



UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS
FACULDADE DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIA



DOURADOS
Thiago Voigtlander Pereira

EMISSÕES DE POLUENTES DURANTE A FASE DE AQUECIMENTO EM UM MOTOR
FLEX UTILIZANDO GASOLINA E ETANOL

DOURADOS/MS

2017

Thiago Voigtlander Pereira

EMISSÕES DE POLUENTES DURANTE A FASE DE AQUECIMENTO EM
UM MOTOR FLEX UTILIZANDO GASOLINA E ETANOL

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à banca examinadora da
Faculdade de Engenharia da Universidade
Federal da Grande Dourados para a
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Ramon Eduardo
Pereira Silva

DOURADOS/MS

2017

*A meus pais José Carlos e Dagmar pelo imenso amor e apoio que me dedicaram para
me tornar um engenheiro.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pois dele vem toda a sabedoria, e sei que aonde quer que eu vá e o que quer que eu faça, ele sempre estará comigo.

Ao meu pai José Carlos Cimatti Pereira por todo o carinho e simpatia, e a minha mãe Dagmar Voigtlander Pereira, que é minha referência de esforço e dedicação. A ambos por tudo que já me proporcionaram e por todo apoio que me deram para alcançar meus sonhos.

A minha companheira Isabella Maria Ferreira de Oliveira, que me acompanha desde o início da minha vida acadêmica e que em momentos felizes e difíceis de minha vida, esteve sempre ao meu lado.

A minha irmã, Leticia Voigtlander Pereira, pela enorme alegria que me proporcionou de ser tio de suas duas filhas (Camila e Lorena). As minhas avós Silvia Voigtlander e Carolina Cimatti Pereira e avô Nilton de Mattos Pereira pela torcida e apoio. Aos meus padrinhos Mário Rubens e Mariley pelo incentivo aos estudos e também a todos demais familiares que me apoiaram nessa jornada.

Ao meu avô, in memoriam, Rolf Voigtlander, que foi o maior influenciador para que eu fizesse faculdade de engenharia.

A instituição Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD, pelo ensino de qualidade que me proporcionou.

A Capes e ao CNPq por todas as bolsas e incentivos a pesquisa dos quais tive acesso e me permitiram desempenhar importante papel na área da ciência.

Ao professor Dr. Ramon Eduardo Pereira Silva, o qual considero além de um ótimo professor, um amigo. E sem o qual este trabalho não seria possível.

A todos os técnicos do Laboratório de Engenharia de Energia, mas em especial à José Carlos Venturin e David Correia da Silva que me conheceram logo no início da vida acadêmica e considero grandes amigos.

A todos aqueles que direta ou indiretamente influenciaram na minha formação e me fizeram crescer como ser humano, amigos, colegas, professores, técnico e terceirizados o meu muito obrigado.

*“A grande conquista é o resultado de
pequenas vitórias que passam despercebidas”*

(Paulo Coelho)

RESUMO

Devido a diminuição das reservas de petróleo e a crescente preocupação com relação ao efeito estufa, cada vez mais países tem voltado sua atenção à bioenergia. E o Etanol, a tempos é utilizado sozinho ou até em mistura com a gasolina com o objetivo de se reduzir a emissão de poluente gerada em motores de ignição por centelha. Na literatura é possível encontrar diversos estudos sobre o uso em motores de misturas de Etanol e Gasolina em diferentes proporções, visando analisar a diferença de performance e reduções de emissão. Entretanto, estes trabalhos se focam em analisar estes efeitos em motores já aquecidos e estáveis. Durante a ignição do motor ciclo Otto, uma mistura rica em combustível é injetada para garantir que a ignição ocorra. Como na partida o motor se encontra a uma temperatura baixa, esse suprimento de combustível a mais acaba por produzir uma grande quantidade de Hidrocarbonetos e de Monóxido de Carbono. Por conta dessa carência que se vê por resultados de emissões durante a fase de aquecimento, e menos ainda resultados utilizando um motor Flex, o presente trabalho tem como objetivo preencher essa lacuna.

Palavras-chave: Motor Flex, Fase de aquecimento, CO, NO_x, HC, Emissões.

ABSTRACT

Due to the decrease of oil reserves and the crescent preoccupation with the global warming, more and more countries turned their attention to the bioenergy. Ethanol, at times has been used alone or with blends with gasoline with the objective to reduce the emissions of pollutants generated in SI engines. In literature, it is possible to find many studies about the applications of Ethanol-Gasoline blends in different proportions in SI engines, analyzing the performance and the emission. However, all of these studies focused in analyzing these effects in warmed and steady engines. During the ignition of the Otto cycle engine, a rich amount of fuel is injected to ensure the ignition. In the start, the engine is at a low temperature, and this extra supply of fuel produce a lot of Hydrocarbons and Carbon Monoxide emissions. On behalf of the lack in results about warm-phase emissions, and even less works using a Flex engine, this work has the purpose of complete this lack.

Keywords: Flex engine, Warm-phase, CO, NO_x, HC, Emissions.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Evolução da frota estimada de veículos por categoria

Figura 2 - Evolução da frota estimada de automóveis por tipo de combustível

Figura 3 - Estrutura parcial de um motor ciclo Otto de 4 tempos

Figura 4 - Os quatro tempos de um motor ciclo Otto

Figura 5 - Diagrama de pressão por volume do ciclo Otto de 4 tempos

Figura 6 - Limites de inflamabilidade para vários combustíveis a temperatura atmosférica

Figura 7 - Produção Brasileira de Etanol (m³)

Figura 8 - Emissão de Co, HC e NO_x em função do coeficiente de Lambda

Figura 9 - Emissão de CO em função do fator de Lambda para diferentes ângulos de ignição

Figura 10 - Emissão de HC em função do ângulo de ignição para diferentes valores de coeficiente de ar

Figura 11 - Emissão de NO_x em função do ângulo de ignição para diferentes valores de coeficiente de ar

Figura 12 - Consumo específico de combustível em função do coeficiente de ar para diferentes valores de ângulo de ignição

Figura 13 - Motores utilizados nos ensaios

Figura 14 – Bancada de testes

Figura 15 - Analisador de gases Greenline 8000

Figura 16 - Layout do sistema de dados obtidos pela ECU

Figura 17 - Rotação em função do tempo de ensaio

Figura 18 - Fator de Lambda em função do tempo de ensaio

Figura 19 - Temperatura em função do tempo de ensaio

Figura 20 - Emissão de CO em função do tempo de ensaio

Figura 21 - Emissão de NO_x em função do tempo de ensaio

Figura 22 - Emissão de Hidrocarbonetos em função do tempo de ensaio

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores do Flashpoint para alguns combustíveis

Tabela 2 - Temperaturas de auto ignição para alguns combustíveis

Tabela 3 - Número de Octanagem de alguns combustíveis

Tabela 4 - Comparação do número de Octanagem entre alguns combustíveis

Tabela 5 - Especificações para Gasolinas segundo a ANP

Tabela 6 - Especificações para Etanol segundo a ANP

Tabela 7 - Limites máximos de emissão de CO em Marcha Lenta e a 2500 RPM para corrigido veículos automotores com motor do Ciclo Otto

Tabela 8 - Limites máximos de emissão de HC (ppm) em Marcha Lenta e a 2500 corrigido RPM para veículos automotores com motor do Ciclo Otto

Tabela 9 - Propriedades físico química do etanol hidratado e da mistura gasolina-etanol

Tabela 10 - Dados do motor

Tabela 11 - Precisão e unidades de medida dos equipamentos utilizados

Tabela 12 - Dados do motor OPEL Astra C16SE

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

[A/C]_{est} - relação ar-combustível estequiométrica

[A/C]_{real} - relação ar-combustível real

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANP – Agencia Nacional do Petróleo

C – Carbono

CO – Monóxido de Carbono

CO₂ – Dióxido de Carbono

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CV – Cavalo Vapor

E22 – Gasolina com 22% de Etanol Anidro

E96 – Etanol Hidratado com 4% de água

ECU – Engine Control Unit

EHC – Etanol Hidratado Combustível

EHCP – Etanol Hidratado Combustível Premium

H – Hidrogênio

H₂O – Água

HC- Hidrocarbonetos

HP – Horse-Power

LII – Limpido e Isento de Impureza

m³ – metros cúbicos

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

mc - vazão mássica de combustível

MCI – Motores de Combustão Interna

MIE – Motores de Ignição Espontânea

MIF – Motores de Ignição por Faísca

N – Nitrogênio

NBR – Norma Brasileira

NO_x – Óxidos Nitrosos

O – Oxigênio

OICA – Organização Mundial da Indústria Automobilística

P - Potência gerada

PCI - Poder Calorífico Inferior

PCS – Poder Calorífico Superior

PMI – Ponto Morto Inferior

PMS – Ponto Morto Superior

Ppm – Partes por milhão

PROCONVE – Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores

PROMOT – Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares

RPM – Rotação por Minuto

SO_x – Óxidos de Enxofre

Tc – Taxa de Compressão

Vm - Volume Morto

Vt - Volume Total

W – Watt

λ - Fator de Lambda

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	17
1.1	ESTRUTURA DO TRABALHO	19
1.2	OBJETIVO.....	20
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1	MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA	21
2.2	MOTORES ALTERNATIVOS	21
2.3	MOTORES CICLO OTTO	22
2.4	TAXA DE COMPRESSÃO.....	24
2.5	EFICIÊNCIA DO MOTOR	25
2.6	FLASHPOINT – PONTO DE FULGOR.....	25
2.7	VELOCIDADE DE QUEIMA.....	26
2.8	ÂNGULO DE IGNIÇÃO.....	26
2.9	EXTENSÃO DA INFLAMABILIDADE.....	27
2.10	TEMPERATURA DE AUTOIGNIÇÃO.....	28
2.11	DETONAÇÃO.....	28
2.12	OCTANAGEM.....	28
2.13	PODER CALORÍFICO.....	29
2.14	RELAÇÕES ESTEQUIOMÉTRICAS ENTRE COMBUSTÍVEL E AR.....	30
2.15	GASOLINA	31
2.16	ETANOL.....	33
2.17	COMBUSTÃO E EMISSÕES NOS MOTORES CICLO OTTO	35
2.18	EMIÇÃO DE CO	38
2.19	EMIÇÃO DE HIDROCARBONETOS.....	40
2.20	EMIÇÃO DE NO _x	41
2.21	CONSUMO DE COMBUSTÍVEL	42
3.	MATERIAIS E METODOS	44
3.1	COMBUSTÍVEIS	44
3.2	EQUIPAMENTO DE TESTE.....	44
3.3	ABORDAGEM EXPERIMENTAL.....	48
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50

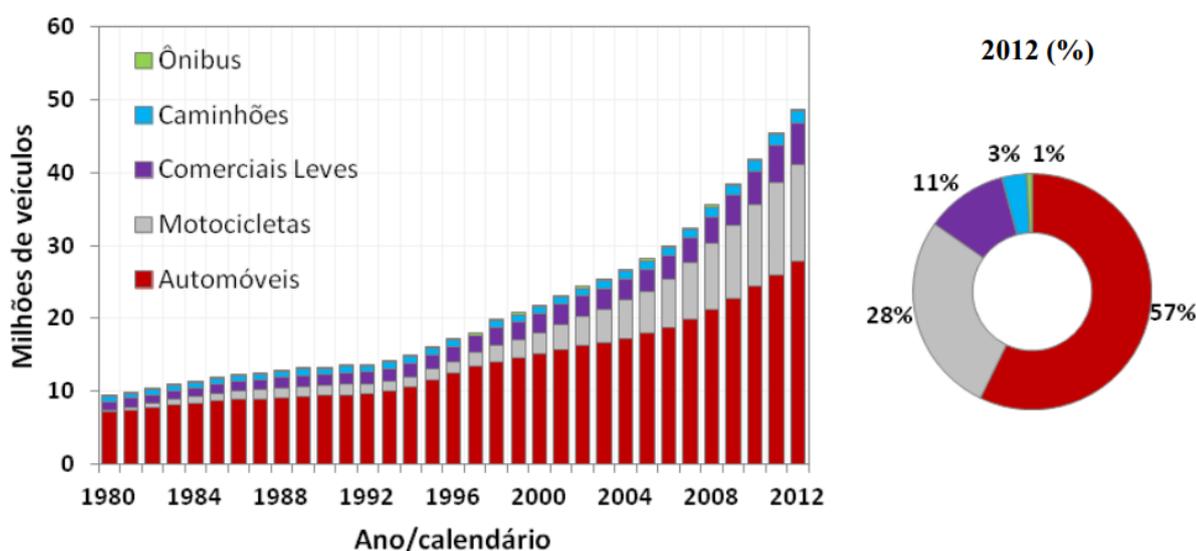
5.	CONCLUSÃO.....	57
6.	REFERÊNCIAS	58

1. INTRODUÇÃO

No mundo todo, várias legislações foram criadas nos últimos anos para controlar as emissões de poluentes que são jogados na atmosfera. Esse aumento de legislações com o objetivo de reduzir emissões ocorre devido aos altos índices de poluição, que são responsáveis por promover a degradação ambiental e por afetar a saúde humana. Por este motivo, a emissão gerada por veículos automotores vem sendo mais monitorada por conta do seu alto crescimento em relação as outras fontes.

