

Sistemas de Alimentação

Relação ar combustível

Jorge Constantino da Silva - 1080482

Instituto Superior de Engenharia do Porto – ISEP
Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores,
Ramo Automação e Sistemas
Disciplina: Sistemas Automóveis - SIAUT

Rui Manuel de Almeida Soares Terra - 1080533

Instituto Superior de Engenharia do Porto - ISEP
Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores,
Ramo Automação e Sistemas
Disciplina: Sistemas Automóveis - SIAUT

Resumo— Neste trabalho pretendemos descrever a relação ar combustível utilizada nos motores de ciclo de Otto e nos motores Diesel. Para além disso, pretendemos descrever os locais de formação da mistura dos diferentes tipos de mecanismos, descrever as misturas utilizadas para cada regime de funcionamento e por fim descrever de forma resumida os processos catalíticos. Desta forma o trabalho é dividido em vários capítulos de forma a facilitar a leitura deste.

No capítulo dois descreve-se os mecanismos de alimentação do motor sendo estes o carburador e o injector.

No capítulo três pretende-se descrever os locais de formação de mistura. Desta forma começamos por descrever o funcionamento em motores a gasolina da injeção indirecta em que se descreve os sistemas mono-ponto e multi-ponto e por fim os sistemas de injeção directa. Para além dos sistemas a gasolina também neste capítulo é descrito funcionamento dos motores a Diesel desde a injeção indirecta à injeção directa.

No capítulo quatro pretende-se descrever a estequiometria das reacções químicas da gasolina e do Diesel. Aqui são efectuados alguns cálculos de forma a demonstrar a relação ar-combustível dos dois tipos de combustíveis. Também aqui é demonstrado os valores que as relações estequiométricas podem tomar tipicamente em excesso de ar.

No capítulo cinco pretende-se apresentar uma avaliação da combustão e posteriormente analisar a combustão com excesso de ar.

No capítulo seis pretende-se demonstrar os regimes de funcionamento do motor, ou seja pretende-se descrever como é que o veículo funciona para diferentes tipos de carga e para diferentes temperaturas.

O capítulo sete descreve como é executado o cálculo da duração de impulso dado para injectar.

O capítulo oito é o capítulo onde é descrito o funcionamento do sensor lambda. Bem como o controlo da combustão através do “close loop” feito com o sensor lambda.

No capítulo nove pretende-se descrever quais os gases produzidos no processo de combustão para os diferentes tipos de queima de combustíveis.

No capítulo dez descreve-se o processo catalítico dos gases resultantes da combustão da gasolina e do Diesel. Para além disso, são descritas as partes do catalisador. Por fim são feitas as conclusões do trabalho efectuado.

Palavras chave; Alimentação; mistura ar/combustível; estequiometria; carburador; injector; catalisador;

I. INTRODUÇÃO

Este projecto surgiu com o objectivo de compreender a formação da mistura de combustíveis, com especial entoação na relação ar combustível de uma mistura. Sendo que engloba alguns dos temas de interesse e foco da disciplina Sistemas Automóveis (SIAUT).

II. ALIMENTAÇÃO

A alimentação do motor realiza-se pelo conjunto ar combustível, este conjunto designa-se de mistura. A mistura alimenta o motor e este produz trabalho mecânico, gases de escape e perdas caloríficas, como se pode ver na Figura 1.

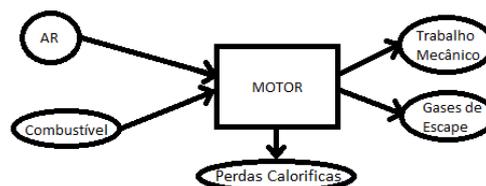


Figura 1 - Motores de combustão interna [1]

A alimentação dos motores efectua-se através de carburadores ou dos injectores. Os carburadores caíram em desuso. É de ter em atenção que para além de o carburador ter caído em desuso este não era utilizado para motores a Diesel.

Essa diferença do motor a gasolina para o Diesel deve-se ao facto do motor a gasolina aspirar a mistura, comprimi-la e fazer a ignição com uma faísca enquanto o motor a Diesel puxa o ar, comprime-o e então injecta o combustível no ar comprimido, o calor e a pressão do ar comprimido inflama o combustível espontaneamente.

Sendo que no carburador o volume de ar que passa por este controla o combustível da mistura, este sistema só pode ser usado em gasolina pois a mistura ocorre antes da admissão. [1]

A. Carburador

No sistema de alimentação por carburador o volume de ar controla o sistema, Figura 2. Isto é, ao abrir a válvula de admissão e ao êmbolo baixar produz um vácuo no interior do cilindro e a pressão atmosférica encarrega-se de preencher esse vácuo. O carburador (1) é montado no canal de admissão (2), ou seja todo o ar que passa pela válvula de admissão tem de passar pelo carburador. A entrada do ar está assegurada, mas o mesmo não acontece com o combustível. O carburador consegue dosar a sua mistura através de um tubo pulverizador (3) que se encontra no meio da passagem da corrente de ar. A passagem de ar provoca um vácuo no interior do tubo pulverizador, fazendo com que suba a gasolina que se encontra numa cuba próxima (4). Pretende-se com este sistema que a quantidade de gasolina que se mistura com o ar seja proporcional ao volume de ar que circula pelo tubo. O que acontece é que se passar uma grande quantidade de ar, é admitida uma grande quantidade de combustível, por outro lado se entrar uma pequena quantidade de ar entrará uma pequena quantidade de combustível.

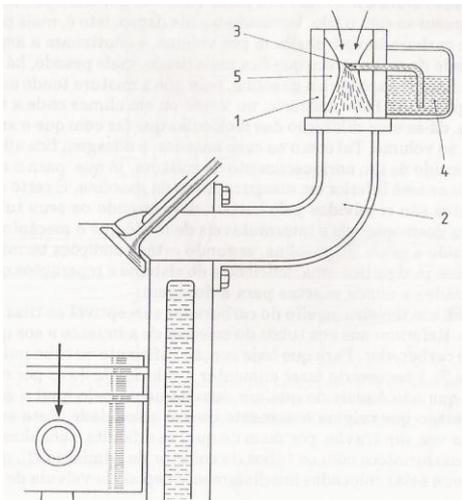


Figura 2 - Alimentação por carburador [2]

Como dito anteriormente, a entrada do ar está assegurada mas o mesmo não acontece com o combustível, isto é devido aos componentes da mistura serem diferentes pois estes têm diferentes inércias. O ar responde com grande rapidez a uma solicitação de vácuo, a gasolina pelo contrário sendo um líquido tarda nesta resposta, resultando na abertura repentina da passagem do ar uma mistura empobrecida até que a gasolina reajá. Para solucionar este defeito, os carburadores começaram a possuir um canal adicional que injecta gasolina à medida que a passagem de ar se move bruscamente. Este canal apesar de resolver o problema anterior, não tem precisão suficiente levando a uma tendência de enriquecimento da mistura e isto leva ao desperdício de combustível em determinadas situações de aceleração. Este canal foi adicionado de forma a resolver problemas de aceleração.

O problema de diferentes inércias dos componentes da mistura condiciona todo o funcionamento do carburador, mesmo que disponha de muitos dispositivos para corrigir as deficiências desta situação.

Outro problema dos carburadores é estes trabalharem por volume de ar, o que implica erros na mistura. Estes erros devem-se ao ar poder mudar de peso, devido a condições atmosféricas e de altitude. Por exemplo, na estação fria as moléculas do ar contraem-se com o frio, tornando-o mais denso (i. e. mais pesado). Uma vez que os carburadores aspiram volume de ar estes vão continuar a aspirar o mesmo volume de ar, mas o ar ao estar mais denso haverá excesso de oxigénio e falta de espaço para a gasolina. Por outro lado no Verão dá-se a dilatação das moléculas o que faz com que o ar perca peso em relação ao volume. Nestes dois casos a mistura é alterada, sendo que neste último caso dá-se o enriquecimento da mistura devido ao volume admitido ser constituído por menos ar e sobrar mais espaço para a gasolina.

