



ESCOLA NÁUTICA INFANTE D. HENRIQUE
CURSO DE ENGENHARIA DE MÁQUINAS MARÍTIMAS

MÁQUINAS DE COMBUSTÃO INTERNA

CAPÍTULO I

Introdução, definições, classificação e ciclos de funcionamento

1.1 Introdução

As máquinas de combustão interna, desempenham há mais de uma centena de anos um papel extremamente importante no progresso das actividades económicas em particular, e da nossa civilização em geral.

Graças à sua enorme versatilidade, são utilizadas em várias actividades, das quais salientamos pela sua importância as seguintes:

Transporte marítimo

Pesca

Transporte rodoviário

Transporte ferroviário

Transporte aéreo

Indústria

Agricultura

Construção civil, etc.

Dado o sector de actividade em que estamos inseridos, iremos abordar sobretudo o estudo das máquinas de combustão interna, na perspectiva da sua utilização no âmbito dos transportes marítimos, isto é na propulsão e serviços auxiliares dos navios.

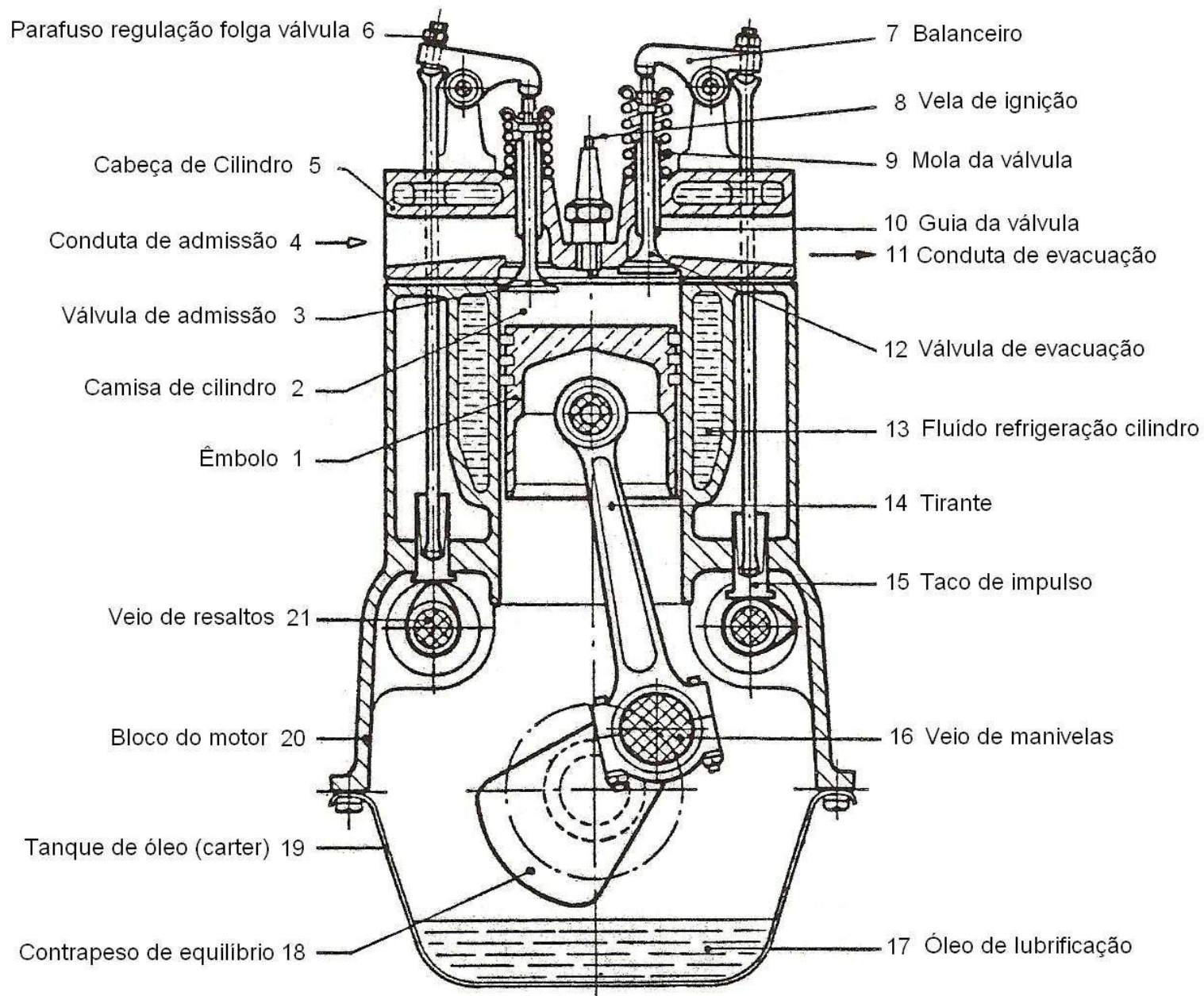
Pode definir-se as máquinas de combustão interna, como sendo aparelhos com capacidade para transformar no interior dos seus cilindros, numa primeira fase a energia química dos combustíveis líquidos e gasosos, em energia calorífica, através de uma combustão, e numa segunda fase em energia mecânica, aproveitando para o efeito a força expansiva dos gases produzidos.

Esta energia mecânica, pode então ser utilizada para accionar aviões, veículos automóveis, veículos ferroviários, navios, geradores de corrente, etc., bastando para o efeito que a máquina de combustão interna seja ligada directa ou indirectamente a um operador, que no caso das aplicações marítimas é normalmente um hélice, um gerador de corrente ou uma bomba, que permitem aproveitar de uma forma útil a energia produzida pelas máquinas de combustão interna.

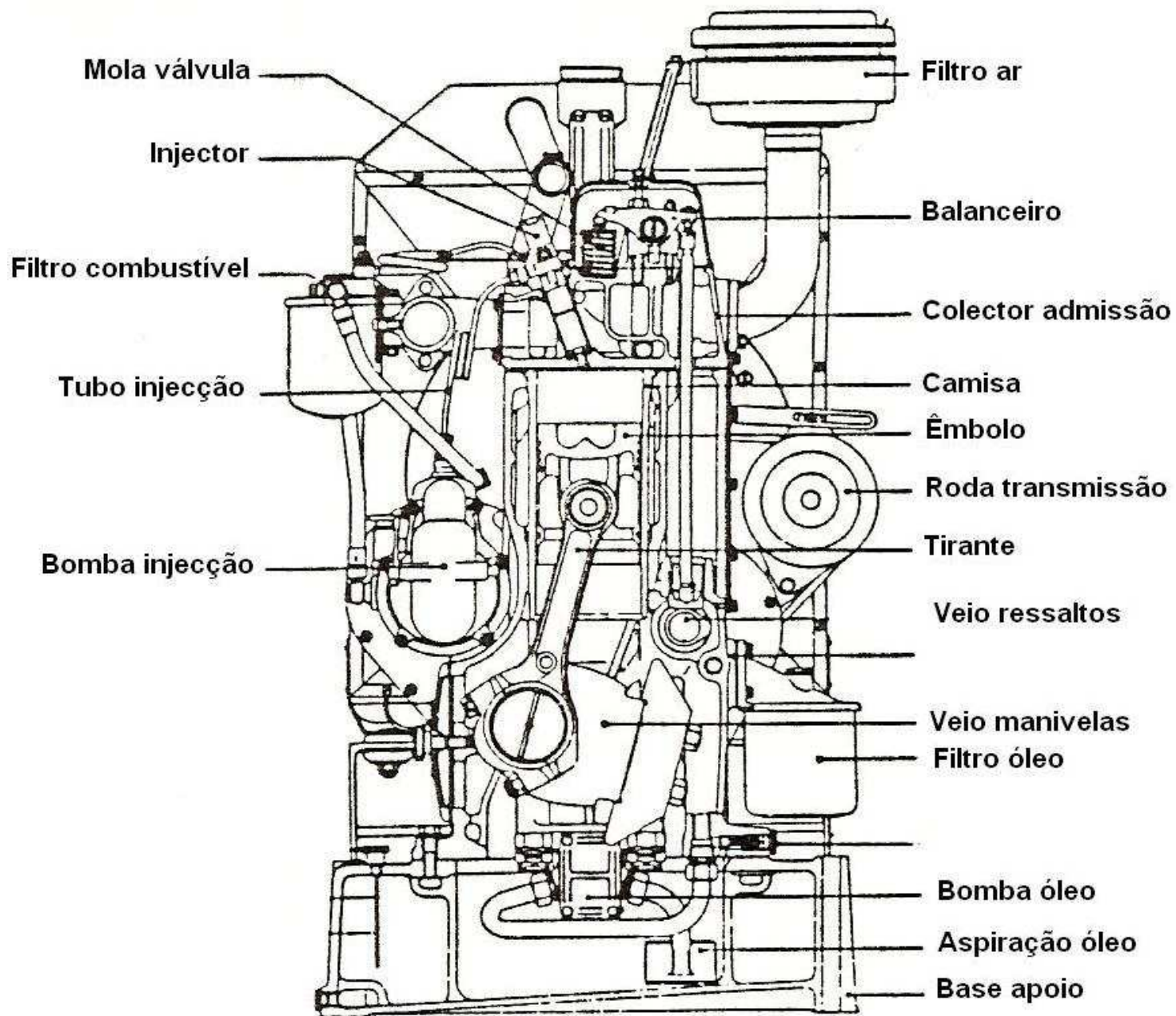
1.2 Nomenclatura e definições

1.2.1 Nomenclatura dos principais componentes

Nas figuras seguintes, apresenta-se a nomenclatura portuguesa dos principais componentes de alguns tipos de máquinas de combustão interna.

