



MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Miguel Neves Camargo

Dois motores diferentes, porém com mesma origem, revolucionaram os transportes. Beau de Rochas, em 1862, publicou uma brochura na qual descreve os princípios básicos de um motor em ciclo de quatro tempos. Esse motor foi construído em 1876 pelo alemão Nicolas Otto e acabou levando o seu nome. O outro é o motor Diesel, ou de ignição por compressão, inventado por um francês filho de alemães, Rudolf Diesel. Derivado do ciclo de quatro tempos idealizado por Beau de Rochas, trata-se de um dos motores térmicos de maior rendimento termodinâmico.

Passados pouco mais de um século, o motor de combustão interna transformou o mundo, e às mudanças seguiram-se preocupações quanto ao futuro daquela invenção. Em 1970 já se dizia que a continuidade da fabricação dos motores Diesel e dos motores a gás de alta compressão dependeria das reservas de combustíveis. Naquela época, praticamente todos os combustíveis usados eram derivados do petróleo. Hoje, sabe-se que, além do petróleo, gás natural, álcool, óleos vegetais e também carvão podem servir de combustíveis. Nesse aspecto, o Brasil tem-se mostrado pioneiro e inovador, criando novas tecnologias para combustíveis alternativos renováveis, oriundos da biomassa. Entretanto, a contínua popularidade dos motores de combustão interna poderá depender da sua capacidade de queimar qualquer tipo de combustível disponível.

1 Introdução

Uma grande invenção raramente é obra de um único homem. O motor térmico não escapa a essa regra. Todos os grandes nomes da ciência física deram a sua contribuição, mas o seu desenvolvimento não teria sido possível sem as inumeráveis contribuições de pequenos artífices de uma das maiores invenções da humanidade.

Os motores térmicos são máquinas que têm por objetivo transformar a energia calorífica em energia mecânica diretamente utilizável. A energia calorífica pode provir de diversas fontes primárias, porém, no caso dos motores de combustão, ela tem origem na queima de combustíveis líquidos ou gasosos. Portanto, motores de combustão transformam em energia mecânica, isto é, em trabalho útil, a energia química do combustível.¹

O trabalho útil é realizado por órgãos em movimento alternativo, por rotores em movimento rotativos ou diretamente realizados pelo empuxe de um jato de gases. Neste artigo só serão tratados motores cujo trabalho útil é realizado por órgãos de movimento alternativo: motores alternativos de combustão interna.

Os motores alternativos podem ser de combustão externa ou de combustão interna. O movimento de seus órgãos internos é gerado pela expansão de um fluido, chamado *fluido operante*. Nos motores de combustão externa, o fluido operante está completamente separado da mistura combustível/ar, sendo o calor da combustão transferido ao fluido operante, através das paredes de um reservatório ou caldeira. Nos motores de combustão interna, por sua vez, o fluido operante, antes da combustão, é a própria mistura de ar e combustível gaseificado. Após, o fluido operante passa a ser uma mistura de gases aquecidos, subprodutos da combustão. O fluido operante funciona também como veículo de calor, posto que introduz calor no motor em certos pontos do ciclo e o retira em outros.²

Os motores alternativos de combustão interna se caracterizam por possuírem um cilindro dentro do qual se desloca em movimento alternativo um êmbolo (pistão) que está conectado a um sistema de biela-manivela, transformando assim o movimento alternativo em movimento rotativo. Durante o funcionamento, o motor desenvolve um ciclo relacionado com o movimento do pistão. Tal ciclo tem diversas fases, caracterizadas pela aspiração, pela compressão, pela expansão e pela descarga do fluido operante. Tais fases podem estar distribuídas em quatro tempos de 180° ou

¹ GIACOSA, D. *Motores endotérmicos*. Madrid: Editorial Dossat, 1986. 722 p.

² TAYLOR, C. F. *Análise dos motores de combustão interna*. São Paulo: Edgard Blücher, 1971. 558 p.

³ GIACOSA, D. *Op. cit.*, p. 3-20.

agrupadas em apenas dois tempos de 180°. ³ Neste trabalho só serão estudados motores alternativos de combustão interna de quatro tempos.

2 Motores de ciclo Otto e de ciclo Diesel

Dois tipos de motores diferentes, porém com mesma origem, revolucionaram os transportes: os motores de ciclo Otto e os motores de ciclo Diesel.

2.1 Modos de funcionamento

Os motores de ciclo Otto, também chamados de motores de ignição por centelha, estão baseados nos princípios teóricos anunciados, em 1862, por Beau de Rochas, segundo os quais a combustão se verifica a volume constante. A brochura publicada pelo inventor foi depois transformada em patente francesa. Entretanto, o motor propriamente dito foi construído pelo alemão Nicolas Otto, em 1876. ⁴

⁴ BOULANGER, P. *Motores Diesel*. São Paulo: Hemus, 1971. 660 p., v. 3.

A esta categoria pertence a maioria dos motores automotivos, quase a totalidade dos motores de motocicletas e aviões pequenos, barcos de pequeno porte e também muitos motores estacionários de pequeno porte. Podem funcionar em dois ou quatro tempos, entretanto, hoje poucos modelos de dois tempos ainda são fabricados, devido às perdas de combustível não queimado plenamente e à poluição ambiental resultante.

Nesse tipo de motor, a ignição do combustível ocorre devido a uma centelha produzida por uma vela de ignição, no exato momento em que a mistura de ar e combustível está comprimida e pronta para ser queimada.

Os motores de ciclo Otto, geralmente, são motores de quatro tempos.

O primeiro tempo começa quando o pistão se encontra próximo ao ponto morto superior. Neste instante, abre-se a válvula de admissão e, com o movimento descendente do pistão, são aspirados ar e combustível para dentro do cilindro, formando uma mistura inflamável (figura 1). A proporção ideal de ar e combustível seria aquela que, após queimada, não deixasse oxigênio livre e nem combustível sem queimar, ou seja, a combustão seria completa. Essa proporção de ar e combustível é chamada de *relação estequiométrica*.

A mistura real tem uma proporção aproximadamente igual à relação estequiométrica e é preparada por um carburador ou, mais recentemente, por um sistema eletronicamente gerenciado, que injeta a quantidade correta de com-

bustível para cada cilindro, no coletor de admissão próximo da respectiva válvula de admissão. Quando o pistão atinge o ponto morto inferior, a válvula de admissão é fechada, e termina o primeiro tempo, chamado de *admissão*. Normalmente, a válvula de admissão é fechada um pouco depois do ponto morto inferior, para permitir que a inércia do movimento dos gases preencha um pouco mais o cilindro. Este tempo, assim como cada um dos demais, consome 180° , ou seja, meia volta de giro do virabrequim, também denominado de *árvore de manivelas* ou *eixo do motor*. Portanto, o ciclo completo de quatro tempos consome 720° , ou seja, duas voltas completas do virabrequim. Em alguns motores, além da aspiração natural provocada pelo deslocamento do pistão dentro do cilindro, existe um sistema externo que auxilia o enchimento do cilindro, provocando uma pressão maior na mistura de admissão. Tais motores são chamados de *motores sobrealimentados*. Normalmente é usado um turbocompressor para essa função. A sobrealimentação é muito comum em motores Diesel. Em motores Otto, só pode ser usada em altas rotações, para não se perder o controle da aceleração.

No segundo tempo, chamado de *compressão*, a mistura ar/combustível admitida no cilindro é comprimida até o motor atingir novamente o ponto morto superior, completando a primeira volta (figura 2).

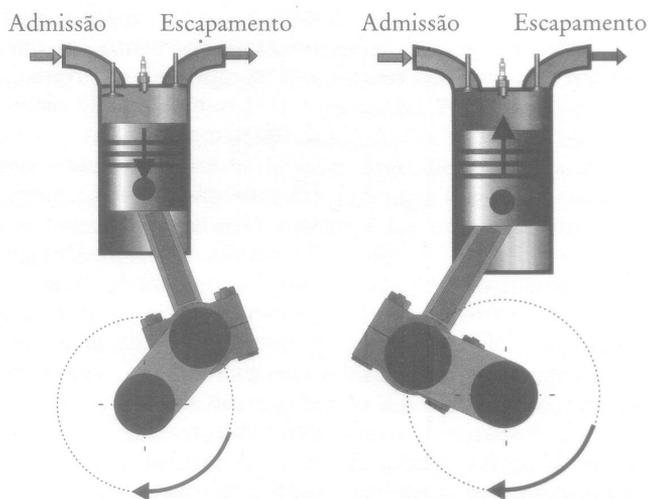


Figura 1:
Primeiro tempo: Admissão⁵

Figura 2:
Segundo tempo: Compressão⁶

⁵ CAMARGO, M. N. Como funciona um motor de ciclo Otto. *Cultivar Máquinas*, Pelotas, ano III, n. 29, abr. 2004, p. 22-26.

⁶ CAMARGO, M. N. Como funciona um motor... *Op. cit.*

O terceiro tempo chama-se *combustão* ou *expansão*. Somente nesse tempo, que corresponde à próxima meia volta, o motor gera energia útil (figura 3).

Um pouco antes de o pistão atingir o ponto morto superior, ainda durante a compressão, a vela de ignição produz uma centelha que dá início à combustão da mistura ar e combustível. Essa combustão deve ocorrer de maneira progressiva, formando uma frente de chama que se propaga até queimar toda a mistura. A combustão gera calor, que provoca uma expansão dos gases aí contidos e conseqüentemente eleva a pressão.

A vela de ignição produz a centelha um pouco antes do ponto morto superior porque a queima do combustível não é instantânea, e necessita um certo tempo para se propagar, de modo que a pressão máxima ocorra quando o pistão já ultrapassou o ponto morto superior e está descendo, entretanto não demasiado tarde. Tal antecipação do ponto de ignição é chamada de *avanço da ignição* e é medida em graus. Se o ângulo de avanço for menor que o ângulo ideal, se diz que o motor está *atrasado*. Neste caso, o pico de combustão ocorre quando o pistão já se deslocou, a ponto de não causar grande acréscimo de pressão, devido ao aumento do espaço gerado pelo deslocamento do pistão. Sendo assim, o motor perde potência, isto é, diminui o rendimento. Se, por outro lado, a antecipação for muito grande, diz-se que o motor está *adiantado*. Neste caso, o pico de pressão ocorre quando o pistão ainda não atingiu o ponto morto superior, causando um esforço muito grande sobre biela e virabrequim, pois a pressão age contra o sentido de rotação do motor, produzindo um ruído seco, como uma batida. Diz-se, então, que o motor está *grilando*. Na realidade, o que ocorre é uma detonação. Devido a essa ignição antecipada, a pressão ocasionada pela expansão dos gases quentes atinge valores elevados ainda no ciclo de compressão, de tal forma que a pressão total ultrapassa o limite suportável pela porção da mistura ar e combustível ainda não queimada, e esta entra em ignição instantaneamente, produzindo uma detonação.

