSMISSÃO AUTOMÁTICA | 40 |
| 10.3. RESULTADOS DO TESTE DE EMISSÕES DE POLUENTES | 41 |
| 11. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS TESTES DE EMISSÕES | 44 |
| 11.1. ANÁLISE QUALITATIVA DOS RESULTADOS DOS TESTES DE EMISSÃO..... | 45 |
| 11.2. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO DO COMBUSTÍVEL NA EMISSÃO DOS POLUENTES | 51 |
| 12. FASE DE DESENVOLVIMENTO DO MOTOR..... | 60 |
| 13. CONCLUSÃO | 65 |
| 14. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 67 |

Lista de Figuras

1. Exemplo de montagem de motor e acessórios. (www.mecanicaonline.com.br, 11/2004)
2. Esquema de funcionamento de um catalisador de três vias.
3. Pressão parcial de oxigênio em função de ϕ^{-1} (Heywood, pg.302)
4. Voltagem de saída em função da relação ϕ^{-1} (Heywood, pg.302)
5. Frestas e folgas na câmara de combustão de motor de ignição por faísca. (Heywood, pg.362)
6. Gráfico da relação entre gases de escape e relação C/A⁻¹ para a gasolina. (PLINT, pg. 247)
7. Variação da concentração de NO com %EGR. (Heywood, pg.583)
8. Ciclo de teste EPA 75.
9. Eficiência média do catalisador com o tempo de funcionamento.
10. Gráfico de emissão de HC por combustível.
11. Gráfico de emissão de CO por combustível.
12. Gráfico de emissão de NO_x por combustível.
13. Gráfico de emissão de aldeídos por mistura combustível.
14. Confronto entre as emissões de poluentes por mistura combustível.
15. Emissão de NO_x por etapas do ciclo EPA 75.
16. Emissão de CO por etapas do ciclo EPA 75.
17. Emissão de HC por etapas do ciclo EPA 75.

Lista de Tabelas

1. Produção e Consumo do Álcool Anidro desde 1987 (Balanço Energético Nacional, 2003)
2. Produção e Consumo do Álcool Hidratado desde 1987 (Balanço Energético Nacional, 2003)
3. Legislação sobre emissões veiculares de poluentes.
4. Resultados do teste com combustível etanol hidratado.
5. Resultados do teste com combustível GPE.
6. Resultados do teste com combustível F50.
7. Emissão de poluentes gasosos por etapa do teste EPA 75.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho aborda o atual tema, dentro da área da engenharia mecânica automotiva, dos motores de combustão interna multi-combustíveis. A escolha deste tema se deve ao grande avanço tecnológico relacionado ao desenvolvimento desses motores ocorrido nos últimos anos, e à importância ambiental e econômica conseqüente desse avanço. O foco deste trabalho será restringido ao estudo de motores bi-combustíveis, movidos a álcool e gasolina.

O investimento em motores com tecnologia multi-combustível têm sido significativo nos últimos anos, com o lançamento recente de muitos veículos incorporando essa tecnologia. O mercado nacional tem recebido bem essa nova safra de veículos, tanto pela questão econômica, pois atualmente o etanol combustível é mais barato que a gasolina, quanto pela questão ambiental, uma vez que se tem dito que o etanol é menos poluente que a gasolina.

Será abordada aqui apenas a questão relativa às emissões de poluentes nesse tipo de motores. Este trabalho abrange os aspectos mais importantes relacionados ao tema, permitindo que futuros estudos mais aprofundados possam ser realizados, alinhados com a evolução tecnológica na área.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é estudar as emissões de poluentes resultantes do processo de combustão em motores bi-combustíveis, movidos a álcool e gasolina, que operam segundo o ciclo padrão-ar de Otto.

Esse estudo será feito através da análise das emissões veiculares resultantes do uso de etanol, gasolina e uma mistura de ambos como combustíveis, e pretende identificar qual a composição de combustível proporciona os menores níveis de emissão para o tipo de motor/ veículo estudado.

Não se tem, entretanto, a presunção de conseguir explicar com precisão o complexo fenômeno de formação de poluentes em motores de combustão interna com uso de teorias e ferramentas mais simples isoladamente, mas sim de analisar qualitativamente os principais fatores de influência nas emissões veiculares.

3. O PROCESSO DE COMBUSTÃO EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA DE IGNIÇÃO POR FAÍSCA

3.1. Conceitos Termodinâmicos

Para iniciar essa breve revisão de conceitos, deve-se citar os princípios básicos da física que regem todos os processos conhecidos, aplicados ao tema do estudo deste trabalho: a conservação da massa e a conservação da energia.

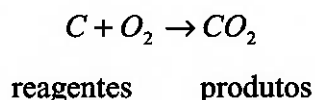
O princípio de conservação da massa, aplicado ao processo de combustão, implica que a massa total de produtos seja igual à massa total inicial de reagentes, independentemente de como ocorreu esse processo. Isto significa que a quantidade de cada elemento, em massa, deve ser constante durante o processo, por exemplo: 1 mol de CH_4 deve resultar em produtos que somem um mol de C em qualquer combinação, no caso da combustão completa em 1 mol de CO_2 .

O princípio da conservação de energia, aplicado ao processo de combustão, implica que a energia total dos produtos no estado em que se encontram somada com a energia liberada na combustão seja igual à energia total dos reagentes no estado em que se encontram.

Em se tratando do aspecto termodinâmico do estudo de motores de combustão interna, o conceito mais importante é o dos ciclos motores ideais. Estes são muito utilizados para modelar situações reais. Um bom exemplo é o ciclo ideal padrão-ar de Otto, que fornece uma aproximação conveniente porém grosseira do ciclo real de operação do motor de combustão interna. Ele é útil para ilustrar os aspectos termodinâmicos da operação do motor, como também fornece estimativas das tendências do comportamento do motor de acordo com mudanças de parâmetros importantes de operação, porém não deve ser utilizado para a modelagem dos processos reais de combustão dos motores de combustão interna. Estes processos de combustão que ocorrem internamente ao cilindro dos motores de combustão interna são processos muito complexos, e requerem modelos mais sofisticados para representá-los de forma mais precisa.

3.2. A reação geral de combustão

O processo de combustão pode ser representado por uma reação química, na qual o combustível é oxidado (queimado) com objetivo de liberação de energia, gerando produtos de combustão em forma mais estável. Por exemplo:

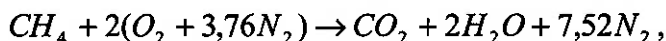


No processo de combustão, ocorre a formação de muitos produtos intermediários durante a reação química, entretanto este trabalho focará nos reagentes e nos principais produtos finais do processo.

Os combustíveis de interesse para este estudo pertencem à família dos hidrocarbonetos e à família dos álcoois, e serão detalhados mais à frente. Seus elementos oxidáveis comuns são o carbono (C) e o hidrogênio (H).

O oxidante ou comburente da reação é o oxigênio, normalmente proveniente do ar atmosférico, que tem composição aproximada de 21% de O_2 e 79% de N_2 em volume. Dessa forma, 1 mol de O_2 correspondem a 3,76 moles de N_2 na reação.

A reação de combustão completa ideal é aquela que gera produtos totalmente oxidados. Tomando como exemplo um combustível hidrocarboneto, os produtos da combustão completa do C e do H geralmente são CO_2 e H_2O , respectivamente. Para que ocorra a combustão completa, o comburente (O_2) deve estar presente em quantidade suficiente, ou seja, na quantidade estequiométrica definida pela reação. Por exemplo, na queima completa de 1 mol de CH_4 :



a quantidade de ar estequiométrica é a chamada quantidade de ar teórica da reação.

A reação pode apresentar ar em excesso, ou mais de 100% do ar teórico, então diz-se que a mistura ar-combustível induzida ao motor é pobre; do contrário, se houver excesso de combustível, a mistura ar-combustível é chamada de mistura rica.

No estudo da combustão, costuma-se definir a relação Combustível-Ar (C/A) seja na base mássica como na base molar:

$$C / A = \frac{m_{comb}}{m_{ar}} \text{ ou}$$

$$C / A = \frac{n_{comb}}{n_{ar}}$$

Também costuma-se definir o adimensional ϕ (ou fração combustível-ar relativa) para comparar a relação C/A real com a relação C/A estequiométrica:

$$\phi = \frac{C / A}{C / A_{est}}$$

Misturas ar-combustível com a relação $\phi > 1$ são chamadas de misturas ricas; misturas com a relação $\phi < 1$ são chamadas misturas pobres.

Na situação real, a reação de combustão não ocorre de maneira ideal. Assim, os produtos da combustão não são apenas os esperados para a reação de combustão completa; esses são os chamados poluentes atmosféricos. Os poluentes serão descritos adiante, bem como os fatores que influenciam sua ocorrência.

3.3. Os combustíveis

Os combustíveis automotivos distinguem-se principalmente pela composição de sua cadeia carbônica e da origem: animal, vegetal ou mineral. Atualmente, os combustíveis disponíveis comercialmente para aplicação automotiva no Brasil são o diesel, a gasolina (misturada com etanol anidro), o gás natural veicular, todos esses de origem mineral, e o etanol anidro, de origem vegetal.

Vale ressaltar que a melhoria da qualidade dos combustíveis está sendo perseguida pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) por meio do IBAMA que, em parceria com a ANP e ANFAVEA, vem conseguindo resultados expressivos, como a retirada do chumbo da gasolina, a adição de álcool à gasolina, a redução gradativa do teor de enxofre do óleo Diesel, são alguns exemplos.

Para o motor bi-combustível a ser estudado, que opera buscando seguir o ciclo padrão-ar de Otto, será realizada uma análise de três diferentes composições da mistura gasolina-etanol e os poluentes resultantes de sua combustão dentro do motor.

3.3.1. Etanol

O etanol, ou álcool etílico, é um combustível de origem vegetal de fórmula molecular C_2H_5OH . O álcool etílico é usado nos automóveis brasileiros de duas maneiras: ou como combustível único, na forma de álcool hidratado, ou misturado à gasolina, na forma de álcool anidro.

Para analisar a importância do etanol no mercado brasileiro, pode-se verificar o aumento na produção de etanol nos últimos anos, nas tabelas a seguir:

| IDENTIFICAÇÃO | 1987 | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| PRODUÇÃO | 2.155 | 1.686 | 1.494 | 849 | 2.044 | 2.226 | 2.526 | 2.798 | 3.003 | 4.433 | 5.671 | 5.683 | 6.174 | 5.644 | 6.481 | 7.040 |
| IMPORTAÇÃO | 0 | 0 | 0 | 438 | 191 | 0 | 0 | 406 | 487 | 0 | 352 | 143 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| EXPORTAÇÃO | -5 | -6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| VAR. EST. PERDAS E AJUSTES | 63 | 337 | 208 | -9 | -588 | 0 | 24 | 47 | 1 | -228 | -874 | -254 | 98 | 289 | -342 | -523 |
| CONSUMO TOTAL | 2.213 | 2.017 | 1.702 | 1.278 | 1.647 | 2.226 | 2.550 | 3.251 | 3.491 | 4.205 | 5.149 | 5.572 | 6.272 | 5.933 | 6.139 | 6.519 |
| CONSUMO FINAL | 2.213 | 2.017 | 1.702 | 1.278 | 1.647 | 2.226 | 2.550 | 3.251 | 3.491 | 4.205 | 5.149 | 5.572 | 6.272 | 5.933 | 6.139 | 6.519 |
| CONSUMO FINAL NÃO-ENERGÉTICO | 77 | 51 | 80 | 60 | 0 | 0 | 120 | 125 | 119 | 151 | 135 | 235 | 270 | 228 | 131 | 100 |
| CONSUMO FINAL ENERGÉTICO | 2.136 | 1.966 | 1.622 | 1.218 | 1.647 | 2.226 | 2.430 | 3.126 | 3.372 | 4.054 | 5.014 | 5.337 | 6.002 | 5.705 | 6.008 | 6.419 |
| TRANSPORTES | 2.136 | 1.966 | 1.622 | 1.218 | 1.647 | 2.226 | 2.430 | 3.126 | 3.372 | 4.054 | 5.014 | 5.337 | 6.002 | 5.705 | 6.008 | 6.419 |
| RODOVIÁRIO | 2.136 | 1.966 | 1.622 | 1.218 | 1.647 | 2.226 | 2.430 | 3.126 | 3.372 | 4.054 | 5.014 | 5.337 | 6.002 | 5.705 | 6.008 | 6.419 |

Tabela 1 – Produção e Consumo do Álcool Anidro desde 1987 (Balanço Energético Nacional, 2003)

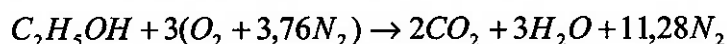
| IDENTIFICAÇÃO | 1987 | 1988 | 1989 | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 |
|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| PRODUÇÃO | 10.185 | 9.837 | 10.315 | 10.669 | 10.818 | 9.540 | 8.869 | 9.715 | 9.742 | 9.701 | 9.823 | 8.438 | 6.807 | 5.056 | 4.985 | 5.548 |
| IMPORTAÇÃO | 0 | 0 | 0 | 718 | 893 | 550 | 1.456 | 1.460 | 1.938 | 1.321 | 530 | 13 | 371 | 64 | 118 | 0 |
| EXPORTAÇÃO | -35 | -85 | 0 | 0 | 0 | 0 | -170 | -293 | -403 | -218 | -176 | -141 | -405 | -227 | -320 | -759 |
| VAR. EST. PERDAS E AJUSTES | -604 | 629 | 1.409 | -275 | -772 | -5 | 290 | -197 | -256 | -44 | -981 | 351 | 1.195 | 1.560 | 661 | 650 |
| CONSUMO TOTAL | 9.546 | 10.381 | 11.724 | 11.112 | 10.939 | 10.085 | 10.445 | 10.685 | 11.021 | 10.760 | 9.196 | 8.661 | 7.968 | 6.453 | 5.444 | 5.439 |
| CONSUMO FINAL | 9.546 | 10.381 | 11.724 | 11.112 | 10.939 | 10.085 | 10.445 | 10.685 | 11.021 | 10.760 | 9.196 | 8.661 | 7.968 | 6.453 | 5.444 | 5.439 |
| CONSUMO FINAL NÃO-ENERGÉTICO | 627 | 621 | 656 | 900 | 688 | 698 | 770 | 925 | 1.075 | 975 | 891 | 944 | 917 | 1.010 | 1.187 | 830 |
| CONSUMO FINAL ENERGÉTICO | 8.919 | 9.760 | 11.068 | 10.212 | 10.251 | 9.387 | 9.675 | 9.760 | 9.946 | 9.785 | 8.305 | 7.717 | 7.051 | 5.443 | 4.257 | 4.609 |
| TRANSPORTES | 8.919 | 9.760 | 11.068 | 10.212 | 10.251 | 9.387 | 9.675 | 9.760 | 9.946 | 9.785 | 8.305 | 7.717 | 7.051 | 5.443 | 4.257 | 4.609 |
| RODOVIÁRIO | 8.919 | 9.760 | 11.068 | 10.212 | 10.251 | 9.387 | 9.675 | 9.760 | 9.946 | 9.785 | 8.305 | 7.717 | 7.051 | 5.443 | 4.257 | 4.609 |

Tabela 2 – Produção e Consumo do Álcool Hidratado desde 1987 (Balanço Energético Nacional, 2003)

Pode-se verificar que a produção total de álcool anidro em 2002 aumentou em 8,6% em relação ao ano anterior, o que já era uma tendência, haja visto que em 2001 o aumento tinha sido de 14,8%. O destino principal deste álcool é o de combustível para transporte rodoviário.

A produção de álcool hidratado a produção teve um aumento de 11,3%. A perspectiva é de aumento da produção, tanto devido ao aumento do preço do açúcar no mercado internacional quanto do incremento das vendas de veículos bi-combustíveis (previsão de produção de 250.000 veículos em 2004, e de 1.000.000 de veículos flex-fuel para 2006).

A especificação brasileira para o teor alcoólico em volume mínimo do álcool etílico anidro é 99,5%, enquanto a do álcool etílico hidratado é $95,2 \pm 0,6\%$. A equação teórica para a combustão completa de etanol puro (100%) é dada por:



O processo real de combustão do etanol gera produtos outros que não apenas água e gás carbônico, como por exemplo monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x), aldeídos, etc. A combustão não-ideal do etanol, combustível oxigenado assim como o metanol, resulta em maiores quantidades de emissões de aldeídos que os veículos movidos a gasolina, como por exemplo o formaldeído e o acetaldeído.

As conseqüências da formação do aldeído para o meio ambiente e para o ser humano são ruins. O formaldeído (HCHO), por exemplo, apresenta odor irritante, percebido quando em concentração superior a 1ppm. Pode provocar no organismo irritações, dermatites alérgicas e urticária, assim como nos olhos pode provocar edema nas pálpebras, opacificação da córnea e perda da visão. Concentrações acima de 50 ppm desse tipo de aldeído podem provocar pneumonia, bronquite, edema pulmonar, podendo resultar em morte quando excedida a concentração de 100 ppm (ANDRADE et al, 2002). Além disso, estudos comprovam que o formaldeído é um agente mutagênico e cancerígeno. Há limites recomendados para exposição a esse aldeído, regulamentados por órgãos como a ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) e a American Industrial Hygiene Association.

O Acetaldeído (CH₃CHO) é menos tóxico que o formaldeído, mas em altas concentrações pode causar bronquite e edema pulmonar.

O álcool etílico comercial apresenta também em sua composição alguns íons e metais de medição complexa que aumentam os níveis de corrosão dos componentes do motor (cloretos e sulfatos), de depósitos nas velas e válvulas e na degeneração do óleo lubrificante (sódio).

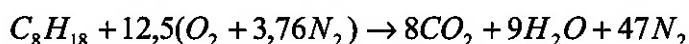
3.3.2. A Gasolina

A gasolina utilizada como combustível nacional tem como característica principal a adição de etanol anidro na proporção de $25 \pm 1\%$ em volume, devido à legislação vigente.

