

ROGER BRENNO GONÇALVES MACHADO

**ANÁLISE DE EMISSÕES DE POLUENTES EM
MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA USANDO
DIFERENTES MISTURAS ENTRE ETANOL E
GASOLINA**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2017

ROGER BRENNO GONÇALVES MACHADO

**ANÁLISE DE EMISSÕES DE POLUENTES EM MOTORES DE
COMBUSTÃO INTERNA USANDO DIFERENTES MISTURAS ENTRE
ETANOL E GASOLINA**

Trabalho de conclusão de curso a ser apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Mecânica na Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de **ENGENHEIRO MECÂNICO**.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Ana Marta de Souza.

**UBERLÂNDIA
2017**

ROGER BRENNO GONÇALVES MACHADO

**ANÁLISE DE EMISSÕES DE POLUENTES EM MOTORES DE
COMBUSTÃO INTERNA USANDO DIFERENTES MISTURAS ENTRE
ETANOL E GASOLINA**

Trabalho de conclusão de curso a ser
apresentado ao Programa de Graduação
em Engenharia Mecânica na Faculdade
de Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Uberlândia, como requisito
parcial para obtenção do título de
ENGENHEIRO MECÂNICO

Data de aprovação: ____/____/____

Banca Examinadora:

Prof^a. Dr^a. Ana Marta de Souza - Presidente da Banca Examinadora
Universidade Federal de Uberlândia - Orientadora

Prof. Dr. Francisco José de Souza
Universidade Federal de Uberlândia

Msc. Diego Nei Venturi
Universidade Federal de Uberlândia

Dedico este trabalho a Deus, meus pais e minha irmã, que me acompanharam nesta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por me dar a força necessária para alcançar este objetivo honorável com saúde, sabedoria, integridade e a mesma vontade pertinetente de adquirir maiores conhecimentos.

Agradeço ao meus pais que sempre estiveram ao meu lado e me apoiando em minhas escolhas, dando o que fosse necessário para que eu conseguisse vencer todas etapas para concluir este sonho.

Agradeço à minha irmã, a qual sou muito orgulhoso por tudo que vem conseguindo em sua trajetória de vida, por estar caminhando sempre ao meu lado, me ajudando em tudo que preciso.

Aos diversos familiares, tios, padrinhos, primos, avós (que sei que estão em algum lugar iluminando meus caminhos) e conhecidos que torceram para que eu pudesse chegar a este momento.

À Universidade Federal de Uberlândia e a todos os professores que durante este período da minha vida, foi a escada que me levou ao nível de aprendizado que sempre busquei. Tenho orgulho de ter sido submetido ao nível de esforço e dedicação que fui. Logo que estou próximo de seguir com minha trajetória profissional, eu já começo a colher os frutos e observar que posso fazer a diferença com tudo que aprendi nesta instituição.

Um agradecimento especial à minha professora orientadora Ana Marta de Souza, que me deu a oportunidade e o apoio necessário para que eu pudesse desenvolver este trabalho com um tema tão importante para a sociedade. As discussões sobre este tema, reforçando o aprendizado na disciplina de Máquinas Térmicas, valerão muito para as oportunidades que haverão de vir.

Um agradecimento aos técnicos e auxiliares do laboratório que estiveram me ajudando com os testes e apontando as melhores formas para que estes fossem possíveis.

À Arizona State University e Louisiana State University que abriram suas portas para eu adquirir conhecimentos diferentes em uma oportunidade única de intercâmbio, quando tive a oportunidade de viver experiências que ficarão guardadas para sempre em minha memória.

Agradeço à A. W. Faber-Castell e a todo o seu pessoal que me acolheu no momento de estágio, oferecendo a oportunidade de aplicar meus conhecimentos adquiridos durante minha vida acadêmica, como também, a oportunidade de adquirir conhecimentos práticos para desenvolver meu lado profissional.

Obrigado aos meus amigos de vida, da UNIFEB, os broderas da UFU, da Equipe de Baja Cerrado, do apartamento 2014 do Regents on University e de tantas outros lugares que passei durante estes anos. Com certeza, vocês contribuíram muito para que eu pudesse seguir em frente durante estes anos e fizeram total diferença nos momentos que me sentia longe da minha família.

Agradeço também à banca examinadora deste trabalho.

"Tudo o que um sonho precisa para ser realizado é que alguém acredite que ele possa ser realizado".

Roberto Shinyashiki

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo a avaliação nos índices de emissão de poluentes em um motor flex do ciclo Otto, utilizando-se de 3 tipos diferentes de combustíveis. Os poluentes avaliados foram os de limites estipulados pela legislação vigente no país sendo estes o monóxido de carbono e o de hidrocarboneto, e também se avaliou o índice de dióxido de carbono, responsabilizado pelos problemas ligados ao aquecimento global. O trabalho consistiu em avaliar os níveis de emissão um motor da montadora Fiat, modelo Fire Flex 1.0, encontrado na Universidade Federal de Uberlândia com o uso de um analisador de gases denominado PC-Multigás da fabricante Napro. Os testes foram realizados alterando as rotações do motor em alta e baixa, utilizando uma mistura de 50% entre gasolina e etanol, bem como em suas formas mais puras possíveis encontradas no mercado brasileiro. O nível de CO diminuiu ao se acrescentar o etanol à mistura, isso devido a uma queima mais completa do combustível. Porém, o nível de CO₂ aumentou devido à combustão mais desenvolvida. O índice de HC, por sua vez, aumentou quando se analisou a mistura entre etanol e gasolina, ligado à diminuição da temperatura dos gases finais da combustão, importante para a oxidação de boa parte do material remanescente. A partir da proposta do trabalho, observou-se que a variável de maior influência nos testes foi a de rotação, sugerindo que diferentes níveis desta pudessem ser aplicadas em trabalhos futuros.

Palavras-chave: *Combustíveis. Rotação. Monóxido de carbono. Hidrocarbonetos. Dióxido de Carbono.*

ABSTRACT

This study had the objective of evaluating the emission rates of pollutants in a flex engine of the Otto cycle, using 3 different types of fuels. The pollutants evaluated were of those of the limits stipulated by the legislation in force in the country, these being carbon monoxide and hydrocarbons, and the carbon dioxide index, which was responsible for the problems related to global warming. The study consisted in evaluating the emission levels of a Fiat automobile engine, model Fire Flex 1.0, found at the Federal University of Uberlandia with the use of a gas analyzer called PC-Multigas of the manufacturer Napro. The tests were performed by altering the engine rotation in high and low, using a 50% mixture between gasoline and ethanol, and their purest forms possible to be found in the Brazilian market as well. The CO level decreased when ethanol was added to the mixture, due to more complete burning of the fuel. However, the CO₂ level increased due to more developed combustion. HC, on the other hand, increased when the mixture between ethanol and gasoline was analyzed, connected to the decrease in the temperature of the final combustion gases, important for the oxidation of much of the remaining material. From the study proposal, it was observed that the variable with the greatest influence in the tests was the one of rotation, suggesting that different levels of this one could be applied in future studies.

Keywords: *Fuels. Rotation. Carbon monoxide. Hydrocarbons. Carbon dioxide.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Partes do motor de combustão interna.	27
Figura 2.2 – Componentes do motor.	27
Figura 2.3 – Variação da composição dos gases de escape em função da composição da mistura.	43
Figura 2.4 – Catalisador de escape de três vias.	44
Figura 2.5 - Sistema EGR	45
Figura 2.6 – Princípio de um espectrômetro de infravermelho	47
Figura 2.7 – Câmara de detecção do analisador FID.	47
Figura 2.8 – Câmara de detecção de um analisador por quimiluminescência.	48
Figura 2.9 - Fatores médios de emissão de CO de veículos novos	51
Figura 2.10 – Fatores médios de emissão de NOx de veículos novos.	52
Figura 2.11 – Fatores médios de emissões de HC de veículos novos.	52
Figura 3.1 - Bancada com o motor Fire	58
Figura 3.2 – Layout da tela do programa do PC-Multigás	59
Figura 3.3 – Vista frontal do analisador de gás	60
Figura 3.4 – Vista traseira do analisador de gás	60
Figura 3.5 – Tacômetro Instrutherm modelo TD-812	62
Figura 3.6 – Montagem dos equipamentos de teste	63
Figura 3.7 – Posicionamento do tacômetro para coletas de dados.	64
Figura 3.8 – Posicionamento da manopla contendo a sonda coletora de gases	65
Figura 3.9 – Dados sendo apresentados pelo analisador de gases.	66
Figura 3.10 – Diagrama do procedimento	67
Figura 4.1 – Comparação das temperaturas dos gases de escapes de diferentes combustíveis	78
Figura 4.2 – Programa do analisador de gás apontando o sensor de oxigênio comprometido.	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Condições de testes para a medição do número de Octanos	36
Tabela 2.2 – Comparação das propriedades da gasolina e etanol	39
Tabela 2.3 – Limites de emissões para veículos leves	53
Tabela 2.4 – Limites de CO (%)	54
Tabela 2.5 – Limites de HC (ppm de hexano)	54
Tabela 3.1 – Planilha para preenchimento de dados da emissão de cada um dos poluentes.....	69

LISTA DE GRÁFICOS

Gráficos 4.1 e 4.2 - Efeitos principais e interações para CO	70
Gráficos 4.3 e 4.4 – Efeitos principais e interações para CO ₂	71
Gráficos 4.5 e 4.6 – Efeitos principais e interações para HC	71
Gráfico 4.7 – Resultado de emissões de CO	73
Gráfico 4.8 – Resultado de emissões de CO ₂	74
Gráfico 4.9 – Resultado de emissões de HC.....	76
Gráficos A1, A2 e A3 – Dados coletados dos poluentes para o uso de gasolina e em baixa rotação.....	90
Gráficos B1, B2 e B3 – Dados coletados dos poluentes para o uso de gasolina e em alta rotação.....	91
Gráficos C1, C2 e C3 – Dados coletados dos poluentes para o uso de mistura e-g e em baixa rotação	92
Gráficos D1, D2 e D3 – Dados coletados dos poluentes para o uso da mistura e-g e alta rotação.....	93
Gráficos E1, E2 e E3 – Dados coletados dos poluentes no uso de etanol e baixa rotação	94
Gráficos G1, G2 e G3 – Dados coletados dos poluentes no uso de etanol e alta rotação	95
Gráficos H1, H2 e H3 – Comparação tempo a tempo das médias dos poluentes para cada combustível	96
Gráficos I1, I2 e I3 – Comparação tempo a tempo das médias dos poluentes para cada combustível	97

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

API	Instituto Americano do Petróleo (American Petroleum Institute)
CIMA	Conselho Interministerial Do Açúcar E Do Alcool
EGR	Sistema de Recirculação dos Gases de Escape (do inglês: Exhaust Gas Recirculation)
ECU	Central Eletrônica do Motor (do inglês: Engine Control Unit)
FID	Detecção de Íons da Queima (do inglês: Flame Ionization Detection)
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
MON	Número de Octanos Obtidos por Teste no Motor (do inglês: Motor Octane Number)
NDIR	Raios Infravermelhos Não Dispersivos (do inglês: Non-Dispersive Infrared)
OICA	Organização Mundial da Indústria Automobilística (do francês: Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles)
RON	Número de Octanos Obtidos por Pesquisa (do inglês: Research Octane Number)
UNEA	Assembléia Ambiental das Nações Unidas (do inglês: United Nations Environment Assembly)
VTEC	Sistema de Comando de Válvula Variável (do inglês: Variable Valve Timing and Lift Electronic Control)
aPMS	Antes do Ponto Superior
C	Carbono
CHO	Aldeídos
CO	Monóxido de Carbono
COc	Monóxido de Carbono Corrigido

CO ₂	Dióxido de Carbono
E	Eficiência (de um motor térmico na ocasião)
H	Hidrogênio
HC	Hidrocarbonetos (não queimados)
HCC	Hidrocarbonetos corrigidos
HZ	Hertz
H ₂ O	Água Como Substância Química
H ₂ SO ₄	Ácido Sulfúrico
MP	Material Particulado
N ₂	Nitrogênio
NO _x	Composição de aproximadamente 90% de NO e 10% de NO ₂
NO	Óxido de Nitrogênio
NO ₂	Dióxido de Nitrogênio
O	Oxigênio
ppm	Partes Por Milhão
RPM	Rotações Por Minuto
S	segundos
THC	Hidrocarbonetos Totais (do inglês: Total Hydrocarbons)
T ₁	Maior Temperatura
T ₂	Menor Temperatura
V	Volts

<i>esteq</i>	Estequiométrica
Kgfm	Unidade de Torque
λ	Coeficiente de Excesso de Ar
ϕ	Coeficiente da Riqueza da Mistura
m_{ar}	Massa de Ar
m_{comb}	Massa de Combustível
°C	Graus Celsius
°F	Graus Farenheit
in	polegadas
mm	milímetros
%	Porcentagem
Nº	número
g mol ⁻¹	massa molar
g/km	Gramas por Quilômetro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1	MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA.....	21
2.2	MOTORES DO CICLO OTTO	24
2.2.1	<i>Etapas do processo de combustão</i>	<i>24</i>
2.2.2	<i>Componentes dos motores Otto.....</i>	<i>26</i>
2.2.3	<i>Sistemas auxiliares.....</i>	<i>28</i>
2.2.4	<i>Sistema de lubrificação</i>	<i>30</i>
2.2.5	<i>Sistema de arrefecimento.....</i>	<i>30</i>
2.2.6	<i>Sistema elétrico e de ignição.....</i>	<i>31</i>
2.2.7	<i>Sistema de instrumentação</i>	<i>31</i>
2.3	COMBUSTÍVEIS.....	33
2.3.1	<i>Conceito de mistura rica e pobre.....</i>	<i>34</i>
2.3.2	<i>Ponto calorífico superior e inferior.....</i>	<i>34</i>
2.3.3	<i>Índices de octanos.....</i>	<i>35</i>
2.3.4	<i>Estrutura dos combustíveis</i>	<i>36</i>
2.4	POLUENTES	40
2.4.1	<i>Tratamento de poluentes.....</i>	<i>43</i>
2.4.2	<i>Medição de poluentes</i>	<i>45</i>
2.5	PROGRAMAS DE CONTROLE DA POLUIÇÃO DO AR	48
3	MATERIAIS E MÉTODOS	56
3.1	LOCAL DOS TESTES	56
3.2	MOTOR ESTUDADO	57
3.3	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS PARA COLETA DOS DADOS	58
3.3.1	<i>Analisador de gases.....</i>	<i>59</i>
3.3.2	<i>Tacômetro</i>	<i>61</i>
3.4	METODOLOGIA.....	62
3.5	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	66
4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	70

4.1 EMISSÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO - CO	72
4.2 EMISSÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO - CO ₂	74
4.3 EMISSÃO DE HIDROCARBONETOS – HC	75
4.4 FONTES DE INCERTEZA QUANTO À PRECISÃO DOS RESULTADOS	79
5 CONCLUSÃO	82
REFERÊNCIAS.....	85
APÊNDICE A – DADO COLETADOS NO USO DE GASOLINA EM BAIXA ROTAÇÃO	90
APÊNDICE B – DADOS COLETADOS NO USO DE GASOLINA EM ALTA ROTAÇÃO	91
APÊNDICE C – DADOS COLETADOS NO USO DA MISTURA ETANOL- GASOLINA EM BAIXA ROTAÇÃO	92
APÊNDICE D – DADOS COLETADOS NO USO DA MISTURA ETANOL- GASOLINA EM ALTA ROTAÇÃO	93
APÊNDICE E – DADOS COLETADOS NO USO DE ETANOL EM BAIXA ROTAÇÃO	94
APÊNDICE F – DADOS COLETADOS NO USO DE ETANOL EM ALTA ROTAÇÃO	95
APÊNDICE H – COMPARAÇÃO DAS MÉDIAS TEMPO A TEMPO NO USO DOS COMBUSTÍVEIS EM BAIXA ROTAÇÃO.....	96
APÊNDICE I – COMPARAÇÃO DAS MÉDIAS TEMPO A TEMPO NO USO DOS COMBUSTÍVEIS EM ALTA ROTAÇÃO	97

1 INTRODUÇÃO

Os problemas relacionados às emissões de poluentes para a atmosfera vêm sendo reconhecidos e controlados por diversas legislações pelo mundo há alguns anos. As consequências em torno dos altos índices de poluição são ligadas aos eventos de degradação do meio ambiente e de complicações na saúde da sociedade. Não diferente de qualquer emissor, a frota de veículos tem sido cada vez mais observada e regulada nas questões ambientais, devido sua alta disparidade em crescimento.

A OICA (Organização Mundial da Indústria Automobilística) divulga uma estatística de que cerca de 95 milhões de carros (de passeio e comerciais) foram produzidos no mundo no ano de 2016. No Brasil, a produção foi de cerca de 2,15 milhões, estando entre as dez maiores produções no ano (OICA, 2017). O Inventário de Emissões por Veículos Rodoviários (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2013) aponta que cerca de 49 milhões de veículos constituíram a frota nacional em 2012 (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2013).

Acerca dos problemas relacionados à grande frota de veículos existente, existe o de que, para desempenhar sua principal função, um motor precisa obter energia de um combustível, e ambos (motor e combustível) vêm passando por um processo evolutivo em seus projetos. Os projetos destes, podem ainda, estar longe de sua forma ideal, apresentando falhas que estão sempre ligadas aos seus respectivos rendimentos.

O relatório da UNEA (Assembleia Ambiental das Nações Unidas) diz que, se fossem adotados padrões nos combustíveis e projetos automobilísticos, a frota de transporte seria capaz de reduzir cerca de 90% de sua contribuição na emissão de poluentes (UNEA, 2016).

Os motores de combustão interna utilizados nos automóveis geram a energia mecânica através da combustão de combustíveis tais como etanol, gasolina, gás natural ou outros. O projeto de um motor flex, que ganhou grande número das preferências dos brasileiros, trouxe a comodidade de deixar opcional o uso da gasolina e/ou etanol.

Em 2012, 57% dos veículos utilizavam a tecnologia flex, 40% eram motores energizados somente pela gasolina e 3% eram para uso do etanol no Brasil, como é reportado no inventário do Ministério do Meio Ambiente (2013).

Relacionados a estes combustíveis, está a parcela de culpa dos automóveis em emitir produtos resultantes da combustão para a atmosfera, tais como: monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrocarbonetos não queimados, óxidos e dióxidos de nitrogênio, particulados, aldeídos e outros.

O governo nacional acabou criando, através dos programas PROCONVE (Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores) e PROMOT (Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares), estratégias de registro e estabelecimento de limites da emissão dos poluentes mais emitidos pelos veículos automotores, nocivos à saúde humana e ao meio ambiente. Os programas abordam de forma direta a vida de um veículo desde a sua concepção em um projeto até o descarte do mesmo.

A Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente 418/2009 (CONAMA, 2009) estabelece limites da emissão de monóxido de carbono e hidrocarbonetos para grupos de veículos fabricados em diferentes anos, usando diferentes tipos de combustíveis. Esta também, apresenta padrões para serem seguidos em procedimentos de análises de gases poluentes para eventual aprovação ou não de um veículo.

Desde que limites destes elementos poluentes foram estabelecidos, as montadoras foram obrigadas a criar projetos que reduzissem seus valores. Fatores responsáveis pela queda brusca da emissão de poluentes durante os anos finais da década de 80 e começo de 2000 se deve à implantação dos catalisadores para o tratamento dos gases e sistemas de injeção controlada eletronicamente (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2013).

Outros elementos poluentes da combustão, apesar de não ter ainda uma legislação que estabelece o seu índice de emissão, também são temas de projetos de leis para o devido controle, podendo citar o dióxido de carbono que vem tendo seus limites para serem divulgados e poderá influenciar bastante nos projetos de motores automotivos.

Saber qual combustível apresenta o melhor comportamento perante às emissões destes já citados e de outros elementos é de grande valia para concentrar foco em determinados projetos de aprimoramento dos motores. Para isso ser possível, é preciso de um estudo bem detalhado, utilizando de técnicas eficazes e simulando situações reais da utilização de um veículo.

A motivação deste trabalho foi de aprofundar no conhecimento das emissões de um motor de combustão interna, verificando os índices de cada um dos poluentes que tem seus limites estipulados na legislação brasileira (monóxido de carbono e hidrocarbonetos), além daquele que é hoje considerado o maior responsável pela degradação do meio ambiente através do efeito estufa, o dióxido de carbono. Para isso, se utilizou de variáveis mais usuais de serem encontradas nos veículos brasileiros, sendo: os combustíveis etanol, gasolina ou a mistura entre eles, em marcha lenta ou acelerado.

O trabalho foi estruturado de forma a informar o leitor sobre a importância do tema. A introdução, motivação e objetivos dos estudos se encontram no capítulo 1. No capítulo 2 é apresentada uma revisão sobre o tema, apresentando todo o conteúdo necessário para se discutir os resultados finais, sendo: motores de ciclo Otto com seus componentes e princípios de funcionamento, combustíveis, poluentes e legislações vigentes sobre estes. No capítulo 3 irão ser apresentados a metodologia e equipamentos usados para se obter os dados necessários para a análise. Gráficos para visualização do comportamento das emissões do motor, uma discussão aliada à literatura de cada elemento poluente e fontes de erros, podem ser vistos no capítulo 4. No capítulo 5 se encontra a conclusão e sugestões de estudos enquadrados no tema aqui desenvolvido. No fim do trabalho se encontram as referências utilizadas e apêndices com os dados coletados.

Este trabalho tem os seguintes objetivos específicos:

- Coletar os dados das medições de gases emitidos pelo escapamento de um motor Otto de tecnologia flex;
- Analisar o comportamento dos gráficos construídos a partir dos resultados;
- Discutir e aliar a prática com a teoria.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Motor de Combustão Interna

Os motores de combustão interna, usados especificamente na indústria automobilística, estão definidos dentro do grupo de máquinas térmicas, segundo relata Martins (2006). Para Martins (2006), máquinas térmicas obtêm energia mecânica através da energia térmica fornecida pela combustão de uma mistura combustível comburente (combustível+ar). No caso de automóveis, o motor de combustão interna produz a energia mecânica necessária para colocar o carro em movimento queimando uma mistura entre o ar e um combustível líquido (gasolina, etanol, metanol ou outros), ou um combustível gasoso (gás natural veicular).

O francês Nicolas Léonard Sadi Carnot, físico e desenvolvedor dos fundamentos da segunda lei da termodinâmica, observou que a eficiência de um motor térmico dependia da diferença entre a maior e menor temperatura alcançada em um ciclo (BRAESS; SEIFFERT, 2005). A Eq. (2.1) descreve esta lei:

$$E = \frac{(T_1 - T_2)}{T_1} \quad (2.1)$$

Carnot comprovou sua concepção com um ciclo teórico termodinâmico conhecido como Ciclo de Carnot, onde o processo termodinâmico, depois de vários estágios, voltava em seu estado inicial.

Nicolas L. Sadi Carnot, analisando a eficiência de motores reais, acreditou que nenhum motor poderia converter todo o calor a ele fornecido em trabalho mecânico (BRAESS; SEIFFERT, 2005).

Braess e Seiffert (2005) explica que motores de combustão interna não são 100% eficientes, e algumas razões para isso, baseado nos estudos de Carnot, é de que:

- O fluido de trabalho não irá completar um ciclo, pois a mistura de admissão irá se transformar em gases de escape e liberada para a atmosfera;

- Não há troca de calor entre dois reservatórios térmicos;
- A eficiência máxima do motor nem sempre coincide com a temperatura máxima.

O motor de ciclo Otto foi inventado por Nicolaus August Otto em 1876, quando colocou em funcionamento um motor de ignição interna de quatro tempos em uma fábrica na Alemanha. Atualmente, a aprimoração deste tipo de motor é a mais utilizada no mundo. Por vez, em 1893, Rudolf Diesel criou o motor diesel que também tem grande utilização nos tempos atuais (BRAESS; SEIFFERT, 2005).

Ao longo dos anos, as construções dos motores sofreram modificações desde os primeiros que surgiram, adequando às necessidades requeridas pelos seus usuários. De acordo com Braess e Seiffert (2005), os requisitos para um motor são:

- o ótimo desempenho;
- boa economia de combustível;
- baixa emissão de poluentes;
- níveis de ruídos baixo;
- fácil partida a frio;
- manutenção barata;
- durabilidade aceitável;
- baixo peso e tamanho;
- economia em sua manufatura.

Segundo Martins (2006), os motores de combustão interna podem ser classificados dentro de grupos de diferentes características. Como exemplo, pode-se citar algumas das classificações quanto ao:

- Ciclo de Operação: Otto, Diesel, Miller e etc;
- Combustível usado: gasolina, diesel, gás (GLP ou natural), oxigenados (etanol, metanol) e outros;
- Admissão de ar: naturalmente aspirado ou sobrealimentado;

- Geometria: cilindros em linha, opostos, em V e outras variações;
- Disposição das válvulas: laterais, à cabeça e rotativas.

Martins (2006) cita que os motores de ciclo Otto necessitam de uma centelha gerada por um sistema elétrico (vela elétrica) para a ignição de uma mistura de ar e combustível de alto valor de octanagem (resistência em entrar em ignição) como gasolina, etanol, gás liquefeito do petróleo ou gás natural. Já os motores do ciclo Diesel têm sua ignição iniciada no encontro do ar comprimido dentro da câmara de combustão e o combustível (Diesel) injetado em alta pressão.

Algumas nomenclaturas relacionadas aos motores, citadas por Braess e Seiffert (2005) como importantes para esclarecer parte do seu princípio de funcionamento, serão vistos ao longo deste trabalho, tornando assim, indispensável as suas descrições. Entre elas estão:

- Ponto morto superior (PMS): ponto mais alto que o pistão pode atingir dentro do cilindro;
- Ponto morto inferior (PMI): ponto mais baixo alcançado pelo pistão;
- Curso: distância percorrida pelo pistão entre o PMI e PMS;
- Cilindrada: A soma dos volumes correspondente ao curso do pistão e a área do diâmetro de cada cilindro do motor;
- Câmara de combustão: espaço entre a cabeça do pistão no PMS e o cabeçote do cilindro, onde o volume comprimido da mistura entra em combustão. Segundo Brunetti (1989), a geometria da câmara de combustão influi diretamente no rendimento da combustão. Fatores como o posicionamento da vela, altura, paredes, posição das válvulas e outros são importantes de serem considerados no projeto da câmara para evitarem problemas como “detonação”, queima incompleta e outros.
- Taxa de compressão: divisão entre o volume total da câmara (acima do PMI) e o volume da câmara de combustão (acima do PMS).

