



UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS (UFGD)
FACULDADE DE ENGENHARIA (FAEN)
ENGENHARIA DE ENERGIA

Gabrielle Arce Matos
Natália Cardoso Dal Molin

**Análise do consumo de ar em um motor alternativo ciclo Otto pela
concentração de oxigênio nos produtos de combustão**

Dourados-MS
2014

Gabrielle Arce Matos
Natália Cardoso Dal Molin

**Análise do consumo de ar em um motor alternativo ciclo Otto pela
concentração de oxigênio nos produtos de combustão**

Trabalho de Conclusão de Curso de
Graduação apresentado para obtenção do
Título de Bacharel em Engenharia de
Energia.

Faculdade de Engenharia

Universidade Federal da Grande Dourados

Orientador: Prof. Me. Ramon Eduardo
Pereira Silva

Dourados-MS

2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

M433a Matos, Gabrielle Arce

Análise do consumo de ar em um motor alternativo ciclo Otto pela concentração de oxigênio nos produtos de combustão. / Gabrielle Arce Matos, Natália Cardoso Dal Molin – Dourados: UFGD, 2014.

65f. il.; (Iconografia, gráficos e tabelas)

Orientador: Prof. Msc. Ramon Eduardo Pereira Silva.

Monografia (Graduação em Engenharia de Energia)
FAEN, Faculdade de Engenharia – Universidade Federal da Grande Dourados.

1. Álcool anidro. 2. Consumo de ar. 3. Excesso de oxigênio. I. Natália Cardoso Dal Molin. II. Título.

CDD – 621.15

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central – UFGD.

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte

Gabrielle Arce Matos
Natália Cardoso Dal Molin

**Análise do consumo de ar em um motor alternativo ciclo Otto pela
concentração de oxigênio nos produtos de combustão**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como requisito parcial para
obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia na Universidade Federal
da Grande Dourados, pela comissão formada por:

Orientador: Prof. Me. Ramon Eduardo Pereira Silva
FAEN- UFGD

Prof. Me. Antônio Carlos Caetano de Souza
FAEN- UFGD

Prof. Dr. Fernando Augusto Alves Mendes
FAEN- UFGD

Dourados, 19 de Dezembro de 2014

“Há mais pessoas que desistem, do que pessoas que fracassam!”

(Henry Ford)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, ao longo de nossas vidas, e não somente nestes anos como universitárias, mas que em todos os momentos é o maior Mestre que alguém pode conhecer.

Aos nossos pais que sempre nos apoiaram, deram todo o alicerce, amor e compreensão e não mediram esforços fazendo o possível para podermos concluir mais esta etapa em nossas vidas.

Aos nossos irmãos, que assim como nossos pais sempre estiveram dispostos a ajudar no que fosse necessário, entendendo nossos momentos de ausência dedicados ao estudo superior, entendendo que o futuro é feito a partir da constante dedicação do presente.

Ao professor Me. Ramon Eduardo Pereira Silva por nos proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional, pela paciência na orientação e incentivo que tornaram possível a conclusão deste trabalho.

A esta Universidade Federal da Grande Dourados, seu corpo docente, gostaríamos de dizer que a palavra mestre, nunca fará justiça aos professores dedicados, então, sem nominar terão todos nossos eternos agradecimentos. E também a direção e administração que foram tão importantes em nossas vidas acadêmicas e no desenvolvimento deste trabalho.

Aos nossos amigos de classe, que em todos estes anos estiveram presentes em nossas vidas, nos momentos de alegria e nas dificuldades, nos incentivando e apoiando sempre que necessário.

Um agradecimento especial à Fagner e Wilson por todo o amor, carinho e compreensão dados a nós, nos momentos em que estivemos ausentes, sabendo de nossos sonhos e nos apoiando para que fossem realizados.

RESUMO

Motores são máquinas que têm por finalidade transformar qualquer tipo de energia primária em energia mecânica para realizar trabalho. Em motores a combustão interna do ciclo Otto, o sistema de admissão é responsável por preparar a mistura ar/combustível em uma razão adequada para garantir o melhor funcionamento do equipamento. Quando a razão ar/combustível nas condições de operação é maior que a estequiométrica dizemos que a mistura é pobre, pois contem mais ar que o necessário para que a reação de combustão completa aconteça. Quando acontece o contrário dizemos que a mistura é rica. Os motores a combustão interna de ciclo Otto também são conhecidos como motores de ignição por centelha, pois a reação de combustão é iniciada pela liberação de energia em uma vela que provoca uma faísca. Nesse tipo de motor o sistema de combustível tenta manter a mistura próxima às condições de estequiometria, ligeiramente pobre para garantir a queima total do combustível. A qualidade da mistura pode ser determinada pela presença de oxigênio nos produtos de combustão e o dispositivo utilizado para fazer essa medida é a sonda lambda. O consumo de ar do motor tem razão direta com a geração de potência do mesmo e esse consumo pode ser determinado pelo balanço mássico entre os reagentes e os produtos. Esse trabalho tem por finalidade realizar um estudo sobre o consumo de ar de um motor Ford Zetec Rocam Flex de 1000 cc através da análise de gases de exaustão, utilizando um analisador de gases para medir a presença de oxigênio no escapamento da bancada utilizando-se etanol anidro.

Palavras-chave: consumo de ar, excesso de oxigênio, álcool anidro.

ABSTRACT

Engines are machines which convert any type of energy into mechanical energy or power to produce force and motion. In internal combustion engines of the Otto cycle fuel system is responsible for preparing the air / fuel mixture in an appropriate rate to ensure the best operation of the equipment. When the air / fuel rate under operating conditions is higher than the stoichiometric it is said that the mixture is poor since it contains more air than required for the combustion reaction to occur. When the opposite happens it is said that the mixture is rich. The internal combustion engines of Otto cycle are also known as spark-ignition engines, because the combustion reaction is initiated by the release of energy in a spark plug that causes a spark. In this type of engine, the fuel system tries to maintain the mixture nearer to the conditions of stoichiometry, slightly poor to ensure complete fuel combustion. The quality of the mixture can be determined by the presence of oxygen in the combustion products and the device used to make this measurement is lambda probe. The engine's air consumption is directly related to the power generation itself and this consumption can be determined by mass balance between reactants and products. This study aims to conduct a study on the air consumption of an engine Ford Zetec Rocam Flex 1000 cc using a gas analyzer to measure the presence of oxygen in the exhaust countertop using anhydrous ethanol.

Keywords: air consumption, excess oxygen, anhydrous alcohol.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Fluxos de massa e energia em um motor de combustão interna.....	11
Figura 2- Partes Estacionários do Motor de Combustão Interna.....	14
Figura 3- Partes Móveis: Motor de Combustão Interna.....	15
Figura 4- Partes Móveis: Pistão, Biela e Virabrequim	16
Figura 5 - Partes Móveis: Eixo do comando de Válvulas e Engrenagem do Eixo comando de válvulas.....	17
Figura 6 - Partes Móveis: Haste, Tucho e Balancim.....	18
Figura 7- Partes Móveis: Haste, Tucho e Balancim.....	18
Figura 8- Bomba Rotativa	19
Figura 9- Bomba de Engrenagens	20
Figura 10 - Bomba D'água	20
Figura 11- Vista dos componentes de um motor de combustão interna	21
Figura 12 - Nomenclatura referente às posições do pistão	24
Figura 13- Nomenclatura referente às posições do pistão	25
Figura 14-Ciclo Ar Padrão Otto – Diagrama P-V.....	27
Figura 15- Sonda Lambda.....	31
Figura 16- Funcionamento da sonda lambda.....	32
Figura 17- Comportamento do Sensor Lambda	33
Figura 18– Comportamento Sonda Lambda conforme temperatura	34
Figura 19– Diagrama de funcionamento da Sonda Lambda	35
Figura 20- Motor Ford Fiesta flex- Power.....	51
Figura 21- Vista superior do motor.	52
Figura 22- Escapamento acoplado da sonda do analisador de gases.	52
Figura 23- Balança e reservatório de combustível.	53
Figura 24- Gráfico da abertura da válvula borboleta X RPM.....	54
Figura 25- Gráfico da vazão mássica de combustível X RPM.....	55
Figura 26- Gráfico da concentração de oxigênio nos gases de escape x RPM.	56
Figura 27- Gráfico da vazão mássica de ar x RPM.	56
Figura 28- Gráfico do fator Lambda medido e calculado x RPM.....	57
Figura 29- Gráfico da vazão mássica de ar teórica X RPM.....	58
Figura 30- Gráfico da eficiência volumétrica X RPM.....	59
Figura 31- Gráfico da eficiência volumétrica x Abertura da válvula.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Componentes do motor de combustão interna	22
Tabela 2- Especificação do combustível	48
Tabela 3- Ficha técnica do motor	49
Tabela 4- Especificação dos equipamentos	49
Tabela 5- Dados da vazão de ar real, referente ao experimento 1	64
Tabela 6- Dados da vazão de ar real, referente ao experimento 2	64
Tabela 7- Dados da vazão de ar real, referente ao experimento 3	64
Tabela 8- Dados da vazão de ar real, referente ao experimento 4	64
Tabela 9- Dados da vazão teórica de ar referente aos quatro experimentos	65

LISTA DE SÍMBOLOS

D= Diâmetro dos cilindros do motor.

j = coeficiente de oxigênio nos reagentes.

m_{ar} = massa de ar admitida pelo motor.

\dot{m}_a = vazão mássica de ar seco que escoar para dentro dos cilindros.

\dot{m}_{ar} = vazão mássica para um mol de combustível.

m_c = massa de combustível admitida pelo motor.

$\dot{m}_{combustível}$ = vazão mássica do combustível.

\dot{m}_g = Vazão mássica de uma mistura fresca que escoar para dentro dos cilindros

MCU= Unidade principal de análise de gases.

$\dot{m}_{ar\ admitida}$ = vazão mássica de ar admitido.

MMO_2 = massa molar do oxigênio.

MMN_2 = massa molar do nitrogênio.

MMC_2H_6O = massa molar do combustível.

$\dot{m}M_{combustível}$ = vazão molar do combustível.

n= Rotação do motor.

N_i = potência indicada.

η_t = eficiência (ou rendimento) térmica do motor.

η_v = Eficiência (ou rendimento) volumétrica.

PMS= Ponto Morto Superior.

PMI=Ponto Morto Inferior.

PCI = poder calorífico inferior.

R = constante universal dos gases.

R_{ar} = constante dos gases para o ar.

$R_{ar/comb}$ = razão ar combustível.

$R_{ar/comb\ estequiométrica}$ = razão ar/combustível estequiométrica.

RCU= Unidade de controle remoto.

S=Curso do pistão.

V_1 = Volume compreendido entre a cabeça do pistão e o cabeçote.

V_2 = Volume morto ou volume da câmara de combustão.

V_{ar} = volume teórico admitido de ar.

$V_{cilindros}$ = Cilindrada total do motor.

V_d = Volume deslocado do motor, deslocamento volumétrico do motor ou cilindrada total.

V_{du} = Cilindrada unitária.

$V_{total\ do\ ar}$ = volume total o ar admitido.

X_{O_2} = concentração de oxigênio.

$X_{O_2\ bs}$ = concentração de oxigênio na base seca.

Z = Número de cilindros do motor.

ϵ = coeficiente de oxigênio nos produtos.

ρ_{ar} = massa específica do ar.

ρ_e = Densidade (ou massa específica) de mistura fresca.

λ = fator Lambda.

SUMÁRIO

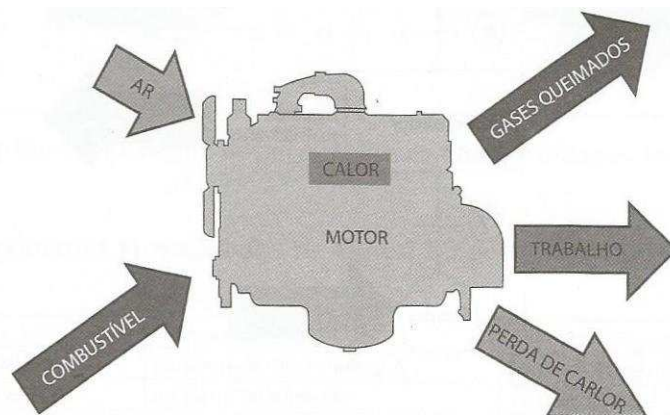
Análise do consumo de ar em um motor alternativo ciclo Otto pela concentração de oxigênio nos produtos de combustão	4
1 INTRODUÇÃO	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 Motores de combustão Interna	13
2.1.1 Principais componentes do motor	13
2.1.2 Motores alternativos	21
2.2 Princípios de funcionamento	25
2.2.1 Motor de quatro tempos	25
2.2.2 Ciclo de ar Otto Ideal	26
2.3 Combustão em motores de ignição por centelha	27
2.4 Relação ar/combustível	28
2.5 Sonda lambda	30
2.6 Carburador	35
2.7 Injeção eletrônica multiponto	36
2.8 Consumo de ar no motor	37
3 MODELAGEM TEÓRICA	39
3.1 Massa de ar por análise dos gases de combustão	39
3.2 Eficiência volumétrica	46
4 MATERIAIS E MÉTODOS	48
4.1 Preparação da amostra	48
4.2 Descrição da bancada	48
4.3 Analisador de gases	50
5 RESULTADOS	54
6 CONCLUSÃO	60
7 TRABALHOS FUTUROS	62
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
9 ANEXOS	64

1 INTRODUÇÃO

Máquinas que permitem transformar calor em trabalho são denominadas *Máquinas Térmicas*. Para que isso ocorra, o calor pode ser admitido de diferentes formas. O caso estudado é considerando que o calor é admitido pela queima do combustível, ou seja, trabalho mecânico obtido através da energia química. (BRUNETTI, 2012)

Na figura 1 observa-se então, que o fluxo ativo é a mistura do combustível e do ar na entrada do volume de controle e também produtos da combustão na saída. (BRUNETTI, 2012)

Figura 1- Fluxos de massa e energia em um motor de combustão interna



(Fonte: BRUNETTI, 2012)

O trabalho é obtido através de uma sequência de processos realizados por uma substância denominada de “Fluxo Ativo – FA”.

