

## Aula 5 - Motores de combustão interna – Parte I

Motores de combustão interna são o tema das aulas 5 a 7, sendo divididos em três partes: I) Introdução e princípios de funcionamento; II) Órgãos fundamentais; e III) Sistemas complementares (sistema de alimentação, de arrefecimento, de lubrificação, elétrico e de exaustão).

### Parte I - Introdução

Começemos com a pergunta: O que é um motor?

Um motor é um dispositivo que converte outras formas de energia em energia mecânica, de forma a realizar trabalho, por exemplo: impelir movimento a uma máquina ou veículo.

O termo motor, no contexto da fisiologia, pode se referir aos músculos e a habilidade de movimento muscular, como em Coordenação Motora.

Animais de tração e o próprio corpo humano são motores, pois transformam a energia química contida nos alimentos em trabalho, além da manutenção do metabolismo basal do organismo.

No trecho a seguir, Debeir, Deléage e Hémerly (1993), comentam sobre a consideração dos escravos como ferramentas falantes durante o Império Romano, pela sua função de conversor biológico.

*“O segundo motor do sistema energético romano deve ser analisado essencialmente em termos de relações sociais: trata-se da exploração, em uma escala jamais igualada, da força motriz de centenas de milhares de escravos. P.A. Brunt avalia seu número, no ano de 28 e na Itália, em cerca de três milhões, para quatro milhões de homens livres, embora não tivessem sido mais que seiscentos mil dois séculos antes. Embora a função dos escravos não pudesse, em geral, ser reduzida à produção de energia motriz, seu no estatuto jurídico na agricultura – instrumentum vocale – situa-os exatamente no prolongamento da ferramenta – instrumentum mutum – e do animal – instrumentum semivocale. “Os instrumentos são dotados da palavra, semifalantes ou mudos. À categoria dotada da palavra pertencem os escravos, à semifalante os bois, à muda as carroças” escreve Varron em seu tratado de agronomia . Esta definição do escravo exprime a racionalidade econômica na qual se situa o trabalho servil, que reduz o escravo a sua função única de conversor biológico”.*

A constituição dos motores de combustão interna se dá de forma análoga ao motor biológico, onde temos uma estrutura hierárquica para o funcionamento, partindo de células, que formam tecidos, que constituem os órgãos, que formam os sistemas, que juntos formam e mantêm o corpo (Figura 1).

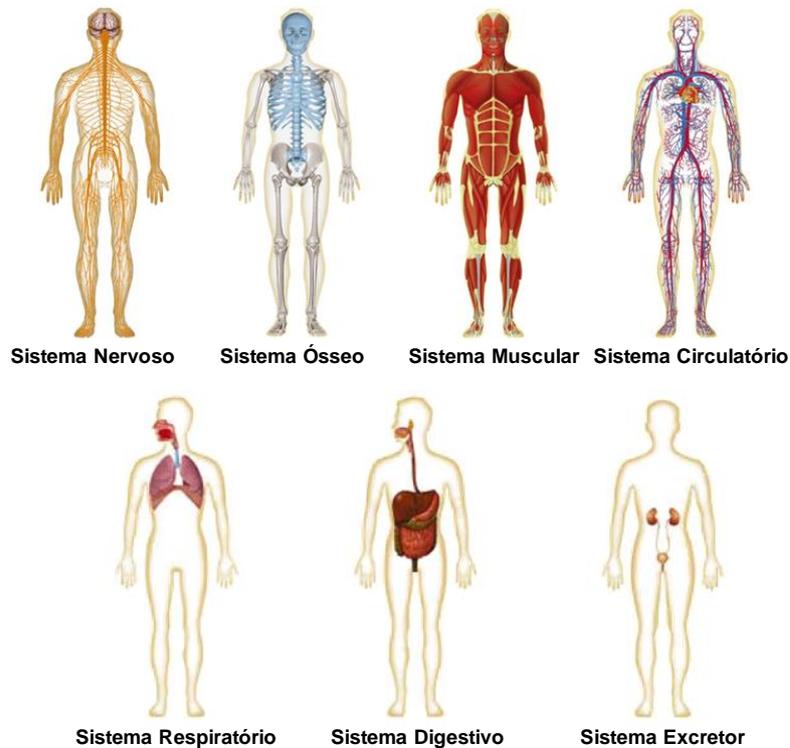


Figura 1 – Exemplos de sistemas componentes do corpo humano.

Para que a transformação da energia química em trabalho no motor biológico ocorra, é necessário que a assimilação da energia deles após processos metabólicos, que demandam nutrientes, e façam uso da energia química para que os músculos reajam aos estímulos. Com a respiração é possível liberar essa energia.



Isso ocorre analogamente, em motores de combustão interna (Figura 2).

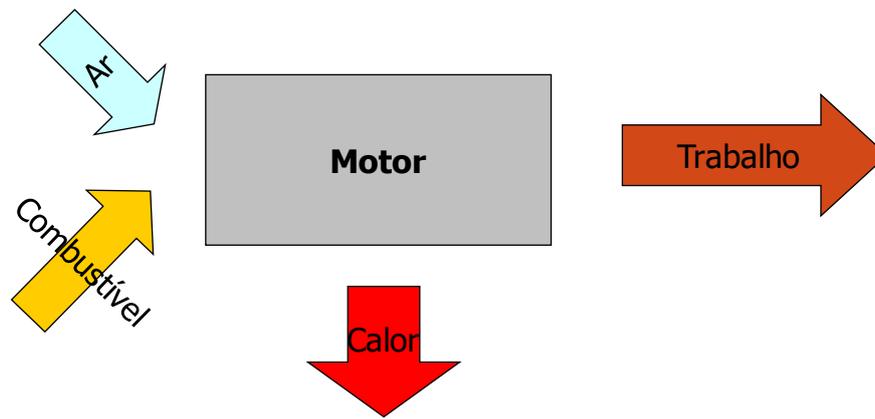


Figura 2 - Esquema dos insumos demandados e de produtos obtidos num motor de combustão interna.