O presente trabalho levou em consideração apenas os motores de ciclo Otto, pois estes são objetos de estudo em questão de suas emissões de poluentes.

2.2 Motores do Ciclo Otto

2.2.1 Etapas do processo de combustão

Um ciclo é um conjunto de etapas para que o motor desempenhe seu papel de gerar energia mecânica aos outros componentes, como relata Martins (2006). No ciclo Otto, algumas das formas de realizar o processo de combustão e fornecer potência são usualmente realizadas em duas ou quatro etapas.

Nos motores que usam quatro etapas (ou tempos), estas podem ser identificadas como as de admissão, compressão, expansão e exaustão. Em motores Otto, como já mencionado, no tempo de admissão, uma mistura de combustível e ar é requerida entrar na câmara de combustão em certa proporção ideal para haver a combustão.

Brunetti (1989) explica que essa admissão é devida à uma pressão negativa criada pelo pistão quando este está indo para o ponto máximo inferior da câmara, permitindo a entrada de ar (ou uma mistura ar e combustível em sistemas de admissão com carburador) e a injeção do combustível (em motores com injeção eletrônica).

Ainda conforme Brunetti (1989), no tempo de compressão, o pistão sobe do ponto inferior da câmara até um ponto máximo superior e a mistura é comprimida (seguindo uma razão de compressão determinada em projeto), tendo sua temperatura e pressão elevada para um ponto ideal para que haja a combustão. Atingido tal estado, uma centelha proveniente de uma vela elétrica é gerada para a iniciação do processo de combustão, requerendo alguns fatores para que seja de forma mais completa possível (evitando até alguns dos poluentes).

A próxima etapa é a de expansão, onde o trabalho produzido nela deve ser maior do que o trabalho requerido para a admissão e compressão da mistura, caso não, o motor não funcionará (MARTINS, 2006). Nesta etapa, os gases provenientes da combustão empurram o pistão para o ponto máximo inferior por ocupar um volume maior, fornecendo trabalho ao conjunto pistão e biela, e conseqüentemente, desenvolvendo uma determinada potência ao longo do tempo que isto ocorrer. De

acordo com Brunetti (1989), o momento do acontecimento da ignição da mistura irá influenciar de forma direta na potência obtida do motor e até mesmo na quantidade de resíduos gerados por este. O atraso ou avanço da liberação da centelha em demasia pode ocasionar indesejáveis consequências para o motor como o fenômeno de detonação, pré-ignição e outros. Nos projetos mais modernos de motores, sistemas eletrônicos são usados para variar o momento da ignição em diferentes situações.

Uma vez que o processo de expansão é terminado, os gases da mistura queimada e seus resíduos são empurrados para fora do cilindro pelo pistão e seguem o caminho que os leva aos elementos de tratamento de resíduos e ruídos (BRUNETTI, 2012).

Os denominados motores de dois tempos completam um ciclo quando o eixo gira apenas 360 graus em vez dos 720 graus utilizados pelo de 4 tempos, ou seja, irá haver um processo de combustão a cada revolução do eixo (R. STONE; J.K. BALL, 2004). Richard Stone e Jeffrey K. Ball (2004) explicam que o processo de admissão e exaustão dos gases é facilitado por um sistema de janela de lavagem que permite que, ao mesmo tempo em que a admissão é realizada, os gases da mistura queimada são lançados para a fora do cilindro, e no tempo de expansão gerada pela ignição do combustível, a mistura já seja pré-comprimida.

Ainda através das explicações de Richard Stone e Jeffrey K. Ball (2004), motores dois tempos apresentam vantagens em relação ao de quatro tempos, como, desempenhar um fluxo constante de potência em altas rotações, ser mais simples, leve e barato. Entretanto, suas desvantagens, como maior consumo (combustível é liberado para atmosfera sem ser queimado devido ao processo de janela de limpeza), lubrificação do pistão feita com a adição de óleo no combustível aumentando a emissão de poluente e maior aquecimento, restringem seu uso em determinadas aplicações. Sua aplicação é encontrada em grandes navios, moedores, geradores, cortadores de grama, aeromodelos, motos e projetos mais antigos de automóveis.

2.2.2 Componentes dos motores Otto

A resistência da estrutura de um motor é importante para suportar elevadas pressões e velocidades a que este será submetido (MARTINS, 2006). Martins (2006) divide a estrutura de um motor em três partes, sendo:

- **Cárter:** parte inferior de um motor que tem a função de armazenar e arrefecer o óleo que circula lubrificando os componentes móveis, diminuindo o atrito. São encontrados feitos de materiais que apresentam boa resistência ao choque como o aço estampado, mas podem ser fundidos em alumínio. Por vezes, apresentam aletas para intensificar a transferência de calor entre o óleo e exterior.
- **Cabeçote ou culaça:** é a parte superior do motor onde ficam situadas as sedes onde são montadas as válvulas do motor e os apoios das árvores de cames e das velas. Podem ser feitos em ligas de alumínio (mais leves e de boa condutibilidade térmica) ou encontrados em ferro fundido nos projetos mais antigos.
- **Bloco:** encontrado entre o cárter e o cabeçote, contem cavidades cilíndricas onde os pistões trabalham. Nos projetos mais antigos era empregado o ferro fundido por ser resistente, mais barato e fácil de trabalhar. Hoje, o alumínio é o material mais usado por ser mais leve e oferecer melhor transferência de calor.

As Figura 2.1 e 2.2 apresentam ilustrações de um motor com estas partes bem definidas.

Ainda segundo Martins (2006), outros componentes importantes constituintes de um motor são:

- **Biela:** fixadas por bronzinas entre o pistão e o virabrequim, tem a função de transmitir o movimento do primeiro (retilíneo) para o segundo (de rotação). São encontras feitas de aço de alta resistência, ligas de alumínio ou titânio.

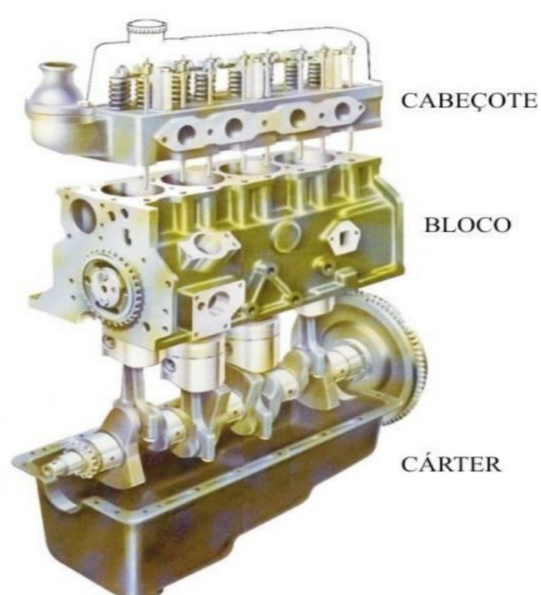


Figura 2.1 – Partes do motor de combustão interna.
Fonte: VARELLA (2016)

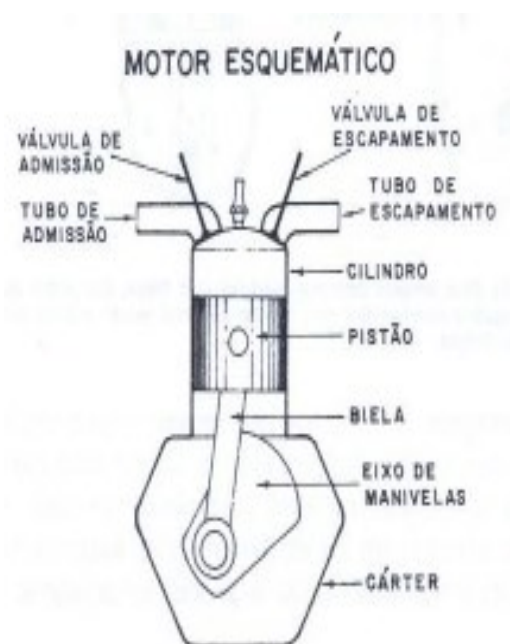


Figura 2.2 – Componentes do motor.
Fonte: FORMAÇÃOPILOTO (2014)

- Pistão: tem como função receber a pressão dos gases e transmitir ao sistema biela-manivela, assegurar a estanqueidade da câmara de combustão, dissipar calor recebido da combustão, moldar-se perfeitamente ao cilindro em meio às variações de temperaturas e servir de guia à biela. Os produzidos a partir de ligas de alumínio foram empregados em substituição aos de ferro fundidos

por apresentarem menor densidade (necessário para o aumento de velocidade deste) e boa condutibilidade térmica.

- Eixo virabrequim ou eixo de manivelas: transmite a potência recebida através das manivelas do motor para um volante de inércia, como também, comanda os sistemas de distribuição, ignição, injeção, refrigeração e lubrificação através de engrenagens, correntes ou sensores eletrônicos de posição. Encontra-se apoiada por casquilhos no bloco do motor.
- Volante: armazena a energia recebida e fornece impulsos para manter o motor funcionando entre os tempos que não gera energia (admissão, compressão e escape), suavizando o funcionamento do motor.
- Eixo comando de válvulas ou árvore de cames: controla a abertura e fechamento das válvulas a partir do sincronismo com o eixo virabrequim para que não ocorra erro de tempo. Sua velocidade é a da metade da velocidade do virabrequim. O conjunto do eixo com tucho, haste e balancim, abre as válvulas no momento adequado.
- Válvula: responsável pela entrada e saída de gases da câmara de combustão. Podem ser encontrados mais do que duas válvulas por cilindro, sendo algumas para a entrada da mistura na câmara de combustão e outras para a saída dos gases de escape de dentro do cilindro.

Outros componentes importantes para o funcionamento do motor poderiam ser detalhados neste trabalho, porém concentra-se estudos naqueles que possam ser mais relevantes para o desenvolvimento do nosso tema.

2.2.3 Sistemas auxiliares

Os sistemas auxiliares são aqueles que permitem o adequado funcionamento do motor, cumprindo a função de controlar diversos parâmetros da combustão (BRAESS; SEIFFERT, 2005). Descreve-se aqui os seguintes sistemas.

2.2.3.1 Sistemas de admissão da mistura Ar-combustível

Representada por duas linhas que permitem a entrada de ar e combustível até que essa se misture (no coletor ou carburador) em uma relação próxima da estequiométrica e entre no cilindro. A admissão de ar pode ser feita naturalmente ou forçada (uso de turbinas ou compressores mecânicos com a função de colocar mais ar dentro da câmara e permitir maior potência), mas em ambos os casos o ar deverá passar por um elemento filtrante para a retenção de partículas, e então, chegar ao ponto de se misturar com o combustível (BRAESS; SEIFFERT, 2005).

A linha de combustível é composta pelo reservatório, bomba, filtro e mangueiras que conduzirão ao elemento que fará a mistura. Brunetti (1989) relata que um sistema com carburador tem a vantagem de ser barato, de fácil manutenção e útil em diferentes motores. Brunetti (2012) explica que o carburador é constituído por um conjunto de vários componentes que controla a quantidade de combustível através do uso de um Venturi por onde passa o ar. O ar, ao vir de sua linha, encontra com uma restrição (válvula borboleta) controlada exclusivamente pelo pedal do motorista, e através de sua vazão, é adicionado o combustível em uma relação próxima à estequiométrica. O carburador já foi utilizado em vários projetos mais antigos, porém foi encontrado insuficiência de precisão na relação da mistura, como quando submetido a diferentes altitudes da usada para projeto, sendo que este fosse desconsiderado nos projetos mais atuais (BRAESS; SEIFFERT, 2005).

A injeção direta ou indireta tem a função de minimizar as desvantagens do sistema de carburador em relação à precisão da mistura, além de proporcionar menor consumo, melhor dirigibilidade, controle automático para variações de rotação e melhor controle de poluentes (BRUNETTI, 2012). Os primeiros sistemas de injeções foram mecânicos e os mais atuais são elétricos, os quais proporcionam maior controle do sistema. O método indireto de injeção pulveriza o combustível em um coletor de admissão (onde se mistura o ar) e é o mais encontrado montados nos veículos dos dias atuais. O sistema direto de injeção de combustível pulveriza o combustível diretamente na câmara de combustão e é um grande aliado no uso de recursos que aumentam a eficiência da combustão, como um turbo compressor. Sua utilização começou a ser empregada em motores de ciclo Otto graças aos avanços tecnológicos que visaram a necessidade de reduzir o consumo e emissões, com ganho de potência. O grande aliado à essa aplicação é a injeção eletrônica

comandada através de uma central que recebe sinais de diversos parâmetros de funcionamento do motor.

2.2.4 Sistema de lubrificação

Este sistema é importante para se evitar a redução da eficiência do motor através das perdas mecânicas pelo atrito entre superfícies em movimento. O sistema deve lubrificar elementos, tais como: apoios do virabrequim, moentes das bielas, cilindros, pistões, apoio de árvore de cames, cames e impulsos, comando de válvulas e outros componentes diversos (MARTINS, 2006).

Uma bomba interligada ao eixo virabrequim é o meio mais utilizado para se fazer a circulação do óleo armazenado no cárter do motor, destacando também o uso de um filtro para reter as partículas indesejáveis.

2.2.5 Sistema de arrefecimento

Uma vez que a temperatura dentro da câmara pode atingir altas temperaturas, o motor precisa ter sua temperatura de trabalho controlada para não atingir aquelas que podem trazer danos aos seus componentes. Vários dos componentes utilizados na montagem do motor não são feitos de materiais que não permitem condições de trabalho em temperaturas extremas.

Para que haja controle da temperatura é necessária a troca da temperatura dos componentes do motor com algum meio com temperaturas mais baixas. Martins (2006) apresenta formas simples para que isso ocorra, podendo uma delas contar com o ar ambiente para refrigerar a parede externa (aletada) do motor, através de uma convecção forçada adquirida pela velocidade do veículo ou um ventilador. Este tipo de sistema é mais adotado por motos, mas alguns projetos de automóveis ainda utilizam deste tipo de sistema visando ganho em redução de peso final do motor. Outro meio de refrigeração utilizado é o de refrigeração a água, onde um líquido (geralmente água+aditivo) circula em meio às paredes do motor para controlar sua temperatura. Este líquido tem uma passagem por um reservatório para troca de calor (radiador) e é bombeado para circular por canais que passam próximo aos

componentes quentes, através de uma bomba conectada ao eixo virabrequim do motor.

2.2.6 Sistema elétrico e de ignição

A fonte que alimenta toda a parte elétrica do veículo é uma bateria que recebe e armazena carga a partir de um alternador elétrico ligado ao eixo de manivelas do motor. Para que haja a combustão em um motor de ciclo Otto, a energia elétrica é necessária, uma vez que, o processo se inicia a partir da centelha de uma vela elétrica.

Uma voltagem de cerca de 10.000 Volts pode ser precisa para iniciar a combustão (BRAESS; SEIFFERT, 2005). Para que se chegue a esse nível de voltagem e a descarga elétrica seja concluída na câmara, um sistema de amplificação (condensador, sistema eletrônico e etc.) e um sistema de distribuição de corrente são necessários, para que, além de amplificar a carga, também distribua para as diversas velas do motor no momento correto da ignição de cada uma.

A energia elétrica armazenada pela bateria alimenta também os diversos componentes que são importantes aos automóveis (motor de arranque, luzes, sensores e etc.) assim como também os que trazem conforto aos passageiros dos veículos (luzes de painéis, rádio, luzes internas e etc.) (BRAESS; SEIFFERT, 2005).

2.2.7 Sistema de instrumentação

A partir do aumento da necessidade de se ter um funcionamento próximo de um ponto ótimo de um motor (mínimo de poluentes e máximo de desempenho) o acompanhamento integral do funcionamento deste se tornou necessário (MARTINS, 2006).

Para que isso seja possível, diversos são os sensores conectados ao motor para indicar diferentes parâmetros de funcionamento e enviar (através de sinais elétricos) informações à uma central de controle de todo o sistema do motor, a denominada central eletrônica ECU (do inglês - Engine Control Unit). A ECU tem programada (geralmente feita pelo fabricante) e armazenada em sua memória

curvas que indicam a melhor forma que o motor deve funcionar em determinada situação. Basicamente, a ECU recebe os sinais dos diversos sensores instalados no motor, compara com os parâmetros programados em sua memória e envia comandos para componentes de atuação (bicos injetores de combustíveis, válvula borboleta, acionamento do sistema de arrefecimento e etc.) para que haja controle do funcionamento do motor. De acordo com Braess e Seiffert (2005), com esse sistema de instrumentação ativa no motor, pode-se afirmar que o motor trabalha em malha fechada, buscando sempre se adequar com as variadas situações que este é colocado em funcionamento. Segundo Braess e Seiffert (2005), dentro dos diversos sensores que podem ser instalados em torno do motor, alguns dos mais importantes podem ser citados, como:

- Sensor de rotação: calcula a velocidade de rotação do motor através da indução criada entre a base magnética do sensor e os dentes de uma engrenagem ligada ao eixo do motor. Ao passar por um espaço em que um dente está ausente nessa engrenagem, o sensor irá acusar o tempo levado para esse ponto passar outra vez pela sua base. Um sinal é então enviado à ECU para o controle de alguns parâmetros, como: tempo de ignição, começo da ignição e trocas de perfil de came em motores que utiliza dessa tecnologia (Honda VTEC);
- Sensor de fase do motor: este sensor indicará à central em qual tempo um dos cilindros do motor está (admissão, compressão, expansão ou descarga) para que se possa obter, por exemplo, o momento exato da ignição do sistema;
- Sensor da posição da válvula borboleta: através de um potenciômetro, este sensor indica à central a carga que está sendo demandada pelo motorista do veículo antes das mudanças na relação ar-combustível. Esta informação é bastante importante para permitir que a ECU controle mudanças na carga de combustível antes dela ser necessária. Alguns sensores são ligados ao pedal do motorista e, a partir do seu sinal, a ECU comanda a abertura das válvulas através de um atuador elétrico.
- Sensor de vazão de ar: mede a vazão mássica de ar entrando no motor, o que é necessário para correlacionar com a massa de combustível a ser

injetada e ter uma mistura ideal para a combustão. Os sistemas mais atuais usam de um fio percorrido por uma corrente elétrica que, ao contato com o fluxo de ar, tem sua temperatura diminuída e resistência aumentada, limitando o fluxo de corrente elétrica. Assim, a quantidade de corrente necessária para manter a temperatura constante do fio percorrido pela corrente elétrica é diretamente proporcional à massa de ar que passa por esse fio.

- Sensor de temperatura do ar na admissão: monitora as mudanças de temperaturas do ar na admissão através de um termo resistor.
- Sensor de pressão do ar na admissão: um elemento constituído de strain gages mais transdutores piezo-resistivos medem a pressão absoluta na admissão. Reunida essa informação, e mais as de temperatura e velocidade do ar, pode-se estimar o fluxo mássico de ar entrando no motor.
- Sensor de temperatura do líquido de arrefecimento do motor: um termo resistor mede a temperatura do líquido que circula através do bloco do motor.
- Sensor de oxigênio: é um dispositivo elétrico que mede a proporção de oxigênio nos gases de escape. Com essa informação é possível determinar a relação de ar-combustível dos gases saindo na descarga. Caso essa mistura for rica (com uma proporção de combustível maior do que da proporção estequiométrica de ar-combustível), há pouco oxigênio nos gases de escape. Essa diferença é captada por uma sonda lambda e enviada à ECU, conseguindo então variar outros parâmetros do sistema do motor, classificando este sistema ao todo com um de malha fechado com “feedback” de informações. Com esse sensor, é possível controlar as emissões de combustível não queimado e de óxido de nitrogênio para a atmosfera.

2.3 Combustíveis

Os combustíveis são fontes de energia química que proverá a energia mecânica necessária para colocar o veículo em movimento. Mas a combustão só será realizada se houver um percentual desse combustível em meio a um de ar. O ar é uma mistura de gases, sendo sua constituição (em volume) de oxigênio

(20,95%), nitrogênio (78,09%), argônio (0,93%) e dióxido de carbono (0,03%) (MARTINS, 2006).

2.3.1 Conceito de mistura rica e pobre

Uma mistura estequiométrica é a que permite que todo o ar disponível em um determinado ambiente seja usado para queimar todo o combustível presente. Entretanto, as misturas nem sempre são estequiométricas, podendo ter excesso ou falta de ar. Quando a mistura tem excesso de ar na relação ar-combustível se tem uma mistura denominada pobre, caso contrário, uma mistura com deficiência de ar, denomina-se de rica. Martins (2006) apresenta dois coeficientes que especificam a mistura ar-combustível, estes são:

- Coeficiente de excesso de ar:

$$\lambda = \frac{(\frac{m_{ar}}{m_{comb}})_{real}}{(\frac{m_{ar}}{m_{comb}})_{esteq}} = \frac{(\frac{Comb}{Ar})_{esteq}}{(\frac{Comb}{Ar})_{real}} \quad (2.2)$$

- Riqueza da mistura:

$$\phi = \frac{(\frac{m_{ar}}{m_{comb}})_{esteq}}{(\frac{m_{ar}}{m_{comb}})_{real}} = \frac{(\frac{Comb}{Ar})_{real}}{(\frac{Comb}{Ar})_{esteq}} \quad (2.3)$$

Com essas relações tem-se uma mistura rica com o aumento de ϕ , enquanto que o aumento de λ tenderá a ter misturas mais pobres.

2.3.2 Ponto calorífico superior e inferior

Uma propriedade importante dos combustíveis para a sua seleção em determinada aplicação é o poder calorífico deste. Martins (2006) explica que, de uma maneira geral, o poder calorífico de um combustível é definido como a quantidade de energia contida em um quilo deste. Geralmente os combustíveis

produzem água por conter hidrogênio em sua composição, e esta água pode aparecer em estado líquido ou vapor no fim da combustão. O poder calorífico superior (PCS) está relacionado a água condensada aproveitando o calor latente da vaporização. O poder calorífico inferior (PCI) está relacionado ao vapor de água produzido. Existem meios para que estes valores possam ser obtidos, o que está longe da análise deste trabalho.

2.3.3 Índices de octanos

Propriedade importante e muito observada em combustíveis utilizados em motores de ciclo Otto é em relação à sua qualidade anti-detonação, medido pelo índice de octano (MARTINS, 2006).

A detonação é um fenômeno que depende primeiramente dessa qualidade, mas também é dependente do projeto do motor e das variáveis operacionais que influenciam a temperatura e a pressão do gás no final do curso de compressão (BRUNETTI, 2012).

O índice de octanos de um combustível é obtido comparando suas características com outros combustíveis padrões em um motor de testes, alterando especificamente a taxa de compressão deste (relacionando com pressões e temperaturas de funcionamento). De acordo com Martins (2006), os combustíveis utilizados para os testes são misturas de iso-octano (C_8H_{18}) e n-heptano (C_7H_{16}). O valor zero da escala corresponde ao heptano e o valor 100 ao octano. Para aqueles combustíveis com um índice de octanos acima de 100, é preciso comparar com uma mistura de octano puro com certos valores de tetro etilo de chumbo.

Para motores usados em automóveis existem dois diferentes testes para determinar o índice de octanos do combustível: o método “MON” ou “motor” que garantem as características através de um motor de teste e o método “RON” ou “pesquisa” (research) que dará as características através da análise química. As situações para ambos os testes são diferentes (tempo de ignição e temperatura da mistura), sendo os valores de MON superiores aos do RON. As características de cada teste podem ser observadas na Tab. 2.1.

Tabela 2.1 – Condições de testes para a medição do número de Octanos

	RON	MON
Rotação do motor (RPM)	600	900
Temperatura do ar de entrada (°C)	52 (125 °F)	149 (300° F)
Temperatura do líquido de arrefecimento (°C)	100 (212 °F)	100
Temperatura do Óleo (°C)	57 (135 °F)	57
Tempo da ignição	13° aPMS	19° - 26° aPMS
Folga da Vela (mm)	0.508 (0.020 in.)	0.508
Pressão do ar de admissão	Pressão atmosférica	
Relação ar/combustível	Ajustado para máxima detonação	
Taxa de Compressão	Ajustado para detonação padrão	

Fonte: PULKAREBI, 2004

Ainda de acordo com Martins (2006), um combustível utilizado de alto valor no índice de octanos não dará mais potência ao motor. Entretanto, o bom desempenho do motor está relacionado ao uso de um combustível com o índice de octanos dentro dos valores de projetos. Um motor que funcione bem com uma gasolina de índice 95 irá apresentar o mesmo desempenho do que com uso de uma gasolina de índice 98, mas o inverso poderá trazer condições para ocasionar o fenômeno de detonação, perda de potência e prematura destruição de componentes.

2.3.4 Estrutura dos combustíveis

2.3.4.1 Gasolina

No refinamento do petróleo é possível produzir diferentes combustíveis e outros tipos de produtos. Apresentando os produtos obtidos, na ordem dos mais leves para os pesados, obtêm-se:

- Gases de síntese: usados para gases de cozinha;
- Gasolina e solventes; utilizados em motores automotivos;
- Querosene: combustível para aviões;
- Gasóleo: óleo diesel, gasolina e alguns combustíveis leves;

- Fuelóleo leve e pesado: usados em caldeiras e fornalhas para geração de calor;
- Parafinas: combustível, proteção termoplástica para frutas, fabricação de velas e outros;
- Óleos lubrificantes: lubrificantes em geral;
- Betumes: fabricação de borrachas, tintas, asfalto e outros;
- Asfalto.

Como mencionado por Martins (2006), gasolina e óleo diesel, os produtos mais usados nos motores de combustão, podem ter os seus hidrocarbonetos agrupados em famílias, seguindo suas características de ligação, como:

- Parafinas: constituídas de ligações atômicas em cadeia linear e simples de carbono, com cadeias de hidrogênio (sem ramificações). Os hidrocarbonetos dessa cadeia terminam com o sufixo “ano”. Exemplos: heptano, metano e iso-octano;
- Oleofinas: ligações duplas em cadeia aberta de átomos de carbono. Ex: Etileno e propeno.
- Naftaleno: As ligações são simples em cadeia fechada. Ex: Ciclopropano.
- Aromáticos: Ligações simples e duplas alternadas fortemente fechadas, tendo então uma temperatura de autoignição elevada. Por essas características são ideais para fazerem parte da gasolina por aumentar seu índice de octanos.

A gasolina, um dos combustíveis mais usados no Brasil com cerca de 41.137 bilhões de litros vendidos em 2015 (ANP, 2016), é um destilado fraccionado do petróleo bruto e é composto por inúmeros hidrocarbonetos. Seu uso é justificado para os motores de ciclo Otto por apresentar uma temperatura de autoignição elevada (MARTINS, 2006).