Segundo a Organização Mundial da Indústria Automobilística (OICA) em 2016 foram produzidos no mundo todo cerca 95 milhões de veículos automotores (passeio e comerciais), 5 milhões a mais do que o ano anterior. OICA (2016) mostra ainda que no Brasil, do ano de 2015 para 2016 o número de veículos comerciais em uso aumentou em 161 mil, atingindo um total de 7 milhões e 272 mil, tendo produzido um total de 2,15 mil veículos (passeio e comerciais). A figura 1 foi retirada do Inventário de Emissões por Veículos Rodoviários (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2013) e mostra a evolução da frota estimada de veículos por categoria no Brasil.

Figura 1: Evolução da frota estimada de veículos por categoria.



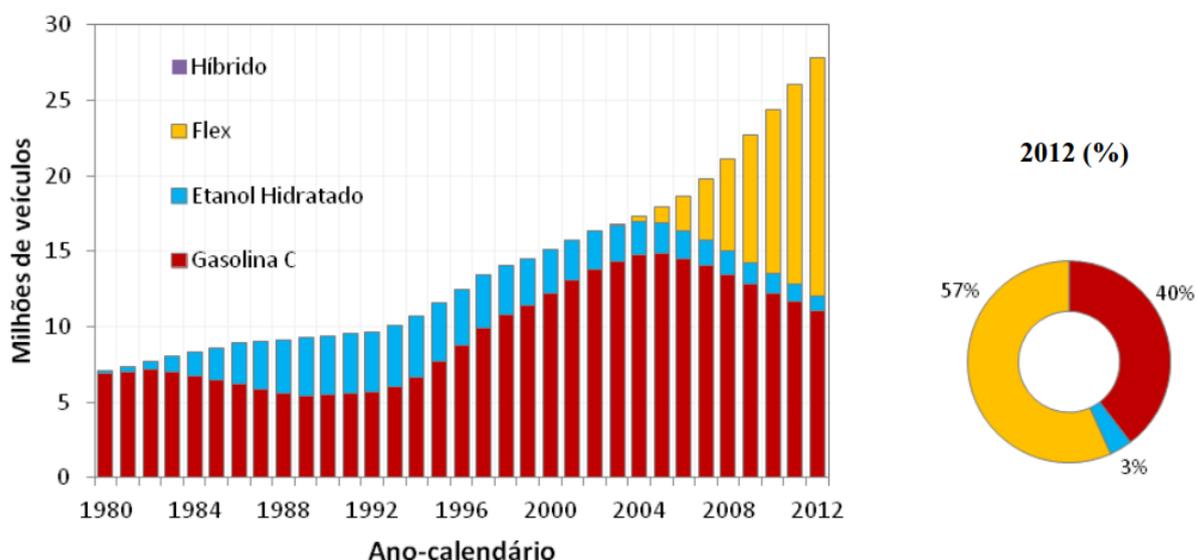
Fonte: (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2013)

O motor, para que consiga desempenhar seu papel precisa obter energia de um combustível, de modo que ano a ano tanto o motor quanto os combustíveis que o mesmo utiliza vem sofrendo mudanças com o objetivo de se tornar mais eficientes e menos poluentes.

Os veículos leves no Brasil utilizam um motor de combustão interna que transforma a energia química presente no combustível (Gasolina, Etanol, Gás Natural ou outros) em energia mecânica por meio da combustão.

O motor Flex, que apresenta ter grande preferência pelos consumidores brasileiros, veio para que seu proprietário possa optar por utilizar tanto etanol quanto gasolina sem perder muito desempenho. Ministério do Meio Ambiente (2013) mostra que em 2003, começou a se instalar no Brasil a utilização de motores flex, e em 2012 ele já representa a maioria dos motores em veículos, tendo um total de 57% do total de veículos utilizando a tecnologia Flex-fuel. Na figura 2 é possível se notar o crescimento do uso de motores Flex no Brasil.

Figura 2: Evolução da frota estimada de automóveis por tipo de combustível



Fonte: (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2013)

O problema dos motores a combustão é que a queima de seus combustíveis gera poluentes como CO_x, NO_x, HC e até SO_x para alguns casos, e estes são causadores de diversos problemas ambientais presentes em nosso planeta como as mudanças climáticas, a

destruição da camada de ozônio, a poluição do ar e a chuva ácida. Grande parte da queima desses combustíveis é causada pelos motores a combustão interna presentes nos carros, o que incentivou o setor automobilístico a incentivar pesquisas com o objetivo de reduzir ou até mesmo acabar de vez com o consumo destes combustíveis (SMUTZER, 2006).

No Brasil, para controlar os poluentes gerados por automóveis, o governo criou os programas PROCONVE - Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE, 2013) e PROMOT - Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares (PROMOT, 2013), e a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente 418/2009 (CONAMA, 1989), que estabelece limites para emissão de monóxido de carbono e hidrocarbonetos por veículos automotores.

Ensaio que estudam a emissão de poluente analisando diferentes motores com diferentes combustíveis são utilizados para ser realizar as estimativas de poluição que são geradas pelos veículos, porém nestes estudos são realizados ensaios com o motor com a sua temperatura de operação já estabilizada.

Todavia, no tempo em que se compreende a partida até o motor chegar na sua temperatura de operação, acontece a chamada fase de aquecimento, na qual o motor tende a emitir maior quantidade de poluentes por estar fora da sua temperatura ideal e por conta de que na partida, para se garantir a ignição, uma maior quantidade de combustível é adicionada, provocando assim o que se chama de combustão incompleta que gera grandes quantidade de poluentes (CHEN, 2011).

A motivação deste trabalho foi de aumentar os conhecimentos sobre as emissões de motores e também sobre processos de combustão, além do fato de que trabalhos sobre emissões em motores durante a fase de aquecimento serem muito escassos na literatura, e menos ainda são os que realizam este ensaio utilizando um motor que utiliza a tecnologia Flex-fuel, que está presente hoje em mais da metade dos carros brasileiros.

1.1 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho tem sua estrutura feita com o objetivo de se mostrar a relevância do tema. No capítulo 1 se encontram a introdução, motivação e o objetivo deste trabalho. No capítulo 2 são apresentados conteúdos necessários para o conhecimento para se discutir os dados e

resultados presentes no trabalho. O modo como foram feitos os ensaios e como se obteve os valores que serão apresentados estão descritos no capítulo 3. Os dados obtidos são apresentados e discutidos no capítulo 4. O capítulo 5 apresenta a conclusão e considerações finais sobre o trabalho. No ultimo capítulo se encontram as referências utilizadas para o embasamento teórico deste trabalho.

1.2 OBJETIVO

Este trabalho tem os seguintes objetivos:

- Coletar medições para o etanol e para a gasolina dos gases de saída do escapamento de um motor ciclo Otto que utiliza a tecnologia Flex durante sua fase de aquecimento.
- Analisar o comportamento dos dados e dos gráficos obtidos pelos dois combustíveis analisados.
- Discutir as diferenças e igualdades apresentados pelos combustíveis e discutir os dados com base na teoria e outros dados encontrados na literatura.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA

Motores de combustão interna (MCI) são máquinas capazes de produzir trabalho mecânico a partir da energia química liberada pela queima de determinado combustível. São chamados de combustão interna pois diferente dos de combustão externa, a combustão ocorre na parte interna do equipamento de modo que o produto da queima participa diretamente do processo de transformação. Em 1860 surgiu o primeiro motor, feito por J.J.E Lenoir, com uma potência de 4,5 kW e eficiência de 5%. (BRUNETTI, 2012).

Seja por motivos financeiros, tecnológico ou preocupação ambiental, a busca por maneiras de otimizar os MCI é algo de grande importância nos dias atuais, pois a população tende a optar por carros mais eficientes e ao mesmo tempo, em diversos países há normas que regularizam a emissão gerada por veículos, de modo que veículos fora da norma não podem ser vendidos (CARVALHO, 2011).

2.2 MOTORES ALTERNATIVOS

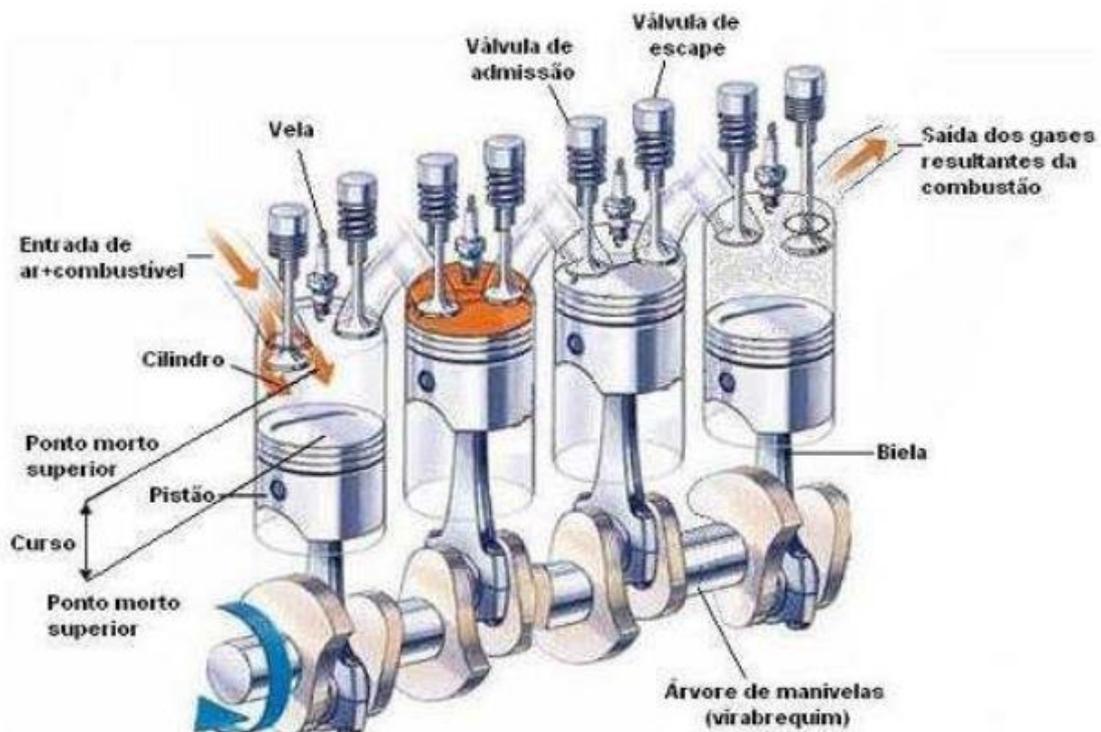
Motores alternativos são motores os quais seu trabalho é obtido por meio do movimento de vai e vem de um pistão que posteriormente é convertido em rotação por um sistema biela-manivela (BRUNETTI, 2012)

Os motores alternativos podem ser divididos em duas diferentes classificações, sendo elas os MIF – motores de ignição por faísca, e os MIE – motores de ignição espontânea. Os MIF mais conhecidos como motores ciclo Otto, em homenagem a Nikolaus August Otto, são motores que tem a sua mistura de queima ignitada por uma faísca, que nos carros de hoje em dia é proporcionada pela vela do motor (BRUNETTI, 2012). No Brasil os motores ciclo Otto são os motores presentes nos carros que vemos no dia a dia que funcionam a álcool e/ou a gasolina. A figura 3 apresenta uma estrutura parcial de um motor ciclo Otto de quatro tempos.

Os MIE, comumente conhecidos como motores Diesel em homenagem ao seu criador Rudolf Christian Karl Diesel, são motores no qual o pistão comprime primeiramente só ar, de modo que o ar atinja uma temperatura elevada o suficiente. Quando o pistão se aproxima da

sua pressão máxima do ar, o combustível é injetado e a reação ocorre espontaneamente. Os motores Diesel no Brasil são presentes somente em automóveis que requisitam mais força como caminhões, tratores, camionetes, e principalmente utilizam como combustível o óleo diesel (BRUNETTI, 2012).

Figura 3: Estrutura Parcial de um Motor Ciclo Otto de 4 Tempos



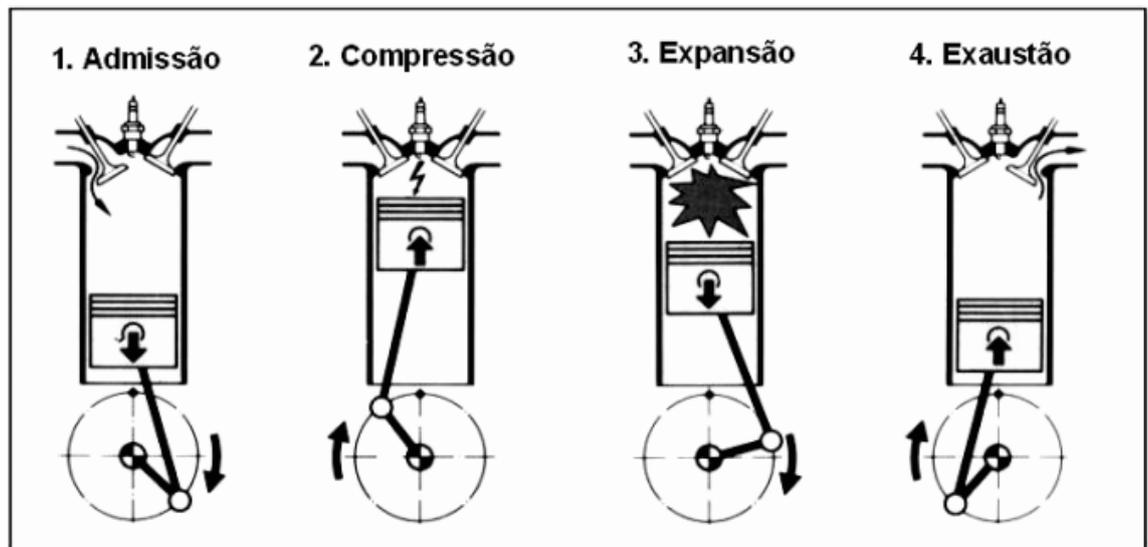
Fonte: (CARVALHO, 2011)

2.3 MOTORES CICLO OTTO

Em 1862, Beau de Rochas apresentou pela primeira vez ao mundo os princípios de funcionamento de um MIF a 4 tempos. Porém, somente em 1876 o engenheiro alemão Nikolaus August Otto, projetou e tentou patentear o motor 4 tempos, entretanto teve sua patente revogada pois alguém já havia patenteado. Apesar do ocorrido, Otto não se deixou abalar e desenvolveu os primeiros protótipos e foi muito mais aceito que os modelos concorrentes por ser mais eficiente e menos barulhento (BRUNETTI, 2012). A figura 5 apresenta o diagrama de pressão por volume de um motor ciclo Otto de 4 tempos.

