

▪ **Motores alternativos**

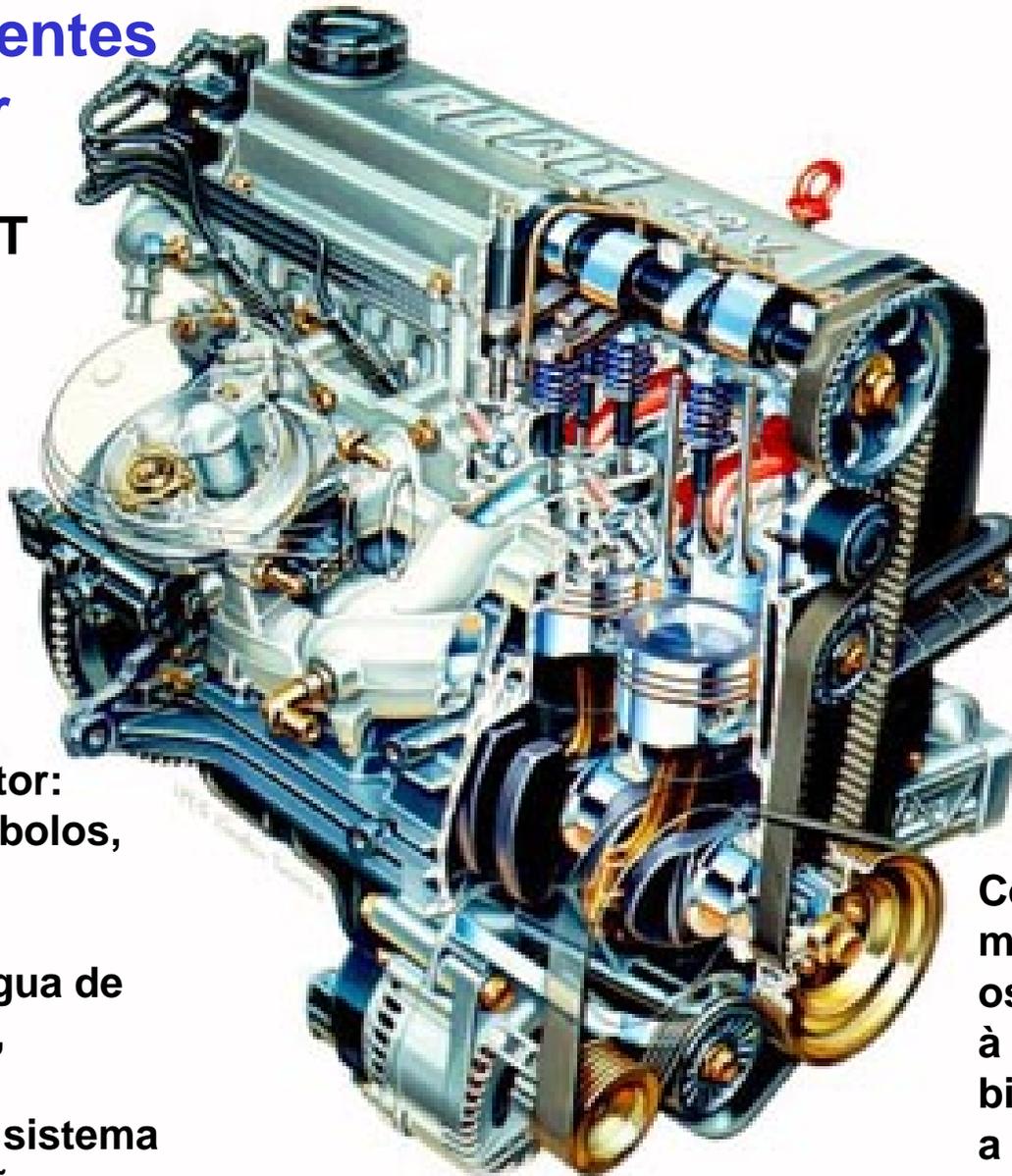
- características
- componentes, funcionamento
- sistemas de injeção de combustível
- motor turbinado
- motor Wankel
- áreas tecnológicas em desenvolvimento
- parâmetros operacionais e de projeto
- modelos termodinâmicos de ciclos motores: ciclos Otto, Diesel, Dual.
- parâmetros de performance
- emissão de poluentes

Características dos motores segundo sua aplicação

Tipo de motor	Utilização	Potência kW	IC ou Diesel	Tempos	Resfriamento
Veículos de passeio	Motocicletas Scooters	0.75 - 70	IC	2,4	Ar
	Carros pequenos	15 - 75	IC	4	Ar, água
	Carros grandes	75 - 200	IC	4	Ar, água
	Comerciais leves	35 - 150	IC, D	4	Ar, água
	Comerciais pesados	120 - 400	D	4	água
Veículos fora de estrada	Veículos leves (aeroportos, fazendas)	1,5 - 15	IC	2,4	Ar, água
	agricultura	3 - 150	IC, D	2,4	Ar, água
	Movimento de terra	40 - 750	D	2,4	água
	Militares	40 - 2000	D	2,4	água
Estrada de ferro	locomotivas	400 - 3.000	D	2,4	água
Marinhos	Fora de borda	0,4 - 75	IC	2	água
	Lanchas a motor	4 - 750	IC,D	4	água
	Barcos a motor	30 - 2.200	D	2,4	água
	Navios	3.500 - 22.000	D	2,4	água
Aeronaves	Aviões	45 - 2.700	IC	4	ar
	Helicópteros	45 - 1.500	IC	4	ar
Domésticos	Cortador de grama	0,7 - 3	IC	2,4	ar
Estacionários	Potência elétrica	35 - 22,000	D	2,4	água

Componentes do motor

Motor FIAT



Cabeçote do motor :
válvulas,
velas,
Balancim (controla a abertura das válvulas),
dutos de admissão e escapamento
câmaras de explosão