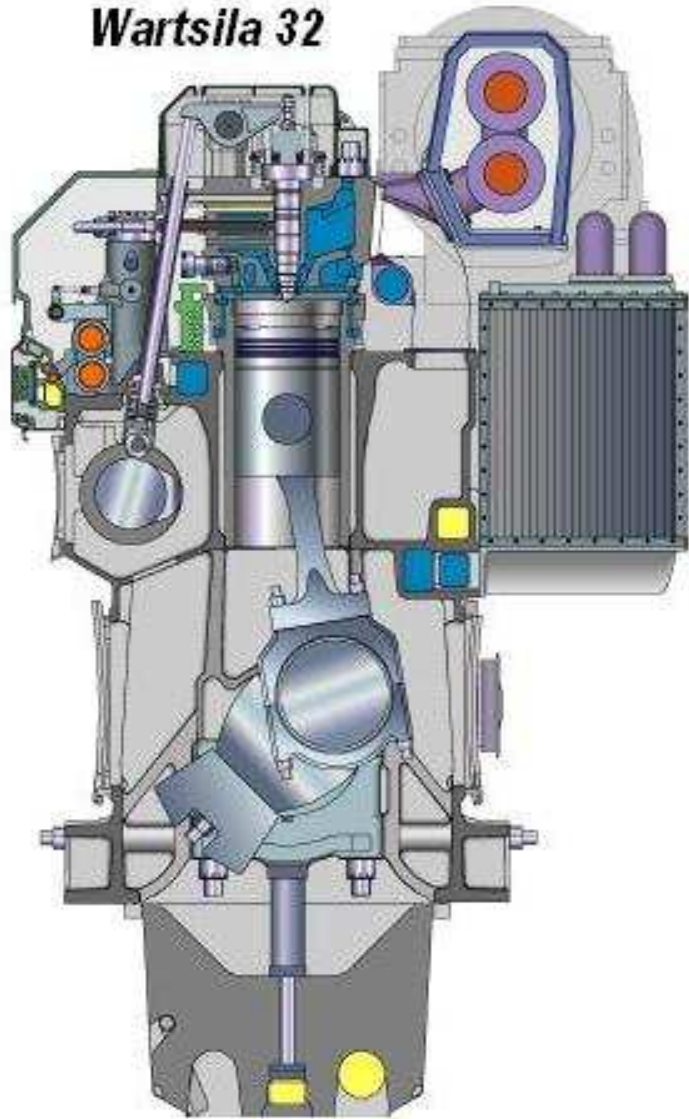


Corte transversal de motor de explosão a 4 tempos atmosférico

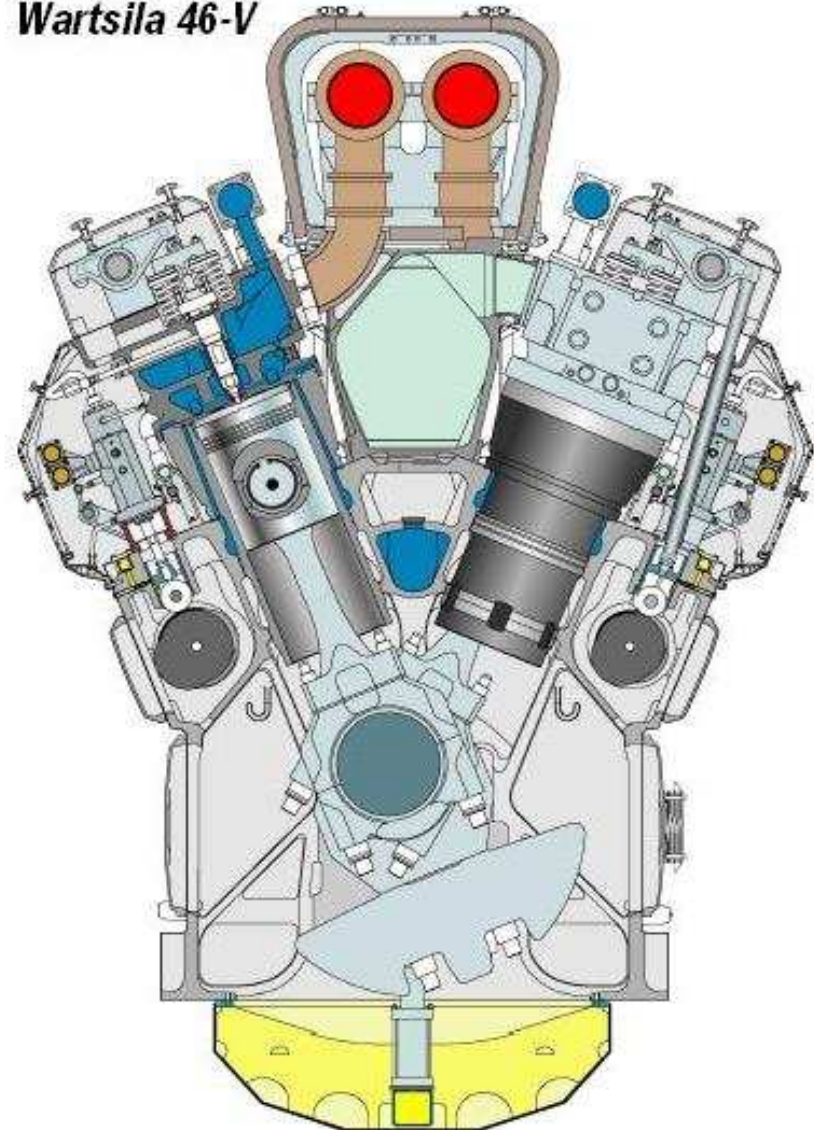


Corte transversal de motor diesel a 4 tempos atmosférico

Wartsila 32

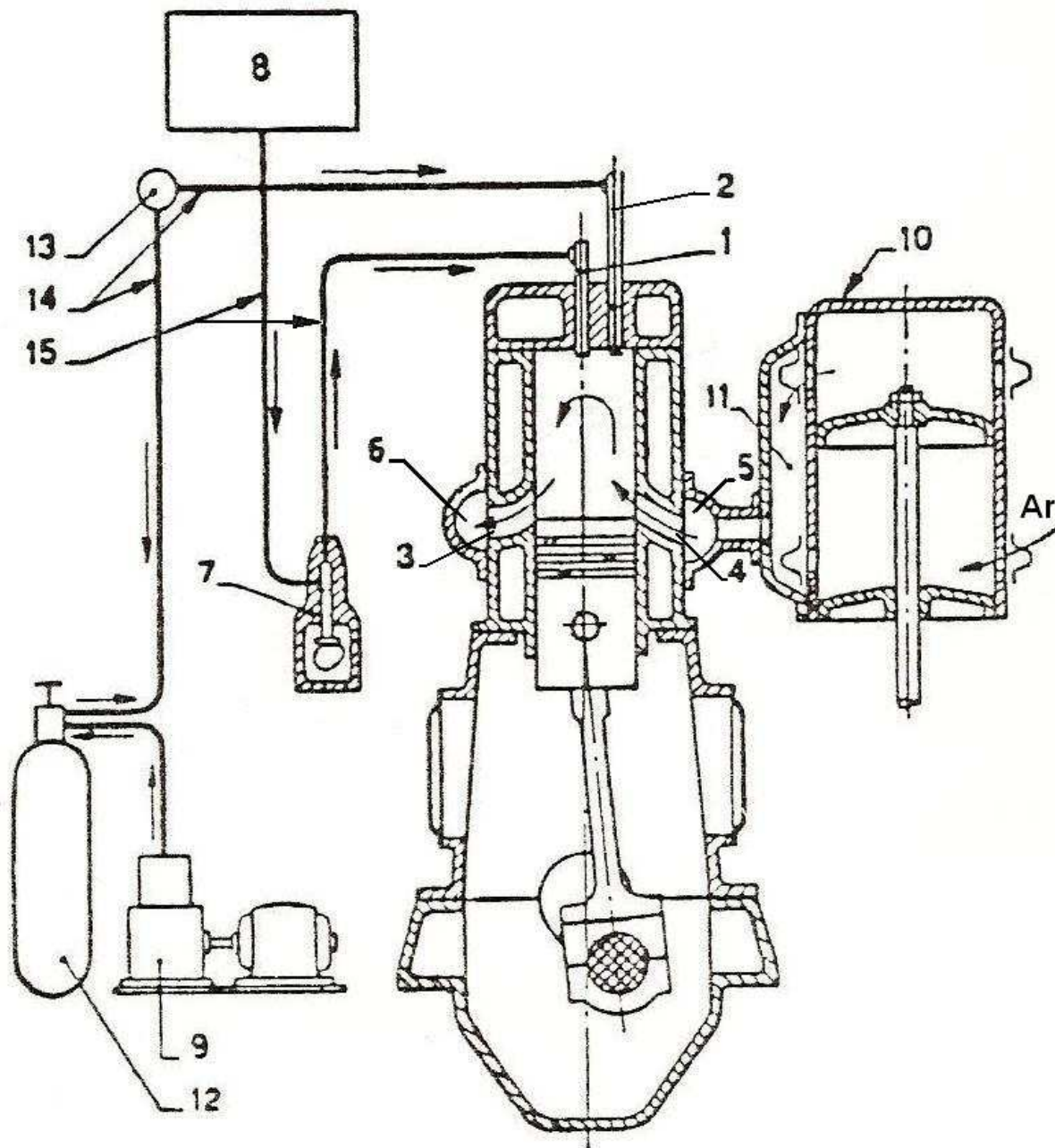


Wartsila 46-V

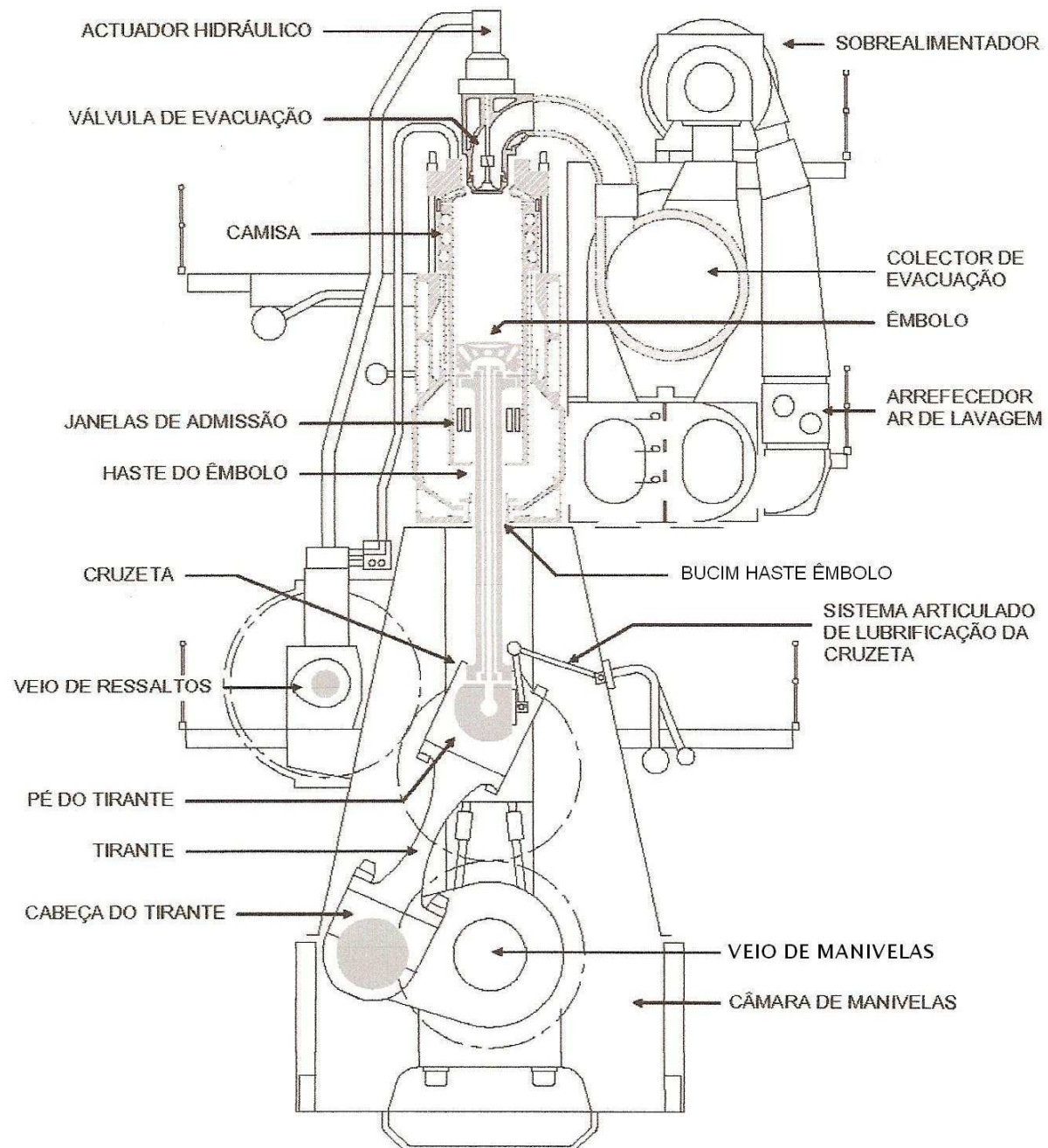


Corte transversal de motores diesel marítimos a 4 tempos sobrealimentados

- 1 - Injetor
- 2 - Válvula ar arranque
- 3 - Janela evacuação
- 4 - Janela admissão
- 5 - Colector ar lavagem
- 6 - Colector evacuação
- 7 - Bomba injeção
- 8 - Tanque combustível
- 9 - Compressor ar arranque
- 10 - Bomba ar lavagem
- 11 - Câmara ar lavagem
- 12 - Reservatório ar arranque
- 13 - Válvula arranque principal
- 14 - Tubos ar
- 15 - Tubos combustivel

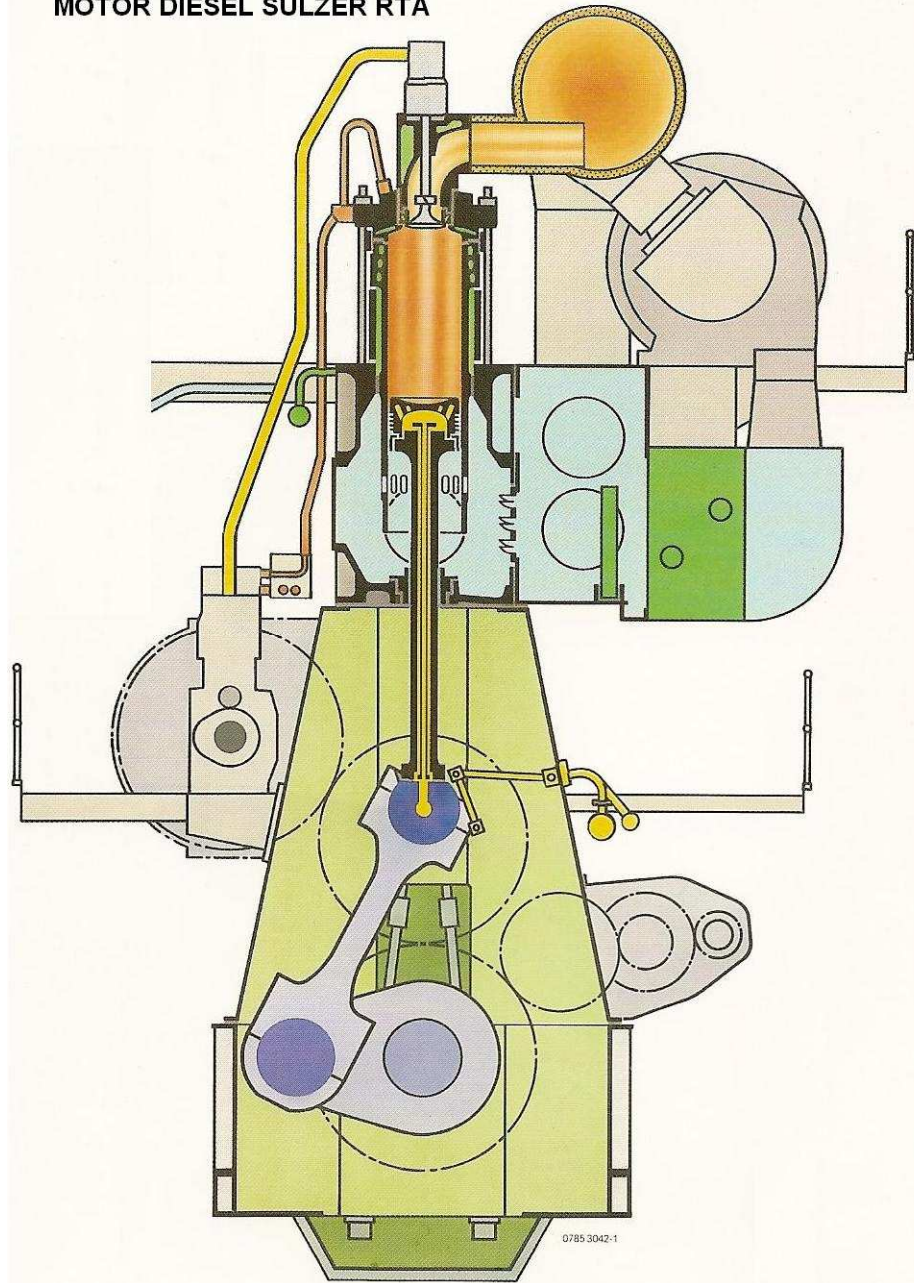


Corte transversal de motor diesel a 2 tempos atmosférico sem cruzeta



Corte transversal de motor diesel a 2 tempos sobrealimentado com cruzetas

MOTOR DIESEL SULZER RTA



Corte transversal de motor diesel marítimo a 2 tempos com cruzetas sobrealimentado

1.2.2 Definições

Os elementos mais relevantes das máquinas de combustão interna que agora interessa definir são:

PMI – ponto morto inferior: é a posição de inversão de movimento do êmbolo mais afastada da cabeça do cilindro

PMS – ponto morto superior: é a posição de inversão de movimento do êmbolo mais próxima da cabeça do cilindro

D – diâmetro do cilindro: é o diâmetro interior da camisa do cilindro

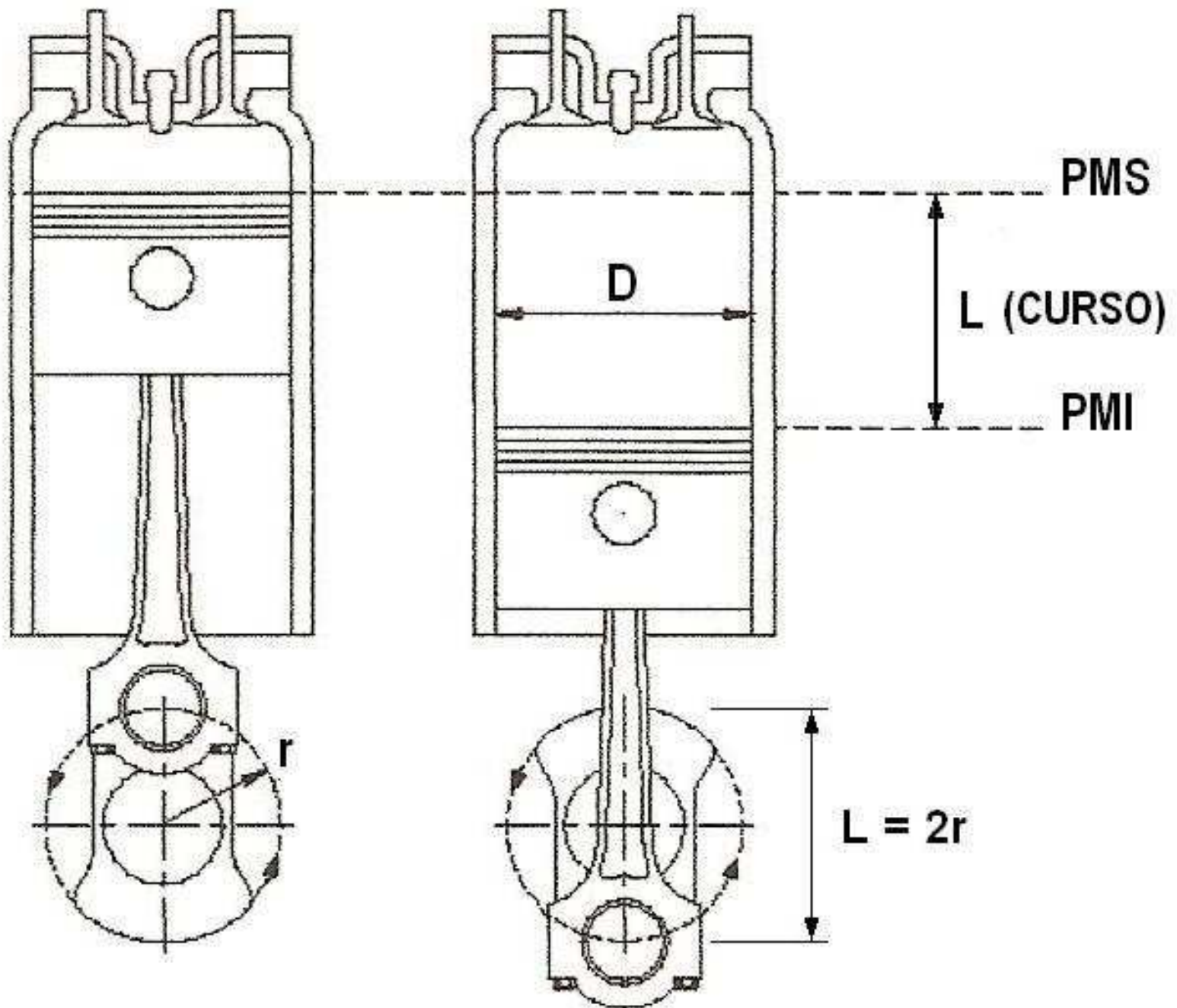
r – raio da manivela: é o raio da circunferência descrita pela manivela durante a sua rotação