Existe ainda um terceiro defeito do carburador susceptível de tirar potência aos motores são os tubos do colector da admissão e o corpo do carburador. Para que haja sucção suficiente no tubo pulverizador (3), é necessário aumentar a velocidade do ar por meio de um difusor (5). Este estreitamento é, por sua vez, um travão, que dificulta o enchimento do cilindro. O mesmo acontece com o tubo do colector de admissão (2), que não podem ser curtos e estar colocados imediatamente depois da válvula de admissão.

Uma vez que o ar é muito sensível às diferenças de diâmetro dos tubos pelos quais circula, isto modifica a sua velocidade pelo aparecimento de remoinhos. Para isto não acontecer o diâmetro do tubo tem de ser semelhante ao da válvula, que por sua vez está condicionado pela câmara de combustão. Sendo assim, o sistema do carburador não permite a entrada do ar no cilindro com a liberdade que seria necessária para o seu completo enchimento.

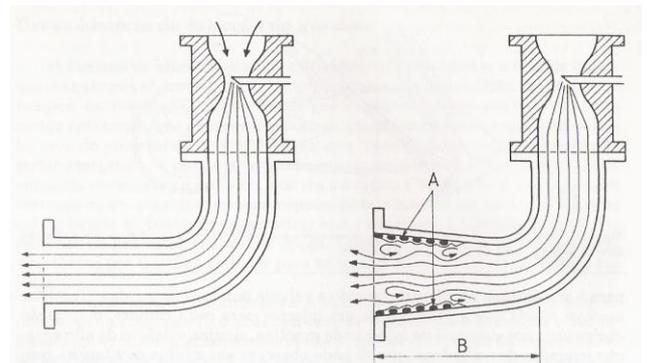


Figura 3 - Tubo do colector de alimentação por carburador [2]

O reduzido diâmetro relativo dos tubos dificulta o enchimento, mas se eles forem alargados, a mistura perde velocidade depositando-se nas paredes do tubo partículas de gasolina, o que empobrece a mistura, além de contribuir, por sua vez, para um enchimento deficiente. Como se pode ver na Figura 3. [2]

B. Injecção

Os sistemas de injeção em motores a gasolina representam a grande vantagem no fornecimento de combustível, i.e. o fornecimento não depende da depressão causada pelo ar. O sistema de injeção possui sensores que fazem a leitura das condições de funcionamento do motor e as envia para a ECU que, através dessas informações, faz os cálculos e actua nos injectores. O diagrama da Figura 4 representa o descrito. [3]



Figura 4 – Diagrama de Blocos do funcionamento da injeção[4]

O injector pode ser posicionado de formas variadas, ou seja pode estar posicionado imediatamente antes da válvula de admissão ou dentro da câmara de combustão, sendo assim isto traz mais uma vantagem face aos carburadores pois a forma e comprimento dos tubos não tem influencia.

Outra grande vantagem da injeção é que com a electrónica a injeção pode ser feita a partir de um cálculo obtido de várias medições, i.e. ter varias medidas de vários sensores.

III. MOTORES E LOCAIS DE MISTURA

A. Motores a gasolina

No sistema de gasolina a mistura de ar-combustível é preparada dentro ou fora do cilindro. Enquanto a mistura em sistemas carburador e de injeção indirecta são preparados fora do cilindro, a mistura nos sistemas de injeção directa de gasolina é feita dentro do cilindro. A Figura 5 ilustra os vários locais de mistura para motores a gasolina.

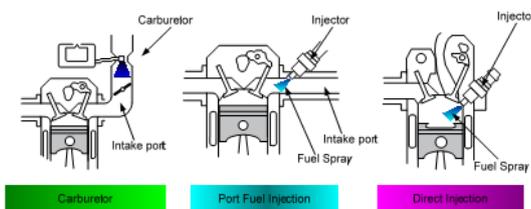


Figura 5 – Representação dos vários sistemas de mistura para motores a gasolina [5]

No sistema Port Fuel Injection (PFI ou injeção indirecta) o combustível é injectado no canal de admissão. Neste sistemas podemos ter dois tipos diferentes de injeção, sendo eles a injeção mono-ponto e injeção multi-ponto. A injeção mono-ponto não permite um controlo de mistura em cada cilindro enquanto que a injeção multiponto permite este controlo e até injectar em diferentes alturas. Os dois tipos de injeção são representados na Figura 6.

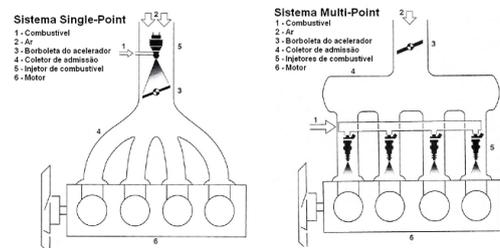


Figura 6 Sistema mono-ponto e multi-ponto [4]

Nos sistemas Gasoline Direct Injection (GDI) o combustível é injectado directamente dentro dos cilindros a alta pressão. Durante o tempo de admissão nos sistemas GDI, apenas o ar flui da válvula aberta e entra no cilindro. Isto garante melhor controlo do processo de injeção e particularmente permite um atraso de injeção, quando as válvulas estão fechadas (durante o tempo de compressão). Nos sistemas GDI, como há falta de tempo para o combustível vaporizar, o combustível é injectado no cilindro a alta pressão para ajudar a atomização e vaporização do processo.

Para os motores GDI, é implementado dois modos de injeção básicos, a injeção estratificada e a injeção homogénea. Em condições de carga parcial é usada a injeção estratificada (injeção atrasada), isto é, o combustível é injectado durante o ciclo de compressão. O motor pode estar a funcionar numa razão de ar-combustível que ultrapassa os 100 e estar completamente desacelerado, mas o motor é acelerado um pouco nesta zona e a relação ar-combustível é controlada para um intervalo de 30 a 40 a fim de introduzir uma grande quantidade de recirculação dos gases de escape (EGR). Para condições de carga elevada é preferido uma injeção homogénea, isto é, a injeção de combustível durante o tempo de admissão oferece uma mistura de combustível homogénea. Na maioria dos casos, este sistema opera abaixo da relação de estequiometria ou numa mistura um pouco mais rica para condições de carga total.

Na condição de carga baixa, o motor opera com mistura homogénea pobre com a relação ar-combustível de 20 a 25 melhorando ainda mais o consumo de combustível. Durante a operação com injeção homogénea, o ajuste da carga do motor é feito pela aceleração enquanto que durante a operação com injeção estratificada o motor funciona em condições de desaceleração (leve redução) e a carga do motor é ajustada pela relação ar-combustível equivalente. Na Figura 7 apresenta-se a injeção homogénea e a injeção estratificada.

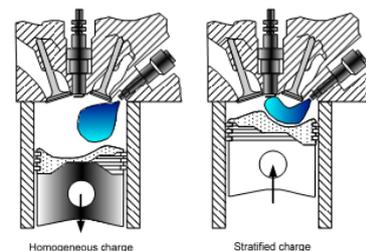


Figura 7 Representação de injeção homogénea e estratificada [5]

Na injeção estratificada são usados três sistemas de combustão de forma a ter uma mistura inflamável próxima da

vela no instante de ignição. Os sistemas de combustão são o *wall-guided*, *air-guided* e o *spray-guided*. A distinção entre os diferentes conceitos é o método usado para fazer com que o *spray* de combustível seja transportado para próximo da vela, como está representado na Figura 8.