Desta forma, analisando o comportamento do FA, as máquinas térmicas são divididas em (BRUNETTI, 2012):

- Motores de Combustão Externa – MCEs: são os tipos de motores nos quais a combustão ocorre externamente ao fluxo ativo, como por exemplo pode-se citar as máquinas a vapor ou motor Stirling, nestes o FA opera apenas como veículo da energia térmica que será transformada em trabalho. (BRUNETTI, 2012)

- Motores de Combustão Interna – MCIs: ao contrário dos MCEs, nestes o FA participa diretamente da combustão, os quais são o foco deste trabalho e que serão classificados no decorrer do mesmo. (BRUNETTI, 2012)

Há aproximadamente 100 anos os motores de combustão interna vêm sendo utilizados. Neste tempo passaram por uma série de desenvolvimentos no que diz respeito aos detalhes, sem que houvessem mudanças significativas na estrutura básica, desde que o motor Otto e o Diesel foram inventados em aproximadamente 1876 e 1897 respectivamente. (TAYLOR, 1971-1976)

Segundo Taylor, “todos os requisitos básicos, tais como a economia de combustível, tamanho, peso e custo, em proporção à potência, confiabilidade e durabilidade, sofrem melhoras a cada ano”. Um projeto bem sucedido de um motor de combustão interna apresenta ainda alguns desafios, uma vez que envolvem escolhas importantes como motores de quatro tempos contra os de dois tempos, ou ainda aspiração natural ou sobrealimentação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Motores de combustão Interna

Os motores alternativos de combustão interna são máquinas térmicas definidas quanto à participação do fluido ativo diretamente no processo de combustão, ou seja a combustão ocorre dentro do cilindro do motor. (BRUNETTI, 2012)

Os motores de combustão interna podem ser classificados de acordo com a ignição que pode ocorrer por centelha ou pela compressão. O motor de ciclo Otto, utiliza ignição por centelha enquanto que o motor de o ciclo Diesel opera com ignição por compressão. Além disso os motores podem ser diversificados quanto ao movimento do pistão para gerar trabalho podendo ser alternativos deslocando o pistão em movimento de vaivém e transformando em rotações contínuas por um conjunto de pistão conectado ao virabrequim por meio de uma biela. Motores rotativos que produzem diretamente a rotação gerando trabalho e motores de impulso, onde este trabalho é gerado pela força dos gases expelidos pelo motor. Como exemplo tem-se os motores Wankel, os quais utilizam, ao invés de pistões semelhantes ao dos motores alternativos convencionais, rotores com formato semelhante ao de um triângulo. (BRUNETTI, 2012)

A diferenciação quanto ao número de cilindros; monocilíndricos ou poli cilíndricos, bem como o número de tempos (2 ou 4 tempos) também são utilizados como classificação. (BRUNETTI, 2012)

Os motores de combustão interna são constituídos de partes fixas e móveis. As partes fixas são o bloco, o cárter e o cabeçote do motor. As peças móveis são a biela, pistão, árvore de comando de válvulas, virabrequim, válvulas de admissão e escape. (BRUNETTI, 2012)

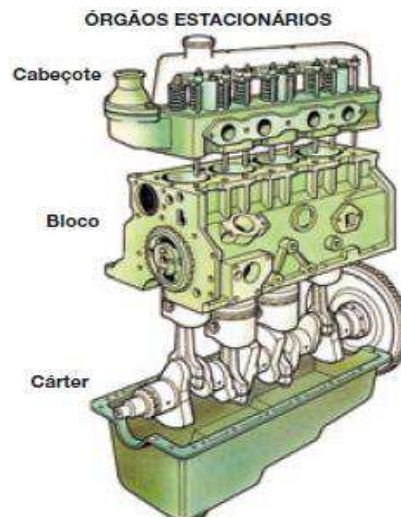
2.1.1 Principais componentes do motor

Os principais componentes de um motor e suas funções são descritos a seguir, e estão separadas entre estacionárias e móveis.

- Estacionárias:

- ✓ Bloco: Nele estão localizados os cilindros e é o motor propriamente dito, como mostra a figura 2 abaixo. Nota-se que os motores com arrefecimento a ar possuem cilindros aletados separados do bloco e na parte de baixo do bloco estão alojados os mancais centrais que apoiam o virabrequim e em vários casos, a árvore de comando de válvulas.

Figura 2- Partes Estacionárias do Motor de Combustão Interna



(FONTE: MAHLE, 2014)

- ✓ Cabeçote: Este serve de tampa para os cilindros, sendo contra este que é comprimida a mistura ar combustível pelo pistão além de suportar o conjunto de válvulas, como já apresentado na figura 2.

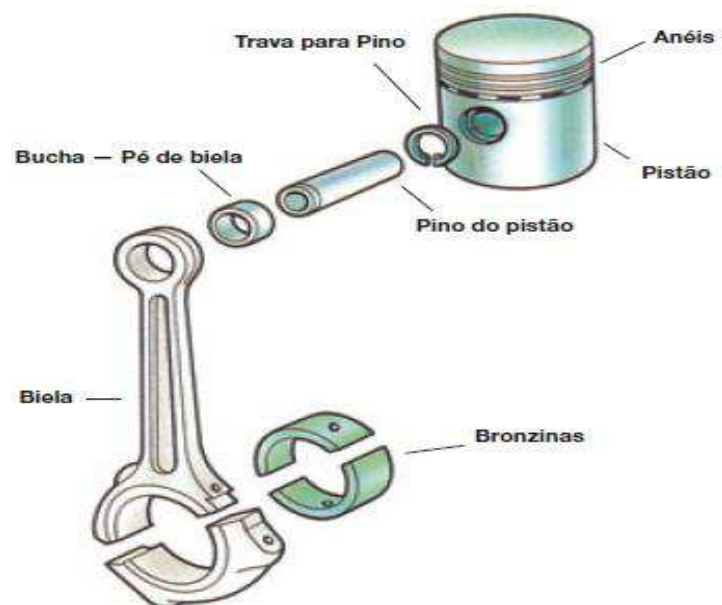
- ✓ Carter: O câster é a tampa de baixo do bloco a qual protege os componentes inferiores do motor e é nele que está o óleo lubrificante.

✓ Coletor de Admissão: É ele que recebe e distribui para os cilindros, no caso do Ciclo Otto a mistura, e no Ciclo Diesel, o ar, que é aspirado pelo pistão através do filtro de ar.

✓ Coletor de Escape: É responsável por receber os gases resultantes da combustão e lançá-los na atmosfera pelo tubo de escape. (MAHLE, 2014)

• Móveis: A figura 3 apresenta algumas partes móveis de um motor, bem como suas posições e encaixes umas nas outras.

Figura 3- Partes Móveis do Motor de Combustão Interna



(Fonte: MAHLE, 2014)

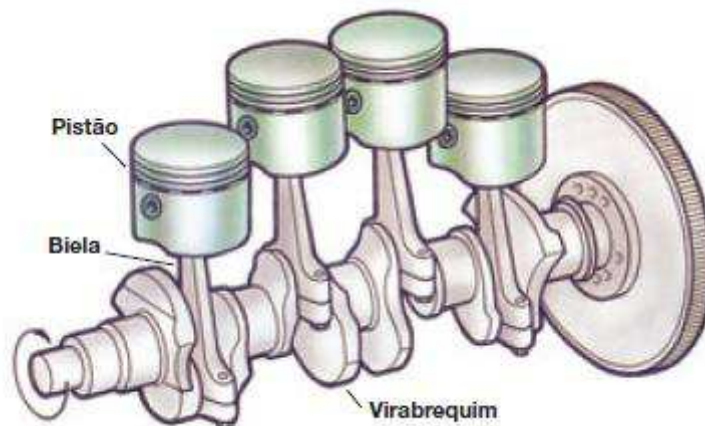
✓ Biela: Como mostra a figura 3, a biela é um braço de ligação entre o pistão e o virabrequim, desta forma, ela recebe o impulso do pistão e transmite ao virabrequim, ou seja, este conjunto transforma em movimento rotativo do virabrequim, o movimento retilíneo do pistão. (MAHLE, 2014)

✓ Pistão/Anel: Através de um pino, transmite a biela a força recebida da expansão dos gases queimados. Em geral o pistão é fabricado em liga de alumínio e é a parte móvel da câmara de combustão. Estrutura também possível de ser observada na figura 3.

✓ Virabrequim: Na maioria das vezes, o virabrequim é instalado na parte inferior do bloco, no qual é impresso o movimento vindo das bielas. É o eixo do motor propriamente dito. (MAHLE, 2014)

A figura 4 mostra um esquema do virabrequim, pistões e biela.

Figura 4- Partes Móveis: Pistão, Biela e Virabrequim



(Fonte: MAHLE, 2014)

✓ Eixo comando de válvulas: É acionado pelo virabrequim por engrenagem, corrente ou correia dentada e tem por função abrir as válvulas de admissão de escape como mostra a figura 5.

Figura 5 - Partes Móveis: Eixo de Comando de Válvulas e Engrenagem do Eixo de Comando de válvulas

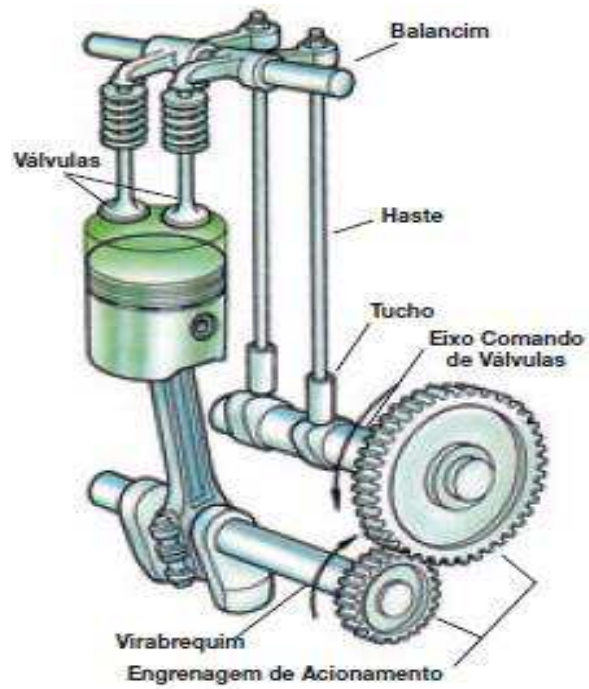


(Fonte: MAHLE,2014)

✓ Válvulas: As válvulas podem ser divididas entre válvula de admissão, que tem por finalidade permitir a entrada da mistura ar combustível, e válvula de escape, a qual permite a saída dos gases queimados. (MAHLE, 2014)

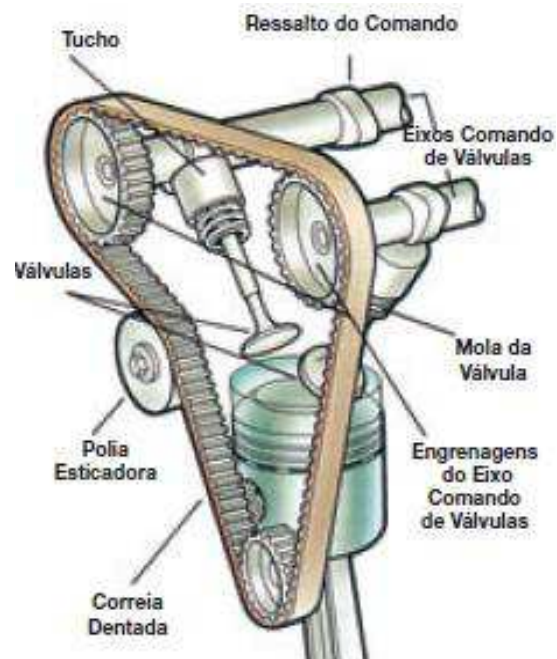
✓ Conjunto de acionamento das válvulas: este conjunto é formado pelo tucho e uma haste, interligado ao balancim que atua diretamente sobre a válvula. O tucho é acionado quando o eixo comando de válvulas gira, movendo a haste, abrindo a válvula pelo movimento transmitido pelo balancim. A figura 7 apresenta um esquema simples para melhor entendimento do posicionamento de tais órgãos. Este conjunto tucho, haste e balancim, existe para cada válvula, tanto a de admissão quanto a de escape, e este conjunto de acionamento das válvulas pode ser por meio de engrenagens, corrente ou correia, como mostram as figuras 6 e 7, respectivamente. (MAHLE, 2014)

Figura 6 - Partes Móveis: Haste, Tucho e Balancim



(Fonte: MAHLE, 2014)