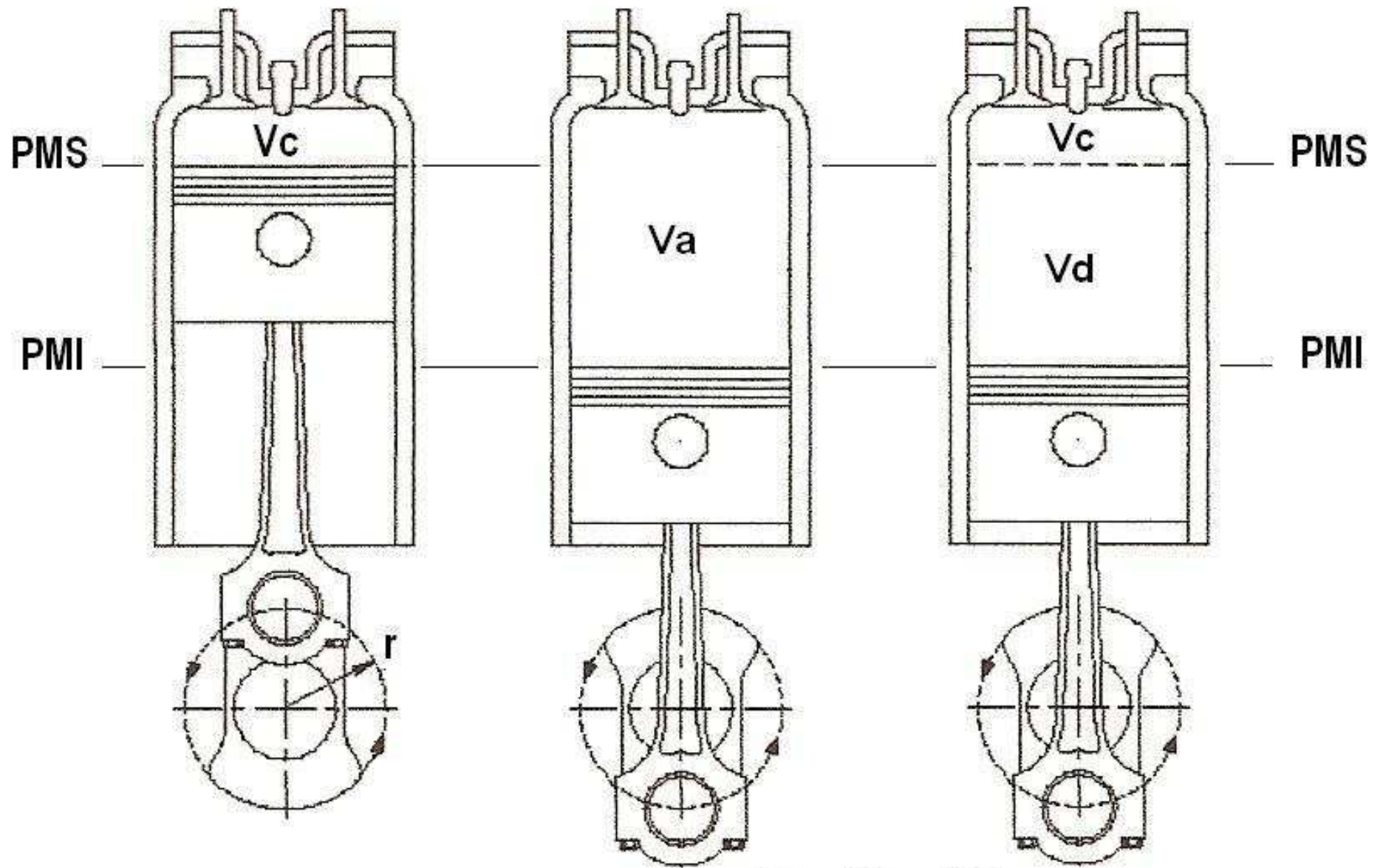
L – curso do êmbolo: é a distância percorrida pelo êmbolo entre os pontos mortos (**$L = 2r$**)

V_a – volume total do cilindro: é o volume do cilindro compreendido entre a cabeça do cilindro e a cabeça do êmbolo quando este se encontra no PMI

V_c – volume da câmara de combustão: é o volume compreendido entre a cabeça do cilindro e a cabeça do êmbolo quando este se encontra no PMS

V_d – volume deslocado ou cilindrada unitária: é o volume deslocado pelo êmbolo quando passa do PMS para o PMI, isto é, o volume interior do cilindro compreendido entre o **PMS** e o **PMI**.





$$V_a = V_c + V_d$$

Fluido motor: também designado por fluido operante, fluido energético e fluido de trabalho, é constituído pela mistura de ar e combustível que evoluciona no interior dos cilindros dos motores durante a realização dos respectivos ciclos de funcionamento.

Tempo de funcionamento: é o conjunto de operações e transformações físicas e químicas a que o fluido motor é submetido durante um curso ou passeio do êmbolo.

Ciclo de funcionamento: compreende toda a série de operações e transformações físicas e químicas exercidas sobre o fluido motor, durante a sua passagem através de cada cilindro do motor, as quais se repetem segundo uma lei periódica, que depende do deslocamento angular do veio de manivelas necessário para a realização do ciclo.

Diagramas reais de funcionamento: são linhas curvas fechadas que permitem representar em cada instante as variações de volume, pressão e temperatura sofridas pelo fluido motor no interior do cilindro durante um ciclo de funcionamento, que nos permitem analisar a evolução do ciclo de funcionamento, e conseqüentemente identificar e corrigir eventuais anomalias bem como determinar a potência desenvolvida.

Os diagramas reais de funcionamento dos motores diesel lentos podem ser obtidos através aparelhos mecânicos indicadores de diagramas, operados manualmente ou através de meios electrónicos operados por comando remoto. Os diagramas dos motores de média rotação e rápidos, apenas podem ser obtidos através de meios electrónicos operados por controlo remoto.

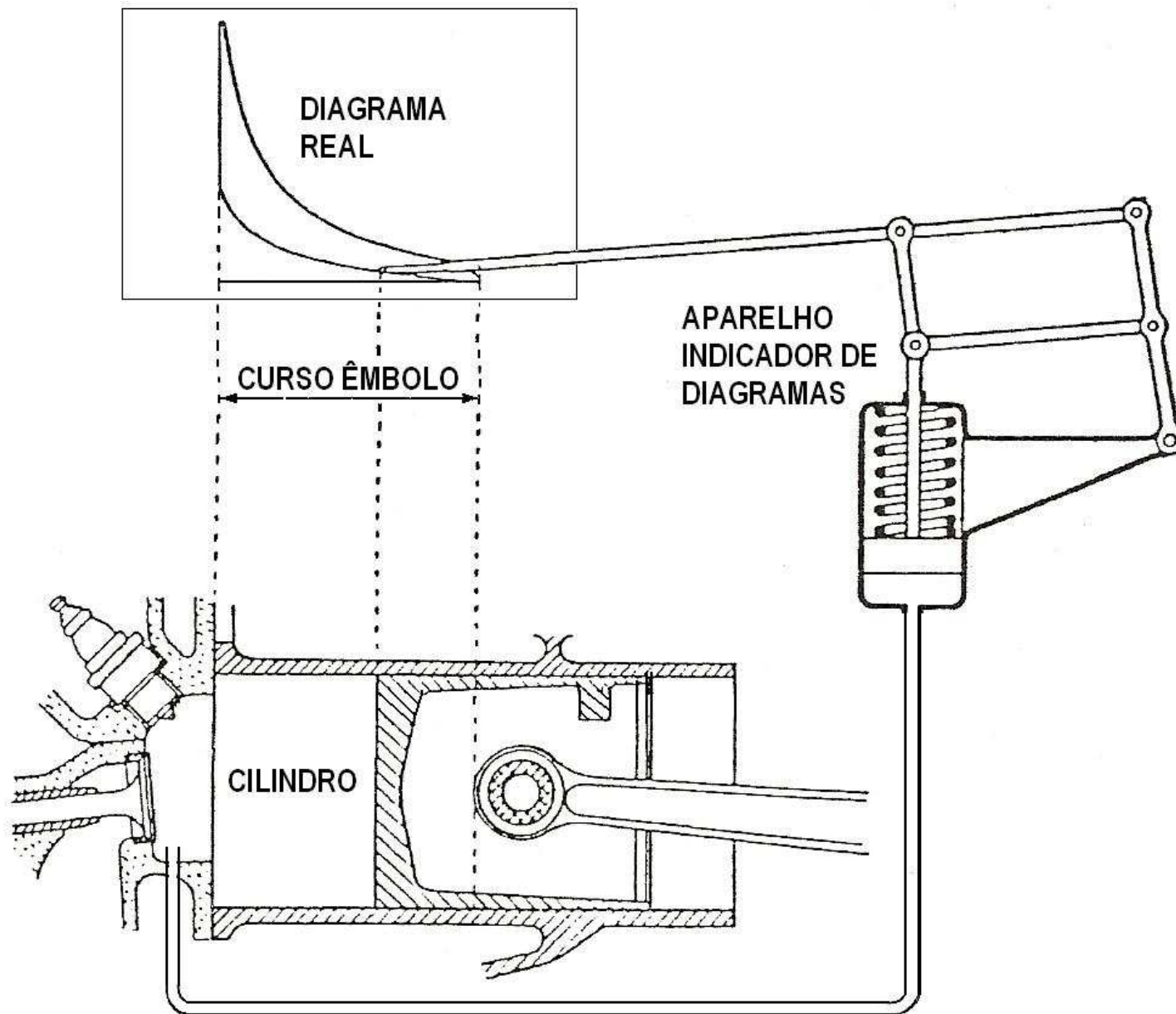


Diagrama real obtido com aparelho indicador mecânico

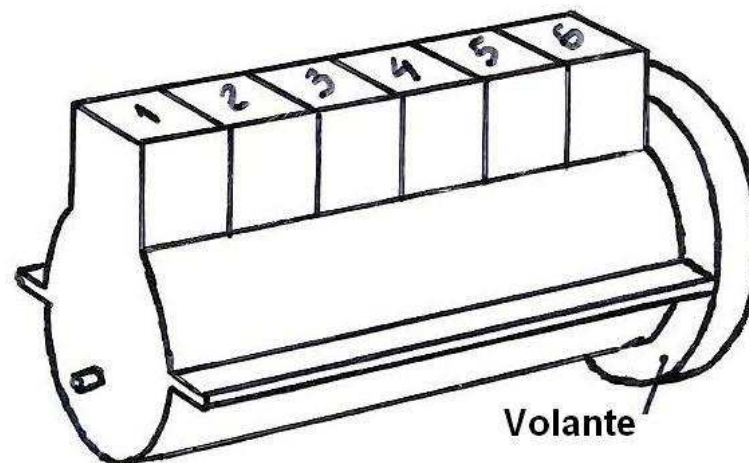
Numeração dos cilindros

Nos motores com os **cilindros dispostos em linha**, numeram-se normalmente a partir da extremidade do veio de manivelas que não suporta o volante, tal como pode ver-se na figura ao lado. No caso dos motores marítimos, corresponde a numerá-los de **Vante** para **Ré**.

Nos motores com os **cilindros dispostos em V**, numeram-se normalmente a partir da extremidade do veio de manivelas que não suporta o volante, tal como pode ver-se na figura ao lado. No caso dos motores marítimos, corresponde a numerá-los de **Vante** para **Ré** e de **EB** para **BB**.

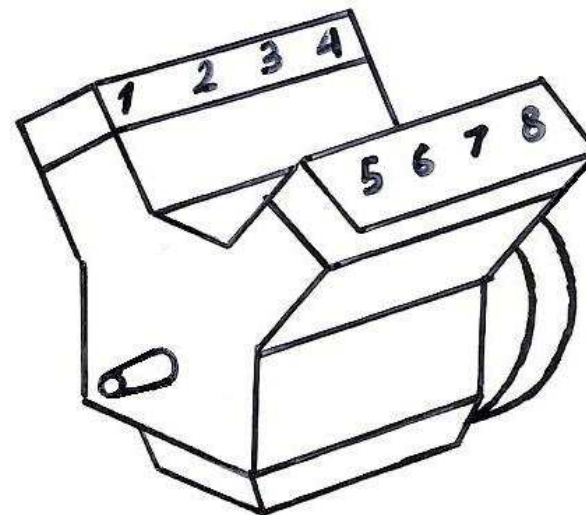
Por vezes adoptam-se outros critérios para numerar os cilindros dos motores, pelo que deve prestar-se especial atenção, para evitar enganos prejudiciais.

MOTOR COM CILINDROS EM LINHA



Numeração dos cilindros

MOTOR COM CILINDROS EM V



Numeração dos cilindros

Ângulo do V entre linhas de cilindros de um motor

Muito embora possam adoptar-se outros critérios mais convenientes para os fins em vista, o **ângulo do V entre as linhas de cilindros** de um motor pode determinar-se através da seguinte expressão:

$$\text{Ângulo V} = (\text{número de graus do ciclo}) : (\text{número de cilindros do motor})$$

Ordem de inflamação ou de ignição de um motor



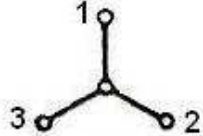

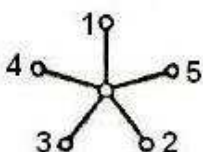
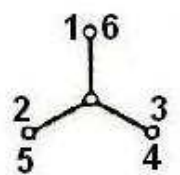
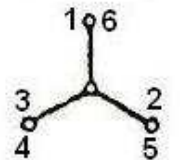
É a sequência, segundo a qual ocorre a inflamação em cada um dos cilindros do motor, a qual pode ser diversa, uma vez que depende dos critérios adoptados pelo fabricante.

A inflamação em cada um dos cilindros de um motor, ocorre segundo uma lei periódica que é função do número de graus necessário para a realização do ciclo de funcionamento, da seguinte forma:

Motores a quatro tempos: após cada 720° de deslocamento angular do veio de manivelas, isto é, após cada duas rotações;

Motores a dois tempos: após cada 360° de deslocamento angular do veio de manivelas, isto é, após cada rotação.

Na tabela seguinte apresentam-se algumas ordens de inflamação de diversos motores.

NÚMERO CILINDROS	POSIÇÃO DAS MANIVELAS	ÂNGULO CALAGEM DAS MANIVELAS	ORDEM INFLAMAÇÃO QUANDO VEIO MANIVELAS RODA SENTIDO HORÁRIO
2		360°	1 — 2
2		180°, 540°	1 — 2
3		240°	1 — 2 — 3
4		180°	1 — 2 — 4 — 3 o 1 — 3 — 4 — 2
5		144°	1 — 3 — 5 — 4 — 2
6		120°	1 — 5 — 3 — 6 — 2 — 4
6		120°	1 — 3 — 5 — 6 — 4 — 2

1.3 Classificação das máquinas de combustão interna

Podem classificar-se em relação a vários aspectos, nomeadamente entre outras possibilidades, quanto:

- **Ao ciclo de funcionamento:** motores a 2 e a 4 tempos conforme realizam o seu ciclo teórico de funcionamento em 2 e 4 cursos do êmbolo, isto é, em 1 ou 2 rotações do veio de manivelas.

- **Ao tipo de movimento do órgão sujeito à acção do fluído motor:**

Alternativas, quando os gases de combustão actuam nas cabeças de êmbolos circulares que se deslocam segundo um movimento rectilíneo alternado (**motores convencionais**);

Rotativas quando os gases de combustão actuam nas faces de êmbolos triangulares, animados de movimento de rotação (**motores wankel**).