A gasolina, proveniente do processo do craqueamento e refino do petróleo, é uma mistura de vários hidrocarbonetos, que tem nessa composição a determinação de sua qualidade.

A qualidade de ignição da gasolina tem relação direta com sua composição. Quanto maior o número de hidrocarbonetos de cadeia ramificada e de pequeno peso molecular na composição da gasolina, maior será sua resistência à compressão antes de auto inflamar-se.

Considerando o iso-octano como composição ideal da gasolina, a equação teórica da combustão completa do combustível é:



Como já foi citado, muitas vezes o processo de combustão não ocorre na sua forma ideal, seja devido à composição da mistura ar-combustível, por ineficiência do motor ou por outro motivo qualquer. Dessa forma, a gasolina também gera como produtos dessa reação não-ideal de combustão, além de água e gás carbônico, substâncias poluentes, como o monóxido de carbono CO, os óxidos de nitrogênio NO_x, hidrocarbonetos (HC) não-queimados, material particulado, e mesmo óxidos de enxofre (SO₂), devido ao enxofre presente na gasolina. Outra substância originada na combustão é o benzeno, que também é um agente cancerígeno. (EPA National Vehicle and Fuel Emissions Laboratory, p. 2565)

3.3.3. Diferenças mais importantes entre os combustíveis

As características físico-químicas dos dois combustíveis, etanol e gasolina, são diferentes, e é importante entender essas diferenças para estudar a emissão de poluentes como resultado da combustão dos mesmos.

A composição química dos dois combustíveis é a mais importante diferença. A gasolina possui maior porcentagem de carbono na sua composição, e por isso tem tendência à maior produção de HC não-queimados do que o etanol, sob mesmas condições de operação.

Das diferentes composições químicas resulta outra importante diferença de características entre os dois combustíveis. A resistência à compressão do combustível antes de ocorrer a auto-ignição, caracterizada pelo chamado **índice anti-detonante (IA)**, é menor para a gasolina do que para o etanol. A estrutura molecular do etanol requer mais energia para ser quebrada, refletindo na resistência à compressão antes de entrar em ignição. Os combustíveis fósseis, compostos de hidrocarbonetos como a gasolina, tem essa característica anti-detonante representada pela sua **octanagem**, que é a indicação da porcentagem de iso-octanos na sua composição. Os iso-octanos são, dentre os diversos constituintes da gasolina, os que requerem maior energia para serem quebrados, por isso quanto maior a octanagem da gasolina, mais ela resiste à compressão. Como o etanol não possui iso-octanos em sua composição, não tem medição de octanagem. Para isso foi criado o **índice anti-detonante**, que nada mais é do que um índice que indica o quanto um combustível resiste à compressão comparado a um combustível de octanagem conhecida. Esse índice é dado por:

$$IA = \frac{RON + MON}{2}$$

onde RON (Research Octane Number) e MON (Motor Octane Number) são valores medidos de resistência à compressão do combustível em condições menos e mais severas de operação do motor, respectivamente.

4. REQUISITOS DA MISTURA AR-COMBUSTÍVEL PARA MOTORES DE IGNIÇÃO POR FAÍSCA

A tarefa do sistema de admissão do motor é preparar a partir do ar ambiente e do combustível uma mistura que satisfaça as necessidades do motor durante todo seu regime de operação.

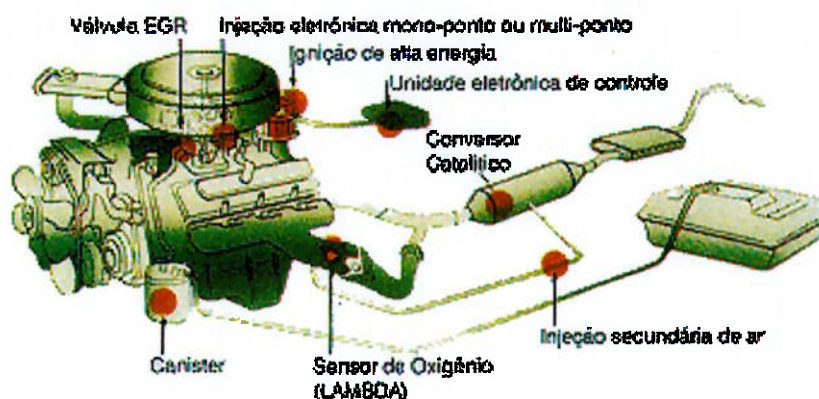


Figura 1. Exemplo de montagem de motor e acessórios (<http://www.mecanicaonline.com.br>, 06/11/2004).

Em princípio, a relação C/A ótima para um motor de ignição por faísca é aquela que fornece a potência requerida com o menor consumo de combustível, consistente com operação suave e confiável. Na prática, as restrições do controle de emissões podem ditar uma relação C/A diferente, como por exemplo exigir a reciclagem de uma fração dos gases de escape (EGR) no sistema de admissão.

A proporção relativa de combustível e ar que resulta no menor consumo de combustível, operação suave e confiável e que satisfaz as exigências de emissões, atingindo a potência desejada, depende da rotação do motor e da carga aplicada.

A preparação da mistura é normalmente baseada na relação C/A e porcentagem de reciclagem de gases EGR, e as proporções relativas de ar e combustível são definidas genericamente, em termos da fração combustível-ar relativa ϕ .

As características desejadas da mistura são diferentes para carga total (ou borboleta aceleradora totalmente aberta) e para carga parcial de operação.

Em condição normal de operação, o ponto crítico é a utilização completa do ar induzido para obter a máxima potência para um dado volume disponível. Quando nem toda potência máxima possível é necessária, a utilização eficiente do combustível é o ponto crítico.

Pra regime WOT (do inglês *wide open throttle*, ou condição de borboleta aceleradora totalmente aberta), a potência máxima para um dado rendimento volumétrico é obtida com misturas ricas, com $\phi \approx 1,1$ (HEYWOOD, p.280).

Para condição de operação em carga parcial, é vantajoso diluir a mistura ar-combustível, seja com excesso de ar ou com gases de escape reciclados. Com excesso de ar, a diluição aumenta a eficiência de conversão do combustível, devido à sobra de oxigênio para queimar todo o combustível. Com diluição por reciclagem dos gases de escape, causa a diminuição da temperatura dentro da câmara de combustão, o que reduz significativamente as emissões de NO_x .

Com a necessidade atual de controle rigoroso de emissões de NO_x , HC e CO, a operação do motor com mistura estequiométrica é vantajosa, e o catalisador de três vias pode ser usado para “limpar” os gases de escape.

4.1.O catalisador de três vias

O catalisador de três vias tem rendimento ótimo na faixa estequiométrica da fração combustível-ar relativa; sendo assim, para misturas muito pobres ou muito ricas, sua eficiência é muito baixa.

Esse tipo de catalisador objetiva transformar tanto o CO quanto os NO_x produzidos em CO_2 e N_2 . Nele, existem duas regiões, cada qual com uma função diferente: em uma é realizada a reação de oxidação do CO e HC para CO_2 e H_2O , na presença do Paládio (Pd) e da Platina (Pt); na outra é realizada a redução do NO_x em N_2 e O_2 na presença do Paládio (Pd) e do Ródio (Rh). A figura abaixo exemplifica o funcionamento deste tipo de catalisador.

SUBSTÂNCIAS

(ENTRADA)

CO - Monóxido de Carbono
HC - Hidrocarbonetos
NOx - Óxidos de Nitrogênio

(SAÍDA)

H₂O - Água
CO₂ - Gás Carbônico
N₂ - Nitrogênio

EMISSÕES PROVENIENTES DO MOTOR

CARCAÇA METÁLICA

SUPORTE CERÂMICO

- Revestida em Óxido de Alumínio
- Contém metais ativos:
 - Paládio/Ródio (para veículos a gasolina)
 - Paládio/Molibdênio (para veículos a álcool)

SAÍDA DE GASES PURIFICADOS

MANTA EXPANSIVA

Funções:

- Vedação
- Isolante Térmico
- Fixação/Proteção mecânica

REAÇÕES QUÍMICAS

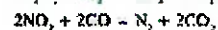
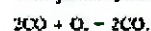


Figura 2. Esquema de funcionamento de um catalisador de três vias.

4.2. O sensor *lambda*

Como foi visto, é possível reduzir emissões do motor dos poluentes HC, CO e NO_x com um único catalisador no sistema de escape se o motor operar muito próximo da relação ϕ estequiométrica, chamado catalisador de três vias.

A operação do motor é mantida próxima da relação ϕ estequiométrica através do uso de um sensor no sistema de escape, que mede a concentração de oxigênio na linha de escape dos gases de combustão. Esse sensor gera um sinal de voltagem que é a entrada do sistema de realimentação, que controla o fornecimento de combustível para o sistema de admissão.

O sensor, chamado de sensor *lambda* (onde λ é o inverso do adimensional ϕ), é uma célula de concentração de oxigênio com eletrólito sólido através do qual a corrente

elétrica é carregada por íons de oxigênio. O eletrólito cerâmico separa duas câmaras com gases a diferentes pressões parciais de oxigênio, o escape e a atmosfera.

Uma reação eletroquímica ocorre e os íons de oxigênio conduzem corrente:



A voltagem de saída relaciona as pressões parciais diferentes através da equação de Nernst:

$$V_s = \frac{R.T}{4.F} \cdot \ln\left(\frac{P_{O_2atm}}{P_{O_2escape}}\right)$$

onde F é a constante de Faraday.

A pressão parcial de equilíbrio nos gases de escape cai em muitas ordens de grandeza com a mudança da fração combustível-ar relativa de 0,99 para 1,01:

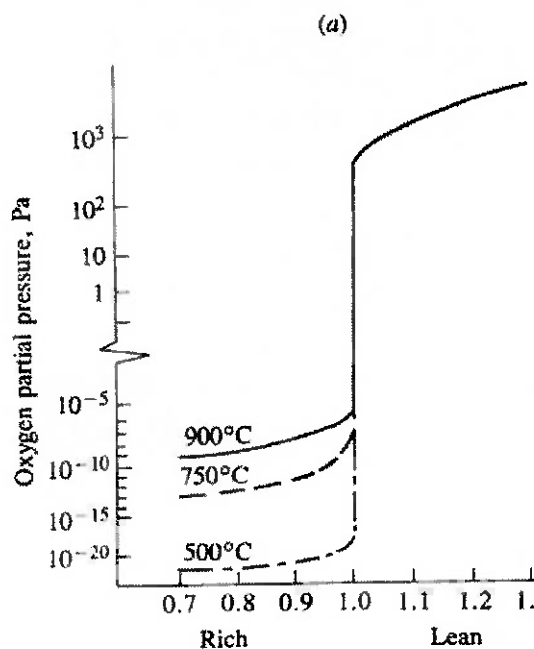


Figura 3. Pressão parcial de oxigênio em função de ϕ^{-1} (HEYWOOD, pg.302)

A voltagem de saída do sensor então aumenta rapidamente nessa transição de mistura pobre para mistura rica:

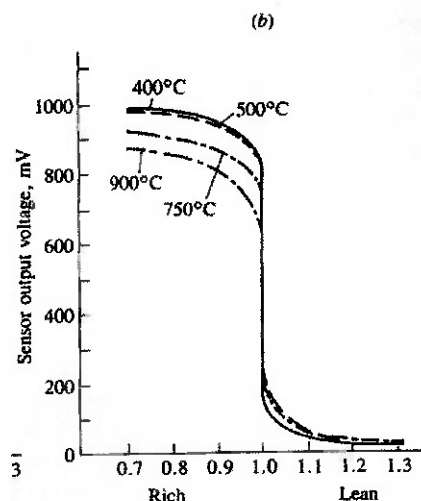


Figura 4. Voltagem de saída em função da relação ϕ (HEYWOOD, p.302)

Se não for influenciado pela temperatura, esse sinal pode ser usado com boa precisão no sistema de realimentação. Caso a temperatura seja muito alta, pode ocorrer o derretimento do sensor, que possui temperaturas máxima e mínima de funcionamento. No entanto, o sensor tem sua temperatura monitorada para que não derreta e tenha uma operação adequada.

O sensor é usualmente colocado na parede do coletor de escape. Essa localização permite rápido aquecimento do sensor seguindo a partida do motor, além de resultar na menor distância entre o local da injeção do combustível e o sensor. Esse atraso é importante para o sistema de realimentação. Existem sensores que já vem pré-aquecidos, portanto, já estão próximos da temperatura de funcionamento e o tempo de resposta logo após a ignição é maior que a dos sensores que não tem pré-aquecimento.

O sensor *lambda* foi inicialmente desenvolvido para controlar a relação ar-combustível próxima da estequiométrica, mas o uso de um sensor para controle da relação ϕ entre pobre e estequiométrica durante operação de carga parcial do motor é possível.

Como o ciclo de teste de emissões EPA 75, a ser descrito mais adiante (ver seção 8.2), é fortemente transiente, com regimes de aceleração e desaceleração fortes, o controle da mistura torna-se mais suscetível ao tempo de resposta dos sensores e controladores.

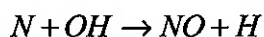
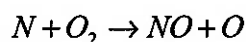
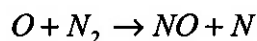
5. FORMAÇÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS

Os poluentes resultantes do processo de combustão em motores de combustão interna são os óxidos de nitrogênio (NO_x), o monóxido de carbono (CO), os hidrocarbonetos não-queimados (HC), material particulado, aldeídos e até mesmo óxidos de enxofre (SO_2), devido ao enxofre presente na gasolina. Os principais deles, produzidos em maior quantidade, são o NO_x , o CO e o HC. Esses poluentes dependem de situações específicas nas quais apresentam alta probabilidade de serem formados; essas situações explicam os mecanismos de formação desses poluentes sob influência de mudança nas variáveis de projeto, de operação e até as variáveis atmosféricas, e serão brevemente descritas neste capítulo. Como as concentrações obtidas dos poluentes não são as verificadas quando se supõe equilíbrio químico, a cinética das reações será levada em consideração para analisar a formação dos poluentes.

Os **óxidos de nitrogênio** têm como causa primordial de formação as altas temperaturas que ocorrem dentro da câmara de combustão, já que só nessa situação o nitrogênio presente no ar da mistura ar-combustível reage com o oxigênio, formando os óxidos poluentes. Quanto maior a temperatura interna do cilindro, maior a taxa de formação de NO_x . É importante, além de temperaturas altas, que exista oxigênio suficiente para que a reação de formação ocorra.

Os óxidos de nitrogênio representados por NO_x incluem tanto o NO quanto o NO_2 , e a formação de cada um ocorre em momentos diferentes.

O óxido que se forma inicialmente é o NO, na frente de chama e nos gases posteriores a ela. As reações químicas de formação do NO acontecem na seguinte sequência:



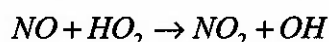
Como a etapa de combustão acontece a altas pressões, a zona de chama é extremamente fina (aproximadamente 0,1 mm), e o tempo de permanência da mistura ar-combustível nesta região é pequena. Os gases queimados produzidos antecipadamente no processo são comprimidos a altas temperaturas. Pode-se dizer

portanto que a formação do NO na região de alta pressão e temperatura posterior à chama sempre prevalece à formação de NO na frente de chama. A taxa de formação do NO ($d[NO]/dt$) pode ser descrita pela seguinte equação: (HEYWOOD)

$$\frac{d[NO]}{dt} = \frac{6.10^{16}}{T^{1/2}} \cdot e^{\frac{-69.090}{T}} \cdot [O_2]^{1/2} \cdot [N_2]_e$$

onde $[NO]$ expressa em mol/cm³.

Nota-se que a equação é função da influência da temperatura e concentração de oxigênio no local. Apenas após a formação inicial do NO é que começam a ocorrer as reações de formação do NO₂, como segue:



Apesar da legislação abordar apenas a medição da quantidade total de óxidos de nitrogênio produzidos, é possível medir a contribuição individual de cada um deles para o total de poluentes emitidos, através de suas massas moleculares.

A formação de **monóxido de carbono** depende diretamente da relação combustível-ar (C/A). Quando a mistura ar-combustível apresenta combustível em excesso, ou menos de 100% de Ar Teórico, não há oxigênio disponível para queimar todo o combustível (oxidar todo o carbono), e a reação de queima incompleta produz CO. Para mistura ar-combustível pobre, ou com mais de 100% de Ar teórico, inicialmente o excesso de oxigênio reduz a formação de CO, devido à queima completa do combustível. Entretanto, se a mistura torna-se muito pobre, a combustão torna-se irregular, e a taxa de formação de CO aumenta novamente. Uma outra situação é a necessidade de enriquecimento da mistura após a partida do motor, quando este está frio. As quantidades de CO emitidas nesta etapa são muito significativas se comparadas às quantidades emitidas quando o motor já está aquecido completamente.

Como os motores de ignição por faísca trabalham com misturas estequiométricas em cargas parciais e misturas ricas em cargas plenas, as emissões de CO são significativas e devem ser controladas. Outro fator importante para os níveis de emissões é a uniformidade conseguida para a mistura ar-combustível admitida.

A emissão de **hidrocarbonetos não-queimados** tem causas diversas. As altas pressões nas etapas de compressão e combustão do ciclo empurram uma fração dos gases para as frestas e folgas presentes na câmara de combustão. A maior parte das folgas normalmente localiza-se nas regiões entre o pistão, os anéis e a parede do cilindro, há ainda frestas causadas por imperfeições próximas à vela, próximas à sede

das válvulas e na região da junta (entre o cabeçote e o bloco do motor). Essa fração de gases que entra nas frestas e folgas não participa do processo primário de combustão, porque a entrada dessas frestas é estreita demais para permitir a entrada da chama. Esses gases, que deixam esses espaços posteriormente, na fase de expansão e exaustão, são uma fonte de emissão de hidrocarbonetos não queimados.