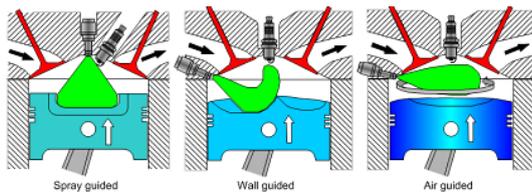


Figura 8 Representação dos vários tipos de injeção estratificada [5]

O sistema de combustão *wall-guided*: O combustível é transportado até à vela usando uma forma especial (um género de uma cova) na superfície do pistão. Como o combustível é injectado na superfície do pistão, este pode não evaporar completamente, resultando no aumento de emissões de HC e CO e aumento o consumo de combustível.

O sistema de combustão *air-guided*. O combustível é injectado junto do fluxo de ar que move o *spray* de combustível para próximo da vela de ignição. A maioria das injeções estratificadas nos motores de GDI usam em larga escala o movimento do ar (remoinho de ar ou queda de ar) bem como uma forma especial na superfície do pistão de forma a manter o *spray* de combustível compacto e movendo-o para junto da vela de ignição. Nos sistemas de combustão *air-guided* e *wall-guided* o injector é colocado longe da vela de ignição.

Sistema de combustão *spray-guided*: Na técnica de *spray-guided* o combustível é injectado próximo da vela de ignição onde também evapora. O processo de combustão por *spray-guided* necessita de um sistema de injector avançado tal como uma injeção piezo-electrónica. Esta técnica tem algumas vantagens: reduz as paredes molhadas, aumenta a região de operação estratificada, menos sensibilidade de fluxo de ar no cilindro, menos sensibilidade de variação de cilindro para cilindro e diminui a taxa de emissões de HC. As desvantagens são a fiabilidade da vela de ignição (falha) e baixa robustez desta (alta sensibilidade de variação na ignição e tempo de injeção).

A Mercedes-Benz desenvolveu um novo sistema de combustão de *spray-guided* (CGI). Este sistema implementa injeção estratificada com tecnologia de injeção piezo electrónica. A injeção *spray-guided* consegue melhor eficiência do que o sistema de injeção convencional *wall-guided*. A principal vantagem do mecanismo CGI (*charge gasoline injection*) é obtida em modo de operação estratificada. Durante este modo o sistema funciona com grande excesso de ar e assim oferece uma excelente eficiência de combustível. A injeção múltipla estende este modo de operação de queima de mistura pobre para altas rotações e também para intervalos de carga. Durante cada tempo de compressão é feita uma série de injeções espaçadas por fracções de segundos. Isto permite uma melhor formação da mistura e combustão e diminui o consumo de combustível.

B. Motores Diesel

Nos motores a Diesel existem principalmente dois tipos de arquitectura de motores: motor com injeção directa e o motor de injeção indirecta.

1) Motores de injeção directa

Nos motores de injeção directa podemos ter motores em que o ar fica imóvel e os motores onde o ar se move.

a) Motores de injeção directa em que o ar fica imóvel

Na realidade, o ar está sempre em movimento, mas como este movimento não é suficiente para misturar o ar e o combustível, costuma-se dizer que o ar está em repouso. Portanto, é necessário que o jacto de Diesel pulverizado alcance todos os cantos da câmara de combustão para garantir uma boa mistura ar-combustível. Este tipo de câmara de combustão tem os seguintes inconvenientes:

- É muito difícil de se obter a distribuição uniforme das partículas do jacto pulverizado de Diesel, sem recorrer ao fluxo de ar em movimento.
- No instante em que ocorre a máxima compressão, parte do ar encontra-se junto das paredes, que estão mais frias, e como o ar não se move, este resfria, ficando com temperatura baixa, na qual a combustão é mais difícil, e parte do Diesel pulverizado não é queimado.

b) Motores de injeção directa em que o ar se move

Nos motores de injeção directa em que o ar se move, procura-se melhorar a mistura ar-combustível através de movimento de remoinho do ar em que o ar forma turbilhões na câmara de combustão, separando em partes menores as partículas de Diesel pulverizado, facilitando a mistura. Nestes motores existem vários formatos da câmara de combustão. Estas alterações reflectem-se principalmente nas formas da superfície do pistão. Na Figura 9 é apresentado dois tipos de injeção directa, em que na imagem da esquerda é a situação em que o ar fica imóvel e na imagem da direita é a situação em que o ar se move. Na Figura 9 o 1 é o injector e na Figura 9 B o 2 é o pistão côncavo.

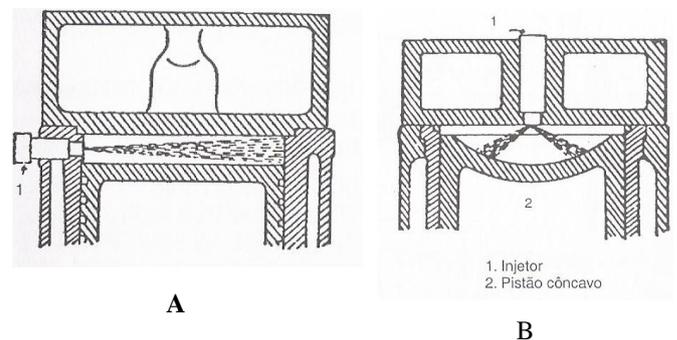


Figura 9 Representação de um cilindro com ar imóvel (A) e de um cilindro com ar móvel (B) [6]

2) Motores com câmara de pré-combustão ou de injeção indirecta

O motor com câmara de pré-combustão, Figura 10, tem uma câmara separada do cilindro, e é nesta câmara que é injectado o combustível. A comunicação com o cilindro é feita

através de um ou mais furos. Há outra arquitectura chamada câmara de turbulência, que tem uma câmara de grandes dimensões, com o objectivo de provocar grande turbulência no ar que entrar, tendo quase o mesmo volume interno do cilindro, como é possível verificar na Figura 11. Existem várias geometrias de pré-câmaras de combustão.

Algumas vantagens da injeção indirecta:

- O motor não necessita de uma pressão tão alta de injeção de Diesel como o motor de injeção directa, não sendo assim necessário bombas para grandes pressões.
- A pressão da combustão é menor, e o funcionamento é mais suave. As pressões internas no motor são menores, logo as espessuras de parede do bloco do cilindro podem ser menores, e o motor pode ser mais leve.
- O motor de injeção indirecta, em marcha lenta, tem um funcionamento mais uniforme e com maior elasticidade, isto é, acelera mais rapidamente do que o motor de injeção directa.

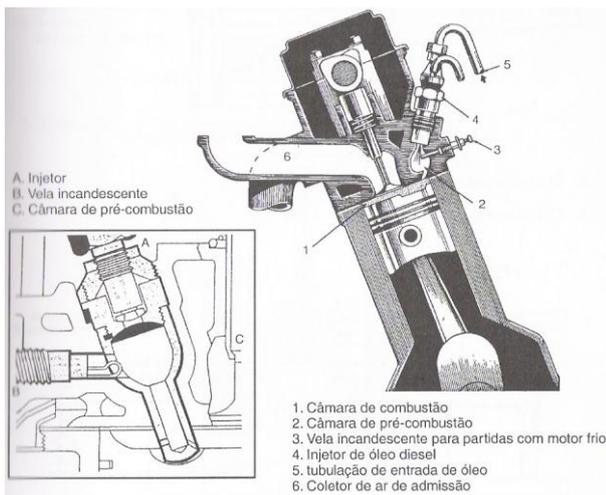


Figura 10 Ilustração de injeção indirecta [6]

Desvantagens:

Os motores de injeção indirecta têm uma partida a frio mais difícil do que os motores de injeção directa.

Os motores de injeção indirecta têm consumos superiores aos de injeção directa, na ordem de 10 a 12%.