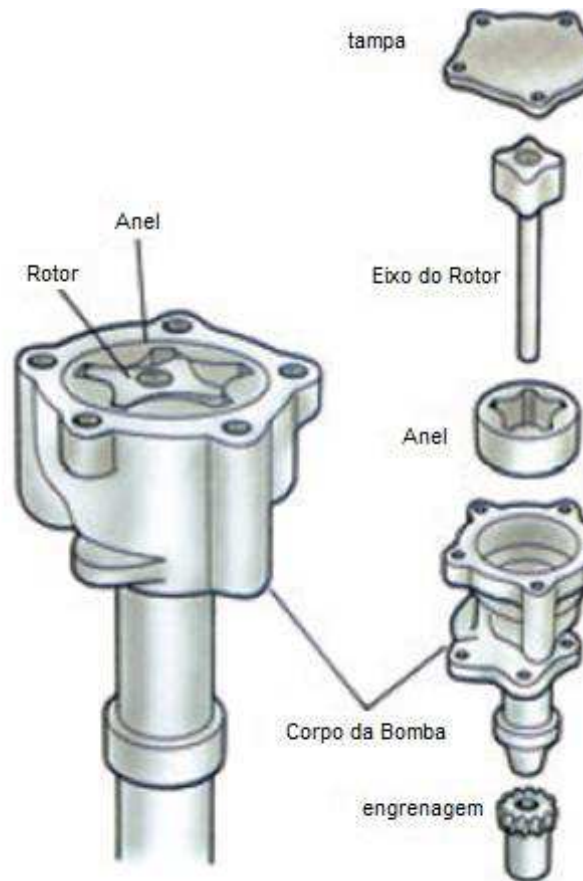
Figura 7- Partes Móveis: Haste, Tucho e Balancim



(Fonte: MAHLE, 2014)

- ✓ Polia e anti-vibrador: Através da correia, transmite o movimento de rotação do virabrequim à bomba e ao alternador, absorvendo as vibrações do funcionamento do motor.
- ✓ Bomba de óleo: Têm por finalidade bombear o óleo a todos os pontos do motor que precisam de lubrificação, enviando-o sob pressão. A mais utilizada é a de engrenagem, mas existem outras diversas, como mostra as figuras 8 e 9. (MAHLE, 2014)

Figura 8- Bomba Rotativa



(Fonte: MAHLE, 2014)

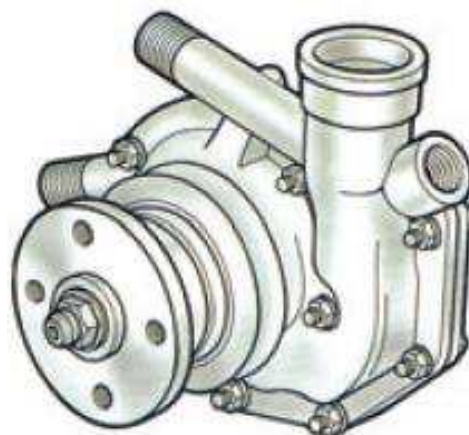
Figura 9- Bomba de Engrenagens



(Fonte: MAHLE, 2014)

✓ Bomba d'água: este tem por finalidade fazer a água circular pelo radiador e motor, para arrefecimento do motor, a figura 10 apresenta a bomba d'água.

Figura 10 – Bomba D'água

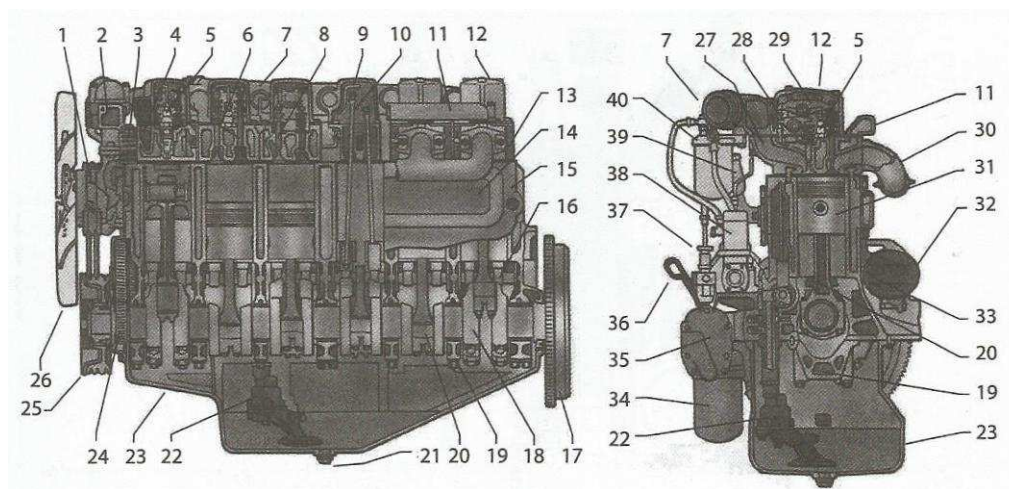


(Fonte: MAHLE, 2014)

2.1.2 Motores alternativos

Para se ter um melhor entendimento das partes de um motor alternativo de combustão interna, a figura 11 mostra os principais elementos do mesmo:

Figura 11- Vista dos componentes de um motor de combustão interna - MCI



(Fonte: BRUNETTI, 2012)

Tabela 1- Componentes do motor de combustão interna

1. Bomba d'água	15. Bloco	28. Balancim da válvula de admissão
2. Válvula termostática	16. Eixo comando de válvulas	29. Balancim da válvula de escapamento
3. Compressor de ar	17. Volante	30. Coletor de escapamento
4. Duto de admissão	18. Virabrequim	31. Pistão
5. Injetor de combustível	19. Capa de mancal	32. Motor de partida
6. Válvula de escapamento	20. Biela	33. Dreno de água
7. Coletor de admissão	21. Bujão do cárter	34. Filtro de óleo
8. Válvula de admissão	22. Bomba de óleo	35. Radiador de óleo
9. Linha de combustível	23. Cárter	36. Vareta de nível de óleo
10. Haste da válvula	24. Engrenagem do virabrequim	37. Bomba manual de combustível
11. Duto de água	25. Amortecedor vibracional	38. Bomba injetora de combustível
12. Tampa de válvula	26. Ventilador	39. Respiro do cárter
13. Cabeçote	27. Duto de admissão	40. Filtro do combustível
14. Tampa lateral		

(Fonte: BRUNETTI, 2012)

A descrição do virabrequim (18), não segue um padrão, podendo ser denominado também como girabrequim, eixo de manivelas e eixo de cambotas, dentre outras. (BRUNETTI, 2012)

A figura 12 apresenta uma descrição quanto a posição do pistão no interior do cilindro: (BRUNETTI, 2012)

Com as figuras 12 e 13, é possível fazer o equacionamento pertinente representado pelas equações (1) e (2). A equação (1) refere-se ao volume deslocado pelo pistão de um ponto para outro, para o caso de cilindrada unitária, como segue:

$$V_{du} = V_1 - V_2 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} S \quad (1)$$

Onde: V_{du} – Cilindrada unitária – também conhecida como volume deslocado útil ou deslocamento volumétrico – é o volume deslocado pelo pistão de um ponto morto a outro.

D – Diâmetro dos cilindros do motor

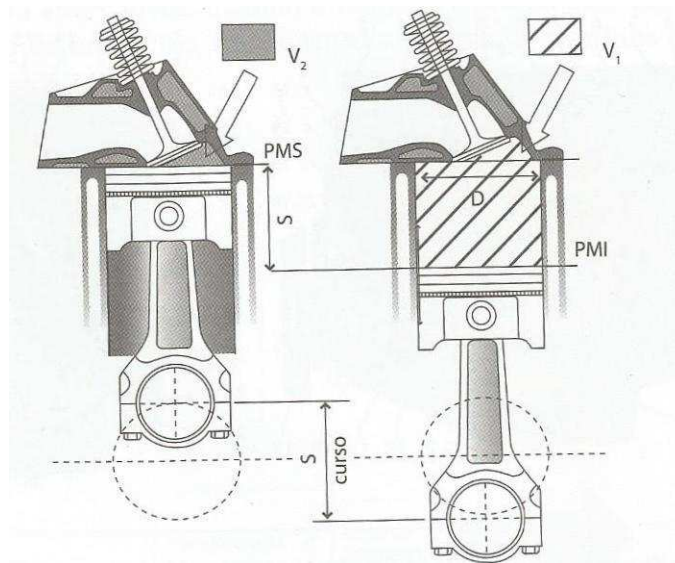
Ou ainda, a equação (1) pode ser escrita como é apresentada na equação (2):

$$V_d = V_{du} \cdot z = \frac{\pi \cdot D^2}{4} S \cdot z \quad (2)$$

Onde: z – Número de cilindros do motor

V_d – Volume deslocado do motor, deslocamento volumétrico do motor ou cilindrada total.

Figura 12 - Nomenclatura referente às posições do pistão



(Fonte: BRUNETTI, 2012)

Onde: PMS - Ponto Morto Superior – é a posição na qual o pistão está o mais próximo possível do cabeçote.

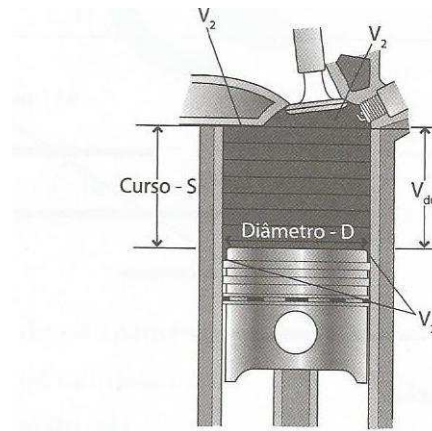
PMI – Ponto Morto Inferior – é a posição na qual o pistão está o mais afastado possível do cabeçote.

S – Curso do pistão – é a distância percorrida pelo pistão quando se desloca de um ponto morto para outro (do PMS ao PMI) ou vice-versa.

V_1 – Volume total - é o volume compreendido entre a cabeça do pistão e o cabeçote, quando o pistão está no PMI.

V_2 – Volume morto ou volume da câmara de combustão – é o volume compreendido entre a cabeça do pistão e o cabeçote, quando o pistão está no PMS.

Figura 13- Nomenclatura referente às posições do pistão



(Fonte: BRUNETTI, 2012)

2.2 Princípios de funcionamento

2.2.1 Motor de quatro tempos

Um motor de combustão interna alternativo consiste em movimento de um pistão no interior de um cilindro que possui duas válvulas, sendo que a capacidade do cilindro é o seu diâmetro e o curso do mesmo é a distância e direção que o pistão se movimenta. O pistão está no ponto morto superior quando o volume é mínimo conhecido como volume morto superior e quando o mesmo se movimenta ao ponto morto inferior o volume percorrido pelo pistão é dito como volume de deslocamento; esse movimento do pistão é convertido em movimento de rotação por um mecanismo de manivela. (MORAN E SHAPIRO,2009)

Em motores de quatro tempos o pistão executa quatro cursos distintos dentro do cilindro para cada duas rotações do eixo de manivelas.

- Curso de admissão- Nesse curso, a válvula de admissão está aberta e admite a carga para dentro do cilindro. Para motores com ignição por centelha esta carga é uma mistura de ar e combustível e nos motores por compressão a carga é exclusivamente o ar.

- Curso de compressão- Nesse curso, as válvulas de admissão permanecem fechadas, a temperatura e a pressão da carga aumentam e com isto fornece trabalho ao pistão no cilindro. Assim; inicia um processo de combustão da mistura gasosa que está em alta temperatura e pressão induzida por uma vela no fim do curso de compressão como já dito anteriormente ou por ignição por centelha ou a combustão é feita pela injeção de combustível no ar que está quente e comprimido para motores com ignição por compressão.

- Curso de potência- onde a mistura gasosa se expande realizando trabalho e volta para o ponto morto inferior.

- Curso de escape- a válvula de escape se abre expulsando os gases queimados da combustão.

Em motores de dois tempos os processos de admissão, compressão, expansão e escape são realizados em um a volta do eixo de manivelas. (MORAN E SHAPIRO,2009)

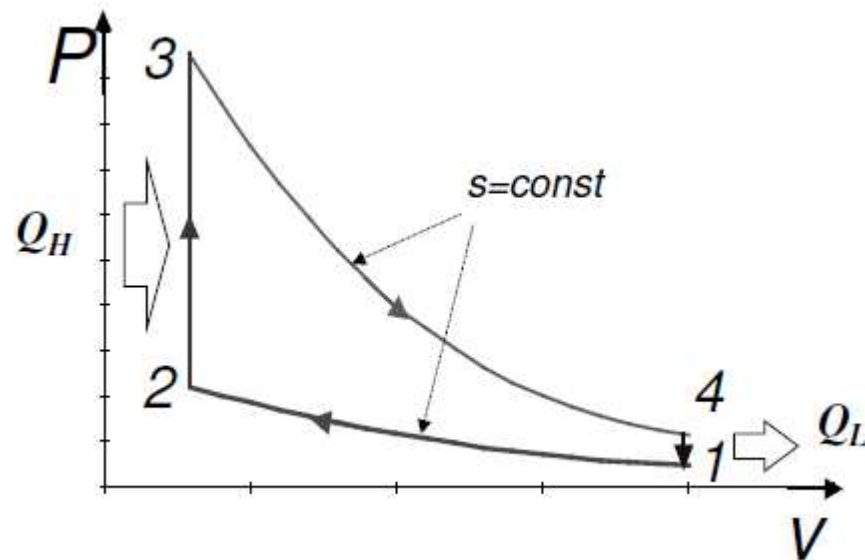
2.2.2 Ciclo de ar Otto Ideal

Os motores de combustão interna se baseiam em ciclos termodinâmicos ideais onde demonstram os processos em que os gases percorrem ao interior do motor. Os ciclos se diferem quanto ao modo em que se adiciona calor.