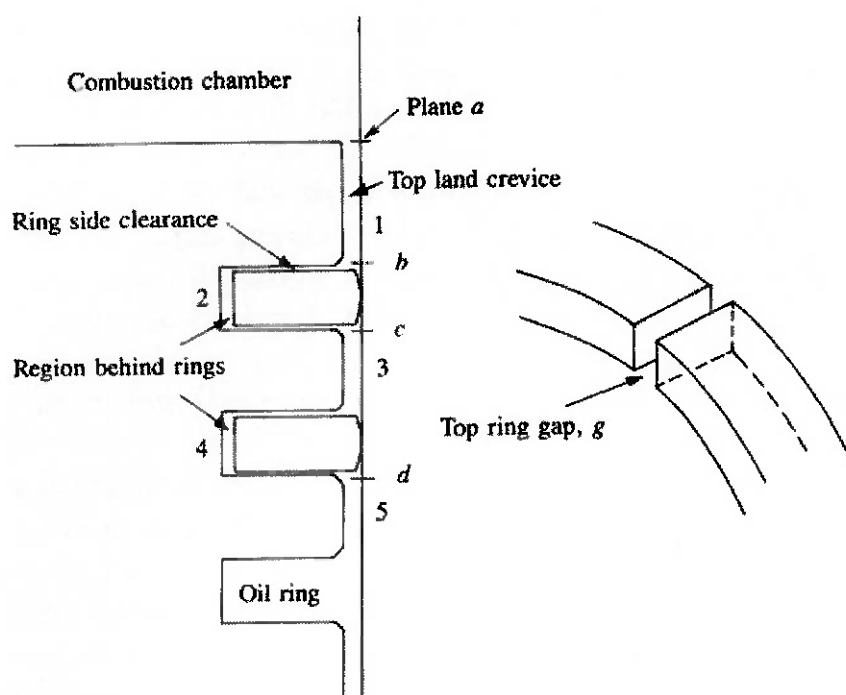


Figura 5. Frestas e folgas na câmara de combustão de motor de ignição por faísca (HEYWOOD, p.362)

Outra causa de emissão de HC são os finos filmes de óleo lubrificante que penetram no cilindro, e depositam-se nas paredes do cilindro, na cabeça do pistão e no cabeçote. Esse óleo tem capacidade de absorver uma pequena fração do hidrocarboneto antes da combustão, e para uma situação de processo de combustão lento, apenas após a essa etapa a fração não-queimada de HC é devolvida aos gases presentes no cilindro. Essa situação usualmente ocorre quando o motor opera em regime transiente.

Há o fator da extinção da chama, quando esta se aproxima muito das paredes do cilindro, deixando uma fina camada de hidrocarbonetos não-queimados e parcialmente queimados. Além disso, motores com muito tempo de uso podem apresentar depósitos nas paredes do cilindro, esses depósitos ocasionam a emissão de HC não-queimados.

É interessante notar que muitos dos componentes orgânicos encontrados no sistema de escapamento não estão presentes na composição do combustível, forte indicativo de que existem reações que ocorrem durante a combustão. Verifica-se por

exemplo a presença de hidrocarbonetos oxigenados quando utilizada gasolina como combustível, apesar de ser muito menor que a presença dos mesmos quando utilizado o etanol como combustível.

Os hidrocarbonetos não-queimados são eliminados junto aos gases de escape, mas ainda podem ser oxidados depois da combustão primária no cilindro se a temperatura, a concentração de oxigênio e o tempo de residência no sistema de escape forem apropriados.

6. EMISSÕES VEICULARES DE POLUENTES

Os principais poluentes que resultam do processo não-ideal de combustão em motores a combustão interna, como já citado, para os combustíveis em estudo, são: o monóxido de carbono (CO), os óxidos de nitrogênio (NO_x), os hidrocarbonetos não-queimados (HC). Para os motores de combustão interna (MCI) de ignição por faísca, os poluentes regulamentados por lei são: CO, NO_x, HC e aldeídos. A emissão de material particulado existe, mas não é regulamentada, além de não ser expressiva. Esse capítulo trata dos fatores de influência na emissão de CO, NO_x, e HC.

Desde que o controle de emissões veiculares se tornou mais rígido, com aplicação de legislação específica, em diversas partes do mundo, muitas técnicas vêm sendo estudadas e implantadas com o objetivo de reduzir os níveis de emissões de poluentes, sempre observando o compromisso de manter as características de desempenho que se espera dos modernos motores de combustão interna (baixo consumo de combustível e alta potência).

Algumas dessas técnicas utilizadas no decorrer dos anos, tanto recentes quanto um pouco mais antigas e conhecidas, estão relacionadas a seguir:

- utilização de 4 válvulas por cilindro, que permite uma mistura ar-combustível mais homogênea em cargas elevadas, e dessa forma uma maior regularidade na combustão;
- sistema eletrônico de injeção, que procura sempre otimizar a proporção da mistura ar-combustível (*closed loop*) para uma determinada situação de operação visando, por exemplo, reduzir emissões e/ou consumo de combustível;
- pré-aquecimento da mistura induzida, que facilita a queima mais uniforme do combustível;
- otimização do sistema de ignição do combustível, que pode ocorrer de diversas maneiras: estudo da melhor posição da vela dentro do cilindro; utilização de duas velas por cilindro; estudo da duração e intensidade ideais da faísca; avanço do ponto de ignição; essas medidas reduzem a emissão de NO_x e HC não queimados, mas podem resultar num aumento de consumo de combustível;

- válvula EGR (*Exhaust Gas Recycling*), que recicla os gases de escape para a admissão do novo ciclo de combustão, e como os gases não são comburentes, por não terem oxigênio, reduzem a temperatura da câmara de combustão, e conseqüentemente os níveis de NO_x produzidos, mas causam redução da potência gerada.

6.1.Fatores que afetam os níveis de emissões

Os níveis de emissões de poluentes dependem de muitos fatores, sejam eles de projeto, operacionais ou até mesmo atmosféricos.

Alguns dos fatores mais importantes que influenciam os níveis de emissões de poluentes são: o formato da câmara de combustão do motor, a posição da vela de ignição (em motores de ignição por faísca, como o motor em estudo) e a taxa de compressão, fatores esses de projeto; a proporção da mistura ar-combustível (C/A) induzida ao motor, o ponto de ignição e a reciclagem de gases de escape são fatores operacionais; a umidade e temperatura do ar ambiente que entra no motor, fatores atmosféricos.

O gráfico abaixo ilustra um exemplo da influência de um desses fatores (relação combustível-ar) nos níveis de emissão dos poluentes:

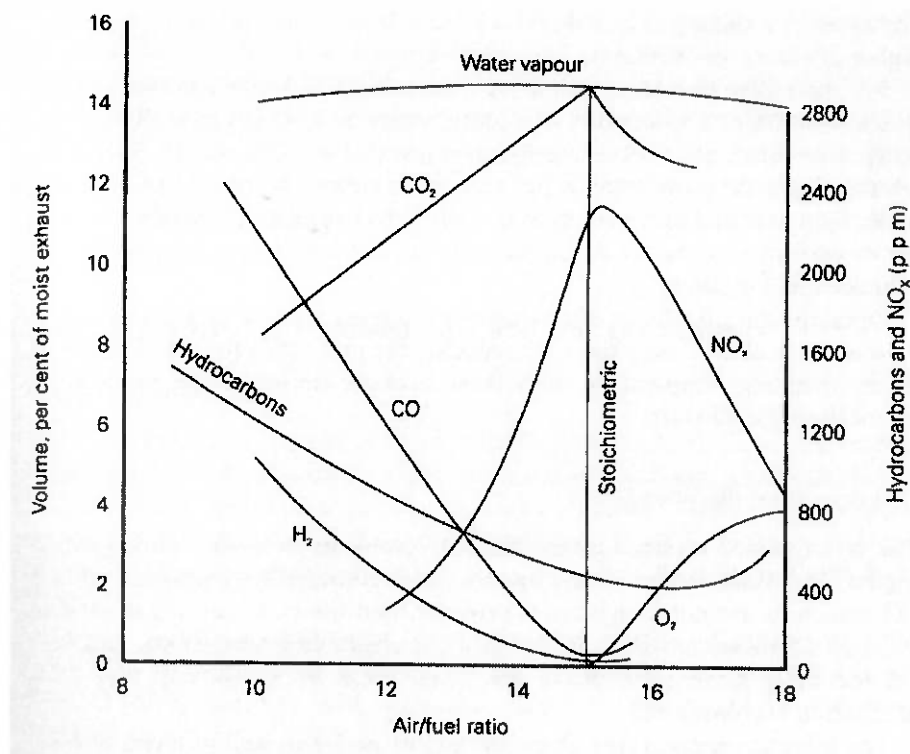


Figura 6. Gráfico da relação entre gases de escape e relação C/A^{-1} para a gasolina (PLINT, p. 247)

Aqui pretende-se abordar a influência de alguns desses fatores citados nas emissões apenas dos poluentes NO_x , CO e HC, que são os mais importantes regulamentados por lei e gerados na combustão do motor de ignição por faísca alimentado com álcool e/ou gasolina.

Em relação ao fator **ponto de ignição**, ou instante da liberação da centelha, pode-se dizer que quando a combustão inicia muito cedo no ciclo, o trabalho transferido ao pistão pelos gases no cilindro ao final da compressão é muito grande. Da mesma forma, se a combustão se inicia tardiamente, o pico de pressão no cilindro é diminuído e o trabalho de expansão transferido ao pistão decresce.

Há um instante particular da ignição que permite o máximo torque do motor para dadas rotação, composição e taxa de fluxo da mistura ar-combustível. Esse momento, chamado de instante de máximo torque (em inglês, *maximum brake torque timing*, ou *MBT timing*), depende da carga aplicada e da rotação do motor. A determinação precisa desse instante particular é difícil, mas é importante porque as emissões de NO_x e HC variam significativamente com o ponto de ignição.

Como o ponto de ignição afeta o pico de pressão no cilindro, por consequência afeta o pico de temperatura dos gases antes e após a combustão. Atrasando o ponto de

ignição, a temperatura máxima alcançada é menor; isso é usado muitas vezes para controle de emissões de NO_x e para evitar a detonação.

A temperatura dos gases de escape também é afetada pelo ponto de ignição, em relação ao *MBT*. Atrasando o ponto de ignição, a temperatura de escape aumenta, e a eficiência do motor e a perda de calor para as paredes do cilindro diminuem. Isso é usado às vezes para reduzir emissões de HC através do aumento da fração de hidrocarbonetos oxidada durante a expansão e escape devido às altas temperaturas dos gases queimados resultantes.

Com relação à **composição da mistura**, antes da combustão ela é formada por combustível (geralmente vaporizado), ar e gases queimados. A fração de gases queimados presentes no interior do cilindro é a fração residual de gás no cilindro mais os gases reciclados (EGR) para controle de NO_x . A composição da mistura é um fator crítico, já que determina o desenvolvimento do processo de combustão, que governa as características de operação do motor.

Mesmo que muito esforço seja feito para produzir uma mistura uniforme dentro do cilindro, ainda existem uniformidades, quando por exemplo o ar, o combustível, os gases de escape reciclados e a fração de gases residual não são completamente misturados. Essas variações, quando ocorrem próximas ao local da vela, prejudicam a formação da chama e conseqüentemente o resto do processo de combustão.

A taxa de formação de NO_x depende da temperatura dos gases e da concentração de oxigênio. Utilizando como parâmetro a fração combustível-ar relativa ϕ , a máxima temperatura dos gases queimados ocorre aproximadamente para $\phi = 1,1$, enquanto a concentração de oxigênio é baixa. Conforme a mistura empobrece, a concentração crescente de oxigênio inicialmente se impõe sobre a temperatura dos gases em decréscimo, e as emissões de NO_x têm seu pico em torno de $\phi = 0,9$. Após isso, a temperatura em queda prevalece e a taxa de emissão de NO_x cai a níveis baixos (HEYWOOD, p.835).

A variação da **fração combustível-ar relativa ϕ** também tem efeito sobre a emissão de hidrocarbonetos não queimados. Para misturas ricas, as emissões de HC não-queimados são altas. Isso ocorre devido à falta de oxigênio para queima posterior à combustão interna ao cilindro de quaisquer HC que escapam do processo de combustão primário. Assim que o ponto estequiométrico é alcançado, as emissões de HC caem: o aumento da concentração de oxigênio e das temperaturas de expansão e exaustão resulta

em aumento da queima de HC. Para misturas mais pobres, os níveis de emissão de HC variam pouco com a relação ϕ .

Diminuindo a concentração de combustível e aumentando a de oxigênio, esse efeito prevalece sobre a diminuição da temperatura do gás. Quando está se alcançando o limite de empobrecimento da mistura, a qualidade da combustão piora significativamente e as emissões de HC começam a crescer novamente devido à ocorrência ocasional de ciclos de queima parcial.

Para misturas ainda mais pobres, as emissões de HC crescem rapidamente devido ao aumento da frequência de ciclos de queima parcial, e até mesmo da ocorrência de ciclos de falha total da combustão.

Em relação às emissões de CO, misturas ricas produzem níveis altos de CO. Isso porque a oxidação completa do combustível para CO₂ não é possível devido à insuficiência de oxigênio. Para misturas pobres, os níveis de emissão de CO são baixos e aproximadamente constantes em cerca de 0,5% ou menos.

A principal técnica usada para controlar emissão de NO_x em motores de ignição por faísca é a **reciclagem dos gases de escape (EGR)**. Uma fração dos gases de escape é reciclada, através de uma válvula de controle, do sistema de escape para o sistema de admissão do motor. O gás reciclado é geralmente diluído junto à mistura fresca ar-combustível apenas depois da borboleta aceleradora. Em operação sob carga parcial, EGR age como um diluente adicional na mistura de gases não queimada, reduzindo assim o pico de temperatura dos gases queimados e as taxas de formação de NO_x.

A fração total de gases queimados presente na mistura não-queimada no cilindro é que age como diluente. Ela é composta tanto por gases residuais de ciclos anteriores quanto por gases reciclados para a admissão. Essa fração residual de gás é principalmente uma função das pressões de admissão e exaustão, rotação do motor e carga aplicada, taxa de compressão, abertura e fechamento das válvulas, e dinâmica do sistema de exaustão. Se os gases queimados diluem a mistura não-queimada, a temperatura absoluta alcançada após a combustão varia inversamente com a fração de massa de gases queimados, e portanto o aumento da fração de gases queimados reduz a taxa de formação de NO_x.

Aumentando o excesso de ar ou a quantidade de gás reciclado, o processo de combustão se torna mais lento e a variação de ciclo para ciclo aumenta. Um certo nível de estabilidade ou repetitividade da combustão é necessário para operação suave do

motor. A perda de estabilidade da combustão, portanto, limita a quantidade de diluição que um motor pode tolerar. Com a diminuição da carga aplicada, menos diluição da mistura fresca pode ser tolerada porque a diluição interna da mistura com gases residuais aumenta.

Em condição de marcha lenta, a mistura ar-combustível fresca não aceita reciclagem do gás e precisa ser estequiométrica ou rica, para que a combustão seja estável.

Consegue-se redução substancial de concentração de NO_x com valores de EGR entre 10 e 25%. Entretanto, o uso de EGR reduz a taxa de combustão, o que torna mais difícil alcançar uma condição de operação estável. A taxa de combustão pode ser entendida como a quantidade de reações de combustão e a velocidade com que elas ocorrem.

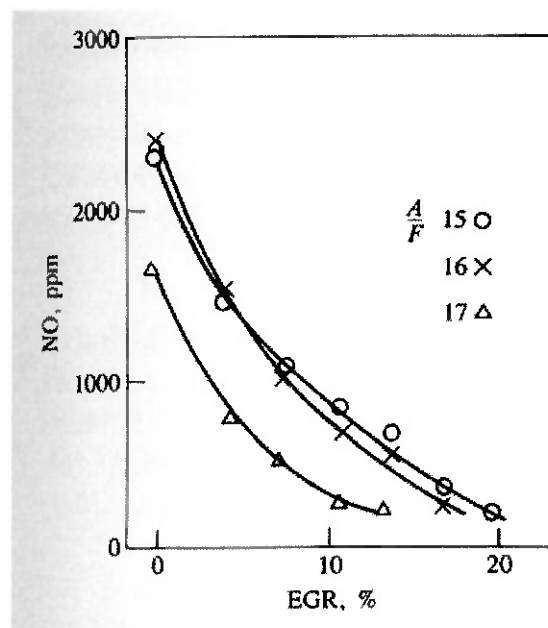


Figura 7. Variação da concentração de NO com %EGR (HEYWOOD, p.583)

A quantidade de EGR que um motor tolera depende das características da combustão, carga e velocidade (rotação), e da relação ϕ . Para um motor de ignição por faísca, os valores máximos estão na faixa de 15 a 30% EGR (HEYWOOD, p.837).

Devido à queda na taxa de combustão e aumento das variações entre os ciclos, as emissões de HC aumentam com o aumento da EGR. Primeiramente, o aumento na formação de HC se deve à diminuição da queima causada por temperaturas menores de expansão e exaustão, e é modesto. Um aumento mais rápido ocorre quando combustão lenta, queima parcial e até falha acontecem com maior frequência.

A reciclagem dos gases de escape não tem, entretanto, efeito sobre as emissões de CO, em condições estáveis de operação do motor de combustão interna.

Tomando como parâmetros a **rotação e carga aplicada ao motor**, as tendências de formação de NO_x e HC são opostas.

A concentração de NO_x aumenta moderadamente com aumento da rotação à carga constante. Isso porque a fração residual de gases diminui com o aumento da rotação, assim como a transferência de calor por ciclo é menor, o que causa um aumento de concentração de NO_x.

Mantendo-se a rotação constante enquanto se aumenta a carga, a concentração de NO_x também aumenta, porque o aumento da carga causa aumento da pressão no coletor de admissão, que diminui a fração residual de gases.

Já os principais mecanismos de formação de HC são afetados pela rotação e carga, apesar de não se conhecer a fundo os detalhes destes processos e as causas dessa dependência.