Como já visto na aula X ou capítulo Y, o trator tem como função tracionar e acionar. O acionamento pode ser mecânico (TDP), hidráulico (sistema hidráulico) ou ainda para obtenção de eletricidade (aciona mecanicamente um gerador que por sua vez aciona motores elétricos). Porém, a fonte primária de potência do trator é o motor de combustão interna. Que, por meio de sistemas de transmissão (aula 8) transmitem a potência nele obtida para rodado, barra de tração, TDP e sistema hidráulico; além do acionamento de diversos sistemas complementares (aula 7).

Já vimos o que é um motor. Então a pergunta seguinte é: O que é combustão?

Combustão ou queima é uma reação química exotérmica entre uma substância (o combustível) e um gás (o comburente), geralmente o oxigênio, para liberar calor.

Devemos lembrar que, muitas vezes, quando ouvimos o termo combustível pensamos em gasolina, etanol e diesel. Porém, lenha, carvão vegetal, carvão mineral, bagaço de cana-de-açúcar também o são, pois são passíveis de sofrer combustão, que é o que define o termo combustível. A lembrança dos combustíveis líquidos se deve ao fato de serem os mais aplicados à finalidade de transporte e mais comumente usados pela maior parte da população.

Outro termo muito importante para o tema desse capítulo é potência. Assim, o que é potência?

Se pensarem na capacidade de realizar trabalho, acertaram parcialmente, pois na realidade potência é a capacidade de transmitir energia por tempo. A transmissão de energia pode ser por realização de trabalho e/ou transmissão de calor.

Por exemplo, chuveiro tem potência (ex.: 3000 W) e não realiza trabalho, já que a água cai por gravidade, sendo que toda energia transmitida num dado tempo por ele ( $3000 \text{ J/s} = 3000 \text{ W}$ ), é destinada a transmitir calor.

Um carro de fórmula 1 com 850 CV de potência (625 kW) tem a mesma capacidade de realizar trabalho que um automóvel popular com motor 1.0 L de 80 CV (59 kW)?

A resposta é sim. Pensemos na realização de trabalho como uma viagem entre São Paulo e o Rio de Janeiro. Ambos têm condição de realiza-la! O que difere é que o fórmula um, por ter mais potência, tem a capacidade de executá-la num tempo menor que o carro 1.0 L. Como vimos, potência é a capacidade de transmitir energia por tempo.

A unidade do Sistema Internacional que mede potência é o watt (W), sendo a relação da energia ou trabalho (J – joule) por tempo (s). Em sistemas elétricos a medição de energia se dá em Wh, por mera praticidade, pois o produto de W (J/s) por h (3600 s) resulta em 3,6 kJ.

Uma unidade muito usada no cotidiano e comercialmente para potência do motor é o CV (cavalo ou cavalo-vapor). Ela é oriunda de um experimento realizado com uma massa (75 kg) atrelada a um cavalo, por meio de uma roldana, que a erguem a 1 m de altura em 1 s (Figura 3). Assim, um motor de 100 CV (73,6 kW) teria a capacidade de erguer 7500 kg a 1 m de altura em 1 s; ou erguer 75 kg a 100 m de altura em 1 s; ou ainda, erguer 75 kg a 1 m de altura em 0,01 s

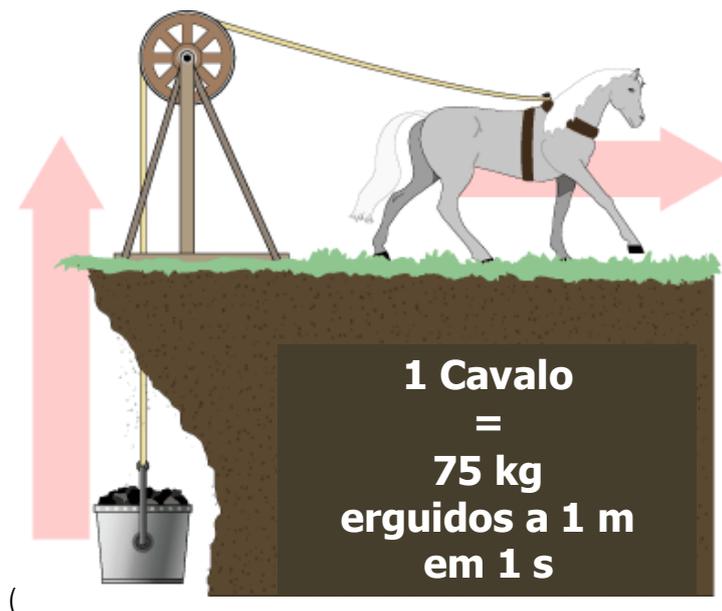


Figura 3 - Esquema da origem da unidade cavalo para determinar potência.

Embora tenhamos a noção que sabemos o que é energia, é difícil de encontrar uma definição. Então, adotaremos que energia é a capacidade de causar alteração, seja no posicionamento geográfico (trabalho) ou por agitação de moléculas (calor).