O potencial de produção de CO₂ pela gasolina é cerca de 331 g/km, do processo de produção à utilização, sendo um dos mais altos (VASCONCELLOS, 2008). Essa é uma das razões que o uso de outras fontes de energia vem sendo estudadas para buscar reduzir o seu consumo.

Segundo Brunetti (2012), pode-se classificar a gasolina em dois grupos:

- Gasolina do tipo A: É aquela retirada diretamente da destilação fracionada do petróleo. Geralmente utilizada para fins técnicos;
- Gasolina do tipo C: Recebe a adição de etanol anidro com o objetivo de aumentar o índice de octanos em certa proporção determinada pela legislação nacional (cerca de 27%) através da Portaria MAPA nº 75 e Resolução CIMA nº 1/2015, 2015 (CIMA, 2015). É a gasolina comercializada nos postos de serviços.

Além do etanol anidro para aumentar o índice de octanagem, outros produtos são adicionados à gasolina para que esta seja benéfica para vida longa de um motor. A Petrobras classifica a gasolina encontrada nos postos de combustíveis em três tipos:

- Gasolina comum: (PETROBRAS, 2017) é a gasolina mais simples com índice de octanos de 87 e recebe um percentual de 27% de etanol anidro especificado pela Portaria MAPA nº 75 e Resolução CIMA nº 1/2015 (CIMA, 2015). O teor atual de enxofre é de 50 ppm (desde 01/2014), o que permite que novas tecnologias para emissão de poluentes possam ser utilizadas, como cita a Petrobras sobre a gasolina s-50, (PETROBRAS, 2017). Sua coloração é amarelada e pode ser aplicada em qualquer veículo movido à gasolina;
- Gasolina Aditivada – (PETROBRAS, 2017) com índice de octanagem de 87 (com 27% de etanol anidro) e teor de enxofre igual a 50 ppm, diferencia-se da gasolina comum pelo fato de apresentar aditivos químicos com ações dispersantes, detergentes e lubrificantes. Os benefícios da adição desses aditivos são a prevenção contra a perda de energia, manter os níveis de emissões mais baixos e impedir a formação de gomas e depósitos. Sua coloração varia de acordo com o fornecedor, tendo, por exemplo, verde para a comercializada pela Petrobras.
- Gasolina Podium – (PETROBRAS, 2017) recebe uma porcentagem de etanol anidro de cerca de 27% e tem seu índice de octanagem de 95 (exclusiva Petrobras). Seu uso é mais justificado para motores de taxas de compressão

mais altas, oferecendo maior desempenho do motor, mas não oferecendo este benefício para motores de baixas taxas de compressão. Também recebe a adição de aditivos químicos com ações dispersantes, detergentes e lubrificantes, mas seu teor de enxofre é menor (30 ppm), sendo menos poluentes. Tem coloração alaranjada resultante da adição do etanol anidro em maior porcentagem.

2.3.4.2 Etanol

O etanol (ou álcool) surgiu como uma fonte alternativa de energia devido à crise de petróleo que surgiu durante os anos 70 (MARTINS, 2006). Em diferentes localidades do mundo começaram a se produzir o álcool originado de diferentes matérias orgânicas como milho, batata, beterraba, arroz, cana de açúcar e outros. No Brasil, o etanol combustível é produzido através do processo de fermentação da cana de açúcar e também é um dos combustíveis mais vendidos no país, com cerca de 28.276 bilhões de litros no ano de 2015 (ANP, 2016).

O etanol trata-se de um combustível que leva a denominação de oxigenado por conter oxigênio em grande proporção na sua composição, assim como o metanol e éteres, quando comparado com a gasolina. As diversas diferenças de propriedades do etanol com a gasolina podem ser verificadas na Tab. 2.2.

Tabela 2.2 – Comparação das propriedades da gasolina e etanol

Propriedade	Etanol	Gasolina (pura)
Fórmula	C_2H_5OH	C_4 a C_{12}
Peso molecular ($g\ mol^{-1}$)	46	100 - 105
Ar/Combustível	9	14,7
Massa específica (20 °C)	0,794	0,72 – 0,78
Carbono (% em massa)	52,2	85 – 88
Hidrogênio (% em massa)	13,1	12 – 15
Oxigênio (% em massa)	34,7	0

Fonte: API, 2001

A ANP (Agência Nacional do Petróleo) classifica o etanol da seguinte forma:

- Etanol Etílico Anidro Combustível (AEAC): é o etanol produzido nacionalmente ou importado, misturado à gasolina do tipo A para dar origem à gasolina C, e consequentemente, aos seus derivados (gasolina comum, aditivada e podium). A lei vigente especifica que sua coloração deve ser alaranjada para evitar fraudes com a adição de água. Adquirido através do processo de desidratação com destilação fracionada, em que se evapora a água e obtêm somente o etanol (NOVACANA, 2017);
- Etanol Etílico Hidratado Combustível (AEHC): é o etanol produzido nacionalmente ou importado com o fim de ser utilizado em motores de ciclo Otto. O índice de octanos deste produto é de cerca de 100. A ANP especifica que este deve ser transparente, isento de impurezas (ferro, sódio e cobre). Obtido pelo processo de fermentação, surgindo assim uma porcentagem de 5% de água em sua composição (NOVACANA, 2017).

O etanol tem o potencial de gerar 213 g/km de emissão de CO₂ da produção até o seu consumo, sendo o valor mais baixo dentro dos combustíveis utilizados para se obter energia (Vasconcellos, 2008). Com isso, o etanol é dito como o combustível que menos prejudica o meio ambiente.

2.3.4.3 *Tecnologia flex*

O sistema Flex foi desenvolvido para tornar possível o uso optativo de gasolina ou etanol pelos usuários de automóveis (MENDONÇA, 2017).

Segundo Teixeira (2005), o teor de gasolina ou etanol em uma mistura é identificado por sensores (como já foi mencionado anteriormente na seção 3.2.7), e a partir dessa identificação e envio de sinal à central eletrônica, os parâmetros de combustão são ajustados para a melhor queima.

2.4 Poluentes

Quando um combustível é submetido a uma combustão completa, os produtos obtidos nesta reação são H₂O, N₂ e CO₂ (BRUNETTI, 2012). Porém,

quando a mistura ar-combustível não se enquadra nesta situação, a constituição dos gases de escape inclui componentes tais como (MARTINS, 2006):

- De carácter redutor: hidrogênio H_2 , monóxido de carbono CO e hidrocarbonetos não queimados HC;
- De carácter oxidante: oxigênio O_2 , monóxido de nitrogênio NO e dióxido de nitrogênio NO_2 ;
- De carácter inertes: dióxido de carbono CO_2 , água e nitrogênio;
- Partículas sólidas.

Em meio a esses componentes, pode-se perceber aqueles que são poluentes em meio à reação normal de combustão, como o monóxido de carbono CO, óxido mais dióxido de nitrogênio NO_x , hidrocarbonetos não queimados HC e as partículas sólidas. Apesar do CO_2 ser um componente resultante da combustão ideal, este também tem que ser observado devido sua ação perturbadora ao meio ambiente. Brunetti (2012) descreve as características destes poluentes como:

- Monóxido de Carbono CO: resulta da combustão incompleta de hidrocarbonetos, quando a partícula de CO contido no combustível não sofre a oxidação para se tornar CO_2 . Desta forma, o nível de CO resultante é formado em função da relação ar-combustível e da homogeneização da mistura. É um gás inodoro que podem trazer as seguintes consequências para o corpo humano: reação com a hemoglobina, redução de oxigênio no sangue, dores de cabeça, náuseas e morte.
- Óxidos de Nitrogênio NO_x : é um termo que indica uma composição de aproximadamente 90% de monóxido de nitrogênio (NO) e 10% de dióxido de nitrogênio (NO_2). Tem origem através da reação entre nitrogênio do combustível e oxigênio do ar ou através da oxidação do nitrogênio presente no ar, quando submetido às altas temperaturas. Desta forma, o controle da emissão do NO_x tem que visar a temperatura de funcionamento do motor, como também, a composição da mistura. Alguns dos efeitos desse produto para a atmosfera são: a formação da chuva ácida quando este se mistura com o ácido sulfúrico (H_2SO_4) (presente até mesmo na queima de combustível com enxofre) e também o aumento do ozônio (O_3), quando o NO_2

recebe a ação dos raios solares ultravioletas (UV). Uma vez na estratosfera, o ozônio é benéfico por filtrar os raios (UV) e diminuir o derretimento das calotas polares, porém, a presença deste próximo a superfície terrestre é uma das razões para o aumento de problemas respiratórios e complicações pulmonares na saúde humana.

- Hidrocarbonetos não queimados: os hidrocarbonetos estão presentes no combustível primário e se decompõem termicamente em outros de menores pesos moleculares, como etano, metano, acetileno e outros. Estes se formam devido à falta de temperatura necessária à combustão em certos pontos da câmara, como paredes do cilindro e regiões onde a mistura não se homogeneizou (pontos excessivamente ricos ou pobres de mistura). Segundo Martins (2006), parte dos hidrocarbonetos são oxidados na saída do escape, sendo assim, quanto menor a temperatura de saída dos gases, maior será a emissão deste componente perante a dificuldade de reagir com o oxigênio. São considerados carcinogênicos, podem causar irritações, problemas respiratórios, inflamação nos olhos e outros.
- Dióxido de carbono CO₂: é resultante da combustão completa de hidrocarbonetos, sendo em maior quantidade em combustíveis de origem fóssil. É considerado o principal responsável pelo efeito estufa no planeta, ocasionando o aumento da temperatura média global e consequente derretimento das calotas polares e aumento do nível dos oceanos. O controle das emissões do CO₂ pode ser dado através da redução do uso de combustíveis de origem fóssil, como a gasolina, e no aperfeiçoamento dos projetos que visam a eficiência térmica, mecânica e volumétrica do motor.

Como observado, um dos principais fatores para formação de poluentes como CO, NO_x e HC é a razão ar-combustível usada dentro da câmara. De acordo com Brunetti (2012), uma mistura excessivamente rica daria a origem a uma emissão maior de CO e HC devido a maior presença de hidrocarbonetos que podem não entrar em combustão. Uma forma de controlar a emissão destes, neste caso, seria o avanço da centelha, podendo causar maiores temperaturas e consequente aumento de NO_x. Uma mistura ligeiramente pobre poderia conter maior presença de oxigênio, um dos elementos necessários também para a formação do NO, mas as

temperaturas mais baixas alcançadas implicariam em uma redução da oxidação deste. Já uma mistura muito pobre forneceria uma situação de instabilidade no funcionamento do motor. Desta forma, a razão de equivalência entre ar e combustível relaciona-se com a emissão de NO, CO e HC conforme mostrado na Fig. 2.3 (BRUNETTI, 2012).

Como visto no gráfico, a relação de emissão dos três poluentes e a razão de equivalência da mistura possui um efeito antagônico. Ou seja, controlando um dos parâmetros, outro tenderá ter seu nível de emissão aumentado.

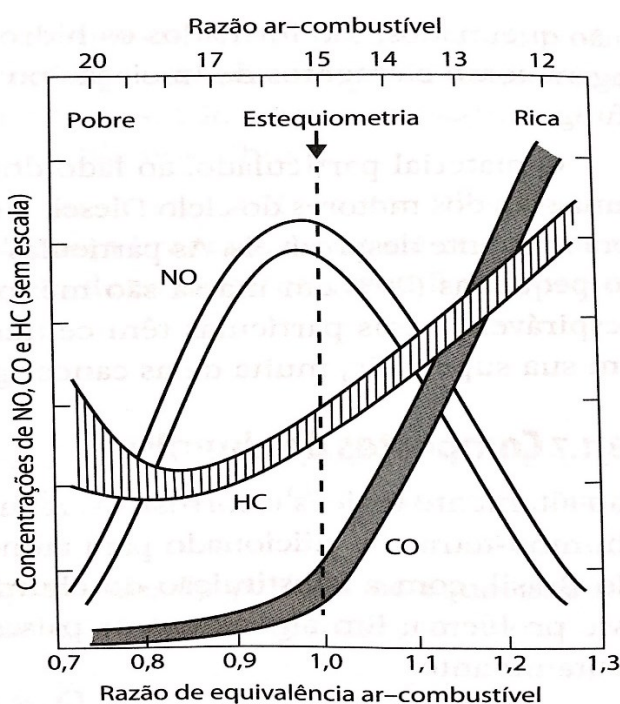


Figura 2.3 – Variação da composição dos gases de escape em função da composição da mistura.
Fonte: BRUNETTI (2012)

2.4.1 Tratamento de poluentes

Brunetti (2012) apresenta um dispositivo usado para a neutralização das emissões no escape, o catalisador. O catalisador é um conversor catalítico instalado na jusante da câmara que usa elementos como paládio e ródio (motores à gasolina) ou paládio e molibdênio (motores à etanol) para transformar CO, HC e NO_x em CO₂, H₂O e N₂.

Também conhecido como catalisador de escape de três vias, este irá utilizar os elementos químicos presentes em seu interior para reagir com os gases poluentes e transformá-los em elementos menos inofensivos para a atmosfera.

O esquema de um catalisador usado com o escapamento pode ser observado na Fig.2.4.

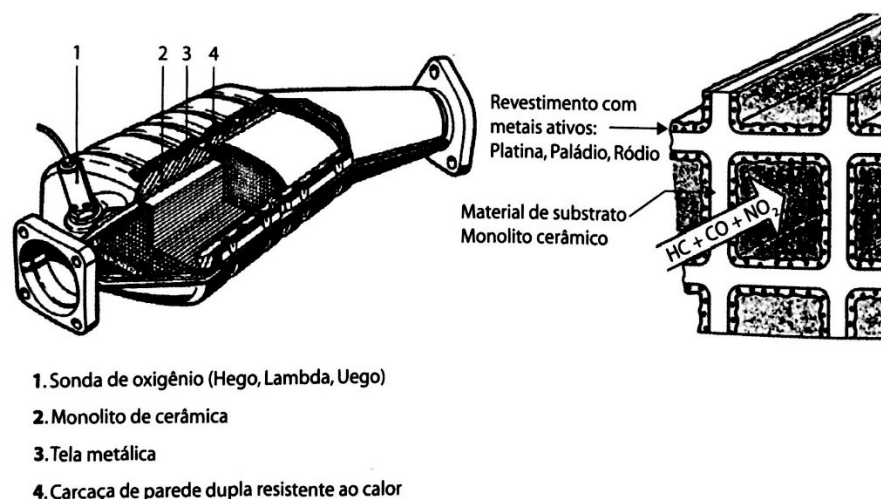


Figura 2.4 – Catalisador de escape de três vias.
 Fonte: BRUNETTI (2012)

Para uma eficiência na neutralização dos poluentes, a mistura deve apresentar uma razão próxima à estequiométrica ($0,99 < \lambda < 1,00$), visando também estar de acordo com leis ambientais que determinam essa eficiência ser de cerca de 90%. No entanto, para garantir essa eficiência, o uso de um sistema de malha fechada se faz necessário e é amplamente utilizado nos projetos mais novos de motores. Este sistema é composto pelo sensor lambda que irá fornecer um sinal à central eletrônica referente à quantidade de oxigênio medido na saída da tubulação do escapamento, indicando se o gás de saída se encontra rico ou pobre. A central por sua vez, irá corrigir a relação da mistura, visando o aperfeiçoamento da combustão.

Outra técnica comumente utilizada para controlar a emissão de poluentes, também relatada por Brunetti (2012), é com a recirculação na câmara de combustão dos gases provenientes da queima da mistura. Essa técnica, conhecida pelas siglas EGR (do inglês: Exhaust Gas Recirculation), visa utilizar o CO₂ (elemento final da

combustão) para roubar calor de dentro da câmara e reduzir a emissão de NO_x , formado principalmente em altas temperaturas. A recirculação dos gases deve ser interrompida quando o motor estiver em baixas cargas e em carga plena, evitando instabilidade no primeiro e roubo de potência no segundo caso. Ainda, a utilização de um catalisador na jusante da câmara ainda se faz necessário para controlar os níveis de emissão de CO e HC. A ilustração de um sistema EGR pode ser observado na Fig. 2.5.

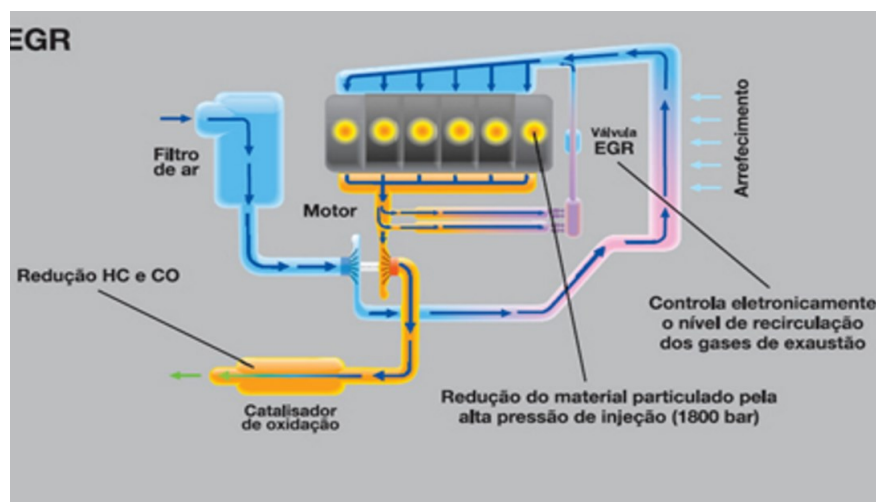


Figura 2.5 - Sistema EGR

Fonte: APTA CAMINHÕES (2017)

Não menos importantes e detalhados neste trabalho, ainda há outros poluentes que podem ser emitidos pelos escapamentos dos automóveis. Estes poluentes também recebem suas devidas formas de tratamentos a partir da detecção dos seus efeitos indesejados para o ambiente. Alguns desses elementos que se podem destacar na emissão dos motores em geral são: aldeídos (presentes principalmente em motores diesel e álcool), compostos de enxofre (maiores em motor Diesel), composto de chumbo (motores a gasolina que utilizam chumbo-tetraetila para elevar o número de octanos) e o particulado (maior emissão nos motores Diesel) (BRUNETTI, 2012).

2.4.2 Medição de poluentes

Existem diferentes técnicas para a medição de cada um dos elementos poluentes liberados pela jusante do motor. Entretanto, a legislação acerca de

emissões irá conferir qual técnica é a ideal para medir determinado elemento, padronizando todo o procedimento para que haja confiabilidade nos resultados. Limites de emissões são estabelecidos visando os problemas ambientais e os riscos à saúde humana.

Brunetti (2012) apresenta algumas das técnicas utilizadas para a medição de elementos, tais como:

- Monóxido e dióxido de carbono: detectores de absorção de raios infravermelhos não dispersivos (do inglês: Non-Dispersive Infrared – NDIR) é o método regulamentado para a medição desses elementos. CO e CO₂ são moléculas constituídas de diferentes átomos (no caso carbono e oxigênio) e por isso, estas são capazes de absorver energia infravermelha em específicos comprimentos de ondas, diferentes de moléculas monoatômicas como N₂ e O₂ (constituído somente de nitrogênio ou oxigênio) que não são capazes de absorvê-las. Portanto, com o uso de uma fonte luminosa de um lado e um detector dessa luz do outro, é possível obter a informação da presença desses elementos poluente. Geralmente, utilizam-se duas câmaras, sendo uma de comparação (com gás livre de poluentes) e outra de medição (que circula os gases a ser analisados), e se faz uma relação entre essas duas para se verificar o índice de emissão. Importante é evitar a presença de água (ou vapor de água) na constituição dos gases passando pela detecção, pois esta, uma vez sendo constituída de moléculas diatômicas, é capaz de absorver parte da energia infravermelha e influenciar os resultados da medição. Para evitar este problema, faz-se necessário a passagem dos gases por filtros condensadores anteriormente à medição. A Figura 2.6 apresenta uma ilustração do esquema utilizado.

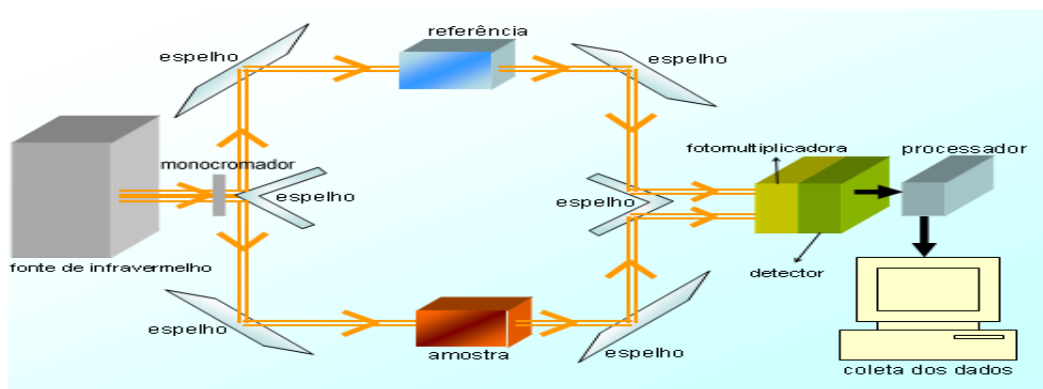


Figura 2.6 – Princípio de um espectrômetro de infravermelho

Fonte: APPENDINO NUNES (2017)

- Hidrocarbonetos: o método descrito para a medição de CO e CO₂, utilizando a detecção da absorção de raios infravermelhos, pode ser utilizado para a medição de hidrocarbonetos leves resultantes da combustão de motores Otto. Entretanto, parte dos hidrocarbonetos presentes nos gases sofre condensação quando passam pelos condensadores de água, não conseguindo obter uma análise precisa. Com isso, esta técnica não é apropriada para a homologação e certificação de veículos. A técnica então recomendada é a que usa a ionização de um eletrodo pela chama de hidrogênio do hidrocarboneto queimado para a geração de um sinal elétrico (do inglês - Flame Ionization Detection-FID). O resultado da medição é expresso em partes de carbono por milhão, não sendo seletivo ao tipo de hidrocarboneto queimado. A ilustração do sistema de medição FID é apresentado na Fig. 2.7.

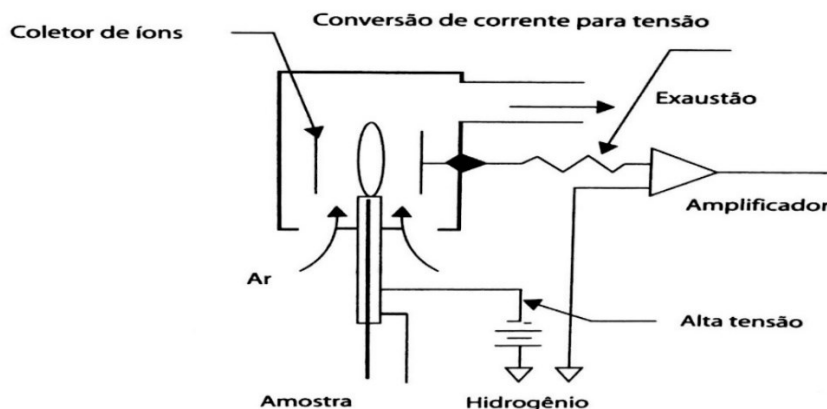


Figura 2.7 – Câmara de detecção do analisador FID.

Fonte: BRUNETTI (2012)

- Óxidos de Nitrogênio: O método de detecção da absorção de raios infravermelhos também poderia ser utilizado para a medição do NO_x , porém, o método regulamentado para este poluente é o de quimiluminescência. O fenômeno de quimiluminescência é explicado pela emissão de um fóton quando uma molécula volta ao seu estado inicial através de uma excitação eletrônica. O método informa através da detecção desse fóton a quantidade de moléculas de NO que se transformaram NO_2 em uma amostra de gás. No entanto, para que ocorra essa transformação, é necessária a reação da amostra de gás com o ozônio. Outra recomendação é a adição de um catalisador antes desse processo para se evitar a entrada de H_2O dentro da câmara de reação, o que poderia inibir o processo de emissão do fóton. Uma ilustração de um analisador por quimiluminescência é apresentada na Fig. 2.8.

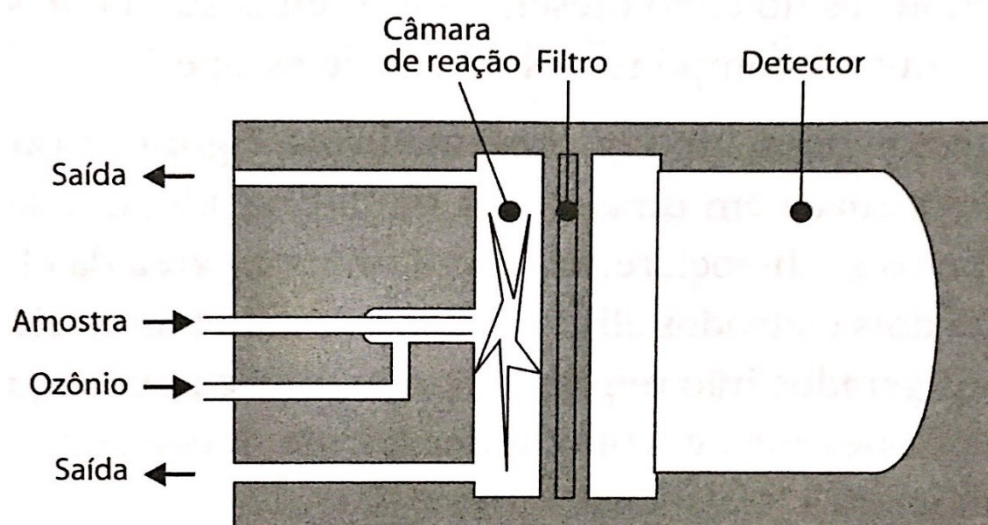


Figura 2.8 – Câmara de detecção de um analisador por quimiluminescência.
Fonte: Brunetti (2012)

Para outros tipos de poluentes, como aqueles não retratados neste trabalho, existem maneiras diferentes e regulamentadas para suas análises quantitativas.

2.5 Programas de Controle da Poluição do Ar

Em 15 de julho de 1989, através da Resolução CONAMA nº 5 (CONAMA, 1989), foi criado o Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar (PRONAR) para estabelecer limites nacionais de emissões de poluentes, visando a melhora da qualidade do ar.