Se oxigênio está disponível, a oxidação de hidrocarbonetos não-queimados tanto no cilindro quanto no sistema de escape aumenta significativamente com o aumento da rotação. Isso porque o aumento da rotação causa menor transferência de calor por ciclo, e as temperaturas das fases de expansão e exaustão são maiores. Esse efeito prevalece sobre a redução do tempo de permanência no cilindro e no sistema de escape.

Já a relação com a variação da carga é mais complexa. Com o aumento da carga, à rotação constante, as temperaturas de expansão e exaustão aumentam, e a taxa de oxidação no cilindro aumenta, para uma quantidade suficiente de oxigênio disponível. Esse efeito prevalece sobre a redução da oxidação de HC na saída de escape devido ao menor tempo de permanência dos gases no motor, causado pela maior taxa de fluxo dos gases de escape, e a tendência da emissão de HC não-queimados é cair moderadamente com o aumento da carga. Para condição de cargas leves, com rotação baixa e fração residual de gases alta, mesmo que variáveis como a relação combustível-ar C/A, a fração de gases reciclados EGR e ponto de ignição estejam apropriadamente controladas, a extinção da chama antes de alcançar todos os pontos mais distantes das paredes do cilindro é uma situação provável de ocorrer. Tal extinção precoce ocasiona uma queda de pressão no cilindro durante a expansão e a temperatura da mistura não-queimada na frente de chama diminui. A taxa de queima é, então, reduzida. Essa situação é uma importante fonte de emissões de HC não-queimados.

O efeito da **taxa de compressão** sobre emissão de NO_x é pequeno. Estudos feitos divergem sobre a influência da taxa de compressão na emissão de NO_x , alguns mostram que a taxa de formação de NO_x cresce moderadamente com o aumento da taxa de compressão, enquanto outros mostram uma queda na produção de NO_x .

O aumento da taxa de compressão resulta em aumento da emissão de HC. Vários fatores contribuem para o fato: maior contribuição das frestas da câmara de combustão a altas pressões; menores temperaturas dos gases ao final da fase da expansão, produzindo menor oxidação de HC no cilindro; a diminuição de fração residual de gás, que aumenta a fração de HC do cilindro que escapa na exaustão; menores temperaturas de expansão, o que causa menor oxidação de HC no sistema de escape.

6.2.O efeito do aquecimento do motor

Supondo que o motor trabalhe com ϕ constante, devido à atuação do sensor *lambda*, e analisando os gases de escape desde o momento em que o motor é ligado em diante, verifica-se que a quantidade de gases poluentes emitidos varia com o tempo, em função do motor estar aquecendo até atingir a temperatura ideal de funcionamento (em inglês, *warm up*).

Só para efeito qualitativo, os testes de emissões feitos com esse propósito em motores de combustão interna de ignição por faísca, independentemente de sofrer aplicação de carga ou não, mostram que há uma tendência determinada de variação de cada gás emitido em função do tempo de funcionamento do motor, até que este atinja sua temperatura de funcionamento ideal:

- a quantidade de CO_2 produzido tende a aumentar;
- a quantidade de CO tende a diminuir;
- a quantidade de HC não queimados tende a diminuir;
- a quantidade de NO_x tende a aumentar.

A explicação para estas observações é que, conforme o motor atinge seu ponto de operação ideal, a reação de combustão ocorre em temperatura próxima da ideal, e então os níveis de CO e HC como produtos de uma combustão ineficiente diminuem.

Já os gases NO_x , que são função principalmente da temperatura de combustão, são produzidos em maior quantidade quando o motor já está aquecido e, logicamente, a temperatura da combustão é mais alta.

7. LEGISLAÇÃO AMBIENTAL BRASILEIRA

A resolução nº 315 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), do dia 29/10/2002 (publicada no Diário Oficial da União em 20/11/2002) regulamenta as emissões veiculares que entram em vigor a partir do dia 01/01/2007, e é denominada CONAMA Fase IV (ou PROCONVE L-4 – Programa de Controle de Poluição do Ar de Veículos Automotores). Também legisla sobre o CONAMA Fase V (PROCONVE L-5), que entra em vigor 01/01/2009. Seu texto integral encontra-se em anexo.

Esta resolução define os seguintes limites para a fase IV são estabelecidos (no artigo 3º), para veículos leves de passageiros utilizando-se de motor com ciclo Otto, os seguintes níveis máximos de emissões:

| | Poluente | CO | HC | NOx | Aldeídos | CO Marcha Lenta | emissão evaporativa |
|------|--------------|------|------|------|----------|-----------------|---------------------|
| Ano | Fase | g/km | g/km | g/km | g/km | %vol | g/teste |
| 1988 | | 24,0 | 2,1 | 2,1 | - | 3,0 | - |
| 1990 | | 24,0 | 2,1 | 2,0 | - | 3,0 | 6,0 |
| 1992 | | 12,0 | 1,2 | 1,4 | 0,20 | 2,5 | 6,0 |
| 1997 | | 2,0 | 0,30 | 0,60 | 0,03 | 0,50 | 6,0 |
| 2007 | Proconve L-4 | 2,0 | 0,16 | 0,25 | 0,03 | 0,50 | 2,0 |
| 2009 | Proconve L-5 | 2,0 | 0,05 | 0,12 | 0,02 | 0,50 | 2,0 |

Tabela 3. Legislação sobre emissões veiculares de poluentes.

Na tabela acima há um comparativo das exigências normativas ao longo do tempo. Em 1997 entrou a exigência de catalisadores, o que permitiu uma redução significativa nos níveis de emissões.

O artigo 2º da resolução estabelece que para as novas homologações o limite é de dois gramas de hidrocarbonetos totais por ensaio de emissão evaporativa exceto para os que usam unicamente gás natural como combustível.

Para os motores que utilizam ciclo Diesel, há exigência mais branda referente ao NO_x. Os veículos pesados com esse tipo de motor devem submeter-se a ensaios ETC, ELR e ESC (art. 22 da Resolução), que são ciclos europeus de emissões para diesel.

A resolução estabelece, no art. 10, que o veículo deverá conter sistemas de auto diagnose (*on board diagnosis – OBD*), com datas que serão estipuladas pelo IBAMA em comum acordo com o CONAMA. Tais dispositivos são instalados a bordo do veículos e visam detectar o mau funcionamento dos componentes que compõem o

sistema de controle de emissões. Também alertam ao cliente sobre a manutenção e reparo do sistema, disponibilizando informações do estado corrente do sistema de controle de emissões completo.

Os fabricantes ou importadores devem aplicar fatores de deterioração por oitenta mil quilômetros ou cinco anos de uso, conforme art. 11. Tais fatores têm implicação direta no desenvolvimento de novos veículos, uma vez que dentre os componentes mais sensíveis à deterioração estão os catalisadores.

Para as montadoras há uma exigência, contida no art. 12, que 40% de sua produção anual já atenda aos limites de emissões dois anos antes da vigência da lei e 70% de sua produção um ano antes do início da vigência da lei.

A resolução permite ainda que o limite de hidrocarbonetos não metano (HC) possa ser alterado futuramente pelo CONAMA, em vista de alguma impossibilidade técnica de não atendimento aos limites.

O art. 18 dispõe sobre os combustíveis, que devem possuir características adequadas e compatíveis com as tecnologias futuras. Tal fato implica que alguns processos de craqueamento do petróleo e seu refino sejam modificados no intuito de atender à resolução. A Agência Nacional do Petróleo (ANP) tem propostas para adequar as especificações da gasolina para atender às fases IV e V (principalmente redução da concentração do enxofre de 1000 para 400 ppm e posterior queda para 50 ppm).

No Brasil a metodologia para medição das emissões de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio é regulamentada pela Norma NBR 6601, elaborado pela Comissão de Estudo de Emissões Veiculares da ABNT (veja capítulo V). A NBR 6601 segue a metodologia americana, que adota o ciclo de condução FTP-75. Este é um ciclo altamente transitório e difere do ciclo adotado na Europa (ECE 15 + EUDC), que é mais artificial.

Os ensaios a serem realizados para medição de aldeídos devem estar de acordo com a NBR 12026, e para medição de emissão evaporativa devem estar de acordo com a NBR 11481.

Os combustíveis devem estar de acordo com as regulamentações da ANP, sendo a mistura gasolina com álcool preparada a partir de 22,0% +- 1,0% em volume de álcool carburante, sendo denominada gasolina padrão de emissões (GPE).

8. TESTES DE EMISSÕES GASOSAS

Para atender à legislação ambiental vigente, é necessário que o motor seja certificado quanto às emissões gasosas resultantes de seu processo de combustão. Essa certificação é obtida a partir dos testes de emissões gasosas feitos especificamente com essa finalidade, que podem ser feitos na própria fábrica ou em laboratórios especializados contratados.

Cada país pode adotar legislações diferentes em relação às emissões gasosas, e dessa forma a padronização dos testes de emissões pode ser diferente. Isso realmente ocorre, mas há uma tendência de que, movidos pelo mercado globalizado e conseqüente intenso comércio industrial entre países, os fabricantes de veículos automotores adotem os mesmos procedimentos e padronizações de testes de emissões.

Em alguns países cuja legislação ambiental é mais rígida, as leis concernentes às emissões gasosas veiculares estão em constante evolução, o que interfere no desenvolvimento de novos equipamentos de medição e na padronização para os testes. Esse desenvolvimento não consegue acompanhar a rápida mudança das leis, questão essa ainda sem solução definitiva.

Pelo aspecto técnico, os testes de emissões gasosas veiculares são mais complicados que outros testes veiculares, por incluírem o regime transiente, mas dessa forma são mais representativos das condições reais de operação dos motores.

O controle das condições do teste é muito importante, e é fator determinante da validade dos resultados obtidos.

Num teste de emissões gasosas devem ser controlados: os procedimentos de montagem do equipamento de teste; a calibração do equipamento; as condições ambientais do teste (qualidade, temperatura e umidade do ar de entrada do motor); montagem do sistema de escape dos gases e a qualidade e armazenamento do combustível.

Há técnicas de medição diferentes para cada tipo de poluente resultante da combustão:

- CO: análise não-dispersiva por infra-vermelho;
- HC: detecção de ionização da chama;
- NO_x: análise por quimioluminescência;
- Material particulado: filtração (comum em motores diesel).

Normalmente, uma pequena fração dos gases de escape é coletada para uma linha de amostragem. Parte dessa amostra é alimentada diretamente para o instrumento que analisa HC não queimados, chamado de detector de ionização de chama (FID). Os HC presentes na amostra do gás de escape são queimados e uma pequena chama hidrogênio-ar, produzindo íons em quantidade proporcional ao número de átomos de carbono queimados. O FID é então um contador de átomos de carbono, calibrado com amostra de gases contendo quantidades conhecidas de HC.

Hidrocarbonetos não queimados são expressos normalmente em fração molar ou volumétrica, em ppm. Medições mais antigas de HC não queimados eram feitas por analisador não dispersivo de infravermelho (NDIR, em inglês), na qual a absorção de infravermelho pelos HC numa célula de amostra é usada para determinar sua concentração. Valores de concentração de HC produzidos pelo motor, medidos por um analisador FID, são cerca de duas vezes maiores que os valores equivalentes medidos por analisador NDIR, usualmente multiplicados por dois para se obter uma estimativa da real concentração de HC nos gases de escape. Concentrações grandes de oxigênio nos gases de escape afetam as medidas feitas pelo FID. Para prevenir condensação de HC na linha de coleta de amostra, esta é geralmente aquecida.

O analisador NDIR é usado para medição de concentrações de CO_2 e CO . A absorção de infravermelho numa célula de amostra contendo gases de escape é comparada à absorção em uma célula de referência. O detector contém o gás sendo medido em dois compartimentos separados por um diafragma. A radiação não absorvida na célula de amostra é absorvida pelos gases no detector em um dos lados do diafragma. A radiação não absorvida pela célula de referência é absorvida pelo gás na outra metade do detector. Diferentes valores de absorção nas duas metades do detector resultam em diferença de pressão que é medida em termos da dilatação do diafragma. O analisador NDIR é calibrado com amostras de gases de composição conhecida. Como a absorção de infravermelho por vapor de água se impõe sobre a absorção por CO e CO_2 , a amostra dos gases de escape é seca antes de entrar no analisador.

Os óxidos de nitrogênio, tanto a quantidade de NO quanto o total de óxidos de nitrogênio (NO_x), são medidos com um analisador de quimioluminescência. O NO da amostra dos gases de escape reage com ozônio num reator de fluxo. A reação produz moléculas de NO_2 excitados eletronicamente que emitem radiação ao decair para um estado inferior. A radiação é medida com um fotomultiplicador e é proporcional à

quantidade de NO. O aparelho pode ainda converter NO₂ da amostra em NO, por decomposição em tubo de aço aquecido, tal que a concentração total de NO_x possa ser determinada.

A cromatografia gasosa pode ser usada para determinar a quantidade de espécies inorgânicas (N₂, O₂, H₂, CO e CO₂), ou pode ser usada para medir a quantidade de hidrocarbonetos presentes na mistura não queimada. O etanol não queimado presente no gás de escapamento emitido por um veículo, durante cada uma das fases de um ensaio dinamométrico, é retido pela água (NBR6601 apud Resolução nº 9, do dia 04/05/94 do CONAMA). A solução aquosa resultante é analisada por cromatografia de fase gasosa que separa, identifica e quantifica o teor de etanol presente nesta solução.

Material particulado é medido por filtração dos gases de escape em filtros previamente pesados.

8.1.Fases do projeto: Etapas de calibração

Em um projeto de um veículo, existem variáveis que são consideradas no intuito de tornar o produto mais robusto e que atenda aos anseios do consumidor em termos de dirigibilidade, consumo, desempenho, entre outros fatores.

Um dos fatores menos percebidos pelo consumidor, mas que é extremamente importante para a montadora, diz respeito às emissões veiculares. A tendência das legislações que regulamentam as emissões é de se tornarem mais rígidas e os cuidados no projeto para atendê-las deve aumentar. O resultado desse maior rigor é o desenvolvimento de um produto que polui menos e de maior tecnologia embarcada.

No entanto, para atender a uma legislação que entrará em vigor em 2007, inúmeros desenvolvimentos são necessários muitos meses antes, pois as fases de projeto compreendem testar o veículo com componentes com projeto e funcionalidade próximos do produto final.

Ao final de cada fase de projeto, ciclos de emissões são rodados para avaliar se os componentes acrescentados, removidos ou modificados do sistema estão fazendo com que o produto se afaste dos limites impostos pelo governo.

Numa fase inicial do projeto, já é possível contar com um catalisador de projeto e funcionalidade finais. No entanto, outros componentes de *powertrain* (motor + transmissão) têm projeto intermediário e funcionalidade próxima do final. Para esses componentes, cujo desenvolvimento dar-se-á durante o programa do veículo, ainda é possível alterar seu desenho, seu material, sua forma, em prol do melhor resultado de emissões no carro como um todo.

Além dos componentes supra-citados (*hardware* do carro), existe a parte de programação do veículo (*software*), dado principalmente pela ECM (*engine control module*), que gerencia o funcionamento do motor através da leitura de seus sensores e atuadores espalhados em pontos estratégicos. Em veículos com transmissão automática ou semi-automática existe a TCM (*transmission control module*) que interage com a ECM de modo a garantir o melhor desempenho do veículo.

A calibração da ECM é bastante alterada dependendo da fase do projeto. Inicialmente, a calibração dela está mais “crua”, uma vez que o *hardware* conjunto não

é final. Na medida em que a fase de projeto chega ao fim, a calibração da ECM é aperfeiçoada até chegar à sua calibração final.

Ao final da calibração da ECM, todo o *hardware* do carro já está definido e é rodado um veículo para homologação do modelo.

8.2.O Ciclo de Testes EPA 75

Todas as questões relativas aos testes de emissões gasosas veiculares são citadas na norma NBR 6601, da ABNT, A versão mais atual da norma é a de 2001.

Essa norma prescreve o método de determinação de HC, CO, NO_x e CO₂ emitidos, através do duto de descarga de veículos rodoviários automotores leves, por motores ciclo Otto utilizando gasolina, etanol ou sua mistura como combustíveis.

A norma prescreve também o ciclo de teste, que é o mesmo utilizado nos EUA com o nome de FTP 75, ou EPA 75, assim como fixa as características mínimas dos equipamentos e materiais, como devem ser calibrados os equipamentos e como proceder para conduzir os testes.

O ciclo de teste chamado EPA 75 pode ser considerado representativo das condições do uso normal médio no trânsito urbano, ou seja, um regime transitório de operação do motor. Apresenta três fases distintas, chamadas de *Cold Transient*, *Cold Stabilized* e *Hot Transient*, representadas na seguinte figura:

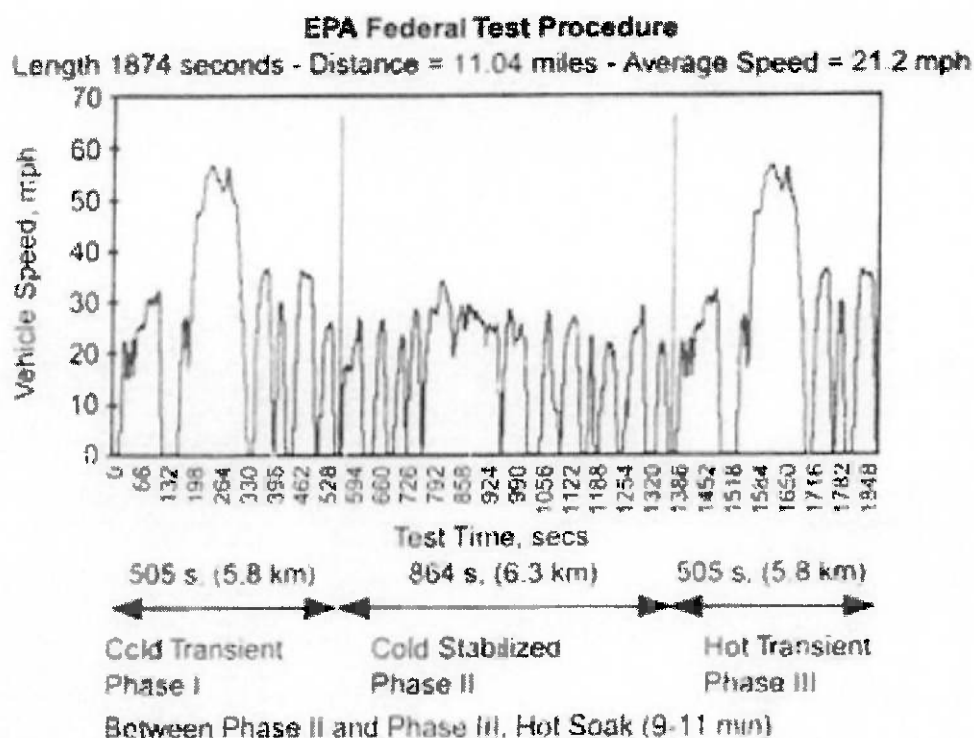


Figura 8. Ciclo de teste EPA 75.