- **Ao tipo de combustível que utilizam para operação:**

Máquinas que operam com combustíveis destilados leves e gases (motores de explosão);

Máquinas que operam com combustíveis destilados mais pesados, combustíveis residuais e gases (motores diesel).

À forma como ocorre a inflamação ou ignição do combustível:

Motores de explosão, quando a ignição do combustível é comandada através da faísca que salta entre os eléctrodos de uma ou mais velas de ignição;

Motores diesel, quando a ignição do combustível é provocada pela temperatura proveniente da elevada compressão do ar pelo êmbolo no cilindro.

-À forma como o ar de alimentação é introduzido nos cilindros:

Atmosféricos, quando o ar entra nos cilindros devido à depressão gerada pelos êmbolos, normalmente a uma pressão inferior à atmosférica ;

Sobrealimentados, quando o ar entra nos cilindros impulsionado por compressores, normalmente a uma pressão superior à atmosférica.

- À forma como é efectuada a refrigeração dos cilindros:

Máquinas arrefecidas por ar - motores de explosão utilizados na aviação e em actividades terrestres, estes de pequena potência;

Máquinas arrefecidas por fluidos líquidos - motores de explosão e diesel em geral.

À forma como é efectuada a ligação entre o êmbolo e o veio de manivelas:

Motores sem cruzeta, quando a ligação é efectuada através de cavilhão e tirante (motores de explosão a 2 e 4 tempos e motores diesel a 4 tempos);

Motores com cruzeta, quando a ligação é efectuada através de um mecanismo constituído por haste de êmbolo, cruzeta e tirante (motores diesel a 2 tempos).

-À sua utilização em geral:

Propulsão rodoviária, ferroviária, marítima e aeronáutica

Produção de energia eléctrica, e muitas outras utilizações na indústria, etc.

-À sua utilização nos navios:

Máquinas principais, quando efectuam a propulsão;

Máquinas auxiliares, quando accionam geradores de corrente eléctrica, bombas, etc..

1.4 Princípios de funcionamento

Os princípios de funcionamento das máquinas de combustão interna alternativas, muito embora visem atingir objectivos comuns, que são a transformação da energia química do combustível primeiro em energia térmica e depois em energia mecânica, diferem contudo na forma como são realizados consoante se trate de motores de explosão e diesel.

De qualquer das formas essas transformações só podem realizar-se mediante a queima de combustível líquido ou gasoso num cilindro e o aproveitamento da força expansiva dos gases produzidos, para accionar um êmbolo móvel nele inserido que desliza segundo um movimento rectilíneo alternado, tornando assim possível primeiro a transformação da energia química do combustível em energia térmica e depois em energia mecânica.

A energia mecânica assim obtida, é então transmitida através do tirante ao veio de manivelas que fica animado de movimento de rotação, uma vez que uma das funções do sistema tirante manivela é aproveitar o movimento rectilíneo alternado do êmbolo para promover o movimento de rotação do veio de manivelas, a fim de poder ser utilizado para accionar no caso dos navios, um hélice, um gerador de corrente eléctrica, uma bomba, etc.

2 Ciclos de funcionamento das máquinas de combustão interna

2.1 Introdução aos ciclos de funcionamento

Como já foi referido, os ciclos de funcionamento das máquinas de combustão interna são constituídos pela série de operações e de transformações físicas e químicas (compressão, combustão, expansão, transmissão de calor para o exterior do cilindro, atritos diversos, etc.) a que o fluído motor é submetido durante a sua passagem através de cada um dos seus cilindros.

Estes fenómenos são bastante complexos, e por isso procura-se analisá-los através da sua comparação com as concepções em que se fundamentam os ciclos teóricos.

Por outro lado, o ciclo de funcionamento de um motor está intimamente relacionado com o número de cursos que o êmbolo tem de percorrer para a sua realização. Assim, diz-se que um ciclo é a 2 ou a 4 tempos conforme seja necessário o êmbolo percorrer respectivamente 2 ou 4 cursos para que se realize.

Em qualquer dos casos, para que estes ciclos de funcionamento tenham realização prática, é condição fundamental dotar as respectivas máquinas de combustão interna com sistemas capazes de efectuarem segundo a sequência apresentada, o conjunto de operações a seguir descritas:

ADMISSÃO

Motor de explosão: admissão de uma mistura de ar com combustível no cilindro, em proporções adequadas para favorecer a combustão.

Motor diesel: admissão apenas de ar no cilindro.

COMPRESSÃO

Motor de explosão: a mistura admitida no cilindro é submetida a uma taxa de compressão de $1/8$ a $1/13$, após o que o sistema de ignição comandada faz saltar uma faísca entre os eléctrodos de uma vela que inflama o combustível.

Motor diesel: o ar admitido no cilindro é submetido a uma elevada taxa de compressão de $1/14$ a $1/24$ suficiente para obter uma temperatura suficiente para auto-inflamar o combustível.

COMBUSTÃO E EXPANSÃO

Uma vez iniciada, a combustão é extremamente rápida nos motores de explosão e mais lenta e gradual nos motores diesel; a combustão produz os gases cuja expansão deve ser aproveitada o mais possível para produzir trabalho.

EVACUAÇÃO

No final do ciclo, os gases de combustão devem ser completamente evacuados do cilindro, tanto do motor de explosão como diesel.

2.2 Ciclos reais de funcionamento

Como já vimos, os diagramas dos ciclos reais de funcionamento dos actuais motores podem ser obtidos em alguns casos através de aparelhos mecânicos e noutros por aparelhos electrónicos, os quais permitem registar em cada instante os valores das pressões nos cilindros em função dos respectivos volumes gerados pelos êmbolos.

Estes diagramas dos ciclos reais, ao contrário dos diagramas dos ciclos teóricos, reflectem por isso as condições concretas de funcionamento dos motores, isto é, as condições segundo as quais os seus ciclos de funcionamento se desenvolvem, tendo para o efeito em consideração os seguintes factores:

Variação do calor específico do fluido motor com a temperatura

Perdas de calor para o exterior do cilindro

Perdas devidas ao atrito do fluido motor

Demora na abertura e fecho das válvulas

Limitações da injeção de combustível

Atraso à inflamação de combustível

Evolução da combustão

Perdas através dos gases de evacuação

2.2.1 Efeitos da regulação concebida para os ciclos teóricos nos ciclos reais

Dado que as condições práticas de funcionamento dos motores, são bastante diferentes das que foram concebidas para os ciclos teóricos, é evidente que se adoptassem a regulação concebida para estes ciclos, os resultados seriam francamente desanimadores, tal como sucedeu nos primórdios da evolução dos motores.

Com efeito, se os motores adoptassem a regulação concebida para os respectivos ciclos teóricos (regulação teórica), isto é, se as válvulas de admissão e de evacuação abrissem e fechassem nos PMS e a injeção e inflamação respectivamente nos motores diesel e de explosão, se iniciassem quando o êmbolo na compressão atingisse o PMS, o **trabalho útil** (*representado pela área útil dos diagramas reais*) que se obteria, seria bastante inferior ao trabalho útil (representado pela área útil dos respectivos diagramas teóricos) tal como pode observar-se nos diagramas a seguir apresentados.

MOTOR DIESEL A 4 TEMPOS

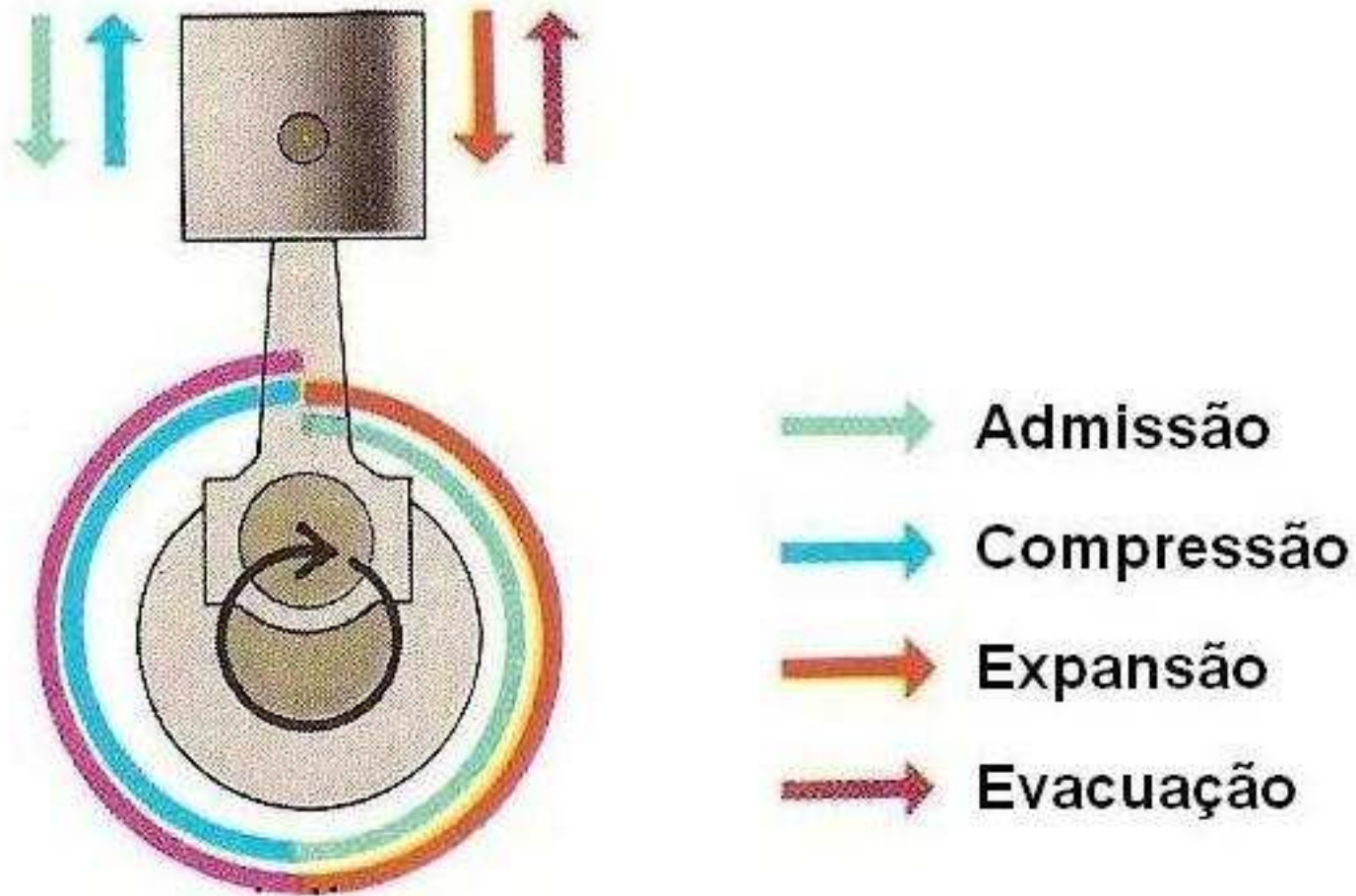
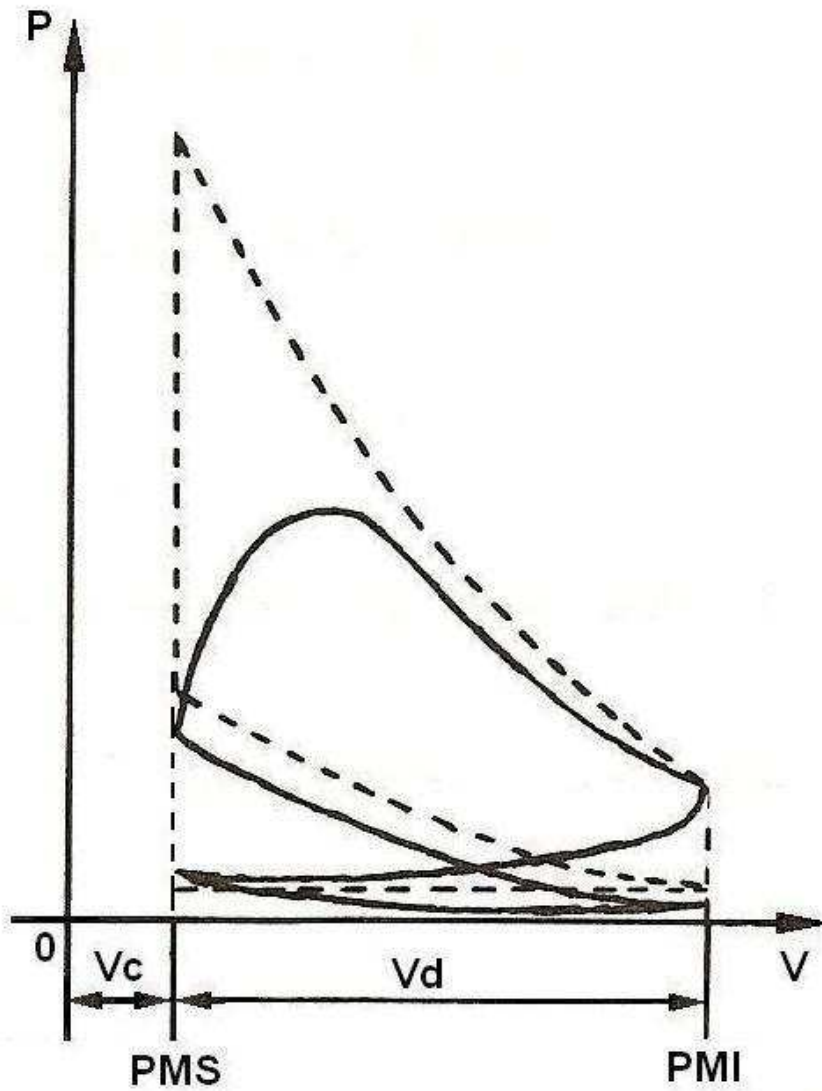
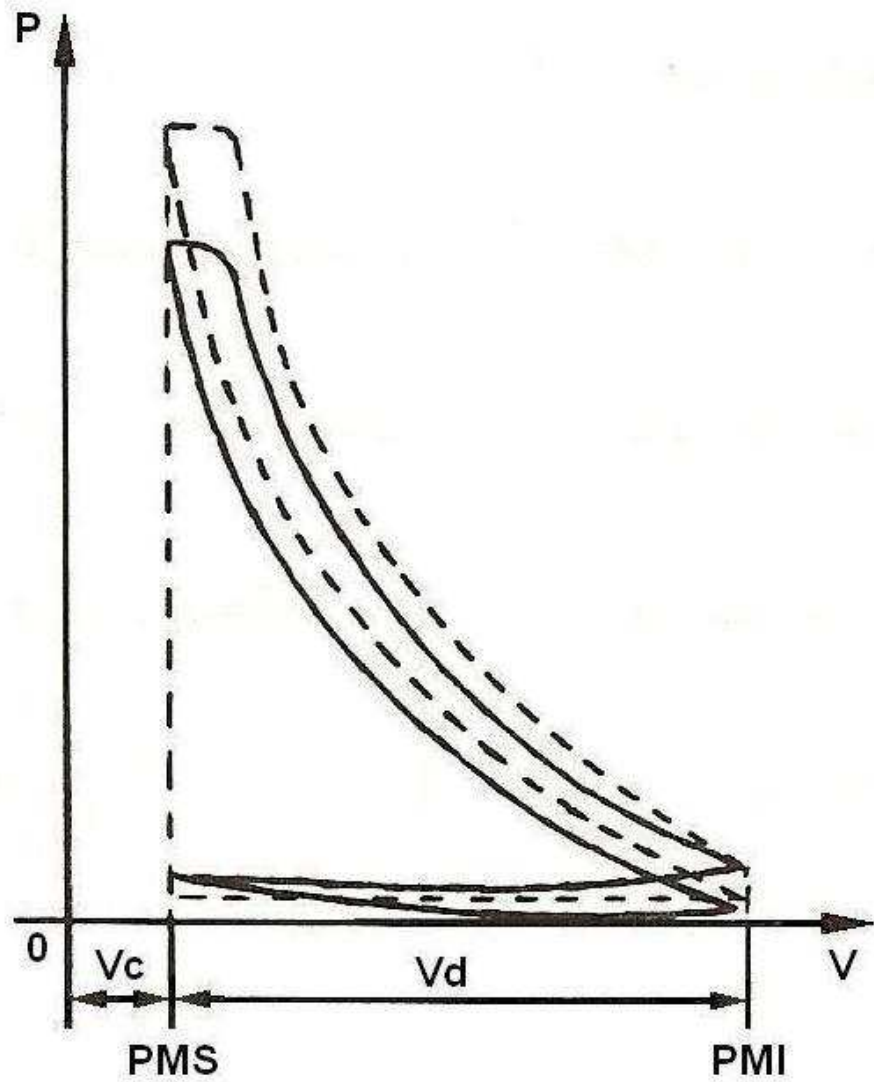


Diagrama em espiral de regulação teórica sem cruzamento de válvulas



- Ciclo teórico de explosão a 4 tempos
- Ciclo real de explosão a 4 tempos com regulação teórica



- Ciclo teórico diesel a 4 tempos
- Ciclo real diesel a 4 tempos com regulação teórica

Como a área útil do diagrama é proporcional ao trabalho útil desenvolvido durante o ciclo, é evidente que esta diminuição de área se traduz numa diminuição de rendimento do ciclo e consequentemente do motor.