Para monitorar cada tipo de fonte poluidora, a PRONAR desenvolveu diferentes programas, como o Programa Nacional de Controle de Poluição Industrial (PRONACOP), Programa de Controle da Poluição do Ar por Motocicletas e Veículos Similares (PROMOT), Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) e outros programas para se divulgar dados relativos à qualidade do ar, como também, tipos de fontes poluidoras.

O manual de regulamentos do PROCONVE de 2011 (IBAMA, 2011) define que o programa busca estabelecer limites máximos de emissão dos diferentes tipos de poluentes gerados pelos motores, prazos para alcançar tais limites, exigências tecnológicas para veículos (nacionais e importados) e padronização nos ensaios.

Para auxiliar no controle do programa, o manual PROCONVE (2011) detalha a estratégia que visa acompanhar as diferentes etapas da vida útil de um veículo (IBAMA, 2011). Estas são:

1. Homologação do Protótipo: assegura um baixo potencial de emissão de poluentes nos veículos novos e baixa taxa de deterioração das emissões ao longo da vida útil do veículo. São analisados os projetos de engenharia e ensaios feitos. Aplicado aos fabricantes e importadores dos automóveis que circulam no país.
2. Controle de Produção/Importação: Aplica-se às linhas de produção e importação, assegurando baixa dispersão dos índices de emissão de poluentes para a atmosfera pelos veículos, seguindo aqueles índices levantados no projeto.
3. Responsabilidade do Fabricante/Importador: responsabiliza o fabricante ou importador do veículo a comercializá-lo dentro das especificações por eles apresentados e homologadas pelo IBAMA, verificando a re-homologação de qualquer ponto modificado no projeto.

4. Requisitos de Manutenção: O fabricante ou importador deve repassar ao usuário e serviços de assistência técnica as informações claras sobre manutenção e prover o fornecimento de peças de reposição, visando à conservação dos limites máximos de emissão de poluentes durante o uso.
5. Controle Pós-Venda: o órgão ambiental (municipal ou estadual) tem liberdade para fiscalizar os fabricantes e usuários no cumprimento das medidas de controle de poluição nos automóveis. Essa fiscalização se volta para o estado de manutenção de veículos em uso, aplicando controles definidos a partir de informações do 1º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários. Esse inventário, publicado em 2011, apresenta pontos que definem se há ou não a necessidade de implantação do Programa de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso. Com isso, o licenciamento anual de veículos realizado pelos Departamentos de Trânsitos (DETRAN) fica condicionado à aprovação destes no programa.
6. Programa de Inspeção e Manutenção: fiscaliza se a originalidade do projeto do veículo é mantida pelos seus usuários, evitando que quaisquer mudanças possam interferir nas emissões de poluentes. Além disso, verifica se o plano de manutenção preventiva elaborado pelo fabricante vem sendo seguido. Nesta etapa final, dados são levantados para dar um “feedback” ao IBAMA quanto à eficiência do PROCONVE.

Como já citado, as informações obtidas através do Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários, lançado pelo Programa Nacional de Inventários de Fontes Poluidoras de Ar, são importantes para direcionar as medidas do PROCONVE para determinado fator, como também apresentar uma resposta à aplicação das medidas já executadas. O primeiro inventário foi lançado em 2010, e a segunda edição foi divulgada em 2013 com novos dados.

O portal do IBAMA (2016) apresenta pontos interessantes no que se diz respeito ao sucesso do PROCONVE durante seus anos de execução. Alguns destes pontos são:

- Modernização do parque industrial automotivo nacional;

- Novas tecnologias empregadas nos veículos e nos laboratórios de ensaios;
- Combustíveis de melhor qualidade. Por exemplo, a redução de 94% do índice de enxofre na gasolina atual em comparação com a que era encontrada até 2013, representando cerca de 35.000 toneladas/ano a menos de emissão de óxido de enxofre para a atmosfera (PETROBRAS, 2016);
- Novos cursos e empregos para profissionais interessados na área;
- Redução de até 98% da emissão de poluentes pelos veículos.

O inventário traz informações bem detalhadas de como a qualidade do ar vem sendo afetada ao longo dos anos através da influência da crescente frota de veículos, como também, apresenta previsões para anos futuros. As Figuras 2.9, 2.10 e 2.11 demonstram como os níveis de emissão comportaram durante os anos de 1983 a 2012.

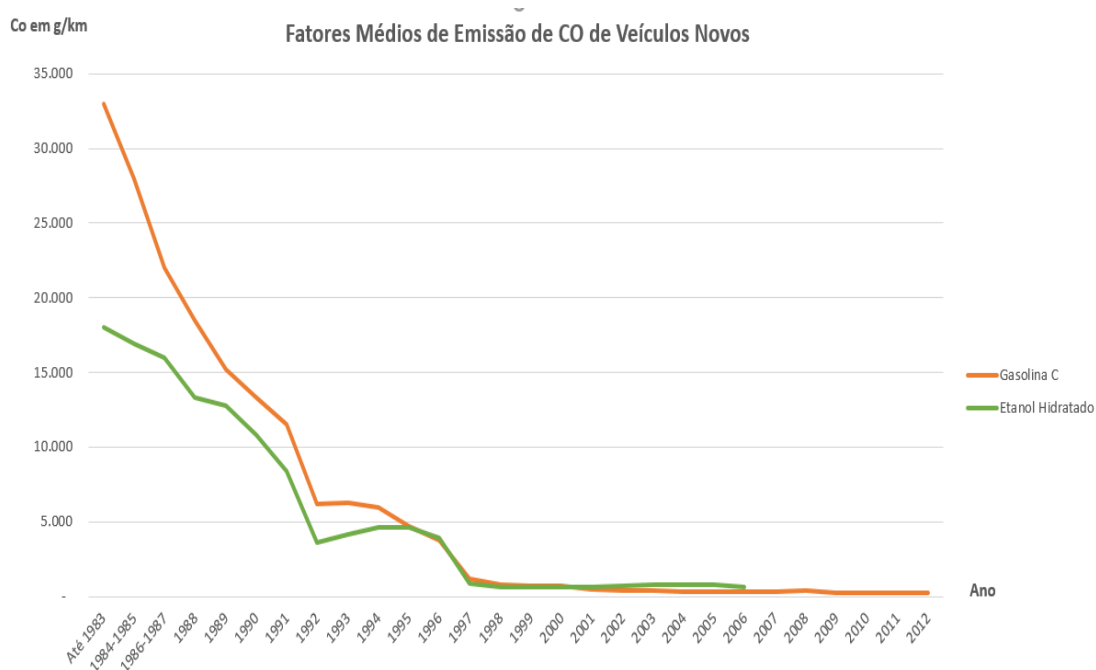


Figura 2.9 - Fatores médios de emissão de CO de veículos novos
Fonte: AUTOR PRÓPRIO COM DADOS MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (2013)

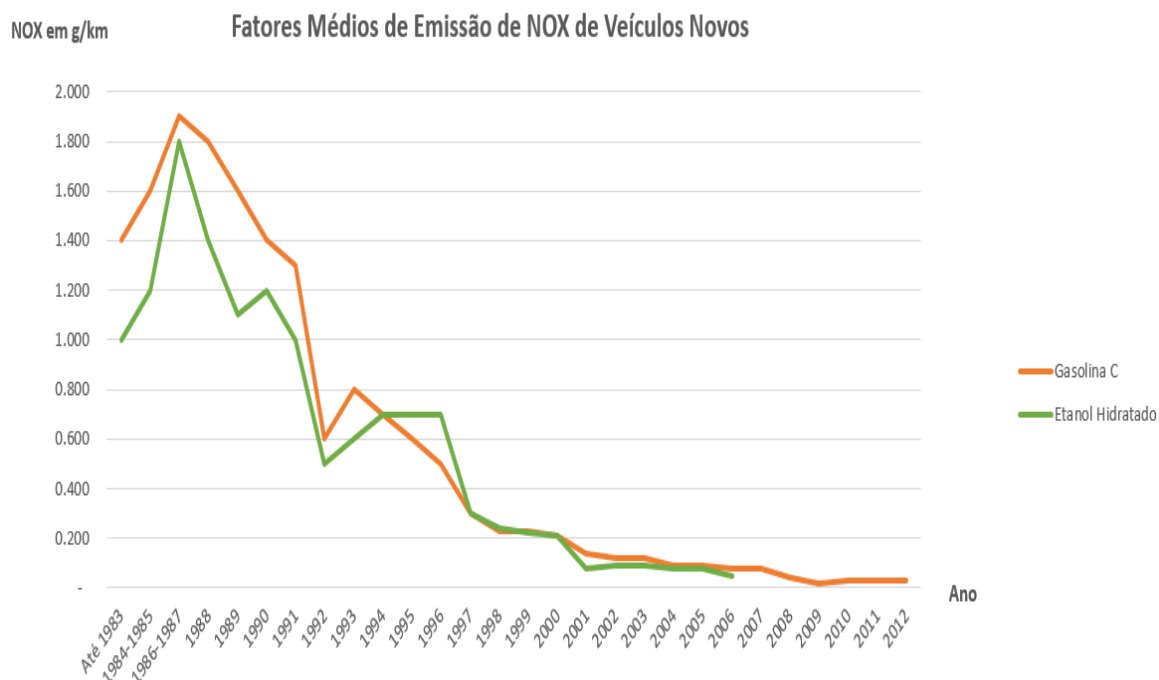


Figura 2.10 – Fatores médios de emissão de NOx de veículos novos

Fonte: AUTOR PRÓPRIO COM DADOS MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (2013)

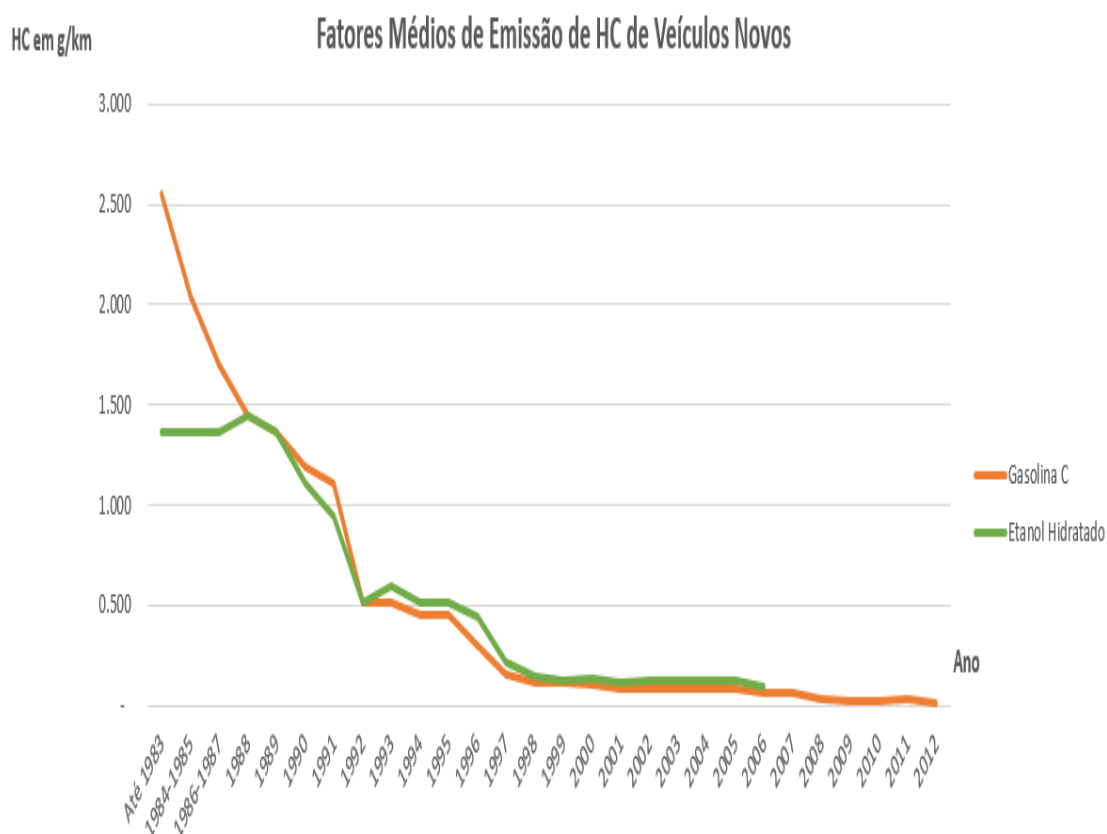


Figura 2.11 – Fatores médios de emissões de HC de veículos novos

Fonte: AUTOR PRÓPRIO COM DADOS MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (2013)

Nos gráficos pode ser observada uma queda acentuada nos elementos poluentes a partir do ano de 1989 em relação ao ano de 1983. Esta queda coincide com o ano em que os primeiros catalisadores foram aplicados aos veículos novos, prevalecendo nos índices dos anos posteriores devido ao aprimoramento das tecnologias empregadas. A linha de histórico do etanol vai até o ano de 2006, pois a partir deste ano, veículo com motores flex começaram a substituir os que usavam os motores que faziam combustão exclusiva deste.

A partir de análises em dados como estes pertencentes ao inventário, novas diretrizes foram criadas visando a redução ainda maior dos poluentes. Com isso, o PROCONVE estipulou os limites máximos de emissão de poluentes para automóveis novos encontrado na Tab. 2.3 (IBAMA, 2011).

Tabela 2.3 – Limites de emissões para veículos leves

Poluentes	Limites (a partir de 1/1/2014)
Monóxido de carbono (CO em g/km)	1.30
Hidrocarbonetos (THC em g/km)	0.3
Hidrocarbonetos não metano (NMHC em g/km)	0.5
Óxidos de nitrogênio (NOX em g/km)	0.08
Material particulado (MP em g/km)	0.025
Aldeídos (CHO em g/km)	0.02
Emissão evaporativa (g/ensaio)	1.5 ou 2
Emissão de gás no cárter	Nula

Fonte: IBAMA (2011)

Lembrando que estes limites são estipulados para veículos novos. A Resolução CONAMA Nº 418/2009 (CONAMA, 2009) estabelece os limites para veículos usados, definidos pelo ano de fabricação do veículo. Os valores permitidos através dessa resolução são fixados nos valores apresentados nas Tab. 2.4 e 2.5 para CO e HC corrigidos. O termo corrigido está relacionado ao valor corrigido quanto à diluição dos gases amostrado, calculado através de fórmulas que levam

em conta o valor contido nos gases do escapamento (em %) e o valor medido de CO₂. As fórmulas para tais elementos corrigidos são apresentadas nas Eq. (2.4) e (2.5) (CONAMA, 2009).

Tabela 2.4 – Limites de CO (%)

Ano de fabricação	Limites de CO _{corrigido} (%)			
	Gasolina	Etanol	Flex	Gás Natural
Todos até 1979;	6,0	6,0	-	6,0
1980 - 1988	5,0	5,0	-	5,0
1989	4,0	4,0	-	4,0
1990 e 1991	3,5	3,5	-	3,5
1992 - 1996	3,0	3,0	-	3,0
1997 – 2002	1,0	1,0	-	1,0
2003 a 2005	0,5	0,5	0,5	1,0
2006 em diante	0,3	0,5	0,3	1,0

Fonte: CONAMA (2009)

Tabela 2.5 – Limites de HC (ppm de hexano)

Ano de fabricação	Limites de HC _{corrigido} (ppm de hexano)			
	Gasolina	Etanol	Flex	Gás Natural
Todos até 1979;	700	1100	-	700
1980 – 1988	700	1100	-	700
1989	700	1100	-	700
1990 e 1991	700	1100	-	700
1992 - 1996	700	700	-	700
1997 – 2002	700	700	-	700
2003 a 2005	200	250	200	500
2006 em diante	100	250	100	500

Fonte: CONAMA (2009)

$$HC_{corrigido} = \frac{15}{(CO + CO_2)_{medido}} \times HC_{medido} \quad (2.5)$$

$$CO_{corrigido} = \frac{15}{(CO + CO_2)_{medido}} \times CO_{medido} \quad (2.6)$$

Os valores tabelados são obtidos para valores de rotações entre 600 à 1200 RPM em marcha lenta (± 100 RPM de tolerância) e 2500 RPM em regime acelerado (± 200 RPM de tolerância) (CONAMA, 2009).

Nacionalmente, os valores de CO₂ não são limitados para se ter controle em uma possível vistoria. Porém, há propostas de limites que já vem há alguns anos sendo preparados para ser implantados, como a PLS 55/2008 que limita a emissão de CO₂ em 120 gramas por quilômetros nos veículos que fossem fabricados a partir de 2016 (SENADO NOTÍCIAS, 2015).

Além desses limites, todos os planos estratégicos de fiscalização são detalhados no manual PROCONVE/PROMOT encontrado no site do IBAMA.

3 Materiais e métodos

Com o objetivo de avaliar os índices de emissão de poluentes tais como CO, CO₂ e hidrocarbonetos pelo escapamento de um motor de combustão de ciclo Otto, este trabalho usou de uma metodologia onde foi necessário coletar dados, registrar em planilhas, desenvolver gráficos, analisar estes e relacionar com os fundamentos teóricos, e por fim, apresentar a conclusão com sugestões. Utilizou-se os combustíveis gasolina, etanol e uma mistura 50% de gasolina e etanol, em rotações baixas e altas, tendo-se diferentes cenários para avaliação.

As seções posteriores irão descrever com detalhes como o desenvolvimento deste trabalho foi possível.

3.1 Local dos testes

Os testes para o desenvolvimento deste trabalho foram realizados na bancada didática de motores do Laboratório de Motores da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

Os testes foram realizados seguindo um planejamento experimental, buscando realizar de forma a preservar a segurança e saúde no momento dos testes.

Para se evitar a inalação dos gases poluentes emitidos pelo motor, como o CO que pode ocasionar asfixia, a bancada foi posicionada em área externa.

As condições climáticas, no dia dos testes dos dados aqui apresentados, eram as seguintes (INMET, 2017):

- Data: 01/04/2017;
- Período dos Testes: 9:00 AM às 11:00 AM;
- Temperatura: 19° C;
- Umidade: 60%;
- Pressão: 918 hPa;
- Temperatura de orvalho: 14° C.

A realização dos testes em um mesmo dia favoreceu para que se obtivesse condições iguais das características do ar para as condições variadas neste trabalho. Uma das características influenciada, principalmente pela temperatura e pressão do ar, é a densidade, importante para se ter uma ideia da quantidade de ar que está presente na câmara e conseqüentemente a de combustível injetada.

Os equipamentos utilizados e o procedimento realizado para os testes podem ser verificados nas seguintes seções.

3.2 Motor Estudado

O motor de estudo se trata de um modelo montado em um kit didático, fornecido pela empresa BIT 9, denominado modelo MCIV10 (BIT 9, 2017).

Segundo a fabricante BIT 9 (2017), o motor montado no kit se trata de um modelo Fire, da fabricante Fiat, utilizado comumente no veículo Palio, no ano de fabricação de 2010. Este motor apresenta as seguintes características (CARROSNWEB, 2017):

- Cilindrada: 999 cm³;
- N° de cilindros: 4 em linha;
- N° de válvulas: 8 (2 para cada cilindro);
- Comando de válvulas: simples no cabeçote, correia dentada;
- Combustível: Flex;
- Aspiração: Natural;
- Injeção de combustível: Eletrônica multiponto com acelerador;
- Ignição: Eletrônica comandada pela ECU;
- Arrefecimento: água com radiador para troca de calor;
- Peso/torque: 92,93 Kg/Kgfm;
- Potência: 73 cv com gasolina e 75 cv com etanol à 6250 rpm;
- Diâmetro e curso do cilindro: 70 x 64,9 mm;

- Taxa de compressão: 12,1:1;
- Torque: 9,5 Kgfm com gasolina e 9,9 Kgfm com etanol a 4500 rpm.

O motor é mantido sobre cuidados de responsáveis e passa por uma rota de manutenção regular de seus componentes.

Este kit didático (motor + elementos de controles) é utilizado para ministrar aulas e como objeto de estudo em outras pesquisas.

O kit com o motor de estudo pode ser visto na Fig. 3.1. Pode-se observar um painel com itens de controle didáticos que não foram utilizados neste trabalho.

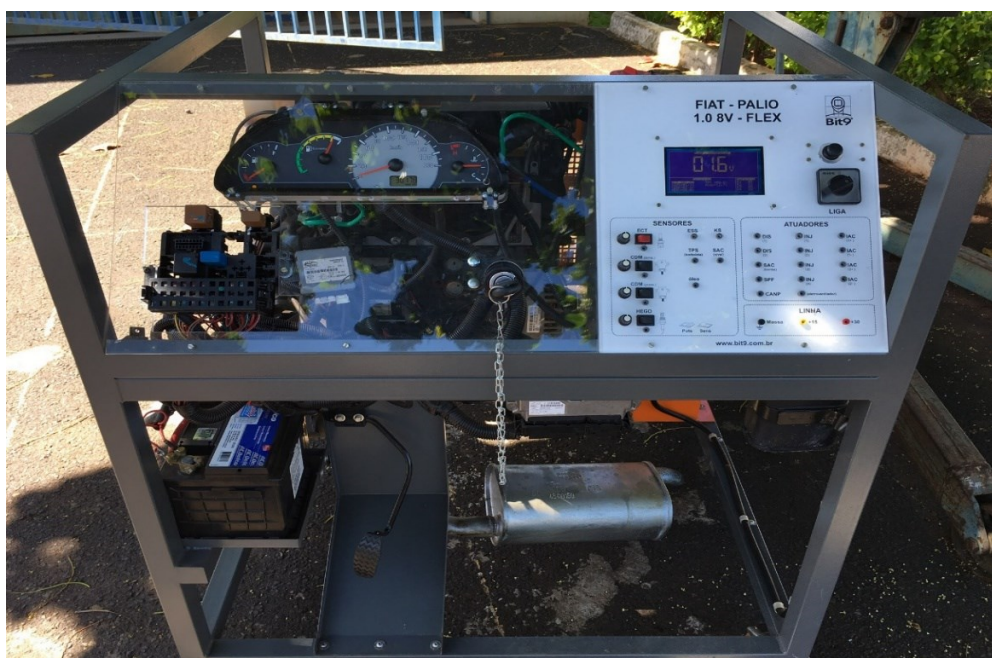


Figura 3.1 - Bancada com o motor Fire
Fonte: AUTOR PRÓPRIO

3.3 Equipamentos Utilizados para Coleta dos Dados

O equipamento utilizado para a medição dos poluentes foi o fornecido pela NAPRO ELETRÔNICA INDUSTRIAL LTDA, modelo PC – Multigás. O PC-Multigás utiliza o método de medição por infravermelhos não dispersivos.

De acordo com o manual do fornecedor NAPRO (2016), o equipamento atende às normas NBRs, OIML R99 CLASS1, ISO 3930 e ASM/BAR 97.

Em conjunto ao analisador de poluentes, foi utilizado o tacômetro da fabricante Instrutherm.

3.3.1 Analisador de gases

Este aparelho utiliza da técnica de absorção de raios infravermelhos não dispersivos. Seus dados são apresentados na tela de um computador conectado ao equipamento. O layout dessa tela pode ser verificado na Fig. 3.2.

PC-Multigás - Medição Instantânea			
MEDIÇÃO			
Rotação do Motor ▲ RPM N/D RPM/1	Temperatura do Motor °C N/D	Estado ☒ Zero solicitado ☒ Sensor de O2 ☐ Sensor de NOx	
Monóxido de Carbono (%vol) CO 0,00	Dióxido de Carbono (%vol) CO2 0,0	Combustível Selecionado ☒ Gasolina ☐ Álcool ☐ Flex ☐ Gás Natural	
Oxigênio (%vol) O2 20,9	Hidrocarbonetos (ppm vol) HC 0 ☒ Hex ☐ Prop	Sensor de Temperatura ☒ Habilitado ☐ Desabilitado	
CO corrigido (%vol) COc 0,00	Hidrocarbonetos Corrigido (ppm vol) HCc 0	Óxidos de Nitrogênio (ppm vol) NOx N/D	
Diluição (%vol) Dil 0,00	Lambda λ 0,000	Fator de Correção F_{diluição} 0,00	
Relação Ar Combustível A.F.R. 0,00			
Número de Série 83618	Versão Software 2.000	Versão do Hardware 5.4	Valor P.E.F. 0,560
Imprimir		Finalizar	
Zero			

Figura 3.2 – Layout da tela do programa do PC-Multigás
Fonte: NAPRO (2013)

Segundo a fabricante NAPRO (2016), o equipamento, através de sua técnica de medição, é capaz de medir os níveis de poluentes como o CO, CO₂, NO_x e hidrocarbonetos não queimados. O equipamento pode ser utilizado para as seguintes finalidades:

- Análise de motores em condições estáticas e dinâmicas;
- Avaliação de emissões para programas obrigatórios de inspeção e manutenção;
- Verificação da eficiência do catalisador dos veículos.

Fotos do equipamento podem ser verificadas nas Fig. 3.3 e 3.4.



Figura 3.3 – Vista frontal do analisador de gás
Fonte: NAPRO (2013)



Figura 3.4 – Vista traseira do analisador de gás
Fonte: NAPRO (2013)

Os componentes do aparelho fornecidos pela fabricante, fundamentais para seu funcionamento, são:

- Módulo analisador PC-MULTIGÁS para medição de CO, CO₂, HC e O₂;
- Sonda de captação dos gases;
- Cabo de alimentação de 12 V;

- Fonte de alimentação para 110/220 V, de corrente alternada e frequência de 60 HZ;
- Cabo de conexão do analisador com o computador;
- Programa do software em CD-ROM;
- Filtro condensador de umidade;
- Filtro para retenção de partículas sólidas;
- Manopla de encaixe na saída do escape do motor;
- Sistema de drenagem de gases e líquidos;
- Sensor de RPM.

O aparelho é capaz de medir os gases nas seguintes escalas (NAPRO, 2016):

- CO: 0 -15%;
- CO₂: 0 – 20%;
- HC: 0 – 20000 ppm;
- O₂: 0 – 25%;
- NO_x: 0 – 500 ppm;
- λ : 0 – 9,99;
- Relação do ar/combustível da mistura: 0 – 99,99.

3.3.2 Tacômetro

O tacômetro utilizado, fabricado pela INSTRUTHERM, foi necessário para se ter controle da rotação do motor, tendo que mantê-lo o mais constante possível. Com isto, o valor representativo da emissão de poluentes para os diferentes combustíveis utilizados pode ser relacionado à uma faixa tolerável de rotação para determinada situação proposta neste trabalho (alta ou baixa rotação).