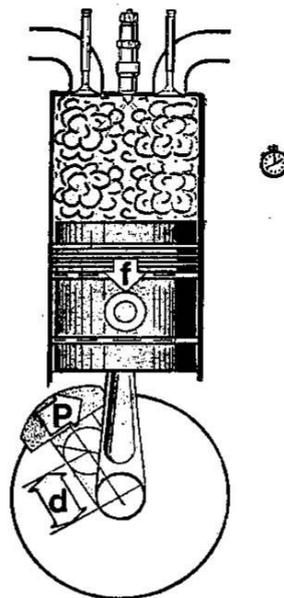
Trabalho é uma das formas de transmissão de energia e é o produto da Força (N) e do deslocamento (m). Força (N), por sua vez, é o produto da massa (kg) x aceleração ( $\Delta v/\Delta t$ ). Logo Força altera a velocidade de um corpo. Então, uma massa que tenha sua velocidade alterada num dado deslocamento, sofreu ação de trabalho.

Um elevador que nos desloque alguns andares para cima, um automóvel que desloque os passageiros entre dois pontos distintos, uma prensa que estampe uma forma numa chapa de aço são exemplos de realização de trabalho e conseqüentemente de deslocamento geográfico (pensando tridimensionalmente em coordenadas X, Y e Z).

A agitação de moléculas (temperatura) que é parte do processo da transmissão de energia pelo calor, não deixa de ser uma alteração da velocidade em um corpo, porém o deslocamento é cíclico por causa da órbita na qual os elétrons agitados se deslocam. No contexto da energia ser a capacidade de causar alterações, o calor pode alterar o estado de uma massa (ebulição, liquefação) bem como na estrutura da massa (cocção de alimentos).

Em um motor de combustão interna, a potência se dá pelo produto da força que o êmbolo recebe na expansão dos gases resultantes da combustão (f) com a distância perpendicular entre o eixo e a direção da força (d) dividido pelo tempo levado para o deslocamento entre o ponto morto superior (PMS) e o ponto morto inferior (PMI), Figura 4.

$$P = f \cdot d / t$$

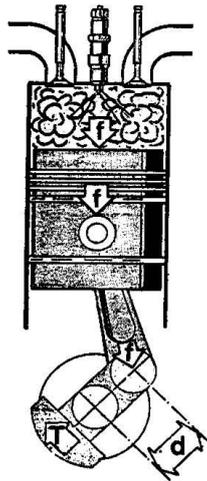


**Figura 4** – Esquema das causas da potência no motor de combustão interna.

Outra característica importante nos motores é o torque. Mas o que é torque?

Torque é definido a partir da componente perpendicular ao eixo de rotação da força aplicada sobre um objeto que é efetivamente utilizada para fazê-lo girar em torno de um ponto central ou eixo. A distância do ponto pivô ao ponto onde atua uma força  $f$  é chamada braço do momento ( $d$ ), que também é um vetor (**Figura 5**).

Torque está sempre vinculado a movimento circular e também pode ser determinado como o produto da força com o deslocamento, porém sempre circular



**Figura 5** – Esquema das causas do torque no motor de combustão interna.

Ambos os termos trabalho e torque são determinados por força vezes deslocamento, porém trabalho faz uso da unidade joule enquanto torque é normalmente expressado em N m, que essencialmente é o mesmo que J.

Se Trabalho = Força x Deslocamento

$$J = N \times m$$

E em deslocamento circular distância =  $2\pi \times r$

Substituindo temos Torque = Força x raio x  $2\pi$

$$Nm = N \times m$$

Lembrando que: Potência = Trabalho por tempo

Então Potência = Torque x Rotação x  $2\pi$

$$W = Nm \times rps$$

Assim, curvas de potência de motores são determinadas ao frear o seu movimento numa dada rotação, pois a frenagem é possível pelo torque exercido no motor, que por sua vez, é mensurado.

A potência do motor pode ser determinada como  $P_m = 2\pi \cdot T_m \cdot N_m$ , em que:  $P_m$  - potência do motor,  $T_m$  - torque do motor, e  $N_m$  - rotação do motor

Com a determinação das curvas de potência, torque e de consumo, são estabelecidos os limites mais adequados de rotação para que o motor trabalhe (Figura 6).

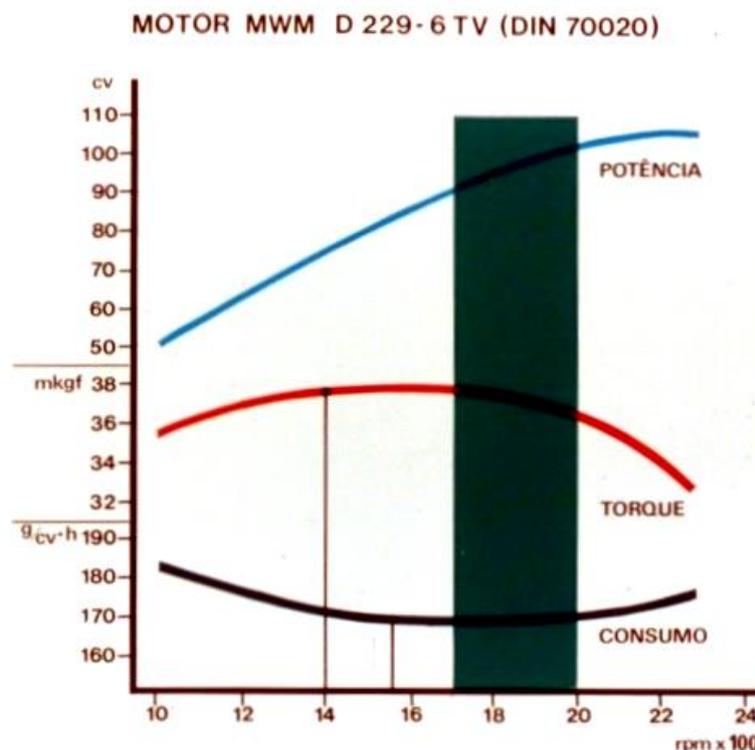


Figura 6 - Exemplo do estabelecimento dos limites de rotação de trabalho do motor em função das curvas de potência, de torque e de consumo de combustível.

## PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DOS MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

- Tipos de ciclo de funcionamento

Os motores de combustão interna (“endotérmicos”) utilizados nos veículos automóveis, transformam a energia térmica gerada pela combustão da mistura comburente/combustível em energia mecânica

Se existem os motores de combustão interna é porque existem os de combustão externa (“exotérmicos”), que se tratavam dos motores à vapor.

Os motores apresentam-se sob formas construtivas e de funcionamento muito diversas. Quanto ao tipo de movimento podem ser classificados em: Motores de movimento alternativo ou de movimento rotativo

### Motores de movimento alternativo

Os motores de movimento alternativo, comumente utilizados nos veículos automóveis, têm como princípio de funcionamento, o movimento alternativo do êmbolo no interior do cilindro que transmite, através da biela, um movimento circular à árvore de manivelas (esses componentes terão suas funções explicadas no próximo capítulo). Simplicando o exemplo, é como os movimentos do joelho e do tornozelo ao pedalar uma bicicleta (Figura 7). Embora ligados fisicamente o joelho tem um movimento de “sobe-e-desce”, ou seja, alternativo, ao passo que o tornozelo tem movimento circular, pois está ligado aos pés que impulsionam os pedais (árvore de manivelas).

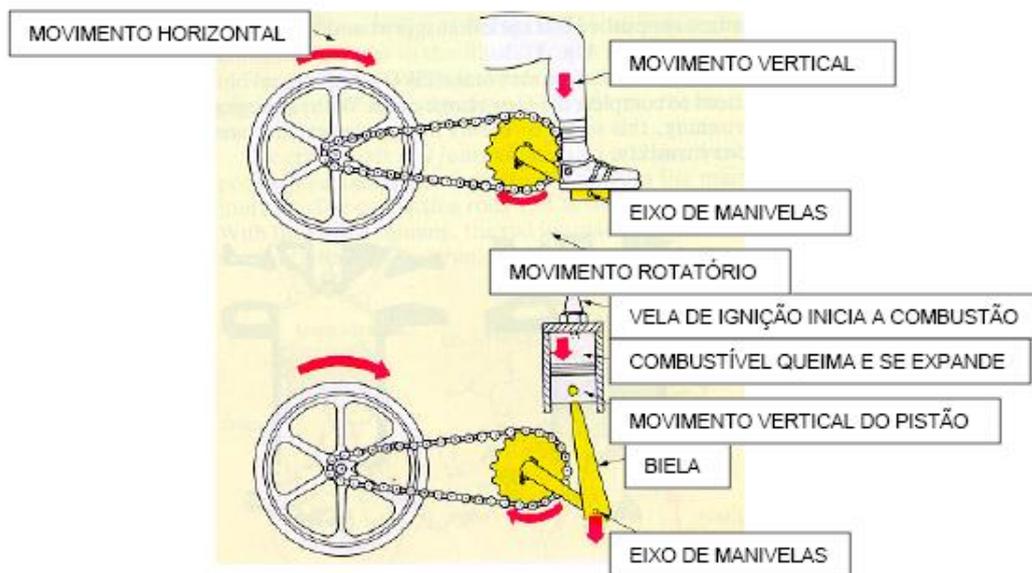


Figura 7 - Representação do funcionamento de um motor de movimento alternativo.

Quanto ao número de cilindros;, os motores de movimento alternativo podem ser constituídos por apenas um cilindro (monocilíndricos) ou por vários cilindros (policilíndricos).

Quanto à disposição de cilindros, os motores de movimento alternativo podem apresentar as seguintes disposições: cilindros em linha; cilindros em V; cilindros opostos; cilindros radiais e cilindros em W (Figura 8).