Fica assim demonstrada a necessidade de alterar a regulação concebida para os ciclos teóricos, por forma a que o rendimento dos diagramas reais se aproxime o mais possível do rendimento dos respectivos diagramas teóricos.

Várias têm sido as alterações experimentadas ao longo dos tempos na regulação dos motores, para atingir tal objectivo, porém algumas sem sucesso, pelo que foram abandonadas, sendo consensual hoje em dia adoptarem-se as seguintes:

Válvulas de admissão: avanço à abertura e atraso ao fecho em relação aos PMs.

Inflamação (motores de explosão) e **injecção e inflamação** (motores diesel): avanço em relação ao **PMS**

Válvulas de evacuação: avanço à abertura e atraso ao fecho em relação aos PMs.

Do conjunto de alterações apresentadas, resultam os diagramas dos ciclos reais de funcionamento dos motores de explosão e diesel actuais, apresentados nas figuras seguintes.

MOTOR DIESEL A 4 TEMPOS

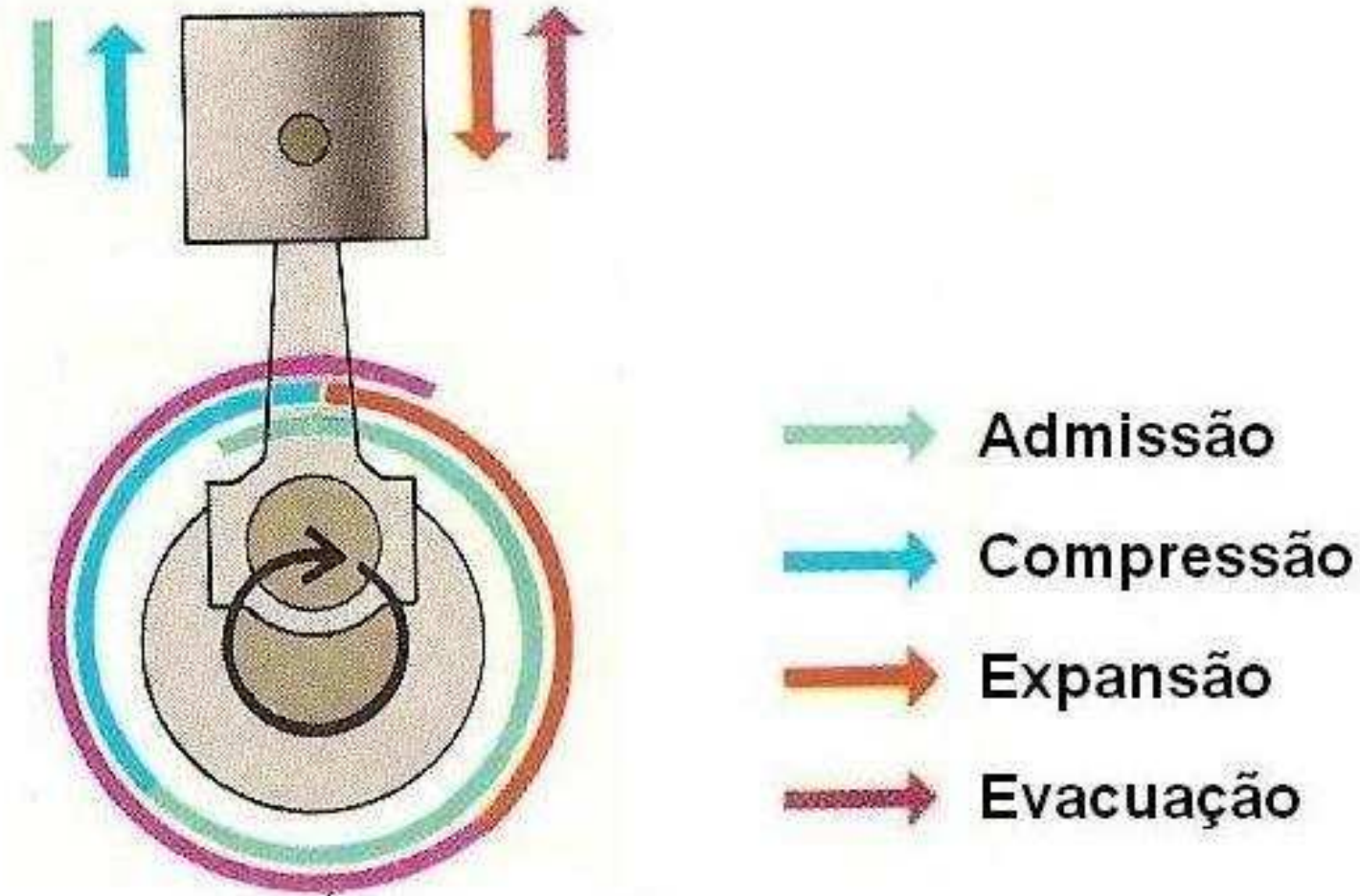
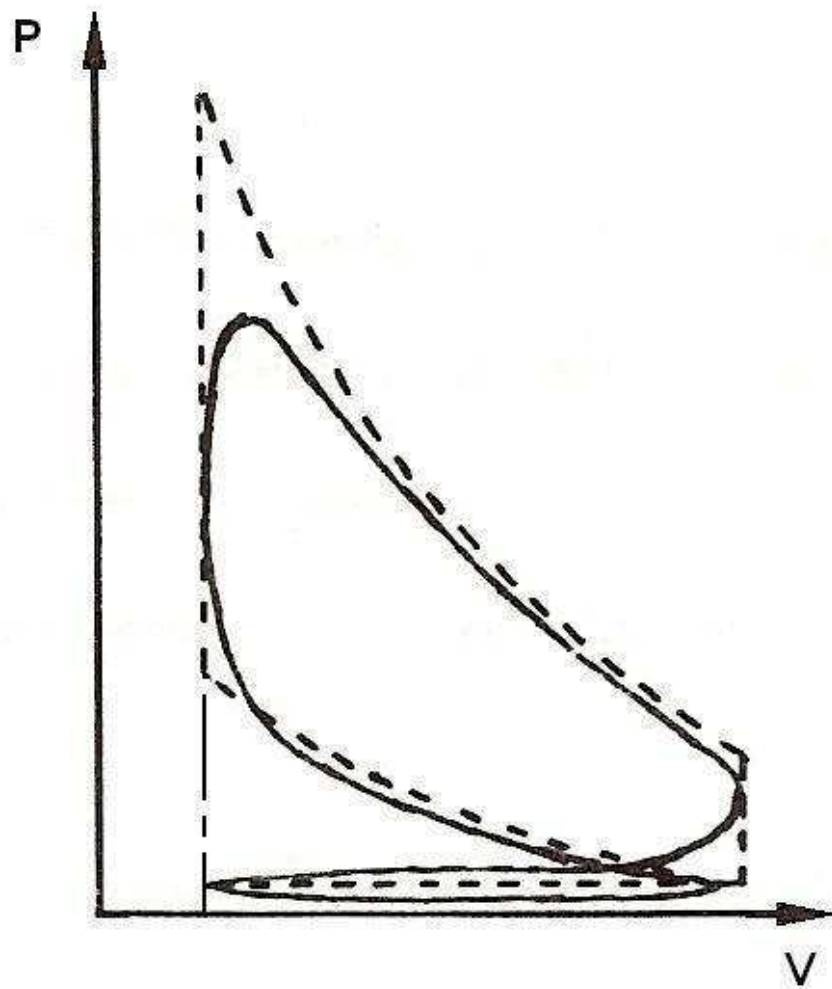
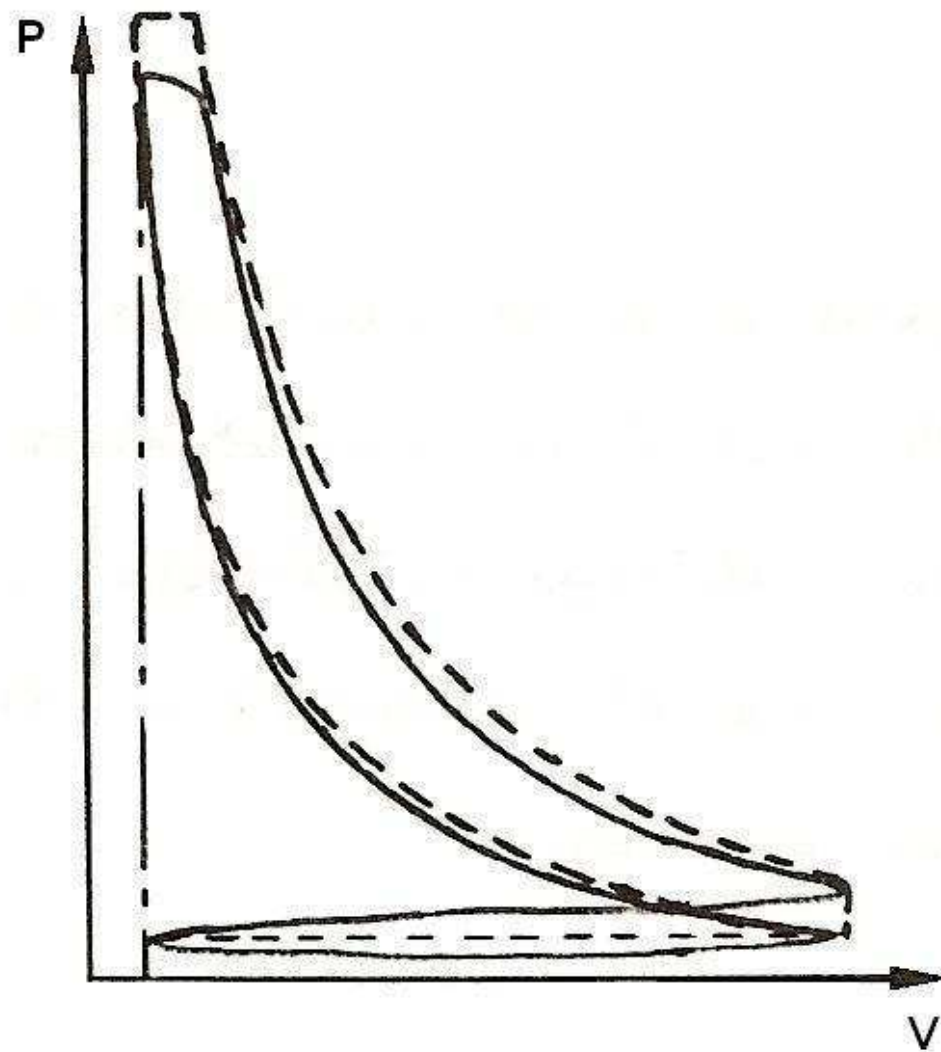


Diagrama em espiral de regulação prática com cruzamento de válvulas



- Ciclo teórico de explosão a 4 tempos
- Ciclo real de explosão a 4 tempos com regulação prática



- Ciclo teórico diesel a 4 tempos
- Ciclo real diesel a 4 tempos com regulação prática

Estes diagramas reais aproximam-se muito mais dos diagramas teóricos, do que, como já vimos, os que resultariam da adopção da regulação teórica. Como conclusão, importa referir que cada motor requer uma regulação adequada às suas características, sendo a velocidade de rotação e a potência desenvolvida, os factores que mais influenciam a pesquisa dos avanços e atrasos angulares que proporcionam o melhor desempenho.

2.2.3 Ciclo real de funcionamento do motor de explosão a quatro tempos

As operações deste ciclo real de funcionamento, desenvolvem-se ao longo de mais de duas voltas completas do veio de manivelas, isto é, durante mais de quatro cursos do êmbolo, e compreendem:

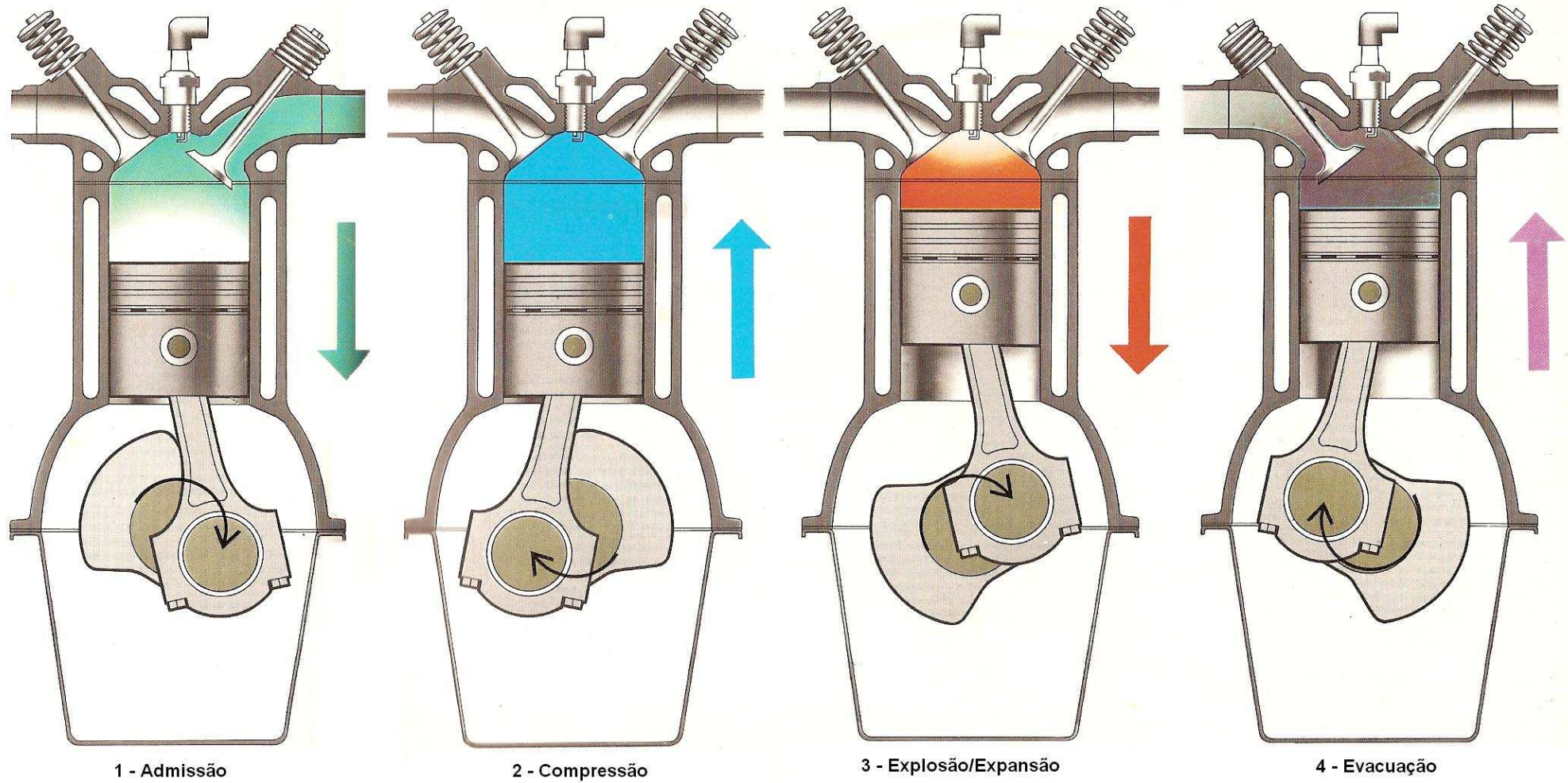
1 – Admissão da mistura de ar e combustível no cilindro nos motores com carburador e de injeção indirecta, sendo neste caso o combustível injectado nas condutas de admissão; admissão primeiro do ar e depois do combustível o qual é injectado no cilindro na fase inicial da compressão, nos motores com injeção directa de combustível nos cilindros.