O ângulo ideal de avanço da ignição varia com a rotação do motor, já que com o aumento da rotação o tempo disponível para a combustão é cada vez menor. Os motores dispõem de dispositivos automáticos de avanço da ignição.

A pressão gerada pela combustão empurra fortemente o pistão para baixo. O movimento linear do pistão dentro do cilindro é transformado em movimento rotativo pelo sistema biela-manivela, formado pela biela e pela manivela do virabrequim.

O quarto e último tempo, dito *descarga* ou *escapamento*, começa no ponto morto inferior. Próximo do ponto morto inferior, a válvula de escapamento é aberta e os gases resultantes da combustão são expelidos para o cano de descarga, enquanto o pistão sobe até o ponto morto superior (figura 4). Nesse ponto a válvula de descarga é fechada, simultaneamente se abre a válvula de admissão e novo ciclo se inicia.

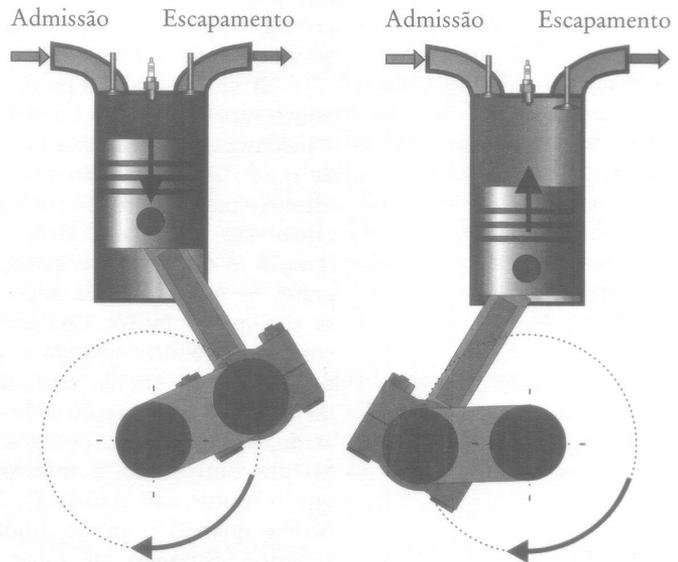


Figura 3:
Terceiro tempo: Expansão⁷

Figura 4:
Quarto tempo: Descarga⁸

⁷ CAMARGO, M. N. Como funciona um motor... *Op. cit.*

⁸ CAMARGO, M. N. Como funciona um motor... *Op. cit.*

Inspirado no sistema de quatro tempos de Beau de Rochas, Rudolf Diesel, nascido em Paris, filho de imigrantes alemães, concebeu em 1890 a idéia que mais tarde resultaria no motor diesel, cuja patente obteve em 1892. Nesse motor de ignição por compressão, o deslocamento do pistão aspira, pela válvula de admissão aberta, o ar que será comprimido. Este ar pode ser aspirado normalmente ou sofrer o efeito de um turbo-compressor que irá favorecer o preenchimento do cilindro, aumentando a taxa real de compressão e o volume de oxigênio (ar) admitido pelo cilindro. Este é preenchido apenas com ar, sem combustível.

Na fase de compressão, as válvulas ficam fechadas como nos motores Otto, entretanto, apenas o ar é comprimido. Nesta fase, o ar é aquecido por compressão dentro

do cilindro. No final da compressão, o óleo Diesel é injetado dentro de uma pré-câmara ou da câmara de combustão (volume residual do cilindro no final da fase de compressão) e sofre uma ignição espontânea causada pela alta temperatura do ar. A ignição ocorre porque a temperatura do ar comprimido é maior que a temperatura de ignição do combustível Diesel.

Na fase seguinte, a alta pressão resultante da combustão empurra o pistão através do cilindro, produzindo um deslocamento linear, o qual, pela biela, é transformado em movimento rotativo no virabrequim.

A injeção do combustível é feita através de uma bomba injetora, dosadora de alta pressão e um bico injetor instalado de tal maneira a injetar o combustível Diesel diretamente dentro da câmara de combustão.

2.2 *Formação da mistura ar e combustível em motores de ciclo Otto*

Para um motor de ciclo Otto funcionar, deve haver a combustão de um elemento combustível com o ar atmosférico. Para facilitar o processo, o combustível deve ser finamente pulverizado e misturado com ar em uma proporção correta, antes de entrar no motor.

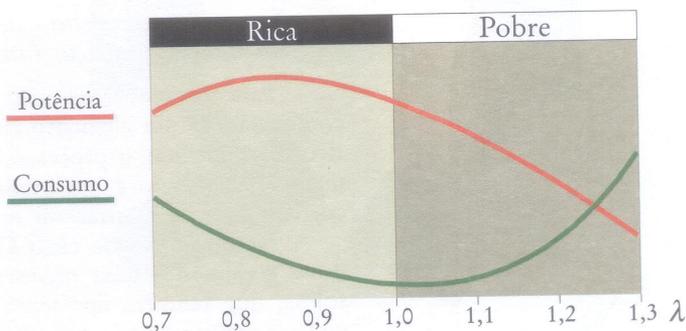
Nos motores de ciclo Otto, o combustível empregado é geralmente uma mistura de hidrocarbonetos, a gasolina, que também apresenta outros compostos químicos que reagem entre si e com os componentes do ar, durante a combustão, formando uma série de poluentes.

Os hidrocarbonetos são substâncias químicas compostas de carbono e hidrogênio. A combustão é uma reação química entre o oxigênio do ar com o carbono e o hidrogênio do combustível, resultando água (H_2O) e gás carbônico (CO_2). Quando existe excesso de combustível em relação à quantidade de ar admitido, diz-se que a mistura está *rica* e sobra combustível sem queimar, que sai semiqueimado pelo cano de descarga, causando poluição. Quando há falta de combustível em relação à quantidade de ar admitido, a mistura é *pobre*. Nesse caso, não é aproveitada toda a potência que o motor pode gerar.

Em regime normal de funcionamento, a mistura deve ser mais próxima possível da mistura estequiométrica, porque esta apresenta o melhor equilíbrio entre potência, consumo e emissão de poluentes. Entretanto, em algumas faixas de rotação e carga, a mistura deve ser enriquecida e, em outras, empobrecida. Para facilitar a partida do motor, deve ser temporariamente enriquecida ou quando se necessita de

um brusco acréscimo de potência, por exemplo, durante a aceleração em uma ultrapassagem. Quando o motor é pouco solicitado, a mistura pode ser empobrecida para reduzir o consumo. Em geral se obtêm maiores potências com a mistura relativamente rica, por outro lado, obtém-se menor consumo com uma mistura relativamente pobre.

Pode-se entender então que a relação real de ar e combustível difere da relação ideal (estequiométrica). Para determinar a intensidade dessa diferença, estabeleceu-se a *relação lambda*. *Lambda* indica quanto ar a mistura real tem a mais do que teria se fosse usada a relação estequiométrica. Quando a relação *lambda* for igual à relação estequiométrica, diz-se que *lambda* é igual a 1. Portanto, uma mistura pobre tem *lambda* maior que 1 e uma mistura rica tem *lambda* menor que 1 (figura 5).



$\lambda = 1$: Melhor solução entre potência, consumo e poluentes

Figura 5: Relação entre a quantidade de combustível e ar em um motor de ciclo Otto (relação *Lambda*).⁹

Do exposto se pode concluir que para cada situação de funcionamento instantâneo do motor, em função da carga aplicada, da rotação e até mesmo da temperatura, o valor de *lambda* deve variar para se obter a melhor condição de funcionamento.

2.3 Composição do fluido operante

A energia química do combustível se libera sob forma de calor quando o combustível queima na presença de oxigênio. Logo, é necessário introduzir, no motor, combustível e ar, contendo oxigênio. Após a queima, na câmara de combustão, a mistura se transforma em vapor d'água, dióxido de carbono e nitrogênio contido no ar que não interfere na combustão. Encontram-se também porções de outros gases,

⁹ BOSCH, R. Programa de aprendizagem KH Jetronic. Plochingen: Robert Bosch, 2002. CD-ROM.

¹⁰ GIACOSA, D. *Op. cit.*, p. 107-112.

como monóxido de carbono, hidrogênio, metano e oxigênio, em especial quando a combustão é incompleta por excesso de ar.¹⁰

2.4 O ar atmosférico

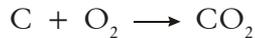
O ar atmosférico é composto, em volume, de aproximadamente 21 partes de oxigênio e 79 partes de nitrogênio e outros gases. Um metro cúbico de ar à pressão atmosférica normal de 760 mm Hg e na temperatura de 0°C pesa 1,2928 kg, logo, um quilograma de ar nas mesmas condições ocupa 0,77351 metro cúbico.

Ao ser feito o cálculo da quantidade de ar necessária para a queima completa do combustível em um motor, deve-se considerar que apenas 21 partes do volume de ar são oxigênio e, somente este irá reagir com o combustível. Os demais gases presentes na mistura não participam da combustão, entretanto, fazem parte do volume a ser comprimido.

2.5 Quantidade de ar necessária para a combustão.

Relação estequiométrica.

Os combustíveis mais usados nos motores de combustão interna são misturas de hidrocarbonetos, compostos essencialmente de carbono e hidrogênio. Os dois elementos se combinam com o oxigênio conforme as fórmulas seguintes:



Onde: CO_2 e $2\text{H}_2\text{O}$ são produtos da combustão.

Não foi considerado o nitrogênio por ser um gás inerte, que não participa da reação.