MOTORES COM CÂMARA DE COMBUSTÃO DE TURBULÊNCIA

A câmara de turbulência costuma ser unida á câmara de combustão por um furo ou por uma passagem em forma de cone. Como é possível verificar na Figura 11, o tamanho ou volume da câmara de turbulência é muito maior que a câmara de pré-combustão dos motores de injeção indirecta. A cavidade da superfície do pistão do motor é feita de modo a haver uma concordância com a entrada da câmara de turbulência. Deste modo, o ar é forçado a ir para a câmara de turbulência, onde se mistura com o Diesel durante a injeção. O ar que entra na câmara de turbulência é forçado a fazer um movimento de remoinho, o que facilita a mistura com o Diesel.

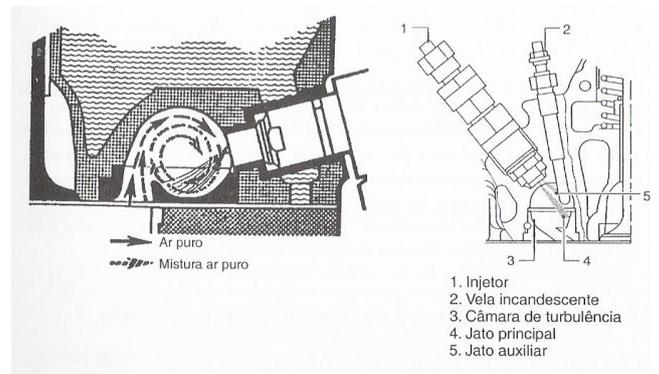


Figura 11 Câmara de turbulência [6]

IV. ESTEQUIOMETRIA

O termo “estequiometria” é usado com frequência em termodinâmica para referir a “mistura ideal” de combustível e o ar em que há uma reacção química completa.

A molécula de um combustível pode ser formada por átomos de carbono, hidrogénio, enxofre, azoto, oxigénio, etc. Além disso, o combustível pode conter substâncias inqueimáveis, normalmente designadas por cinzas. A queima de um combustível requer a presença de oxigénio, que é o comburente. Sem oxigénio nenhum combustível arde. Nos motores de combustão interna (Diesel e gasolina) utiliza-se o ar como comburente, que contém o oxigénio necessário à combustão; os outros elementos constituintes do ar podem, numa primeira aproximação, considerar-se como inertes, ou seja, não participantes nas reacções químicas de combustão. [7]

Um motor de combustão interna está limitado pela quantidade de ar que pode entrar em cada ciclo, pois tem um volume fixo. Relativamente pela quantidade de ar admitido, o motor tem de receber uma dada quantidade de combustível. A relação entre estas duas quantidades dá-se o nome de relação ar-combustível ou A/C (A vem de “ar” e C de “combustível”).

$$A/C = M_{ar} / M_c \quad (1)$$

Do mesmo modo pode-se definir a relação:

$$C/A = M_c / M_{ar} \quad (2)$$

Quando a relação entre o ar e o combustível é tal que todo o combustível é (ou pode ser) queimado utilizando todo o ar disponível, dizemos que a mistura é estequiométrica e especifica-se por (A/C)_{est}. Um motor ao qual se forneça mais combustível que o requerido pela estequiometria diz-se que a queima uma mistura rica, e ao contrário chama-se mistura pobre. A avaliação da “riqueza” ou “pobreza” da mistura é feita pelos seguintes parâmetros.

Riqueza:

$$\phi = ((A/C)_{est}) / (A/C) = (C/A) / ((C/A)_{est}) \quad (3)$$

Excesso de ar:

$$\lambda = (A/C) / ((A/C)_{est}) = ((C/A)_{est}) / (C/A) \quad (4)$$

Uma mistura estequiométrica apresenta $\lambda=1$ e $\phi=1$, para misturas ricas $\lambda < 1$ e $\phi > 1$ e para misturas pobres $\lambda > 1$ e $\phi < 1$.

Vulgarmente, os motores a gasolina apresentam misturas estequiométricas (de modo a que o catalisador elimine a maioria dos poluentes presentes no escape), embora os motores de injeção indirecta e os motores a gás possam queimar misturas com elevado excesso de ar (mistura pobres). Os motores de ignição por compressão queimam sempre em excesso de ar ($\lambda > 1.1$).

A. Relação ar-combustível

Aqui será demonstrado como se chega aos valores da relação ar-combustível para os combustíveis gasolina e gasóleo. Para tal é preciso perceber como ocorre a reacção de combustão. Qualquer reacção química é representada pelo seguinte esquema:

Reagentes ---Cadeia de reacção----> Produtos de reacção

A mistura de combustível e de comburente é a mistura reagente (Reagentes) resultando os produtos de combustão ou de reacção.

Neste trabalho, considerar-se-á que o ar é constituído apenas por oxigénio e azoto em que 79% é Azoto e 21% é oxigénio, ou seja considera-se que em 100 moles de ar existem 79 moles de N₂ e 21 moles de O₂, resultando assim em 3,76 moles de N₂ por cada mole de O₂, como será detalhado por cálculos.¹ [7][8][9]

1) Gasolina

Os reagentes (gasolina, oxigénio e azoto) por intermédio de centelha geram os produtos de reacção (dióxido de carbono, água, azoto, etc). O composto utilizado para representar a gasolina é o C₉H₂₀, isto deve-se a ser um dos que melhor representa a gasolina.



Como já referido, no ar em cada mol de oxigénio existe 3,76 moles de azoto (azoto atmosférico ou aparente).

$$(1 - 0,21) / 0,21 = 3,76 \quad (6)$$

Massa de ar (considerando que no ar 21% é oxigénio, 78% é Azoto e 1% dióxido de carbono e outros gases):

Massa atómica do oxigénio: 15,9994u; massa atómica do Azoto: 14,0067u

$$(9+10/2) \times M(O_2) : (9+10/2) \times 2 \times 15,9994 = 447,983u \quad (7)$$

$$(9+10/2) \times 3,76 \times M(N_2) : (9+10/2) \times 3,76 \times 2 \times 14,0067 = 1474,63u \quad (8)$$

A massa do ar é:

$$M(O_2) + 3,76 \times M(N_2) = 447,983u + 1474,63u = 1922,61u \quad (9)$$

Massa do combustível:

Massa atómica do Carbono: 12,0107u; massa atómica do Hidrogénio: 1,00794u

$$M(C_9) : 1 \times 9 \times 12,0107 = 108,096u \quad (10)$$

$$M(H_{20}) : 1 \times 20 \times 1,00794 = 20,1588u \quad (11)$$

Massa atómica total do combustível é:

$$M(C_9) + M(H_{20}) = 108,096u + 20,1588u = 128,255u \quad (12)$$

Logo:

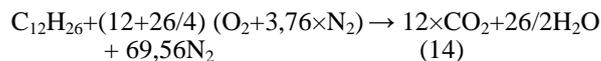
$$(A/C)_{est} = 1922,61 / 128,255u = 14,9905 \quad (13)$$

Desta forma, por aproximação podemos dizer que a relação Ar-Combustível é de 15:1.

A mistura estequiométrica é a mistura em que a relação ar combustível é a ideal para que ocorra uma combustão completa. Teoricamente falando, esta seria a razão da mistura com o qual um motor apresentaria a sua máxima potência, porém, na prática, isto não acontece, sendo necessário o uso de uma mistura com razão A/C menor que o estequiométrico. O uso desta mistura em excesso de combustível, com a qual obtemos a máxima potência, faz-se necessário, por causa da vaporização da mistura e dos gases residuais da combustão do ciclo anterior que se juntam a esta nova mistura. Por outras palavras para obter a máxima potência do motor, é necessário ter a certeza que todo o ar seja queimado e portanto usar uma mistura levemente rica. Nas velocidades de cruzeiro do motor, o factor predominante é a economia de combustível, portanto, nesta condição, o título da mistura ar-combustível deve ser maior que o valor estequiométrico, isto é, a combustão realiza-se em excesso de ar.