A primeira etapa, *Cold Transient*, representa o período de aquecimento do motor, logo após a partida, e é também chamada de “*warm up*”. A segunda etapa é chamada de *Cold Stabilized*. Entre esta etapa e a próxima, há um período chamado “*soak*”, que dura 10 minutos, no qual o motor é desligado e o capô do veículo é mantido fechado. A terceira e última etapa do ciclo é chamada de *Hot Transient*, na qual o motor é ligado novamente e apresenta temperatura de funcionamento próxima da ideal, visto que o tempo de *soak* é pequeno.

9. META DE EMISSÕES DA MONTADORA

A meta de emissões de poluentes da montadora General Motors do Brasil para seus automóveis é na maioria das vezes menor que a meta estabelecida pela legislação governamental em vigor, no caso a CONAMA Fase IV.

A explicação para o fato tem relação direta com a vida útil do catalisador. Até alguns anos atrás, a curva de eficiência do catalisador mostrava que um catalisador montado num veículo com 80 mil quilômetros rodados tinha eficiência próxima à metade de quando o mesmo veículo apresentava apenas quatro mil quilômetros rodados. Hoje, a tecnologia dos catalisadores melhorou e essa curva de eficiência apresenta um decréscimo mais suave.

De qualquer forma, para garantir que a meta de emissões definida por lei seja atendida mesmo ao fim da vida útil do catalisador (por volta dos 80 mil quilômetros rodados do veículo), a meta de emissões da montadora para homologação de seus veículos é igual à metade da meta da legislação governamental.

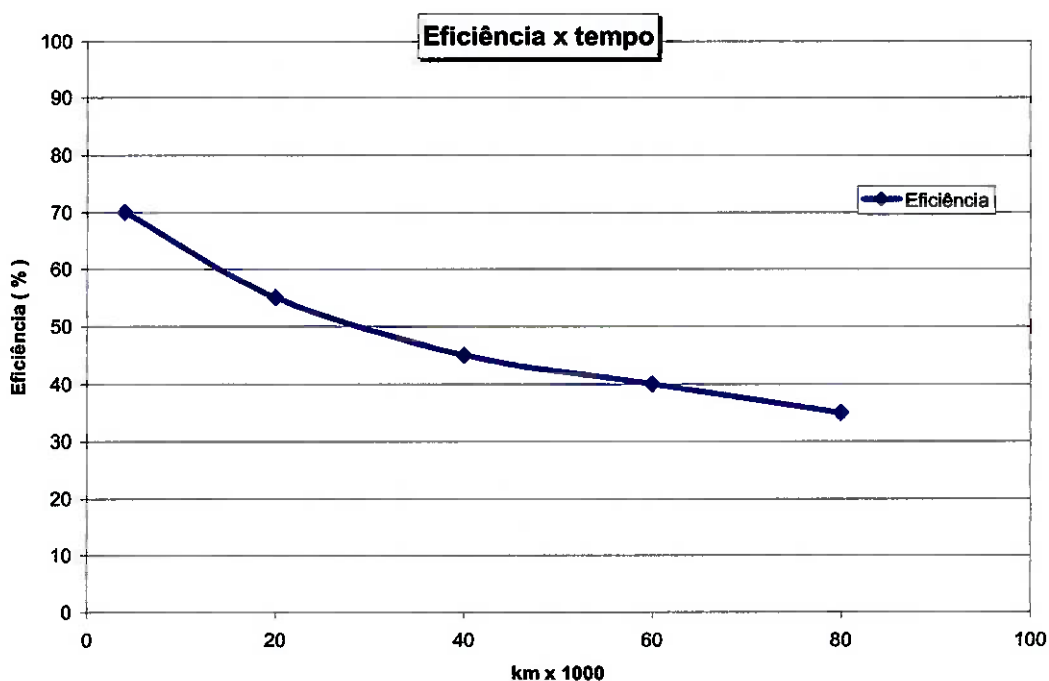


Figura 9. Eficiência média do catalisador com o tempo de funcionamento.

10. TESTE DE HOMOLOGAÇÃO DO VEÍCULO

Para se homologar um veículo bi-combustível no Brasil, a legislação exige que se realizem três tipos de teste de emissões para três proporções de combustível diferentes, sendo:

- uma bateria de três testes para gasolina padrão de emissões (GPE): ciclo EPA75, emissões de aldeídos e emissões evaporativas (*shed*);
- uma bateria de três testes para combustível F50 (composição: 50% de GPE e 50% de etanol hidratado, em volume);
- uma bateria de três testes para etanol hidratado;

Os testes devem ser feitos para as três proporções de combustível citadas justamente com o objetivo de garantir que o veículo cumpra a legislação de emissões, independentemente de como será abastecido pelo consumidor final. As diferentes proporções do etanol utilizadas no combustível, que incluem dois extremos e uma composição intermediária, supõem cobrir toda a faixa de comportamento possível do veículo.

A necessidade de se realizar um ciclo de testes de emissões de aldeídos se deve ao fato de que os combustíveis gasolina e álcool comercializados no Brasil produzem acetaldeídos e formaldeídos, poluentes que ocasionam câncer dentre outras enfermidades. A gasolina comercializada no Brasil contém 25% de etanol anidro, o que justifica rodar um ciclo de aldeídos.

Os outros dois testes dizem respeito à medição de emissões gasosas emitidas pelo veículo como NO_x, HC, CO e CO₂ (ciclo EPA-75), e medição de emissões evaporativas.

10.1. Condições do Teste

O veículo submetido aos testes é equipado com motor 2.0L 8V FlexFuel da General Motors do Brasil, de fabricação no ano 2003, com transmissão automática de 4 velocidades. O veículo apresentava 4800 km rodados no início dos testes.

Os testes foram feitos no Campo de Provas da Cruz Alta da GMB, em Indaiatuba – SP.

Os equipamentos utilizados foram:

- Dinamômetro de chassis Burke E. Porter Elétrico com Rolo Simples de 48” 2163-11 CPLE:0561;
- Amostrador Horiba 254904-8 – CPLE: 0561;
- Analisadores Horiba:
HC: FIA-23A CPLA: 0045
CO: AIA-23AS CPLA: 0043
NOx: CLA-22A CPLE: 0047
CO2: AIA-23 CPLE: 0041
- Coleta de aldeídos: CPLE: 0242
- Análise de aldeídos: Cromatógrafo Milton Roy 3100 CPLE: 0175
- Câmara selada Horiba CPLE 0168

Normas utilizadas:

- Emissões de gases de escapamentos: NBR 6601
- Emissões de aldeídos: NBR 12026
- Emissões evaporativas: NBR 11481
- Emissões de CO em marcha lenta: NBR 10972
- Consumo de combustível: NBR 7024

10.2. A transmissão automática

O veículo em estudo, como já foi dito, é um modelo com transmissão automática. Sob a óptica de emissões veiculares, há diferenças entre a transmissão automática e a manual.

A transmissão manual é a mais vendida no país atualmente e, comparativamente com a automática gera menos poluentes. A explicação é que na opção automática as trocas de marcha são mais freqüentes, causadas pelo acerto (e tempo de reação) dos

sensores que recebem como entrada os dados de velocidade e rotação instantâneas do veículo.

Entretanto, esse fato de modo algum invalida a análise a que este trabalho se dispõe a realizar, já que o foco não são os valores exatos das quantidades de poluentes emitidas, mas sim a sua dependência com a composição do combustível e regime de operação, a serem descritos no capítulo seguinte.

10.3. Resultados do teste de emissões de poluentes

Os dados resultantes dos testes de emissão de poluentes gasosos, aldeídos e emissão evaporativa, cada teste realizado de acordo com sua norma, estão apresentados nas tabelas seguintes.

Os combustíveis utilizados nos testes, de acordo com norma para homologação do veículo, foram três:

- Etanol hidratado puro;
- Gasolina com 22% de Etanol Anidro(chamado de GPE);
- 50% GPE e 50% Etanol hidratado (chamado de F50).

Vale observar que para cada combustível, foram realizados dois ensaios, e o resultado válido é a média final dos valores obtidos nos dois ensaios.

| | | | | | | | | | |
|---|----------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|-------------|
| Combustível: Etanol hidratado | | | | | | | | | |
| Massa específica: 0,809 kg/l a 20°C | | | | | | | | | |
| Resultados do Ensaio de Emissões dos Gases de Escapamento | | | | | | | | | |
| Ensaio | 1 | | | | 2 | | | | |
| Data | 29/08/03 | | | | 29/08/03 | | | | |
| Horário | 08:37 | | | | 23:14 | | | | |
| Temp. Amb. (°C) | 23,8 | | | | 24,5 | | | | |
| Pressão Baro. (kPa) | 95,65 | | | | 95,61 | | | | |
| Umidade Relat. (%) | 48,5 | | | | 45,9 | | | | |
| Vol. de Comb.(l) | 21 | | | | 21 | | | | |
| Auton. Esteq. (km/l) | 7,04 | | | | 7,03 | | | | |
| Fase | 1 | 2 | 3 | Total | 1 | 2 | 3 | Total | Média Final |
| Dist. Percorr. (km) | 5,759 | 6,191 | 5,773 | 17,72 | 5,777 | 6,173 | 5,767 | 17,72 | 17,72 |
| Emiss. HC (g/km) | 0,152 | 0,012 | 0,012 | 0,176 | 0,162 | 0,012 | 0,012 | 0,186 | 0,18 |
| Emiss. CO (g/km) | 0,402 | 0 | 0,024 | 0,426 | 0,465 | 0 | 0,009 | 0,474 | 0,45 |
| Emiss. NOx (g/km) | 0,02 | 0,04 | 0,017 | 0,077 | 0,015 | 0,034 | 0,024 | 0,073 | 0,08 |
| Emiss. CO2 (g/km) | 45,1 | 108,4 | 50,1 | 203,6 | 45,1 | 108,5 | 50,1 | 203,7 | 203,7 |
| Emiss. Aldeid. (g/km) | 0,0198 | | | | 0,0185 | | | | 0,0192 |
| Emiss. CO M.L. (%) | 0,01 | | | | 0,01 | | | | 0,01 |
| Rotação M.L. (rpm) | 780 | | | | 760 | | | | 770 |
| Resultados do Ensaio de Emissão Evaporativa | | | | | | | | | |
| Ensaio | 1 | | | | 2 | | | | |
| Data | 29/08/03 | | | | 29/08/03 | | | | |
| Fase | 1 | 2 | Total | | 1 | 2 | Total | | Média Final |
| Horário Inicial | 07:26 | 09:21 | | | 22:05 | 23:56 | | | |
| Temp. Inicial (°C) | 21,7 | 23,8 | | | 20,9 | 23,1 | | | |
| Temp. Final (°C) | 23,1 | 26,4 | | | 22,5 | 26 | | | |
| Pressão Baro. (kPa) | 95,46 | 95,46 | | | 95,45 | 95,45 | | | |
| Massa Evaporada (g) | 0,327 | 0,922 | 1,249 | | 0,265 | 0,789 | 1,054 | | 1,15 |

Tabela 4. Resultados do teste com combustível etanol hidratado.

| | | | | | | | | | |
|---|----------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|-------------|
| Combustível: Gasolina com 22% Etanol | | | | | | | | | |
| Massa específica: 0,752 kg/l a 20°C | | | | | | | | | |
| Resultados do Ensaio de Emissões dos Gases de Escapamento | | | | | | | | | |
| Ensaio | 1 | | | | 2 | | | | |
| Data | 05/09/03 | | | | 05/09/03 | | | | |
| Horário | 08:37 | | | | 23:04 | | | | |
| Temp. Amb. (°C) | 23,2 | | | | 23,9 | | | | |
| Pressão Baro. (kPa) | 95,67 | | | | 95,45 | | | | |
| Umidade Relat. (%) | 56,2 | | | | 46,7 | | | | |
| Vol. de Comb.(l) | 21 | | | | 21 | | | | |
| Auton. Esteq. (km/l) | 9,93 | | | | 9,90 | | | | |
| Fase | 1 | 2 | 3 | Total | 1 | 2 | 3 | Total | Média Final |
| Dist. Percorr. (km) | 5,786 | 6,194 | 5,757 | 17,74 | 5,773 | 6,198 | 5,762 | 17,73 | 17,74 |
| Emiss. HC (g/km) | 0,062 | 0,021 | 0,007 | 0,09 | 0,038 | 0,025 | 0,007 | 0,07 | 0,08 |
| Emiss. CO (g/km) | 0,432 | 0,078 | 0,011 | 0,521 | 0,24 | 0,1 | 0,026 | 0,366 | 0,44 |
| Emiss. NOx (g/km) | 0,053 | 0,003 | 0,031 | 0,087 | 0,052 | 0,004 | 0,018 | 0,074 | 0,08 |
| Emiss. CO2 (g/km) | 47,3 | 115,6 | 53,6 | 216,5 | 47,4 | 116 | 53,9 | 217,3 | 216,9 |
| Emiss. Aldeid. (g/km) | 0,002 | | | | 0,0022 | | | | 0,0021 |
| Emiss. CO M.L. (%) | 0,01 | | | | 0,01 | | | | 0,01 |
| Rotação M.L. (rpm) | 760 | | | | 760 | | | | 760 |
| Resultados do Ensaio de Emissão Evaporativa | | | | | | | | | |
| Ensaio | 1 | | | | 2 | | | | |
| Data | 05/09/03 | | | | 05/09/03 | | | | |
| Fase | 1 | 2 | Total | | 1 | 2 | Total | | Média Final |
| Horário Inicial | 07:30 | 09:20 | | | 21:55 | 23:46 | | | |
| Temp. Inicial (°C) | 22,4 | 24,7 | | | 23,8 | 24,5 | | | |
| Temp. Final (°C) | 24 | 27 | | | 24,5 | 27,6 | | | |
| Pressão Baro. (kPa) | 95,59 | 95,59 | | | 95,36 | 95,36 | | | |
| Massa Evaporada (g) | 0,122 | 0,276 | 0,398 | | 0,102 | 0,315 | 0,417 | 0,41 | |

Tabela 5. Resultados do teste com combustível GPE.

| | | | | | | | | | |
|---|----------|-------|-------|----------|----------|-------|-------------|-------|-------------|
| Combustível: 50% Gasolina com 22% Etanol / 50% Etanol Hidratado | | | | | | | | | |
| Massa específica: 0,778 kg/l a 20°C | | | | | | | | | |
| Resultados do Ensaio de Emissões dos Gases de Escapamento | | | | | | | | | |
| Ensaio | 1 | | | | 2 | | | | |
| Data | 3/9/2003 | | | | 3/9/2003 | | | | |
| Horário | 09:24 | | | | 23:48 | | | | |
| Temp. Amb. (°C) | 23,2 | | | | 23,4 | | | | |
| Pressão Baro. (kPa) | 95,86 | | | | 95,73 | | | | |
| Umidade Relat. (%) | 53,7 | | | | 54,1 | | | | |
| Vol. de Comb.(l) | 21 | | | | 21 | | | | |
| Auton. Esteq. (km/l) | 8,56 | | | | 8,56 | | | | |
| Fase | 1 | 2 | 3 | Total | 1 | 2 | 3 | Total | Média Final |
| Dist. Percorr. (km) | 5,784 | 6,198 | 5,787 | 17,77 | 5,763 | 6,225 | 5,763 | 17,75 | 17,76 |
| Emiss. HC (g/km) | 0,054 | 0,008 | 0,008 | 0,07 | 0,045 | 0,008 | 0,006 | 0,059 | 0,06 |
| Emiss. CO (g/km) | 0,357 | 0 | 0,017 | 0,374 | 0,256 | 0,005 | 0,023 | 0,284 | 0,33 |
| Emiss. NOx (g/km) | 0,036 | 0,009 | 0,024 | 0,069 | 0,062 | 0,005 | 0,034 | 0,101 | 0,09 |
| Emiss. CO2 (g/km) | 46,1 | 112,1 | 52,3 | 210,5 | 45,6 | 112,9 | 52,1 | 210,6 | 210,6 |
| Emiss. Aldeíd. (g/km) | 0,0062 | | | | 0,0065 | | | | 0,0064 |
| Emiss. CO M.L. (%) | 0,01 | | | | 0,01 | | | | 0,01 |
| Rotação M.L. (rpm) | 770 | | | | 760 | | | | 765 |
| Resultados do Ensaio de Emissão Evaporativa | | | | | | | | | |
| Ensaio | 1 | | | 2 | | | | | |
| Data | 3/9/2003 | | | 3/9/2003 | | | | | |
| Fase | 1 | 2 | Total | 1 | 2 | Total | Média Final | | |
| Horário Inicial | 07:31 | 10:06 | | 22:14 | 00:31 | | | | |
| Temp. Inicial (°C) | 22,2 | 25,4 | | 23,3 | 24,0 | | | | |
| Temp. Final (°C) | 23,8 | 26,9 | | 24,3 | 27,3 | | | | |
| Pressão Baro. (kPa) | 95,73 | 95,73 | | 95,49 | 95,49 | | | | |
| Massa Evaporada (g) | 0,075 | 0,197 | 0,272 | 0,076 | 0,199 | 0,275 | 0,27 | | |

Tabela 6. Resultados do teste com combustível F50.

11. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS NOS TESTES DE EMISSÕES

O objetivo dessa análise inicial é confrontar os dados resultantes do teste de emissões a fim de identificar qual a composição da mistura combustível que apresenta melhor compromisso entre os níveis de emissões dos diversos poluentes, além de verificar dentro o ciclo EPA 75 se alguma etapa tem maior contribuição nas emissões. Serão feitas duas abordagens distintas de análise dos resultados.

Ressalta-se que o processo de combustão em si é muito complexo, e as emissões reais de poluentes não podem ser totalmente explicadas pelo estudo dos mecanismos teóricos de formação de poluentes. A existência de pós-tratamento dos gases pelo catalisador aumenta a complexidade da compreensão do fenômeno em estudo, já que a eficiência de conversão não apresenta comportamento semelhante para os diversos poluentes, sendo também influenciada pela temperatura e pela composição dos produtos da combustão.

Outro fator muito importante a ser destacado é que o combustível não apresenta comportamento linear para a proporção de etanol na composição, não sendo possível prever, por exemplo, o comportamento do combustível F50 (50% etanol – 50% gasolina), com relação à emissão de um dado poluente.

Alguns resultados não esperados foram obtidos e estão relacionados diretamente ao fato de que nem o catalisador nem os combustíveis apresentam comportamentos previsíveis.

A primeira abordagem será qualitativa, visando identificar no ciclo de teste EPA 75 se alguma de suas etapas apresenta maior contribuição para a emissão de poluentes, qual é essa etapa e o motivo dessa diferença em relação ao restante do ciclo de teste.

A segunda abordagem é avaliar comparativamente a produção de cada um dos poluentes, e explicar as suas causas com base nos mecanismos e fatores de influência na formação dos mesmos.

11.1. Análise qualitativa dos resultados dos testes de emissão

A primeira abordagem feita em relação aos resultados do teste de emissões diz respeito à análise qualitativa dos dados, baseada na contribuição de cada etapa do ciclo de teste para a emissão total dos poluentes.

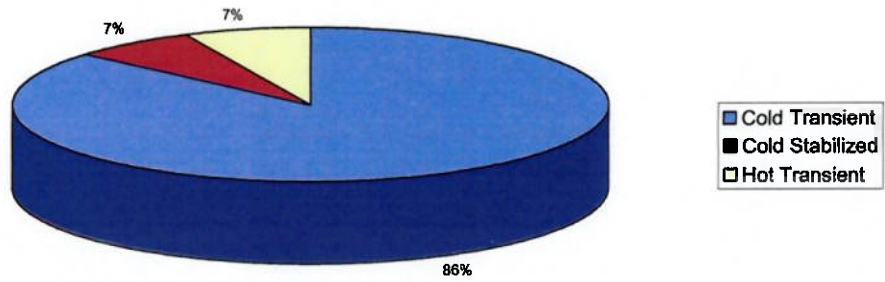
O teste de emissão de poluentes gasosos EPA 75 é dividido em 3 etapas, chamadas *Cold Transient*, *Cold Stabilized* e *Hot Transient*, como já citado. Ao final de cada uma delas é feita a medição da quantidade de poluentes emitida, e pode-se analisar a contribuição de cada uma para o total de poluentes emitidos durante o ciclo de teste.

Como houve pequenas variações entre os níveis de poluentes medidos entre os dois ensaios realizados em horários diferentes do mesmo dia para cada combustível, aqui será avaliado apenas o primeiro ensaio dos dois feitos, para que não haja distorção da análise, lembrando que esta será apenas qualitativa nesse momento. A tabela mostra os resultados obtidos no primeiro ensaio feito para cada combustível, e pode-se visualizar a contribuição de cada etapa através dos gráficos seguintes.

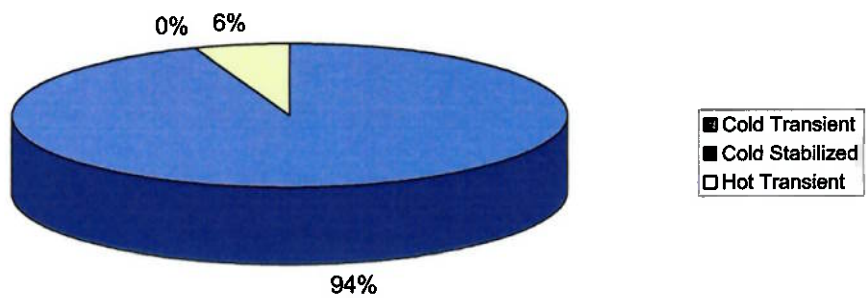
| Combustível | | 100% Etanol hidratado - 0,809 kg/l a 20°C | | | |
|-----------------|-----------------|---|-------|-------|-------|
| poluentes(g/km) | etapas | 1 | 2 | 3 | total |
| | HC | 0,152 | 0,012 | 0,012 | 0,176 |
| | CO | 0,402 | 0 | 0,024 | 0,426 |
| | NO _x | 0,02 | 0,04 | 0,017 | 0,077 |
| Combustível | | 50% GPE/ 50% Etanol hidrat. - 0,778 kg/l a 20°C | | | |
| poluentes(g/km) | etapas | 1 | 2 | 3 | total |
| | HC | 0,054 | 0,008 | 0,008 | 0,07 |
| | CO | 0,357 | 0 | 0,017 | 0,374 |
| | NO _x | 0,036 | 0,009 | 0,024 | 0,069 |
| Combustível | | Gasolina com 22% Etanol - 0,752 kg/l a 20°C | | | |
| poluentes(g/km) | etapas | 1 | 2 | 3 | total |
| | HC | 0,062 | 0,021 | 0,007 | 0,09 |
| | CO | 0,432 | 0,078 | 0,011 | 0,521 |
| | NO _x | 0,053 | 0,003 | 0,031 | 0,087 |

Tabela 7. Emissão de poluentes gasosos por etapa do teste EPA 75.

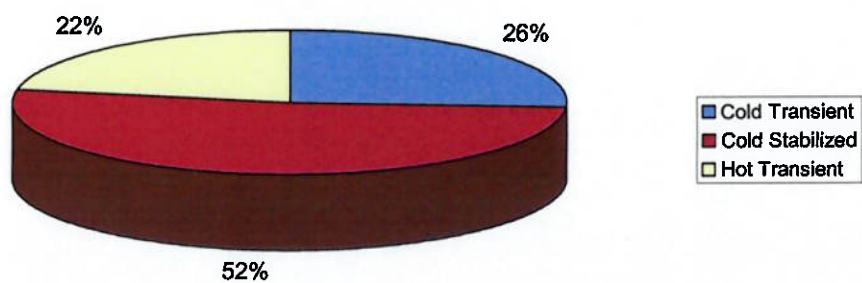
Emissão de HC por etapa - Etanol hidratado



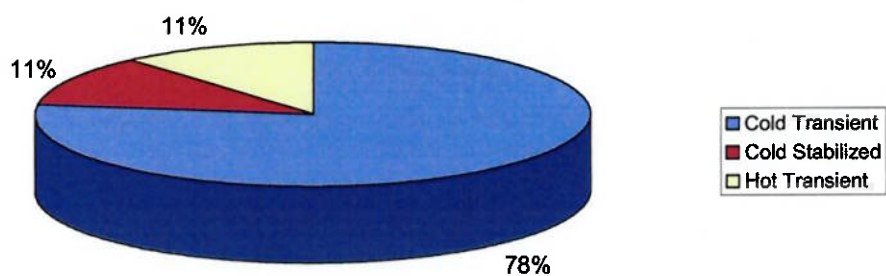
Emissão de CO por etapa - Etanol hidratado



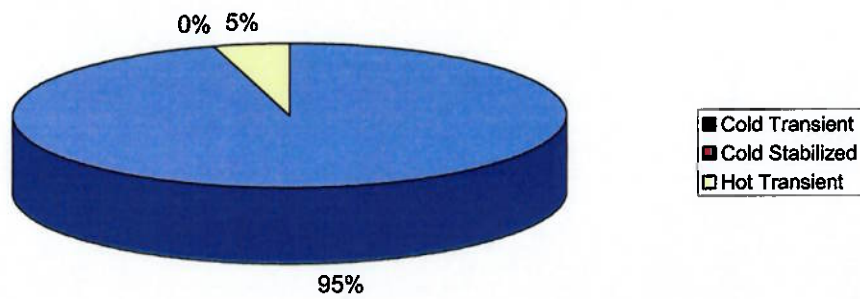
Emissão de NOx por etapa - Etanol hidratado



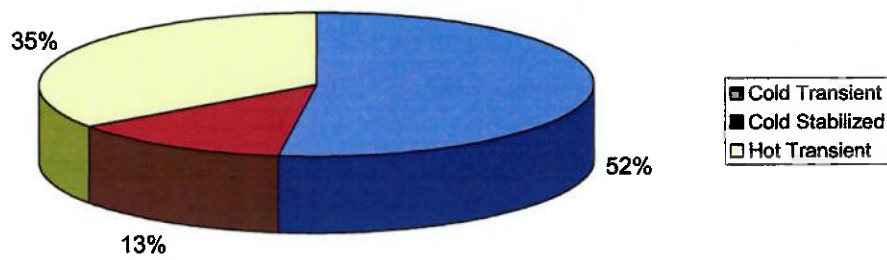
Emissão de HC por etapa - 50% GPE / 50% Etanol hidrat.



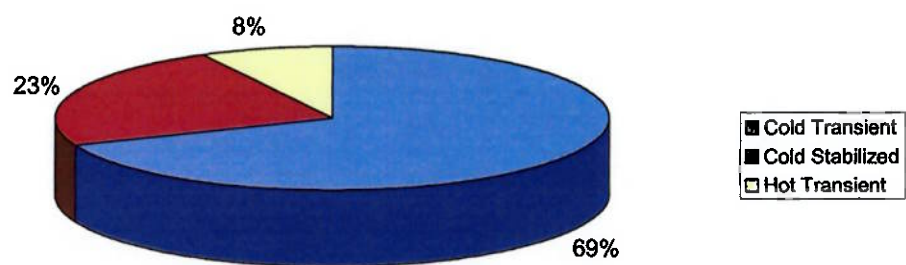
Emissão de CO por etapa - 50% GPE / 50% Etanol hidrat.



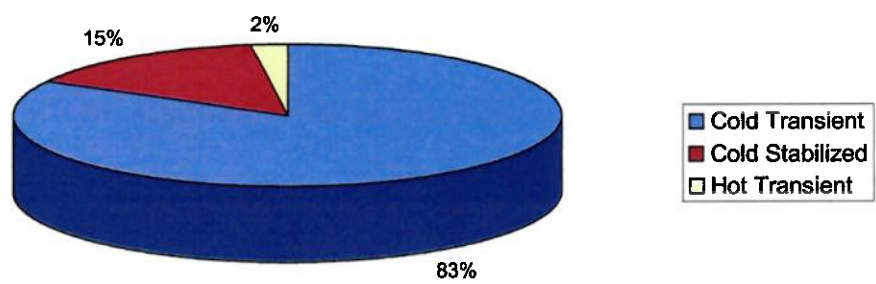
Emissão de NOx por etapa - 50% GPE / 50% Etanol hidrat.



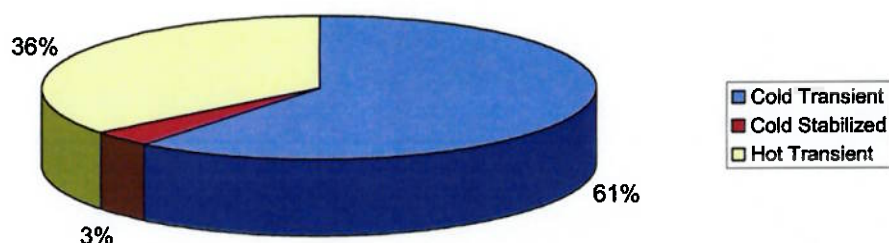
Emissão de HC por etapa - GPE



Emissão de CO por etapa - GPE



Emissão de NOx por etapa - GPE



A mais importante observação que se pode fazer sobre a análise qualitativa desses gráficos é a grande contribuição da primeira etapa do ciclo de teste EPA 75, chamada de *Cold Transient*, para o total de poluentes emitidos durante o ciclo de teste completo. Esse comportamento foi observado igualmente para os poluentes HC e CO, para cada combustível utilizado.

O comportamento padrão observado tem diversas causas. A etapa *Cold Transient* do ciclo corresponde aos instantes que seguem a partida do motor.

A primeira causa da contribuição significativa da primeira etapa está relacionada com o processo de aquecimento do motor (*warm up*). Como o motor opera ainda frio, longe da temperatura ideal de funcionamento, mesmo sendo a mistura ar-combustível enriquecida para proporcionar um bom funcionamento, não é possível eliminar as irregularidades do processo de combustão, que dessa maneira afetam negativamente as emissões de todos os poluentes.

A segunda causa tem relação com o funcionamento do catalisador. O catalisador, como o motor, tem uma temperatura ideal de funcionamento. O tempo que leva até que essa temperatura ideal de operação seja atingida, que corresponde a um mínimo de 50% de eficiência do mesmo, é chamado de *light off*. Isso indica que nos instantes seguintes à partida do motor a eficiência de conversão dos poluentes é baixa, justificando altos níveis de emissão registrados na primeira etapa.

A terceira causa também está relacionada com o tempo de funcionamento do motor após a partida, só que dessa vez com respeito ao sensor *lambda*. Como a combustão, com o motor operando a baixas temperaturas, é muito irregular ainda, os gases de escape não apresentam uma composição constante, fazendo com que o sensor *lambda* tenha um atraso até conseguir calcular a composição da mistura ar-combustível e enviar as informações para a central eletrônica atuar buscando obter uma mistura estequiométrica. Assim, o atraso do sensor, até que consiga ler corretamente a composição dos gases de escape, permite que a emissão de poluentes nos momentos iniciais de funcionamento do motor seja um pouco maior do que no restante do ciclo.

Em relação à emissão de NO_x , percebe-se que a contribuição da primeira etapa do ciclo é inversamente proporcional à quantidade de etanol no combustível. Este fato pode ser explicado pelo tempo de aquecimento do catalisador (*light off*), durante o mesmo o catalisador tem uma eficiência de conversão dos poluentes muito baixa. Por conta disso, as emissões de NO_x ocorrem em maior quantidade para o combustível com maior proporção de gasolina na sua composição, cujo pico de temperatura na câmara de combustão é maior.

Dessa maneira, as atenções devem estar voltadas principalmente para a fase de aquecimento do motor após sua partida, que é onde ocorrem os maiores níveis de emissões. Nesta fase, o catalisador e o sensor *lambda* ainda não estão atuando em suas temperaturas ideais de operação. O tempo ótimo de resposta do sensor ainda não foi atingido e o *light off* do catalisador ocorre alguns segundos depois da partida do motor.

11.2. Análise da influência da composição do combustível na emissão dos poluentes

O objetivo desta análise é confrontar os dados resultantes do teste de emissões a fim de identificar a composição da mistura combustível que apresenta o melhor compromisso entre os níveis de emissões dos diversos poluentes.

Fez-se uma análise inicial para cada poluente emitido, isoladamente, e outra análise comparando todos os poluentes medidos.

Como dito anteriormente, o processo de combustão é muito complexo, e o estudo dos mecanismos de formação de poluentes não explica totalmente os resultados

obtidos. Além disto, existem outras variáveis que aumentam a complexidade desta análise como, por exemplo, a não-linearidade do comportamento do catalisador e das propriedades do combustível conforme sua composição.

Para determinadas composições de combustível, o nível de emissão de poluentes em determinada etapa do ciclo EPA 75 variou significativamente entre os dois ensaios feitos. As principais variações encontradas entre os dois ensaios foram para:

a) Etanol:

- Emissão de CO na etapa 3 do ciclo
- Emissão evaporativa

b) GPE:

- Emissão de HC na etapa 1 do ciclo
- Emissão de CO nas etapas 1 e 3
- Emissão de NO_x na etapa 3

c) F50:

- Emissão de CO na etapa 1 do ciclo
- Emissão de NO_x nas etapas 1 e 3

Apesar de não se conseguir explicar exatamente a causa dessa variação, sabe-se que os motoristas responsáveis por conduzir cada ensaio são diferentes; dessa forma há influência do modo de dirigir de cada um deles no comportamento do veículo e conseqüentemente nos resultados dos níveis de emissões. Por isso, foram utilizados nessa análise quantitativa os valores médios dos ensaios, admitindo serem válidos os dados levantados. O resultado segue abaixo.