Motores a 4 tempos são assim chamados pois realizam um ciclo de 2 voltas na manivela que consiste de quatro movimentos do pistão: Admissão, Compressão, Expansão e Exaustão. A figura 4 mostra como são os 4 tempos do ciclo feito pelo pistão.

Figura 4: Os quatro tempos de um motor ciclo Otto



Fonte: (BOSCH, Automotive eletric/eletronic systems, 1988)

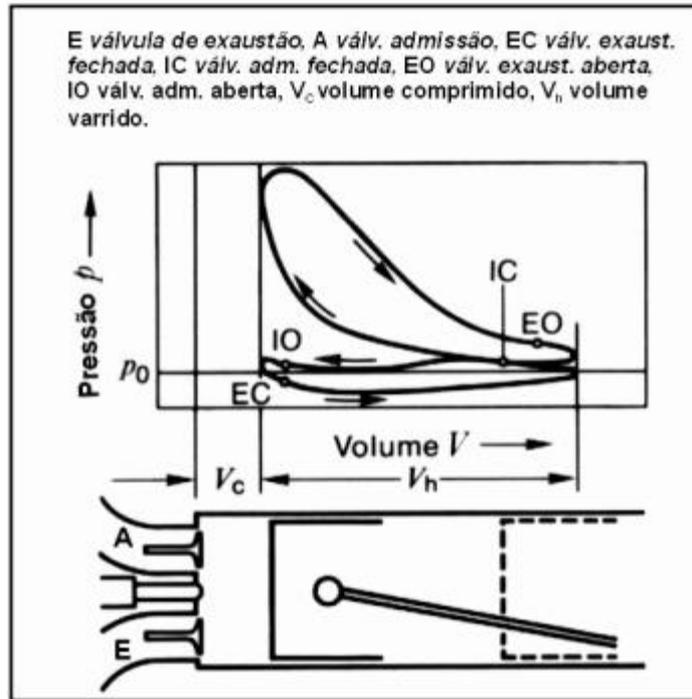
Admissão: a admissão é quando o pistão vai do PMS - Ponto Morto Superior (ponto mais alto que o pistão chega) até o PMI - Ponto Morto Inferior (ponto mais baixo que o pistão chega) com a válvula de admissão aberta e a de exaustão fechada. Deste modo, a depressão causada pelo movimento faz com que a mistura de ar-combustível entre na câmara de combustão (MILHOR, 2002).

Compressão: O pistão se desloca do ponto morto inferior para o ponto morto superior com ambas as válvulas fechadas, comprimindo assim a mistura combustível. Pouco antes do pistão atingir o PMS, a vela do motor produz uma centelha, deste modo queimando a mistura e fazendo com que a pressão no cilindro aumente.

Expansão: Com o aumento de pressão causado pela combustão, o pistão é empurrado do PMS para o PMI, com as válvulas ainda fechadas. É nesta parte do ciclo que a energia do combustível é transformada em movimento.

Exaustão: O pistão se desloca do PMI para o PMS com a válvula de exaustão aberta de modo que os gases produzidos na combustão da mistura sejam removidos do cilindro.

Figura 5: Diagrama de Pressão por Volume do ciclo Otto de 4 tempos.



Fonte: (BOSCH, Automotive electric/electronic systems, 1988)

2.4 TAXA DE COMPRESSÃO

A Relação Volumétrica ou Taxa de Compressão (T_c) é a relação entre o volume que é admitido no cilindro durante a admissão, conhecido como volume total, pelo volume no qual a mistura sofre a combustão que é o volume em que se encerra o processo de compressão, chamado de volume morto (BRUNETTI, 2012). Essa taxa representa em quantas vezes o volume total é comprimido e é obtida pela seguinte equação:

$$T_c = \frac{V_t}{V_m}$$

Onde:

T_c : é a Taxa de Compressão

Vt: é o Volume Total

Vm: é o Volume Morto

2.5 EFICIÊNCIA DO MOTOR

A potência de um motor, geralmente representada em HP (horse-power) ou CV (cavalo vapor), e representa a quantidade de trabalho mecânico realizado pelo mesmo por unidade de tempo (SENRA, LIMA, & ABREU, 2014). Deste modo temos que a eficiência de um motor é a potência gerada pelo mesmo pela energia por unidade de tempo liberada pela queima do combustível, em outras palavras, é a energia útil que se retira do motor pela energia que entra no mesmo. Dessa forma a equação da eficiência de um motor pode ser descrita como:

Equação da eficiência do motor:

$$n = \frac{P \times 1000}{mc \times PCI}$$

Onde:

P: é a potência gerada (W)

mc: é a vazão mássica de combustível em kg/s

PCI: é o Poder Calorífico Inferior do combustível em kJ/kg

2.6 FLASHPOINT – PONTO DE FULGOR

O ponto de fulgor, também conhecido como *flashpoint*, é a menor temperatura no qual o combustível se torna vapor inflamável juntamente com o ar (WOLLMANN, 2013).

A Tabela 1 apresenta os valores de flashpoint de alguns combustíveis usualmente utilizados em motores ciclo Otto.

Tabela 1 - Valores do Flashpoint Para Alguns Combustíveis

COMBUSTÍVEL	FLASHPOINT
Hidrogênio	< - 253°C
Metano	- 188°C
Propano	- 104°C
Gasolina	Aprox. -43°C
Metanol	11°C

Fonte: (WOLLMANN, 2013)

2.7 VELOCIDADE DE QUEIMA

A velocidade de queima é a velocidade com que a chama percorre uma mistura gasosa inflamável. Muitas pessoas confundem a velocidade de queima com a velocidade de chama, sendo que essa é a soma da velocidade de queima com a velocidade de deslocamento da mistura não queimada. A velocidade de queima é um fator muito importante a se estudar quando se analisa motores, pois a partir dela é calculado tempo que determinado combustível demorará para realizar uma combustão por completo (WOLLMANN, 2013).

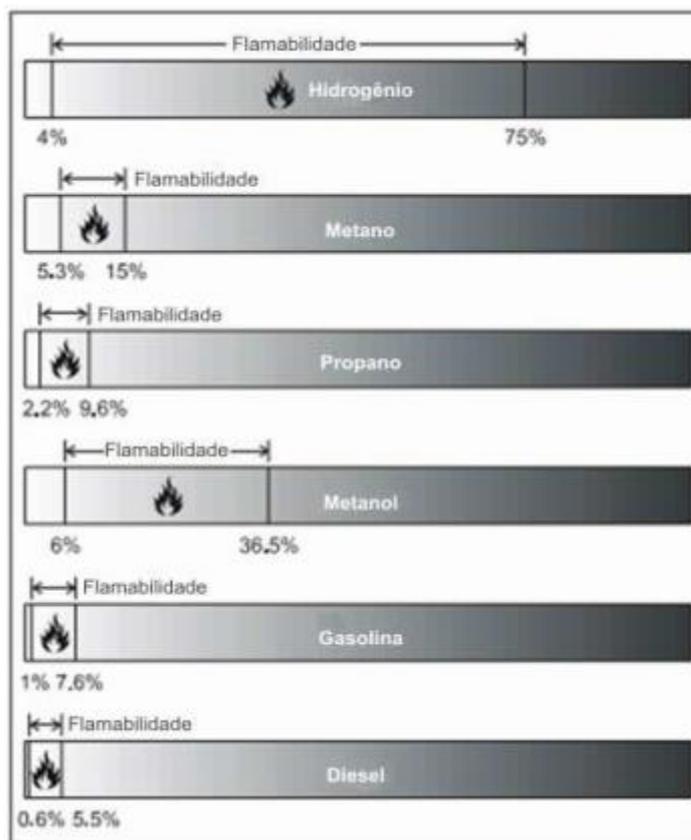
2.8 ÂNGULO DE IGNIÇÃO

É comum acreditar que a ignição no cilindro do motor ocorra quando o pistão se encontra no seu ponto mais alto (Ponto Morto Superior – PMS). Porém, como mostrado anteriormente, cada combustível apresenta uma velocidade de queima, ou seja, a sua combustão completa necessita de um tempo para ser realizada. Por conta disso, o ângulo de ignição é o ângulo na manivela, com o ângulo do PMS como referência (ângulo 0), aonde a ignição irá ocorrer de forma a se obter a maior pressão possível dentro do cilindro. Este ângulo podendo ser desde atrasado em relação ao PMS (ângulo negativo) ou adiantado em relação ao mesmo (ângulo positivo), tudo dependendo somente do combustível empregado e da sua respectiva velocidade de queima (MILHOR, 2002).

2.9 EXTENSÃO DA INFLAMABILIDADE

Como já citado no texto, para que ocorra a combustão o combustível deve estar dentro dos seus limites mínimo e máximo de inflamabilidade. Caso a mistura esteja abaixo do limite de inflamabilidade, se tem muito mais ar do que combustível de modo que o mesmo não consegue gerar uma combustão. No caso contrário, na qual a mistura estiver acima do limite de inflamabilidade, a mistura também não será capaz de sustentar uma combustão pois existe muito pouco ar para a quantidade de combustível (WOLLMANN, 2013). A figura 6 apresenta os limites de inflamabilidade de alguns combustíveis.

Figura 6: Limites de Inflamabilidade Para Vários Combustíveis a Temperatura Atmosférica



Fonte: (WOLLMANN, 2013)

2.10 TEMPERATURA DE AUTOIGNIÇÃO

A temperatura de autoignição é a temperatura na qual um combustível entra em combustão de forma espontânea. A tabela 2 mostra os valores de temperatura de auto ignição para alguns combustíveis mais usuais.

Tabela 2 – Temperaturas de auto ignição para alguns combustíveis

COMBUSTÍVEL	TEMPERATURA DE AUTOIGNIÇÃO
Hidrogênio	558 °C
Metano	540 °C
Propano	490 °C
Gasolina	230 A 480 °C
Metanol	385 °C

Fonte: (WOLLMANN, 2013)

2.11 DETONAÇÃO

Quando na câmara de combustão, ocorre a autoignição repentina da mistura que não havia sido queimada, isso se chama detonação. Qualquer elevação que ocorra na pressão ou na temperatura na câmara de combustão, por consequência aumenta as chances de que aconteça a detonação (BRUNETTI, 2012).

Um barulho diferente pode ser ouvido quando ocorre a detonação, pois quando a mesma ocorre, ela gera uma tensão local maior que faz esse barulho, conhecido como “batida de pino” (knock em inglês) (BRUNETTI, 2012).

2.12 OCTANAGEM

Octanagem é a propriedade que dita o quão bem um combustível pode ser comprimido sem que o mesmo entre em autoignição. Esta propriedade é uma escala numérica que compara o combustível analisado com combustíveis de referência para um determinado motor em determinadas condições de uso. Geralmente os combustíveis de referência são o isooctano em número de octanas de 100 e o heptano como número de octanas 0.

A octanagem é um fator muito importante em motores ciclo Otto, pois quanto maior esse índice, menor será a probabilidade do combustível sofrer autoignição durante o processo de compressão. Motores que possuem maior taxa de compressão devem utilizar combustíveis com altas taxas de octanagem, e o mesmo vale para o caso contrário, motores com baixas taxas de compressão devem operar com combustíveis de baixo número de octanagem (PULKRABEK, 2003). A tabela 3 apresenta valores de número de octanagem para alguns combustíveis.

Tabela 3: Número de Octanagem de Alguns Combustíveis

COMBUSTÍVEL	OCTANAGEM
Hidrogênio	130
Metano	125
Propano	105
Octano	100
Gasolina	87
Metanol	30

Fonte: (WOLLMANN, 2013)

2.13 PODER CALORÍFICO

Poder calorífico é a quantidade de energia libera pela queima de um combustível dividido pela massa ou volume queimado desse combustível. Este valor está diretamente ligado diretamente à composição química do combustível. O Poder Calorífico é dividido ainda em duas partes, o Poder Calorífico Superior (PCS) e o Poder Calorífico Inferior (PCI) (PULKRABEK, 2003).