2) Gasóleo

O composto utilizado para representar a gasóleo é o C₁₂H₂₆, isto deve-se a ser um dos que melhor representa o gasóleo. Mas o composto pode variar entre C₁₀H₂₀ e C₁₅H₂₈.



Para determinar a estequiometria da reacção considera-se que 21% do ar é Oxigénio e o restante é azoto.

¹ O ar seco é constituído não só por O₂ e N₂, mas também por CO₂, Ar, Ne, He, CH₄ e outros.

Desta forma vem que a massa atómica da molécula de combustível é:

$$M(C_{12}H_{26})=12 \times M_{\text{atómica do carbono}} + 26 \times M_{\text{atómica do hidrogénio}}$$

$$\Leftrightarrow M(C_{12}H_{26})=12 \times 12,0107 + 26 \times 1,00794 = 170,335u \quad (9)$$

A massa atómica do ar:

$$(12 + 26/4) \times M(O_2 + 3,76 \times N_2) = 37/2 \times 2 \times M_{\text{atómica do oxigénio}} + 37/2 \times 3,76 \times 2 \times M_{\text{atómica do azoto}}$$

$$\Leftrightarrow 37/2 \times M(O_2 + 3,76 \times N_2) = 37 \times 15,9994 + 37 \times 3,76 \times 14,0067 = 2540,59u \quad (9)$$

$$(A/C)_{\text{est}} = M_{\text{ar}} / M_{\text{Combustível}} = 2540,59u / 170,335u = 14,9153(11)$$

Assim concluímos, por aproximação que a razão estequiométrica do ar e combustível é de 15:1, ou seja, que para 1 Kg de Diesel são necessários aproximadamente 15 Kg de ar.

V. AVALIAÇÃO DO RENDIMENTO DA COMBUSTÃO

Se a composição do combustível e a composição dos produtos de sua combustão são medidos, o rendimento da combustão pode ser calculado. A quantidade teórica de ar (ou oxigénio) para combustão completa e a composição estequiométrica dos produtos combustíveis são calculados e comparados com a composição real obtida pela análise dos gases de combustão; isto pode mostrar:

a) Qual a quantidade de calor que está a ser desperdiçada para aquecer quantidades excessivas de gases de combustão; isto quer dizer que se está a utilizar mais ar que o necessário. (Na prática é necessário excesso de ar sobre a quantidade de ar estequiométrica para assegurar uma combustão completa).

b) Se o combustível não é todo queimado, a combustão não ocorre completamente. Isto é demonstrado pela presença de CO, fumaça, combustível não queimado e possivelmente hidrogénio nos produtos de reacção.

Como foi observado previamente, um combustível específico requer uma quantidade específica de ar para a combustão teoricamente completa, mas na prática necessita de uma quantidade adicional de ar para atingir praticamente a combustão completa. Abaixo desta quantidade prática, que é uma função de algumas variáveis (tipo de combustível, das condições de combustão, etc.) é desperdiçado combustível e esta condição pode ser reconhecida pelo aparecimento de quantidades excessivas de monóxido de carbono no gás de combustão, um pouco antes da produção da fumaça preta (fuligem). Acima desta quantidade, o calor é perdido devido às quantidades excessivas de gás de combustão e é reconhecido pela grande quantidade de oxigénio no gás na exaustão.

A. Excesso de ar

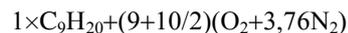
Quando a quantidade de ar da mistura reagente excede a quantidade estritamente necessária, a mistura tem excesso de ar. Portanto nas reacções de queima em que a quantidade de ar misturada com o combustível é a estritamente necessária, a combustão deveria ser completa. Porém, tal não acontece na prática porque a mistura de combustível e de comburente nunca é perfeita: haverá sempre zonas da mistura reagente em que o combustível terá ar a mais para reagir, e assim haverá outras zonas em que o combustível terá ar a menos para o mesmo efeito.

Quando o carbono arde, ou seja, reage com o oxigénio, resulta o aparecimento de monóxido de carbono, CO, ou de dióxido de carbono, CO₂. O CO é o produto da queima incompleta de carbono, ou seja, o CO é ainda combustível. Quando surge CO nos fumos de qualquer queima, pode concluir-se que essa queima é deficiente. O CO₂ já não é combustível, e por isso resulta da queima completa de carbono.

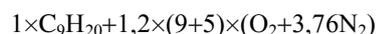
De notar que o combustível só reage com o oxigénio de que precisa para arder, segundo a reacção estequiométrica, e por isso o excesso de ar, ou seja, a quantidade de ar para além da estritamente necessária à queima, sai nos produtos da combustão sem ter reagido.

Para combustíveis gasosos ou combustíveis líquidos voláteis, que se misturam bem com o ar, o valor do excesso de ar é baixo, na ordem de 10 a 20%. Para combustíveis pouco voláteis ou sólidos, cuja mistura com o ar é difícil, o valor do excesso de ar pode subir até aos 300%. [7]

Para gasolina tínhamos que os reagentes de combustão eram:



Com 20% de excesso de ar temos que:



Obtendo assim uma relação ar/combustível de:

$$M_{\text{ar}} = 1,2 \times 14 \times (M_{\text{oxigénio}} + 3,76M_{\text{azoto}})$$

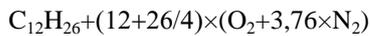
$$\Leftrightarrow M_{\text{ar}} = 1,2 \times 14 \times (2 \times 15,9994 + 3,76 \times 2 \times 14,0067) = 2307,13$$

$$M_{\text{combustível}} = 9M_{\text{carbono}} + 20M_{\text{hidrogénio}}$$

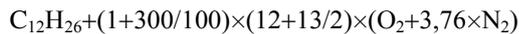
$$\Leftrightarrow M_{\text{combustível}} = 9 \times 12,0107 + 20 \times 1,00794 = 128,255$$

$$A/C = M_{\text{ar}} / M_{\text{Combustível}} = 2307,13 / 128,255 = 17,9886$$

Para gasóleo tínhamos que os reagentes de combustão eram:



Com 300% de excesso de ar temos que:



Obtendo assim uma relação ar/combustível de:

$$M_{ar} = 4 \times 18,5 \times (M_{oxigênio} + 3,76 \times M_{azoto})$$

$$\Leftrightarrow M_{ar} = 74 \times (2 \times 15,9994 + 3,76 \times 2 \times 14,0067) = 10162,3596$$

$$M_{combustível} = 12 \times M_{carbono} + 26 \times M_{hidrogênio}$$

$$\Leftrightarrow M_{combustível} = 12 \times 12,0107 + 26 \times 1,00794 = 170,3348$$

$$A/C = M_{ar} / M_{Combustível} = 10162,3596 / 170,3348 = 59,6612$$

Como aqui explicado, é necessário, na prática, um excesso de ar para assegurar uma combustão completa. Mas um excesso para além do necessário de ar pode gerar quantidades de calor que estão a ser desperdiçadas a aquecer quantidades excessivas de ar. [7][8][9]

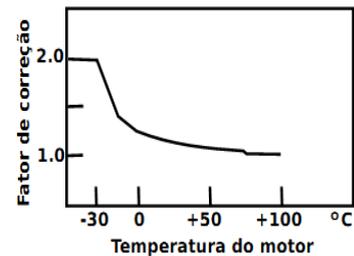
VI. CONTROLO DA MISTURA PARA DIFERENTES REGIMES DE FUNCIONAMENTO

Em determinados regimes de funcionamento do motor existe a necessidade de um enriquecimento da mistura ar/combustível acima da relação estequiométrica para os motores a gasolina. Como os motores a Diesel operam normalmente em excesso de ar é necessário alterar a mistura de igual forma como se processa nos motores a gasolina. Desta forma é focado apenas os regimes de funcionamento dos motores a gasolina. Esses regimes estão relacionados com a temperatura de operação, situação de partida, mudança de regime e funcionamento em plena carga. Existem também condições de funcionamento no qual o motor não precisa de injeção de combustível, podendo o mesmo ser cortado. A seguir, será detalhado a condição de enriquecimento em cada regime e a condição de corte do combustível.