O tacômetro se trata de um modelo portátil a laser, não necessitando contato físico com o eixo movido do motor. Segundo a fabricante INSTRUTHERM (2017), o aparelho, modelo TD-812, apresenta as seguintes características:

- Faixa de medição: 2,5 a 99999 RPM;

- Resolução: 0,1 RPM entre 2,5 a 999,99 RPM) e 1 RPM acima de 1000 RPM;
- Precisão de $\pm 0,05\%$ + dígito;
- Tempo de amostragem: 1s;
- Distância de medição: 500mm a 2000mm para o laser.

Uma imagem ilustrativa do aparelho pode ser verificada na Fig. 3.5.



Figura 3.5 – Tacômetro Instrutherm modelo TD-812
Fonte: AUTOR PRÓPRIO

3.4 Metodologia

Os testes foram realizados na bancada apresentada. Para que estes fossem confiáveis, medidas de posicionamento e manuseio do material foram tomadas. Todo o material utilizado (analisador de gases, computador e bancada do motor) pode ser conferido na Fig. 3.6. Pode-se notar que o motor está ao ar livre para se evitar qualquer complicação devido aos gases emitidos por este. A manopla de fixação do coletor de gases do escapamento ainda se encontra fora do ponto de medição, uma vez que, se deve tomar medidas de calibração e pré-testes do equipamento antes de começar a utilizá-lo.

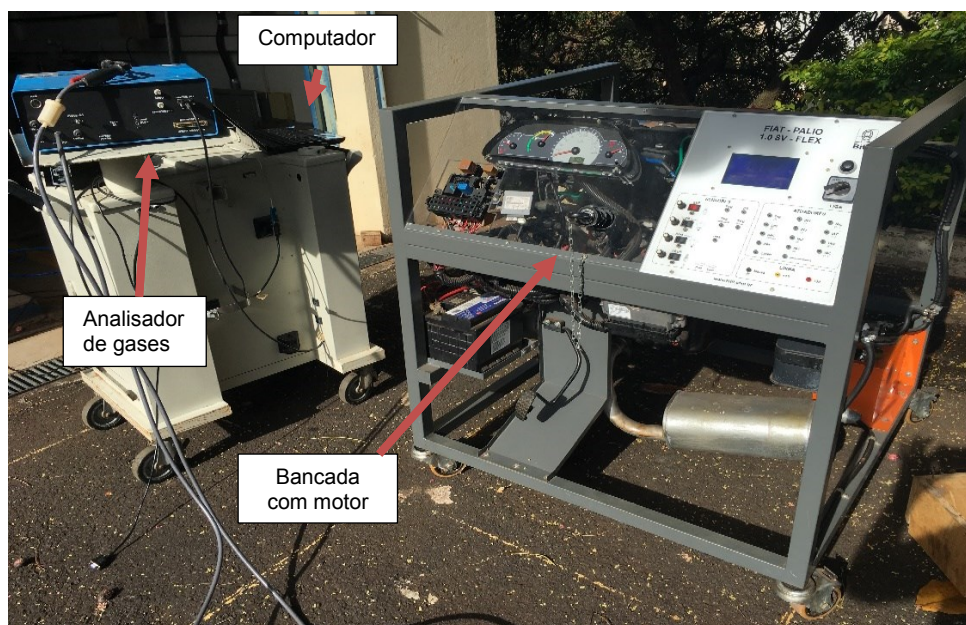


Figura 3.6 – Montagem dos equipamentos de teste
Fonte: AUTOR PRÓPRIO.

As etapas de instalação dos equipamentos podem ser conferidas a seguir:

1. Preparação para o uso do tacômetro:

Como já mencionado, o tacômetro utilizado trata-se de um modelo portátil da Instrutherm, utilizando laser para a medição de velocidades de rotação. Para que isso seja possível, uma fita refletiva é colada em uma superfície que irá girar em uma determinada frequência. O laser enviado pelo tacômetro, quando incidente sobre a superfície da fita que reflete a luz infravermelha, é detectado pelo aparelho que contabilizará a frequência com que isso ocorre.

Desta forma, a superfície onde se fixa a fita adesiva deve ser bem limpa para garantir que esta não se solte com o movimento. Também, a superfície refletiva deve ser preservada sempre limpa para não influenciar nos resultados.

Outro ponto importante é a distância que o se deve posicionar o aparelho da superfície em rotação (com a fita refletiva fixada), pois distâncias muito longas podem apresentar interferências, fazendo o aparelho apresentar resultados errôneos. De forma contrária, distância

muito próxima também servirá para o aparelho não dar um valor preciso da rotação, além de se tornar uma maneira perigosa de se obter a medição (objetos girando em altas velocidades). O ideal é manter a distância sugerida pelo fabricante.

A Figura 3.7 ilustra a fita adesiva fixada na polia acionada pelo eixo virabrequim do motor com o feixe incidente do laser do tacômetro.



Figura 3.7 – Posicionamento do tacômetro para coletas de dados
Fonte: AUTOR PRÓPRIO.

2. Posicionamento da sonda de captação dos gases:

Uma sonda de captação de gases é introduzida em cerca de 30 cm no escapamento do motor, de acordo com as especificações da fabricante NAPRO (2016). A sonda fica na ponta de uma ponteira metálica acoplada em uma manopla. Um sistema semelhante a um alicate permite a fixação desta manopla ao escapamento, e um filtro colocado logo após a manopla absorve uma parte da umidade contida nos gases.

A Figura 3.8 apresenta como este dispositivo é fixado ao escapamento do motor estudado.



Figura 3.8 – Posicionamento da manopla contendo a sonda coletora de gases
Fonte: AUTOR PRÓPRIO.

Os gases da amostra são levados até ao analisador através de uma mangueira conectada ao ponto específico para a entrada dos gases no aparelho.

3. Conexão do analisador de gases ao computador

Para que seja possível a análise dos resultados obtidos pelo sistema do analisador de gases, um computador deve ser ligado a este, e ter o software fornecido pela fabricante instalado. A conexão do equipamento é feita através de cabos de transferência de dados.

Ao iniciar o software, pode ser verificada diferentes formas de se trabalhar com o aparelho, sendo de forma voltada para o controle de poluente (verificando quanto às leis vigentes), ou, de forma mais experimental, para se conseguir resultados como os obtidos neste trabalho.

A forma com que foi obtido os resultados deste trabalho corresponde ao modo de medição instantânea especificada pela fabricante NAPRO (2016). Dentro deste modo, pode-se obter os valores instantâneos de RPM, temperatura ($^{\circ}\text{C}$), CO (% no volume de gás), CO corrigido (% no volume de gás), CO₂ (% no volume de gás), O₂ (% no volume de gás), HC (ppm no volume de gás), HC corrigido (ppm no volume de gás), relação de

ar-combustível, fator de diluição dos gases, fator de correção e o coeficiente de excesso de ar lambda (λ). Os parâmetros corrigidos se referem a aqueles que foram calculados pelo analisador sem a presença do ar externo no escape (GASCATAPRETA, 2017).

Após acionado o modo de medição instantânea, o analisador de gases se inicia e algumas verificações são realizadas automaticamente voltadas para a calibração e vedação do equipamento.

Os procedimentos de calibração e vedação são importantes e imprescindíveis para a realização da análise dos gases da exaustão. A calibração é importante devido ao fato de tomar como referência valores de um ambiente sem a presença dos elementos poluentes e comparar com os encontrados nos gases de escape. O de vedação, por sua vez, verifica a proteção do sistema contra qualquer fonte externa de elementos.

Posteriormente, a seguinte tela é apresentada demonstrando os valores dos parâmetros analisados pelo o aparelho (ver Fig. 3.9)



Figura 3.9 – Dados sendo apresentados pelo analisador de gases
Fonte: AUTOR PRÓPRIO.

3.5 Planejamento experimental

Um planejamento experimental tem por objetivo reduzir a interferência nos dados obtidos, reduzir tempo na avaliação dos dados, tornar o procedimento mais barato e aumentar o rendimento dos testes (PORTAL ACTION, 2017).

Dentro da estratégia de planejamento experimental, existe o conceito de experimento fatorial que tem por objetivo comparar dois níveis de um determinado fator para verificar qual deles proporciona o melhor resultado. O estudo se baseia em avaliar o comportamento da variação do fator dentro de um nível mais baixo e outro mais alto. (PORTAL ACTION, 2017). Mais especificamente, os testes foram planejados seguindo o planejamento experimental fatorial completo 3x2 (2 fatores sendo um de 3 níveis e outro de 2 níveis), onde os fatores foram avaliados em dois níveis, verificando a emissão de poluentes no uso de cada combustível em alta e baixa rotação (representando baixa carga e plena carga).

O diagrama a seguir ilustra o procedimento:

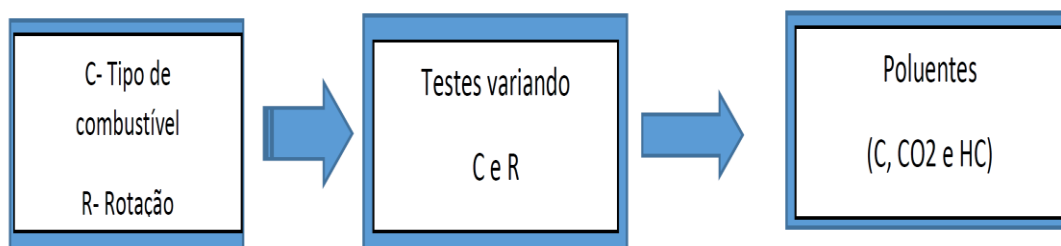


Figura 3.10 – Diagrama do procedimento
Fonte: AUTOR PRÓPRIO.

Desta forma, se tem as seguintes definições:

- **Fatores:** Os combustíveis C_{-1} = Gasolina, C_0 = Gasolina + Etanol e C_{+1} = Etanol;
- **Níveis:** As rotações R_{-1} = Baixa e R_{+1} = Alta;
- **Tratamento:**
 - $C_{-1} R_{-1}$ = Gasolina e baixa rotação;
 - $C_{-1} R_{+1}$ = Gasolina e alta rotação;
 - $C_0 R_{-1}$ = Gasolina + Etanol em mistura e baixa rotação;
 - $C_0 R_{+1}$ = Gasolina + Etanol em mistura e alta rotação;
 - $C_{+1} R_{-1}$ = Etanol e baixa rotação;

$C_{+1} R_{+1}$ = Etanol e alta rotação.

Neste tipo de planejamento é possível ser avaliado qual fator influência mais os resultados dos testes, como também, a interação de um fator com o outro. Com o gráfico de efeitos especiais é possível notar qual fator influência mais os resultados, e com o gráfico de interações busca-se qual combinação das variáveis apresenta o melhor comportamento perante às emissões de CO, CO₂ e HC.

A identificação de cada nível e fator é descrito abaixo:

- **Gasolina:** a gasolina utilizada foi a comumente encontrada no mercado nacional, tendo em sua composição uma porcentagem de etanol etílico anidro de cerca de 27%, estabelecida pelas leis vigentes (ver seção), para que esta alcance o número de octanos idealmente estipulado para que favoreça a combustão;
- **Etanol hidratado:** este também contém as características do utilizado no mercado nacional, sendo derivado do processo de fermentação de cana-de-açúcar, contendo cerca de 5% de água em sua composição, segundo limite máximo na RESOLUÇÃO ANP Nº 7, 2011 (ANP, 2011);
- **Mistura:** o combustível dito como mistura foi obtido no momento dos testes, resultando em uma composição de 50% gasolina (comercial com 27% de etanol etílico anidro) e 50% de etanol. O termo mistura, neste contexto, não deve ser confundido com o termo mistura para ar+combustível;
- **Baixa rotação:** Valor estipulado de 750 RPM. Valor onde o motor se encontra em marcha lenta;
- **Alta rotação:** Valor estipulado de 5000 RPM. Rotação não muito usual para movimentação nas vias e estradas, mas possível de ser atingida em determinadas situações (aceleração máxima de um veículo, ultrapassagens, subidas e etc.). Valor escolhido sem determinada razão.

Seguindo o planejamento, os testes foram realizados registrando dados coletados de cada um dos elementos poluentes da seguinte forma, como verificado na Tab. 3.1.

Tabela 3.1 – Planilha para preenchimento de dados da emissão de cada um dos poluentes

Tratamento	C	R	1º teste	2º teste	3º teste	Média	Desvio
1	-1	-1					
2	-1	+1					
3	0	-1					
4	0	+1					
5	+1	-1					
6	+1	+1					

Fonte: AUTOR PRÓPRIO

Importante dizer que se foi trabalhado pegando médias dos índices dos poluentes por um período de tempo de cerca de 20 segundos para cada teste.

A ordem dos testes foi feita da seguinte forma com os combustíveis:

1º - Uso de etanol alternando baixa e alta rotação;

2º - Uso da mistura gasolina+etanol alternando baixa e alta rotação;

3º - Uso de gasolina alternando baixa e alta rotação.

Os cálculos referentes aos gráficos obtidos foram realizados através da versão de estudante do programa de estatística MINITAB. Este contém no seu pacote de ferramentas aquela necessária para se obter informações de um planejamento experimental fatorial, como o que foi aqui realizado. É necessário somente entrar com os dados e pedir que este apresente as informações que forem de interesse do seu usuário (MINITAB, 2017).

Os resultados contidos neste trabalho foram obtidos em um mesmo dia de teste, tendo a mesma temperatura ambiente para todos os combustíveis. Outros mais foram realizados em outras ocasiões, mas seus resultados foram somente para reprodução.

O procedimento utilizado para a avaliação dos resultados de emissões deste trabalho não deve servir de base para certificação no controle de poluição, pois não segue os padrões determinados pela legislação vigente. Porém, estes se demonstram confiáveis o suficiente para analisar as variações do comportamento do motor em relação aos elementos poluentes, realizando as alterações dos combustíveis e variando a rotação deste.

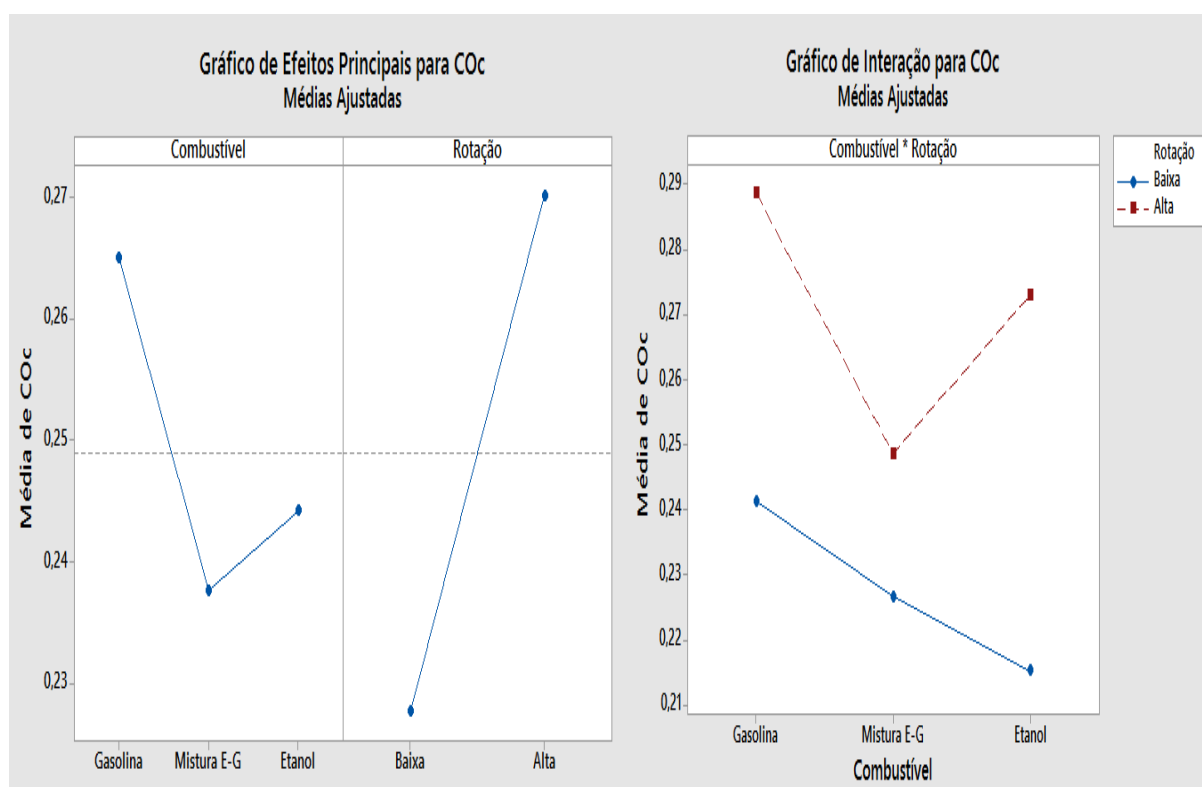
4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os dados, uma vez coletados, foram registrados em planilhas, e gráficos foram montados para melhor representação do comportamento às variações estipuladas no procedimento.

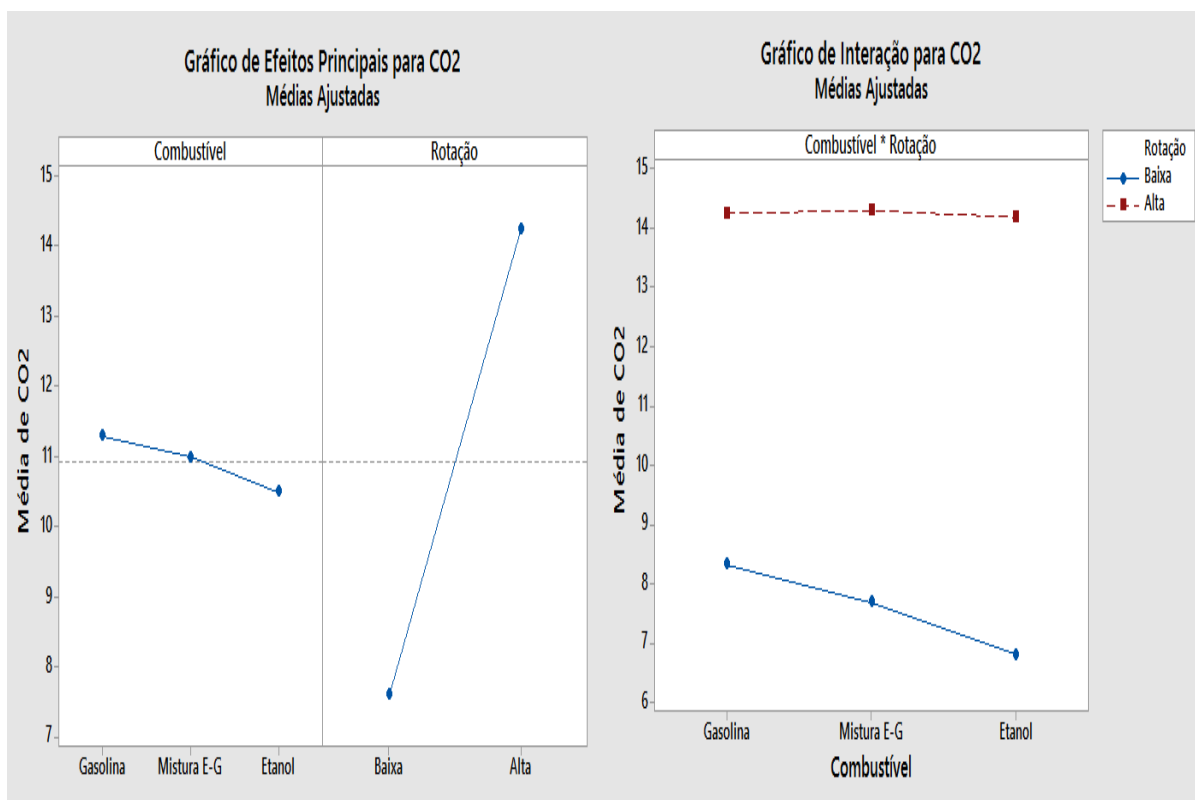
É importante alertar que os números apresentados para a análise são referentes às médias dos índices medidos dos poluentes. Os valores coletados tempo a tempo em cada um dos testes estão apresentados nos anexos, localizados no fim deste trabalho.

Os gráficos de efeitos principais e de interações foram obtidos a partir de cálculos realizados pelas ferramentas de estatísticas do programa MINITAB.

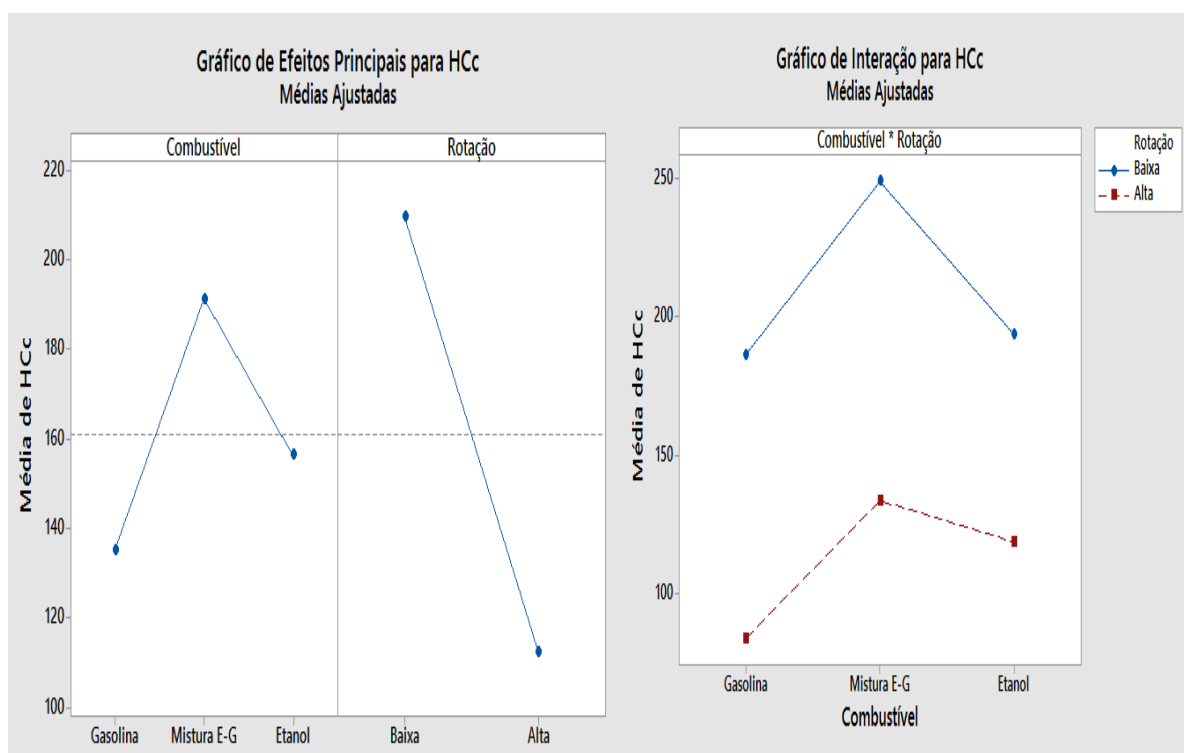
Pode-se verificar os gráficos de efeitos principais e de interações para cada poluente a seguir:



Gráficos 4.1 e 4.2 - Efeitos principais e interações para CO
Fonte: AUTOR PRÓPRIO



Gráficos 4.3 e 4.4 – Efeitos principais e interações para CO₂
Fonte: AUTOR PRÓPRIO



Gráficos 4.5 e 4.6 – Efeitos principais e interações para HC
Fonte: AUTOR PRÓPRIO

Como pode ser observado nos gráficos, em sua interpretação, pode-se dizer que a rotação foi a variável que teve mais influência nos testes para todos os poluentes, pois apresenta a maior variação quando comparada com a influência dos combustíveis.

Em relação à interpretação dos gráficos de interações, é verificado as seguintes situações:

- Maior emissão de CO: gasolina e alta rotação;
- Menor emissão de CO: etanol em baixa rotação;
- Maior emissão de CO₂: mistura de etanol e gasolina em alta rotação;
- Menor emissão de CO₂: etanol em baixa rotação;
- Maior emissão de HC: mistura de etanol e gasolina em alta rotação;
- Menor emissão de HC: gasolina em baixa rotação.

Uma análise mais estatística dos resultados não será realizada neste trabalho, uma vez que, necessita de uma discussão mais aprofundada nos dados.

As seções a seguir apresentam uma análise mais detalhada feita sobre as emissões de cada um dos elementos poluentes.

4.1 Emissão de Monóxido de Carbono - CO

O Gráfico 4.7 demonstra o comportamento das emissões de monóxido de carbono CO (corrigido) na variação dos combustíveis, em alta e baixa rotação:

Primeiramente observado, os valores referentes à emissão de CO se encontram dentro dos limites máximos estipulados pela Resolução CONAMA 418/09, detalhados na Tab. 2.4. Os limites estabelecidos de 0,5% em volume para motores flex, fabricados para o ano de 2010, são respeitados utilizando quaisquer um dos combustíveis em qualquer uma das rotações do procedimento (mesmo não utilizando a padrão de regime acelerado de 2500 RPM).

Destaca-se também, a obediência ao gráfico da Fig. 2.2, correspondente à variação da composição dos gases de escape em função da composição da mistura (BRUNETTI, 2012).