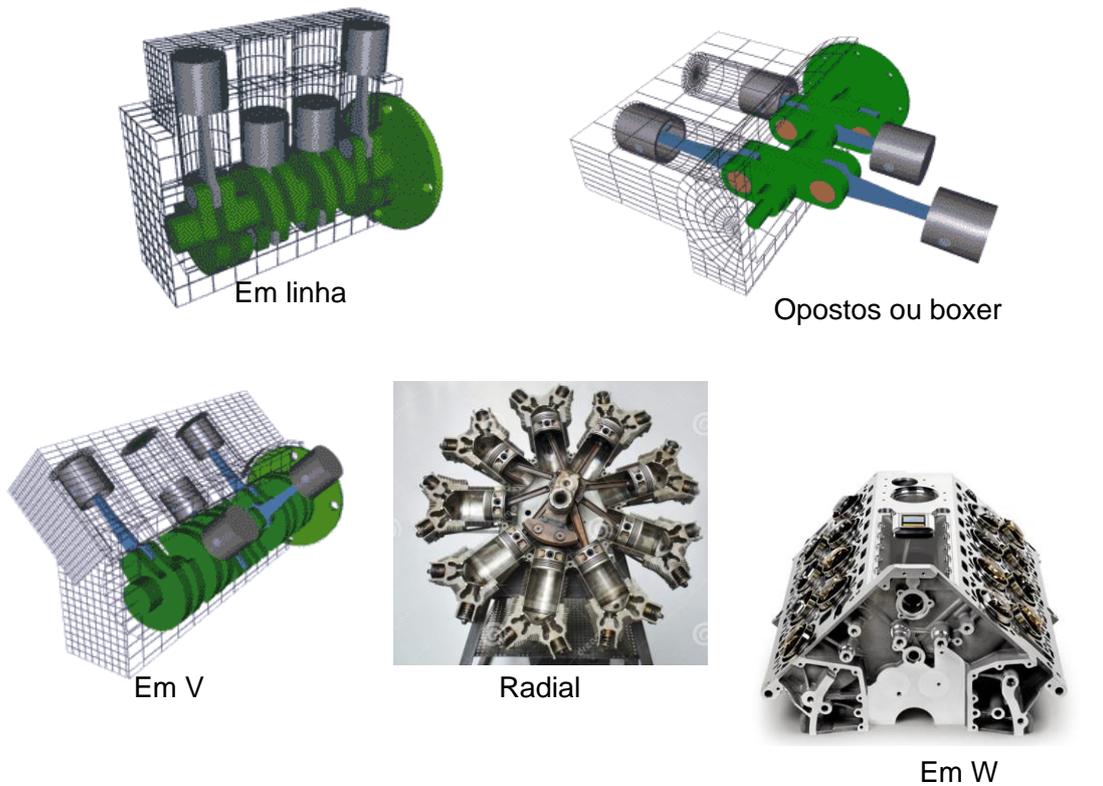


Figura 8 - Tipos de disposição de cilindros em motores de movimento alternativo.

Quanto aos tipos de ciclos de funcionamento, temos os mais comuns: OTTO, desenvolvido por Nikolaus Otto em 1876; e o DIESEL, desenvolvido por Rudolf Diesel em 1893.

As principais características dos motores de ciclo Otto são:

- Ignição por centelha; pois utilizam energia elétrica para dar início a reação de combustão. A centelha (faísca elétrica) é produzida pela vela de ignição;
- O combustível é misturado com o ar fora da câmara de combustão;
- Pode ser de 2 ou 4 tempos.

As principais características dos motores do ciclo diesel são:

- Ignição por compressão, pois utilizam o aumento da temperatura, devido a compressão da massa de ar admitida, para dar início a reação de combustão;
- O combustível é misturado com o ar dentro da câmara de combustão.
- Apenas de 4 tempos

Os motores de movimento alternativo funcionam numa sequência de etapas – admissão, compressão, expansão ou explosão-expansão e escape ou exaustão. A ignição é um momento que ocorre no fim da compressão e que propicia a explosão da mistura ar-combustível, causando a expansão. Num motor de 4 tempos cada uma dessas etapas ocorre isoladamente num dos tempos (4 etapas em 4 tempos). Já num motor 2 tempos, duas etapas ocorrem simultaneamente em cada tempo (4 etapas em 2 tempos).

O que é um tempo do motor? Um tempo do motor é o movimento do êmbolo a cada 180° de giro da árvore de manivelas. Motores de 4 Tempos: Realizam o ciclo em quatro etapas; o ciclo é equivalente a duas voltas (720°) na árvore de manivelas . Motores de 2 Tempos: Realizam o ciclo em duas etapas; o ciclo é equivalente a uma volta (360°) na árvore de manivelas

O tempo “motor”: é o de explosão-expansão, o único onde ocorre a transformação da energia do combustível em mecânica.

### **Funcionamento básico dos motores de 4 tempos de ciclo Otto**

- Primeiro curso: Admissão. Nessa etapa, as válvulas de admissão (a ser apresentada na aula de Sistemas Complementares) estão abertas para a entrada da mistura ar e combustível (mistura feita fora do cilindro). O êmbolo se desloca do ponto morto superior ao ponto morto inferior (Figura 9).

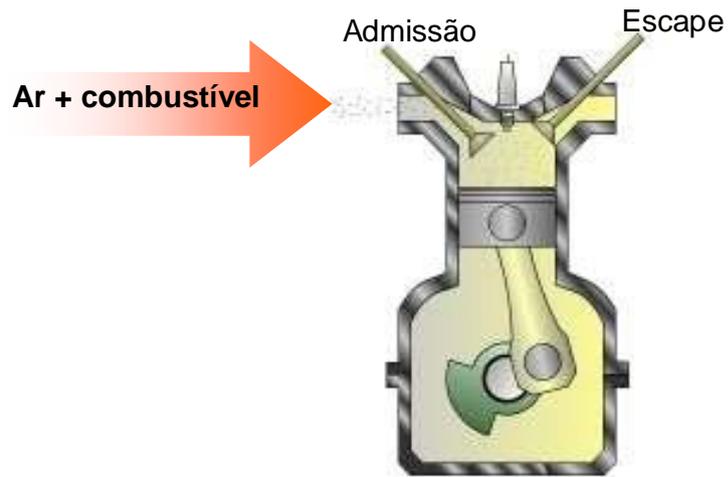


Figura 9 - Esquema da admissão no ciclo Otto 4 tempos

- Segundo curso: Compressão. Nessa etapa, as válvulas estão fechadas, pois a compressão demanda um sistema vedado. O êmbolo se desloca do ponto morto inferior ao ponto morto superior. Há aumento da temperatura e pressão e diminuição do volume. Quando o êmbolo chega ao ponto morto superior, toda a mistura de ar e combustível fica confinada na câmara de compressão, uma reentrância presente no cabeçote ou no êmbolo. Cada cilindro tem a sua câmara de compressão (Figura 10). A taxa de compressão, que é a relação entre o volume inicial (volume do cilindro + o volume da câmara de compressão) e o volume final (o volume da câmara de compressão) é normalmente entre 9 e 11.