A. Enriquecimento Devido a Temperatura e Arranque do Motor

Quando o motor está com uma temperatura de operação muito baixa, o combustível possui baixa capacidade de vaporização, tornando a mistura não uniforme e causando também uma condensação no colector de admissão. Em veículos MP, devido ao combustível ser injectado directamente em cima da válvula a condensação é muito menor, mas ainda existe. A falta de homogeneidade na mistura e a condensação fazem com que parte do combustível injectado não participe no processo de combustão, ou não seja aproveitado de forma eficiente. Para um motor funcionar correctamente durante a

fase de aquecimento, é necessário um enriquecimento da mistura, assim injecta-se mais combustível. Conforme o motor aquece e atinge a temperatura operacional, que normalmente é acima de 80°C, o enriquecimento adicional vai reduzindo. A Figura 12 ilustra o factor de enriquecimento da mistura em função da temperatura do motor.



Temperatura do motor (°C)	-30	-10	0	10	20	30	50	60	70	80
Fator de enriquecimento	2	1,33	1,25	1,20	1,15	1,12	1,08	1,06	1,04	1,00

Figura 12 - Relação de Factor de correcção de enriquecimento de mistura e temperatura [4]

Quando se dá o arranque do motor, a ECU (Electronic Command Unit) faz um enriquecimento da mistura para permitir uma partida rápida e eficiente. Mesmo quando o motor já está aquecido, o enriquecimento é necessário para facilitar o processo de partida.

B. Em progressão:

A mistura deve ser enriquecida para que se obtenha uma transição suave do ralenti para uma velocidade baixa.

C. Enriquecimento Devido ao Regime de Trabalho

1) Em aceleração:

Quando um motor está em condição de marcha lenta (borboleta de aceleração fechada) e a borboleta abre rapidamente, exigindo uma mudança rápida no regime de trabalho, existe a necessidade de se enriquecer a mistura (adicionando combustível) para permitir uma rápida passagem entre os dois regimes, sem que exista deficiência que causaria uma descontinuidade na aceleração.

2) Em Plena Carga:

Uma condição que exige o enriquecimento da mistura é a situação de plena carga, onde a borboleta de aceleração se encontra completamente aberta, exigindo a máxima capacidade do motor. Nesta situação, a mistura é enriquecida para fornecer um pouco mais de potência ao motor e evitar uma possível mistura pobre, a qual geraria um aquecimento e nessas condições poderia causar danos ao motor.

3) Em meia carga:

É desejável, a meia carga do motor, uma mistura pobre combinada com um consumo baixo e níveis de emissões de poluentes igualmente baixos.

D. Corte de Combustível Para Frenagem do Motor

Quando a rotação motor é elevada e a borboleta de aceleração está fechada o motor fica em frenagem. Isto acontece quando o condutor larga o acelerador, fazendo assim

com que haja redução da rotação e consequentemente desacelerar o veículo através do motor. Nessa condição, não é necessária a injeção de combustível, fazendo o sistema entrar em condição de corte. Esta condição permite economizar combustível e reduzir emissões desnecessárias. Aqui a relação ar-combustível é dada por:

$$\text{Ar/Combustível} = \text{Ar}/0 = \infty \quad (12)$$

VII. ALGORITMOS DE CONTROLO

Os algoritmos que controlam o motor são muito complicados. O *software* tem de fazer com que o carro satisfaça os requisitos em termos de emissões, os requisitos de economia de combustível, adaptar-se aos regimes de funcionamento, etc.

A unidade de controlo do motor utiliza uma fórmula e um grande número de tabelas para determinar a injeção para determinada condição de operação. A equação é uma série de vários factores multiplicados uns pelos outros. Sendo que muitos destes factores vêm das tabelas. Aqui vai ser dado um exemplo de cálculo da largura de impulso a dar ao injector. Neste exemplo a equação vai ter só três factores, sendo que num controlo real pode ter centenas de factores.

$$\text{Largura de Impulso} = (\text{base da largura de impulso}) \times (\text{Factor A}) \times (\text{Factor B}) \quad (13)$$

Para calcular a largura de impulso, o ECU pesquisa numa tabela pela base da largura de impulso. A base de largura de impulso é uma função da velocidade do motor (RPM) e da carga (que pode ser calculada a partir da pressão absoluta no colector de admissão). Por exemplo se o motor estiver a uma velocidade de 3000 RPM e com uma carga de 5, o programa vai a tabela e obtém 15ms para a base de tempo.

Tabela 1 Tabela representativa para cálculo da base da largura de impulso [10]

RPM	Load				
	1	2	3	4	5
1,000	1	2	3	4	5
2,000	2	4	6	8	10
3,000	3	6	9	12	15
4,000	4	8	12	16	20

O Factor A e B são mais uma vez retirados de tabelas, estes são referidos por valores medidos. Ou seja, são obtidas medidas de varias partes do carro e estas medidas correspondem a factores que vão ser utilizados para calcular a largura de impulso. O factor A e B podem ser referidos pelas variáveis medidas A e B, respectivamente. Por exemplo, se o A for a temperatura do liquido de refrigeração e o B o nível de oxigénio nos gases de exaustão. Quando a temperatura do líquido de refrigeração for 100 e o nível de oxigénio for 3 tiramos da Tabela 2 que o Factor A é 0.8 e o Factor B é 1.0.

Tabela 2 Tabela representativa para obtenção do Factor A e B [10]

A	Factor A	B	Factor B
0	1.2	0	1.0
25	1.1	1	1.0
50	1.0	2	1.0
75	0.9	3	1.0
100	0.8	4	0.75

Com a equação 13 obtemos que a largura de impulso é de 12ms. A partir deste exemplo dá para verificar que o sistema faz ajustes para as variadas variáveis. Hoje em dia os carros têm muitos sensores dando assim um conjunto muito grande de variáveis que ajudam a ter uma injeção otimizada para a condição de operação em causa. Como referido, um sistema real pode ter centenas de variáveis, sendo que cada uma delas tem a sua própria tabela e ainda alguns dos parâmetros são alterados ao longo do tempo para compensar as mudanças de performance dos componentes do motor, como por exemplo o catalisador.

É de ter em atenção que isto é um exemplo com valores exemplificativos e também cada fabricante pode ter a sua aplicação e estes não a apresentam ao público em geral.

VIII. GASES PRODUZIDOS NA COMBUSTÃO

Numa queima ideal resultaria do processo de combustão apenas CO₂, H₂O e N₂, os quais não são considerados poluentes. O problema é que num motor de combustão interna (MCI) a queima não é perfeita, o que resulta em vários outros gases como: monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HxCy), hidrogénio (H₂), óxido de nitrogénio (NOx), metano (CH₄) e óxido de enxofre (SOx). Destes gases, os mais prejudiciais e que seus níveis de emissão precisam ser controlados são: CO, NOx e HxCy.

A. Monóxido de Carbono

A falta de homogeneidade na mistura também influencia para formação de CO, pois irão existir áreas na câmara de combustão com muita concentração de ar e pouco combustível. O avanço de ignição influencia pouco na formação do CO, tendo maior influência somente quando a mistura é extremamente rica. A Figura 13 representa a formação de CO em função do tipo de mistura.