Correia de transmissão

Bloco do motor:
cilindros, êmbolos,
bielas

dutos para água de resfriamento,

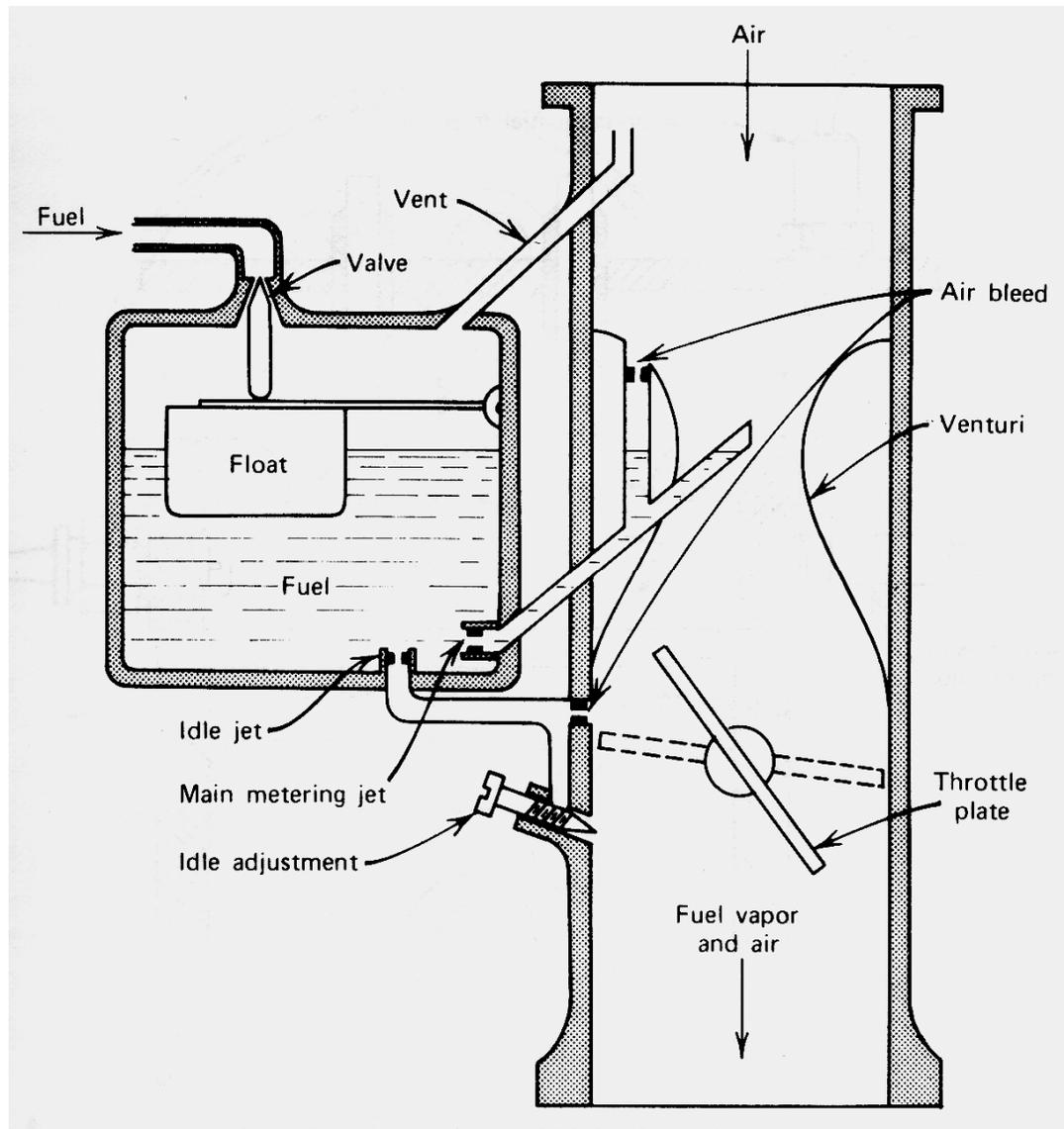
dutos para o sistema de lubrificação

Conjunto de árvores de manivelas,
os pistões estão ligados à árvore por meio das bielas,
a árvore está apoiada na base do bloco do motor