O ciclo de ar padrão Otto é um ciclo ideal e se aproxima do motor por ignição por centelha e que considera que a adição de calor ocorre enquanto o pistão se encontra no ponto morto superior. O processo 1-2 é uma compressão isoentrópica do ar quando o pistão se movimenta do ponto morto da manivela para o ponto morto do cabeçote. O processo 2-3 é a transferência de calor para o ar a volume constante enquanto o pistão está no PMS; em um motor real este momento é corresponde a ignição mistura de ar-combustível pela centelha e logo após a sua queima. O processo 3-4 é uma expansão isoentrópica e o processo 4-1 completa o ciclo através de um processo a volume constante no qual o calor é rejeitado pelo ar quando o pistão está no PMI.

A partir da figura 14, mostra-se a visualização de tais processos, portanto, segue:

Figura 14– Ciclo Ar Padrão Otto – Diagrama P-V.



(Fonte: YANAGIHARA, 2014)

Em um motor real de ignição por centelha o rendimento térmico aumenta quando a relação de compressão é elevada, essa utilização de relação de compressão maiores é realizada para obtenção de rendimentos térmicos maiores porém em um motor real quando se aumenta a relação de compressão ocorre o aumento a detonação do combustível que é uma queima do mesmo extremamente rápida ocasionada por forte pressão no cilindro do motor antes do ponto de ignição da ideal e devem ser evitadas para não originar batidas. Os aumentos das relações de compressão estão sendo possíveis devido ao desenvolvimento de combustíveis antidetonantes. Para aumentar a octanagem da gasolina, tem sido adicionado o etanol a mesma. (BORGNAKKE E SONNTAG, 2009)

2.3 Combustão em motores de ignição por centelha

No instante que ocorre a ignição, os motores de ignição por centelha recebem uma mistura homogênea e essencialmente gasosa de combustível e ar, fato este que já tem grande foco de pesquisa experimental e teórica. Logo, estas pesquisas mostram que este tipo de combustão é caracterizado pelo desenvolvimento relativamente rápido de uma chama que se inicia em um determinado ponto da ignição se espalhando continuamente no sentido a se afastar desde ponto. Esta

combustão é chamada de normal quando ocorre até a extremidade da câmara sem mudança abrupta de sua forma ou velocidade; no entanto, quando a mistura parece queimar na frente da chama, parecendo iniciar a ignição, é chamada de autoignição; e por fim, o fenômeno é conhecido por *detonação* quando ocorre um grande aumento na taxa de reação com ondas de pressão mensuráveis. (TAYLOR,1976)

As observações dos processos químicos envolvidos na combustão são muito difíceis de serem observados, uma vez que está ocorrendo rapidamente nas misturas ar/combustível e também devido às grandes temperaturas. Mas observa-se que a composição química dos produtos da combustão e dos gases que não foram queimados, após o resfriamento, pode ser determinada, no entanto experiências mostram que inúmeros compostos intermediários são observados na transição destes estados. (TAYLOR,1976)

Estudos mostram que a combustão destas misturas (ar/combustível) depende dos reagentes e produtos, as quais se caracterizam por poucos constituintes bastante ativos que geram reações provocando produtos intermediários, multiplicando desta forma o número de reações, até o equilíbrio ou seja, até a combustão completa, ou ainda até o ponto em que as reações de formação das cadeias sejam mais fracas que as da destruição das mesmas. (TAYLOR,1976)

No que diz respeito à propagação da chama, em uma combustão normal, o que é denominado como *frente da chama* é o contorno da frente da zona de reação, a qual, junto com os produtos que são queimados atrás dela, é luminosa o suficiente para uma observação e análise óptica ou fotográfica; quando isto não é possível, pode-se, com uma pequena adição de composto de sódio, tornar a chama luminosa. (TAYLOR,1976)

Quando o gás se move através da chama, e não o oposto, estas são chamas estacionárias. Um exemplo deste tipo de queima é observado nas turbinas a gás. (TAYLOR,1976)

2.4 Relação ar/combustível

Nos motores de combustão interna, o sistema de combustível é o responsável por preparar a mistura com ar ambiente e o combustível contido no tanque. Desta

forma, como já mencionado, esta mistura poderá ser rica ou pobre, com falta ou excesso de ar, respectivamente. Logo, observa-se que tal sistema manterá a mistura próxima às condições de estequiometria, ligeiramente pobre para garantir a queima total do combustível.

Para se estimar tal proporção, segue a equação (3):

$$R_{ar/comb} = \frac{m_{ar}}{m_c} \quad (3)$$

Onde: $R_{ar/comb}$ = relação ar combustível (adimensional);

m_{ar} = massa de ar admitida pelo motor (g);

m_c = massa de combustível admitida pelo motor (g);

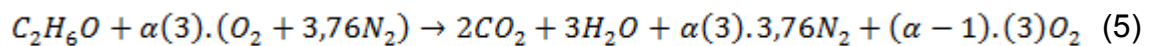
Com a equação (4) é possível calcular o fator lambda (λ), o qual apresenta o tipo de mistura, sendo classificada entre rica ou pobre, como segue:

$$\lambda = \frac{R \frac{ar}{combustível} \text{ real}}{R \frac{ar}{combustível} \text{ estequiométrico}} \quad (4)$$

Quando na mistura tiver falta de combustível, ela é denominada mistura pobre, e ao contrário, se houver excesso do mesmo, é uma mistura rica. Tendo em vista estes conceitos, quando o fator lambda é maior que um é denominada mistura pobre, quando o lambda é menor que um mistura rica e lambda igual a uma mistura estequiométrica.

O valor de referência para esta proporção estequiométrica é a relação que permite uma combustão completa.

Para o etanol anidro, cuja composição é C_2H_6O , sabendo que o ar tenha 21% de oxigênio e 79% de nitrogênio e sabendo que as massas atômicas do carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio são iguais a 12, 1, 16 e 14 respectivamente, o balanço estequiométrico é apresentado na equação (5):



Onde: " α " é o excesso de ar.

Então, após o balanço estequiométrico, é possível realizar o cálculo da relação ar/combustível conforme segue na equação 6:

$$R_{ar/comb} \text{ estequiométrica} = \frac{3[(16 \times 2) + (3,76 \times 14 \times 2)]}{[(2 \times 12) + (1 \times 6) + (1 \times 16)]} = 8,95 \quad (6)$$

Onde: $R_{ar/comb}$ estequiométrica é a razão ar/combustível estequiométrica.

2.5 Sonda lambda

A sonda lambda, também conhecida como sensor lambda ou sensor de oxigênio, é um dos componentes mais importantes de um carro. Entender seu

funcionamento é de suma importância para um bom funcionamento do motor. (LOPES, 2010)

Desta forma, vale ressaltar que os sensores lambda tem por finalidade detectar a concentração informando assim em forma de sinal elétrico a central de combustível a qual fará o balanço estequiométrico. A figura 15 apresenta uma sonda lambda para maior conhecimento do aparato. (LOPES, 2010)

Figura 15– Sonda Lambda

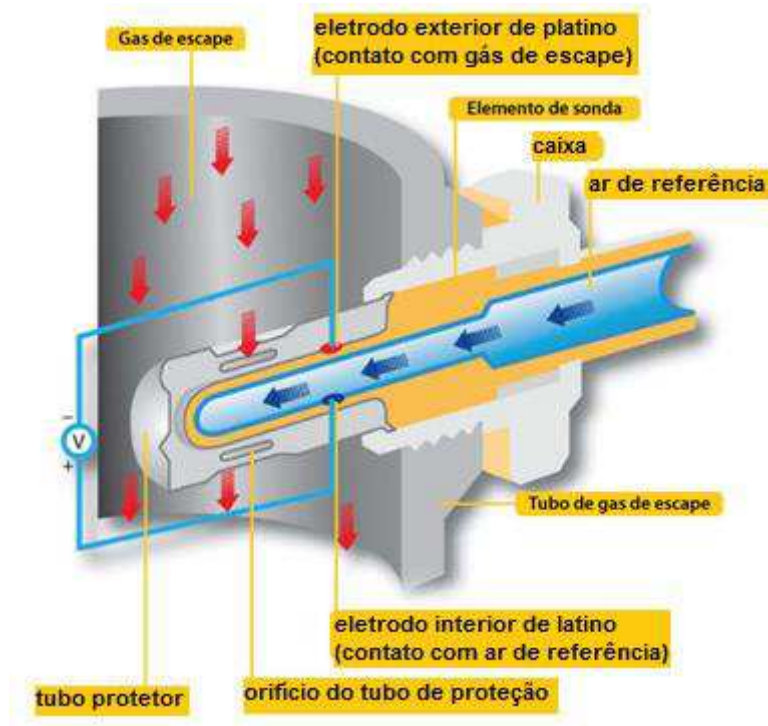


(Fonte: LOPES, 2010)

Tais sensores tem em sua composição o dióxido de zircônio, componente uma vez que atinge temperaturas superiores a 300°C, transforma-se em um condutor de íons de oxigênio, e é devido a este componente que a sonda consegue detectar o teor de oxigênio presente nos gases de escape. Desta forma, a tensão medida é enviada para a central de combustível para que os cálculos sejam feitos, tendo por base o fator lambda. (LOPES, 2010)

A figura 16 apresenta um esquema simples do funcionamento de uma sonda lambda.

16– Funcionamento da sonda lambda

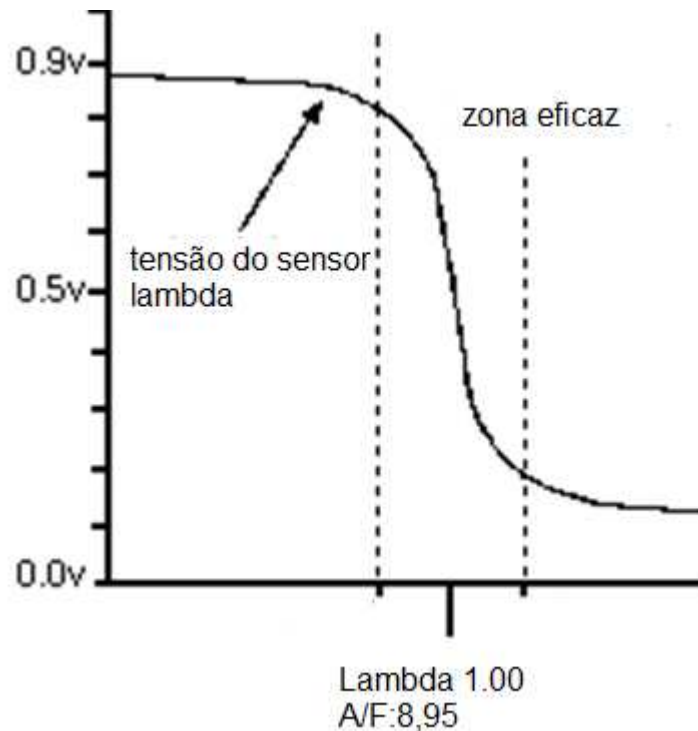


(Fonte: LOPES, 2010)

Conforme mencionado, a sonda funciona de maneira ótima apenas com temperaturas acima de 300°C. Então, para que a leitura seja a melhor possível ela deve receber os gases de todos os cilindros e, para que isso ocorra, é fixada o mais próximo possível do motor, Pode também ser localizada próximo ao catalisador, uma vez que esta possui resistência ao aquecimento, não sendo necessário ficar próxima ao motor. (LOPES, 2010)

O sinal da sonda lambda é medido em milivolts (mV), variando entre 50 e 900mV. Tal variação ocorre conforme a concentração de Oxigênio presente nos gases se distancia do ponto estequiométrico. O tempo de injeção (TI), é medido em milissegundos, tal tempo corresponde ao tempo que a válvula injetora, ou bico injetor, permanece aberta, ou ainda, o tempo que a central fica com o bico energizado para pulverizar o combustível dentro da câmara de combustão. Conforme apresentado na figura 17.(LOPES, 2010)

Figura 17– Comportamento do Sensor Lambda



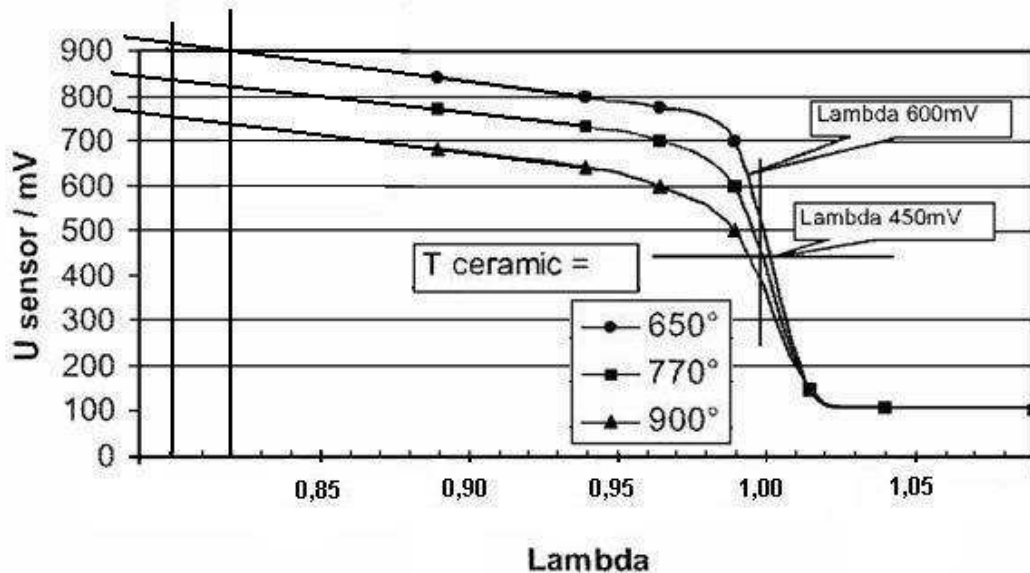
(Fonte: LOPES, 2010)