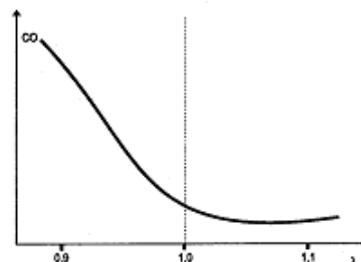


Figura 13 Formação de CO em função da mistura [4]

B. Óxido de Nitrogénio

O NO_x não é um gás tóxico mas apresenta o inconveniente de reagir com os raios ultravioletas formando ácido nítrico. Isso causa um fenómeno chamado de smog-fotoquímico, o que resulta em irritação dos olhos. O principal factor para a formação de NO_x é a temperatura da câmara de explosão que, quanto maior for, maior será sua concentração. Devido à temperatura na câmara ter relação com a mistura ar/combustível, o λ tem considerável influência sobre a formação de NO_x , conforme apresentado na Figura 14.

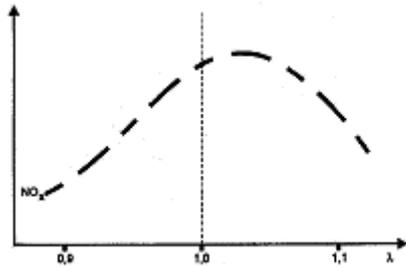


Figura 14 Formação de NO_x em função de mistura [4]

C. Hidrocarbonetos

O H_xC_y não é tóxico, mas em alta concentração causa uma reacção química nociva às plantas. Para os seres humanos esta reacção somente causa irritação nos olhos e um odor desagradável. O H_xC_y assim como o CO é resultado de uma queima incompleta com carência de oxigénio. A Figura 15 mostra a relação de emissão do H_xC_y com o λ .

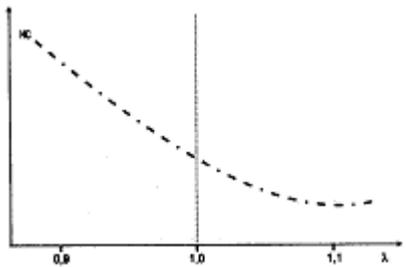


Figura 15 Formação de HC em função da mistura [4]

IX. PROCESSO CATALÍTICO

Neste capítulo é descrito o processo catalítico para os gases resultantes da combustão dos dois combustíveis referidos ao longo do trabalho.

A. Motores a gasolina

O controlo do λ é algo importante para a diminuição da emissão de gases nocivos aos seres humanos e ao meio ambiente. Mas somente o controlo de malha fechada pela sonda lambda não é suficiente para manter o nível de emissões dentro de um limite aceitável. Para reduzir as emissões, os gases expelidos pelo motor passam por um processo catalítico. Para tal processo, existe um componente montado na câmara de exaustão do motor, denominado catalisador. O catalisador reduz em até 85% os principais poluentes produzidos pela combustão do motor, como CO, H_xC_y e NO_x . [13] Por esse motivo ele também é conhecido como catalisador de três vias. Dentro de um catalisador existem duas colmeias feitas de um

elemento cerâmico que possuem tratamento externo com metais activos: paládio (Pd), molibdénio (Mo) ou ródio (Ro). Quando o CO e o H_xC_y passam pelo catalisador e entram em contacto com o Pd ocorre um processo de oxidação, que resulta em H_2O e CO_2 . O NO_x ao passar pelo Mo ou o Ro, dependendo do catalisador, sofre um processo de redução que remove o oxigénio (O) do NO_x , tendo como resultado o N_2 e o O_2 . A Figura 16 ilustra os gases emitidos antes e após o processo catalítico.

Ainda pode ser observado na Figura 16 que, o processo catalítico tem melhor resultado quando a mistura ar/combustível trabalha com $\lambda = 1$. Por esse motivo, é importante que os sistemas de alimentação actuais trabalhem com malha fechada, que garanta $0,95 < \lambda < 1,5$.

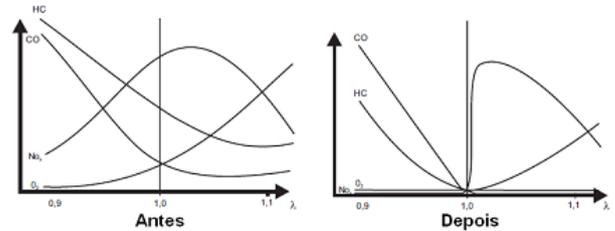


Figura 16 Imagem representativa da aplicação de um catalisador de três vias [4]

Devido às reacções de oxidação, o catalisador trabalha com temperatura próxima a 350°C , na qual atinge sua melhor eficiência. Desta forma, o catalisador é ineficiente durante a fase de aquecimento. A Figura 17 ilustra a conversão de gases poluentes feita por um catalisador



Figura 17 Catalisador e o processo catalítico [4]

Nos motores GDI para condições de carga baixa estes operam com injeção estratificada. Desta forma dentro da câmara de combustão vamos ter diferentes misturas em que numa zona mais afastada da vela de ignição estas atingem relação A/C de 65:1 e junto da vela de ignição tem-se uma mistura aproximadamente estequiométrica (ligeiramente rica) para a combustão se dar. Apesar de no global a mistura ser muito pobre ocorre combustão de igual forma mas com menor potência. Com a mistura global com um leve excesso de ar tem-se grande produção de NO_x e à medida que esta se torna mais pobre a produção de NO_x é reduzida devido a combustão se fazer completamente (Figura 16). Desta forma não é necessário ter em consideração os gases produzidos visto que ocorre uma combustão completa e logo não há produção de

NOx. Com uma mistura levemente pobre é activado o EGR de forma a reduzir o NOx.

B. Motores Diesel

Os catalisadores utilizados nos motores Diesel são bastante parecidos na forma e função dos catalisadores utilizados nos veículos a gasolina, os chamados conversores catalíticos. Para além dos gases produzidos pelos motores a gasolina, os motores a Diesel tem o problema de ter uma grande quantidade de matérias particuladas (MP). A filtragem do material particulado não é em princípio um problema, visto que, actualmente, existe uma grande variedade de filtros baseados em substratos cerâmicos ou metálicos, os quais permitem a captura de 70 a 95% da massa total do material particulado produzido.

O material particulado produzido por uma máquina Diesel consiste, basicamente, em aglomerados de núcleos de carbono, de hidratos de carbonetos, SO₃ ou ácido sulfúrico, e água adsorvidos ou condensados sobre esses núcleos carbónicos.

Se um projecto de uma máquina é capaz de reduzir a emissão de materiais particulados por perlongar o processo de combustão, as altas temperaturas resultantes irão levar ao aumento de NOx, e o inverso também se verifica. Dessa maneira, como as estratégias para reduzir o NOx, tais como retardar a injeção de combustível, frequentemente reduz a temperatura dentro do cilindro, uma quantidade menor de combustível é queimada, o que aumenta as emissões de HC e material particulado, reduzindo o NOx. Esse balanço também afecta outros dispositivos estratégicos para máquinas Diesel; a injeção do Diesel a altas pressões, por exemplo, melhora a combustão por criar gotas menores que podem queimar mais completamente, mas tende a aumentar as emissões de NOx.

A fim de minimizar o problema do balanço NOx/MP, em meados da década de 80, os fabricantes introduziram controlos electrónicos nas máquinas de combustão (a “injeção electrónica”). Esses dispositivos são capazes de minimizar NOx e material particulado em diferentes condições de operação através do balanço de factores-chave, tais como pressão de injeção e válvula de ajuste da ignição, mas reduzindo a eficiência do motor.