Considerando-se o peso atômico do hidrogênio igual a 1, do carbono igual a 12 e do oxigênio igual a 16, pode-se ter:



Nesses casos, conclui-se que 12 kg de carbono (C) mais 32 kg de oxigênio (O_2) formam, após a queima, 44 Kg de gás carbônico, dióxido de carbono (CO_2). Também é certo que 2 kg de hidrogênio mais 16 kg de oxigênio formam 18 kg de água (H_2O). Essa relação de massas que produzem uma reação sem deixar sobras de reagentes é a chamada relação estequiométrica.

Assim, sabendo-se a fórmula química de um combustível, é possível determinar matematicamente a sua relação estequiométrica com o ar. Deve-se considerar sempre que o ar tem 21% de oxigênio em volume.¹¹

¹¹ GIACOSA, D. *Op. cit.*, p. 107-112.

2.6 Calor desenvolvido pela combustão

Da mesma forma que se pode calcular a relação estequiométrica a partir das equações das reações químicas que se desenvolvem durante a combustão, também é possível calcular a quantidade de calor desenvolvido por tais reações.

Sabendo-se que a transformação de 1 kg de carbono em CO₂ produz 34,080 kJ e a combustão do hidrogênio gerando água produz 120,161 kJ por kg de hidrogênio, pode-se facilmente calcular o total de calor gerado na combustão de uma determinada quantidade de um determinado hidrocarboneto de fórmula conhecida. Entretanto, como a maioria dos combustíveis, inclusive a gasolina, são formados pela mistura de inúmeros hidrocarbonetos às vezes não perfeitamente determinados, são aplicados métodos experimentais para precisar a quantidade de calor gerada pela queima de uma unidade de combustível.

2.7 Tonalidade térmica

A tonalidade térmica, ou potencial térmico, é a quantidade de calor que se desenvolve por unidade de volume de mistura, a temperatura e pressão constantes. A potência que se obtém de um motor depende da tonalidade térmica do combustível empregado. Quando se trabalha com mistura de combustíveis, é mais correto o emprego do conceito de tonalidade térmica, já que cada um dos combustíveis componentes tem poder calorífico diferente. Entretanto, é necessário conhecer o poder calorífico individual de cada combustível, o que pode ser feito por método experimental.¹²

¹² GIACOSA, D. *Op. cit.*, p. 107-112.

2.8 Emissões de CO e CO₂

Para estudar as emissões resultantes da combustão, existem duas formas de abordagem. A primeira é considerar o que o motor está emitindo, e a segunda é levar em conta o potencial do combustível.¹³

¹³ DELAVIA, D. *Combustíveis para motores endotérmicos – enfoque para o gás natural*. Porto Alegre: UFRGS, 2000. 21 p.

O que o motor está emitindo tem relação com o projeto e o mapeamento do motor gerenciado eletronicamente, ou a regulagem do motor carburado. O potencial do combustível, por sua vez, está relacionado com a sua composição. Por exemplo, ao se avaliar a emissão de monóxido de carbono para a relação ar/combustível que gera máxima

potência, será constatado um valor elevado de monóxido de carbono, porque esta relação de mistura é rica em combustível. Entretanto, se o combustível for substituído por gás hidrogênio puro, na mesma relação ar combustível de máxima potência, não existirá monóxido de carbono. Por analogia, verifica-se que quanto maior o percentual de hidrogênio na molécula (menos carbono), menor será a emissão de monóxido de carbono na região de mistura rica.

À medida que o motor começa a trabalhar com uma mistura rica em combustível, o monóxido de carbono aumenta sensivelmente. Para determinar se a mistura está rica ou pobre de combustível, nos motores dotados de gerenciamento eletrônico, usa-se a sonda *lambda*. A sonda *lambda* é um sensor que determina um número empírico, denominado *lambda*, utilizado para medir o oxigênio livre (não queimado) nos gases de escapamento.

O dióxido de carbono máximo teórico é calculado pela reação de combustão na relação estequiométrica (balanço de massa). Na tabela 1 estão os valores de dióxido de carbono (CO₂) máximo teórico para alguns combustíveis.

O menor dióxido de carbono teórico também significa menor monóxido de carbono na região rica. Portanto, verifica-se que o GNV (gás natural veicular) tem excelente potencial para tornar um motor pouco poluente. Na verdade, é o melhor entre os combustíveis atualmente disponíveis. A tabela 1 mostra as emissões de CO₂ para gasolina, álcool e gás natural.

¹⁴ DELAVIA, D. *Op. cit.*

Tabela 1: Emissão de CO₂ para gasolina, álcool e gás natural.¹⁴

Combustível	% carbono	% hidrogênio	% oxigênio	CO ₂ máx. calculado (%)
Gasolina	86,37	13,63	0	13,34
Etanol	52,14	13,13	34,73	12,24
GNV	76,02	23,98	0	9,79

Sob o aspecto do efeito estufa, deve-se considerar não somente o dióxido de carbono máximo do combustível, mas também toda a cadeia de sua produção. Para o caso do etanol, por exemplo, temos que considerar a indústria de nitrogenados (adubação do solo), maquinário agrícola, caminhões transportando a cana do campo até a usina, a fermentação, geração de CO₂ na usina (caldeiras) etc. No caso do GNV, o dióxido de carbono agregado é bastante baixo, pois, na maioria dos casos, ele já existe praticamente pronto no subsolo.

Na prática, outros fatores de projeto devem ser observados ao analisar a redução de dióxido de carbono quando se passa a utilizar GNV. Num motor de ciclo Otto, quando se está em carga parcial e utilizando um combustível líquido, ao ser acionado o acelerador, ocorre um aumento na pressão absoluta do coletor (redução do vácuo). Isso faz com que o combustível que estava sendo vaporizado condense, molhando a parede do coletor. Desse modo o motor irá falhar por mistura pobre, pois a mistura admitida naquele momento ficou sem aquele combustível que condensou. A situação é contornada com sistemas de enriquecimento nos transientes. Basicamente, ocorre aumento do pulso de injeção para os veículos com injeção eletrônica, acionando automaticamente a bomba de aceleração (injeção de combustível adicional em forma líquida) nos motores carburados. Assim, o motor passa por curtos períodos de mistura muito rica (bastante monóxido de carbono) cada vez que o acelerador é acionado. Com o gás o problema acima não ocorre, porque ele não condensa. Por conta disso, o monóxido de carbono fica bastante reduzido se comparado a combustíveis líquidos.

Outro fato importante quando se usa um combustível líquido e se deseja uma potência máxima, é o seguinte: a partir de certa posição do acelerador (aproximadamente 70% a 80%), a central de injeção aumenta o pulso de modo a enriquecer para a máxima potência, o que resulta num índice de monóxido de carbono entre 3,5% a 4%. Nos veículos carburados existem circuitos enriquecedores para esse fim (válvula de máxima, econostat etc.).

O enriquecimento no regime de máxima potência, quando são empregados combustíveis líquidos, é necessário porque o λ de potência máxima situa-se na região rica, em torno de 0,89 para a gasolina e 0,85 para o etanol. Esse valor é uma característica do combustível. Para o caso do GNV, o λ de máxima potência é próximo do estequiométrico, em que a percentagem de monóxido de carbono fica geralmente bastante reduzida (da ordem de 0,5% a 1% dependendo da composição do gás). Quando se usa GNV, não é necessário enriquecer a mistura durante as acelerações nem para atingir a máxima potência. Isso resulta em baixa emissão de monóxido de carbono, chegando a reduções da ordem de até 70% (quando a adaptação do motor para GNV for feita de forma correta).

Além das vantagens já expostas referentes às emissões, há a vantagem construtiva, pois se evitam complexidades na conversão de motores de gasolina para gás natural.

2.9 Taxa de compressão

Taxa de compressão é a relação entre o volume do cilindro, quando o pistão está no ponto morto inferior, e o volume do cilindro, quando o pistão se encontra no ponto morto superior (figura 6). Os motores de ignição por compressão podem trabalhar com altas taxas de compressão.

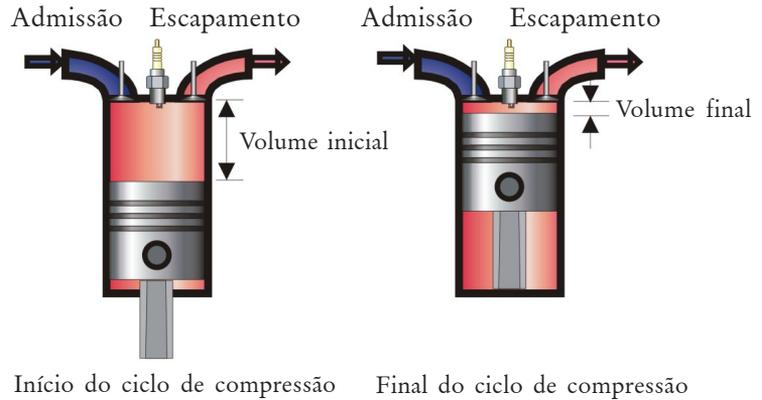


Figura 6: Taxa de compressão.¹⁵

O rendimento termodinâmico de um motor cresce com o aumento da taxa de compressão.¹⁶

Nos motores de ignição por compressão, como a taxa de compressão é mais alta, o rendimento termodinâmico também é maior. Para um motor de ciclo Otto trabalhar com taxa de compressão alta, é necessário que o combustível suporte esta compressão sem detonar.

2.10 Rendimento

O rendimento total de um motor pode ser entendido pela seguinte equação:¹⁷

$$\eta_{tt} = \eta_m \eta_{ht} \eta_{hv}$$

Onde:

η_{tt} = rendimento total;

η_m = rendimento mecânico;

η_{ht} = rendimento termodinâmico;

η_{hv} = rendimento volumétrico.

Define-se o *rendimento mecânico* como a relação entre a energia líquida disponível no motor e a energia mecânica gerada pelo motor antes de subtrair as perdas por atrito. Em geral, o rendimento mecânico é elevado e a sua melhoria obtida pela redução do atrito.

¹⁵ CAMARGO, M. N. Potência extra. *Cultivar Máquinas*, Pelotas, ano III, n. 26, jan. 2003, p. 18-22

¹⁶ GIACOSA, D. *Op. cit.*, p. 126-128.

¹⁷ GIACOSA, D. *Op. cit.*, p. 126-128.