O TI é alterado conforme a sonda lambda emite um sinal informando a ocorrência de alterações na mistura ar/combustível, sendo assim, o TI é calculado pela central que usa como base as informações dos sensores espalhados pelo motor e as alterações descritas acima. (LOPES, 2010)

Esta correção só é ignorada quando a sonda não atingir a temperatura de trabalho que é de 300°C, como dito anteriormente, caso contrário, é feita o tempo todo, tanto em desacelerações como em acelerações em plena carga. A correção ocorre da seguinte maneira: quando o sinal recebido pela central é menor que 300mV, ela entende que tem uma mistura pobre, ou seja, com pouco combustível, então ela aumenta o tempo de injeção para estabilizar a mistura. O mesmo ocorre quando o sinal é maior que 600mV, no entanto de forma contrária, ela entenderá que a mistura está rica, com excesso de combustível e fará com que o TI abaixe, corrigindo a mistura. (LOPES, 2010)

A figura 18 apresenta o comportamento do sensor lambda conforme temperaturas para se manter a mistura ideal. (MONZEIROS, 2013)

Figura 18– Comportamento Sonda Lambda conforme temperatura



(Fonte: MONZEIROS, 2013)

Alguns fatos podem estar relacionados com o excesso de combustível, causando uma mistura rica e forçando a central a empobrecer a mistura, como: (LOPES, 2010)

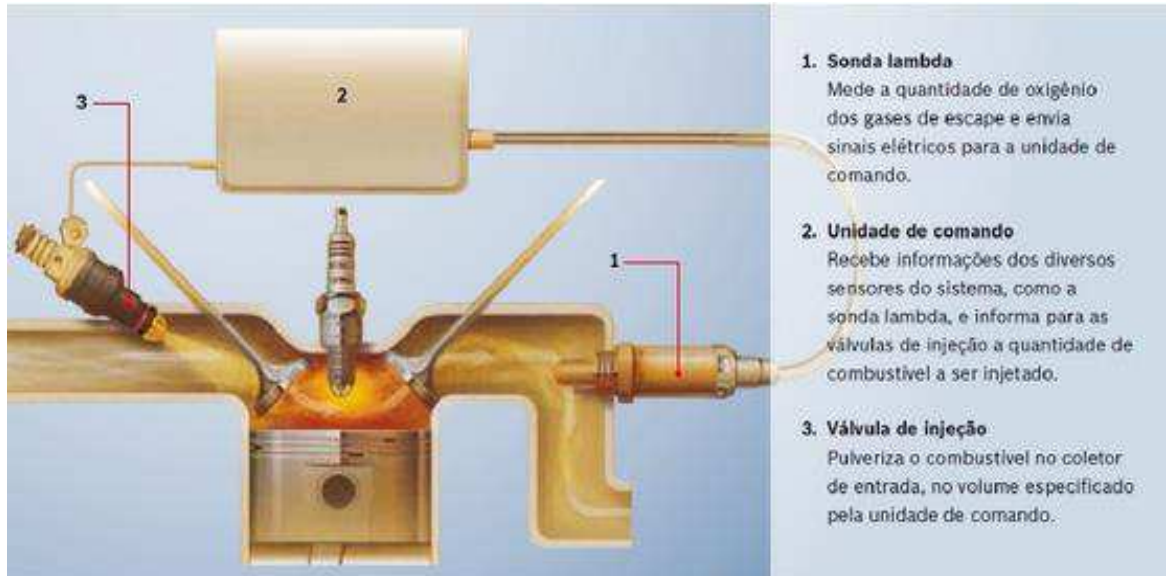
- Correia fora do ponto,
- Catalisador entupido;
- Regulador de pressão furado;
- Bico com vazão acima do normal;
- Problema no sistema de ignição: velas, cabos, etc.

No caso de uma mistura pobre estar ocorrendo, alguns fatores preponderantes podem ser: (LOPES, 2010)

- Problemas de baixa pressão na linha de combustível;
- Bicos injetores sujos;
- Entrada de ar falsa;

A figura 19 apresenta esquema do funcionamento de uma sonda-lambda:

Figura 19– Diagrama de funcionamento da Sonda Lambda



(Fonte: GALVEZ, 2011)

2.6 Carburador

Basicamente o funcionamento do carburador ocorre através da admissão do ar no pistão, o qual passa em alta velocidade pelo difusor aspirando combustível. O pedal do acelerador e a borboleta estão interligados, e é ela que dosa a quantidade da mistura ar/combustível que o motor necessita. (VILANOVA, 2014)

Como mencionado anteriormente, essa mistura deve ser tal que o motor tenha um bom funcionamento e consumo normal de combustível. O carburador teve seu avanço tecnológico forçado uma vez que necessitava acompanhar as exigências de emissão de poluentes na atmosfera; tal evolução chegou à injeção eletrônica. (VILANOVA, 2014)

Existem vários modelos de carburadores, os quais mudam de acordo com a potência e da aplicação. Em um carburador simples o combustível alimenta os quatro cilindros, já o de estágio duplo alimenta dois cilindros por vez e é mais avançado tecnologicamente. (VILANOVA, 2014)

A carburação sofre influência de diversos componentes e fatores como filtro de ar, pressão atmosférica, coletor de admissão, válvulas, ignição, combustível etc.

e é um processo que finaliza na câmara de combustão, iniciando no carburador. (VILANOVA, 2014)

2.7 Injeção eletrônica multiponto

O sistema de Injeção Eletrônica é uma das maiores inovações tecnológicas no ramo dos automóveis. Esta surgiu para substituir o carburador agregando mais eficiência ao motor, em especial no que diz respeito às emissões de gases pelo escapamento, mesmo antes de contar com gerenciamento eletrônico. A função de tal equipamento, da mesma forma que o carburador, é a de fazer a mistura ar/combustível. De maneira que em carros modernos isso é feito mais precisamente possível. (CARROSNAWEB, 2014)

Na injeção eletrônica, um computador determina por quanto tempo, quantidade e quando as válvulas de injeção, ou injetores, abrem; baseando-se no quanto o motorista apertou o pedal do acelerador, ou ainda pela rotação do motor, as temperaturas de ar e do líquido de arrefecimento, dentre outras informações. Tais informações chegam em sinais elétricos para o computador, colhidas previamente por sensores. (CARROSNAWEB, 2014)

Desta forma, a quantidade de combustível que entrar irá se juntar ao ar que está sendo admitido pelo motor, formando assim a mistura ar/combustível. A injeção eletrônica por ser monoponto (EFI) ou multiponto (MPFI), por ponto central ou tantos pontos quanto forem os cilindros, respectivamente. E ainda vale dizer que a injeção multiponto pode ser sequencial (SFI), na qual as válvulas se abrem de acordo com a ordem de ignição do motor. (CARROSNAWEB, 2014)

As válvulas de injeção dos sistemas localizam-se nos ramos do coletor de admissão tanto no MPFI quanto SFI, anteriormente aos dutos de admissão do cabeçote. (CARROSNAWEB, 2014)

Para os sistemas de injeção não existe manutenção preventiva, o que favorece os proprietários, sendo então que o único trabalho para com este sistema é manter a limpeza das válvulas e injeção. Uma maneira de se prorrogar a eficiência das válvulas de injeção do carro é abastecê-lo preferencialmente com gasolina aditivada, assegurando assim a limpeza dos componentes por aproximadamente

150.000 km. Apesar de custar um pouco mais, este combustível por manter a limpeza das válvulas, compensando sua utilização compensa em longo prazo. (CARROSNAWEB, 2014)

Seu princípio de funcionamento da seguinte forma: quando há partida do motor, os pistões executam movimento de subida e descida, sendo que nesta última produz-se, no coletor de admissão, vácuo, aspirando assim ar da atmosfera que passa pelo medidor de fluxo de ar e pela borboleta, chegando por fim nos cilindros do motor. (CARROSNAWEB, 2014)

Então, o medidor de fluxo de ar informa qual volume de ar foi admitido para que a unidade de comando permita que as válvulas injetem a quantidade certa de combustível, gerando assim a mistura de ar/combustível mais conveniente para o funcionamento do motor. Vale ressaltar que, quanto mais adequada a mistura for, melhor será o rendimento e a economia de combustível com a emissão de menos poluentes. (CARROSNAWEB, 2014)

2.8 Consumo de ar no motor

Sobre o consumo de ar no motor, vale ressaltar primeiramente, como este se relaciona com a potência do motor, desta forma segue a equação (7): (BRUNETTI, 2012)

$$N_i = \dot{m}_a \cdot R_{ar/comb} \cdot PCI \cdot \eta_t \quad (7)$$

Onde: N_i é a potência indicada;

\dot{m}_a é a vazão mássica de ar seco que escoar para dentro dos cilindros;

η_t é a eficiência (ou rendimento) térmica do motor;

PCI é o poder calorífico inferior.

Observa-se pela equação (7) que a vazão mássica e a potência indicada de um motor são grandezas proporcionais, desde que se garanta: (BRUNETTI, 2012)

- O mesmo combustível;
- A relação ar/combustível constante;
- A relação de compressão e o melhor avanço da faísca na vela.

Desta forma, a potência indicada e a vazão mássica são diretamente proporcionais e a eficiência térmica permanece aproximadamente constante. (BRUNETTI, 2012)

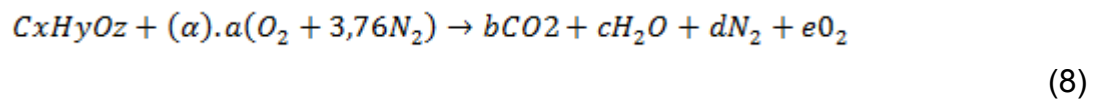
Nos motores de combustão interna, a potência é a partir da variação da vazão mássica de ar, variando-se previamente a pressão de admissão; já nos motores Diesel a variação da potência é a partir da variação da relação ar/combustível, variando assim a eficiência térmica. Como a eficiência térmica é afetada pela pressão e temperatura ambiente e rotação, mesmo que se mantenha a relação ar/combustível constante, não se pode garantir que tal eficiência seja também constante. (BRUNETTI, 2012)

É irrefutável o fato de que, em motores Diesel, a máxima eficiência é dada pela massa de ar, uma vez que o máximo valor da relação ar/combustível é tal que pode ser usado sem problemas de formação de fumaça no escapamento, excessiva pressão de combustão ou de depósitos de carbono. (BRUNETTI, 2012)

3 MODELAGEM TEÓRICA

3.1 Massa de ar por análise dos gases de combustão

A partir da equação de combustão completa para um mol de combustível oxigenado com ar e o excesso oxidante α , é possível começar a análise de O_2 para cálculo teórico da vazão mássica de ar, iniciando pela equação (8):



Realizando balanços estequiométricos a partir a equação (8), temos os seguintes parâmetros descritos pelas equações (9), (10), (11) e (12):

$$C: b = x \quad (9)$$

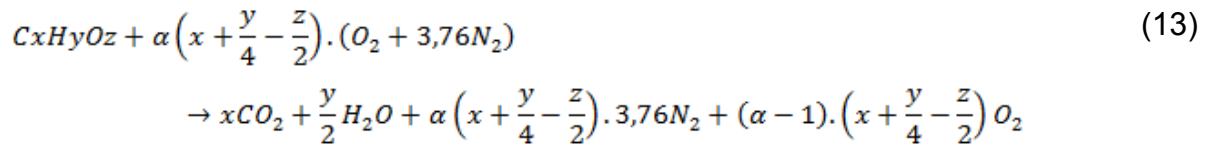
$$H: c = y/2 \quad (10)$$

$$O = z + 2a = 2b + c + 2e \quad (11)$$

Considerando $e=0$, temos:

$$a = (2b + c + 2e)/2 = b + c/2 - z = x + y/4 - z/2 \quad (12)$$

Reescrevendo a equação (8) temos:



Onde j é o coeficiente de oxigênio nos reagentes e ε o coeficiente de oxigênio nos produtos, como descritos nas equações (14) e (15):

$$j = \alpha \left(x + \frac{y}{4} - \frac{z}{2} \right) \quad (14)$$

$$\varepsilon = (\alpha - 1) \cdot \left(x + \frac{y}{4} - \frac{z}{2} \right) \quad (15)$$

Fazendo balanço de oxigênio, chega-se às equações (16) e (17):

$$2j = 2x + \frac{y}{2} + 2\varepsilon \quad (16)$$

$$\varepsilon = j - x - \frac{y}{4} - \frac{z}{2} \quad (17)$$

A vazão mássica para um mol de combustível é dada pelo cálculo da equação (18):

$$\dot{m}_{ar} = j(MMO_2 + 3,76MMN_2) = j(32 + 3,76 \times 28) = 137,28j \quad (18)$$

Onde: \dot{m}_{ar} é a vazão mássica para um mol de combustível, dada em g/mol

MMO_2 é a massa molar do oxigênio

MMN_2 é a massa molar do nitrogênio

A concentração de oxigênio pode ser obtida através da base seca pela equação (19) abaixo:

$$XO_2 = \frac{\varepsilon}{x + j3,76 + \varepsilon} \quad (19)$$

Onde: XO_2 é a concentração de oxigênio

Ou ainda como apresentado pela equação (20):

$$j3,76 = \varepsilon \left[\frac{1 - XO_2BS}{XO_2BS} \right] - x \quad (20)$$

Onde: XO_2bs é a concentração de oxigênio na base seca

Substituindo ε , conforme a equação (17), vem que:

$$j3,76 = j \left[\frac{1 - XO_2BS}{XO_2BS} \right] - x - \left(x - \frac{y}{4} - \frac{z}{2} \right) \left[\frac{1 - XO_2BS}{XO_2BS} \right] \quad (21)$$