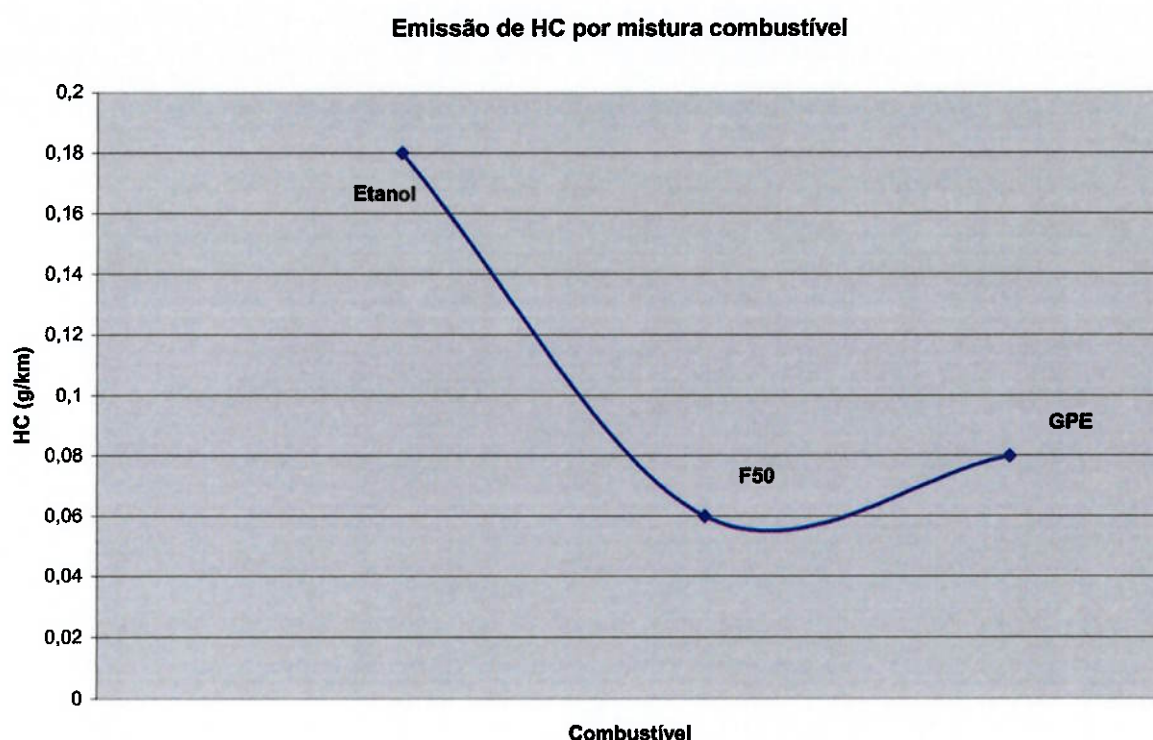


Figura 10. Gráfico de emissão de HC por combustível.

A primeira informação que se pode tirar do gráfico é que a emissão de hidrocarbonetos não-queimados (HC) para o combustível etanol hidratado é muito superior em relação às outras duas misturas, fato esse que pode parecer incoerente em um primeiro momento, já que para a mesma quantidade de combustível a gasolina possui maior massa de carbono em sua composição, refletindo em maior emissão de HC's não queimados comparativamente ao etanol. Além disso, para uma mesma taxa de compressão, o ponto de ignição da gasolina é adiantado em relação ao do etanol, como explicado mais adiante, o que causa maiores temperaturas na câmara de combustão, e conseqüentes picos de pressão maiores, contribuindo para a maior produção de HC não-queimados.

Entretanto, deve-se observar um aspecto importante: o etanol também produz como resultado da combustão álcool não-queimado, que também possui hidrogênio e carbono na sua composição química. Mas a identificação do álcool não-queimado não é tão simples pelos analisadores mais comuns, e ele entra na contabilidade de HC não-queimados, pois é analisado também por cromatografia gasosa.

Se descontada essa contribuição, já que o etanol não-queimado não é abordado pela legislação vigente, é possível que a produção de HC pelo combustível em questão

fosse mais baixa, e condizente com os níveis de emissão das outras composições de combustível. Cogita-se até que, se os álcoois não-queimados continuarem a ser contabilizados juntamente com HC não queimados, veículos movidos a álcool e veículos bi-combustíveis não conseguirão atender os limites de emissões especificados para a fase V do PROCONVE.

Posto isso, os níveis de emissão de HC para os outros dois combustíveis estão de acordo com o esperado. A composição básica da gasolina possui maior porcentagem de carbono, e assim para um combustível com maior quantidade de gasolina na sua composição, as emissões de HC tendem a ser maiores do que outro com menor proporção de gasolina, caso do GPE e do F50, respectivamente.

Essa diferença nas quantidades emitidas de poluentes também pode ser explicada analisando-se as pressões dentro do cilindro. Em motores semelhantes alimentados exclusivamente com gasolina ou com etanol, as taxas de compressão são diferentes devido às diferentes resistências à compressão antes da detonação de cada combustível, sendo que os motores alimentados com etanol são projetados para propiciar maiores taxas de compressão. O ponto de ignição em cada motor também é diferente, mais atrasado no motor movido a etanol em relação ao motor movido a gasolina. Isso deve-se à facilidade de ignição, uma característica dos combustíveis que diz respeito à facilidade do combustível inflamar-se. O etanol tem maior facilidade de ignição que a gasolina e, apesar de possuir também maior resistência à detonação, precisa ter seu ponto de ignição atrasado para não inflamar antes do momento ideal no ciclo de operação.

Como a taxa de compressão para um motor bi-combustível é fixa, apesar de ser um fator que influencia diretamente as emissões de todos os poluentes, o ponto de ignição é atrasado ainda mais quando os sensores detectam etanol na composição do combustível. Conforme o ponto de ignição é atrasado por ordem da central eletrônica, e isso de fato ocorre, os picos de pressão no cilindro diminuem proporcionalmente. O principal mecanismo de emissão de HC não-queimados é a fuga dos gases da mistura não-queimada para frestas e folgas na câmara de combustão devido a altas pressões. Com essa redução de pressão resultante do atraso do ponto de ignição, a emissão de HC é menor para combustível com maior quantidade de etanol em sua composição.

Outra possível explicação para essa diferença de emissão de HC maior para o etanol tem a ver com o catalisador. A eficiência de conversão do catalisador para cada

poluente pode variar com a composição do combustível, não podendo ser presumido um comportamento linear do mesmo.

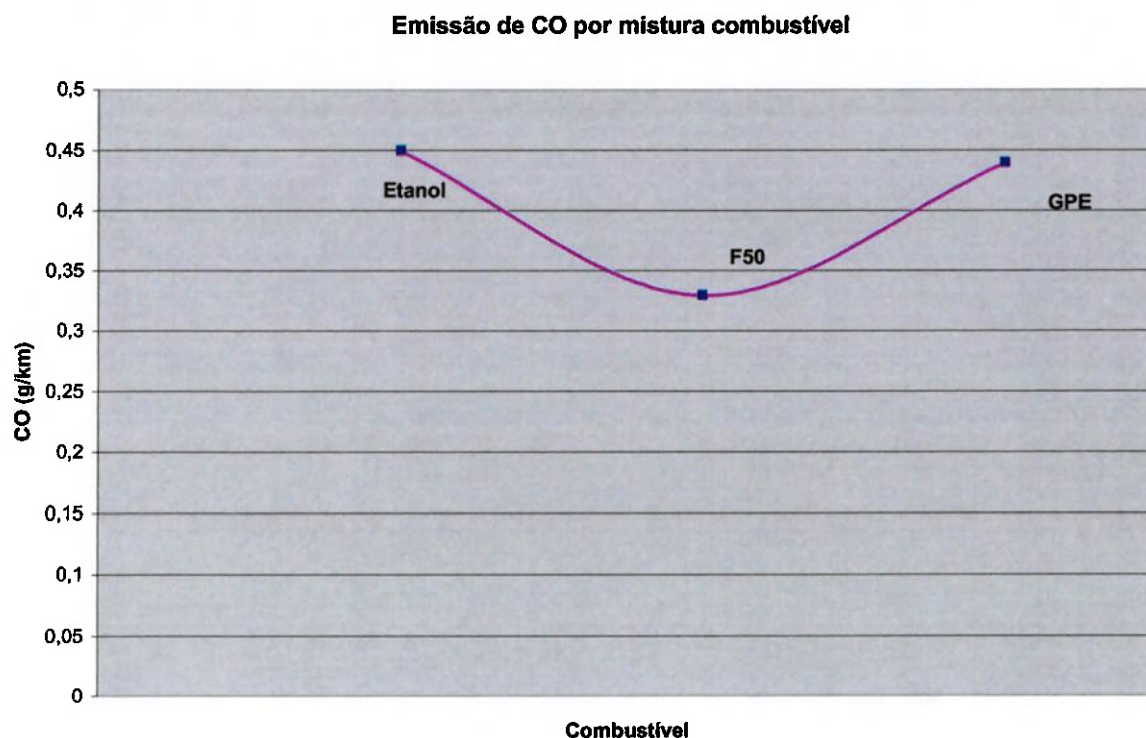


Figura 11. Gráfico de emissão de CO por combustível.

O principal fator que influencia o mecanismo de formação do CO é a fração combustível-ar relativa ϕ . Como o veículo está equipado com o sensor *lambda* e procura garantir que a mistura ar-combustível admitida seja estequiométrica (*closed loop*) não deveria haver diferença entre os valores de emissão para os três combustíveis. Nota-se, porém, um comportamento diferente para o combustível F50 que apresentou níveis de emissão de CO mais baixos que os outros combustíveis (cerca de 25% menor).

Uma hipótese para a explicação da ocorrência destes resultados recai novamente sobre a eficiência não-linear do catalisador de acordo com a composição do combustível.

Outra hipótese para os resultados obtidos é que neste teste outros fatores que não a relação ϕ afetaram a formação de CO.

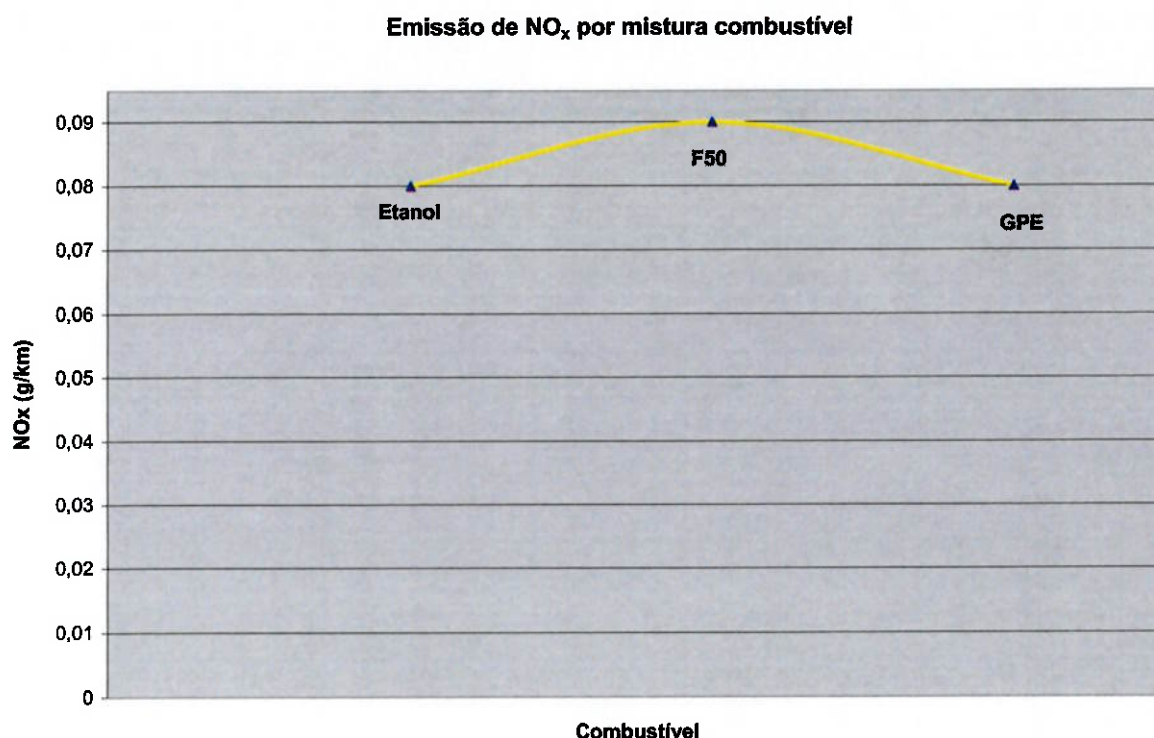


Figura 12. Gráfico de emissão de NO_x por combustível.

Como se pode notar, os valores máximo e mínimo de emissão de NO_x verificados diferem em 12,5%. No entanto, a análise dos valores brutos finais de cada um dos ensaios do ciclo de teste mostra que essa diferença pode ser atribuída ao arredondamento das médias dos valores. Portanto, os valores de emissão de NO_x para cada um dos combustíveis podem ser considerados equivalentes.

Supondo que o comportamento do catalisador fosse constante para as diferentes composições de combustível, era esperado que a taxa de formação de NO_x fosse maior para menores proporções de etanol no combustível, devido às temperaturas mais altas na câmara de combustão para a última composição de combustível citada. Este fato não foi verificado nos resultados de pós-tratamento de gases do escape, o que reforça a justificativa de que o catalisador modifica muito os resultados finais de emissões.

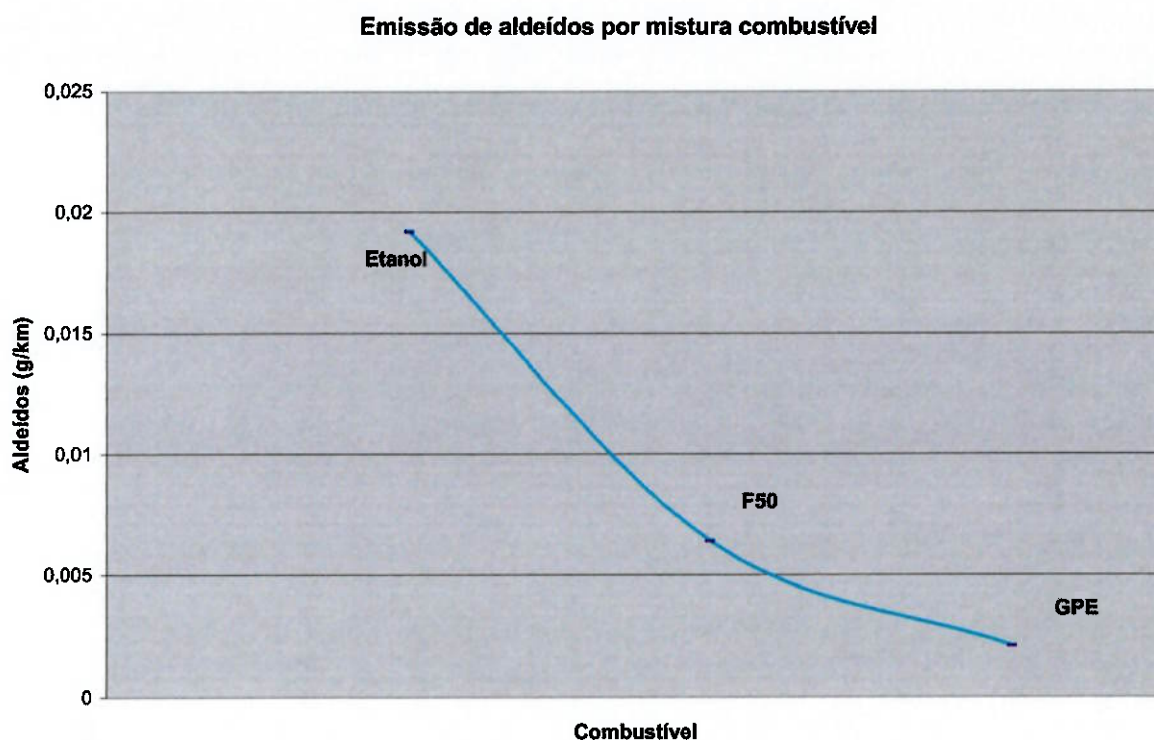


Figura 13. Gráfico de emissão de aldeídos por mistura combustível.

A formação de aldeídos como resultado do processo de combustão é característica do uso de etanol como combustível. Portanto é natural que a quantidade de aldeído produzida seja proporcional à quantidade de etanol presente na composição do combustível utilizado pelo motor. Esse comportamento observado condiz com o resultado esperado porque o catalisador não reage com esse elemento presente nos gases de escape.

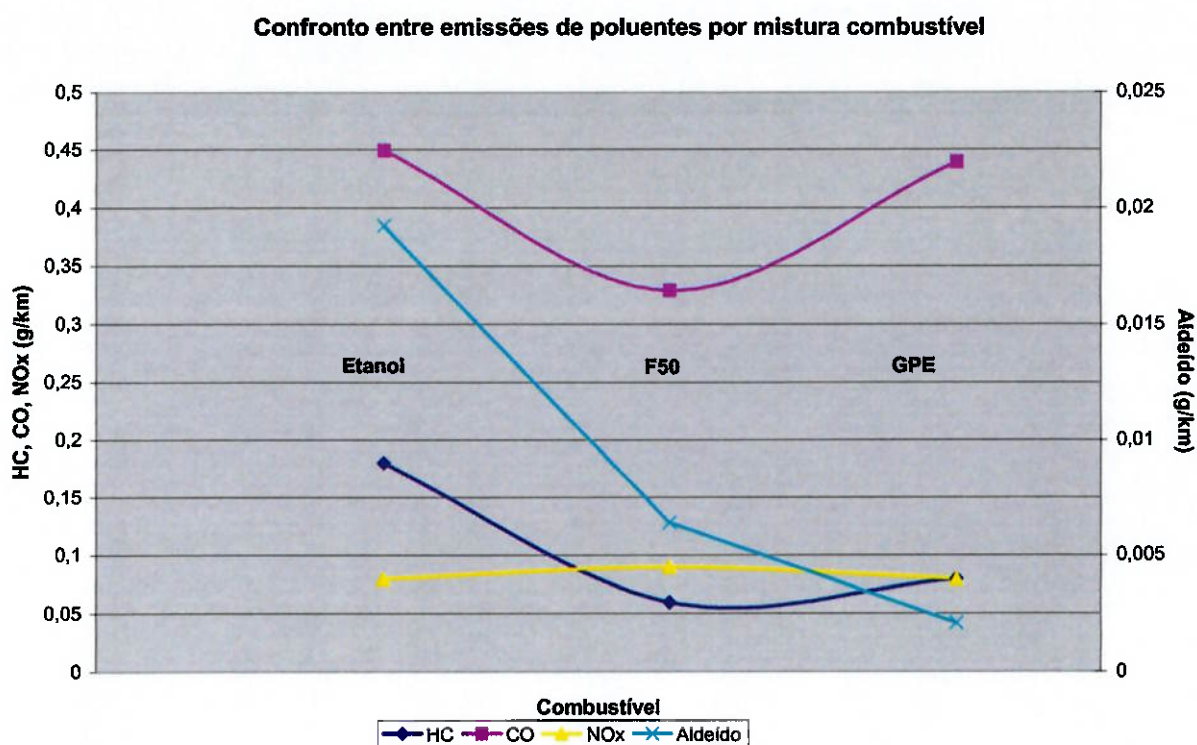


Figura 14. Confronto entre as emissões de poluentes por mistura combustível.