Quanto ao *rendimento termodinâmico*, trata-se da relação entre a parcela de calor transformado em energia mecânica pelo motor e o calor total gerado pela queima do combustível. O rendimento termodinâmico é muito importante, porque define a intensidade da transformação da energia no motor. É significado pelas seguintes equações:

$$ht = 1 - \left(\frac{1}{1 - r^{(k-1)}} \right)$$

para ciclos Otto e

$$ht = 1 - \left(\frac{1}{1 - r^{(k-1)}} \right) \cdot \left(\frac{t'^k - 1}{k(t' - 1)} \right)$$

para ciclos Diesel onde:

h_t - Rendimento termodinâmico.

k - Relação entre o calor específico à pressão constante e o calor específico a volume constante.

t' - Relação entre o volume inicial e o volume final da fase de combustão à pressão constante.

r - Taxa de compressão.

O *rendimento volumétrico* relaciona o volume de ar realmente aspirado pelo movimento do pistão dentro do cilindro com a capacidade volumétrica teórica do cilindro. O volume de ar aspirado pelos motores em geral é bastante menor que o volume teórico do cilindro, devido a perdas de carga (atrito fluido) na tubulação de admissão e as obstruções naturais dos canais de ar, incluindo no caso dos motores de ciclo Otto, a própria borboleta do carburador. Nos motores Diesel, o rendimento volumétrico pode ser aumentado com o emprego de turbo compressores. O rendimento volumétrico é muito importante, porque define uma taxa de compressão real menor que a taxa de compressão de projeto, reduzindo, portanto, o rendimento termodinâmico, que depende da taxa de compressão.

3 Combustíveis

Os combustíveis para os motores de combustão interna podem se classificar em sólidos, líquidos e gasosos.¹⁸

Os combustíveis sólidos não têm aplicação prática, porque as tentativas feitas para introduzi-los pulverizados no motor evidenciaram graves inconvenientes, dentre os quais a corrosão por abrasividade.

¹⁸ GIACOSA, D. *Op. cit.*, p. 85-106.

Os combustíveis gasosos podem ser classificados em gases líquidos e gases permanentes.

Os gases líquidos são uma mistura de hidrocarbonetos parafínicos: propano, butano etc., junto com olefínicos, propileno, butileno, isobutileno e outros, que à temperatura normal podem ser liquefeitos a uma pressão relativamente baixa, $\pm 680\text{kPa}$ (7kg/cm^2). Tais gases, quando submetidos à pressão atmosférica, evaporam-se voltando ao estado gasoso. Normalmente são armazenados em cilindros de aço e podem ser transportados e manuseados com relativa segurança. No Brasil, por questões de segurança e devido a subsídios para uso como gás de cozinha, este tipo de gás só pode ser usado em motores estacionários ou em veículos especiais de uso restrito, como empilhadeiras.

Quanto aos gases permanentes, há o metano natural ou fabricado e o gás de coque, essencialmente formado de hidrogênio e metano e outros gases leves. São gases que não se liquefazem em temperatura ambiente e, para armazená-los, é necessário comprimi-los a pressões da ordem de 20MPa ($\approx 200\text{kg/cm}^2$), em cilindros especiais de aço com parede espessa. Desses gases, o mais empregado é sem dúvida o gás natural.

Entretanto, os combustíveis líquidos foram os que encontraram até o presente maior aplicação para motores de combustão interna. E os que se destacam são os derivados do petróleo. Os principais combustíveis líquidos postos à venda no comércio são os hidrocarbonetos obtidos pela destilação do petróleo, e no Brasil, o álcool (etanol, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$).

Os hidrocarbonetos se classificam em dois grandes grupos: carburantes e óleos, os quais se distinguem entre si essencialmente por sua volatilidade, isto é, por sua capacidade de se evaporar e, por conseqüência, sua capacidade de se misturar homogeneamente com o ar. Os carburantes são usados, sobretudo, nos motores de ignição por centelha, enquanto os óleos destinam-se a motores de ignição por compressão. Entre os carburantes está incluída a gasolina.

Os óleos compreendem os óleos médios e pesados, que procedem da destilação de petróleo mineral cru ou de alcatrão, os quais se chamam respectivamente de óleo Diesel e óleo combustível (*fuel oil*). Considera-se o querosene ou óleo refinado o produto intermediário entre os carburantes e os óleos.

O benzol e os álcoois podem ser classificados como carburantes. O benzol é um subproduto do carvão, obtido da transformação do coque. Seu principal componente é o benzeno (C_6H_6).

Os álcoois têm uma composição similar à dos hidrocarbonetos, entretanto, possuem em sua composição átomos de oxigênio. Os álcoois mais usados como combustíveis são o álcool metílico ou metanol (CH_3OH) e o álcool etílico ou etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$).¹⁹

¹⁹ GIACOSA, D. *Op. cit.*, p. 85-106.

3.1 Número de octanas

Se uma mistura estequiométrica de ar e combustível for comprimida, haverá uma determinada relação de compressão (taxa de compressão) na qual a mistura de ar e combustível entra espontaneamente em combustão, ou seja, a pressão e o conseqüente aumento de temperatura provocam a queima do combustível independentemente de centelha. Como toda a massa de ar e combustível está submetida às mesmas condições, a combustão se dá quase instantaneamente em toda a mistura, provocando uma detonação. A detonação também pode se dar no motor sob condições anormais de funcionamento, seja por excesso de carga, seja por sobreaquecimento, ou ainda por um excessivo avanço da ignição (excessiva antecipação do instante em que ocorre a centelha em relação ao ponto morto superior).

Um combustível para motores de ciclo Otto é considerado melhor, quanto maior for sua capacidade de suportar taxas de compressão elevadas sem detonar, ou seja, quanto maior for sua capacidade antidetonante. Para medir a capacidade antidetonante de um combustível é usado um índice empírico chamado *índice de octanas* ou *número de octanas*.

O número de octanas de um combustível (N.O.) se obtém comparando-o com combustíveis de referência constituídos de uma mistura de isoctano (C_8H_{18}) e heptano (C_7H_{16}). O isoctano, da série isoparafínica, tem uma ótima capacidade antidetonante e para este combustível foi dado convencionalmente o número de octanas igual a 100. Para o heptano da série parafínica, que possui uma capacidade antidetonante muito baixa, foi dado o N.O. igual a zero. Misturando-se os dois combustíveis em variadas proporções, obtêm-se todos os números de octanas possíveis entre 0 e 100.

A determinação do N.O. de um combustível se faz através de motores construídos segundo normas específicas. Esses motores são monocilíndricos e permitem variar a taxa de compressão durante o funcionamento. Como foram normalizados pela *Cooperative Fuel Research Committee*, são chamados de motor C.F.R.

A determinação do N.O. de um combustível é feita por comparação em um motor C.F.R., do combustível desejado e da mistura de isoctano e heptano que inicia a detona-

ção na mesma taxa de compressão do combustível testado. Assim, um combustível que começa a detonar na mesma taxa de compressão que uma mistura de 80% de isoctano e 20% de heptano, apresenta um N.O. igual a 80 ou tem 80 octanas.

Quanto mais alto o N.O. de um combustível, maior a sua capacidade de resistir à detonação e mais alta pode ser a taxa de compressão do motor que o está usando. Como o rendimento termodinâmico depende exclusivamente da taxa de compressão, pode-se afirmar que, para aumentar o rendimento de um motor, deve-se aumentar a taxa de compressão, entretanto esta taxa de compressão fica limitada ao número de octanas do combustível que será usado.

As gasolinas disponíveis no mercado têm um N.O. variando entre 60 e 80 octanas, podendo chegar próximo a 100 octanas nas gasolinas de aviação. Em princípio, a gasolina amarela normal apresenta 72,3 octanas, a gasolina azul, 82 octanas, e a gasolina super, 96 octanas.

O álcool etílico possui um N.O. levemente superior a 100, em geral em torno de 106, e o gás natural, um N.O. bem mais alto, podendo chegar a até 145 octanas, dependendo da sua composição.

3.2 RON e MON

Existem dois métodos principais para determinar o número de octanas de um combustível. O primeiro, chamado RON (*research octane number*), que já foi descrito anteriormente, indica o número de octanas através do motor CFR, e o segundo, chamado MON (*motor octane number*), determina o número de octanas do combustível testado, em um motor convencional em alta rotação, ou seja, na condição de funcionamento real em estrada.²⁰

A diferença entre os dois métodos reside no número de rotações no qual se efetua o ensaio, na temperatura de entrada do ar, no aquecimento da mistura e no avanço da ignição.

Os valores obtidos para N.O. pelos dois métodos são diferentes. Em geral os valores RON são mais elevados que os valores MON. A diferença entre os dois N.O. se chama *sensibilidade da gasolina (sensitivity)*. Ela indica como as características antidetonantes do combustível se ressentem das condições de funcionamento do motor, em particular, da temperatura da mistura e do número de rotações por minuto. Assim, por exemplo, tomando dois combustíveis de mesmo N.O. RON, terá maior facilidade para detonar em rotações elevadas do motor o combustível de sensibilidade mais elevada. Por essa razão, mesmo que os combus-

²⁰ GIACOSA, D. *Op. cit.*

tíveis se classifiquem para todos os fins comerciais pelo N.O. RON, para definir de maneira mais completa as características antidetonantes de um combustível, é necessário conhecer os dois N.O..

Na maioria dos países é usado apenas o RON, como é o caso da América Latina, com exceção do Brasil. O RON dá um valor numericamente maior que o MON em até 10 pontos. O Brasil é um dos poucos países que especifica somente MON. Portanto, o índice de octanas real de uma gasolina brasileira é aproximadamente 10 pontos maior que o de uma gasolina estrangeira de mesmo índice de octanas. A especificação mais correta seria a média entre RON e MON, como é feito nos Estados Unidos. Este número médio é chamado de AKI (*Anti Knock Index*) e é o índice normalmente indicado nos manuais de carros importados. Portanto, ao citar um valor de octanagem, deve-se especificar se é ROM, MON ou AKI.²¹

²¹ FARAH, M. A. Os Tipos e Produção de Gasolina. In: Curso Básico de Combustíveis e Asfalto, 4., 1994, Esteio. Anais. Esteio: Petrobrás – Refinaria Alberto Pasqualini, 1994. 42 p.