Poder calorífico superior é a quantidade de energia liberada na formada de calor resultante de um processo de combustão somada ao valor da energia necessária para se evaporar a água que é gerada no mesmo processo. O PCI é somente a quantidade de calor liberada na queima, sem levar em conta a energia perdida transformando a água em vapor. A tabela 4 apresenta valores dos poderes caloríficos superiores e inferiores de alguns combustíveis.

Tabela 4 - Comparação do Número de Octanagem Entre Alguns Combustíveis

COMBUSTÍVEL	VALOR DO PODER CALORÍFICO SUPERIO (A 25 E 1 ATM)	VALOR DO PODER CALORÍFICO INFERIOR (A 25 E 1 ATM)
Hidrogênio	141,86 kJ/g	119,93 kJ/g
Metano	55,53 kJ/g	50,02 kJ/g
Propano	50,36 kJ/g	45,6 kJ/g
Gasolina	47,5 kJ/g	44,5 kJ/g
Gasóleo	44,8 kJ/g	42,5 kJ/g
Metanol	19,96 kJ/g	18,05 kJ/g

Fonte: (SANTOS & SANTOS, 2005)

2.14 RELAÇÕES ESTEQUIOMÉTRICAS ENTRE COMBUSTÍVEL E AR

A combustão é o fator mais importante do motor, pois o mesmo altera diretamente na potência, eficiência e na emissão de poluentes. A estequiometria de combustão é o estudo que visa analisar qual a quantidade de ar necessária para queimar completamente determinada quantidade de combustível, de modo a se ter um processo de combustão mais eficiente possível (SENRA, LIMA, & ABREU, 2014).

O Fator de Lambda, é a relação entre a razão ar-combustível real (que ocorre no motor) pela razão ar-combustível estequiométrica (Razão na qual se tem a quantidade de ar exata para se queimar por completo o combustível), de modo que quando o Lambda é igual a 1, se tem uma combustão estequiométrica no motor. Quando Lambda (λ) é menor que 1, significa que se tem no motor uma quantidade de ar menor do que a quantidade necessária para se realizar uma combustão completa, esse tipo de mistura é chamado de mistura rica. Quando um motor funciona com uma mistura rica, a combustão ocorre de forma incompleta, de modo a aumentar a emissão de poluentes e o consumo de combustível, diminuindo assim a eficiência do motor (SENRA, LIMA, & ABREU, 2014).

A equação do Fator de Lambda é dada pela forma a seguir:

$$\lambda = \frac{\left[\frac{A}{C}\right]_{\text{real}}}{\left[\frac{A}{C}\right]_{\text{est}}}$$

Onde:

[A/C]_{real}: é a relação ar-combustível real que ocorre no motor em kg/kg

[A/C]_{est}: é a relação ar-combustível estequiométrica em kg/kg

Se λ for maior que 1, temos uma mistura pobre, no qual a quantidade de ar excede a quantidade necessária para fazer com que o combustível queime completamente. Neste tipo de mistura todo o combustível será queimado, porém a eficiência do motor será menor pois certa quantidade de calor vai ser perdida pois estará aquecendo também o ar em excesso presente no cilindro, além do fato de que o oxigênio a mais pode se misturar com outras substâncias e formar óxidos, aumentando assim a emissão de poluentes (SENRA, LIMA, & ABREU, 2014).

Na combustão há também o que chamamos de limite de inflamabilidade, de modo que há um limite inferior de inflamabilidade e um limite superior de inflamabilidade para cada combustível. Quando se tem uma mistura muito rica, ou uma mistura muito pobre de modo a ultrapassar esses limites, a combustão não irá ocorrer e o motor não vai funcionar, e por esta razão ocorre o que é muito comum ser chamado de 'afogar o motor'. (SENRA, LIMA, & ABREU, 2014).

De modo geral, a melhor eficiência no motor é obtida quando λ é igual a 1, chamada de mistura estequiométrica, pois neste caso o consumo e a emissão de poluente será a mínima possível (SENRA, LIMA, & ABREU, 2014). Segundo Milhor (2002) a razão estequiométrica da gasolina pura é de 14,9:1, e para o etanol etílico é de 9:1. Como no Brasil a gasolina vendida nos postos de combustível contém uma porcentagem de etanol anidro, a razão média para ela é atribuída como 13:1.

2.15 GASOLINA

Segundo Brunetti (2012), a gasolina é constituída de uma mistura de diversas naftas obtidas a partir do processamento do petróleo e possui hidrocarbonetos de 4 a 12 carbonos, tendo em sua maioria entre 5 e 9 carbonos.

Tabela 5 - Especificações Para Gasolinas segundo a ANP

Características	Unidade	Especificação		Método	
		Gas, Comum e ativada	Gas premium	ABNT	ASTM
Cor	...			Visual	
Aspecto	...				
Álcool Etilico Anidro	% vol	25 ±1	25 ±1	NBR 13992	
Densidade Relativa a 20/24°C	...			NBR 7148 NBR 14065	D 1298 D 4052
Massa Específica 20°C				NBR 7148 NBR 14065	D 1298 D 4052
Destilação 10 ,max. 50, max. 90 , max.PFE, max.Resíduo máx.	°C, °C, °C, °C, vol	65,0 80,0 190,0 220,0 2,0	65,0 80,0 190,0 220,0 2,0	NBR 9619	D 86
MON mín	...	82,0	...	MB 457	D 2700
IAD.mín. (MON + RON)/2	...	87,0	91	MB 457	D 2699 D2700
Enxofre, máx.	% massa	0,10	0,10	NBR 6563 NBR 14533	
Benzeno, máx.	% vol	1.0	1,5		D 1266, 2622, 3120, 4294, 5453
Aromático, máx.	% vol	45	45	MB 424	D 1319
Olefínicos, máx.	% vol	30	30	MB 424	D 1319

Fonte: (ANP, Resolução ANP N° 40/2013, 2013)

No Brasil, a gasolina é classificada em 2 tipos (ANP, 2017):

Gasolina A – Não contém álcool etílico anidro, tendo sua comercialização restrita somente ao refinador e ao distribuidor.

Gasolina B – Contém álcool etílico anidro em 27%, com uma variação de 18% a 17% dependendo da variação da safra da cana de açúcar.

A tabela 5 mostra as especificações exigidas pela Agência Nacional do Petróleo para a gasolina no Brasil.

2.16 ETANOL

Segundo ANP (2017), o Brasil é o pioneiro na utilização em larga escala de etanol como combustível, de modo que hoje em dia é o segundo maior produtor do mundo. A fórmula molecular do etanol puro é C_2H_6O .

No Brasil o etanol é usado em duas formas (ANP, Etanol, 2017):

Etanol Anidro: Mistura na gasolina para formação da gasolina tipo B.

Etanol Hidratado: Mais conhecido como E96 por ter em sua composição aproximadamente 4% de água.

A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) estabelece especificações para a compra e venda de etanol no Brasil por meio da RESOLUÇÃO ANP Nº 19, DE 15.4.2015 DOU 16.4.2015 REPUBLICADA DOU 17.4.2015 REPUBLICADA DOU 20.4.2015. As especificações do etanol são apresentadas na tabela 6.

Os dados de produção de etanol no Brasil podem ser encontrados no MAPA (2018). Nele vemos que na safra de 2017/2018 foram produzidos cerca de 26.605.089 metros cúbicos de etanol, sendo que desse valor 15.785.800 m³ é de etanol hidratado e 10.819.289 é de etanol anidro.

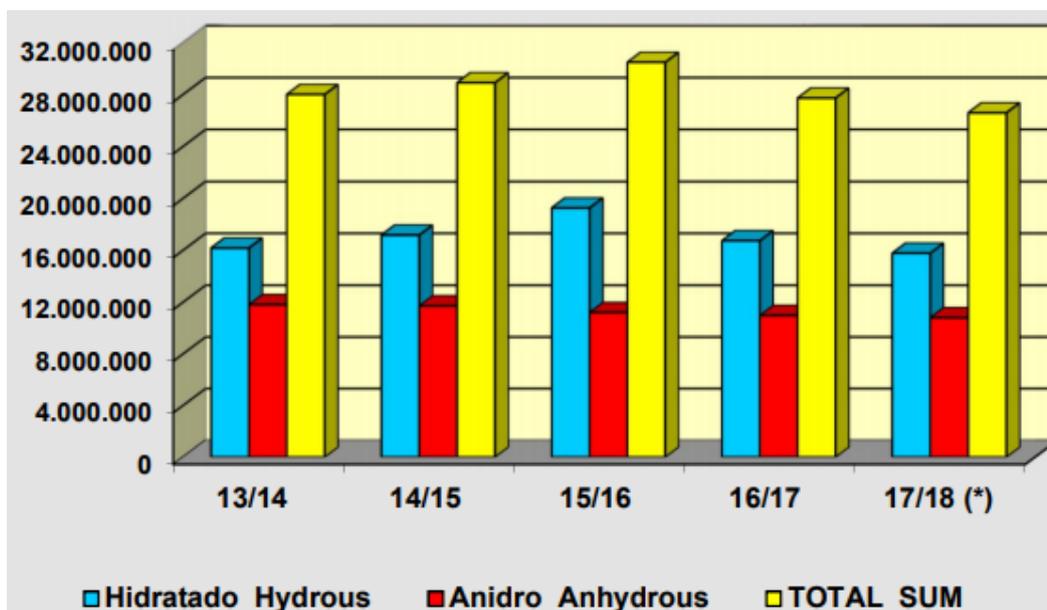
Tabela 6 - Especificações Para Etanol segundo a ANP

Característica	unidade	limite		Método	
		EHC	EHCP2	NBR	ASTM/EM
Aspecto	-	Límpido e Isento de Impurezas (LII)		Visual	
Cor	-	5		Visual	
Condutividade Elétrica	μS/m	300		10547	ISSO 17308
Massa Específica a 20°C	kg/m ³	802,9 a 811,2	796,2 a 802,8	5992 15639	D4052
Teor Alcoólico	% massa	92,5 a 96,4	95,5 a 97,7	5992 15639	
Potencial Hidrogeniônico (pH)	-	6,0 a 8,0		10891	-
Resíduo por Evaporação	mg/100 mL	5		8644	-
Teor de Hidrocarbonetos	% volume	3		13993	-
Teor de Cloreto	mg/kg	1		10894	D7328 D7319
Teor de Etenol	% volume	94,5	96,3	16041	D5501
Teor de Água	% massa	7,5	4,5	15531 15888	E203 E106411
Teor de Metanol	% volume	0,5			16041

Fonte: (ANP, Resolução ANP nº 19/2015, 2015)

Na figura 7 são apresentados dados da produção brasileira de etanol dos cinco últimos anos-safra. Nele vemos que o total de etanol vem caindo a três safras. Todavia, é possível observar que a quantidade de etanol hidratado cai com maior intensidade do que o do etanol anidro, mostrando que a população diminui o consumo de combustível, porém que a parcela da população que utiliza o E22 diminuiu em menor quantidade do que a que usa o E96.

Figura 7: Produção Brasileira de Etanol (m³)

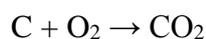


Fonte: (MAPA, 2018).

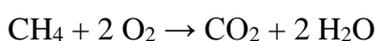
2.17 COMBUSTÃO E EMISSÕES NOS MOTORES CICLO OTTO

O processo de combustão é uma reação química entre um combustível e um comburente, que durante a realização da mesma, é gerado calor e outros produtos químicos de modo que cada elemento presente na reação tenha a mesma massa antes e após o processo (WYLEN, 1995).

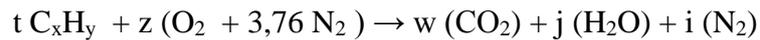
A princípio, todo processo de combustão precisa de três elementos, o combustível, o comburente, e uma fonte de calor. Em motores de modo geral, o comburente é o oxigênio presente no ar, usado como oxidante enquanto os outros gases presentes no ar são considerados inertes. Um exemplo simples de combustão pode ser representado pela combustão do carbono:



Em uma combustão teórica de um Hidrocarboneto, além do CO₂ é gerado também como produto água pura, pois além do Carbono o Hidrogênio também é oxidado. Abaixo temos um exemplo da combustão teórica do metano (WYLEN, 1995).



Portanto para uma reação teórica é possível obter uma fórmula de combustão completa para qualquer hidrocarboneto em reação com o ar atmosférico. O ar é composto em sua maioria somente por Oxigênio e Nitrogênio de modo que para cada molécula de oxigênio se tem 3,76 moléculas de nitrogênio. Deste modo, uma reação de combustão com o ar gera mais um produto que é basicamente o nitrogênio presente no ar que passa diretamente pelo processo sem reagir (WYLEN, 1995). Assim temos a seguinte fórmula:



Onde :

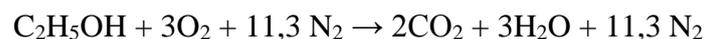
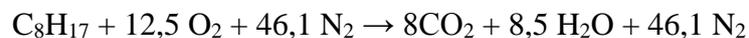
$$w = t * x$$

$$j = (t * y) / 2$$

$$z = (w * 2 + j) / 2$$

Dessa forma, a partir dos valores encontrados e utilizando a massa molar de cada elemento químico é possível calcular a relação ar/combustível estequiométrica (WYLEN, 1995).