Actualmente um dos maiores desafios a que está submetida a comunidade catalítica mundial de forma a não comprometer a eficiência do motor é o estudo desenvolvido de catalisadores de “quatro vias”, ou seja, que possibilitem a oxidação do HC, CO e MP em baixa temperatura associado à eliminação de NOx em atmosfera oxidante. [14]

X. SENSOR LAMBDA E CONTROLO EM “CLOSED LOOP”

O catalisador de triplo efeito necessita de uma mistura perfeitamente estequiométrica para eliminar os poluentes na sua passagem. A precisão necessária obriga a sistemas de injeção controlados digitalmente. Uma das características destes sistemas é o controlo em “closed loop” (“malha fechada”) que vai buscar a informação da riqueza da mistura a sonda lambda, colocada no escape. O sistema não necessita que a mistura seja sempre estequiométrica em cada cilindro, mas permite variações temporais e espaciais (entre cilindros) desde

que o valor médio da mistura dos gases de escape integrados ao longo de um curto período (inferior a um segundo) se apresente dentro da “janela” de 1% de estequiometria. Como a resposta da sonda lambda é, geralmente, muito brusca, o motor é controlado estequiometricamente alternando entre mistura levemente rica e levemente pobre. Os gases provenientes destas combustões são misturados no escape e no catalisador. Assim, a resposta da sonda lambda estará sempre a variar entre alta/baixa tensão com uma frequência de cerca de um Hertz. A Figura 18 representa a resposta da sonda lambda em função da mistura bem como o controlo em malha fechada.

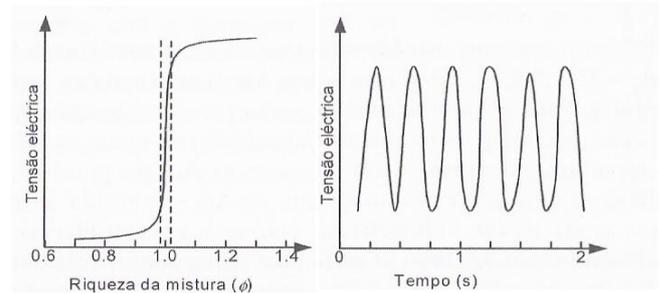


Figura 18 - Resposta da sonda λ em relação a riqueza da mistura e do tempo respectivamente [11]

A. Funcionamento do Sensor Lambda

A sonda Lambda, apresentada na Figura 19, é utilizada como referido anteriormente para o controlo da relação estequiométrica Ar-Combustível.

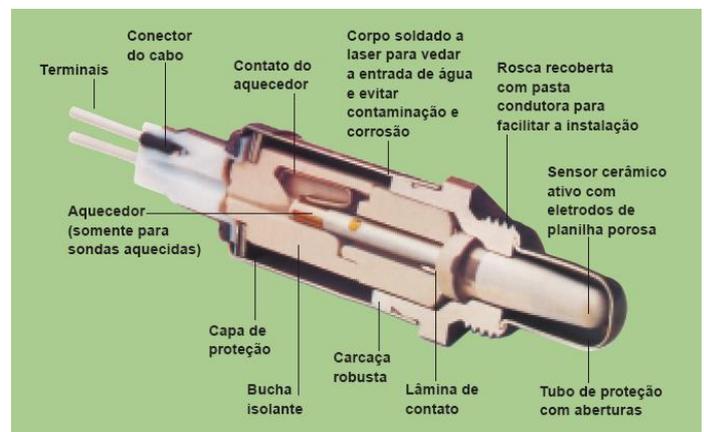


Figura 19 Esquema representativo da sonda Lambda [12]

Estas são constituídas por um componente muito importante: o dióxido de zircónio, este material quando atinge uma temperatura superior a 300°C transforma-se em condutor de iões de oxigénio. Com o auxílio deste componente a sonda consegue identificar por meio de uma variação de tensão a quantidade de oxigénio presente nos gases de escape. Esta tensão que pode ser medida em milivolts e varia de 0 a 900mv. Este sinal é enviado para a unidade de comando para que seja feito os cálculos usando como factor base o factor lambda.

Como a sonda funciona na perfeição somente acima de 300°C, geralmente este dispositivo é fixado na descarga, o mais próximo do motor possível e, obrigatoriamente, a sonda deve receber os gases provenientes de todos os cilindros para

que a leitura seja o mais exacta possível. A sonda de quatro fios por sua vez, pode estar localizada até mesmo próxima do catalisador pois esta possui uma resistência de aquecimento para atingir os 300°C necessários, dispensando assim a necessidade de ficar próximo do motor.

CONCLUSÃO

Com este trabalho verificou-se que para além dos dispositivos que efectuam a mistura terem sofrido uma grande alteração, o avanço da tecnologia permitiu em grande medida ter um controlo de elevada qualidade da mistura produzida. Com a introdução da electrónica para além dos dispositivos terem melhores tempos de resposta os computadores actuam tendo em consideração um grande conjunto de variáveis e actuam em conformidade mesmo em regimes de funcionamento diferentes.

Verificou-se que a tendência é tornar as misturas cada vez mais pobres possíveis de forma a ter baixos consumos tendo de igual forma uma queima total.

Conclui-se ainda que os motores a gasolina bem como os motores a gasóleo funcionam com uma mistura geralmente pobre para ocorrer a combustão completa. A quantidade de excesso de ar depende do tipo de combustível, ou seja depende da volatilidade deste, se esta for maior o excesso de ar pode ser menor para haver combustão completa, já em combustíveis pouco voláteis o excesso de ar tem de ser maior.

Verificou-se a existência de diferentes regimes de funcionamento sendo estes em que a mistura é pobre, em que a mistura é ligeiramente rica e em que a mistura rica dependendo da carga e temperatura aplicada ao motor.

Verificou-se que a sonda lambda tem um papel importante no controlo da mistura na câmara de combustão, pois esta, através do controlo em malha fechada, informa a ECU sobre a constituição dos gases de exaustão, ou seja informa como foi efectuada a combustão.

Outra tendência verificada é a injeção directa uma vez que permite uma maior liberdade de injeção. Desta forma é

possível fazer múltiplas injeções dependendo das condições do motor.

Tal como Alphonse Beau Rochas conclui, o trabalho mecânico obtido com uma explosão de uma mistura reagente é tanto maior quanto maior for a pressão dessa mistura antes da explosão. Portanto tendência dos motores actuais segue este princípio pois a tendência é aumentar as pressões na câmara de combustão ocorrendo assim maior rendimento de trabalho/combustão.

REFERENCES

- [1] Mário Ferreira Alves, Acetatos de SIAUT_v2
- [2] Miguel de Castro, Injecção a gasolina, 1ª edição, Plátano Edições técnicas, 1989
- [3] Miguel de Castro, Manual de Injecção Diesel, 1ª edição, Plátano Edições técnicas, 1990
- [4] Rafael Fassi Lobão, Controlador para Adaptação de Injecção Electrónica em Motores de Ciclo Otto Originalmente Carburados, Faculdade de Tecnologia e Ciências de Engenharia Mecatrónica, 2011
- [5] Daniela Siano, Fuel injection, SCIYO, 2010
- [6] Marco Rache A. M., Mecânica Diesel Caminhões – Pick-ups - Barcos, HEMUS, 2004
- [7] Leonardo Ribeiro, Elementos de combustão, 2010
- [8] Waldir A. Bizzo, Combustão
- [9] António Moreira dos Santos, Preparação da mistura ar-combustível
- [10] How Stuf Works, [22-12-2011], <http://auto.howstuffworks.com/>
- [11] Jorge Martins, Motores de combustão Interna, 3ª Edição, Publindústria, 2011
- [12] LinkPerformance Injecção de qualidade , [22-12-2011], <http://linkperformance.blogspot.com/2008/02/sonda-lambda.html>
- [13] Humberto José Manavella, Eficiência Catalítica, <http://www.hmautoron.eng.br/artigos/EficienciaCatalitica.pdf>
- [14] Silvana Braun, Lucia Gorenstín Appel e Martin Schmal, A POLUIÇÃO GERADA POR MÁQUINAS DE COMBUSTÃO INTERNA MOVIDAS À DIESEL – A QUESTÃO DOS PARTICULADOS. ESTRATÉGIAS ACTUAIS PARA A REDUÇÃO E CONTROLO DAS EMISSÕES E TENDENCIAS FUTURAS, 2003
- [15] Marshall Brain, How Stuf Works, [31-10-2010] <http://carros.hsw.uol.com.br/Diesel.htm>