3.3 Número de metano (N.M.)

Em alguns combustíveis, em especial os gases como o caso do gás natural, é muito complicado o processo de medição do número de octanas, porque o N.O. desses combustíveis é superior a 100. Para tais casos, foi desenvolvido um método chamado de *número de metano (N.M.)*.

O método se resume basicamente a encontrar uma composição de metano (atribuído valor 100) e hidrogênio (atribuído valor 0) que tenha um comportamento similar à amostra do combustível a ser testado. O teste é feito em motor padrão CFR, portanto é um número RON. Nesse caso, o número de metano passa a ser o percentual de metano da mistura (N.M.).²²

²² DELAVIA, D. *Op. cit.*

Para efeito de comparação, foi determinada uma equação empírica que relaciona o N.O. MON e o N.M.

$$\text{N.O. MON} = 0,679 \times \text{N.M.} + 72,32$$

Onde:

N.M. = número de metano do gás testado

N.O. MON = número de octanas MON

(equivalente ao N.M. do gás testado).

3.4 Aditivos antidetonantes

Para aumentar a capacidade antidetonante de um combustível, pode-se adicionar sob a forma de mistura pequenas porções de aditivos antidetonantes. Durante muitos anos foram usados como aditivos antidetonantes o chumbo

tetraetila $Pb(C_2H_5)_4$, o chumbo tetrametila $Pb(CH_3)_4$ e o estanho dimetila $Sn(CH_3)_2$. Atualmente, esses aditivos são evitados por causarem grandes males ao meio ambiente.

No Brasil, a gasolina tem um percentual elevado de álcool. Como o álcool naturalmente tem um alto N.O., a mistura de álcool na gasolina, que pode chegar a 25%, provoca um aumento do N.O. da mesma, não necessitando outro aditivo antidetonante. Uma gasolina, com N.O. igual a 69, passa a ter um N.O. igual a 75 com a simples adição de 15% de álcool, e passa a ter N.O. igual a 77 com a adição de 30% de álcool.²³

Em muitos países, atualmente são usados como aditivos antidetonantes, em vez do álcool, outros compostos oxigenados como MTBE (metil tércio butil éter) ou ETBE (etil tércio butil éter) na proporção de 11% a 13%. Durante certo período, tais aditivos também foram usados em alguns estados brasileiros.²⁴ Alguns países também usam como antidetonantes compostos aromáticos, como: dimetil 1,2 etil 3 benzeno; dimetil 1,3 etil 4 benzeno; dimetil 1,3 etil 5 benzeno; dimetil 1,4 etil 2 benzeno ou ainda tetrametil 1,2,3,5 benzeno. Também esses compostos aromáticos têm limitações em seu uso devido a efeitos poluentes.²⁵

3.5 Índice de cetano

Em um motor de ignição por compressão, desde o momento em que o combustível é injetado na câmara de combustão até o momento em que se inicia a ignição, ocorre um pequeno período de tempo chamado *retardo da ignição*. Quanto maior for o retardo da ignição, maior será a quantidade de combustível que se acumula na câmara de combustão antes que comece a queima. Assim, quando se inicia a combustão, toda a massa de combustível depositada na câmara entra repentinamente em ignição. Isso causa um gradiente de pressão tão forte que produz um golpe. Pode-se dizer que, nesse caso, ocorre num motor Diesel um efeito semelhante à detonação de um motor Otto.²⁶

Um combustível Diesel é tanto melhor quanto menor o retardo da ignição que produz no motor. Nesse caso se diz que o combustível tem uma *boa facilidade de ignição*. A facilidade de ignição é função de muitas características do combustível, tais como, a temperatura de ignição, a viscosidade, o calor específico, etc. e altera-se com a variação da composição química.

Assim, como as gasolinas, o óleo Diesel é composto de destilados do petróleo de todas as séries, entretanto, os de melhor comportamento são os parafínicos, seguidos dos olefínicos, dos naftalênicos e dos aromáticos.

²³ VENANZI, D. *Contribuição à técnica do emprego do álcool etílico em motores de ciclo Otto*. 1972. 206 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 1972.

²⁴ PETROBRAS. *Gasolina: tudo o que você gostaria de saber*. Esteio: Petrobrás – Refinaria Alberto Pasqualini, 2001. 8 p.

²⁵ FARAH, M. A. *Op. cit.*

²⁶ GIACOSA, D. *Op. cit.*, p. 92-94.

Para avaliar a maior ou menor facilidade de ignição de um determinado combustível, é feita a comparação direta com um combustível de referência em um motor CFR. A medida da facilidade de ignição de um óleo Diesel é dada por um índice empírico chamado *índice de cetano* (N.C.).

Índice de cetano é um índice empírico que relaciona o combustível que está sendo usado com uma mistura de um hidrocarboneto parafínico de ótima facilidade de ignição chamado *cetano* ($C_{16}H_{35}$), ao qual foi dado o índice 100 e um hidrocarboneto de escassa facilidade de ignição, chamado *alfametilnaftaleno*, ao qual foi dado o índice zero.

O índice de cetano de um combustível é determinado por comparação, em um motor CFR, com uma mistura de cetano e alfametilnaftaleno. A percentagem de cetano nessa mistura determina o índice de cetano.²⁷

²⁷ GIACOSA, D. *Op. cit.*, p. 92-94.

3.6 Combustíveis para motores de ciclo Otto

Gasolina

O petróleo cru é mistura de um grande número de hidrocarbonetos, ou seja, compostos de hidrogênio e carbono. Contém também pequena percentagem de enxofre, oxigênio e nitrogênio e impurezas como água e areia. Os hidrocarbonetos se diferenciam uns dos outros pelo número e pela disposição dos átomos nas moléculas e se classificam em grandes famílias, de acordo com sua estrutura molecular. Temos, portanto, a série parafínica ou alifática, a série olefínica, a série naftalênica e a série aromática.

A gasolina é uma mistura de hidrocarbonetos de todas as séries, porém com peso molecular não elevado, e segundo a proporção das diversas séries, variam suas propriedades.

Álcool

A tecnicamente bem sucedida experiência brasileira com álcool produziu como combustível o etanol, mais precisamente o etanol hidratado, ou simplesmente álcool hidratado. É considerado álcool hidratado aquele cuja graduação alcoólica é inferior a 94,05 GL. Em ensaios com motores, ficou comprovado que a hidratação ideal é em torno de 6%.

A tabela 2 mostra características de diversos tipos de álcoois hidratados e anidros e gasolina, indicando, entre outras, a sua fórmula, densidade, relação estequiométrica, poder calorífico, ponto de ignição e ebulição e número de octanas. O aumento do número de octanas observado na tabela do etanol anidro para o etanol hidratado é devido à água contida no combustível. O alto calor latente de evaporação da água absor-

²⁸ SCHLOSSER, J. F. *Alcohol combustible: la experiencia de Brasil*. Madrid: Editorial Agrícola Española, 1995. 174 p.

ve calor da mistura, baixando a temperatura e dificultando a detonação, ou seja, aumentando o número de octanas.²⁸

Considerando que o número de octanas mais alto define um combustível capaz de suportar maiores taxas de compressão, e que a taxa de compressão é a única variável que influi no rendimento termodinâmico, é possível afirmar que um motor trabalhando com álcool poderá ter uma taxa maior de compressão e, conseqüentemente, maior rendimento termodinâmico. Dependendo do projeto do motor, o aumento do rendimento termodinâmico poderá compensar a perda devido ao menor poder calorífico do álcool em relação à gasolina. Um motor de ciclo Otto projetado para trabalhar com gasolina deve sofrer uma série de modificações para que possa funcionar com álcool. As principais modificações se referem à taxa de compressão, modificações diversas no sistema de alimentação de combustível, modificações na curva de avanço da ignição e proteção de todos os metais brancos do sistema de alimentação contra a corrosão provocada pelo álcool nesses metais.

Durante o programa pró-álcool, implantado no Brasil conforme plano de substituição de combustíveis fósseis por biocombustível, as modificações feitas nos motores foram apenas superficiais. Os fabricantes simplesmente adaptaram os motores existentes para funcionarem com álcool. Se tivessem projetado motores novos especificamente para uso do álcool, com taxa de compressão mais alta, com certas tais motores iriam render mais km rodados por litro de álcool do que originariamente faziam com gasolina. Como o álcool tem preço menor do que a gasolina, a vantagem financeira para o usuário teria sido muito maior do que foi.

Tabela 2: Comparação das principais características entre gasolina e álcoois.²⁹

²⁹ SCHLOSSER, J. F. *Op. cit.*

Característica	Gasolina	Etanol anidro	Etanol hidratado	Metanol anidro
Fórmula química	(CH) _x	C ₂ H ₅ OH	C ₂ H ₅ OH19H ₂ O	CH ₃ OH
Peso molecular	114	46	-	32
Densidade a 20°C	0,73	0,79	0,81	0,79
Relação ar/combustível	15,2:1	9:1	8,3:1	6,45:1
Início da ebulição	40°C	78,3°C	78,2°C	65°C
Fim da ebulição	250°C	78,3°C	78,2°C	65°C
Calor de vaporização	90kcal/kg	216kcal/kg	237kcal/kg	270kcal/kg
Calor de vaporização	337kJ/kg	904kJ/kg	992kJ/kg	1.130kJ/kg
Auto ignição	367°C	550°C	580°C	570°C
PCI kcal/kg	10.500	6.400	6.000	4.600
PCI mJ/kg	43,9	26,8	25,1	19,2
Número de octanas	73	106	110	110

Gás natural

Em princípio, qualquer combustível gasoso pode servir para motores de ciclo Otto. Em geral, poucas modificações são necessárias para esse motor funcionar com um combustível gasoso. Entretanto, no Brasil, apenas o gás natural (GNV) é homologado para servir de combustível a veículos automotores.

O gás natural é um combustível fóssil composto de hidrocarbonetos leves, basicamente o metano, que, à temperatura ambiente e pressão atmosférica, permanece no estado gasoso.

Este gás normalmente apresenta baixos teores de contaminantes, como nitrogênio e dióxido de carbono, e é praticamente isento de enxofre. Por já estar no estado gasoso, não precisa ser atomizado para queimar. Daí decorre uma combustão limpa, com reduzida emissão de poluentes e melhor rendimento térmico.