No Brasil os dois combustíveis mais utilizados em motores ciclo otto são a gasolina e o etanol. Segundo Garcia (1988) para fins de análise teórica podemos considerar a gasolina como um hidrocarboneto de fórmula C_8H_{17} e o etanol é representado pela fórmula do álcool etílico que tem fórmula C_2H_5OH , de modo que a combustão estequiométrica destes combustíveis é representada por:



Como já foi mostrado acima, na teoria, a combustão completa de um combustível gera somente três produtos, o gás carbônico (CO_2), água (H_2O) e o Nitrogênio (N_2), sendo que destes somente o CO_2 é prejudicial ao meio ambiente. Porém, quando analisado na prática, o motor gera outros gases devido a combustão incompleta, como os óxidos de nitrogênio (NO_x), o monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC), etc (BRUNETTI, 2012).

Tabela 7- Limites Máximos de Emissão de CO em Marcha Lenta e a 2500 RPM Para corrigido Veículos Automotores com Motor do Ciclo Otto

Ano de fabricação	Limite de CO corrigido (ppm%)			
	Gasolina	álcool	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
1990-1991	3,5	3,5	-	3,5
1992-1996	3,0	3,0	-	3,0
1997-2002	1,0	1,0	-	1,0
2003-2005	0,5	0,5	0,5	1,0
2006 em diante	0,3	0,3	0,3	1,0

Fonte: (CARVALHO, 2011)

Tabela 8 - Limites Máximos de Emissão de HC (ppm) em Marcha Lenta e a 2500 corrigido RPM Para Veículos Automotores com Motor do Ciclo Otto

Ano de fabricação	HC corrigido (ppm) em marcha lenta e a 2500 RPM			
	Gasolina	álcool	Flex	Gás natural
Todos até 1979	700	1100	-	700
1980 – 1988	700	1100	-	700
1989	700	1100	-	700
1990-1991	700	1100	-	700
1992-1996	700	700	-	700
1997-2002	700	700	-	700
2003-2005	200	250	200	500
2006 em diante	100	250	100	500

Fonte: (CARVALHO, 2011)

No Brasil, o órgão responsável por estabelecer limites para as emissões veiculares é o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). As tabelas 7 e 8 apresentam os valores limite máximos de emissão de CO e HC, respectivamente, permitidos pela legislação brasileira (CARVALHO, 2011).

2.18 EMISSÃO DE CO

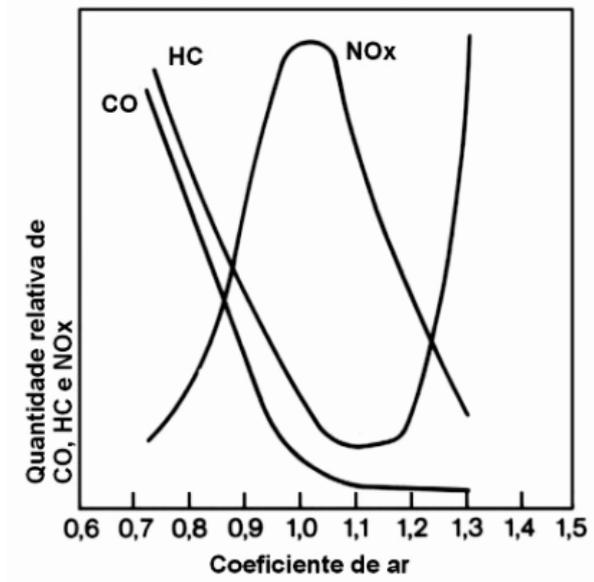
O monóxido de carbono é um gás sem cheiro e cor que apresenta perigo para o ser humano por apresentar alta afinidade com a hemoglobina do sangue, fazendo assim com que a mesma possa carregar menor quantidade de oxigênio, gerando a falta de oxigênio para o organismo.

De acordo com Bosch (1988) o maior influenciador da produção de monóxido de carbono em motores de combustão interna é a relação ar-combustível utilizada no mesmo, pois quando se tem uma mistura rica (quantidade de comburente insuficiente), a quantidade de CO emitida é resultante da combustão incompleta causada pela deficiência de ar. Entretanto, quando se realiza um estudo do caso inverso, com uma mistura ar-combustível pobre (quantidade de comburente em excesso), a emissão de CO não é nula, porém é muito baixa, sendo que esta emissão é predominantemente gerada pelo fato da mistura não apresentar um aspecto totalmente homogêneo e variante em sua composição quando analisado dentro do pistão.

A figura 8 apresenta os dados da quantidade relativa de emissão de CO, Hidrocarbonetos não queimados e Óxidos de Nitrogênio que são emitidos pelo motor em função do Fator de Lambda. Pela figura é possível observar a influência da relação ar-combustível na emissão de CO, pois para pontos acima do ponto de estequiometria (Lambda igual a 1) a emissão de CO é quase nula.

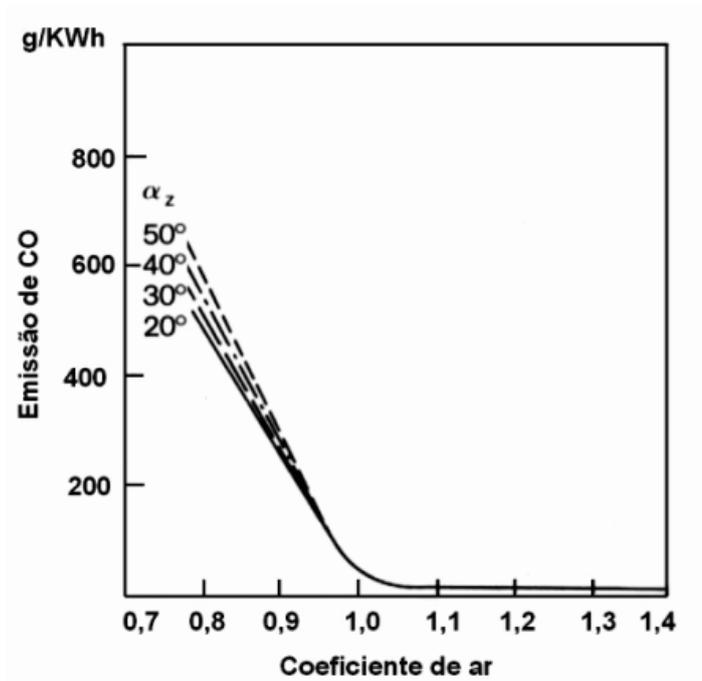
Como pode ser observado na figura 9 o ângulo de ignição apresenta quase que nenhuma influência na emissão de monóxido de carbono. A figura 8 apresenta valores de emissão de CO em função do Coeficiente de ar (Lambda) para diferentes ângulos de ignição.

Figura 8 - Emissão de Co, HC e Nox em função do coeficiente de Lambda



Fonte : (BOSCH, 1995)

Figura 9 – Emissão de CO em função do fator de Labda para diferente ângulos de ignição.



Fonte: (BOSCH, 1995)

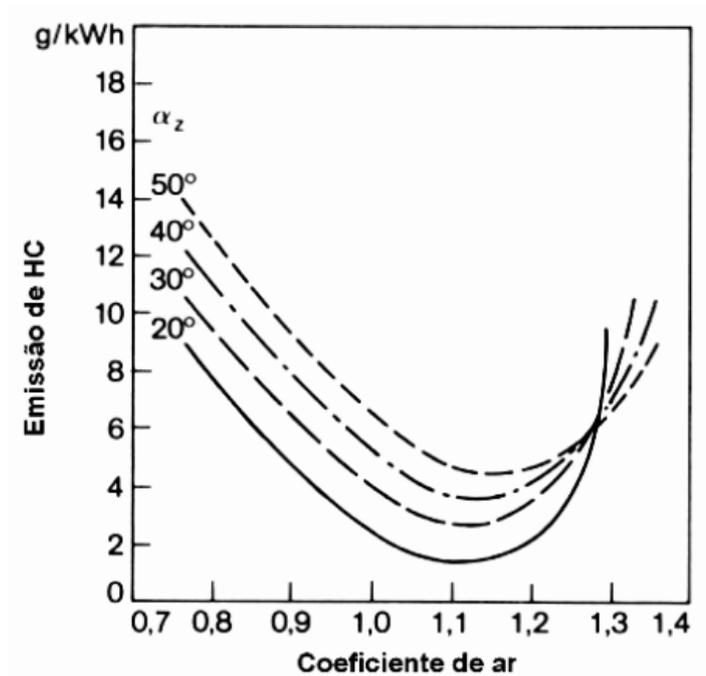
2.19 EMISSÃO DE HIDROCARBONETOS

Como pode ser observado na figura 8 assim como a emissão da CO, o fato da insuficiência de ar gerar uma combustão incompleta da mistura de ar-combustível, ela também acaba por gerar elevadas emissões de HC (Hidrocarbonetos), podendo eles estar parcialmente queimados ou não queimados (BOSCH, 1995).

Entretanto, diferente da emissão de CO, nos pontos aonde a mistura está pobre, a emissão de HC volta a crescer, de modo que sua faixa de emissão mínimas são nos valores de Lambda entre 1 e 1,2. (MILHOR, 2002) afirma que este aumento da emissão para valores de mistura pobre ocorre por conta das áreas da câmara de combustão chamadas de incluídas ou semi-incluídas. Estas regiões são representadas pela parede do cilindro, aonde por conta dos resfriamento pela troca de calor com a própria parede, a chama tende a se extinguir ou ocorrer de forma incompleta. No caso aonde se tem um a mistura com ar em excesso, o efeito gerado por essas camadas por conta do atraso na combustão e por conta das falhas.

A figura 10 mostra a influência que o ângulo de ignição gera na emissão de Hidrocarbonetos para diferentes valores de coeficiente de ar. Conforme se aumenta o adiantamento do ângulo, maior é a emissão de HC, pelo fato da baixa temperatura que ocorre na exaustão. No entanto, para valores de mistura pobre com Lambda maior que 1,3 ocorre uma inversão nessa relação, devido ao fato da baixa velocidade de combustão em conjunto com o atraso gerar uma combustão incompleta quando o processo de exaustão ocorre.

Figura 10 – Emissão de HC em função do ângulo de ignição para diferentes valores de coeficiente de ar.



Fonte: (BOSCH, 1995)

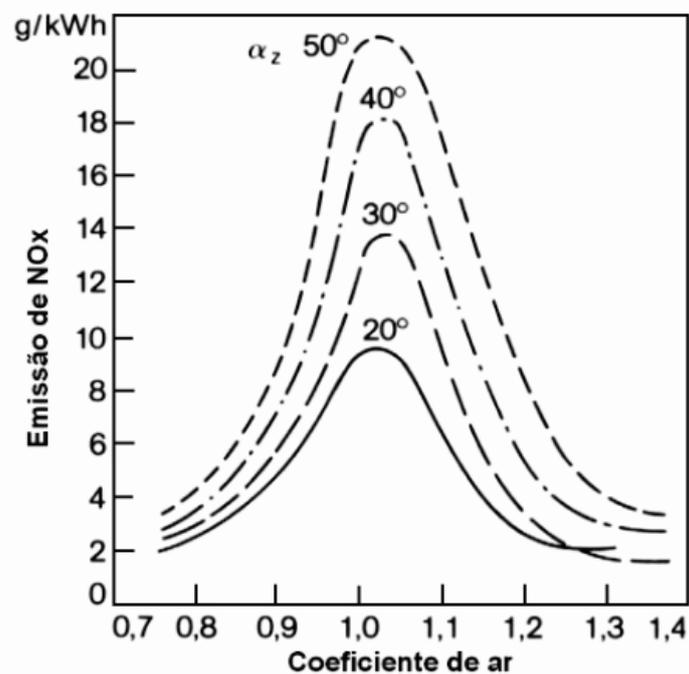
2.20 EMISSÃO DE NO_x

De acordo com Bosch (1995) o maior influenciador na produção de óxido nítrico (NO) em motores de combustão interna, são os picos de temperatura presentes no mesmo e a duração do mesmo. Dióxido de nitrogênio (NO₂) e óxido nitroso (N₂O) também é produzido decorrente da temperatura do motor.

Como pode ser observado na figura 8, a emissão de NO_x em função do fator de Lambda é quase que proporcional ao inverso da produção de HC, de modo que para misturas ricas, a produção de NO_x aumenta conforme se vai em direção ao ponto estequiométrico, de modo que o pico se encontra entre os valores de 1,0 e 1,1 para o coeficiente de ar. Após passar pelo ponto de 1,1 de Lambda, a emissão de NO_x começa a diminuir, pois o aumento da quantidade de ar acaba por diminuir a temperatura na câmara de combustão.

O aumento do adiantamento do ângulo de ignição faz com que se tenha um aumento na temperatura na câmara de combustão, de modo a aumentar a emissão de NO_x , conforme pode ser observado na figura 11.

Figura 11 – Emissão de NO_x em função do ângulo de ignição para diferentes valores de coeficiente de ar.



Fonte: (BOSCH, 1995)

Além dos fatores analisados acima, outros fatores presentes no motor são influenciadores na emissão de NO_x , como taxa de compressão, tempo de abertura de válvula, velocidade de rotação de operação, carga no motor, entre outros.