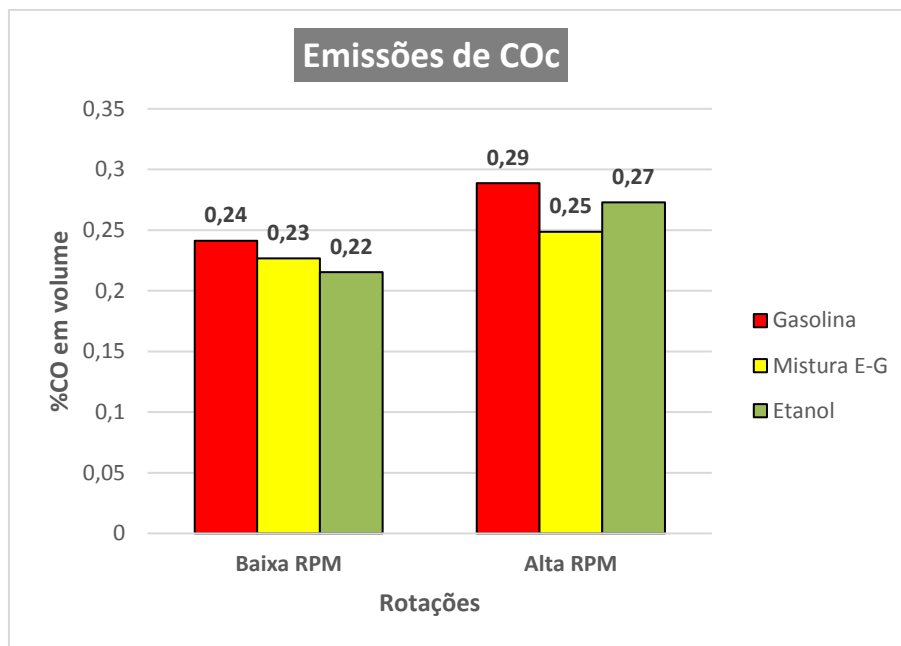


Gráfico 4.7 – Resultado de emissões de CO
Fonte: AUTOR PRÓPRIO

Para baixa rotação, a válvula borboleta (que permite a entrada de ar) está mais fechada do que quando o motor é acelerado. Desta forma, uma quantidade menor de ar, e uma compatível de combustível, é enviada à câmara de combustão. Menos combustível (e presença de CO na mistura ar+combustível) resulta em uma quantidade menor da emissão de CO pelo escapamento. O contrário acontece quando o motor é acelerado em plena carga, pois uma quantidade maior de ar, devido à abertura quase completa da válvula borboleta, permite que uma quantidade de combustível maior seja injetada na câmara, representando assim, uma probabilidade maior de hidrocarbonetos que não entraram em combustão por completo apresente-se como CO e seja emitido pelo escapamento. Este acontecimento pode estar relacionado ao fato do menor tempo de o combustível entrar em combustão em maiores velocidades do motor. Importante destacar também é que os testes foram realizados medindo a partir do escapamento, sendo pós tratamento do catalisador, o qual tem sua eficiência diminuída caso a mistura apresente-se fora da estequiometria, influenciando os dados.

Importante notar que o comportamento da emissão de CO apresentou uma variação (mais visível em alta RPM) quando houve a troca de combustível. É observado que a quantidade emitida na utilização da gasolina é maior do que no uso dos demais.

O etanol hidratado, denominado combustível oxigenado, tem em sua composição o oxigênio, como foi visto na Tab. 2.2. Quando este é misturado à gasolina, o oxigênio presente consegue reagir com todo o carbono (maior parte proveniente da gasolina), indicando uma combustão mais completa, com uma quantidade maior de CO presente no combustível sendo oxidada.

O fato do uso do etanol apresentar uma emissão de CO menor do que a gasolina pode também ser explicado pela sua composição. Pode-se ver na Tab. 2.2 que a quantidade de carbono na composição da gasolina é maior do que a encontrada no etanol, aumentando a possibilidade de restar mais destes nos gases do escape

4.2 Emissão de Dióxido de Carbono - CO₂

As emissões de CO e CO₂ foram realizadas através do princípio de medição mais adequada para estas, a partir do método de detectores de raios infravermelhos não dispersivos (NDIR) oferecido pelo equipamento. O Gráfico 4.8 apresenta qual foi o comportamento das emissões de CO₂ para as variações dos parâmetros combustível e rotação.

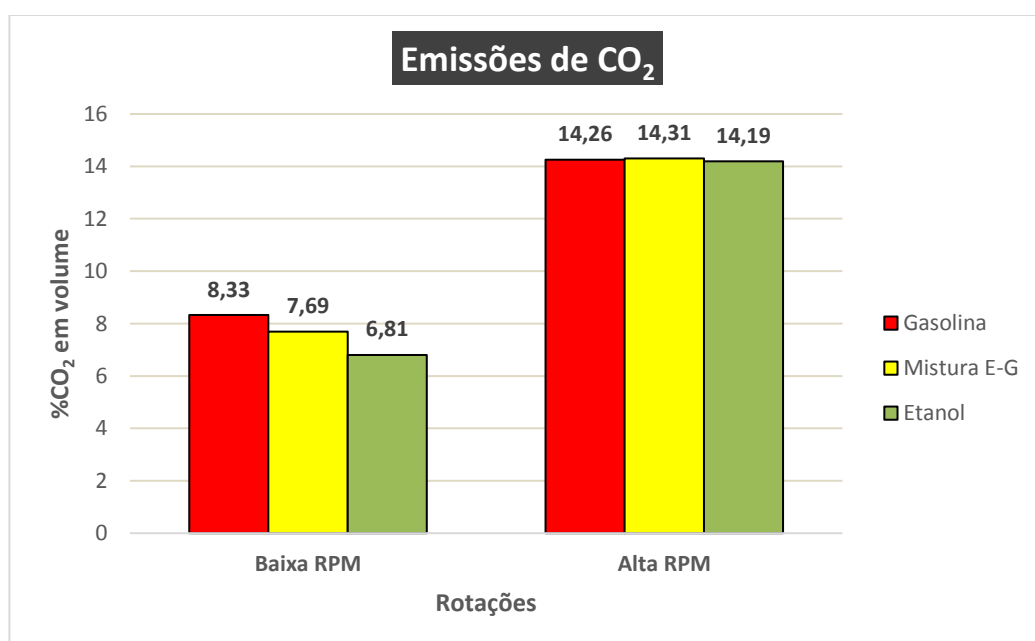


Gráfico 4.8 – Resultado de emissões de CO₂
Fonte: AUTOR PRÓPRIO

Como já mencionado na Seção 2.5, não há limites definidos para a emissão de CO₂ para motores de combustão interna. O que se vem planejando de ser aplicado nos anos futuros, ainda vem se tornando tema de diversas discussões ao redor do mundo para conseguir reduzir as possíveis ocorrências do envio demasiado deste poluente para a atmosfera. O mais importante do que se pode notar na avaliação deste trabalho é a correspondência em seu comportamento em relação a outro elemento poluente (especificamente o CO).

O comportamento observado da emissão de CO₂ apresenta algo semelhante ao que foi visto no gráfico da emissão de CO, principalmente em baixa rotação. É verificado que a emissão em baixa rotação é menor comparada com a alta. Isto se deve ao fato da abertura da válvula borboleta ser menor comparada à alta, comandando uma menor quantidade de combustível para dentro da câmara de combustão, assim como discutido na seção anterior.

O importante de notar no comportamento das emissões em alta é a correspondência do aumento de CO₂ quando houve o acréscimo de etanol na gasolina. É um comportamento contrário da emissão de CO visto na seção anterior. Este fato é melhor explicado quando se diz que a quantidade maior de oxigênio presente na câmara de combustão, mencionado anteriormente na análise de CO, se torna suficiente para oxidar uma maior quantidade de CO presente no combustível.

A menor emissão de CO₂ pelo uso de etanol quando comparado ao de gasolina também é explicado pelo fato de que, em sua composição, este apresenta uma porcentagem menor de carbono.

4.3 Emissão de Hidrocarbonetos – HC

Como mencionado, o princípio de medição para hidrocarbonetos foi o mesmo utilizado para as emissões de CO e CO₂ (NDIR), fornecido pelo aparelho, sendo suficiente para obter resultados para a discussão deste agente.

O Gráfico 4.9 demonstra o comportamento das emissões de hidrocarbonetos perante as variações de combustíveis e rotações.

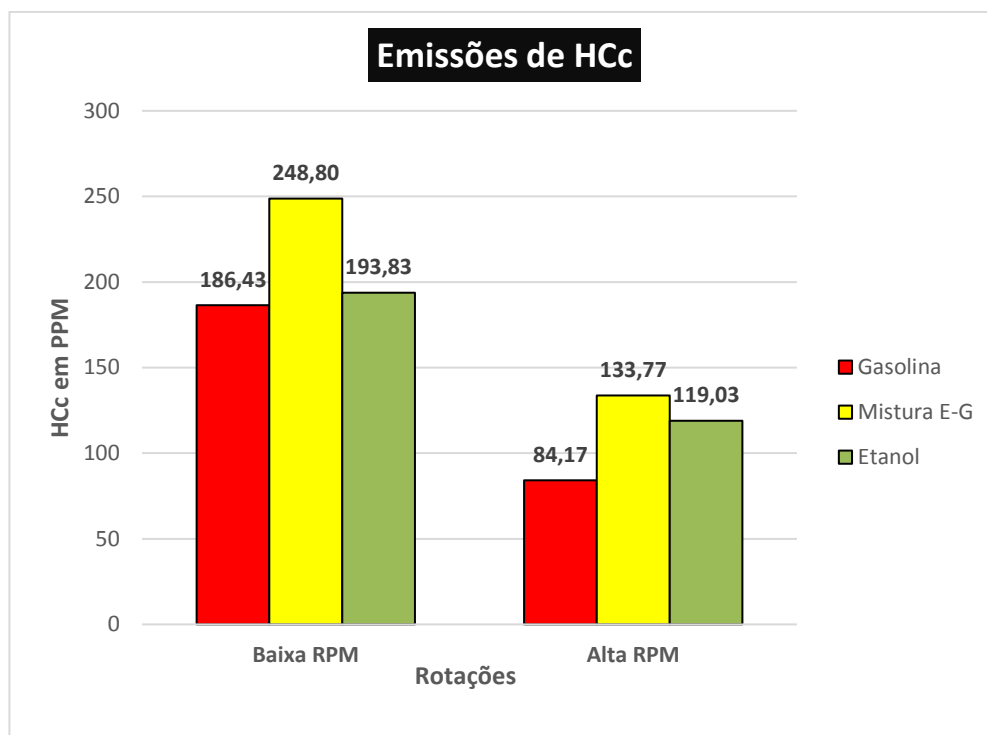


Gráfico 4.9 – Resultado de emissões de HC
Fonte: AUTOR PRÓPRIO

Comparando estes resultados com os limites na Tab. 2.5, observa-se que os limites de hidrocarbonetos estipulados pela Resolução CONAMA 418/2009 são excedidos pela média dos valores coletados. Enquanto a resolução estabelece o limite de 100 PPM de hidrocarbonetos no volume de gás de escape, já corrigidos, para motores flex fabricados no ano de 2010, vê-se que índices acima desse valor aparecem para o uso de todos os combustíveis em baixa rotação e para o uso da mistura (gasolina e etanol) e etanol em alta rotação, variando entre 119 e 248 PPM.

Verifica-se a partir do gráfico que a emissão de hidrocarbonetos apresenta uma redução nos seus índices em alta rotação quando comparado com os de baixa. É um resultado contrário verificado no comportamento da emissão de CO e CO₂ discutidos nas seções anteriores.

Como mencionado por Brunetti (2012) e verificado no gráfico da Fig. 2.3, vê-se que a mistura, tornando-se mais rica pelo fato de estar se enviando mais combustível para acompanhar a massa de ar que adentra na câmara com motor acelerado, teria no processo pós-combustão uma emissão de HC semelhante ao que se ocorre com CO, ou seja, uma elevação. Porém, em tão altas rotações a turbulência criada dentro da câmara de combustão promove uma propagação mais

rápida da chama, acelerando a reação e aumentando a temperatura final dos gases (SOUZA, 2016) . Como mencionado na Seção 2.4, uma temperatura maior dos gases pode contribuir para a oxidação dos hidrocarbonetos não queimados antes na combustão, diminuindo assim o seu índice de emissão. Este fato, porém, deve ser melhor verificado realizando medições de temperaturas dos gases de escapes, o que não esteve presente no escopo deste trabalho.

Um trabalho realizado por Carvalho (2011) teve em sua abordagem a temperatura dos gases de escape relacionado à diferentes combustíveis. O teste foi realizado utilizando um sensor termopar acoplado na saída do escapamento de um motor da fabricante GM, modelo Powertrain. Os combustíveis utilizados foram a gasolina comum tipo C (E25), etanol anídrico combustível (AEAC), etanol hidratado combustível (AEHC), mistura de 50% de gasolina pura tipo A com 50% de etanol anídrico (E50), mistura de 75% etanol anídrico com 25% gasolina pura tipo A (E75) e gás natural veicular (GNV).

Os resultados de Carvalho (2011) foram apresentados através do seguinte gráfico visto na Fig. 4.1.

O que foi constatado por Carvalho (2011) apresentando tal estudo foi que a gasolina, ao receber uma porcentagem de etanol em sua composição, passou a emitir gases com temperaturas menores. Pode-se verificar que a mistura E25 relacionada à gasolina comum e semelhante à usada neste trabalho apresenta temperaturas maiores do que a da mistura E50 que recebeu um percentual de etanol em sua composição.

Observando as emissões de hidrocarbonetos do Gráfico 4.1 perante às variações realizadas de combustíveis, um ponto interessante é a maior emissão de hidrocarboneto com o uso da mistura, tendo o índice mais alto nas baixa e alta rotações, seguida pelo etanol e gasolina.

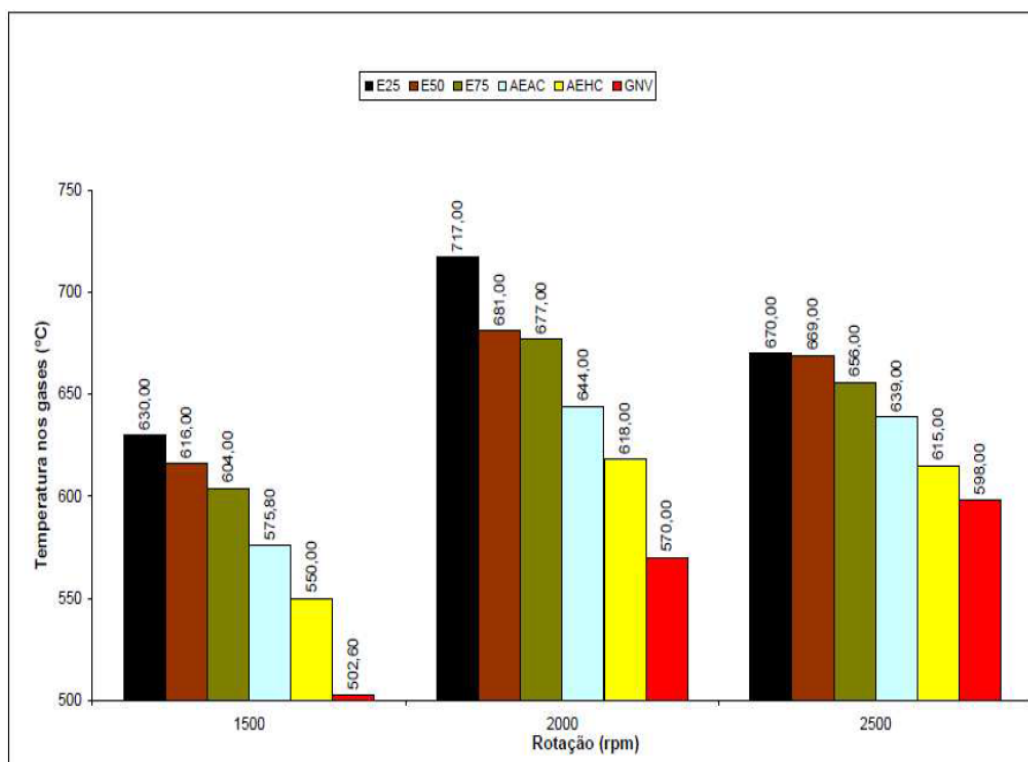


Figura 4.1 – Comparação das temperaturas dos gases de escapes de diferentes combustíveis
Fonte: CARVALHO (2011)

Vê-se que este trabalho e ao que é apresentado por Carvalho (2011) tem um ponto comum. Quando se tem uma temperatura menor dos gases de escapes, consequente desta mistura, um índice maior de hidrocarbonetos ainda remanescentes da combustão tem dificuldade de entrar numa reação de oxidação, permanecendo até serem coletados pelo aparelho utilizado para medição de gases. Isto explica de fato, a maior emissão de hidrocarbonetos pelo uso da mistura gasolina-etanol.

Outra situação vista é a maior emissão de hidrocarbonetos por parte do etanol quando comparada à emissão proporcionada pelo uso da gasolina. Isto pode ser ligado ao fato da temperatura dos gases na combustão do etanol ser menor. Assim, mais hidrocarbonetos presentes no etanol permanece até na saída do escapamento. A composição do etanol também contribui para que o índice de emissão de hidrocarboneto seja maior, uma vez que, elementos de sua constituição (ex: etano) são considerados hidrocarbonetos de menor peso, e são emitidos pelo escapamento quando não queimados. Vê-se no gráfico da Fig. 2.11 como, historicamente, a emissão de HC foi maior nos motores que trabalham exclusivamente com etanol quando comparado com os que funcionam à gasolina.

Caso este trabalho fosse realizado visando a aprovação do motor de estudo, este seria impedido de funcionar nas vias nacionais, isto devido a extrapolação do limite de hidrocarbonetos. Porém, como já mencionado, o procedimento de avaliação dos gases realizado aqui não segue padrões estabelecidos para qualquer certificação, não servindo de parâmetro para reprovar o motor. Além disto, pode-se listar fontes possíveis de terem fornecidos tais resultados que, até melhor análise, apresentam resultados incompatíveis com o ideal.

4.4 Fontes de Incerteza Quanto à Precisão dos Resultados

Este trabalho foi realizado seguindo uma ordem de testes que visou facilitar a execução e reduzir o seu tempo, atingindo a quantidade de dados necessárias para a análise do comportamento das emissões, perante a variação dos combustíveis.

Os dados aqui divulgados são referentes a um único dia de testes. Porém, outras rodadas de testes foram executadas em dias diferentes, tendo seus resultados observados somente para comparação.

A vantagem de ter realizado os testes em um único dia é a condição igualitária das características do ar e temperatura ambiente para as diferentes utilizações de combustíveis. Se tem então, características tais como a densidade do ar, importante para o controle da massa de combustível injetada no motor, semelhante para combustão no uso de etanol, gasolina e a mistura gasolina-etanol.

Porém, pode-se listar aqui algumas fontes que podem ter interferido nos resultados obtidos e divulgados neste trabalho, sendo aqui reconhecidas as seguintes:

- **Condições do aparelho analisador de gases:** Este aparelho, com uma utilização regular no laboratório de motores, apresenta falhas na manutenção preventiva. A data limite para uma calibração mais técnica, realizada pelo fornecedor deste equipamento, está extrapolada por um período que ultrapassa anos. A falta de calibração em qualquer equipamento de medição pode significar a incerteza de precisão nos dados coletados. Além disto, algumas funções importantes do aparelho se apresentaram comprometidas, como exemplo: sonda coletora de

gases, manopla de encaixe no escapamento, filtros coletores de água (condensadores) e partículas indesejadas, tubulações e outros. Na utilização do equipamento, o aviso de que a sonda estava com o prazo limite de substituição ultrapassado era apontado no layout de apresentação dos dados no computador. O sinal vermelho no estado do componente apontava este problema (ver Fig. 4.2). A manopla para posicionamento e fixação do sensor coletor de gases apresentava certas avarias que dificultavam a melhor colocação no equipamento. Alguns reparos tiveram que ser feitos neste componente durante o tempo que foi utilizado para o desenvolvimento deste trabalho, o que atrasou alguns testes e foi motivo de descarte de alguns dados. Obteve-se informações de que os filtros (que também necessitam ser trocados após um tempo de uso) estavam conectados no aparelho por um longo período, não tendo sido substituídos. O estado dos filtros comprometidos pode ter permitido que substâncias indesejáveis influenciassem na análise dos gases. A tubulação que leva os gases coletados para dentro do aparelho já se encontrava utilizada. O manual do equipamento alerta que este componente deve passar por um processo de limpeza, pois hidrocarbonetos podem ficar impregnados ao longo do seu comprimento. Para reduzir o efeito deste problema, o aparelho foi colocado em funcionamento por um determinado tempo, com o coletor de gás ao ar livre e longe da posição onde estava o motor, de modo a reduzir o índice de hidrocarbonetos com a passagem de ar mais limpo. Além disto, ar comprimido foi injetado na tubulação para forçar a limpeza, protegendo outros componentes como filtro e sensores). Contudo, houve um momento onde foi preciso substituir a tubulação por outra para verificar a certeza dos resultados. Estes problemas relacionados às condições do aparelho poderiam ter sido evitados, mas alguns destes foram complexos de ser resolvidos dentro do tempo para desenvolvimento deste trabalho, demandando um tempo de inatividade do aparelho e custos fora dos recursos disponíveis para isto.

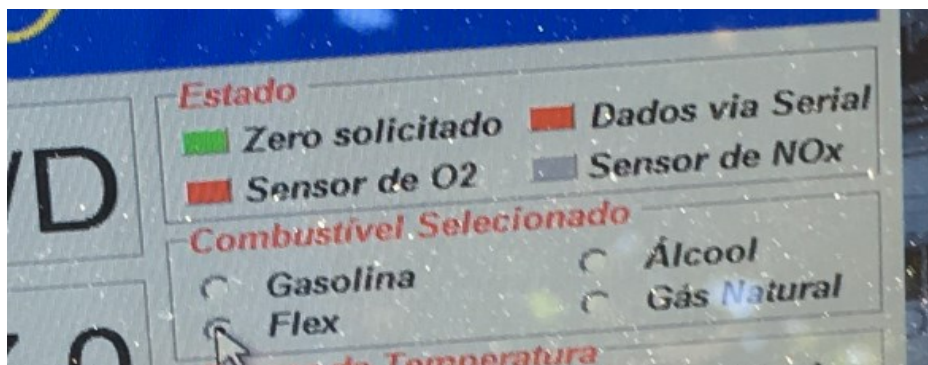


Figura 4.2 – Programa do analisador de gás apontando o sensor de oxigênio comprometido
Fonte: AUTOR PRÓPRIO

- **Execução dos testes:** manter a rotação constante durante a coleta de gases nos cenários aqui propostos foi uma dificuldade que deve ser reconhecida neste trabalho. Este problema foi mais eminente nas rotações em alta, apresentando no tacômetro uma variação de maior índice de ± 70 RPM. A Resolução CONAMA 418/2009 estabelece uma tolerância de ± 200 RPM para regime acelerado do motor em 2500 RPM (ver Seção 2.5), então podendo considerar a variação atingida nos testes, mesmo que em um regime de 5000 RPM, dentro de uma faixa tolerável. Porém, esta variação pode ter apresentado influência na média dos resultados obtidos.
- **Condições do motor dos testes:** o motor localizado no laboratório, mesmo que apresentando uma manutenção realizada pelo técnico responsável, já é um motor que apresenta uma certa quantidade de tempo em funcionamento. Dentro deste tempo, este motor é utilizado para diferentes estudos e demonstrações em aula, variando suas características de funcionamento. Embora em uma escala menor de influência nos resultados aqui obtidos, deve ser alertado de que se trata de um motor que não tem um histórico de funcionamento usual para motores que passam por esse tipo de análise em centros de inspeções. Além disto, o catalisador e outros componentes de tratamento de gases resultantes da combustão podem estar comprometidos, sendo assim uma explicação para os índices alto de hidrocarbonetos.

5 CONCLUSÃO

A análise de gases em motores de combustão interna é importante para se verificar a parcela de contribuição que este vem apresentando nos problemas ocorrentes na saúde humana e degradação do meio ambiente.

Identificar quais problemas são relacionados a cada tipo de fonte de energia utilizada para movimentar nossos veículos é importante para que haja aprimoramentos nos projetos do sistema de geração e transmissão de potência, como também, do sistema de tratamento de resíduos, frutos da combustão destas fontes.

Os testes realizados no motor Fire, fabricado pela FIAT, pertencente ao grupo dos motores que seguem o princípio do ciclo Otto, teve como objetivo avaliar a emissão dos elementos poluentes monóxido de carbono CO, dióxido de carbono CO₂ e hidrocarbonetos não queimados HC, utilizando três tipos de combustíveis diferentes: a gasolina comum do tipo C, o etanol hidratado combustível e uma mistura que contava com 50% da gasolina tipo C e 50% de etanol hidratado. A avaliação dos poluentes foi feita observando o comportamento do motor perante o uso dos 3 combustíveis em marcha lenta e acelerado.

Em relação à emissão de CO, o motor apresentou estar dentro dos limites estipulados pela resolução CONAMA 418/2009, para o seu ano de fabricação. A emissão de CO aumentou com a elevação da rotação devido a injeção de uma mistura mais rica em combustível, e conseqüentemente, dificuldades de oxidar todos a componentes de CO já presentes no combustível. A menor emissão de CO ficou com o uso da mistura em 50% de gasolina e etanol, uma vez que, o oxigênio presente na composição do etanol favoreceu para uma combustão mais completa. Já na comparação entre etanol e gasolina, o etanol apresentou enviar um índice menor de CO devido à presença menor de carbono em sua composição.

Para o CO₂, não teve nenhum índice utilizado para comparar quanto à legalidade para sua quantidade emitida por falta de limites estabelecidos no país. Na análise quanto à rotação, foi verificado que o comportamento é semelhante ao que apresentou o CO. A emissão aumentou em altas rotações devido ao enriquecimento da mistura ar-combustível com a abertura da válvula borboleta (aceleração). Porém,

em consequência de uma combustão mais completa, a mistura entre etanol e gasolina apresentou o maior índice do CO_2 , um dos elementos primários de uma melhor combustão. Desta forma, observa-se que a emissão de CO e CO_2 é antagônica, com um aumentando quando o outro é reduzido. Comparando o uso entre etanol e gasolina, a mesma explicação da composição do etanol mencionada para o CO vale para compreender a menor emissão de CO_2 na utilização deste combustível.

Na análise quanto à emissão de HC, o motor apresentou índices que extrapolaram o limite estabelecido pela Resolução CONAMA 418/2009, o que, em caso de uma avaliação feita por um órgão de regulamentação legal, este motor se tornaria impedido de equipar um veículo que rodasse nas vias nacionais. Observando a análise perante à rotação, o motor teve sua emissão de HC reduzida em alto RPM, tendo comportamento contrário ao que apresentou os dois outros elementos poluentes analisados neste trabalho. Esta redução se deve a maior temperatura dos gases de escape atingida nesta situação, o que contribui para a oxidação dos hidrocarbonetos remanescentes da combustão. Esta explicação se obteve através de outro trabalho de Carvalho (2011), onde ele obteve uma temperatura maior para os gases emitidos em alta rotação em um motor flex, sendo maior com o uso de gasolina, seguido por uma mistura entre etanol e gasolina. Desta forma, com os dados obtidos neste trabalho e os resultados de Carvalho (2011), é possível se dizer que a redução da temperatura dos gases de escape, a partir da mistura etanol e gasolina, dificulta a oxidação dos hidrocarbonetos remanescentes da combustão, elevando seu índice de emissão para a atmosfera. A composição do etanol (já contendo etano, um tipo de hidrocarboneto de menor peso) e a menor temperatura dos gases de escape favorecem para que a emissão de hidrocarbonetos na utilização deste seja maior do que no uso da gasolina.