O veículo comporta-se de maneira diferente conforme o combustível utilizado, variando o nível de emissão de cada poluente para o mesmo ciclo de teste. Em geral, não há uma tendência de maiores níveis de emissões de todos os poluentes para uma determinada mistura combustível.

Analisando-se comparativamente as curvas de emissão de poluentes para cada mistura combustível, pode-se concluir que, para este motor, sob o regime de operação imposto pelo regime de teste EPA 75 (altamente transitório) o combustível que apresenta melhor compromisso em relação às emissões totais de poluentes é o F50. A F50 apresentou emissão de NO_x igual aos outros combustíveis; emissão intermediária de aldeídos (poluente pouco tóxico em baixas quantidades como as observadas); e os menores níveis de emissões de HC não-queimados e CO. Este último apresentando 25% de redução em relação aos demais combustíveis.

Essa conclusão pode ser usada tanto por usuários finais na hora da escolha do combustível nos poços de abastecimento como pelos projetistas da montadora para avaliação de fatores que influenciam o comportamento de emissões. Tem-se aqui uma visão realista de que, apesar de todo o embasamento teórico por trás do projeto de motores de combustão interna, o ajuste final no que diz respeito à homologação de

emissões é feito empiricamente, já que não se consegue prever o comportamento de emissões com modelos mais simples utilizados.

12. FASE DE DESENVOLVIMENTO DO MOTOR

Após a primeira homologação do veículo, há a necessidade de prepará-lo e adequá-lo à legislação que entra em vigor no período subsequente. Esse desenvolvimento é feito pelo ajuste de parâmetros como utilização de válvula EGR, remapeamento da ECM, utilização de *closed couple* (dois catalisadores, um deles mais próximo do coletor de escape), e ajuste do posicionamento do sensor *lambda*. O veículo avaliado teve alterado seu mapeamento da ECM, não utilizando válvula EGR nem *closed couple*.

Dessa forma, um teste mais detalhado de emissões de poluentes foi realizado com o objetivo de aperfeiçoar o motor homologado. O modelo do veículo utilizado é o mesmo do teste anterior e indicava 6.939 km rodados. A diferença para o teste de homologação é a massa total do veículo, que foi aumentada para 1531 kg, mais de 150 kg de massa extra em relação ao anterior. Alguns valores de níveis de emissão medidos foram maiores que os obtidos no teste de homologação, em parte explicado devido à maior carga aplicada ao motor (maior massa do veículo).

Para uma abordagem de desenvolvimento do produto, fez-se necessário subdividir os três ciclos principais do teste de emissão EPA 75 (*Cold Transient*, *Cold Stabilized* e *Hot Transient*) em 23 partes, com o objetivo principal de verificar a contribuição de cada uma dessas fases no total das emissões. Desejou-se também avaliar o momento em que a central eletrônica começa a receber informação do sensor *lambda* e começa a atuar em malha fechada (*closed-loop*), e ainda o momento em que o catalisador começa a operar na temperatura ótima. É possível verificar se o catalisador já está operando em condições ideais observando a sua eficiência, ou seja, medindo-se as quantidades de cada poluente no sistema de escape antes e depois do catalisador.

Foram realizados testes com dois combustíveis: com álcool etílico hidratado e com gasolina comum. Os resultados, por cada poluente, estão apresentados nos gráficos a seguir.

Emissões de NO_x (g/km) em cada fase do ciclo EPA-75

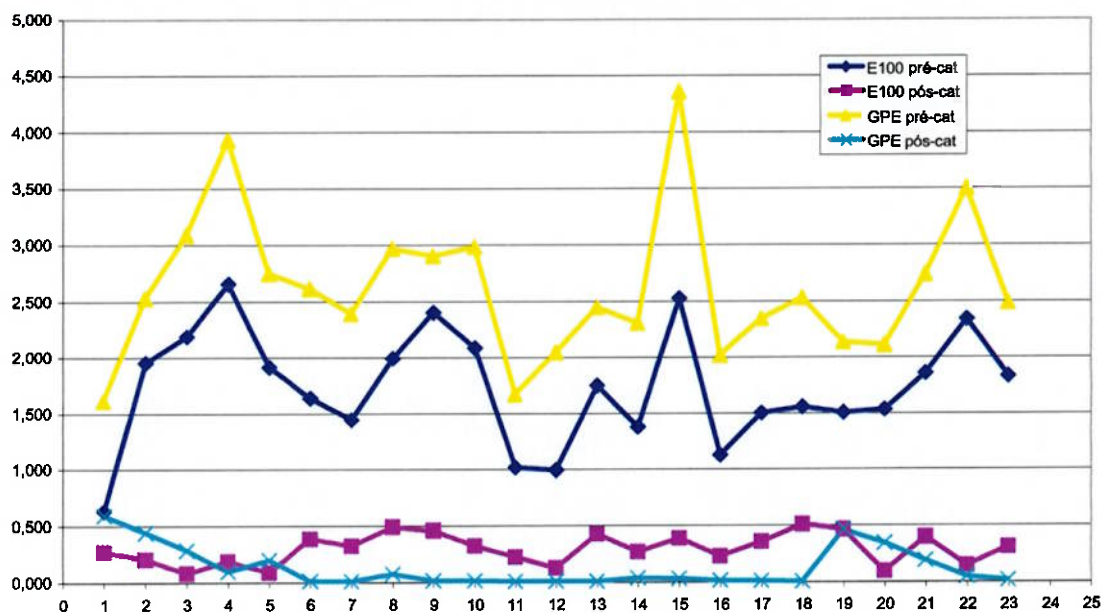


Figura 15. Emissão de NO_x por etapas do ciclo EPA 75.

Em relação às emissões de óxidos de nitrogênio, é nítida a diferença entre os dois combustíveis. Para a gasolina, o total de emissões de NO_x foi de 0,18 g/km, e para o etanol foi de 0,26 g/km. No entanto, na medição feita antes do catalisador a presença de NO_x é em média 52% maior após a queima da gasolina em relação ao etanol. A diferença no resultado final, após o catalisador, indica que a eficiência de redução do NO_x para a gasolina é maior.

Ainda para o NO_x, é possível visualizar que sua eficiência de conversão é menor no início da fase I e da fase III (para a gasolina), que são subsequentes à ignição do veículo. Mas em seguida a eficiência de conversão aumenta e no resultado final sua eficiência global é maior que utilizando-se etanol. Para o etanol, no entanto, a eficiência de redução do NO_x é menor.

Emissões de CO (g/km) em cada fase do ciclo EPA-75

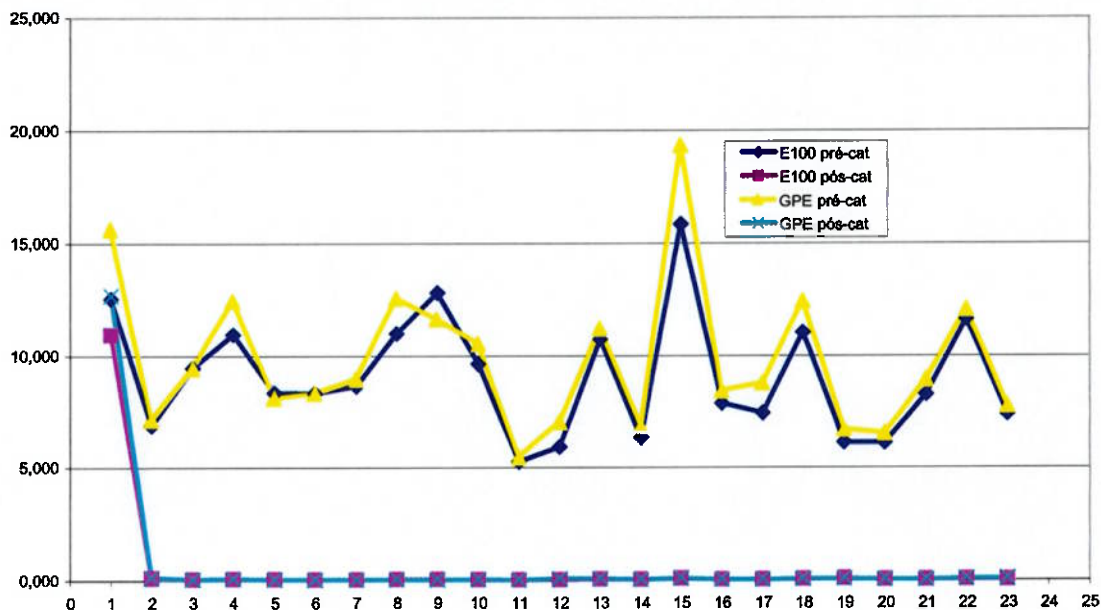


Figura 16. Emissão de CO por etapas do ciclo EPA 75.

Para a oxidação do CO, visualiza-se uma eficiência de conversão próximo a 99,5% durante todo o ciclo, para os dois combustíveis, à exceção no começo, em que o catalisador ainda está trabalhando frio. As curvas de emissões de CO antes do catalisador permitem inferir que a produção de CO para ambos é idêntica ao longo dos ciclos I, II e III. Isto se deve ao fato de o sensor *lambda* estar atuando durante praticamente todo o ciclo de teste. No entanto, apesar de o perfil das curvas pós-catalisador serem equivalentes no gráfico, a produção de CO foi de 0,53 g/km para a gasolina e de 0,36 g/km para o álcool devido ao fato de as curvas estarem um pouco defasadas entre si. Os valores finais de emissão de CO para o etanol melhoraram e para os da gasolina pioraram, em relação ao teste de homologação.

A maior contribuição para o CO ocorreu no ciclo I, por causa do tempo de *light off* do catalisador.

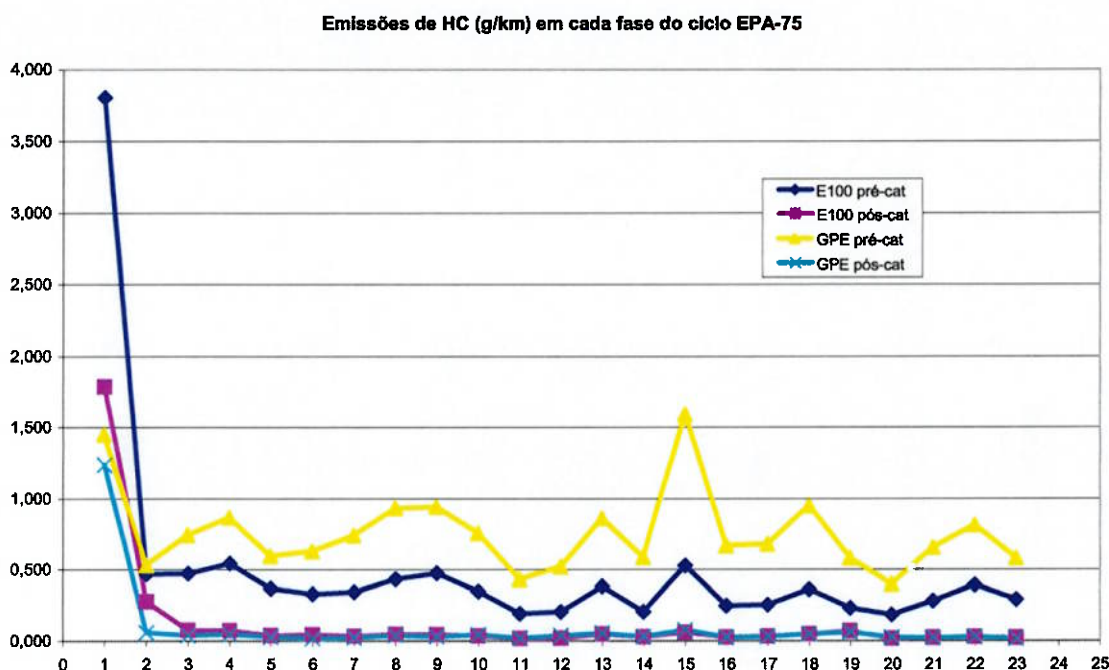


Figura 17. Emissão de HC por etapas do ciclo EPA 75.

Para a conversão dos HC não-queimados originários do processo de combustão não ideal desses combustíveis, verifica-se que o catalisador tem um tempo de resposta um pouco mais demorado no ciclo I. Para o etanol, o resultado final de emissões no ciclo todo foi de 0,17 g/km, enquanto que para a gasolina foi de 0,08 g/km. A melhora nos níveis de emissões aconteceu para o etanol, comparativamente ao resultado do teste de homologação, enquanto os da gasolina mantiveram-se os mesmos. O perfil das curvas da gasolina e do etanol antes do catalisador é semelhante, porém a curva de emissão de HC da gasolina está deslocada com valores maiores. Esse fato condiz com o mecanismo principal de formação de HC que são as altas pressões dentro da câmara de combustão características do uso da gasolina como combustível (ponto de ignição mais avançado a uma mesma taxa de compressão).

O resultado final sugere que a eficiência do catalisador é maior para a gasolina. Mesmo na fase fria (*Cold Transient*) é possível verificar que a gasolina emite menos HC após o conversor catalítico.

Pelos resultados encontrados, conclui-se que para a redução dos níveis de CO e HC, que estão intrinsecamente ligados à fase fria (ciclo 1), é necessário diminuir o tempo de *light off* do conversor catalítico (que é quando o conversor atinge o mínimo de 50% de eficiência) e os tempos de resposta dos sensores.

Como é um teste de desenvolvimento, eventualmente pode-se notar pioras de valores de emissões medidos. A causa dessas diferenças deve-se, por exemplo, a mudanças no mapeamento eletrônico do motor, ajuste da posição e do pré-aquecimento do sensor *lambda* no sistema de escape, posição do catalisador no sistema de escape, como também mudança no modelo do mesmo.

13. CONCLUSÃO

Seguindo a apresentação do embasamento teórico concernente ao processo de combustão e formação de poluentes em motores de combustão interna de ignição por faísca, foram apresentados os resultados dos testes para homologação do veículo com relação a emissões.

A análise desses resultados seguiu por duas abordagens distintas, uma com objetivo de comparar a contribuição de cada etapa do ciclo no total de poluentes emitidos, e a outra com objetivo de definir qual combustível apresenta o melhor compromisso de níveis de emissões de todos os poluentes, respectivamente. Concluiu-se que, para o veículo em estudo, nas condições de operação impostas pelo ciclo de teste EPA 75, a melhor composição de combustível a ser utilizada objetivando-se reduzir os níveis totais de emissões de poluentes é a F50, em proporção de 50% gasolina e 50% etanol em volume. Além disso, nota-se claramente que a fase crítica que mais contribui para emissões de poluentes é a de aquecimento do motor, pós partida, representada pela etapa I do ciclo de teste EPA 75.

Após essa primeira análise, foram realizados testes de desenvolvimento pós-homologação do veículo, que obtiveram tanto resultados positivos quanto negativos em comparação aos resultados obtidos na homologação, devido às modificações implementadas no veículo.

A principal característica observada em relação ao estudo de emissões em motores de combustão interna é a grande complexidade de modelagem teórica dos processos reais de combustão, e conseqüente de formação de poluentes. Interação variáveis diversas, como o tratamento dos gases de escape pelo uso de catalisador e o comportamento do combustível conforme sua proporção gasolina/etanol, ambos fortemente não lineares e que tornam alguns dados levantados difíceis de serem explicados de maneira precisa.

Feitas essas colocações, conclui-se que este trabalho cumpre o objetivo proposto de introduzir o estudo do tema atual de motores bi-combustíveis, abrangendo os principais aspectos relativos às emissões veiculares de poluentes, servindo como base

para futuros trabalhos mais aprofundados sobre o assunto, conforme a tecnologia na área evolua ainda mais.

14. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, Marta Valéria Almeida Santana de et al. *Compostos Carbonílicos Atmosféricos: fontes, reatividade, níveis de concentração e efeitos toxicológicos*. In: *Química Nova*, vol. 25 No. 6B, pp 1117-1131, 2002.
- CHOLLET, H. M. *Mecânicos de Automóveis: o motor e seus acessórios*. São Paulo: Hemus, 1996.
- DE NEVERS. *Air Pollution Control Engineering. Experimental Methods in Engine Research and Development*. Londres-Inglaterra: Institution of Mechanical Engineers, 1998.
- HEYWOOD, John B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. Nova Iorque – EUA: McGraw-Hill, 1988.
- KEATING, Eugene L. *Applied Combustion*. Nova Iorque – EUA: Marcel Dekker, 1993.
- MAXWELL/JONES. *Alternative Fuels: Emissions, Economics, and Performance*. Warrendale-EUA: Society of Automotive Engineers, 1995.
- MILHOR, Carlos Eduardo. *Sistema de Desenvolvimento para Controle Eletrônico dos Motores de Combustão Interna Ciclo Otto*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002.
- PLINT, Michael & MARTYR, Anthony. *Engine Testing: Theory and Practice*. 2nd edition. Oxford-Inglaterra: Butterworth Heinemann, 2001.
- Seminário de Combustíveis – Cenário Atual e Tendências para os Combustíveis Automotivos do Brasil*; AEA, 1996.
- SONNTAG, Richard E.; BORGNAKKE, Claus; VAN WYLEN, Gordon J. *Fundamentos da Termodinâmica*. 5ª.ed. São Paulo: Edgard Blücher LTDA, 2001.
- WARK/WARNER. *Air Pollution its origin and control*.
- YOO, Joon-Ho et al. *A Study of a Fast Light-Off Planar Oxygen Sensor Application for Exhaust Emissions Reduction*. Detroit, Michigan: SAE 2000 World Congress.