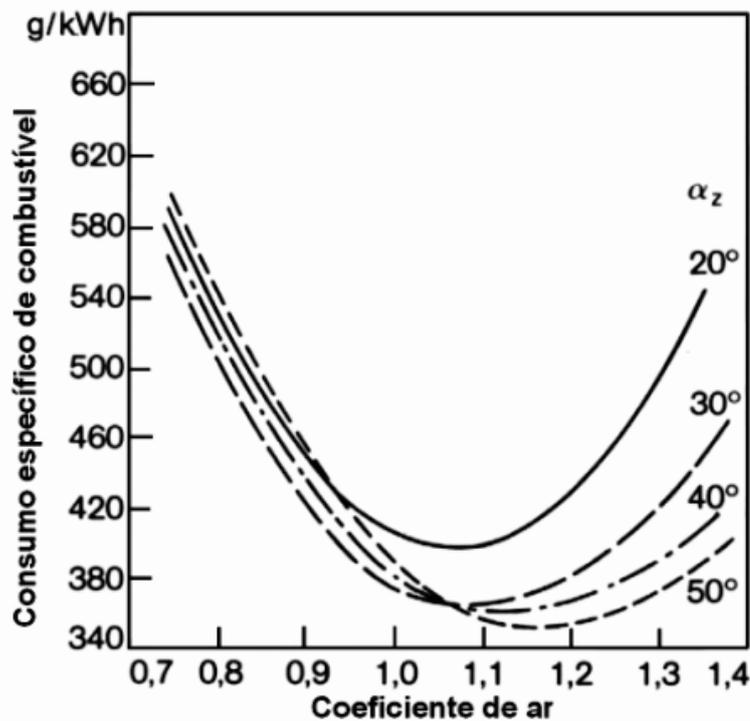
2.21 CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

A figura 12 apresenta os valores de consumo específico de combustível em função do coeficiente de ar para diferentes valores de ângulo de ignição. É possível observar que para os valores de 30, 40 e 50 graus, até o coeficiente de ar de aproximadamente 1,05, os três casos

apresentam valores proporcionais, de modo que 30 graus apresenta os menores valores de consumo.

No ponto de 1,05 de Lambda, os três graus convergem para um único ponto de consumo, e acima deste valor os valores de consumos se invertem de modo que o ângulo de 50 graus se torna o de menor consumo. Já para a ignição de ângulo de 20 graus, até o ponto de Lambda igual a 0,9, apresenta valores entre os consumos dos ângulos de 30 e 40 graus. Após este ponto, ele se torna o ângulo de maior consumo, tendo uma diferença grande entre ele e o próximo grau de maior consumo. Com isso é possível perceber que se deve adiantar a ignição com o objetivo de contrabalancear a baixa velocidade de combustão.

Figura 12 – Consumo específico de combustível em função do coeficiente de ar para diferentes valores de ângulo de ignição.



Fonte: (BOSCH, 1995)

3. MATERIAIS E METODOS

3.1 COMBUSTÍVEIS

Este trabalho considera as propriedades físico-químicas típicas do etanol hidratado vendido comercialmente que contem 4% de água e é usualmente chamado de E96 e da gasolina vendida nos postos de gasolina no Brasil, que é uma mistura de gasolina com etanol anidro, conhecido como E22 (chamado assim por ser composto por 78% de gasolina e 22% de etanol anidro). A tabela 9 apresenta os valores das propriedades físico-químicas desses combustíveis.

Tabela 9 – Propriedades físico química do etanol hidratano e da mistura gasoline-etanol

Parâmetro	E22	E96	Unidade
Densidade	0,74	0,81	kg/l
Poder Calorífico Inferior	39,3	25	MJ/kg
Razão ar-combustível estequiométrica	13,10:1	8,7:1	-
Composição química	$C_{6,39}H_{13,6}O_{0,16}$	$C_2H_{6,16}O_{1,18}$	-

Fonte: (COSTA & SODRÉ, 2010)

3.2 EQUIPAMENTO DE TESTE

Os dados apresentados neste trabalho foram realizados em um motor Flex Ford Rocam de 1000cc, quatro tempos, com quarto cilindros, oito válvulas e ignição por centelha. A Figura 13 mostra o motor utilizado para obtenção dos dados. Os dados técnicos deste motor são apresentados na tabela 10.

Tabela 10 – Dados do motor

Propriedade	Valor	Unidade
Diâmetro	68,68	mm
Curso	67,4	mm
Cilindros	4	-
Volume	973,28	cm ³
Razão de compressão	9,8:1	-
Ciclo	Otto-Flex	-
Combustível	Gasolina e etanol	-
Rotação máxima	6600	-
Torque máximo	87/2750	Nm/rpm
Potência máxima	48,47/5750	kW/rpm

Figura 13 - Motor utilizados nos ensaios



Fonte: autor

O motor pode ser abastecido com gasolina, com etanol e com misturas em qualquer proporção destes dois combustíveis. O sistema de injeção de combustível, da ignição e a rotação do virabrequim é controlado por meio do módulo eletrônico PCScan 3000 (ECU).

Foi montado um tanque de combustível auxiliar, de modo a poder colocar o mesmo em cima de uma balança digital, com o objetivo de com o auxílio de um cronometro digital se obter a vazão mássica de combustível com o motor ligado.

Figura 14 – bancada de testes.



Fonte: autor

Os dados de emissão de poluentes foram coletados utilizando o software Dbgas2004, por meio de um analisador de gases Greenline 8000 (Figura 15) posicionado no escapamento do motor. No analisador de gases, os dados de monóxido de carbono e óxidos nitrosos são obtidos por meio de sensores eletroquímicos. Já os dados de dióxido de de carbono e hidrocarbonetos é obtido por meio de um sensor infravermelho não dispersivo.

As medidas e precisão dos equipamentos utilizados são apresentados na tabela 11. A Figura 14 mostra a bancada de teste montada.

Figura 15 - analisador de gases Greenline 8000



Fonte: autor

Tabela 11 - Precisões e unidades de medida dos equipamentos utilizados

Medida	Dispositivo	Precisão	Unidade de medida
Massa	Balança digital	1,00	G
Tempo	Cronometro	0,01	S
Rotação	PCScan3000	1,00	Rpm
CO	Sensor	10,0	Ppm
	Eletroquimico		
CO ₂	Sensor	0,30	%
	Infravermelho não dispersivo		
NO _x	Sensor	5,00	Ppm
	Eletroquimico		
HC	Sensor	0,30	%
	Infravermelho não dispersivo		

3.3 ABORDAGEM EXPERIMENTAL

Os ensaios realizados no motor foram feitos no Laboratório de Máquinas, Sistemas Térmicos e Combustão (LABCOM) da Faculdade de Engenharia (FAEN) da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD).

Os testes foram realizados durante o período de aquecimento do motor. Ensaios anteriores realizados no motor mostram que o motor estabiliza em 80°C. No trabalho de Marques (2016) realizado com o mesmo motor, os autores também consideram que a temperatura na qual o motor sai da fase de aquecimento é em 80°C. Chen (2011), utilizou em seu trabalho sobre emissão de poluente na fase de aquecimento, um motor a gasolina do tipo OPEL Astra C16SE (Especificações na tabela 12), e também atribui 80 °C como temperatura de estabilização do motor. Por conta disso, neste trabalho foi considerado 80 °C como temperatura na qual o motor estabiliza e sai da fase de aquecimento.

Tabela 12 – Dados do motor OPEL Astra C16SE

Item	Especificações
Tipo do motor	C16SE
Número de cilindros	4
Número de válvulas	8
Cilindrada	1598 cm
Diâmetro do cilindro	79 mm
Curso do cilindro	81,5 mm
Potência	74/5800 kW/rpm
Torque	135/3400 Nm/rpm
Razão de compressão	9,8:1

Fonte: (CHEN, 2011)

Os ensaios foram realizados em quatro dias, sendo que no primeiro dia foi colocado gasolina (E22) e deixado o motor funcionando por um longo período com o objetivo de se limpar o motor de qualquer outro combustível que possa ter sido utilizado anteriormente ao ensaio. No segundo dia foi feito o ensaio no qual se obteve os dados para o E22, neste dia a

pressão ambiente estava em 94,48 kPa e a temperatura ambiente estava em 297,25 K. No terceiro realizou-se o mesmo processo realizado no primeiro dia porém com etanol (E96), com o mesmo objetivo de se “limpar” o motor. No quarto dia foram obtidos os dados referentes ao E96, a pressão e temperatura ambiente neste dia foram de 94,46 kPa e 297,25 kPa. Os dados de pressão e temperatura ambiente foram obtidos utilizando um termômetro e um barômetro digital.

Os dados obtidos com o analisador de gases, eram gerados a cada 1,5 segundos para cada um dos gases analisados neste trabalho (CO, CO₂, NO_x e HC), até que o motor atingisse a temperatura de estabilização (80 °C). Deste modo, no ensaio utilizando gasolina se obteve um total de 447 pontos, com um tempo total de 669 segundos de teste. O ensaio utilizando Etanol teve um total de 444 pontos e teve um tempo total de 664,5 segundos.

Quanto aos dados de fator de Lambda, Rotação do Motor e Temperatura do motor, que são obtidos por meio do ECU, não se sabe ao certo o porque, mas ele adquiriu os dados em frações de tempo diferentes para cada teste, de modo que no ensaio utilizando gasolina ele adquiriu dados de 15 em 15 segundos e no ensaio utilizando Etanol os dados são gerados a cada 12,5 segundos. A figura 16 é um exemplo de como os dados da ECU são apresentados no computador.

Figura 16: Layout do sistema de dados obtidos pela ECU

 NAPRO ELETRÔNICA INDUSTRIAL LTDA DIADEMA - SÃO PAULO - BR Telefone : 0 XX 11 4066-6677 Fera em Tecnologia			
Dados do Cliente / Veículo :			
Nome do Cliente : MASTERCOM			
Placa : FLEXMAST			
Marca : Ford	Modelo : Fiesta 1.0 8V Flex	RoCam Flex	Ano do Modelo :
Combustível : Flex	Hodômetro :	Data de Verificação do Hodômetro :	
Sistema de Injeção - Marelli IAW-4CFR			
Identificação			
7S55			
Rotação do Motor (rpm)	972 (750 a 950)	P. Atmosférica (mbar)	0
Rotação do Motor Ideal (rpm)	960	Sonda Lambda B1S1 (mVolts)	366 (50 a 1000)
Temperatura da Água (°C)	47 (80 a 108)	Sonda Lambda B1S2 (mVolts)	N/D
Temperatura do Ar (°C)	27 (20 a 70)	Ajuste Curto Prazo (%)	20
Atuador da Marcha Lenta (%)	25 (20 a 30)	Ajuste Longo Prazo (%)	-7
Tensão da Bateria (Volts)	14.2 (12.0 a 15.0)	Controle da Mistura (Lambda)	0.925
Tempo de Injeção (ms)	0.00 (1.00 a 5.00)	Relação Ar/Combustível	11.65
Avanço (°<	10.0 (-10.0 a 10.0)	Velocidade (km/h)	0
Posição da Borboleta (°<	15.3 (0.0 a 5.0)	Purga do Canister (%)	0
Pressão Coletor (mbar)	340 (220 a 380)	I22	VI22 LI22
Pressão Coletor (Volts)	1.43 (1.10 a 2.10)	I23	VI23 LI23
Carga Motor (%)	30		

Fonte: autor

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 17, apresenta os valores da rotação (rpm) do motor obtidos nos ensaios com gasolina (E22) e com Etanol (E96) em função do tempo (segundos). No gráfico é possível observar que nos dois casos, a rotação se estabeleceu quase que a mesma, com exceção no início aonde há uma pequena diferença.

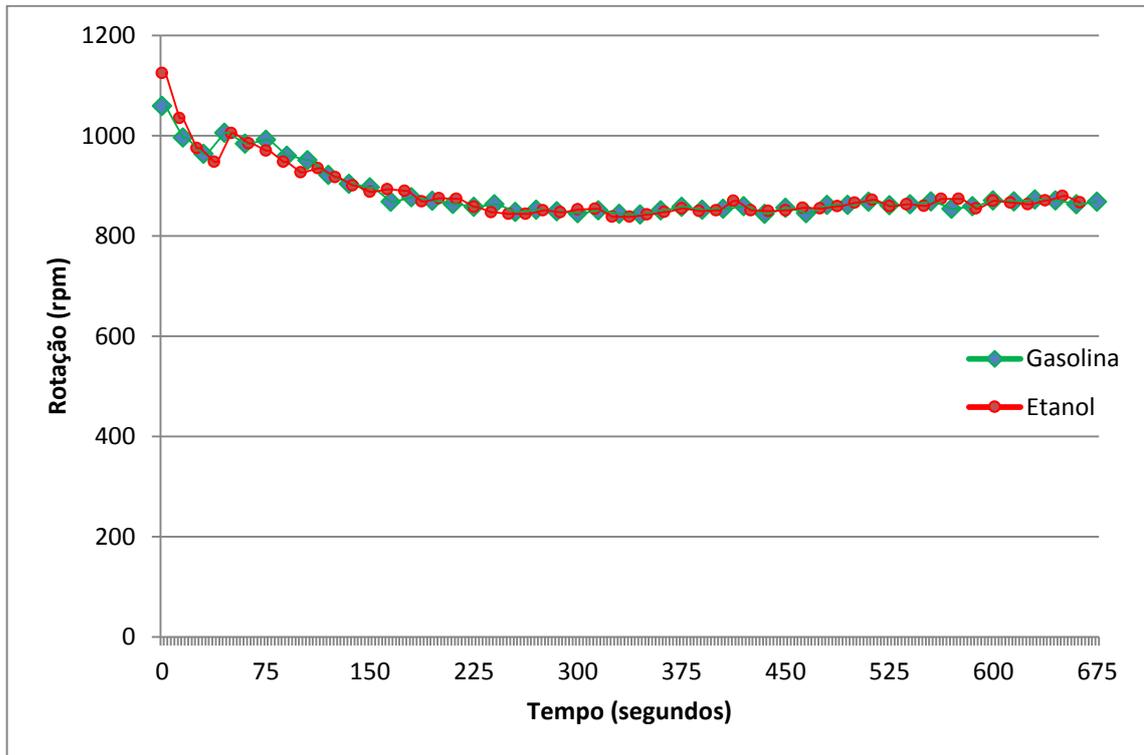
Em ambos os casos a rotação se inicia alta, tendo a gasolina iniciado com 1059 rpm e o etanol com um valor um pouco mais alto de 1125. Ambos decaem de forma um pouco rápida até que por volta de 55 segundos de ensaio, há um leve pico e após isso voltam a decair, até que em torno de 230 segundos os valores de rotação começam a se estabilizar com valores na faixa de 840 à 870 rpm.