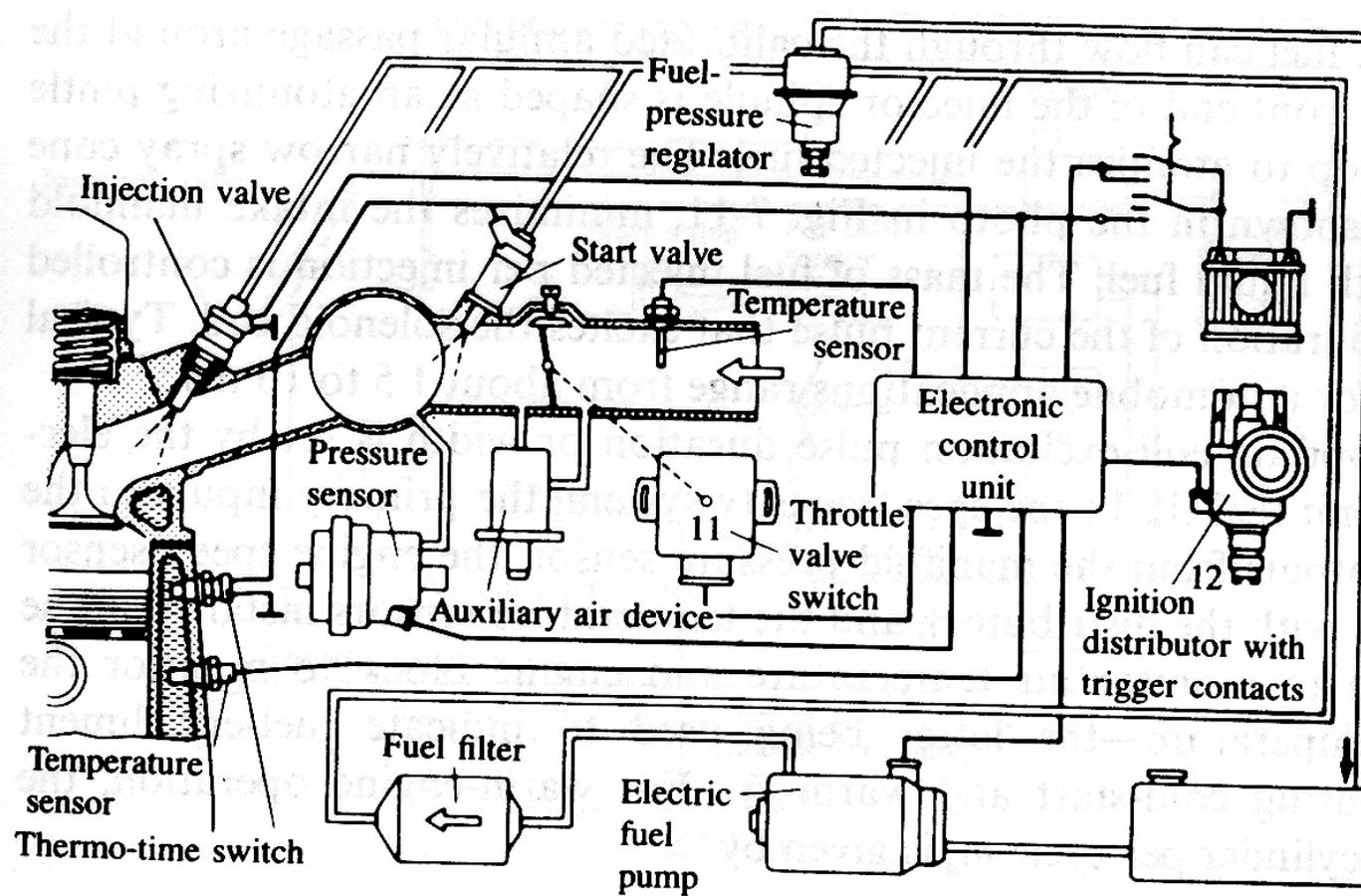
Carburador

princípio de

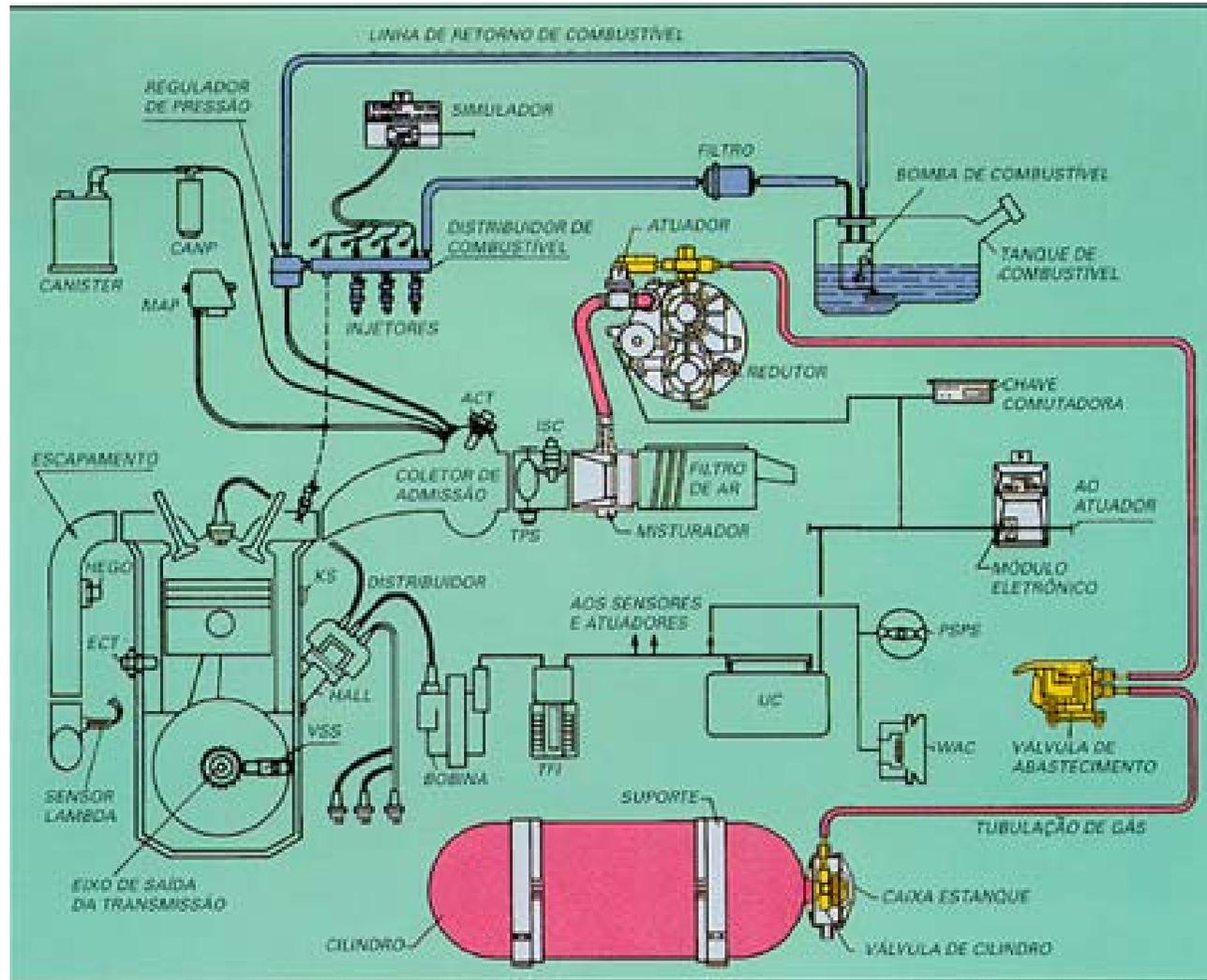
funcionamento



Sistema de Injeção eletrônica de combustível

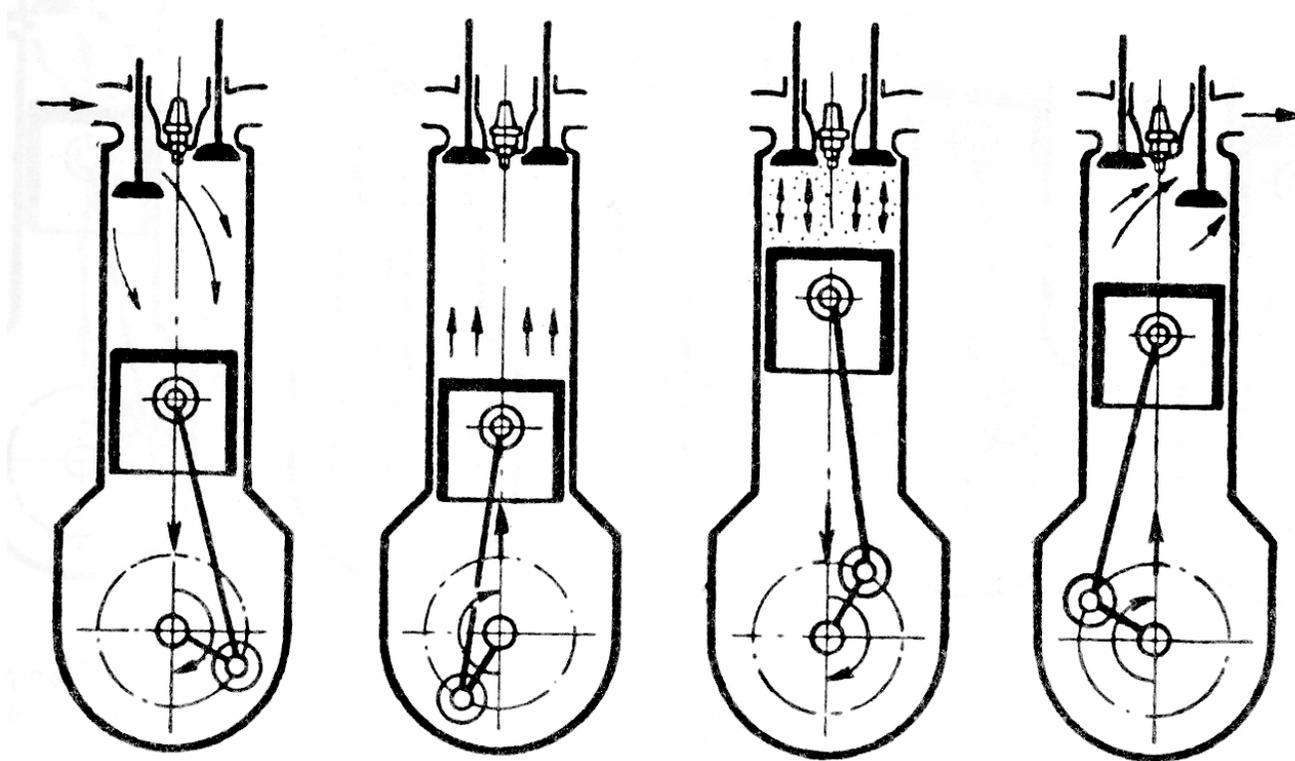


Sistema de alimentação de gás da Rodagás



MOTORES : CICLO OPERACIONAL

4 tempos



Aspiração

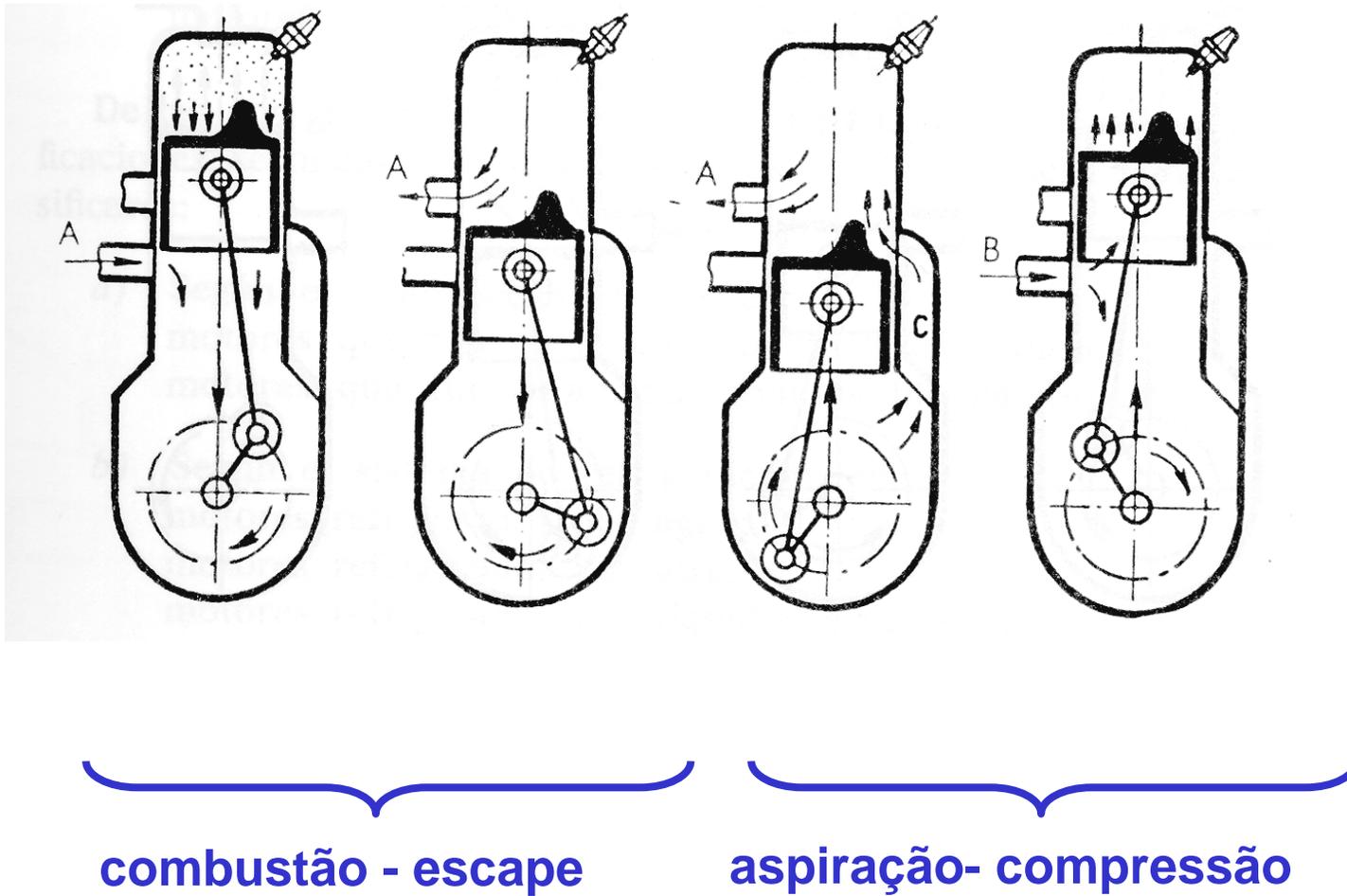
Compressão

Combustão

Escape

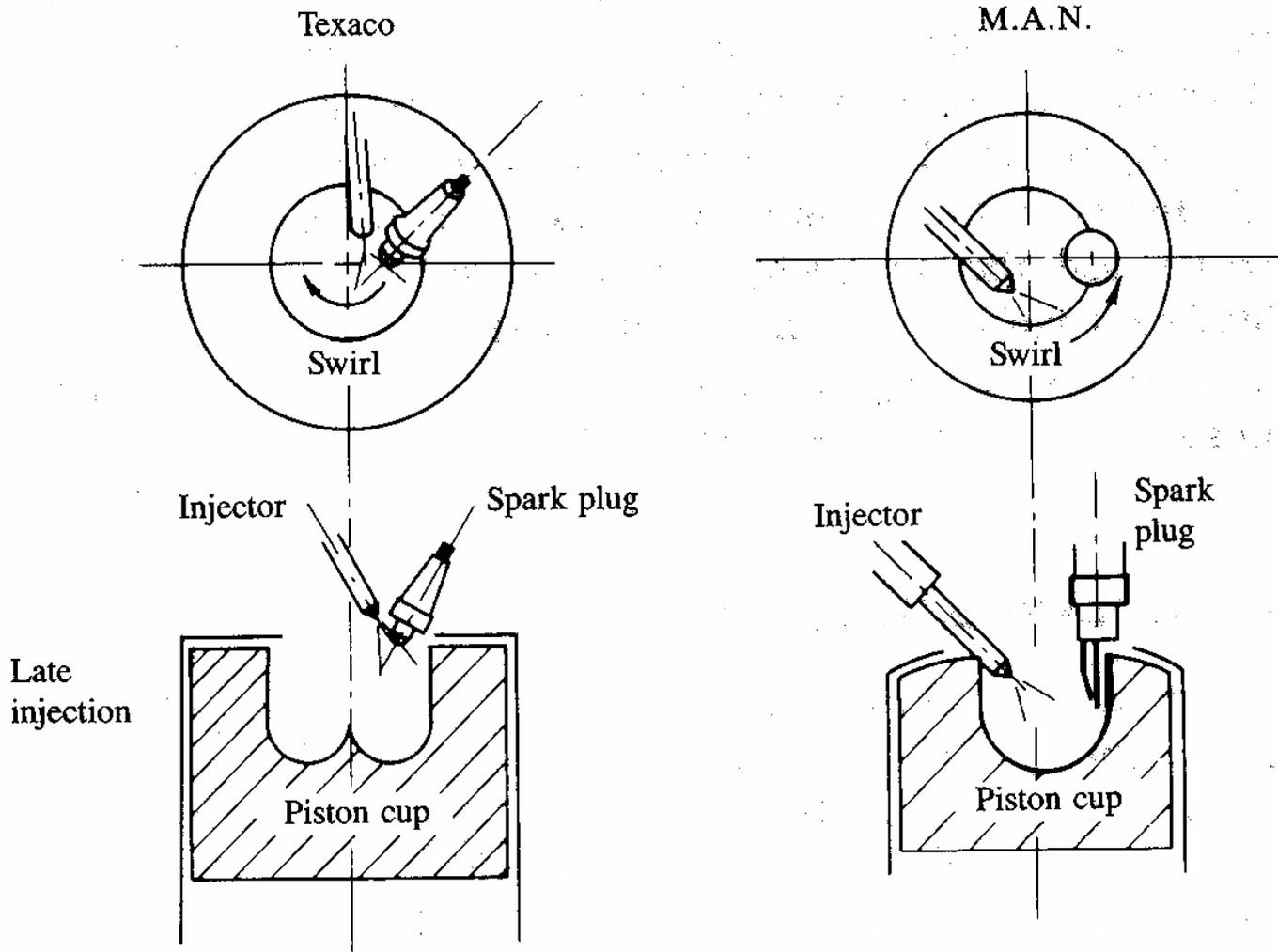