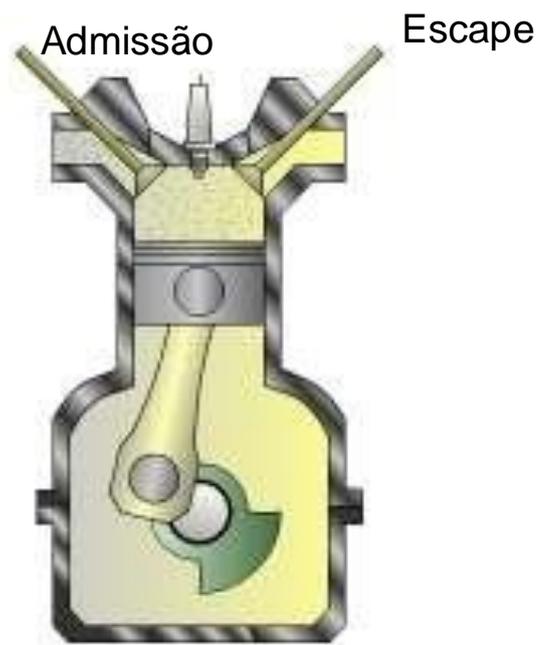


Figura 10 - Esquema da compressão no ciclo Otto 4 tempos

- Terceiro curso: Expansão. Quando o êmbolo chega ao ponto morto superior, na máxima compressão, a ignição por centelha (ciclo Otto) é liberada, causando a explosão da mistura ar e combustível. Como ocorre o aquecimento e conseqüentemente o ar se expande, a expansão impulsiona o êmbolo para baixo (do ponto morto superior ao inferior). As válvulas estão fechadas, pois para o melhor aproveitamento da expansão dos gases para impulsionar o êmbolo é necessária a vedação (Figura 11).

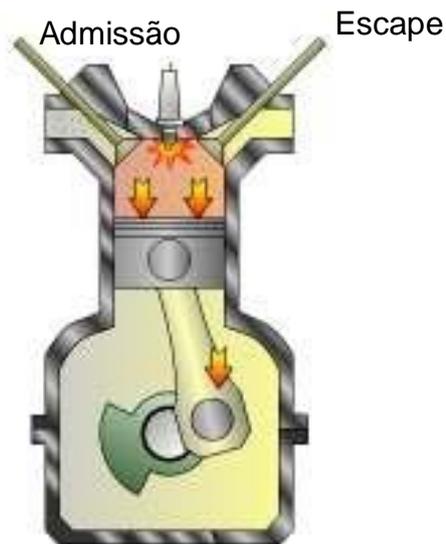


Figura 11 - Esquema da explosão-expansão no ciclo Otto 4 tempos

- Quarto curso: Escape. Para que sejam retirados os resíduos da combustão para que o próximo ciclo de 4 tempos aconteça, a válvula de escape se abre e o êmbolo, impulsionado pela energia liberada no tempo explosão-expansão, se movimenta do ponto morto inferior ao superior, empurrando os resíduos que seguem para o sistema de escape (Figura 12).

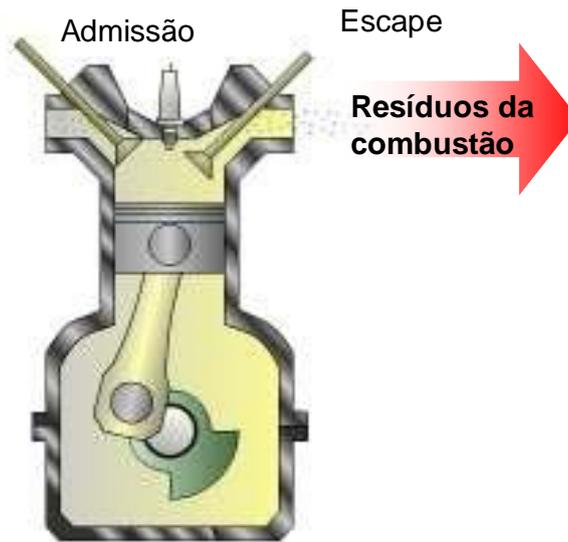


Figura 12 - Esquema do escape no ciclo Otto 4 tempos

### Funcionamento básico dos motores de 4 tempos de ciclo Diesel

Este motor, inventado pelo engenheiro alemão Rudolf Diesel, é, do ponto de vista estrutural, igual ao motor a gasolina.

Os motores do ciclo diesel de quatro tempos admitem somente ar. O êmbolo ao descer aspira ar para dentro do cilindro através da válvula de admissão aberta. O ar, que entra na câmara de combustão na fase de admissão (Figura 13a), é submetido a uma elevada compressão, seguindo-se a entrada de combustível, que inflama, ao entrar em contato com o ar quente comprimido.

Nestes motores, de ignição por compressão, a mistura ar/combustível é feita na câmara de combustão. A válvula de admissão fecha-se e o êmbolo ao subir, comprime o ar, aquecendo-o. O combustível é injetado. A centelha não é necessária, pois, devido à alta taxa de compressão o ar atinge temperaturas tão altas (Figura 13b) que ao entrar em contato com ele, o combustível (óleo Diesel) explode que causa a expansão dos gases (Figura 13c). A taxa de compressão num motor Diesel é ao redor de 17 a 22:1. Isso se deve às características do combustível e ao sistema de injeção (altíssima pressão) propiciado pela bomba injetora. A válvula de escape abre-se e o êmbolo ao subir, expulsa do cilindro os gases de combustão (Figura 13d).