Para converter um motor de ciclo Otto para trabalhar com gás natural são necessárias apenas modificações externas ao motor. O motor modificado pode funcionar tanto com o gás natural, como com seu combustível primitivo. As modificações básicas são a instalação do cilindro de alta pressão para armazenar o gás, com seus dispositivos de segurança, conforme regulamenta a NBR 11353, intitulada: Veículos rodoviários convertidos para uso de gás metano veicular. Tais dispositivos são: válvula redutora e reguladora de pressão; válvula de abastecimento e injetor/misturador de gás. É muito importante a instalação de um sistema de gerenciamento eletrônico da injeção do gás, semelhante ao utilizado para a injeção de gasolina. Hoje, no Brasil, por questões econômicas, a maioria dos conjuntos de conversão instalados em veículos com injeção eletrônica de combustível não dispõe desse dispositivo, utilizando-se então um simulador de bicos e sonda *lambda* para “enganar” a central eletrônica do automóvel. Assim, o motor passa a ser carburado, em vez de injetado, diminuindo o rendimento e aumentando drasticamente os níveis de poluição. Por isso se dá preferência à montagem destes conjuntos de conversão em motores convencionais dotados de carburador. Também no caso do gás natural, será necessário desenvolver motores dedicados para trabalhar com este gás. Os motores devem ter alta taxa de compressão, próxima dos motores Diesel, e injeção eletrônica de gás, além de um rendimento muito superior ao das adaptações que hoje estão sendo feitas.

3.7 Combustíveis para motores de ciclo Diesel

Um motor Diesel, em princípio, dependendo de suas características, pode queimar uma variedade muito grande de combustíveis, desde óleos leves como querosene até óleos pesados como *fuel oil*, incluindo óleos vegetais de diversas espécies. O óleo Diesel é constituído de um grande número de hidrocarbonetos, os quais têm ponto de evaporação entre 180°C e 360°C. Pode ser obtido por destilação fracionada do petróleo cru ou por *cracking* (quebra das moléculas) de óleos pesados pela aplicação de calor, pressão e utilização de catalisadores.³⁰

³⁰ RIESEMBERG, *et alii*. *Diesel Fuel Injection*. Stuttgart: Robert Bosch, 1994. 201 p. Rieseberg.

Para que um combustível possa ser utilizado como combustível de motores Diesel, é necessário que cumpra alguns requisitos básicos: 1. facilitar a ignição por compressão (alto índice de cetano); 2. lubrificar a bomba injetora (viscosidade adequada); 3. gerar uma alta quantidade de calor na sua combustão (poder calorífico elevado); 4. ter baixo índice de contaminantes sólidos e baixo índice de contaminantes líquidos ou solúveis, em especial compostos de enxofre para evitar a corrosão.

4 Gerenciamento eletrônico de motores

Os motores modernos são eletronicamente gerenciados através da tecnologia de microprocessadores; assim se obtém um perfeito controle da combustão e otimização do rendimento, com injeção de combustível e/ou ignição eletrônica. Dispõem ainda de um microprocessador de alta velocidade, capaz de repetir operações matemáticas complexas, como integrações e derivadas, analisar os resultados e tomar decisões de correção para cada ciclo de combustão, individualmente para cada um dos cilindros. Em altas rotações, chegam a ser efetuados milhares de ciclos de cálculos e correções por segundo.³¹

³¹ CAMARGO, M. N. Computador no comando. *Cultivar Máquinas*, Pelotas, ano III, n. 31, jun. 2004, p. 24-28.

Nos motores de ciclo Otto, assim como nos motores de ciclo Diesel, o sistema de alimentação de combustível é pressurizado. Nos primeiros, o combustível é submetido a uma pressão da ordem de 0,3 MPa (3 bar), podendo variar para mais ou para menos, dependendo do fabricante; nos motores de ciclo Diesel, a pressão é superior a 20 MPa (200 bar). Nos motores de ciclo Otto, existem bicos comandados pela central eletrônica que injetam combustível no coletor de admissão, próximo à válvula do cilindro correspondente. Nos motores Diesel, os bicos injetores são eletronicamente comandados e injetam combustível dentro da câmara de combustão. A quantidade de combustível injetado depende do tempo de abertura do bico injetor.

Nos motores de ciclo Otto, existe um sensor que mede a massa de ar que está entrando no cilindro enquanto a central eletrônica calcula o tempo de abertura do bico para que a quantidade de combustível injetada complete com o ar uma mistura próxima da estequiométrica, com relação *lambda* adequada às condições instantâneas de funcionamento do motor. O instante exato de abertura do bico correspondente é determinado também pela central eletrônica. Há ainda um sensor de posição e de rotação do motor, chamado de *roda fônica*, que indica para a central a posição angular do virabrequim a cada instante, determinando assim o momento preciso de cada ação. A ignição é gerenciada pela central eletrônica, que determina o momento exato da centelha de cada vela, fazendo, eletronicamente, todas as compensações e avanços necessários.

Um sensor analisa os gases da combustão, chamado *sonda lambda*, determinando a relação *lambda* de cada ciclo de combustão. Existem ainda outros sensores de temperatura da água, do óleo, do bloco do motor e do ar ambiente, sensores de pressão, além de um sensor de detonação, que detecta a batida provocada por pré-ignição ou detonação.

Para cada ciclo de combustão, em cada cilindro, a central eletrônica coleta todas as informações dos sensores, calcula a quantidade real de ar que está sendo admitida, determina a quantidade correta de gasolina e dispara o sistema de ignição no momento exato. Durante a combustão, a central eletrônica detecta eventual detonação e faz as correções necessárias para o próximo ciclo. Imediatamente após a combustão, os gases residuais são coletados e analisados pela sonda *lambda*, quanto ao teor de oxigênio, determinando assim se a mistura de ar e combustível estava correta. Em função dessa análise, também são feitas correções necessárias para o próximo ciclo.

Todos esses cálculos e correções permitem obter o melhor rendimento do motor com o combustível para o qual ele foi projetado.

Entre as diversas funções que a central eletrônica executa, uma das mais importantes é o ajuste automático do ângulo de avanço da ignição. Esse ângulo é limitado através do sensor de detonação que, ao perceber o início da detonação, indica à central eletrônica que o ângulo de avanço deve ser um pouco reduzido para cessar a detonação.

Motores são por inerência não-lineares, variando suas características com a temperatura ambiente, velocidade de operação e potência de saída. Os sistemas são discretos, variáveis com o tempo, nos quais o início da injeção de

³² CONRAD, E. & KARRAY, F. Design of intelligent controllers for electronic speed regulation of a Diesel engine. In: *First International Conference on Knowledge-based Intelligent Electronic Systems*. Adelaide, mai. 1997. p. 607-616.

combustível e a definição do tempo de injeção dependem da velocidade do motor que, por sua vez, depende da quantidade de combustível injetada durante a largura de pulso de tempo, iniciada após o começo do processo de injeção.³²

É muito difícil a obtenção de um modelo matemático preciso para sistemas reais com elevado grau de complexidade como um motor de combustão interna, mesmo com recurso sofisticado aliado à matemática avançada. Para facilitar o gerenciamento eletrônico, é feito o mapeamento das funções a serem controladas em função da carga e da rotação, e o mapa tridimensional assim obtido é armazenado em uma memória tipo *eprom*. Durante o funcionamento, a cada instante o processador busca no mapa os valores adequados para cada função a ser controlada.

O principal componente do gerenciamento eletrônico de um motor é, sem dúvida, a central eletrônica. Esta consiste de um poderoso micro processador capaz de receber todas as informações emitidas pelos muitos sensores instalados no motor, tomar as decisões, com base em um mapeamento do funcionamento correto, e acionar atuadores, que corrigem ou executam uma tarefa específica para manter o motor funcionando na condição ideal a cada instante.

A central eletrônica gerencia o motor como se cada cilindro fosse um motor independente e sem influência sobre os outros, e todos os cálculos, ações e correções são repetidos a cada ciclo de funcionamento do motor (figura 7).

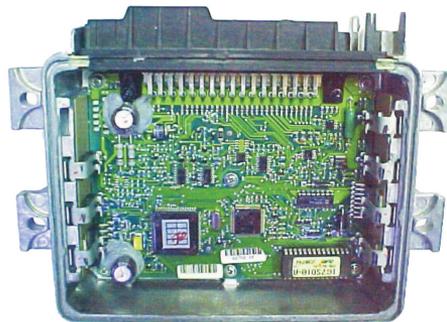


Figura 7: Central de gerenciamento eletrônico microprocessado.³³

³³ CAMARGO, M. N. Computador no comando. *Op. cit.*, p. 24-28.

Entre as funções básicas a serem controladas pela central eletrônica, duas são muito importantes: a dosagem de combustível e o instante do início da ignição.

Para que a central eletrônica possa executar as funções de comandar a dosagem de combustível e a ignição, são necessárias muitas informações fornecidas por diversos sensores e podem ser organizadas por grupos de funções afins.

O primeiro gera duas informações necessárias: a posição angular do motor em relação aos 720° de um ciclo completo e, ao mesmo tempo, o regime de rotação do motor a cada instante (rpm instantânea). Essas duas informações são obtidas a partir de um disco dentado, chamado de *roda fônica*, que gira solidário com o eixo de comando de válvulas (figura 8).

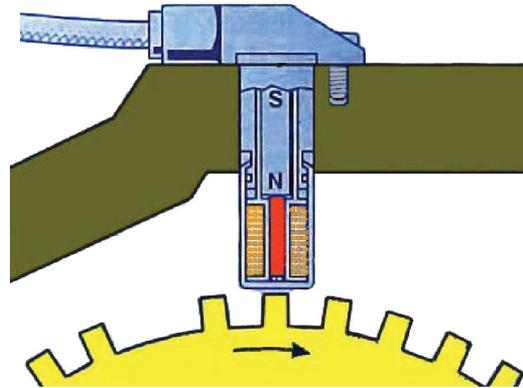


Figura 8: Sensor de posição angular e rotação.³⁴

³⁴ CAMARGO, M. N. Computador no comando. *Op. cit.*, p. 24-28.