MOTORES : CICLO OPERACIONAL

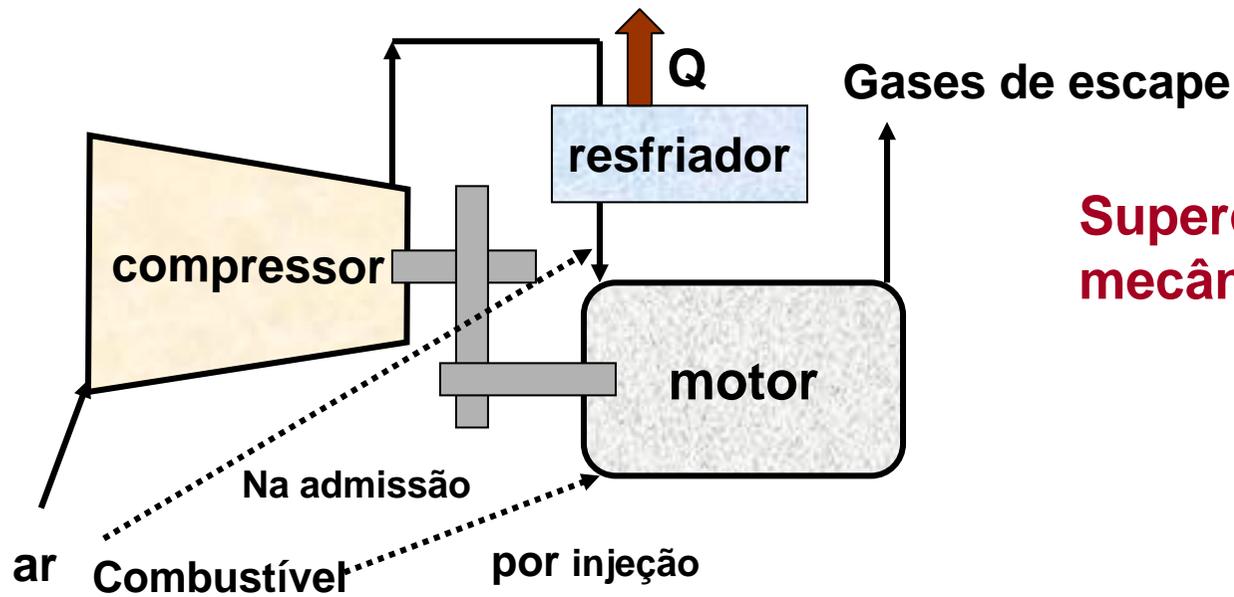
2 tempos com válvula de ignição



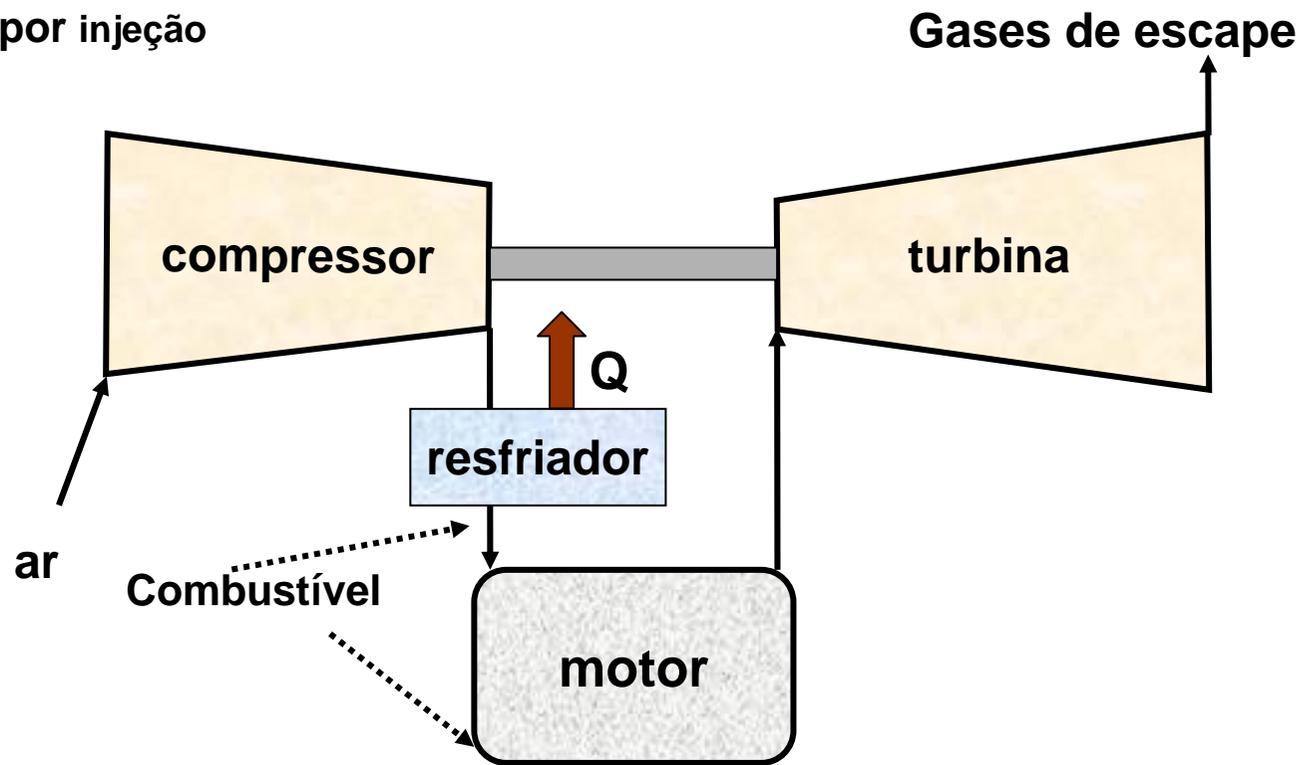
Ciclo diesel	Ciclo Otto	De carga estratificada
Na compressão, somente ar é comprimido na câmara	Na compressão é comprimida uma mistura de ar + combustível	Motores híbridos, tentam somar as vantagens dos outros dois
O ar é comprimido até atingir uma temperatura acima da de auto-ignição	O ar é comprimido a mais baixas pressões, a temperatura atingida fica abaixo da de autoignição	Trabalha com relação de pressão similar ao Diesel: 12 a 15 (melhora a eficiência)
O combustível é injetado (quase no final da corrida do pistão) e entra em autoignição	O combustível entra em ignição através de uma faísca	Injeção direta de combustível na câmara de combustão: evita "golpeteo"
Taxas de compressão altas	Taxas de compressão mais baixas	Ignição por centelha, evita ignição espontânea indesejada
Aceita combustível menos "nobre" : óleo Diesel	Combustível: gasolina, álcool	O controle de potência do motor é realizado através do controle de combustível injetado por ciclo
Ciclo a ar ideal: o calor entra a pressão constante	Ciclo a ar ideal: O calor entra a volume constante	Podem operar com combustíveis menos "nobres"