Em suma, a gasolina foi o maior emissor de CO, uma mistura entre etanol e gasolina (comum em motores flex) foi o maior em CO_2 , e o etanol (mesmo não sendo o maior) teve uma parcela representativa na contribuição de HC.

Diante do desenvolvimento deste trabalho, fica evidente que há oportunidades de melhorias que podem trazer resultados mais precisos e claros, que eliminem as fontes de incertezas aqui reconhecidas. Algumas destas apontadas aqui são:

- Revisão técnica do equipamento analisador de gases para o torná-lo mais preciso e livre de possíveis erros;
- Testes com uma variedade maior de combustíveis, alterando a porcentagem do etanol adicionado à gasolina;
- Testes utilizando mais faixas de rotações, observando a emissão em cada faixa e traçar curvas de emissões em função das rotações;
- Testes utilizando uma rotação crescente para se obter curvas de rotação x emissão;
- Obter resultados em software como o Fire da AVL, no qual é possível realizar simulações de combustão, exaustão e outros
- Obter resultados utilizando a rotação do motor mais constante;
- Usar a forma mais adequada de se medir a emissão de hidrocarbonetos a partir da quimiluminescência;
- Estudar a emissão de outros tipos de elementos poluentes, como por exemplo: NOx, particulados e outros.

Este estudo aliado com qualquer um destes estudos pode trazer benefícios e avanços nos projetos de motores de ciclo Otto, assim como, trazer melhores características para as fontes de energias utilizadas nestes tipos de motores.

REFERÊNCIAS

ANP AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. **Seminário de Avaliação do Mercado de Combustíveis 2017 (Ano-Base 2016)**. Rio de Janeiro. 2017. Disponível em: <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2017-02/consumo-de-combustiveis-no-brasil-caiu-45-em-2016-segundo-anp>>. Acesso em: 4 mar. 2017.

ANP AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. **RESOLUÇÃO ANP Nº7 DE 9/2/2011 – DOU 10/02/2011**. 2011. Disponível em: <http://www.udop.com.br/download/legislacao/comercializacao/institucional_site_juridico/res_anp_07_amplia_nomenclatura_alcool.pdf>. Acesso em: 23 fev. 2017.

API AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **Alcohols and Ethers, Publication No. 4261**. 3rd ed. Washington DC. June 2001. Tabela B-1.

APPENDINO NUNES, Maria Luísa. **Uso de Espectrometria de Infravermelho nas Aferições de Gases de Efeito Estufa na suinocultura**. Disponível em: <www.esalq.usp.br/departamentos/leb/aulas/lce5702/texto_maria_nunes.doc>. Acesso em: 25 jan. 2017.

APTA. **Sobre Sistemas EGR**. 2017. Disponível em: <<http://www.aptacaminhoes.com.br/proconve-p7-tecnologia.asp>>. Acesso em: 25 jan, 2017.

BIT9. **MCIV10-MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA FLEX**. Disponível em: <http://www.bit9.com.br/index.php?pag=49&sub_pag=56&conteudo=96>. Acesso em: 21 jun. 2017.

BRUNETTI, Franco. **Motores de Combustão Interna**. Volume 1. São Paulo: Bluncher, 2012.

BRUNETTI, Franco. **Motores de Combustão Interna**. Volume 2. São Paulo: Bluncher, 2012.

CARVALHO. Márcio Augusto. **Avaliação de um Motor de Combustão Interna Ciclo Otto Utilizando Diferentes Tipos de Combustíveis**. Salvador: Universidade Federal da Bahia, 2011. 168p. Dissertação.

CARROSNAWEB. **Ficha Técnica: Fiat Pálio ELX 1.0 8V**. Disponível em: < <http://www.carrosnaweb.com.br/fichadetalhe.asp?codigo=3859>>. Acesso em: 21 jun. 2017.

CIMA CONSELHO INTERMINISTERIAL DO AÇUCAR E DO ALCOOL. **Portaria MAPA Nº 75 DE 05/03/2015. Publicado no DO em 6 mar 2015**. 2015. Disponível em: < <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=28177>>. Acesso em: 25 abr. 2017.

CONAMA CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA Nº5 de 15 de junho de 1989. Publicada no DOU, de 25 de agosto de 1989, seção 1, páginas 14713-14714**. 1989. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=81>>. Acesso em: 15 jan. 2017.

CONAMA CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução Nº 418, de 25 de novembro de 2009. Publicada no DOU nº 226 de 26/11/2009, págs. 81-84**. 2009. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=618>>. Acesso em: 12 nov. 2016.

FORMAÇÃO PILOTO. **Os Componentes do Motor**. 2014. Disponível em: < <https://formacaopiloto.blogspot.com.br/2014/08/aeronaves-e-motores-capitulo-viii-os.html>>. Acesso em: 8 ago. 2017.

GASCATAPRETA. **Análise de Gases**. 2017. Disponível em: <<http://www.gascatapreta.com.br/analise-de-gases/>>. Acesso em: 2 jul. 2017.

IBAMA INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Programa de controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE/PROMOT/IBAMA**. 3º ED. Brasília: IBAMA/Diqua, 2011.

IBAMA INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Programa de Controle de Emissões Veiculares**

(Proconve). 2016. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/emissoes/veiculos-auto-motores/programa-de-controle-de-emissoes-veiculares-proconve>>. Acesso em: 16 fev. 2017.

INMET INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA. **Estações Automáticas – Gráficos (pesquisa sobre Uberlândia-MG)**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_auto_graf>. Acesso em: 20 jun. 2017.

INSTRUTHERM, 2017. **Tacômetros Digital: Modelo TD-812**. Instrutherm. 2017. Disponível em: <<http://www.instrumbrasil.com.br>>. Acesso em: 15 jul. 2017.

MARTINS, J. **Motores de Combustão Interna**. 2º ed. Porto: Pubblindústria, 2006.

MENDONÇA, Douglas. **Precisamos Mesmo dos Motores Flex**. Revista Eletrônica: Motorshow, 2017. Disponível em: <<http://motorshow.com.br/precisamos-mesmo-dos-motores-flex/>>. Acesso em: 03 jul. 2017.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários**. Brasília, 2013. 114p. Relatório.

MINITAB. **Características Minitab**. 2017. Disponível em: <<https://www.minitab.com/pt-br/>>. Acesso em: 27 jul. 2017.

NAPRO. **Manual de Operação: NAPRO PC-Multigás**. NAPRO. 2013. 63p. Manual

NOVACANA. **Sobre o Etanol**. 2017. Disponível em: <<https://www.novacana.com/etanol/>>. Acesso em: 25 mar. 2017.

OICA INTERNATIONAL ORGANIZATION OF MOTOR VEHICLE MANUFACTURES. **2016 Vehicle Production Statistics**. Disponível em: <<http://www.oica.net/category/production-statistics/>>. Acesso em: 21 jul. 2017.

PETROBRAS. **Conheça os Benefícios das Novas Gasolinas S-50**. 2014. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/conheca-os-beneficios-das-novas-gasolinas-s-50.htm>>. Acesso em: 11 nov. 2016

PETROBRAS. **Sobre a Gasolina**. 2017. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/produtos-e-servicos/produtos/automotivos/gasolina/>>. Acesso em: 25 mar. 2017.

PORTAL ACTION. **Experimentos Fatoriais 2^K**. 2017. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/planejamento-de-experimento/31-experimentos-fatoriais-2k>>. Acesso em: 20 jan. 2017.

PULKRABEK, Willard W. **Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine**. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2004. Print.

R. STONE; J.K. BALL, 2004. **Automotive Engineering Fundamentals**. SAE International. Warrendale: PA, 2004.

SEIFFERT, U.W.; BRAESS, H.H. **Handbook of Automotive Engineering**. SAE International. Warrendale: PA, 2005.

SENADO NOTÍCIAS. **Carro Fabricado a Partir de 2016 Poderá Ter Limite de Emissão de Gás Carbônico**. 2012. Disponível em: <<http://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2012/11/09/carro-fabricado-a-partir-de-2016-podera-ter-limite-de-emissao-de-gas-carbonico>>. Acesso em: 23 mai. 2017.

SOUZA, Ana Marta de. **Combustíveis. Aula 13 – pg. 14**. 2016. Uberlândia. 54p. Material de estudo

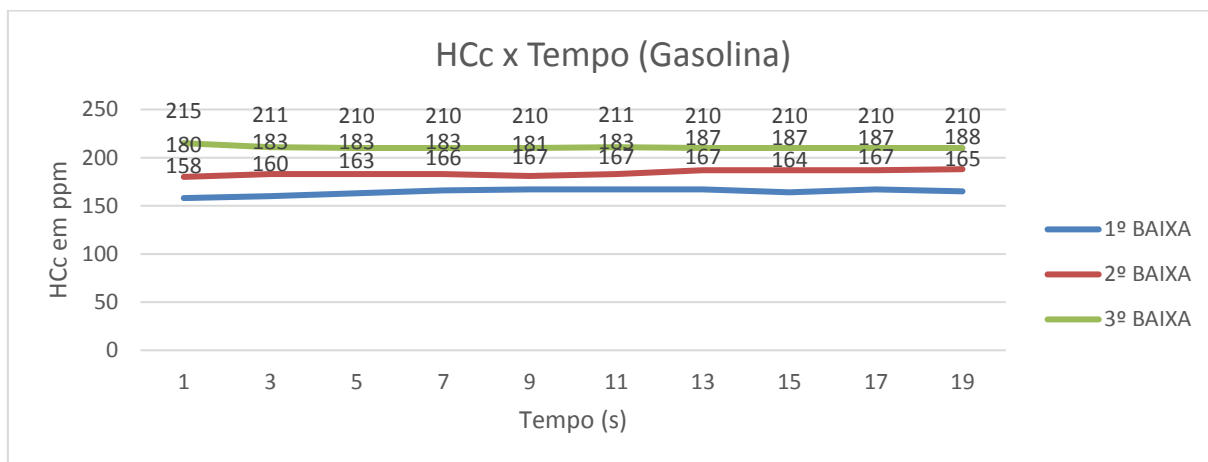
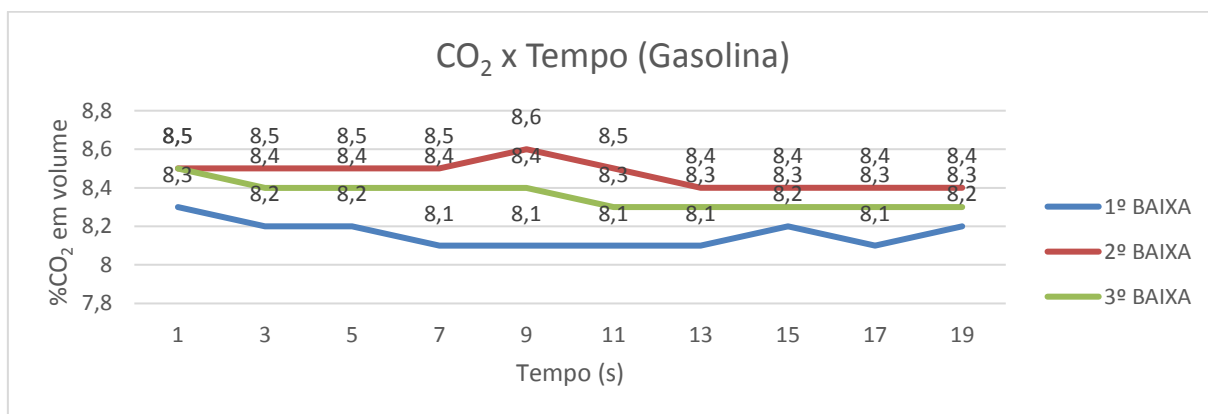
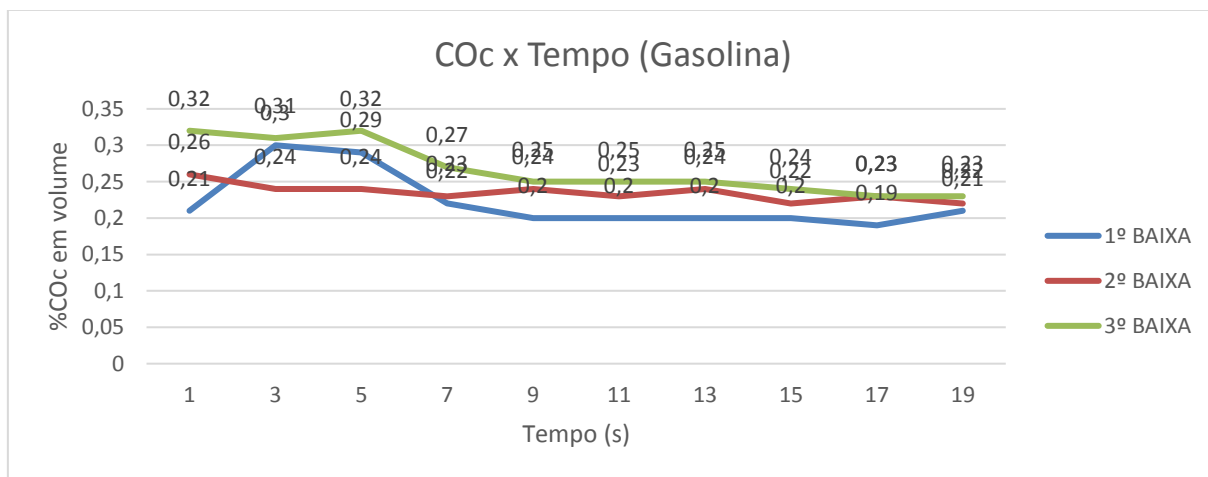
TEIXEIRA, E. C. **O desenvolvimento da tecnologia Flex-fuel no Brasil**. São Paulo: Instituto DNA Brasil, 2005.

UNEA UNITED NATIONS ENVIRONMENTAL ASSEMBLY. **Actions on Air Quality**. Nairobi, Kenya. 2016. Disponível em: <<http://www.ccacoalition.org/en/resources/actions-air-quality>>. Acesso em: 21 jul. 2017.

VARELLA, Carlos Alberto Alves. **Constituição dos Motores**. Seropédica: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2016. 6p. Artigo. Disponível em: <http://www.ufrrj.br/institutos/it/deng/varella/Downloads/IT154_motores_e_tratores/Aulas/constituicao_dos_motores.pdf>. Acesso em: 10 out. 2016.

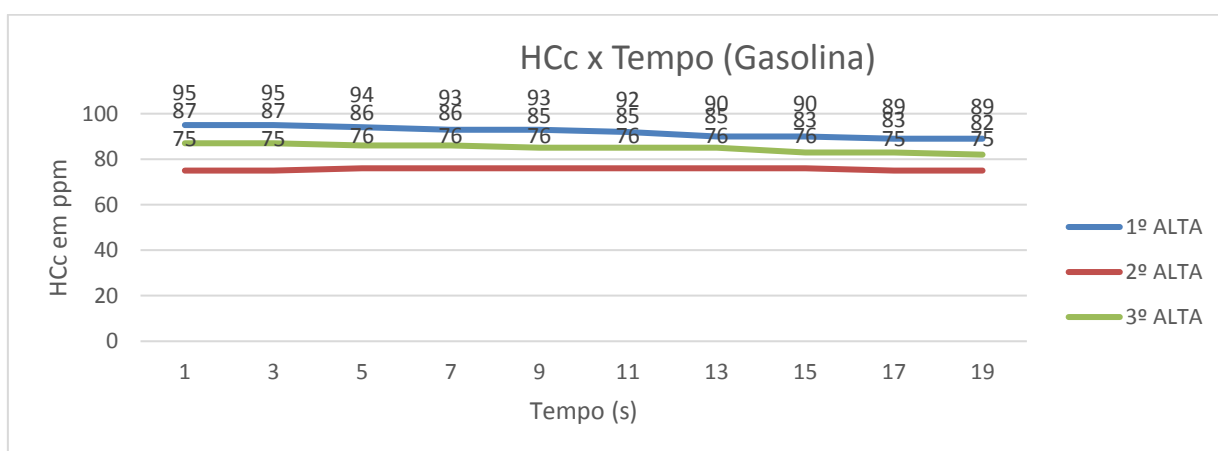
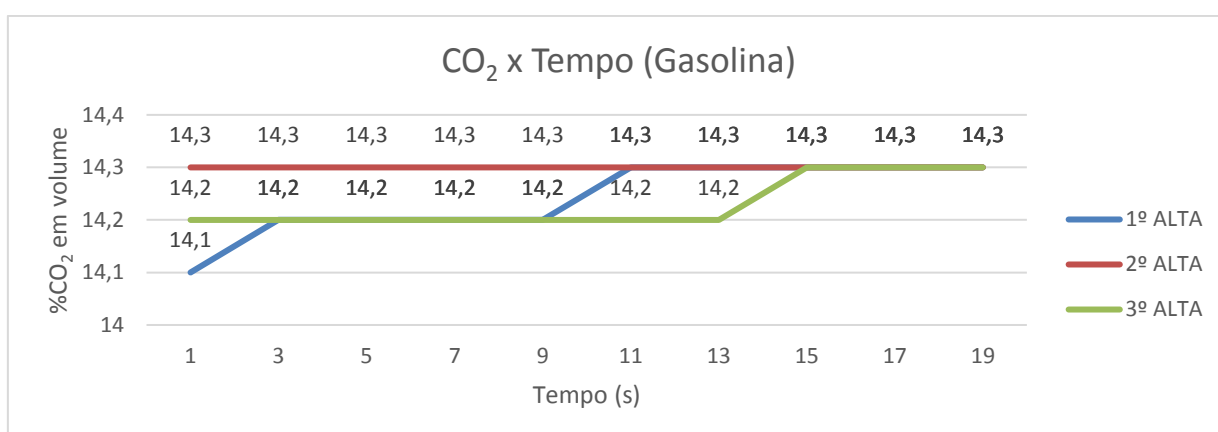
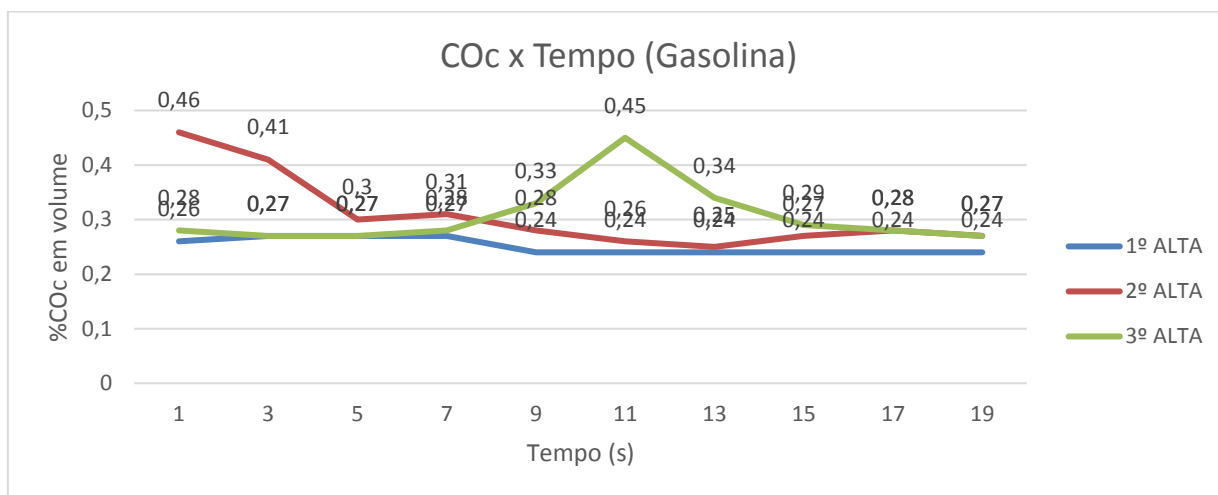
VASCONCELLOS, Eduardo Alcântara de. **Transporte e meio ambiente: conceitos e informações para análise de impactos**. São Paulo: Annablume Editora, 2006

APÊNDICE A – DADO COLETADOS NO USO DE GASOLINA EM BAIXA ROTAÇÃO



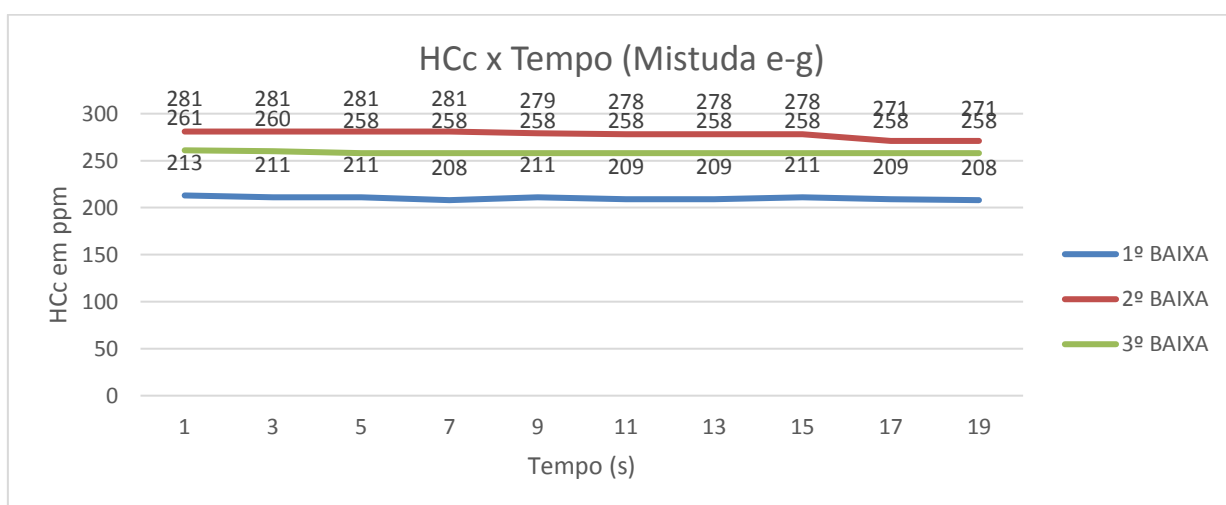
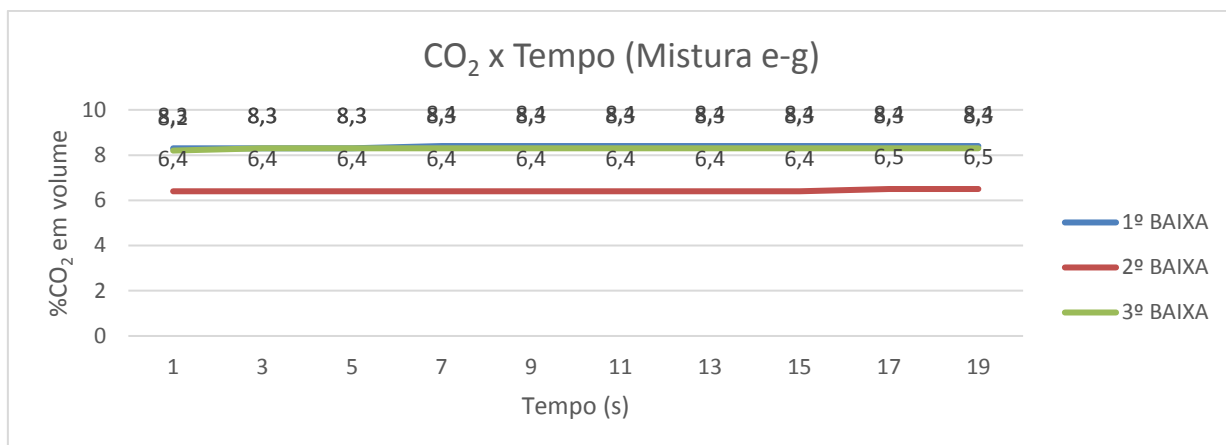
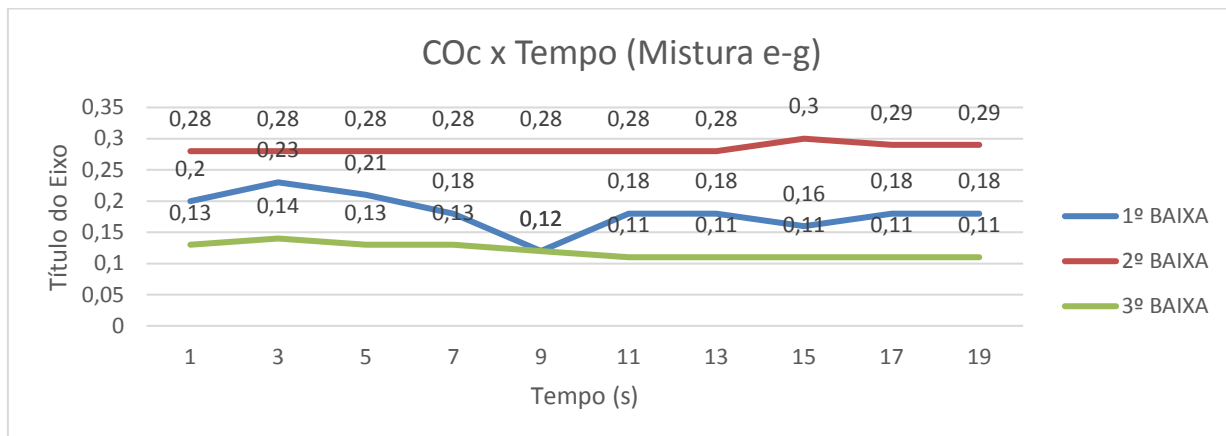
Gráficos A1, A2 e A3 – Dados coletados dos poluentes para o uso de gasolina e em baixa rotação.
Fonte: AUTOR PRÓPRIO