Rearranjando a equação (21):

$$j = \frac{x + \left(x - \frac{y}{4} - \frac{z}{2}\right) \left[\frac{1 - XO_2 BS}{XO_2 BS}\right]}{\left[\frac{1 - XO_2 BS}{XO_2 BS}\right] - 3,76} \quad (22)$$

Desta forma, para o combustível C₂H₆O sabe-se que g/mol de cada componente do combustível tem:

$$C = 12 \text{ g/mol}$$

$$H = 1 \text{ g/mol}$$

$$O = 16 \text{ g/mol}$$

Onde a vazão mássica do combustível é dada pela equação (23):

$$\dot{m}_{\text{combustível}} = \left(\frac{\dot{m}_i - \dot{m}_f}{\Delta t}\right) \times 1000 \left(\frac{g}{s}\right) \quad (23)$$

Onde: $\dot{m}_{\text{combustível}}$ é a vazão mássica do combustível

Para a concentração de O₂, segue a equação (24):

$$XO_2 = \frac{(\text{média } O_2)}{100} \quad (24)$$

A massa molar do combustível é apresentada na equação (25):

$$MMC_{2H_6O} = 2 \times 12 + 6 \times 1 + 1 \times 16 = 46 \left(\frac{g}{mol} \right) \quad (25)$$

Onde: MMC_{2H_6O} é a massa molar do combustível

Então, a vazão molar do combustível é:

$$\dot{n}M_{combustível} = \frac{\dot{m}_{combustível}}{MMC_{2H_6O}} \left(\frac{mol}{s} \right) \quad (26)$$

Onde: $\dot{n}M_{combustível}$ é a vazão molar do combustível

Para a massa molar do O_2 e N_2 , seguem as equações (27) e (28), respectivamente:

$$MMO_2 = \dot{n}M_{combustível} \times j \quad (27)$$

$$MMN_2 = 3,76 \times MMO_2 \quad (28)$$

Vazão mássica do ar é dada pela equação (29):

$$\dot{m}_{ar\ real} = \frac{MMO_2 \times 32 + MMN_2 \times 28}{1000} \left(\frac{kg}{s} \right) \quad (29)$$

Onde: $\dot{m}_{ar\ real}$ é a vazão mássica do ar

A constante universal dos gases é dada por:

$$R = 8314 \left(\frac{J}{Kmol \cdot K} \right)$$

Constante para o ar é dada pela equação (30):

$$R_{ar} = \frac{R}{MMO_2 \times 32 + MMN_2 \times 28} \left(\frac{J}{Kmol \cdot K} \right) \quad (30)$$

Onde: R_{ar} é a constante dos gases para o ar

A massa específica do ar é calculada a partir da equação (31):

$$\rho_{ar} = \frac{P_{atm}}{R_{ar} \times T_{atm}} \left(\frac{kg}{m^3} \right) \quad (31)$$

Onde: ρ_{ar} é a massa específica do ar

Volume teórico admitido de ar e o volume total do ar admitido são calculados como segue nas equações (32) e (33), respectivamente:

$$V_{ar} = \pi \times \frac{(\text{diâmetro do pistão}^2)}{4} \times \text{curso do pistão} \left(\frac{m^3}{\text{cilindro}} \right) \quad (32)$$

$$V_{total\ do\ ar} = V_{ar} \times \text{número de cilindros} \ (m^3) \quad (33)$$

Onde: V_{ar} é volume teórico admitido de ar

$V_{total\ do\ ar}$ é o volume total o ar admitido

Então, para a vazão mássica de ar admitido será pela equação (34):

$$\dot{m}_{ar\ teórico} = \frac{V_{total\ do\ ar} \times \rho_{ar} \times \frac{n}{2}}{60} \left(\frac{kg}{s} \right) \quad (34)$$

Onde: $\dot{m}_{ar\ teórico}$ é a vazão mássica de ar admitido

A eficiência volumétrica pode então ser calculada pela relação entre o enchimento real e o enchimento teórico do cilindro quando da admissão, pela equação (35):

$$\eta_v = \frac{\dot{m}_{ar \text{ real}}}{\dot{m}_{ar \text{ teórica}}} \times 100 \quad (\%) \quad (35)$$

Onde: η_v é a eficiência volumétrica

Cálculo do fator Lambda (λ): a R ar/ combustível estequiométrica no valor de 8,9530 citada e calculada anteriormente demonstra claramente que a proporção ideal de queima do combustível. Segue então, a equação (36):

$$\lambda = \frac{R \frac{ar}{combustível} \text{ real}}{R \frac{ar}{combustível} \text{ estequiométrico}} \quad (36)$$

3.2 Eficiência volumétrica

Segundo Brunetti, “A eficiência volumétrica é definida como sendo a relação entre a massa de mistura nova que entra para o cilindro durante o curso de admissão e a massa que encheria o volume deslocado pelo pistão, com a massa específica da atmosfera.” Conforme apresentado pela equação (37): (BRUNETTI, 2012)

$$\eta_v = \frac{2\dot{m}_e}{\rho_e V_{cilindros} n} \quad (37)$$

Onde:

\dot{m}_e = Vazão mássica de uma mistura fresca que escoar para dentro dos cilindros (m^3/s)

$V_{cilindros}$ = Cilindrada total do motor (m^3)

ρ_s = Densidade (ou massa específica) de mistura fresca que escoia para dentro dos cilindros nas condições de entrada (ambiente do vão motor) (kg/m^3)

n = Rotação do motor (rpm)

η_v = Eficiência (ou rendimento) volumétrica (%)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção descreve como foi preparado uma amostra de combustível utilizado, a descrição da bancada e a descrição do experimento.

4.1 Preparação da amostra

Foram realizadas quatro amostras de combustível na qual foi utilizado um tanque, um funil e uma balança para 10 kg e precisão de 0,0001 kg. O combustível utilizado foi etanol anidro. O mesmo foi pesado e efetuado a leitura com um béquer para determinação da massa específica (kg/m^3).

Tabela 2- Especificação do combustível

Combustível	C ₂ H ₆ O		
Componente	C	H	O
Coeficientes	2	6	1
Massa molar (g)	12	1	6
Massa molar combustível (g)	46		
Massa molar ar (g)	411,84		
R Ar/Combustível estequiométrico	8,95		

4.2 Descrição da bancada

No experimento, foi utilizado um motor flex Ford Fiesta 2010, com as seguintes características do motor são mostradas na tabela abaixo.

Tabela 3- Ficha técnica do motor

Motor dianteiro, 4 cilindros em linha e 8 válvulas.	Álcool e/ou gasolina
Alimentação	Injeção multiponto sequencial
Diâmetro x curso	68,68 x 67,4 mm
Cilindrada	999 cm ³
Rotação máxima	6700 RPM
Taxa de compressão	12,8
Ignição	Eletrônica digital controlada por módulo

Foi adaptado um tanque auxiliar externo ao equipamento de forma que fosse possível de ser posicionado um balança eletrônica para que o consumo mássico do combustível fosse medido. A vazão do combustível foi determinada com uso de um cronômetro.

A tabela 4 abaixo demonstra os equipamentos utilizados e suas características.

Tabela 4- Especificação dos equipamentos.

Equipamento	Medida	Capacidade	Precisão
Balança Balmax ELP-10	Massa de combustível	Máx. 5k a 10kg	0,001kg
Cronômetro Cronobio SW2018	Medida de tempo de experimento		±0,001s
Anemômetro Digital	Medida de pressão e temperatura local		±0,08°C ±0,001hPa

O tanque externo foi abastecido com o combustível e posicionado na balança. Foi colocado o sensor de gases no escapamento para que este envie dados ao um notebook utilizando o programa DBGAS2004 que gera dados; valores de emissão de O₂ nos gases de exaustão.

Os valores de valores de rotação, abertura da borboleta, lambda, são coletados pelo *scanner* e mostrados no programa PCScan.

Partiu-se o motor, este que estava sem carga, e aguardou o aquecimento até que a temperatura da água atingisse uma temperatura de 80 graus Celsius para a garantia que entrasse em regime permanente. Foram aferidas as condições locais, como umidade, temperatura e pressão atmosférica. Além do mais foi ligado o cronômetro para cada ponto do experimento utilizando três minutos para coletas de dados e para a determinação do consumo do combustível, foram coletados os dados.

4.3 Analisador de gases

O analisador de gases é constituído por uma unidade de controle remoto (RCU) e a unidade de principal de análise de gases (MCU), assim a comunicação feita pelas duas unidades é por um cabo serial RS422. A operação do analisador foi feita gerando dados em um computador pessoal via software DBGAS2004. Na unidade principal de análise de gases (MCU) é uma maleta utilizada para alojar os sensores a unidade de controle remoto e as conexões do analisador em conjunto com a placa mãe, o sistema de amostragem com eletroválvulas, filtros para retenção de poeira, sistema de retirada de umidade, bateria elétrica e células eletroquímicas. (SILVA, 2010)

Os conectores para as sondas estão localizados na parte superior do analisador onde ocorre o bombeamento responsável pela entrada do gás, a entrada de ar para calibração, o conector do termopar que fornece a temperatura dos gases, pressão dos gases, conexão serial/USB, interruptor liga/desliga e alimentação para rede elétrica. (SILVA, 2010)

O gás a ser analisado é bombeado de uma sonda para uma bomba primária, onde o fluxo de gás é regulado eletronicamente, esse fluxo então é limpo e seco por um filtro; passa pelo sistema de retirada de umidade e esta é condensada e purgada por uma bomba peristáltica. O sensor de oxigênio é uma célula eletroquímica com dois eletrodos em solução eletrolítica. (SILVA, 2010)

Para melhor entendimento, vale ressaltar que uma célula eletroquímica é um dispositivo capaz de transformar através de reações espontâneas de oxirredução, onde há transferência de elétrons, energia química em energia elétrica. Desta forma, seu princípio de funcionamento se baseia no fato de, existindo um polo positivo e outro negativo, haverá, através da solução eletrolítica, transferência de elétrons a partir do ânodo (polo negativo) para o cátodo (polo positivo). (FOGAÇA, 2014)

As Figuras abaixo mostram detalhes da bancada.

Figura 20- Motor Ford Fiesta flex- Power.



Figura 21- Vista superior do motor.



Figura 22- Escapamento acoplado da sonda do analisador de gases.



Figura 23- Balança e reservatório de combustível.

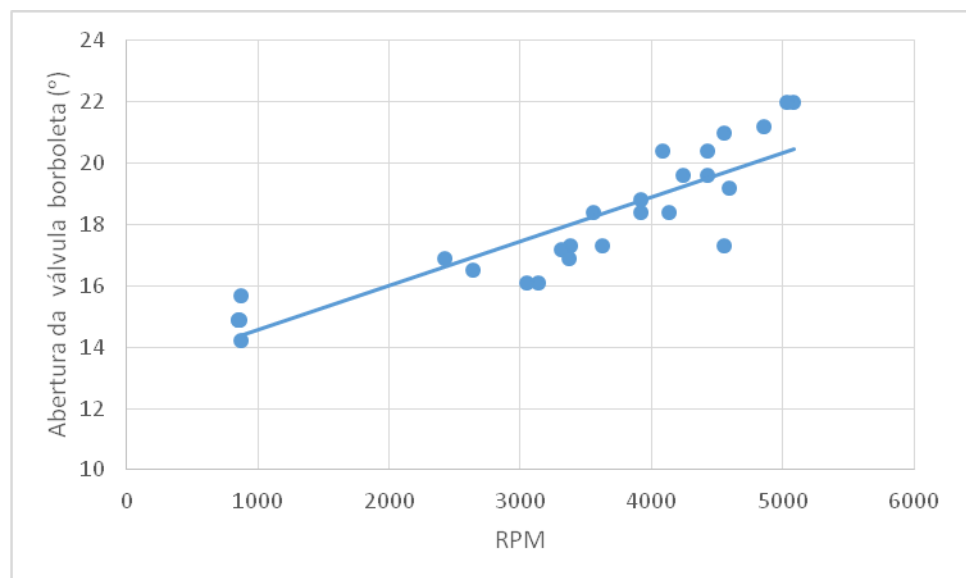


5 RESULTADOS

Os ensaios foram realizados alterando-se a abertura da válvula borboleta para cada condição de coleta de dados. A válvula borboleta é ligada diretamente ao acelerador do motor por meio de um cabo de aço.

A admissão de ar é regulada pela abertura da válvula borboleta. A válvula borboleta mais aberta permite a passagem de uma vazão maior de ar para os cilindros, o que deve provocar a aceleração do motor. No programa PCScan é possível obter o valor da abertura da válvula em graus. Analisando a Fig. 24 percebe-se que esse comportamento ocorreu nos ensaios e o resultado é uma curva ascendente em que a rotação do motor aumentou com o aumento da abertura da borboleta.