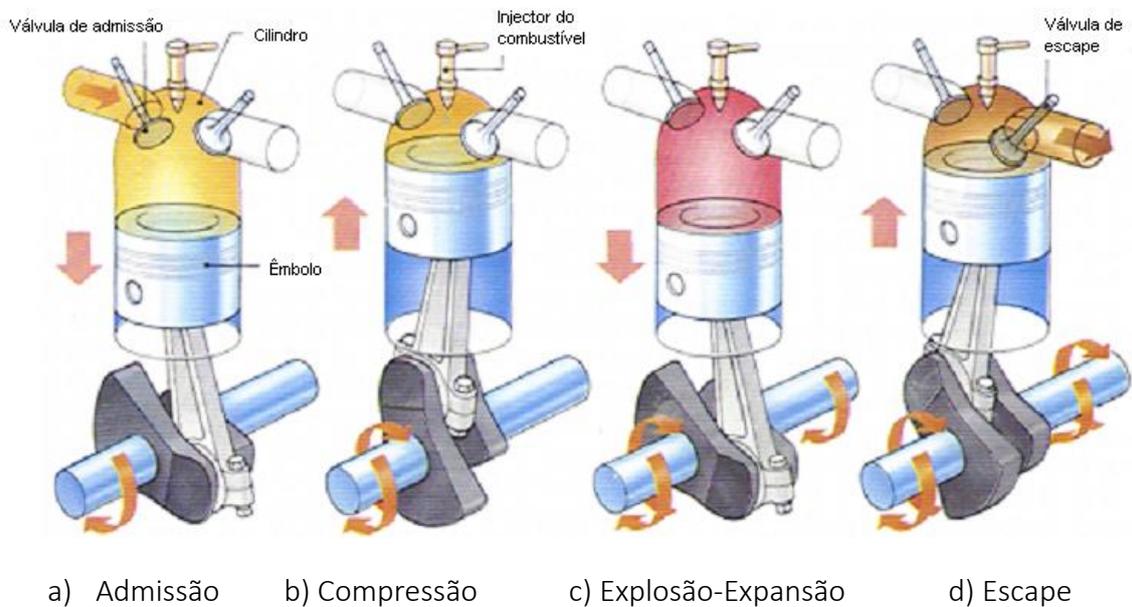


Figura 13 - Esquema do funcionamento no ciclo Diesel 4 tempos

### Funcionamento básico dos motores de 2 tempos de ciclo Otto

Entre algumas particularidades dos motores Otto 2 tempos estão: apresentam o ciclo equivalente a uma volta ( $360^\circ$ ) na árvore de manivelas, não apresentam válvulas (sistema de alimentação), admitem mistura de ar, combustível e óleo lubrificante (feita fora do cilindro). O lubrificante é misturado ao ar+combustível, por conta da ausência de um sistema de lubrificação.

Esses motores apresentam menos peças móveis, e conseqüentemente menor massa. Assim são usados em equipamentos como motosserra, roçadoras costais e motores estacionários. Esse motor não é mais adotado para motocicletas e automóveis por conta das restrições ambientais, principalmente por causa das emissões.

Para que duas etapas ocorram simultaneamente em cada uma das etapas, elas são agrupadas em função do movimento realizado: sendo o primeiro tempo a expansão/ (do ponto morto superior ao inferior) e a compressão/escape (do ponto morto inferior ao superior) o segundo tempo.

#### 1ºTempo – Expansão/Admissão

Para que a expansão e a admissão ocorram simultaneamente, a mistura gasolina-ar-óleo lubrificante explode e empurra o êmbolo para baixo, uma nova mistura entra no cárter pela janela de admissão (Figura 14).

O êmbolo empurra a mistura nova para a janela de transferência e começa a abrir a janela de escape.

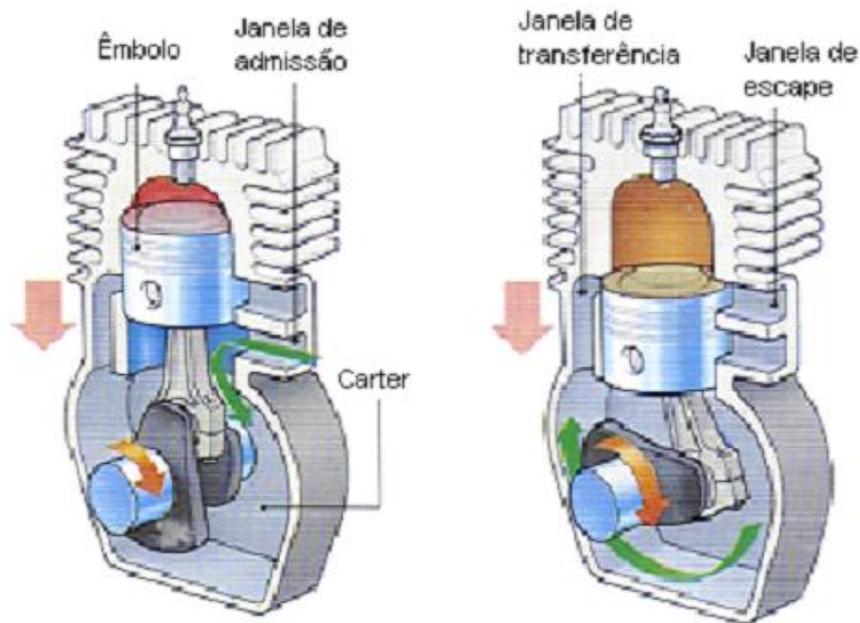


Figura 14 - Esquema da Expansão/Admissão do ciclo Otto 2 tempos

### 2ºTempo – Compressão/Escape

Para que a compressão e o escape ocorram simultaneamente, a janela de transferência é aberta, passando a mistura para a parte superior do cilindro o que ajuda a expulsar os gases. O êmbolo sobe, fechando a janela de escape e comprimindo a mistura. Na vela salta a faísca (Figura 15).