No disco referido há falta de dois dentes que determinam o ângulo zero para o primeiro cilindro. Um sensor de proximidade, fixo na carcaça do motor, percebe quando um dente do disco passa pelo mesmo e emite um pulso elétrico para a central eletrônica. A central detecta a rotação medindo a frequência dos pulsos e detecta o ângulo zero pela falta de dois pulsos. O ângulo instantâneo é definido pela contagem dos pulsos a partir do ângulo zero. A roda dentada (roda fônica) tem 58 dentes e duas falhas, ou seja, 60 divisões. Isso significa que cada pulso corresponde a $1/60$ de uma rotação, ou seja, $360/60^\circ = 6^\circ$. Então, cada pulso corresponde a 6 graus de giro da roda fônica.

Outro grupo de sensores define as condições do ar admitido. Consiste de um sensor de quantidade de ar admitido a cada instante e de sensores de temperatura e pressão atmosférica deste ar, além de um sensor de posição da borboleta do acelerador no caso de motores de ciclo Otto. Existem diversos tipos de sensores de quantidade de ar admitida pelo motor. Os mais comuns são: os medidores de fluxo de ar, que medem o volume de ar aspirado pela deflexão de uma válvula borboleta que reage contra a pressão de uma mola; e o medidor de massa de ar a fio quente. Neste último, o fluxo de ar passa através de uma tubulação onde existe um fio eletricamente aquecido, o qual é esfriado pelo fluxo de ar que está passando. Medindo-se a temperatura e a

corrente elétrica necessária para manter o fio aquecido, pode-se determinar a massa de ar que está passando pela tubulação por unidade de tempo. Em ambos os casos, são necessárias muitas correções, em função da temperatura do ar que está sendo admitido e sua pressão atmosférica.

Outro grupo de sensores, formado pela sonda *lambda* e pelo sensor de detonação, serve para corrigir as ações comandadas pela central eletrônica para o próximo ciclo do cilindro correspondente.

Para determinar a carga à qual o motor está submetido, a central eletrônica considera a relação entre a posição da borboleta do acelerador, a massa de ar admitida e a rotação instantânea do motor.

Após efetuar os cálculos, pré-definidos no programa do microprocessador, com base nas informações recebidas dos sensores, ficam determinadas: a rotação instantânea do motor, a massa de ar admitida e, conseqüentemente, a carga à qual o motor está submetido. Resta à central eletrônica definir a massa de gasolina a ser pulverizada no ar que está sendo admitido para formar a mistura e determinar o instante exato em que deve ser formada a centelha elétrica que irá dar início à combustão. No caso de motores Diesel, a central eletrônica irá determinar o momento de início da injeção de combustível e a duração dessa injeção.

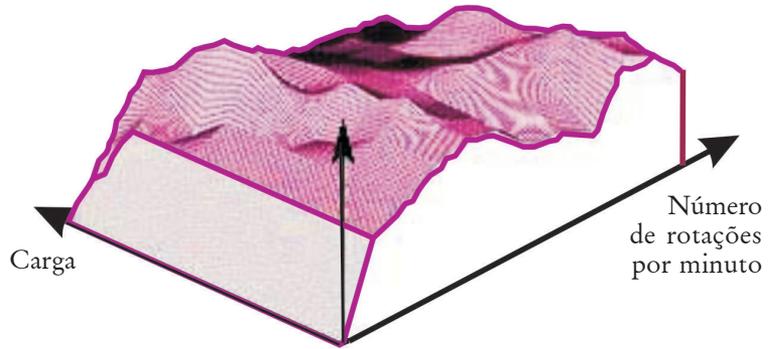
Como o motor, na realidade, não trabalha com a mistura estequiométrica e sim com um valor da relação *lambda* diferente de 1 e variável a cada instante, dependendo do regime de rotação, da carga à qual o motor está submetido, da temperatura do motor, e até da pressão atmosférica, torna-se difícil calcular a cada instante a massa de combustível a ser injetado. Para facilitar, é feito um mapeamento do motor onde fica determinada, em função da rotação e da carga, qual a relação *lambda* adequada. O mapeamento é feito experimentalmente e fica armazenado na memória da central eletrônica. São tantos os fatores que influem na determinação da relação *lambda*, que o mapa tridimensional obtido tem a forma de uma cadeia de montanhas (figura 9). Vê-se que só é possível obter esse mapeamento por método experimental.

A técnica de mapeamento dos sinais de entrada e saída é tradicionalmente usada para fazer o controle da injeção em motores de combustão interna.³⁵ O mapeamento consiste no seguinte:

1. O motor é previamente ensaiado e levantam-se tabelas e curvas para registrar os pontos ótimos de funcionamento, para cada condição de entrada.

³⁵ RAMOS, D. B. *Controlador nebuloso para motores de ignição por compressão operando com gás natural e óleo Diesel*. 2006. 123 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Santa Maria, 2006.

2. Os dados são armazenados, na forma de mapas, na memória de uma CPU, que faz o processamento matemático requerido para gerenciar eletronicamente o motor. Assim, diz-se que o motor foi *mapeado*.



³⁶ BOSCH, R. *Op. cit.*

Figura 9: Mapeamento da relação λ .³⁶

Com o motor em funcionamento, os sinais provenientes dos sensores conectados ao motor são processados e cruzados com os mapas de memória. Os dados de entrada e saída são processados e comparados, através de interpolações matemáticas, com os valores previamente levantados e armazenados na memória da CPU. Os valores de saída desses mapas são determinantes para as ações de controle a serem tomadas pelos atuadores existentes no motor. Assim, resta à central eletrônica, tendo já calculado a massa de ar, a carga à qual o motor está submetido e a rotação instantânea, encontrar no mapa da memória qual o valor adequado de λ e, então, determinar a massa de combustível.

O bico injetor de combustível fica situado no coletor de admissão bastante próximo da válvula de admissão. Este bico injetor (que não deve ser confundido com bico injetor de motor Diesel) tem uma vazão determinada por unidade de tempo que permanece aberta. Então, basta controlar o tempo de abertura para se ter o controle sobre quantidade de combustível injetado. Portanto, a central eletrônica apenas controla o tempo de injeção.

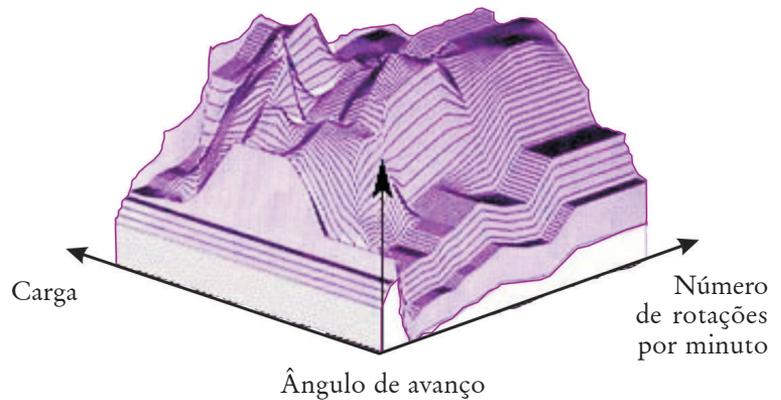
Da mesma forma, também é difícil determinar com exatidão o momento em que se deve dar a ignição, devido aos inúmeros fatores que afetam o ponto de ignição.

Entende-se que a mistura ar e combustível dentro da câmara de combustão não sofre uma queima instantânea, o que provocaria uma detonação prejudicial ao motor. A quei-

ma é progressiva, apesar de muito rápida e leva um tempo para se propagar por toda a mistura. Então é necessário que a combustão inicie um pouco antes de o pistão chegar ao ponto morto superior, ou seja, a ignição ocorre com um determinado ângulo de antecipação. Este ângulo é chamado de *ângulo de avanço da ignição*, definido de tal forma que o aumento da pressão dos gases, resultante da combustão, ocorra logo após o ponto morto superior, quando o pistão já iniciou o ciclo de descida, convertendo a pressão em torque no virabrequim. Se o motor estiver funcionando em rotação elevada, é natural que tal ângulo seja aumentado para que o ponto de máxima pressão se dê sempre logo após a ultrapassagem do ponto morto superior. Portanto, o ângulo de avanço da ignição deve ser variável com a rotação.

Em um motor antigo de ciclo Otto, sem gerenciamento eletrônico, a variação do ângulo de avanço, em função da rotação, era realizada por um sistema mecânico constituído de contrapesos centrífugos, chamado de *avanço centrífugo da ignição*. Nos motores Diesel com bomba injetora convencional, o avanço do ponto de injeção também é feito por contrapesos que geram uma força centrífuga. Por outro lado, para aumentar o torque do motor em baixas rotações sob carga, também deve ser aumentado o ângulo de avanço da ignição. Nos antigos motores Otto, sem gerenciamento eletrônico, o aumento do ângulo de avanço em função da carga era efetuado por um sistema pneumático em que o vácuo formado em um determinado ponto do venturi do carburador acionava um diafragma, que, por sua vez, produzia a antecipação do ponto de ignição. Era o chamado *avanço a vácuo*. Como se pode ver, o sistema antigo, além de ter uma grande complexidade mecânica, não oferecia precisão.

Em um motor com gerenciamento eletrônico, é feito um mapeamento tridimensional, por métodos experimentais, determinando-se com precisão o ângulo de avanço de ignição ou de injeção (no caso de motores Diesel) correto em função da rotação e da carga à qual o motor está submetido a cada instante. Esse mapeamento, assim como o mapeamento da relação *lambda*, apresenta o aspecto de uma cadeia de montanhas, tal é a sua complexidade (figura 10). O mapeamento também fica armazenado na memória do microprocessador, como no caso da relação *lambda*. Então basta terem sido determinadas a rotação do motor e a carga aplicada, para a central eletrônica encontrar o momento exato da ignição. Os cálculos são repetidos para cada cilindro e para cada ciclo de funcionamento de cada cilindro.