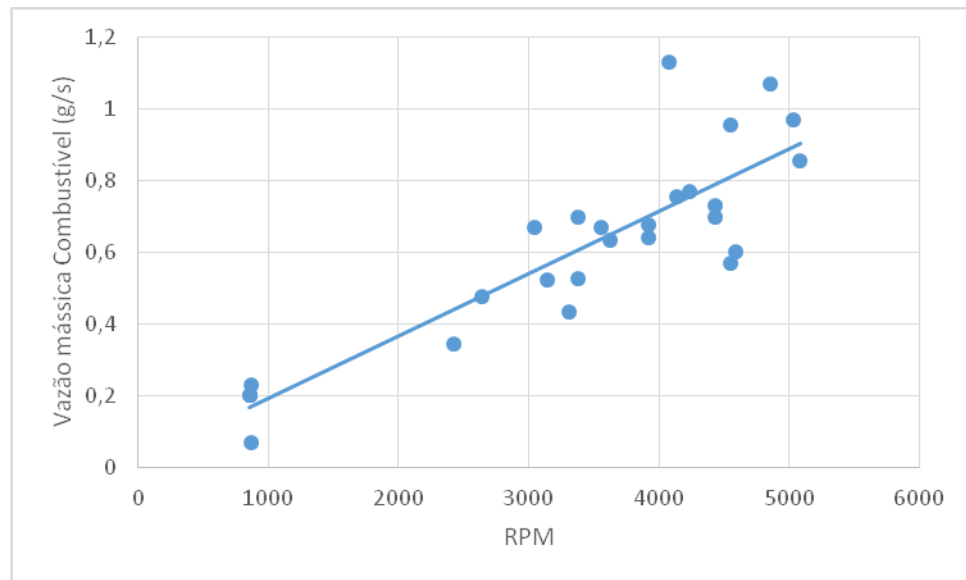
. Figura 24- Gráfico da Abertura da válvula borboleta X RPM.



Com o aumento da vazão de ar acontecido com o aumento da rotação, torna-se necessário o aumento da vazão de combustível de maneira a se manter a relação ar/combustível em patamares otimizados de operação. Analisando a Fig. 25 percebe-se que esse comportamento ocorreu de fato, ou seja, conforme a abertura

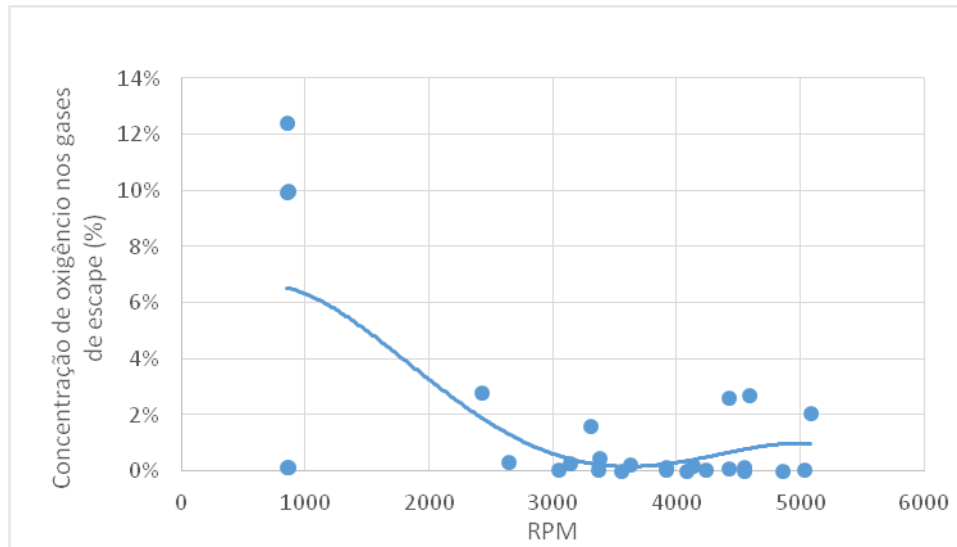
da válvula borboleta provocou um aumento de rotação, esse aumento na rotação induziu a um consumo maior de combustível.

Figura 25- Gráfico da Vazão mássica de combustível X RPM.



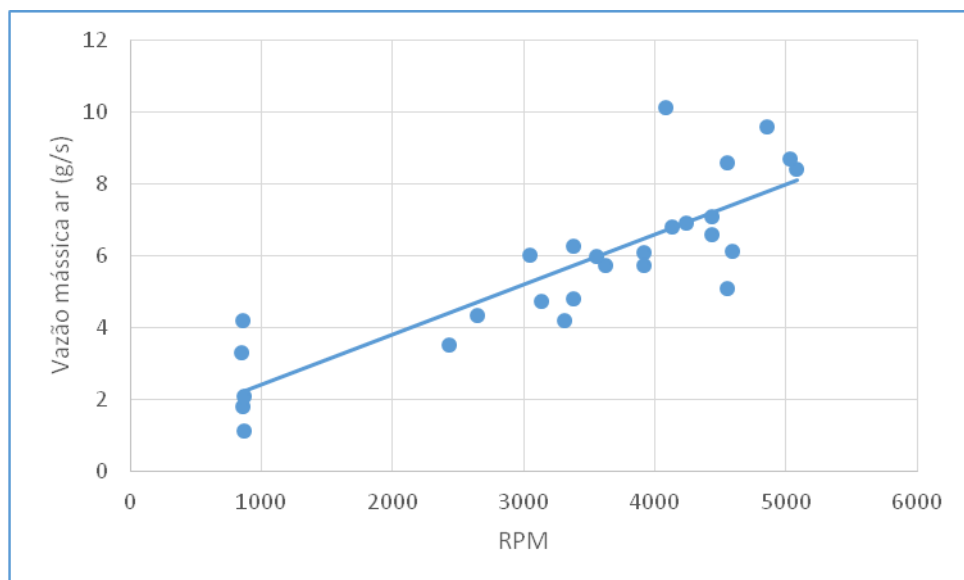
A concentração de oxigênio (%) medido nos gases de escape tem um comportamento de decréscimo. Com o aumento da velocidade de rotação demonstrando a estratégia de equilibrar o a relação ar/combustível e consequentemente estar em valores ideais do fator Lambda. No experimento foi observado que em marcha lenta a concentração de oxigênio é alta pois a sonda lambda ainda está se adequando as informações e começando a enviar sinais ao comando.

Figura 26- Gráfico Concentração de oxigênio nos gases de escape x RPM.



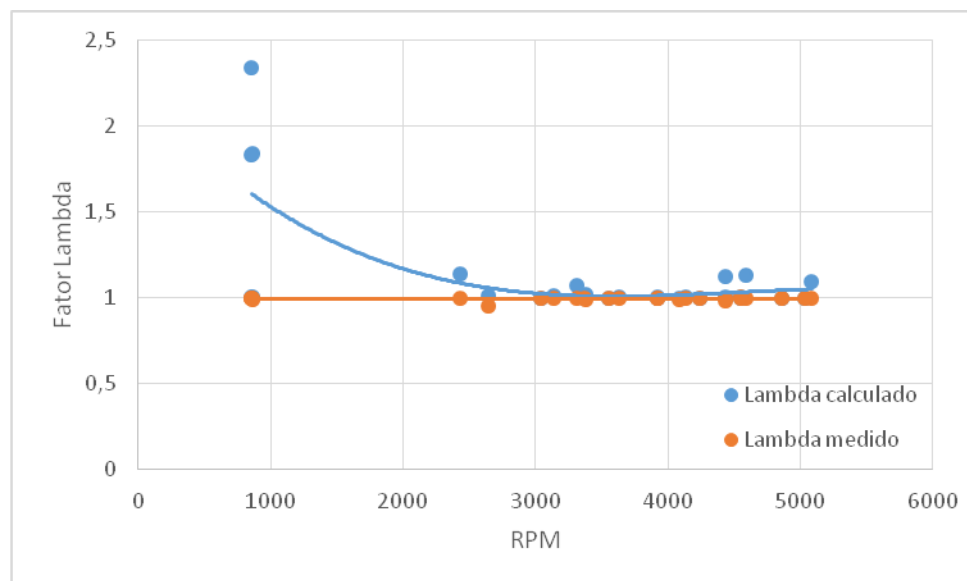
A vazão de ar calculada foi realizada pelo balanço de massa entre reagentes e produtos, utilizando a concentração de oxigênio nos gases de escape como parâmetro de medida de excesso de oxigênio. Dessa forma determinou-se a vazão real de ar. Conforme esperado e discutido anteriormente o motor admitiu mais ar para maiores rotações (Fig. 27).

Figura 27- Gráfico da Vazão mássica de ar x RPM.



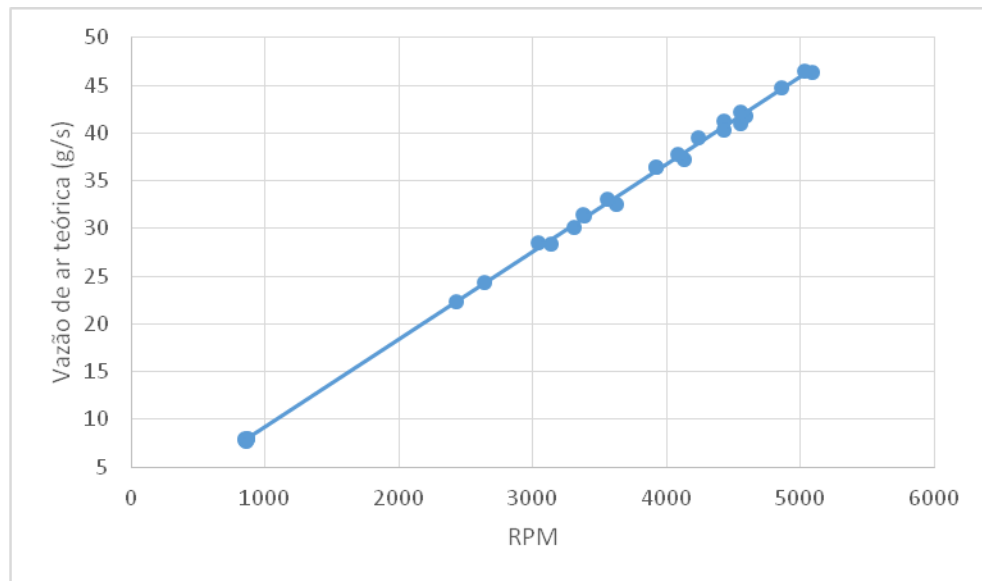
Como demonstrado no funcionamento do sensor lambda, os motores de ignição por centelha trabalham com níveis de razão ar/combustível próximos à estequiometria. Esse comportamento foi percebido pelos dados coletados no *scanner*. Uma maneira de confirmar a validade do cálculo de vazão de ar real pelo balanço de massa entre os reagentes e os produtos é a comparação dos valores calculados do fator lambda com os coletados nos ensaios. A Fig. 28 mostra que para valores de rotação superiores a 2000 rpm os valores calculados convergem para os valores medidos. Esse comportamento demonstra a validade dos cálculos anteriores.

Figura 28- Gráfico do fator Lambda medido e calculado x RPM.



A vazão de ar teórica foi calculada pela Eq. 37 que leva em consideração o volume total dos quatro cilindros que o motor possui, a massa específica do ar calculado considerando-se a temperatura e pressão locais e que o mesmo admite ar a cada duas voltas ou 720 graus. A Fig. 29 mostra este comportamento de maiores vazões mássica a maiores rotações. Esta vazão dita como teórica é a capacidade de enchimento dos cilindros relacionada à rotação.

Figura 29- Gráfico da Vazão mássica de ar teórica X RPM.



A eficiência volumétrica é a relação entre a vazão de ar real e a vazão de ar teórica do motor. Os ensaios foram realizados com variação de rotação, porém sem carga. No trabalho realizado por Gumus (2011) demonstra-se que a eficiência volumétrica de um motor alternativo tem razão direta com o aumento de carga, sendo que para motores operando em baixa carga no eixo de saída os valores de eficiência volumétrica atingem níveis inferiores a 20%. Analisando a Fig. 30 notou-se que para rotações maiores que 1000 rpm a eficiência volumétrica aumenta com o aumento da rotação, fato esse que é esperado e é corroborado pela Fig. 31. A vazão de ar real é controlada pela abertura da válvula borboleta. Uma abertura maior da válvula borboleta diminui a perda de carga no caminho do ar, proporcionando uma vazão maior, o que não é considerado pela Eq. 36. Os valores calculados de eficiência volumétrica coincidem com os valores definidos por Gumus (2011). O fato dessa eficiência ser maior nas rotações de marcha lenta é que nesse ponto a mistura controlada pela central é mais pobre conforme mostrado nos gráficos de concentração de oxigênio e de fator lambda.

Figura 30- Gráfico da Eficiência volumétrica X RPM.