2 – Compressão da mistura de ar e combustível pelo êmbolo

3 – Ignição do combustível na fase final de compressão, seguida de combustão extremamente rápida e da consequente expansão dos gases libertados, que deslocam o êmbolo para o PMI.

4 – Evacuação, escape ou expulsão dos gases do cilindro

MOTOR DE EXPLOSÃO A 4 TEMPOS



Os quatro tempos do motor de explosão

2.2.4 Ciclo real de funcionamento do motor diesel a 4 tempos

As operações deste ciclo de funcionamento desenvolvem-se ao longo de mais de duas voltas completas do veio de manivelas, sendo por isso necessários à sua realização um pouco mais de quatro cursos do êmbolo.

A sua realização compreende as seguintes operações:

1 – Admissão do ar no cilindro

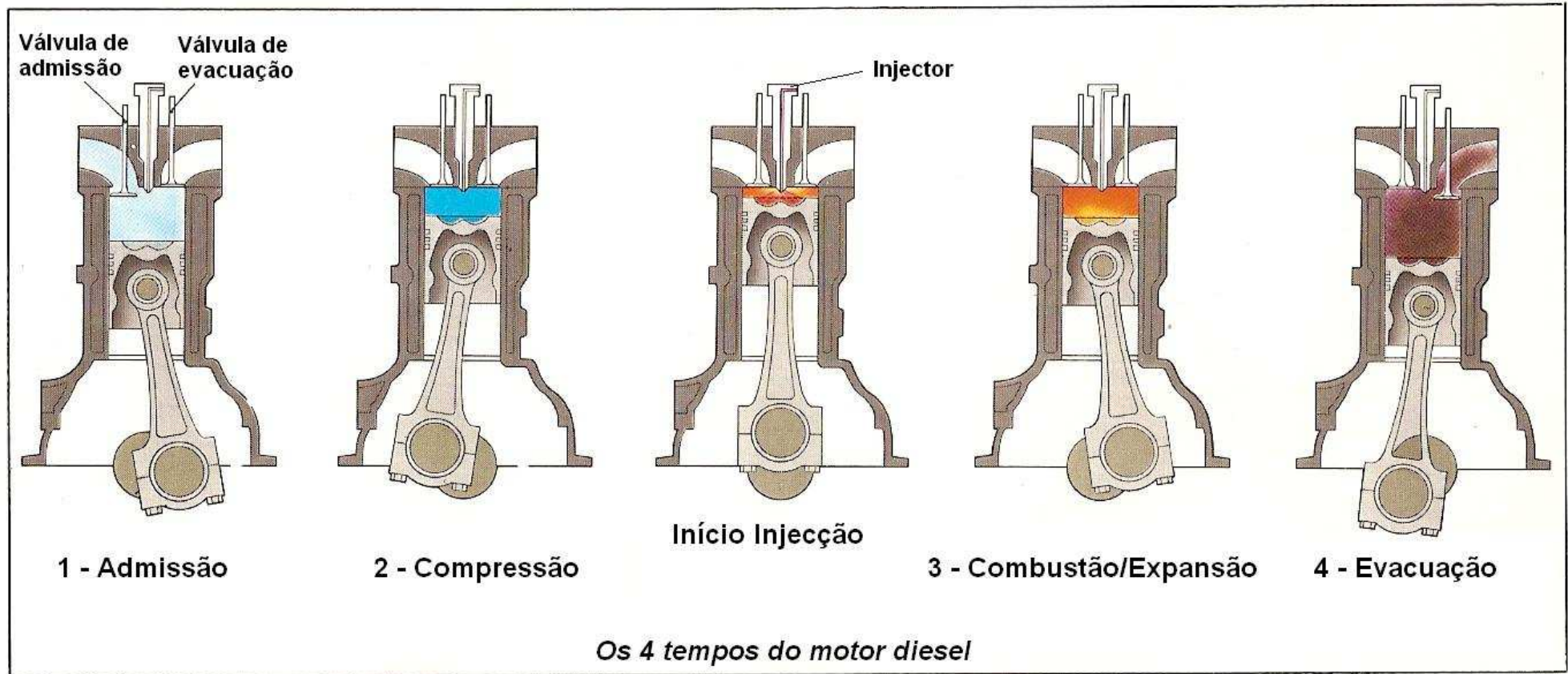
2 – Compressão do ar pelo êmbolo

3 – Injecção do combustível no cilindro, iniciando-se antes do êmbolo atingir o PMS, sendo de imediato seguida da combustão e da expansão dos gases libertados os quais deslocam o êmbolo para o PMI.

4 – Evacuação, escape ou expulsão dos gases do cilindro

Os 4 tempos do ciclo real de funcionamento do motor diesel, são normalmente designados da seguinte forma: **Admissão; Compressão; Expansão; Evacuação.**

MOTOR DIESEL A 4 TEMPOS



2.2.4.1 Desenvolvimento do ciclo real de funcionamento do motor diesel a 4 tempos

Fase de admissão: antes de se iniciar o curso de admissão, já a válvula de admissão se encontra aberta, o que significa que abre um pouco antes do êmbolo atingir o ponto morto superior, portanto ainda durante a fase de evacuação dos gases do ciclo anterior.

Por outro lado, a válvula de escape ou de evacuação, apenas fecha um pouco depois do êmbolo passar pelo ponto morto superior, portanto já com o êmbolo no curso de admissão a deslocar-se para o ponto morto inferior.

A abertura antecipada da válvula de admissão, antes do êmbolo atingir o ponto morto superior, e o fecho atrasado da válvula de evacuação, depois do êmbolo passar pelo ponto morto superior, permitem que durante um certo número de graus de deslocamento angular do veio de manivelas, as válvulas de admissão e de evacuação do cilindro estejam simultaneamente abertas, isto é, o **cruzamento de válvulas**, o qual promove uma melhor evacuação dos gases do cilindro, bem como a admissão de uma maior carga de ar.

Uma vez fechada a válvula de evacuação, o êmbolo continua a deslocar-se para o ponto morto inferior, gerando uma depressão que aspira o ar fresco para o interior do cilindro através da válvula de admissão no caso do motor atmosférico. Se o motor for sobrealimentado, o ar será introduzido no cilindro sobretudo devido à acção do respectivo compressor.

A fase de admissão termina com o fecho da válvula de admissão, o que sucede apenas depois do êmbolo inverter o movimento no **PMI** e percorrer parte do curso em direcção ao **PMS**.

Fase de compressão: Inicia-se após o fecho da válvula de admissão, e termina quando o êmbolo atinge o ponto morto superior. No final da compressão, conforme a relação de compressão e o grau de sobrealimentação adoptados, o ar fortemente comprimido pode atingir temperaturas da ordem dos **550 °C aos 650 °C** e pressões de compressão de **60 a 100 bar**.

Nestas condições, o combustível comprimido pela bomba de injeção a elevadas pressões (300 a 2000 bar), é devidamente pulverizado no interior do cilindro através de um ou mais injectores, auto-inflamando-se rapidamente.

Pode desenvolver-se então durante a combustão, conforme o tipo de motor, uma pressão no cilindro entre **120** e mais de **200 bar** e uma temperatura que pode ultrapassar os **1500 °C**.

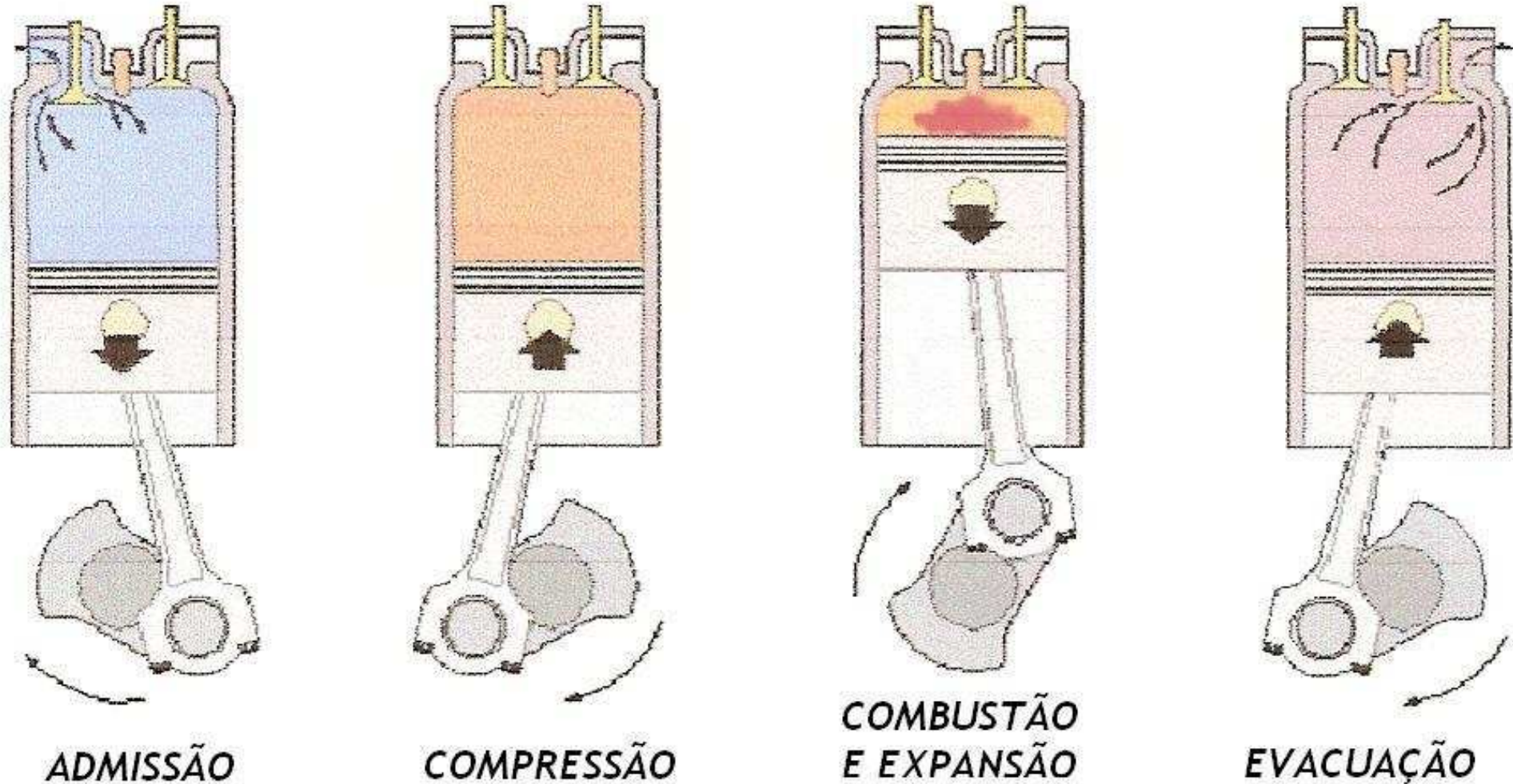
Fase de expansão: no início do deslocamento do êmbolo para o **PMI**, podem ocorrer em simultâneo a injeção, a combustão e a expansão até cessar a injeção de combustível. Depois prossegue apenas a expansão que termina quando abrir a válvula de evacuação. Durante esta fase, a força expansiva dos gases, empurra o êmbolo para o ponto morto inferior, impulsionando assim a rotação do veio de manivelas, por forma a produzir trabalho útil.

Fase de evacuação: inicia-se com a abertura da válvula de evacuação, normalmente um pouco antes do êmbolo atingir o PMI, e prolonga-se durante o deslocamento do êmbolo para o ponto morto superior, o qual força os gases a sair do cilindro através da válvula de evacuação, terminando apenas após a inversão do movimento do êmbolo, portanto já com este a deslocar-se para o PMI, tendo por isso já decorrido número de graus de deslocamento angular do veio de manivelas.

Do exposto conclui-se que o ciclo real de funcionamento de um motor, começa com o início da abertura da válvula de admissão e termina com o fim do fecho da válvula de evacuação, o que significa que devido ao avanço à abertura da válvula de admissão e ao atraso ao fecho da válvula de evacuação, **excede largamente os 720 ° de deslocamento angular do veio de manivelas e portanto os 4 cursos do êmbolo, concebidos para o desenvolvimento do ciclo teórico.**

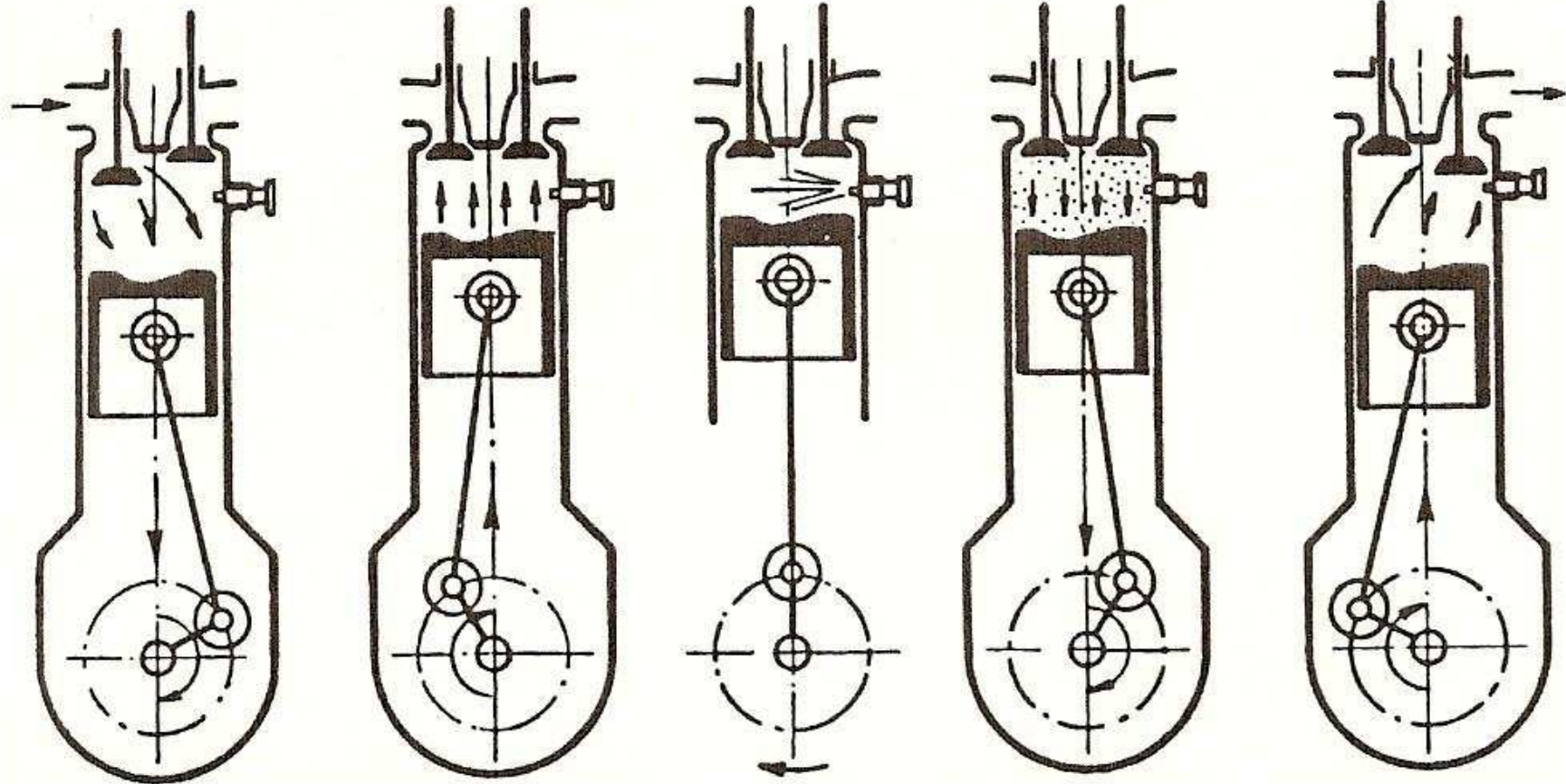
Importa ainda referir que as válvulas de admissão e de evacuação dos motores diesel a quatro tempos convencionais, são normalmente accionadas mecanicamente através de um veio de ressaltos que roda a metade da velocidade do veio de manivelas que o acciona de uma forma sincronizada.