³⁷ BOSCH, R. *Op. cit.*

Figura 10: Mapeamento do ângulo de avanço da ignição.³⁷

Entretanto, apesar de todos os cálculos feitos, tanto o ângulo de avanço da ignição como a quantidade de combustível injetada podem ainda não estar totalmente corretos. Se, por exemplo, a câmara de combustão estiver muito aquecida, a combustão é facilitada e pode haver pré-ignição, que leva à detonação. Esta é a queima instantânea de toda ou de parte da mistura de ar e combustível, causando uma espécie de explosão dentro do motor. O fato causa acréscimos excessivos de pressão que podem danificar o motor, provocando um desgaste prematuro e até a ruptura de componentes internos como bielas, virabrequim e pistões, portanto deve ser evitado. A detonação produz um ruído característico, como se fosse uma batida seca. O sensor de detonação detecta o ruído e informa a central eletrônica através de um pulso elétrico. A central eletrônica, ao receber esta informação, reduz o ângulo de avanço da ignição já para o próximo ciclo do cilindro. A redução do ângulo de avanço da ignição dificulta a ocorrência de detonação, pois atrasa um pouco o ponto de ignição.

A sonda *lambda* é um sensor que determina a quantidade de oxigênio livre nos gases de escapamento, e conseqüentemente a relação *lambda*. Imediatamente após a combustão, a sonda *lambda* analisa os gases expelidos e informa através de um sinal elétrico qual o teor de oxigênio livre. Com essa informação, a central eletrônica revisa o cálculo feito para determinar a massa de combustível em função do valor *lambda* mapeado e o corrige já para o próximo ciclo do cilindro respectivo.

O uso somente do mapeamento limita as condições de operação do motor às situações previstas nos ensaios. A adaptabilidade é restringida e pode haver perda da capacidade de antever situações adversas, como o desgaste gradual dos diversos componentes do motor. Os principais fabricantes de centrais de injeção eletrônica recorrem hoje a uma técnica mista que aplica o mapeamento, porém é dotado de um sistema inteligente que corrige as distorções e inclusive reconhece e se adapta ao modo de dirigir do motorista.

Os modernos veículos eletronicamente gerenciados agregam muitas outras funções, entre as quais o gerenciamento do sistema de frenagem ABS, o sistema de gerenciamento de tração, a abertura e o fechamento de vidros e portas, o sistema de segurança contra furtos, o sistema de piloto automático (controle automático da aceleração), o sistema de gerenciamento da estabilidade espacial do veículo (empregado no Mercedes Classe A), o sistema de navegação por GPS, e outras tantas funções que dia a dia estão sendo implementadas.

Nos motores de ignição por compressão (Diesel), o sistema de gerenciamento eletrônico segue as mesmas regras do gerenciamento de motores Otto, porém mais simples, com menos funções. Há no mercado os chamados motores Diesel eletrônicos, que não são motores de injeção eletrônica; utilizam uma bomba e bicos injetores mecânicos gerenciados eletronicamente, através de reguladores eletrônicos digitais.

Os motores Diesel com injeção eletrônica de combustíveis possuem uma bomba de alimentação que mantém pressurizado um tubo principal chamado de *common rail*, do qual partem tubulações que levam o combustível para um bico que injeta combustível diretamente dentro da câmara de combustão. Esse bico tem função simultânea de bomba (eleva a pressão até a necessária para promover a pulverização do combustível) e de bico pulverizador, sendo acionado por uma bobina elétrica e muitas vezes auxiliado por ar comprimido ou óleo sob pressão.

Os sistemas eletrônicos de gerenciamento possuem uma resposta transitória rápida, bastante linear, mas são projetados pelos fabricantes para gerenciar apenas o débito de combustível Diesel. Esses equipamentos não são dedicados ao gerenciamento quando o motor utiliza outros combustíveis ou quando opera no regime bicomcombustível.

5 Motores multicomcombustíveis

Diversos fabricantes automotivos nacionais oferecem hoje veículos equipados com motores multicomcombustível. Tais motores oferecem como grande vantagem a possibilidade de funcionar com gasolina, com álcool ou com uma mistura destes combustíveis em qualquer proporção. Essa nova tecnologia não altera significativamente o motor. A principal modificação é no programa de gerenciamento eletrônico, que consegue adequar o motor a dois combustíveis com características diferentes. A tecnologia dos motores multicomcombustível só é aplicada em motores de ciclo Otto.

Os engenheiros que desenvolveram esse tipo de motor partiram de dois princípios básicos. Primeiro, adotaram para o motor uma taxa de compressão intermediária entre a taxa requerida para a gasolina e a taxa requerida para o álcool. Esta simples modificação faz com que o motor não funcione, ou funcione mal tanto com álcool como com gasolina.

Para resolver o problema utilizaram-se do sensor de detonação, isto é, modificaram a programação do microprocessador da central eletrônica, de tal forma que o motor sempre tenta funcionar com o maior ângulo de avanço possível, e o sensor de detonação fica sempre detectando qualquer sinal de detonação e comandando a central eletrônica para reduzir um pouco esse ângulo. Assim está sempre limitando o ângulo de avanço da ignição. Dessa forma, o motor consegue trabalhar sempre próximo ao limite da detonação, independentemente do combustível empregado, álcool, gasolina, ou mistura dos dois. Portanto, o motor poderá trabalhar com um ângulo de avanço de ignição que não seria o ângulo ideal se o motor fosse convencional, mas que é o melhor possível para o combustível na taxa de compressão alterada desse motor. Dependendo do combustível que está sendo queimado no momento, o motor poderá estar muito adiantado ou muito atrasado. O ângulo de avanço só será correto para uma mistura de álcool e gasolina tal, que a taxa de compressão adequada a essa mistura coincida com a taxa de compressão do motor. Para melhorar as condições de funcionamento desses motores em alguns regimes de rotações e para determinadas proporções de mistura de ar e combustível, a central eletrônica enriquece a mistura, injetando mais combustível do que o necessário para obter a relação estequiométrica, ocasionando um consumo maior de combustível.

Esse motor apresenta a grande vantagem de poder trabalhar com qualquer combustível, porém, toda vantagem tem seu custo. Como a ignição se dá geralmente fora do ponto ideal (o ângulo de ignição foi alterado para compensar a taxa de compressão inadequada para o combustível que está sendo consumido), o motor não trabalha com máximo rendimento para qualquer proporção de gasolina e álcool, mas apenas para uma determinada proporção adequada à taxa de compressão do motor. Trabalhando com gasolina, deverá ter um rendimento um pouco menor do que se fosse projetado para trabalhar exclusivamente com gasolina; da mesma forma, quando trabalha com álcool, o rendimento é menor do que um motor que fosse projetado para trabalhar exclusivamente com álcool. O ponto ótimo deste motor ocorre para uma mistura álcool e gasolina cuja proporção só poderá ser definida sabendo-se com exatidão a taxa de compressão de projeto do motor. Essa taxa é definida pelo fabricante e é específica para cada modelo.

A solução encontrada com os motores multicomcombustível não deixa de ser inteligente, porém não passa de uma adaptação de baixo custo sobre um motor já existente. Existem outras soluções mais corretas, que permitem a um motor funcionar com máximo rendimento com qualquer combustível, porém com custo de desenvolvimento muito elevado. Como exemplo, citam-se os motores com taxa de compressão variável. A taxa de compressão seria ajustada para o valor ideal conforme o combustível em uso, de modo a se obter sempre o máximo rendimento. Conjugando um sistema de gerenciamento eletrônico adequado e um sistema de válvulas eletronicamente comandadas, talvez os motores futuros possam ter o dobro do rendimento dos atuais. As inovações já são tecnicamente acessíveis, entretanto há resistência dos fabricantes a tais modificações, porque seriam necessários motores inteiramente novos, cujos custos de desenvolvimento representam milhões de dólares. A grande maioria dos atuais motores é constituída por aqueles que evoluíram graças a modificações sucessivas aplicadas em antigos motores, alguns cujo projeto original já ultrapassou mais de meio século.

6 Motores bicombustíveis

São bicombustíveis todos aqueles motores que trabalham simultaneamente com dois combustíveis. Os mais comuns têm como combustível-base o óleo Diesel, ou seja, são motores de ciclo Diesel. O óleo Diesel continua sendo

usado normalmente, porém apenas como combustível piloto, para proporcionar a ignição por compressão, dando início à combustão do combustível principal (gás ou líquido vaporizado), que é admitido no cilindro pelo coletor de admissão, semelhante à alimentação de um motor de ciclo Otto. Os motores bicomcombustíveis Diesel e gás natural apresentam aumento de potência e redução do consumo, podendo ser utilizados como alternativa ecológica e econômica no transporte urbano.³⁸

³⁸ CAMARGO, M. N. *Estudo do comportamento de um motor de ignição por compressão, trabalhando com óleo Diesel e gás natural*. 2003. 280 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Santa Maria, 2003.

7 Conclusões

Muitas tecnologias novas estão surgindo para tentar substituir os motores alternativos de combustão interna por outras fontes de energia mecânica mais eficientes.

Pesquisam-se, hoje, veículos híbridos, nos quais um motor de combustão interna trabalhando em regime de máxima eficiência aciona um gerador elétrico que produz energia para acionar motores elétricos nas rodas. Um banco de baterias armazena a energia excedente quando o veículo roda em terreno plano ou ladeira, para ser usada quando as condições do terreno exigem maior potência do veículo. Outra solução é o emprego de células de combustível, em que este – preferencialmente hidrogênio – reage com o oxigênio liberando energia elétrica. Nesse caso também deve haver um banco de baterias para armazenar temporariamente a energia gerada e suprir a demanda nos momentos de pico de consumo. Investigam-se, também, veículos elétricos, nos quais as baterias são carregadas diretamente da rede elétrica doméstica.

Todas essas soluções, ainda em estudos, dependem essencialmente do desenvolvimento de baterias mais eficientes. Em todos os casos deve-se ter o cuidado de não trocar o endereço da poluição; por exemplo, um veículo elétrico não polui, entretanto, se a energia elétrica que irá mover o veículo for gerada em uma usina termoeletrica, a poluição continua ocorrendo, em outro local.

De qualquer forma, o motor alternativo de combustão interna ainda irá imperar nos meios de transporte por muitos anos. Portanto, é preciso melhorar seu rendimento e reduzir as emissões para diminuir os danos que tais motores causam à natureza.

Miguel Neves Camargo é graduado em Engenharia Mecânica, especialista em Engenharia Automotiva, doutor em Engenharia Agrícola e professor do curso de Engenharia Mecânica da Faculdade Horizontina (FAHOR), Rio Grande do Sul. mnevesc@brturbo.com.br