**Câmara de combustão :
motor de carga estratificada de injeção direta**

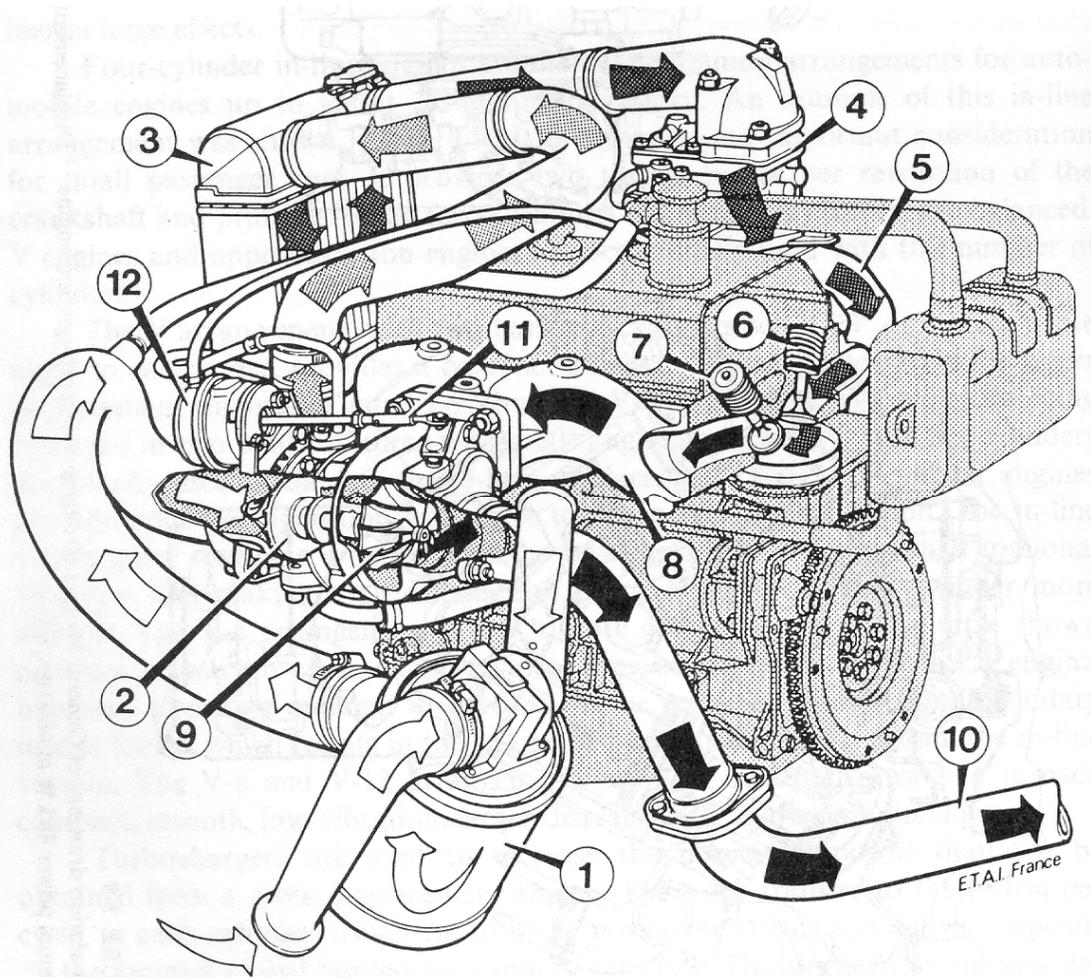




Motor turbinado

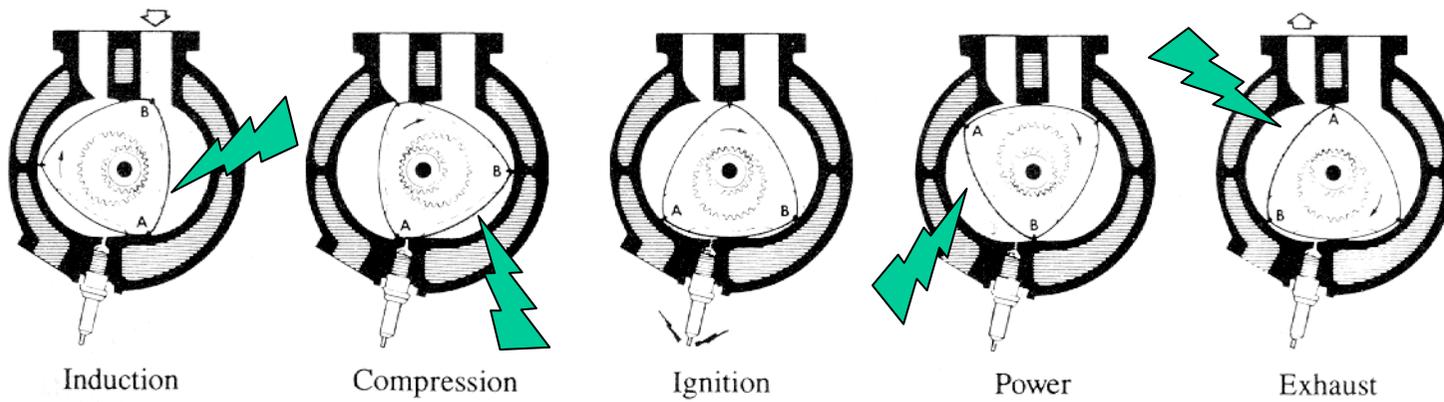
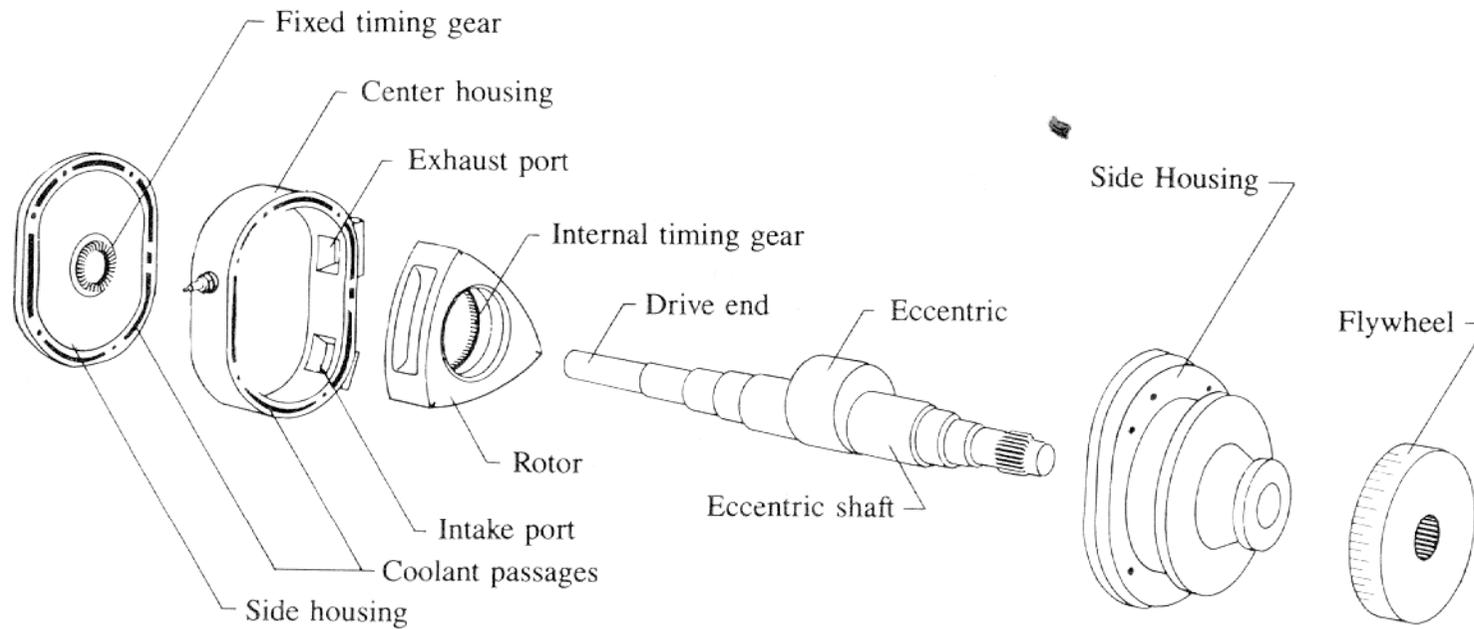