MOTOR DIESEL A 4 TEMPOS



Desenvolvimento do ciclo real de funcionamento do motor diesel a 4 tempos

MOTOR DIESEL A 4 TEMPOS



ADMISSÃO

COMPRESSÃO

INJEÇÃO

COMBUSTÃO
EXPANSÃO

EVACUAÇÃO

1º Tempo

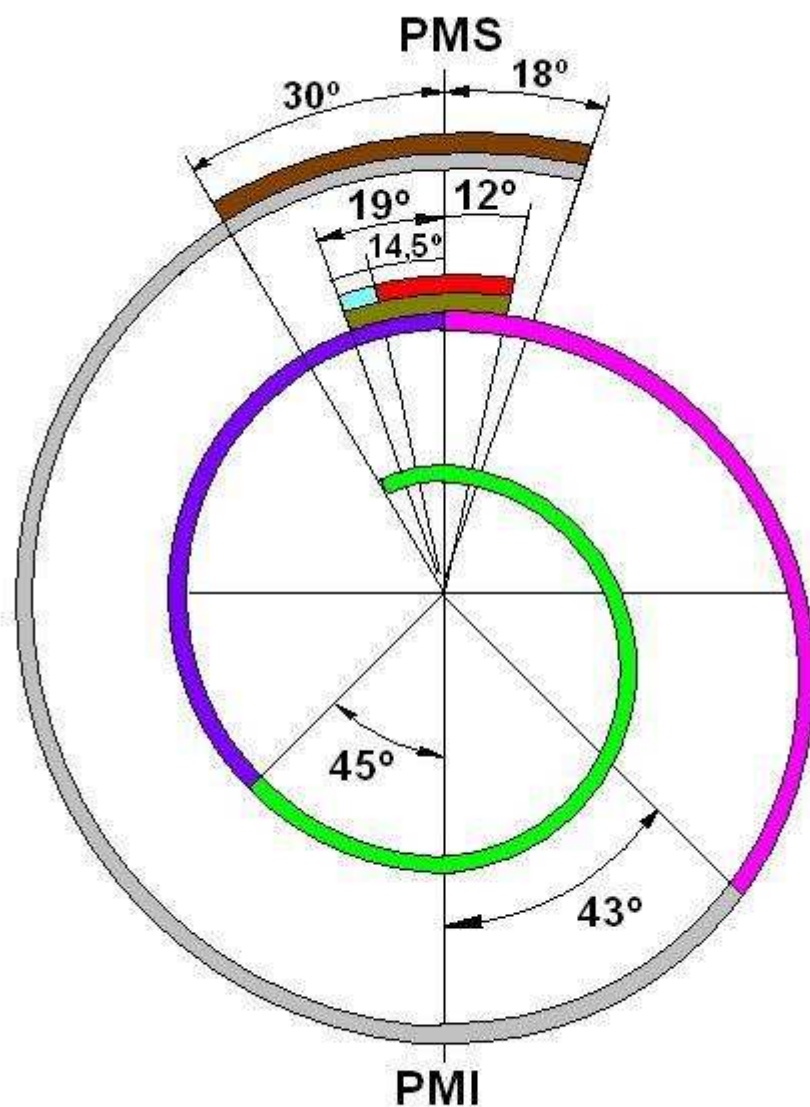
2º Tempo

3º Tempo

4º Tempo

Desenvolvimento do ciclo real de funcionamento do motor diesel a 4 tempos

MOTOR DIESEL A 4 TEMPOS



- ADMISSÃO** $(30 + 180 + 45) = 255^\circ$
- COMPRESSÃO** $(180 - 45) = 135^\circ$
- Injecção** $(19 + 12) = 31^\circ$
- Atraso Inflamação** $4,5^\circ$
- Combustão** $(31 - 4,5) = 26,5^\circ$
- Expansão** $(180 - 43) = 137^\circ$
- Evacuação** $(43 + 180 + 18) = 241^\circ$
- Cruzamento válvulas** $(30 + 18) = 48^\circ$

Diagrama em espiral de regulação prática

O ciclo real de funcionamento do motor diesel a quatro tempos representa-se através de um diagrama do tipo a seguir apresentado.

MOTOR DIESEL A 4 TEMPOS

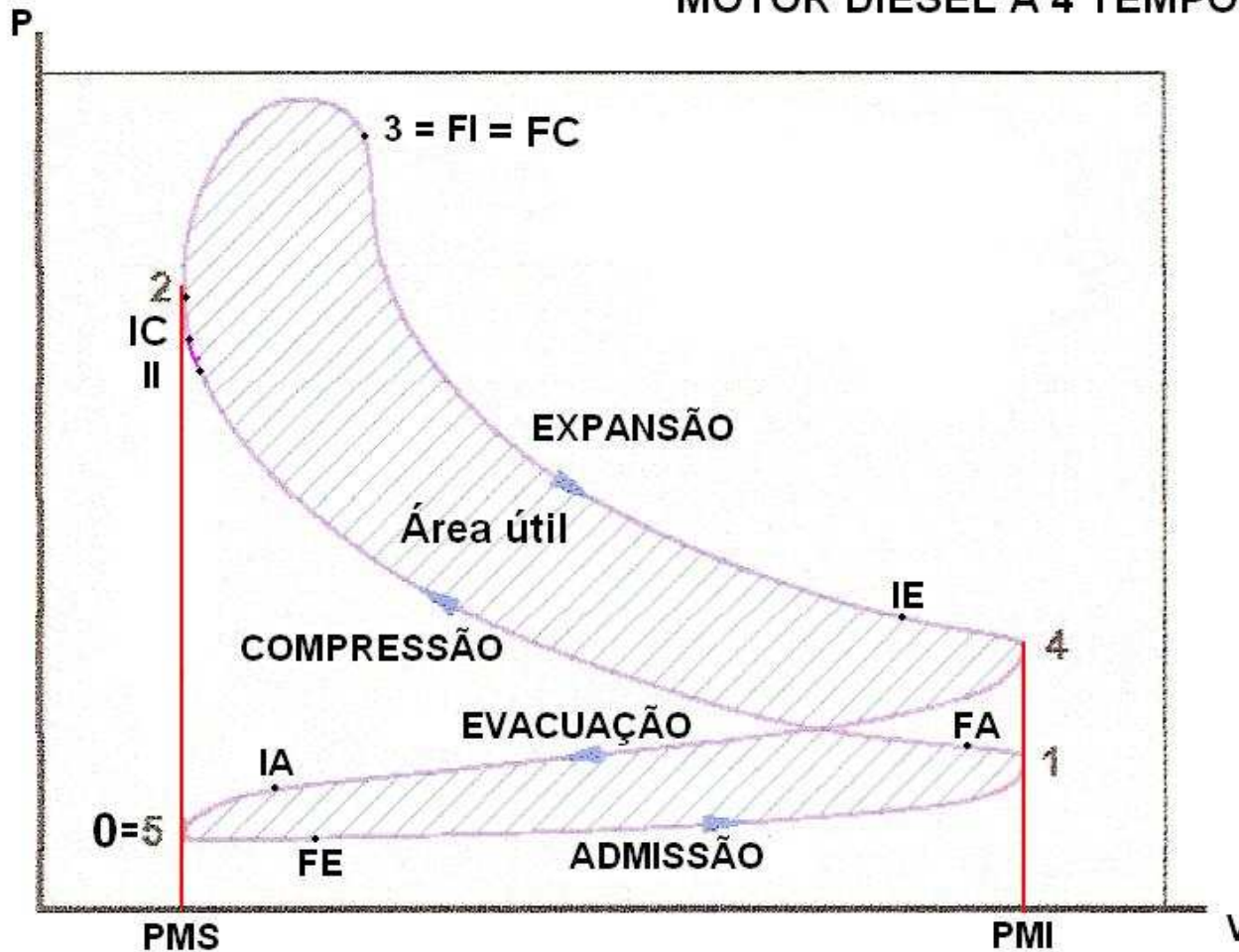


Diagrama real do ciclo de funcionamento

Teórico	Real	
0 → 1	Admissão	IA → FA
1 → 2	Compressão	FA → 2
2 → 3	Injecção	II → 3 = FI
2 → 3	Combustão	IC → 3 = Fc
2 → 4	Expansão	2 → IE
4 → 5	Evacuação	IE → FE

IA - Início da admissão
 FA - Fim da admissão
 II - Início da injecção
 IC - Início da combustão
 FI - Fim da injecção
 FC - Fim da combustão
 IE - Início da evacuação
 FE - Fim da evacuação
 (IC - II) - Atraso à inflamação

2.2.5 Comparação entre os ciclos reais dos motores diesel e de explosão a 4 tempos

TEMPO	MOTORES DIESEL	MOTORES DE EXPLOSÃO
ADMISSÃO	Admitem apenas ar no cilindro	Os motores com carburador e de injeção indirecta, admitem uma mistura de ar e combustível nos cilindros. Os motores de injeção directa admitem primeiro o ar, sendo o combustível injectado pulverizado após o fecho da válvula de evacuação.
COMPRESSÃO	O ar admitido no cilindro é comprimido pelo êmbolo a elevada pressão para atingir a temperatura suficiente para auto-inflamar o combustível, que começa a ser injectado no final da compressão, inflamando-se normalmente antes do êmbolo atingir o PMS	A mistura de ar e combustível é comprimida pelo êmbolo a uma pressão moderada correspondente à relação de compressão do motor. A ignição comandada, gera uma faísca na vela de ignição, antes do êmbolo atingir o PMS e o combustível inflama-se
COMBUSTÃO E EXPANSÃO	O combustível continua a ser pulverizado no seio do ar, ocorrendo de imediato a sua combustão que termina logo após o fim da injeção, produzindo-se assim os gases que empurram o êmbolo para o PMI	Imediatamente após a inflamação, ocorre a explosão, isto é, o combustível queima-se instantaneamente, os gases libertam-se e empurram o êmbolo para o PMI
EVACUAÇÃO	Os gases abandonam o cilindro primeiro devido à sua pressão ser superior à atmosférica e depois expulsos pelo êmbolo	Os gases abandonam o cilindro primeiro devido à sua pressão ser superior à atmosférica e depois expulsos pelo êmbolo

2.2.6 Ciclo real de funcionamento do motor diesel a 2 tempos

Os motores diesel a dois tempos, realizam as mesmas operações dos motores diesel a 4 tempos, em um pouco mais de **360 °** de deslocamento angular do veio de manivelas, isto é, durante mais de dois cursos do êmbolo. Para tal ser possível, foram eliminados os cursos de admissão e evacuação e utilizados novos processos e equipamentos para remoção dos gases de evacuação do cilindro e enchimento do mesmo com ar novo.

Tais equipamentos indispensáveis para permitirem o funcionamento destes motores, incluem hoje em dia compressores de ar de baixa pressão acoplados ao motor, accionados por motores eléctricos e pelos gases de evacuação, os quais fornecem o ar necessário para a lavagem e enchimento dos cilindros.

O ar de lavagem entra no cilindro através de janelas de lavagem praticadas na parte inferior da camisa, que são abertas e fechadas pelo próprio êmbolo durante o seu movimento, enquanto os gases de evacuação abandonam o cilindro através de janelas idênticas praticadas na parte inferior da camisa sobre as de janelas de lavagem ou na parede oposta da camisa, ou ainda de uma válvula de evacuação colocada no centro da cabeça do cilindro.

2.2.6.1 Desenvolvimento do ciclo real de funcionamento do motor diesel a 2 tempos

Curso de compressão: inicia-se com o êmbolo no ponto morto inferior, com as janelas de admissão ou de ar de lavagem abertas, tal como as janelas ou válvula de evacuação, o que permite que o ar novo sob pressão entre pelas janelas de ar de lavagem e expulse os gases através das janelas ou válvula de evacuação. Esta fase do ciclo é designada por **Lavagem**, a qual consiste na remoção dos gases do ciclo anterior pela carga de ar do ciclo seguinte.

Ao deslocar-se para o ponto morto superior, o êmbolo fecha as janelas de lavagem e de evacuação, sendo as válvulas de evacuação no caso de existirem, fechadas por outros meios, após o que se inicia a compressão da nova carga de ar no cilindro, a qual desenvolve pressões e temperaturas similares às dos motores diesel a 4 tempos, isto é, **550 a 650 °C**.

A injeção inicia-se com um certo avanço, isto é, um pouco antes do êmbolo no seu movimento ascendente chegar ao ponto morto superior, auto-inflamando-se o combustível uns milésimos de segundo depois, iniciando-se então a combustão que termina logo após o fim da injeção, o que pode suceder mesmo antes do êmbolo atingir o ponto morto superior ou depois, já com este a deslocar-se para o ponto morto inferior conforme o regime de funcionamento do motor.

Durante o curso de compressão do êmbolo, que termina quando este atinge o PMS, realizam-se portanto as seguintes operações do ciclo real de funcionamento: **evacuação dos gases do ciclo anterior através da lavagem; admissão e compressão da nova carga de ar, inflamação e parte ou a totalidade da combustão, conforme o regime de operação.**

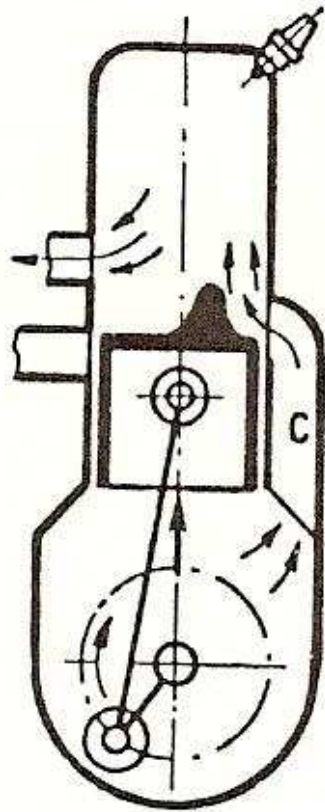
Curso de expansão: inicia-se com o êmbolo no ponto morto superior, portanto com as janelas de admissão e as janelas ou válvulas de evacuação fechadas. Durante a fase inicial de deslocamento do êmbolo para o **PMI**, se o motor estiver a operar a média ou elevada potência, ocorrem em simultâneo a injeção, a combustão e a expansão, verificando-se elevadas pressões no cilindro que poderão atingir os **140 bar** e temperaturas **superiores a 1500 °C**.