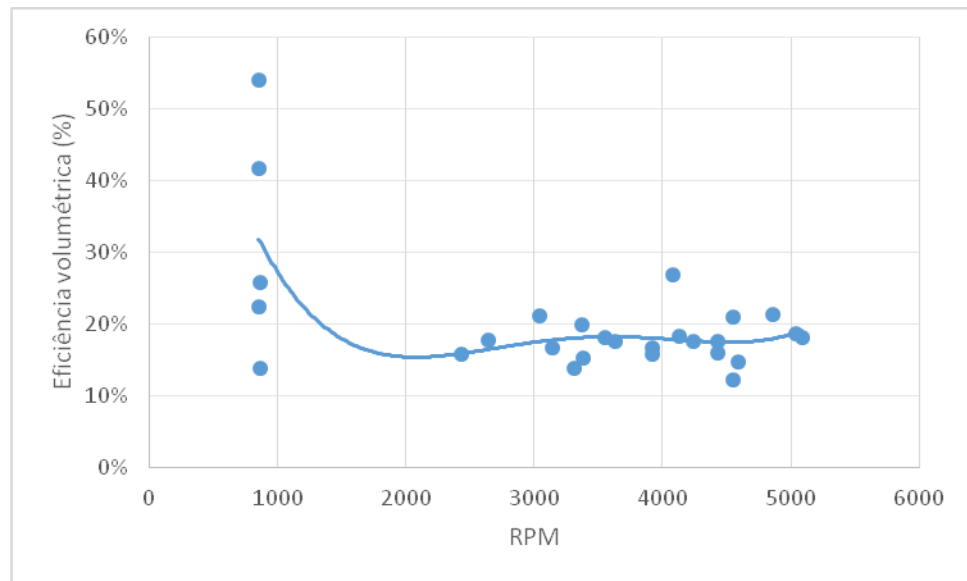
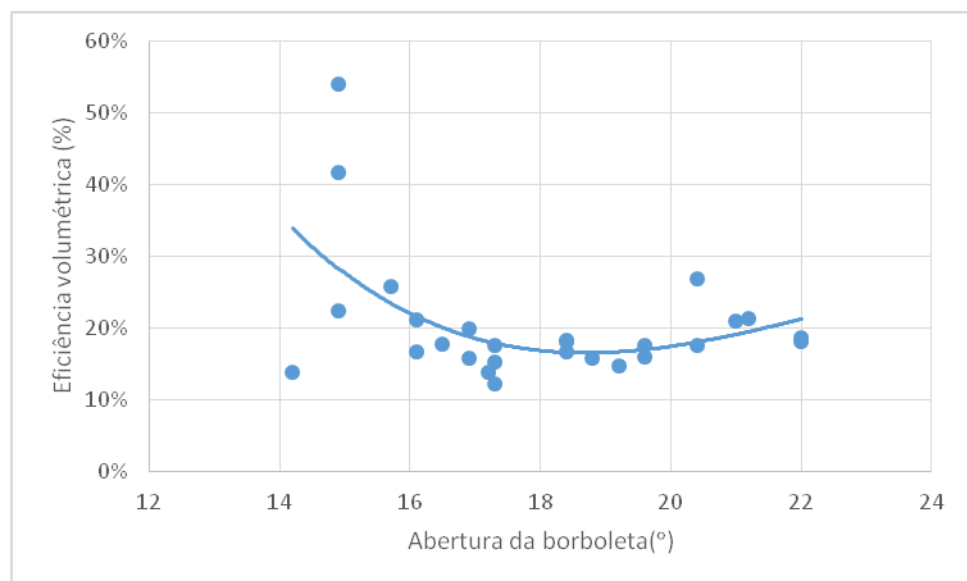


Figura 31- Gráfico da Eficiência volumétrica x Abertura da válvula.



6 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve por objetivo propor um método para a análise do consumo de ar em um motor alternativo ciclo Otto pela concentração de oxigênio nos produtos de combustão. Neste tipo de motor o sistema de combustível é responsável por preparar a mistura ar/combustível em uma razão adequada para garantir o melhor funcionamento do equipamento.

É importante ressaltar, além das características do motor, que a qualidade da mistura pode ser determinada pela presença de oxigênio nos produtos de combustão e o dispositivo utilizado para fazer essa medida é a sonda lambda. Desta forma, observou-se durante o trabalho que o consumo de ar do motor tem razão direta com o aumento da rotação do mesmo e esse consumo pode ser determinado pelo balanço mássico entre os reagentes e os produtos.

A primeira análise pertinente é em relação da válvula borboleta e a rotação, uma vez que o esperado era que com o aumento da abertura da válvula a rotação aumentasse também, e tal fato foi observado e comprovado experimentalmente neste trabalho. Este comportamento esperado é devido ao fato de que, com a válvula mais aberta há maior passagem de vazão de ar pelos cilindros, acelerando o motor.

Em seguida, observou-se o comportamento da vazão mássica do combustível pela rotação do motor, esperando também uma relação de aumento entre ambos, uma vez que aumentando-se a rotação há aumento da vazão mássica de combustível para se manter a relação ar/combustível adequada. Também comprovou-se tal comportamento neste trabalho, no qual houve indução a um consumo maior de combustível.

Posteriormente observou-se que com o aumento da velocidade de rotação houve também um decréscimo na concentração de oxigênio (%), comprovando assim a estratégia da injeção eletrônica de equilibrar a relação ar/combustível e por consequência valores ideais do fator lambda.

Como dito no trabalho, os motores de ignição por centelha trabalham com níveis de razão ar/combustível próximos à estequiometria. Esse comportamento foi percebido pelos dados coletados no scanner e também pela diminuição da presença

de oxigênio nos gases de exaustão. Desta forma, conseguiu-se comprovar a validade dos cálculos de vazão de ar real pelo balanço de massa entre os reagentes e produtos realizados, uma vez que para isso, comparou-se os valores calculados do fator lambda com os coletados no ensaio. Conforme a análise para valores acima de 1000rpm de rotação os valores calculados convergiram para os valores medidos comprovando a validade dos cálculos efetuados e do método de balanço utilizando a concentração de oxigênio nos gases de escape de massa para determinar a vazão real de ar no motor.

A utilização de etanol anidro foi fundamental para que o balanço de massa fosse realizado com um nível de incerteza muito baixo, pois a composição do combustível é conhecida.

Por fim, em relação à eficiência volumétrica que é a relação entre a vazão de ar real e a vazão de ar teórica do motor, observou-se nos ensaios realizados com variação de rotação, mas sem carga, que estes condizem com os valores apresentados por Gumus (2011), demonstrando que a eficiência volumétrica de um motor alternativo tem relação direta como aumento de carga, sendo que para motores operando em baixa carga no eixo de saída os valores de eficiência volumétrica atingem níveis inferiores a 20%.

Observou-se em Gumus (2011) que a eficiência volumétrica aumenta com a aplicação de maiores cargas no eixo. Fato esse que não pode ser comprovado neste trabalho pois a bancada não dispõe de um dinamômetro para simular a carga de frenagem no eixo.

Observou-se também que a eficiência volumétrica é maior nas rotações de marcha lenta, fato justificado pois nesse ponto a mistura controlada pela central é mais pobre conforme mostrado nos gráficos de concentração de oxigênio e de fator lambda.

7 TRABALHOS FUTUROS

O laboratório da Fundação Universidade Federal da Grande Dourados do curso de Engenharia de Energia conta somente com o motor Ford Zetec Rocam Flex de 1000 cc e um motor a diesel o qual limitou os ensaios no motor dificultando o presente trabalho, seria necessário a aquisição de um dinamômetro equipamento que possibilita medir a potência, trabalho executado na unidade de tempo de um motor em suas diversas condições de funcionamento. Com a aquisição do mesmo os eventuais trabalhos posteriores poderão submeter os motores a ensaios para que possa assegurar da sua potência e demais características construtivas.

Outra alternativa de um futuro trabalho seria a utilização de outros combustíveis bem como a obtenção deste em vários postos de combustíveis visando o controle de qualidade.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BORGNAKKE, C.; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da termodinâmica**. São Paulo: E.Blucher, 2009.

BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna. Volume 1**. São Paulo: Blucher, 2012.

BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna. Volume 2**. São Paulo: Blucher, 2012.

CARROS. **Como tudo funciona?** Disponível em: <http://carros.hsw.uol.com.br/questao562.htm> Acesso em: 10.12.2014

FOGAÇA, J.R.V. **Pilhas ou Células Eletroquímicas**. Disponível em: <http://www.mundoeducacao.com/quimica/pilhas-ou-celulas-eletoquimicas.htm> Acesso em: 10.12.2014

GALVEZ, J.M. **Sonda Lambda (sensor de oxigênio) – Sistema de Injeção Eletrônica**. Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <http://pt.scribd.com/doc/59791031/Sonda-Lambda-sensor-de-oxigenio-Sistema-de-Injecao-Eletronica> Acesso em: 19.11.2014

Injeção Eletrônica. Disponível em: <http://www.carrosnaweb.com.br/dicasinjecao.asp> Acesso em: 19.11.2014

LOPES, G. **Sonda Lambda ou Sensor de Oxigênio**. Disponível em: <http://www.dicasmecanicas.com/2010/05/sonda-lambda-sensor-oxigenio/> Acesso em: 19.11.2014

MAHLE – *Driven by Performance*. **Manual Técnico – Curso Mahle Metal Leve Motores e Combustão Interna**. 2014.

MONZEIROS. **Sonda Lambda no Multex 700**. Disponível em: <http://forum.monzeiros.com/viewtopic.php?f=50&t=28443&start=25> Acesso em: 11.12.2014

MORAN, Michael J. et al. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 6. ed. Rio de Janeiro: Grupo Editora Nacional, 2009. 378 p.

TAYLOR, C.F. **Análise dos Motores de Combustão Interna. Volume 2**. São Paulo, Edgard Blücher. Ed. da Universidade de São Paulo, 1976.

VILANOVA, C. **De volta ao Carburador**. Disponível em: <http://www.omecanico.com.br/modules/revista.php?recid=186> Acesso em: 19.11.2014

YANAGIHARA, J.I. **Termodinâmica: Ciclos Padrão a Ar**. Disponível em: http://www.lete.poli.usp.br/PME2321_files/cicloPadrao.PDF Acesso em: 10.12.2014

9 ANEXOS

Seguem-se os dados:

Tabela 5- Dados da vazão de ar real, referente ao experimento 1

Ponto	Combustível	[O ₂]	Vazão de ar Calculado	R ar/combustível calculada	Lambda calculado	Lambda medido
	[g/s]	%	[g/s]	[adm]	[adm]	[adm]
1	0,2	9,9197%	3,2803	16,4013	1,8319	1,0003
2	0,4762	0,3201%	4,3248	9,0819	1,0144	0,9584
3	0,5258	0,4242%	4,7977	9,1246	1,0192	0,9926
4	0,6769	0,1351%	6,0968	9,0069	1,0060	0,9974
5	0,7314	0,0900%	6,5745	8,9889	1,0040	0,9859

Tabela 6- Dados da vazão de ar real, referente ao experimento 2

6	0,2	12,3988%	4,1887	20,9435	2,3393	1
7	0,522	0,2496%	4,7257	9,0532	1,0112	1
8	0,633	0,2201%	5,7231	9,0412	1,0098	1
9	0,755	0,1593%	6,8076	9,0167	1,0071	1
10	0,955	0,1248%	8,5977	9,0028	1,0056	1

Tabela 7- Dados da vazão de ar real, referente ao experimento 3

11	0,0667	9,9790%	1,0996	16,4861	1,8414	1
12	0,3444	2,7729%	3,5195	10,2191	1,1414	1
13	0,4333	1,6026%	4,1773	9,6406	1,0768	1
14	0,6	2,6954%	6,1071	10,1785	1,1369	1
15	0,7	2,5723%	7,0803	10,1147	1,1298	1
16	0,8556	2,0263%	8,4207	9,8418	1,0993	1

Tabela 8- Dados da vazão de ar real, referente ao experimento 4

17	0,2	0,1210%	1,8003	9,0013	1,0054	1
18	0,67	0,0330%	6,0073	8,9661	1,0015	1
19	0,7	0,0310%	6,2757	8,9653	1,0014	1
20	0,64	0,0420%	5,7406	8,9697	1,0019	1
21	0,77	0,0400%	6,9061	8,9689	1,0018	1
22	0,97	0,0350%	8,6979	8,9669	1,0016	1
23	1,07	0,0010%	9,5802	8,9534	1,0000	0,9990
24	1,13	0,0010%	10,1174	8,9534	1,0000	0,9910
25	0,67	0,0014%	5,9989	8,9536	1,0001	0,9990
26	0,57	0,0018%	5,1036	8,9538	1,0001	1,0040
27	0,23	0,1424%	2,0723	9,0099	1,0063	0,9890

Tabela 9- Dados da vazão teórica de ar referente aos quatro experimentos

Ponto	Abertura borboleta	Vazão Teórica					Eficiência Volumétrica
		Patm	T	ρ_{ar}	RPM	Teórico	
	[°]	[Pa]	[°C]	[kg/m ³]	Rev/min	[g/s]	[%]
1	14,9	96580	30	1,1051	853,76	7,85	41,77%
2	16,5	96580	30,3	1,1040	2642,33	24,28	17,81%
3	17,3	96580	27,8	1,1132	3383,26	31,35	15,30%
4	18,4	96580	27	1,1162	3919,86	36,42	16,74%
5	19,6	96590	26,4	1,1185	4430,8	41,25	15,94%
6	14,9	96580	35	1,0872	856,6	7,75	54,04%
7	16,1	95810	32,5	1,0874	3138,6	28,41	16,64%
8	17,3	95810	35	1,0785	3628,5	32,57	17,57%
9	18,4	95810	34,3	1,0810	4133,7	37,19	18,30%
10	21	95800	34,3	1,0809	4554	40,97	20,99%
11	14,2	96100	28,6	1,1047	866,46	7,97	13,80%
12	16,9	96110	29,5	1,1016	2428,4	22,26	15,81%
13	17,2	96120	31,7	1,0937	3309,3	30,13	13,87%
14	19,2	96110	31,7	1,0936	4593,9	41,82	14,60%
15	20,4	96110	31,7	1,0936	4430,8	40,33	17,56%
16	22	96100	31,1	1,0957	5084,4	46,37	18,16%
17	14,9	96200	22,9	1,1272	854,43	8,02	22,46%
18	16,1	96200	23,6	1,1245	3045,73	28,51	21,07%
19	16,9	96200	24,7	1,1204	3375	31,47	19,94%
20	18,8	96200	25,5	1,1174	3920,75	36,46	15,74%
21	19,6	96300	25,5	1,1185	4237,92	39,45	17,50%
22	22	96400	27,9	1,1108	5034,32	46,54	18,69%
23	21,2	96200	27,9	1,1085	4857,81	44,82	21,38%
24	20,4	96300	27,9	1,1096	4082,91	37,71	26,83%
25	18,4	96300	26,2	1,1159	3555,67	33,02	18,16%
26	17,3	96200	26,8	1,1125	4554	42,17	12,10%
27	15,7	96200	27,1	1,1114	866,46	8,02	25,85%