No trabalho de Chen (2011), é possível verificar este mesmo gráfico de rotação em função do tempo porém para diversas proporções de misturas de etanol e gasolina. No artigo, nota-se que independente do combustível, o pico no início sempre ocorre, e o autor atribui esse efeito para o período de ignição. Ele afirma que quando o motor dá a partida, a ECU, injeta uma maior quantidade de combustível no motor com o objetivo de garantir que a ignição ocorra com maior garantia, fazendo com que a rotação atinja valores altos.

Os valores referentes aos dados de fatores de lambda obtidos nos ensaios em função do tempo (segundos) são apresentados no figura 18. Nele é possível perceber que assim como os valores de rotação, os coeficientes de ar dos dois combustíveis tenderam a seguir valores muito próximos um do outro.

Analisando o gráfico, logo no início ocorre uma brusca queda que em seu ponto mais baixo chega por volta de $0,600 \lambda$ e em seguida ocorre um pico no qual ele atinge o ponto de estequiometria. Se analisarmos a figura 17 em conjunto com a figura 18 é perceptível que o alto valor de rotação logo no início é resultado do alto valor de pobreza da mistura de combustível injetada, comprovando assim o que foi afirmado por Chen (2011). Ainda comparando os gráficos, vemos que o pico do valor de lambda que se tem após o vale acaba por influenciar no segundo pico na rotação.

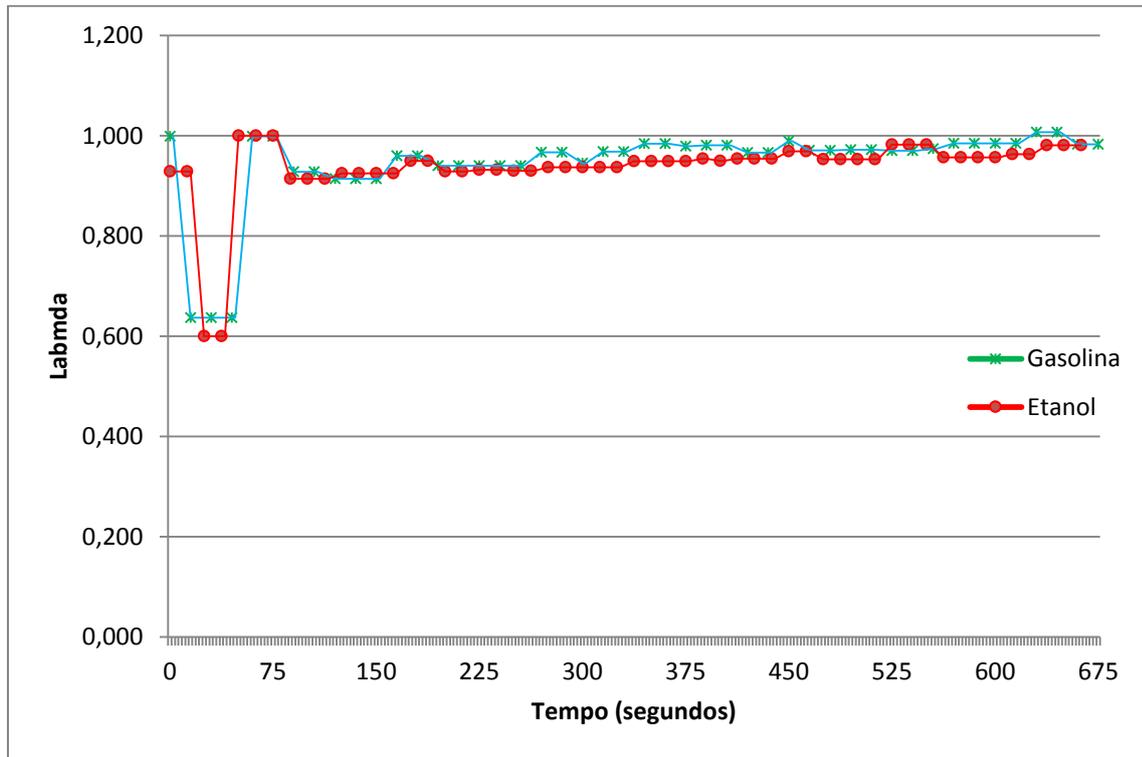
Figura 17 : Rotação em função do tempo de ensaio



Os valores de lambda mostram que na partida, durante a fase de aquecimento, o motor utiliza uma mistura rica na câmara de combustão. O fator que pode ter levado a ECU a utilizar este tipo de mistura pode ser porque misturas pobres (com excesso de ar) acabam por desacelerar o processo de aquecimento do motor, e como o mesmo busca atingir a sua temperatura de estabilidade, a ECU coloca valores de λ menos que 1.

No gráfico da para notar também, que mesmo ambos combustíveis apresentarem valores de de lambda próximos, é notável que a gasolina em sua maior parte apresenta valores levemente maiores, porém nada muito relevante.

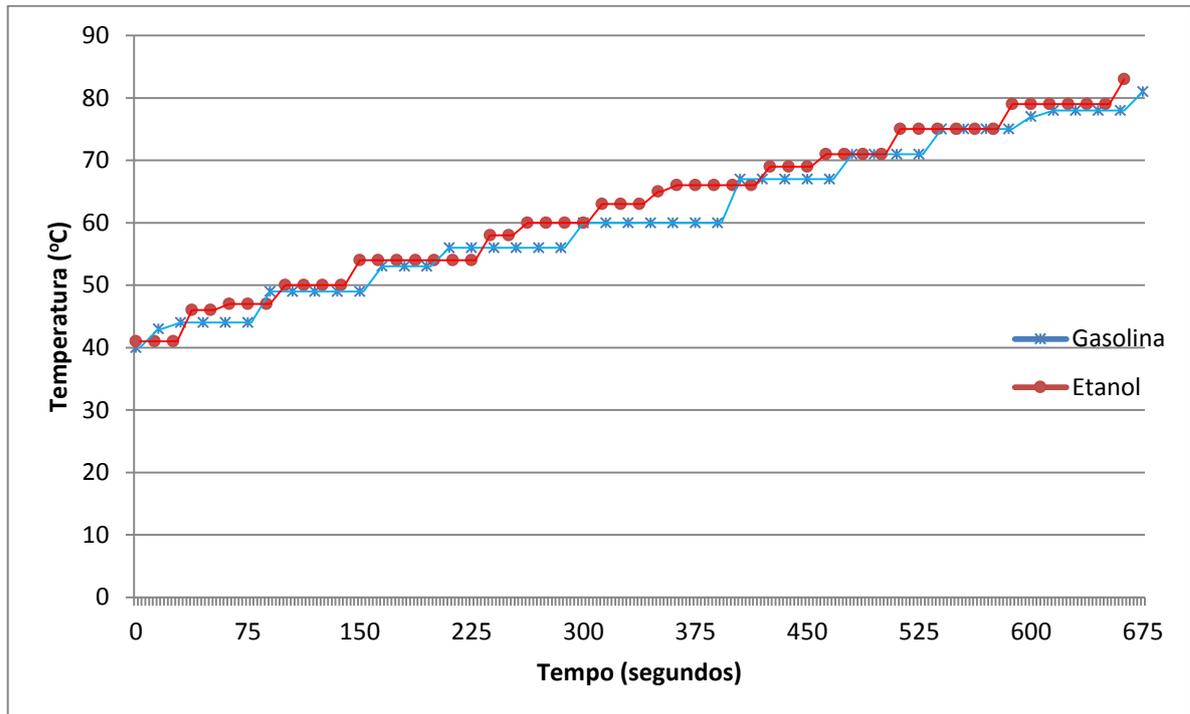
Figura 18: Fator de Lambda em função do tempo de ensaio



Foi medido as temperaturas do fluido de refrigeração do motor com o objetivo de se obter o tempo no qual o motor, operando com os dois combustíveis, demora até atingir 80 °C. Estes dados são apresentados na figura 19.

Observando os dados, nota-se que quem ambos os combustíveis terminam a fase de aquecimento em um tempo muito próximo, em que ambos tendem a aumentar de temperatura de forma similar. É possível notar que o Etanol, na maior parte do gráfico, apresenta valores de temperatura levemente maiores do que os vistos com a gasolina, de modo que o mesmo atinge 80 °C com 10 segundos de antecedência do que a gasolina.

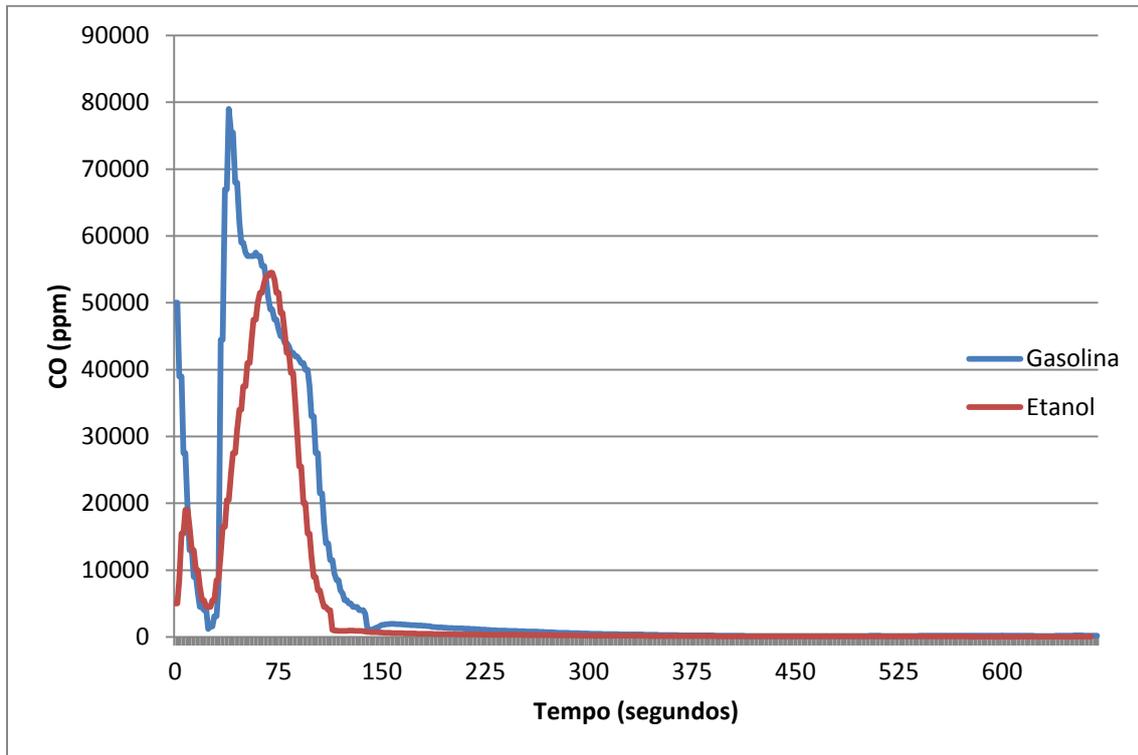
Figura 19: Temperatura em função do tempo de ensaio



A influencia que a mistura rica que é injetada logo no início do processo na produção do CO pode ser observada na figura 20. Nele vemos dois picos na produção do CO em ambos os combustíveis. Examinando os dados em conjunto com os valores obtidos de Lambda vemos que a grande emissão de CO gerada no início é proveniente do baixo λ que se é utilizado na partida, pois quanto mais rica a mistura é, menos oxigênio se tem na reação, de forma que na reação o Carbono não se oxide completamente, gerando assim maior quantidade Monóxido de Carbono.

Após o pico de produção de CO, vemos que ambos os combustíveis se igualam. Todavia, vemos no pico que o etanol apresenta valores menos do que a gasolina. No trabalho de Chen (2011) é possível observar esse mesmo efeito para misturas em diferentes proporções de etanol. O autor atribui que este acontecimento tem principal causa o fato da presença de Oxigênio dentro da molécula de Etanol, fazendo com que a combustão do carbono tenha maior chance de se gerar CO₂ (Combustão completa).