APÊNDICE B – DADOS COLETADOS NO USO DE GASOLINA EM ALTA ROTAÇÃO



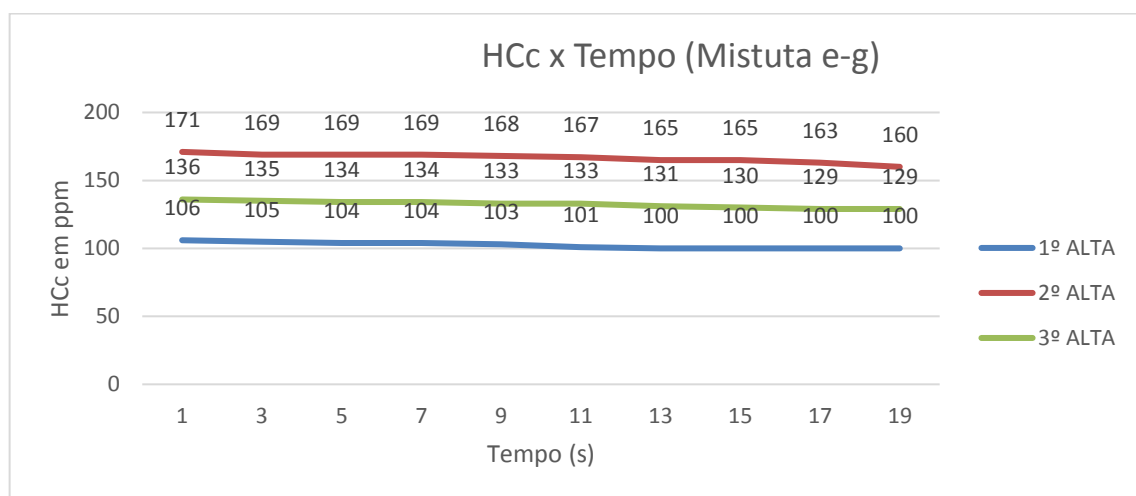
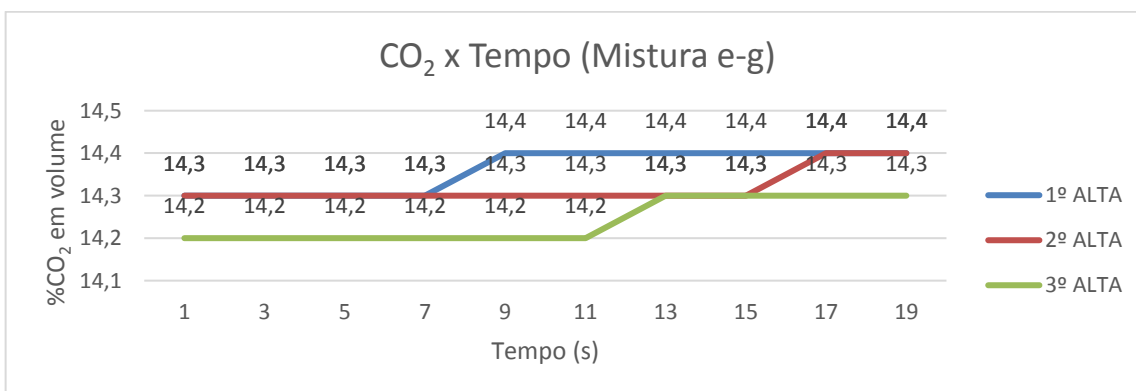
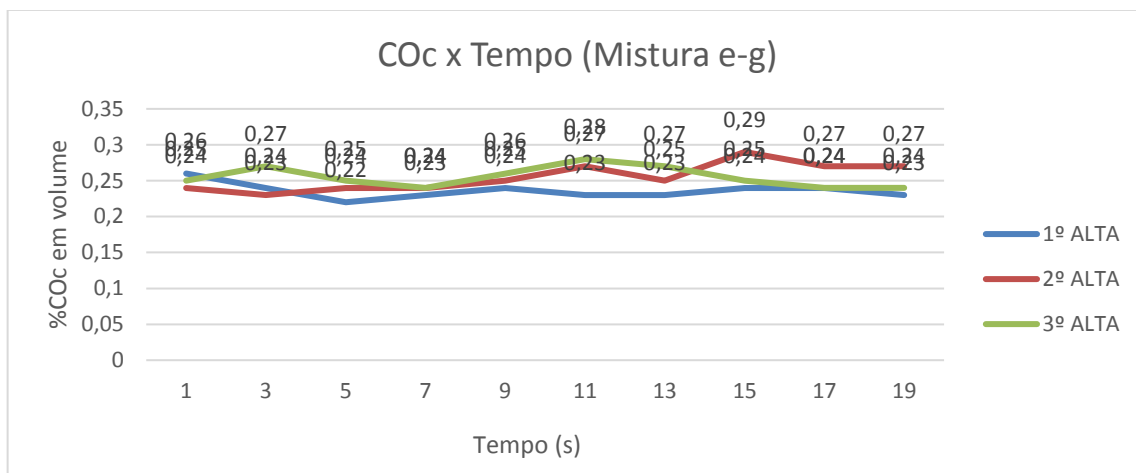
Gráficos B1, B2 e B3 – Dados coletados dos poluentes para o uso de gasolina e em alta rotação.
Fonte: AUTOR PRÓPRIO

APÊNDICE C – DADOS COLETADOS NO USO DA MISTURA ETANOL-GASOLINA EM BAIXA ROTAÇÃO



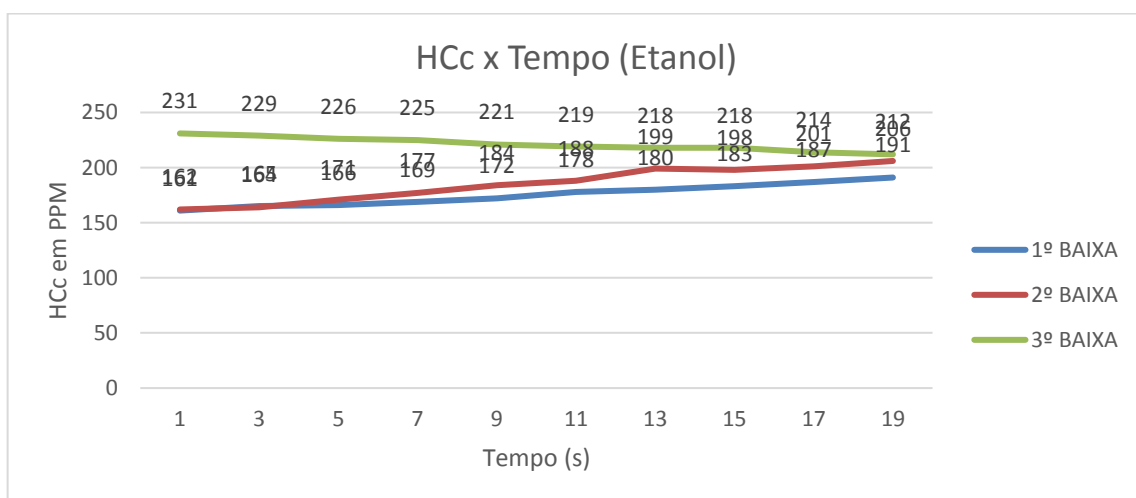
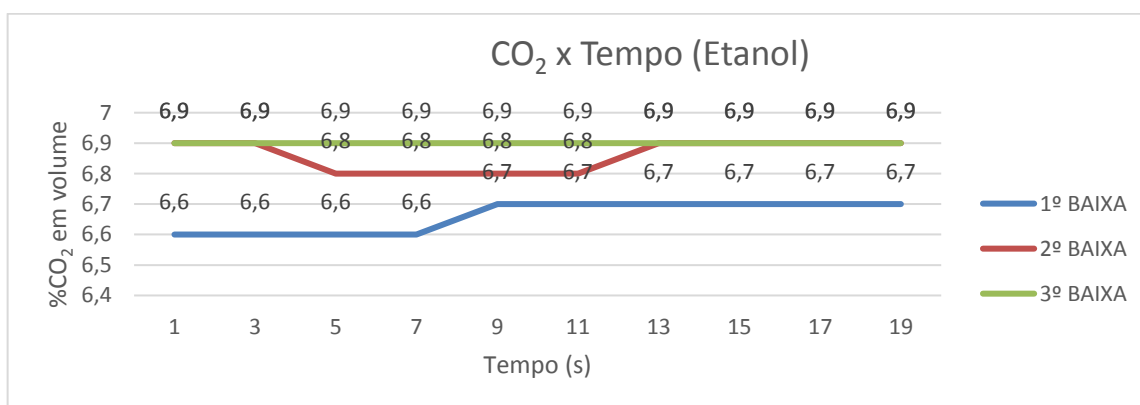
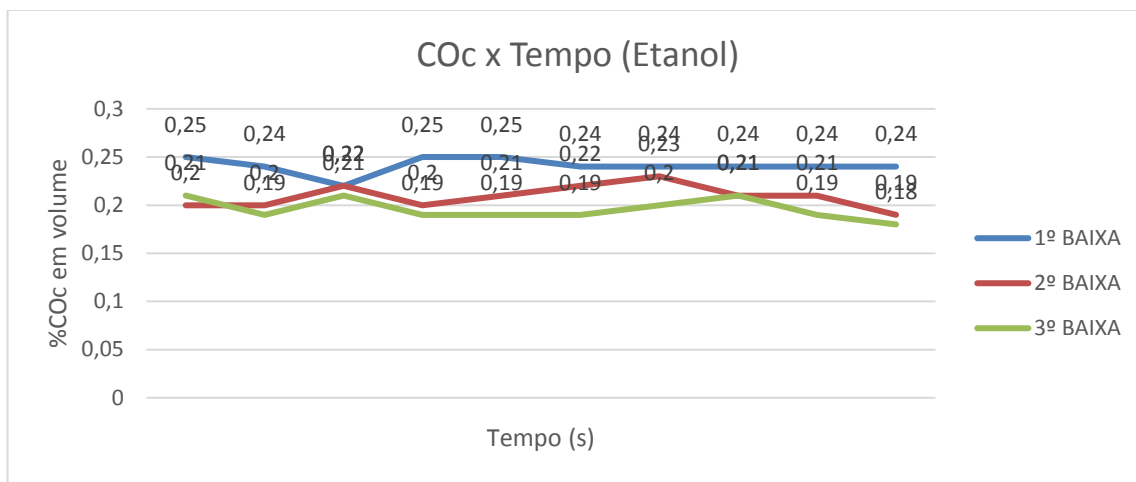
Gráficos C1, C2 e C3 – Dados coletados dos poluentes para o uso de mistura e-g e em baixa rotação
Fonte: AUTOR PRÓPRIO

APÊNDICE D – DADOS COLETADOS NO USO DA MISTURA ETANOL-GASOLINA EM ALTA ROTAÇÃO



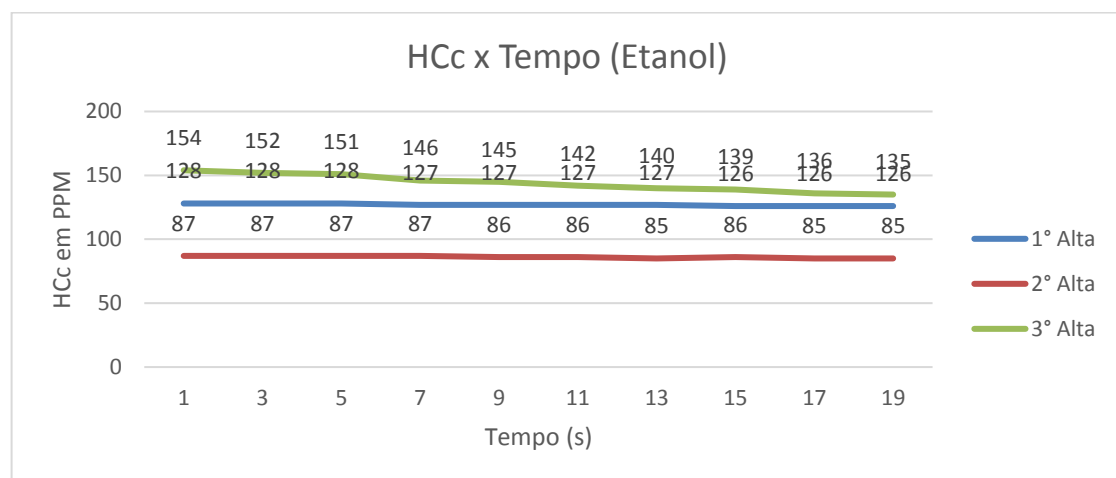
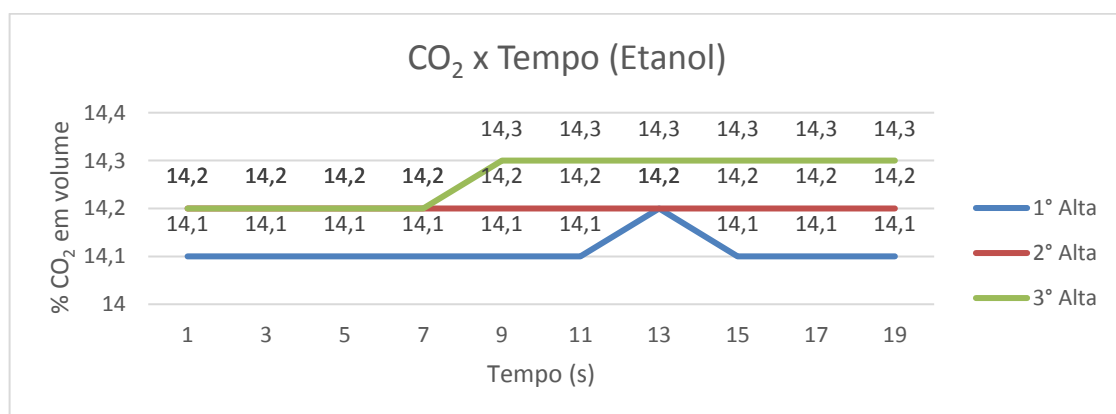
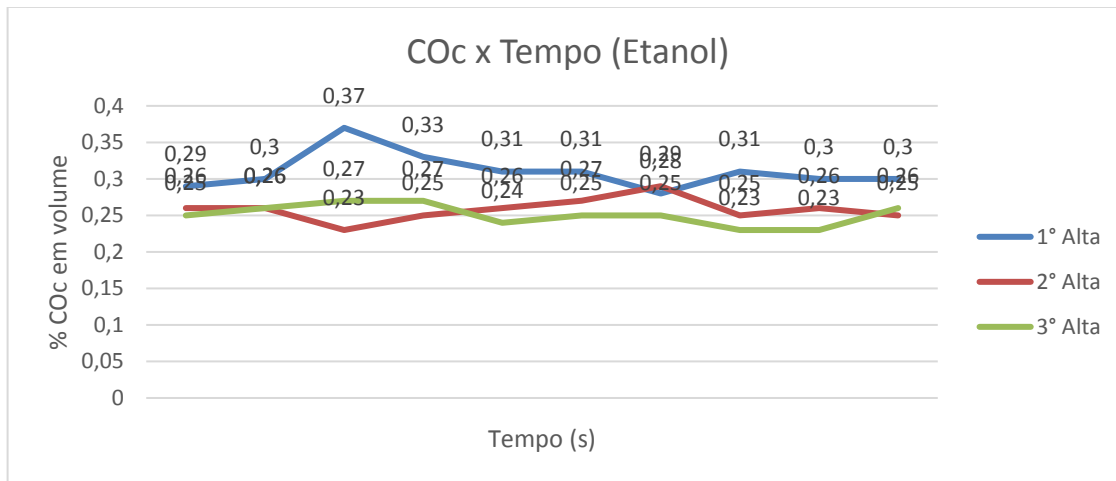
Gráficos D1, D2 e D3 – Dados coletados dos poluentes para o uso da mistura e-g e alta rotação
Fonte: AUTOR PRÓPRIO

APÊNDICE E – DADOS COLETADOS NO USO DE ETANOL EM BAIXA ROTAÇÃO



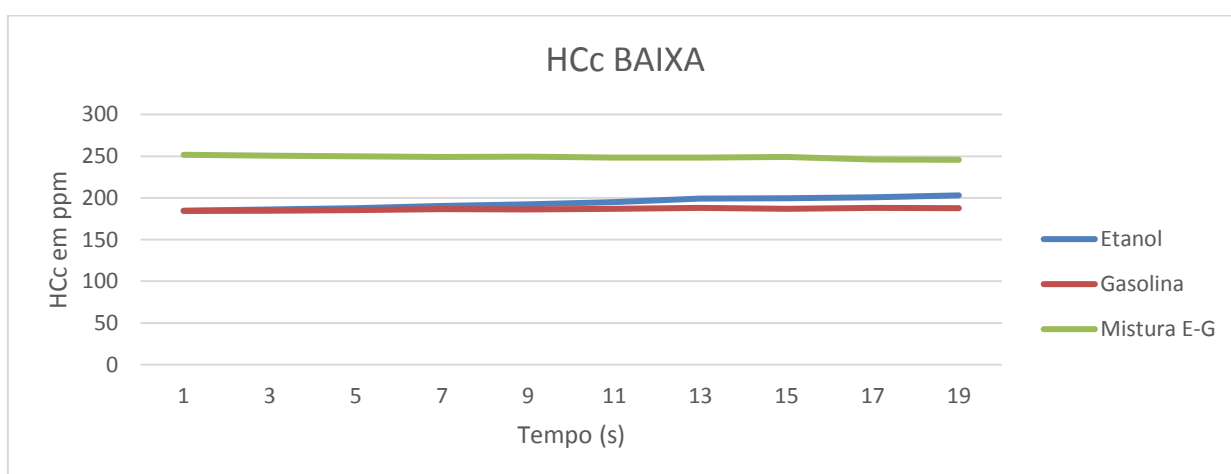
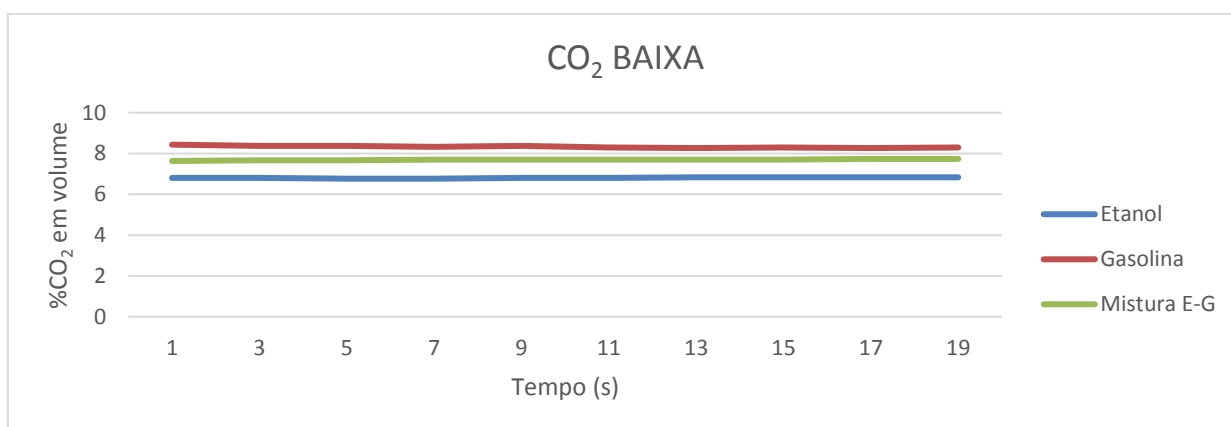
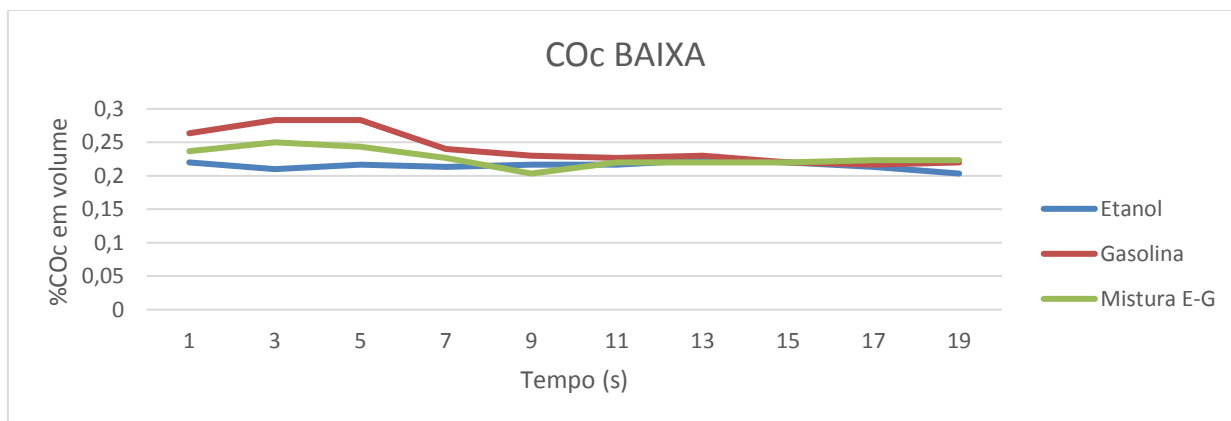
Gráficos E1, E2 e E3 – Dados coletados dos poluentes no uso de etanol e baixa rotação
Fonte: AUTOR PRÓPRIO

APÊNDICE F – DADOS COLETADOS NO USO DE ETANOL EM ALTA ROTAÇÃO



Gráficos G1, G2 e G3 – Dados coletados dos poluentes no uso de etanol e alta rotação
 Fonte: AUTOR PRÓPRIO

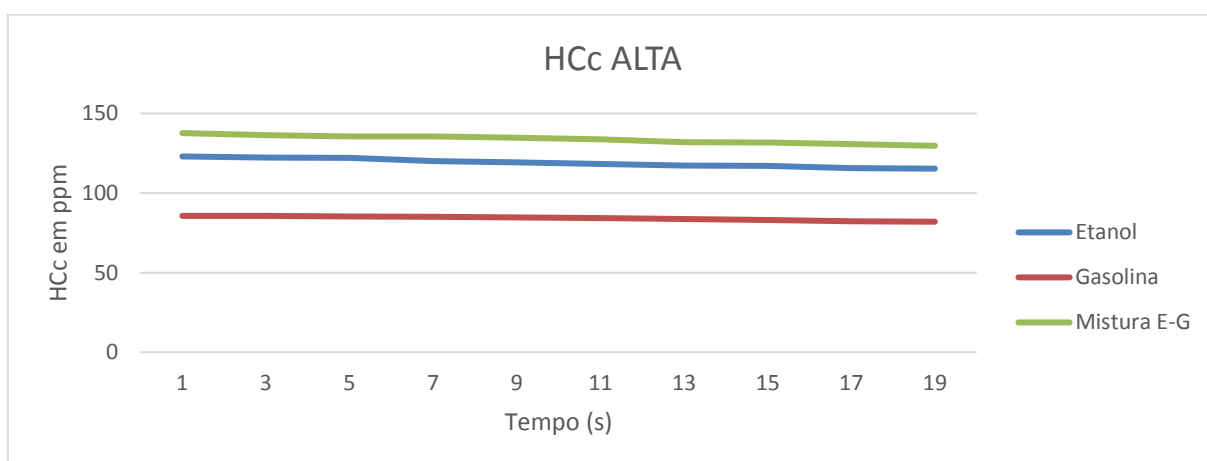
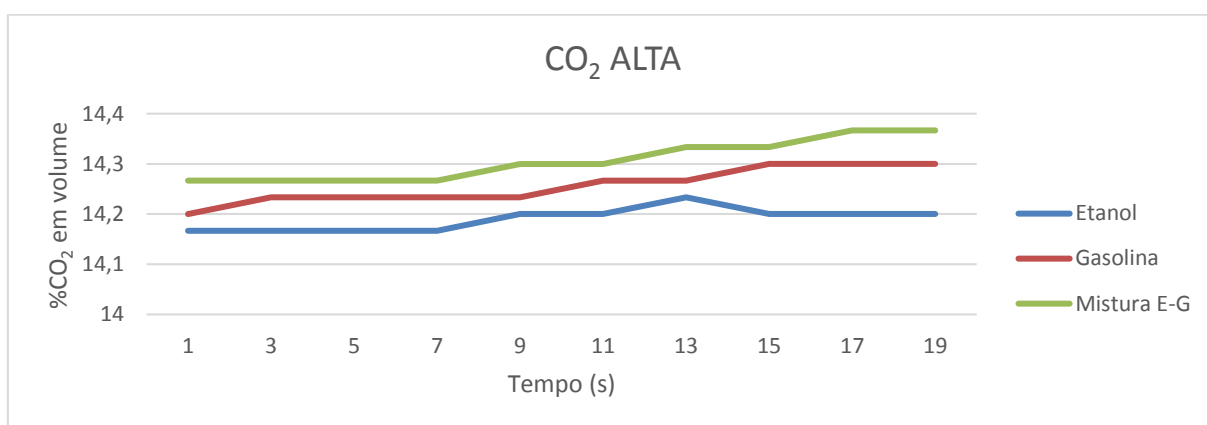
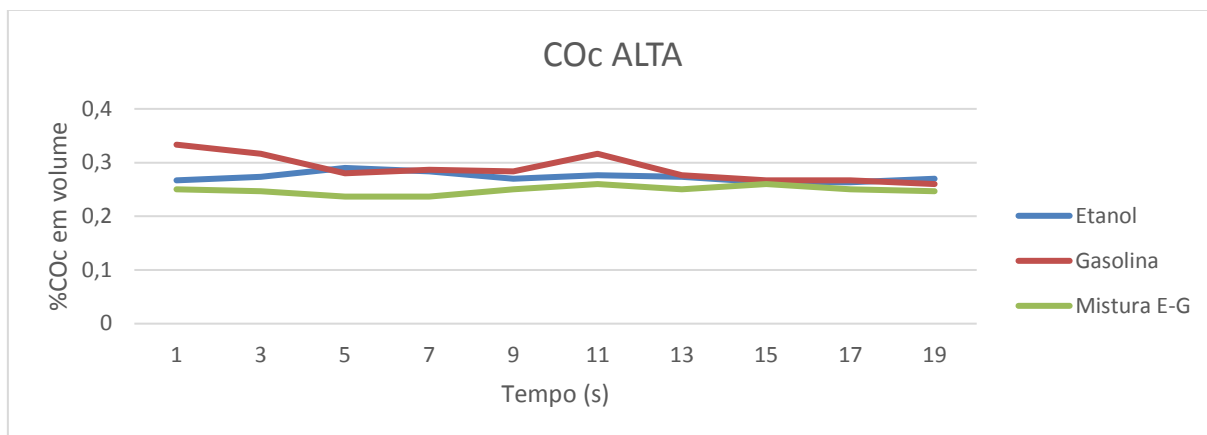
APÊNDICE H – COMPARAÇÃO DAS MÉDIAS TEMPO A TEMPO NO USO DOS COMBUSTÍVEIS EM BAIXA ROTAÇÃO



Gráficos H1, H2 e H3 – Comparação tempo a tempo das médias dos poluentes para cada combustível

Fonte: AUTOR PRÓPRIO

APÊNDICE I – COMPARAÇÃO DAS MÉDIAS TEMPO A TEMPO NO USO DOS COMBUSTÍVEIS EM ALTA ROTAÇÃO



Gráficos I1, I2 e I3 – Comparação tempo a tempo das médias dos poluentes para cada combustível
 Fonte: AUTO PRÓPRIO