A partir do momento em que a combustão termina, apenas a expansão prossegue devido à acção dos gases produzidos que deslocam o êmbolo em direcção ao PMI, a qual termina quando o êmbolo abrir as janelas de evacuação ou a válvula de evacuação for aberta por comando próprio, sincronizado com a rotação do veio de manivelas. O êmbolo prossegue o seu movimento abrindo em seguida as janelas de admissão, altura em que se inicia o ciclo seguinte, e por fim atinge o **PMI**, efectuando-se durante este período a **lavagem do cilindro**, isto é a expulsão do mesmo dos gases através da entrada de ar novo, uma parte do qual vai ser utilizado na realização do ciclo seguinte.

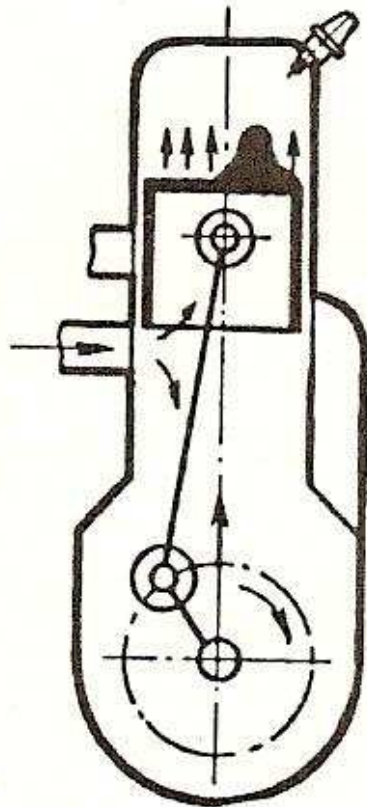
Conforme o regime de operação do motor diesel a dois tempos, durante o curso de expansão podem realizar-se as seguintes operações do ciclo real de funcionamento: **injeção, combustão e expansão em simultâneo, expansão isolada após o término da combustão, evacuação e lavagem.**

De referir ainda que o ciclo real de funcionamento do motor diesel a dois tempos começa com o início da abertura das janelas de admissão e termina com o fim do fecho das janelas ou da válvula de evacuação, após completada um pouco mais de uma rotação do veio de manivelas ou de dois cursos do êmbolo, o que em graus de deslocamento angular do veio de manivelas corresponde a um pouco mais dos **360° concebidos para o ciclo teórico.**

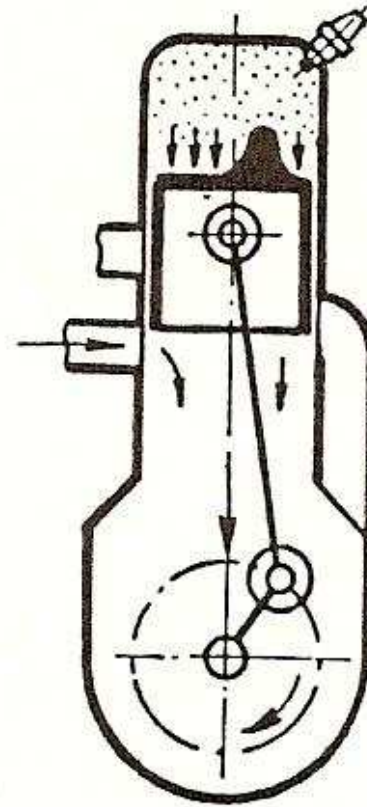
MOTOR DIESEL A 2 TEMPOS COM JANELAS



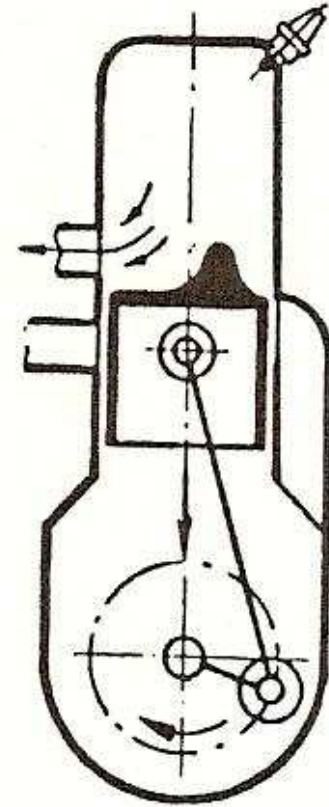
EVACUAÇÃO
ADMISSÃO



COMPRESSÃO



COMBUSTÃO
EXPANSÃO



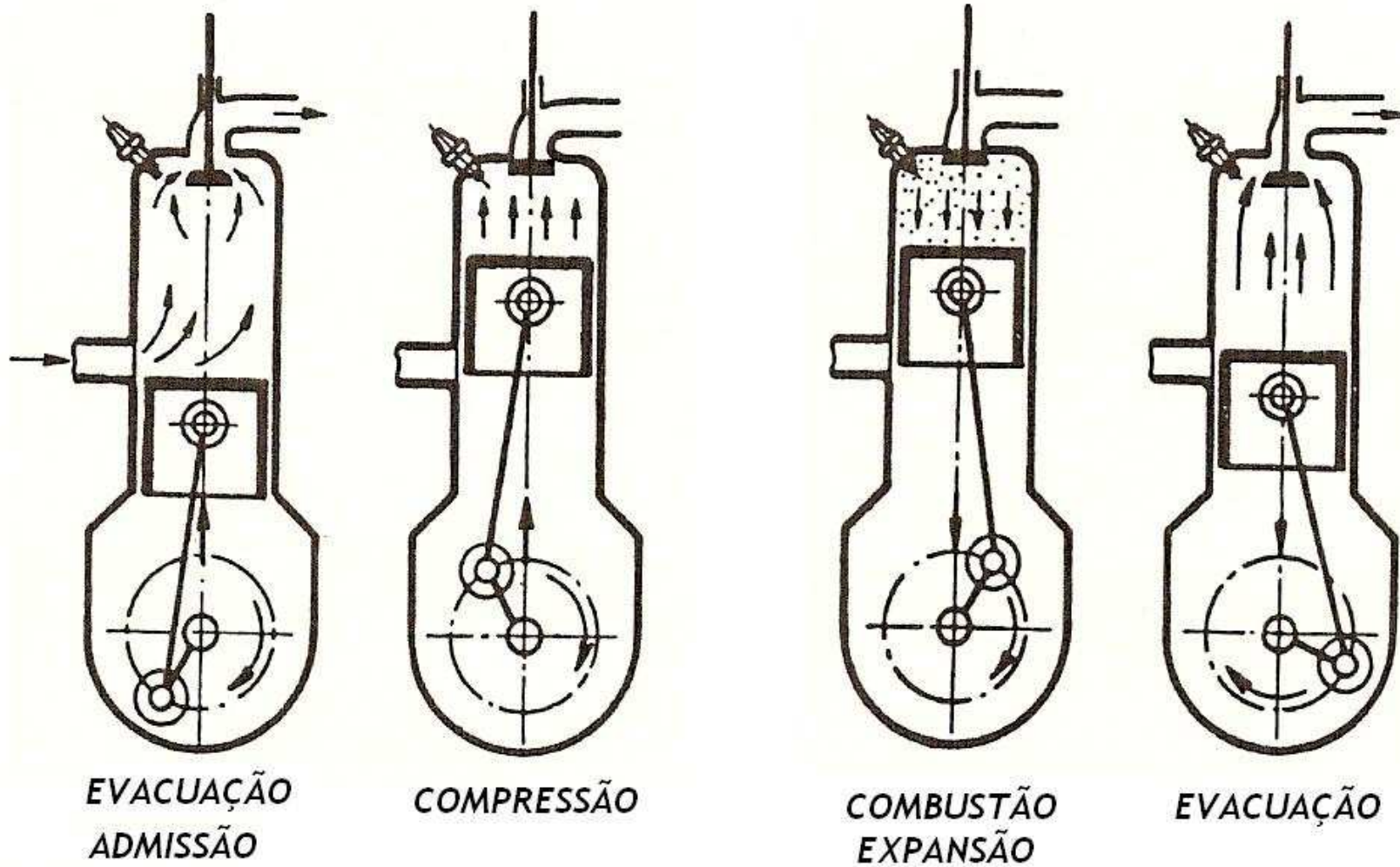
EVACUAÇÃO

Primeiro Tempo

Segundo Tempo

Desenvolvimento do ciclo real de funcionamento

MOTOR DIESEL A 2 TEMPOS COM JANELAS E VÁLVULAS

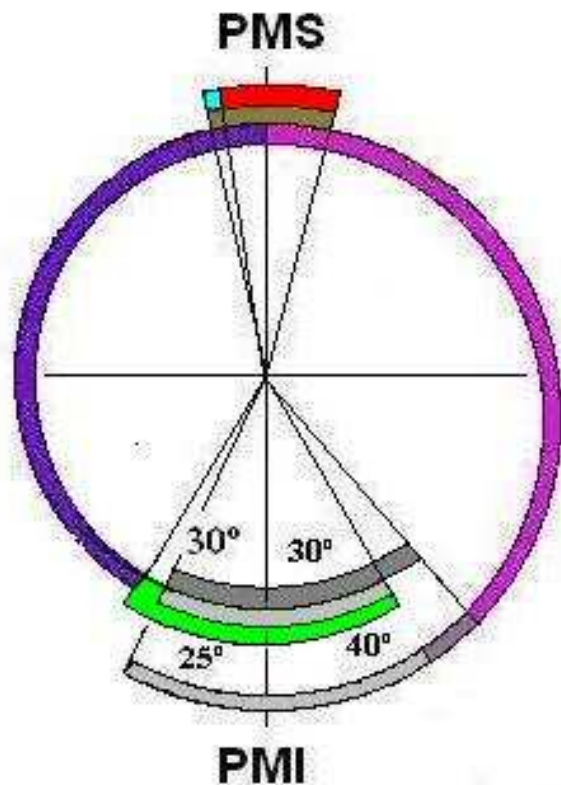


Primeiro Tempo

Segundo tempo

Desenvolvimento do ciclo real de funcionamento

MOTOR DIESEL A 2 TEMPOS COM VÁLVULAS E JANELAS



- Admissão** $(30 + 30) = 60^\circ$
- Lavagem** $(30 + 25) = 55^\circ$
- Compressão** $(180 - 30) = 150^\circ$
- Injecção** $(12 + 15) = 27^\circ$
- Atraso inflamação** 2°
- Combustão** $(27 - 2) = 25^\circ$
- Expansão** $(180 - 40) = 140^\circ$
- Evacuação** $(40 + 25) = 65^\circ$

Duração do ciclo real = $(30 + 180 + 180 + 25) = 415^\circ$

Diagrama em espiral de regulação prática

2.2.7 Comparação entre os ciclos reais diesel e de explosão a 2 tempos

TEMPOS	MOTORES DIESEL	MOTORES DE EXPLOSÃO
ADMISSÃO	Admitem apenas ar nos cilindros, o qual pode ser introduzido por bombas de ar de lavagem ou compressores, acoplados ou independentes	Admitem a mistura ar e combustível nos cilindros, através da câmara de manivelas que juntamente com o êmbolo e cilindro constituem a bomba de ar de lavagem
COMPRESSÃO	O ar admitido é comprimido pelo êmbolo a elevada pressão para atingir a temperatura suficiente para auto-inflamar o combustível, que começa a ser injectado e se inflama antes do êmbolo atingir o PMS	A mistura de ar e combustível é comprimida pelo êmbolo à pressão correspondente à relação de compressão. No final da compressão, um pouco antes do PMS, o sistema de ignição gera uma faísca na vela que inflama o combustível
COMBUSTÃO E EXPANSÃO	O combustível continua a ser pulverizado no seio do ar, queima-se de imediato e produzem-se os gases que empurram o êmbolo para o PMI	Imediatamente após a inflamação, ocorre a explosão, isto é, o combustível queima-se imediatamente, os gases libertam-se e empurram o êmbolo para o PMI
EVACUAÇÃO	Os gases abandonam o cilindro primeiro devido à sua pressão ser superior à atmosférica e depois expulsos pelo ar de lavagem	Os gases abandonam o cilindro primeiro devido à sua pressão ser superior à atmosférica e depois expulsos pela mistura de ar e combustível

3 Comparação dos motores diesel que operam segundo os ciclos a 2 e a 4 tempos

Apenas faz sentido comparar estes dois tipos de motores, quando podem concorrer para uma dada aplicabilidade, tal como por exemplo a propulsão de navios, etc.. Nesta perspectiva, indicam-se a seguir as vantagens e desvantagens da utilização dos motores diesel a dois tempos:

Vantagens:

Eliminação de todas as válvulas, ou pelo menos das de admissão

Funcionamento mais regular em consequência de desenvolver um tempo motor por cada rotação do veio de manivelas;

Maior rendimento e portanto um menor consumo de combustível, o qual sendo mais pesado, é também mais barato

Desvantagens:

Maior dificuldade de alimentação de ar e de evacuação dos gases dos cilindros, sendo necessário recorrer a meios próprios, para tal efeito;

Temperaturas de funcionamento mais elevadas sobretudo no caso dos motores mais rápidos

Grandes dimensões e peso, tal como se verifica nos motores com cruzeta

4 Comparação dos motores diesel com os de explosão com a mesma aplicabilidade

4.1 Vantagens dos motores diesel

1. **Maior economia de combustível** – Devido ao elevado grau de compressão em que se baseia o seu princípio de funcionamento, o rendimento térmico dos motores diesel é bastante superior ao dos motores de explosão, o que se traduz num menor consumo de combustível. A esta economia há ainda que adicionar a diferença de preço entre os combustíveis mais leves utilizados pelos motores de explosão e os mais pesados utilizados pelos motores diesel.
2. **Menor perigo de incêndio** – O motor diesel apresenta menores riscos de incêndio, dado os combustíveis que consome apenas emitirem vapores inflamáveis a partir de temperaturas de **80 °C**, enquanto a gasolina emite vapores inflamáveis a partir de temperaturas de **20 °C**.
3. **Menos sujeitos a avarias** – Dado serem mais resistentes do que os motores de explosão, estão menos sujeitos a avarias e têm uma maior vida útil.
4. **Menores emissões poluentes** – Quando forem correctamente operados e a manutenção for adequada os gases de evacuação emitidos pelos motores diesel são menos tóxicos

4.2 Desvantagens dos motores diesel

1. Maior custo – A aquisição do motor diesel é mais dispendiosa do que a de um motor de explosão equivalente, dada a sua maior robustez e o elevado custo do seu sistema de injeção de grande precisão.

2. Maior peso – A estrutura do motor diesel decorrente da robustez necessária para resistir aos elevados esforços provenientes do elevado grau de compressão inerente ao seu princípio de funcionamento, é bastante mais pesada do que a do motor de explosão equivalente.

3. Funcionamento mais ruidoso – Consequência das características do seu funcionamento, nomeadamente da forma como ocorre a combustão.

4. Arranque mais difícil – O maior peso dos órgãos móveis e o elevado grau de compressão, exigem um maior dispêndio de energia do sistema de arranque para o impulso inicial necessário para o arranque do motor.

5. Maiores dificuldades de aceleração – Devido ao maior peso e conseqüentemente à maior inércia dos órgãos móveis do motor diesel, a resposta às solicitações de aceleração é mais lenta.