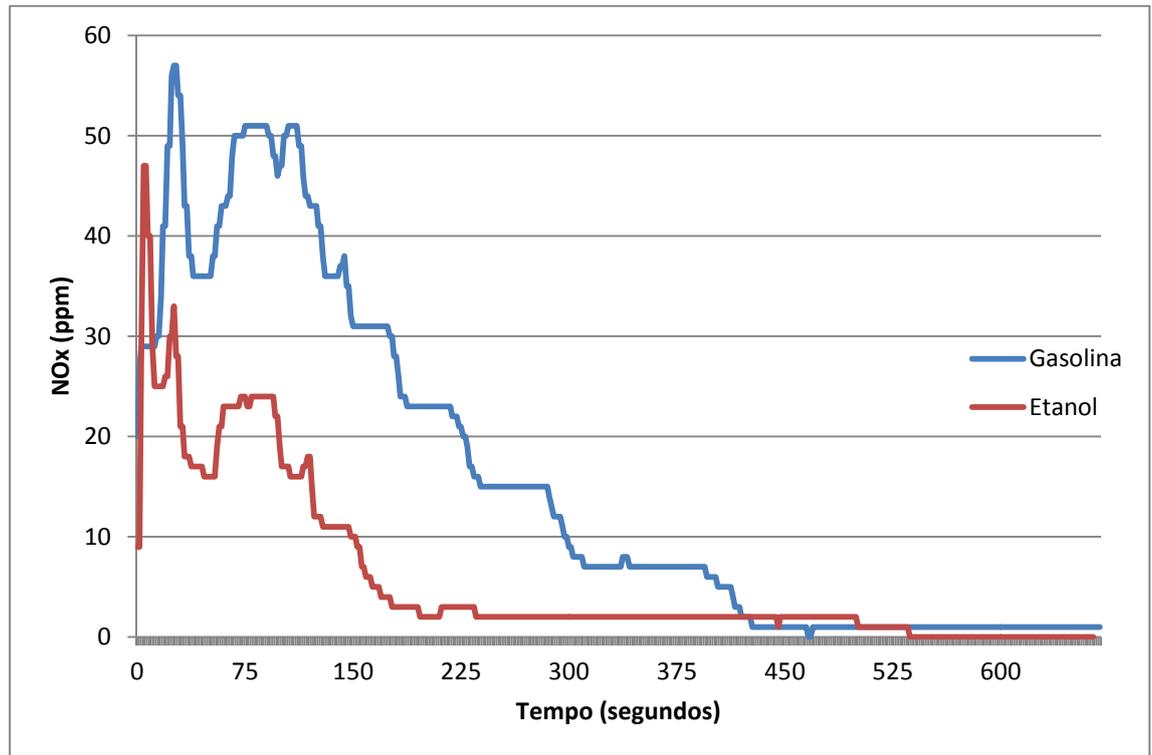
Figura 20: Emissão de CO em função do tempo de ensaio.



Nos trabalhos da literatura sobre o assunto, vemos que a emissão de NO_x é diretamente proporcional á temperatura do motor. No entanto, na figura 21 vemos que os dados de óxidos de nitrogênio obtidos no nosso ensaio não seguiram este padrão. No gráfico, para os dois combustíveis o NO_x começa alto e com o tempo vai diminuindo até que chegar em um ponto que estabilizam. O tempo para o etanol estabilizar foi de 170 segundo e para a gasolina foi obtido um tempo de 408 segundo.

No gráfico é possível notar que os dados do E96 apresenta a mesma forma gerada pelos do E22, porém em menor proporção, de modo se entende ter o mesmo processo só que em tempo mais curto e em menor amplitude. Este fato pode estar relacionado com o menor poder calorífico apresentado pelo Etanol, o que faz com que se tenha uma menor temperatura de chama adiabática.

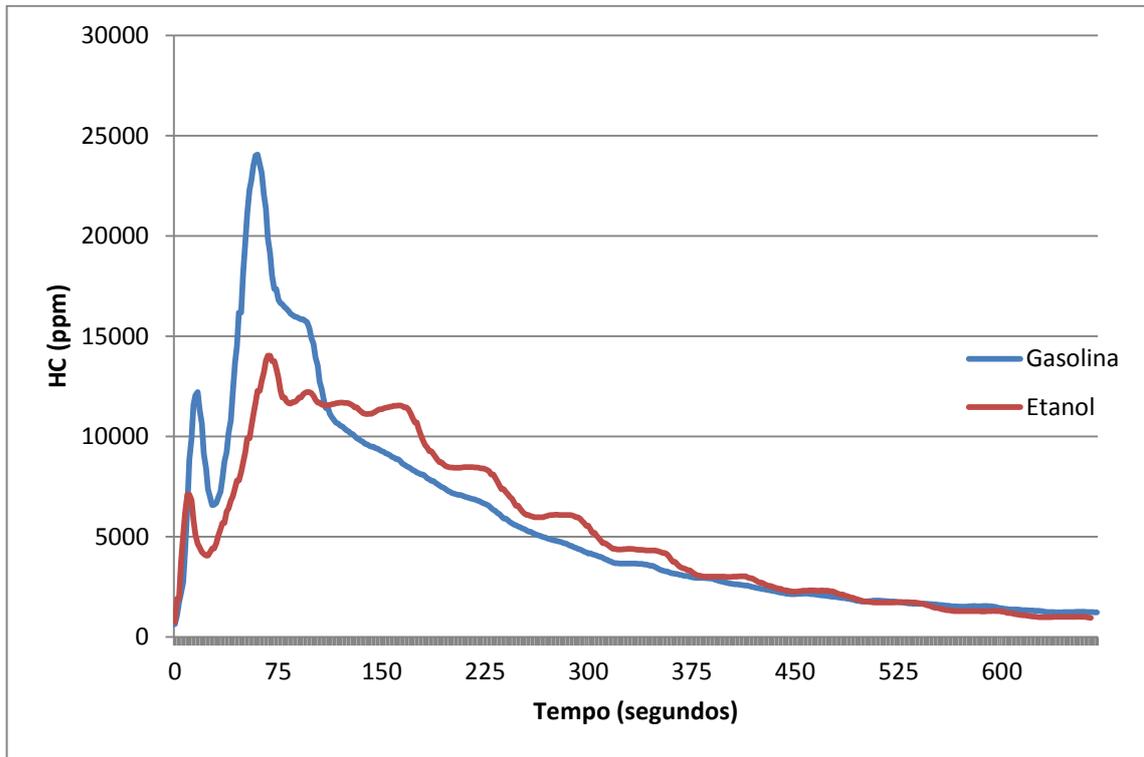
Figura 21: Emissão de NO_x em função do tempo de ensaio



No trabalho de Chen (2011), conforme se aumenta a quantidade de etanol na mistura, menor é a produção de HC, e também se observa que para independente da proporção, na partida ele tem um pico de emissão é menor pra maior quantidade de álcool. Na figura 22, aonde são apresentados a emissão de hidrocarbonetos medida nos nossos ensaios, mostra que o etanol gera menor quantidade de HC do que a gasolina, e vemos o mesmo pico na partida observado no trabalho de Chen (2011).

O pico que se tem no início do gráfico ocorre por conta da baixa quantidade de oxigênio injetada na câmara de combustão, que acaba por desencadear uma reação de combustão incompleta, tendo assim no escapamento uma maior emissão de HC decorrente de Hidrocarbonetos presente no combustível que não foram queimados e Hidrocarbonetos gerados por reações intermediárias (MARQUES, 2016). Já a diferença que se observa entre a gasolina e o etanol se dá pelo mesmo motivo da diferença de produção de CO, pois o oxigênio presente no etanol faz com que a reação ocorra de forma mais completa, que por sua vez diminui as chances de ser gerado CO e HC.

Figura 22: Emissão de Hidrocarbonetos em função do tempo de ensaio



5. CONCLUSÃO

A eficiência de combustão do etanol se mostrou melhor no etanol. Esse efeito pode ser verificado pelas emissões de CO e HC que foi menor nos resultados obtidos para o E96. A eficiência de combustão é indiretamente a proporcional a produção de CO e HC, pois quanto mais completa a combustão, menos destes dois poluentes são gerados.

Embora os dados tenham ocorrido de forma diferente do usualmente observado, os dados obtidos apresentam valores referentes a emissão de NO_x, se mostraram menores para o E96 em comparação com o E22. Este efeito foi atribuído ao fato do etanol apresentar um menor Poder Calorífico, que por consequência tem também menor temperatura de chama adiabática, que influencia na nos dados de NO_x.

Quanto aos dados de variação de temperatura, lambda e rotação, ambos os combustíveis apresentaram valores muito próximos nos três gráficos, tendo leves diferenças em alguns dos gráficos.

No gráfico de lambda em função do tempo se ve o pico de mistura rica que é gerado na partida para garantir que a ignição ocorra. Nos gráficos 4 e 6 é possível ver que essa injeção a mais de combustível acaba por gerar picos de emissão de Monóxido de Carbono e de Hidrocarbonetos, decorrente da combustão incompleta que ocorre pela falta de ar.

Algo interessante que pode ser observado analisando todos os gráficos é o fato de que a ECU tenta fazer com que os valores dos diferentes combustíveis se estabilizem em valores iguais, pois mesmo no gráfico aonde se ve diferença entre eles, no final eles sempre terminam com valores iguais ou muito próximos.

6. REFERÊNCIAS

- ANP. (2013, Dezembro 25). *Resolução ANP Nº 40/2013*. Retrieved Setembro 7, 2017, from Sindiposto: <http://www.sindiposto.com.br/images/Leis/Resoluo-ANP-n.-684.pdf>
- ANP. (2015, Abril 15). *Resolução ANP n° 19/2015*. Retrieved Setembro 9, 2017, from SPdistribuidora: <http://spdistribuidora.com/administrador/docs/manual/20.pdf>
- ANP. (2017, Novembro 27). *Etanol*. Retrieved Novembro 28, 2017, from Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis: <http://www.anp.gov.br/wwwanp/biocombustiveis/etanol>
- ANP. (2017, Dezembro 1). *Gasolina*. Retrieved Dezembro 10, 2017, from Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis: <http://www.anp.gov.br/wwwanp/petroleo-derivados/155-combustiveis/1855-gasolina>
- BOSCH. (1988). *Automotive eletric/eletronic systems*. Warrendale.
- BOSCH. (1995). *Automotive eletric/eletronic system 2ed*. Warrendale.
- BRUNETTI, F. (2012). *Motores de combustão interna*. São Paulo: Blucher.
- CARVALHO, M. A. (2011). Avaliação de um motor de combustão interna ciclo Otto utilizando diferentes tipos de combustíveis. *Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Universidade Federal da Bahia (UFBA)*.
- CHEN, R.-H., CHIANG, L.-B., CHEN, C.-N., & LIN, T.-H. (2011, Janeiro 21). Cold-start emissions of an SI engine using ethanolegasoline blended fuel. *Applied Thermal Engineering*, p. 5.
- CONAMA. (1989, Agosto 25). *Resolução CONAMA Nº5 de 15 de junho de 1989. Publicada no DOU, de 25 de agosto de 1989, seção 1, páginas 14713-14714.* . Retrieved Outubro 22, 2017, from Conselho Nacional do Meio Ambiente: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=61>
- COSTA, R., & SODRÉ, J. (2010). Hydrous ethanol vs gasoline–ethanol blend: engine performance and emissions. *FUEL*.
- GARCIA, O. (1988). *Motores de Combustão Interna*. São Paulo: DER-SP.
- MAPA, M. P. (2018, Janeiro 1). *Produção Brasileira de Etanol por ano-safra*. Retrieved Janeiro 28, 2018, from http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/agroenergia/arquivos-producao/copy15_of_06_prodetanolportipo.pdf
- MARQUES, D. O., TREVIZAN, L. S., OLIVEIRA, I. M., SEYE, O., & SILVA, R. E. (2016, Julhor 22). Combustion assessment of an ethanol/gasoline fex-fuel engine. *Springer*, p. 8.

- MILHOR, C. E. (2002). Sistema de desenvolvimento para controle eletrônico dos motores de combustão interna ciclo Otto. *Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo*, 101.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. (2013). *Inventário de Emissões por Veículos Rodoviários*. Retrieved Novembro 28, 2017, from <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/19497/1/AnaliseEmissoesPoluentes.pdf>
- OICA. (2016). Retrieved Novembro 22, 2017, from International Organization of Motor Vehicle Manufacturers: <http://www.oica.net/>
- PROCONVE. (2013). *Ministério do Meio Ambiente*. Retrieved Dezembro 18, 2017, from http://www.mma.gov.br/estruturas/163/_arquivos/proconve_163.pdf
- PROMOT. (2013). *Ministério do Meio Ambiente*. Retrieved Dezembro 18, 2017, from http://www.mma.gov.br/estruturas/163/_arquivos/promot_163.pdf
- PULKRABEK, W. W. (2003). *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. Platteville: Prentice-Hall.
- SANTOS, F. M., & SANTOS, F. A. (2005). O combustível “hidrogênio”. *Educação, Ciência e Tecnologia*.
- SENRA, K. A., LIMA, K. A., & ABREU, R. A. (2014). Estudo da aplicação de hidrogênio e gasolina em motor ciclo Otto. *Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia), Curso de Engenharia Mecânica – Automação e Sistemas, Universidade São Francisco (USF)*.
- SMUTZER, C. (2006). *Application of Hydrogen Assisted Lean Operation to Natural Gas-Fueled Reciprocating Engines (HALO)*. Cambridge: Mass.
- WOLLMANN, F. L. (2013). Estudo da utilização de gás hidrogênio em veículos automotores. *Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia), Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJU)*.
- WYLEN, G. V. (1995). *Fundamentos da termodinâmica clássica*. São Paulo: Edgar Blücher LTDA.