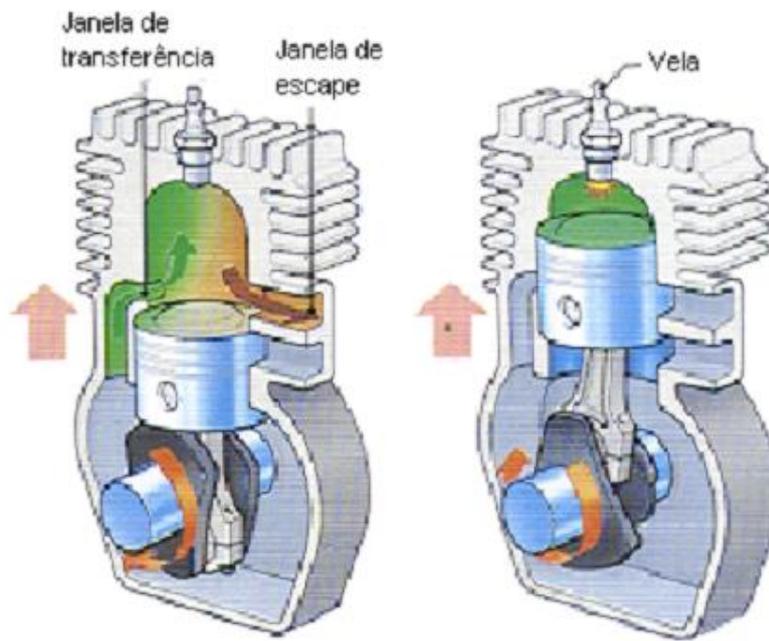


Figura 15 - Esquema da Compressão/Escape do ciclo Otto 2 tempos

#### Motor de movimento rotativo (Motor Wankel).

Esse exemplo será mostrado apenas para ilustrar esse tipo de motor, pois para finalidade agrícola ele não é utilizado, sendo muito pouco adotado na indústria automobilística.

Este motor apresenta movimento rotativo e é menos usual do que os anteriores, assim realiza em cada rotação do rotor uma sequência das quatro etapas componentes do ciclo Otto ou Diesel: admissão, compressão, explosão e escape (Figura 16). Esses motores não têm cilindros e sim rotores.

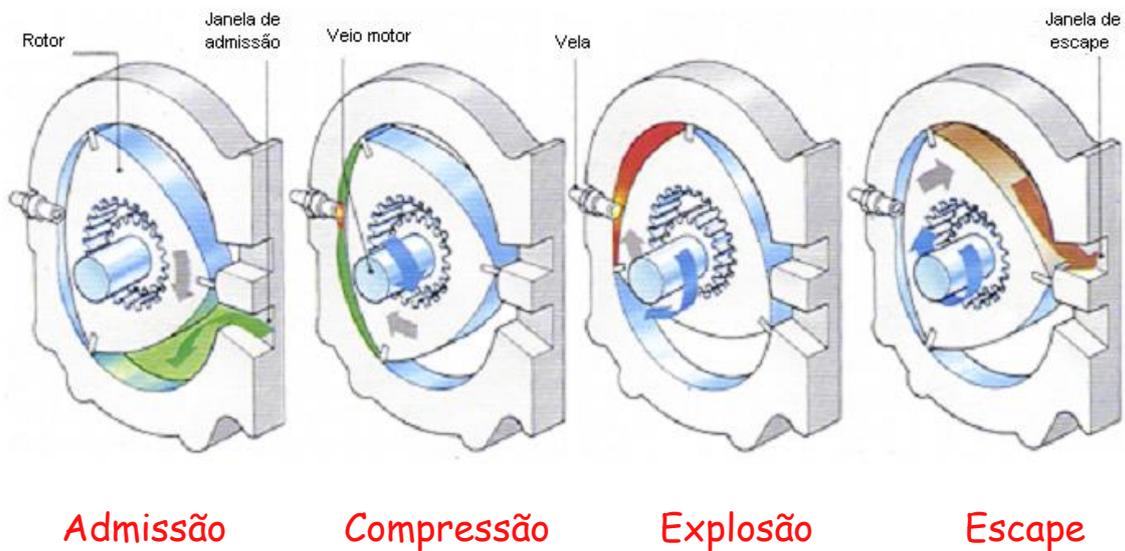


Figura 16 - Esquema do funcionamento do motor rotativo (Wankel)

#### Referências

ATARES, P.V.A.; BLANCA, A.L. Tratores e Motores Agrícolas. 2ª ed. Madri: Ediciones Mundi. Prensa, 1993. 429 p.

BARGER, E.L. et ali. Tratores e seus Motores. St. Joseph. Ed. Edgard Blucher Ltda. SP. 398p.

DEBEIR, J. C., DELÉAGE, J. P.; HÉMERY, D. Uma história da energia. Editora da Universidade de Brasília, 1993. 447p.

MIALHE, L.G. Máquinas motoras na Agricultura. Vol. I e II. EDUSP, 1980, 289 e 367p., respectivamente.

ORTIZ CAÑAVATE, J.; HERNANZ, J.L. Técnica de la mecanizacion agraria. 2ª ed. Madri: Ediciones Mundi. Prensa, 1989. 641p.