Motor turbinado



- 1 - entrada ar
- 2 - compressor
- 3 - interresfriador
- 4 - carburador
- 5 - manifold
- 6 - válvula de entrada
- 7 - válvula de saída
- 8 - manifold
- 9 - turbina
- 10 - saída dos gases
- 11 - sistema de controle da saída dos gases
- 12 - regulador de pressão

Motor Wankel , de pistão rotativo



MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA : áreas em desenvolvimento

- controle de poluição

Poluente	Impacto	Carros			Caminhões	
		% (do total) emissões fontes móveis	Emissão em veículos não controlados (g/km) (#)	Redução nos novos motores %	Motores IC (g/km)	Motores Diesel (g/km)
NO e NO _x	Névoa, tóxicos	40-60	2,5	75	7	12
CO	tóxico	90	65	95	150	17
Hidrocarbo- netos não queimados	névoa	60-80	10	90	17	3
Particulados	Reduz visibilidade		0,5(*)	40	--	0,5

(#) valores médios antes do início da normatização (USA - 1968)

(*) motores Diesel

- diminuição do consumo de combustível
- novos combustíveis : álcool, gás, biogás, gases pobres, hidrogênio
- competitividade no mercado
- diminuição de ruído

Parâmetros operacionais e de projeto em motores alternativos

- **relações geométricas em motores alternativos**
- **seqüência de eventos no processo**
- **potência, trabalho, eficiência mecânica**
- **potência de rodagem**
- **pressão média efetiva**
- **consumo específico de combustível**
- **eficiência volumétrica**
- **fatores de correção das eficiências**
- **relações entre parâmetros de performance**
- **dados de projeto e performance**

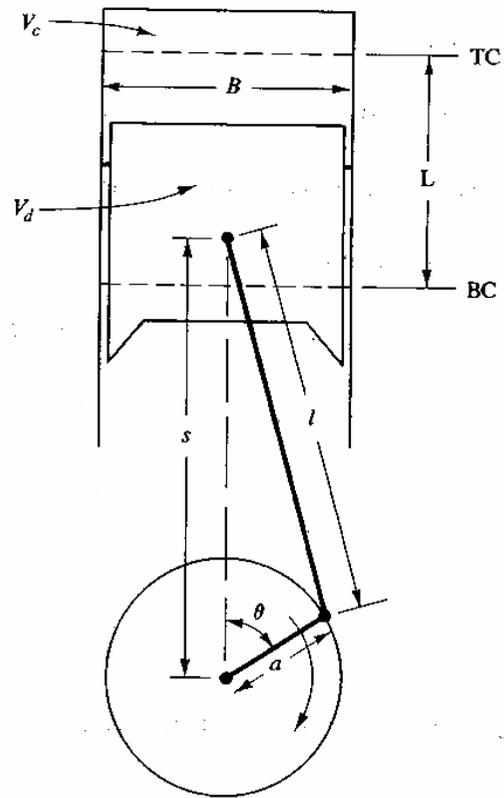
Principais Parâmetros de performance:

Potência máxima (potência a plena carga, limite) : o mais alto valor de potência que um motor consegue desenvolver, por um curto período de tempo.

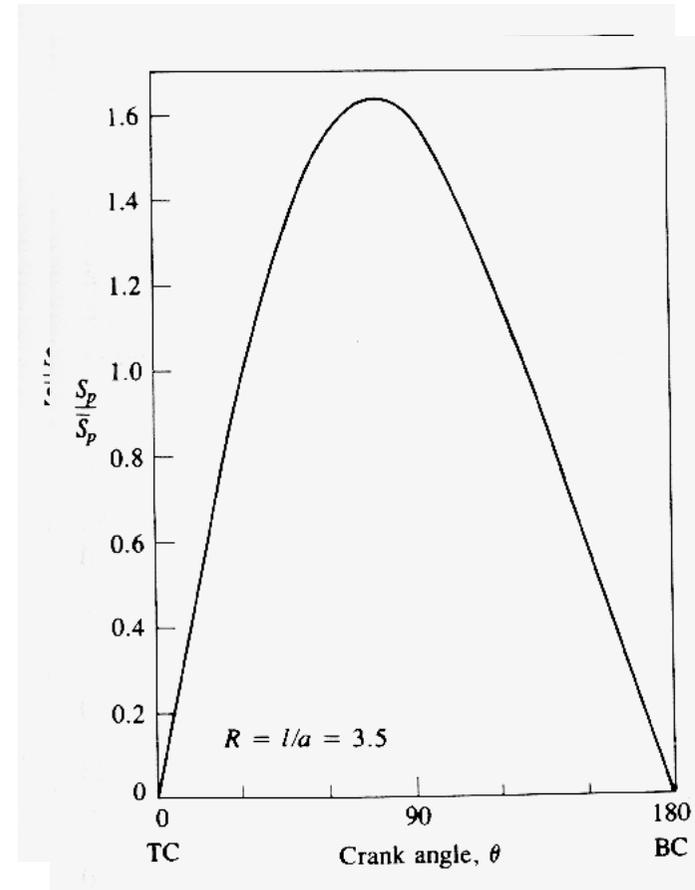
Potência normal ou contínua: a mais alta potência que o motor desenvolve em operação contínua.

Velocidade de rotação: deve ser informado o valor da velocidade de rotação do sistema de biela-manivela, correspondente às potências definidas acima.

- relações geométricas em motores alternativos



V_c = espaço morto
 V_d = cilindrada
 L = curso do pistão
 B = diâmetro do pistão



θ = ângulo de rotação
 S_p = velocidade instantânea do pistão
 $\overline{S_p}$ = velocidade média do pistão

Parâmetros geométricos:

Razão de compressão: $r_c = \frac{\text{máximo volume do cilindro}}{\text{mínimo volume do cilindro}} = \frac{V_d + V_c}{V_c}$

V_c = câmara de combustão (espaço "morto" superior)

V_d = cilindrada (volume varrido pelo cilindro no seu deslocamento)

Razão diâmetro/curso do pistão: $R_{bs} = \frac{B}{L}$

Razão braço/rádio do sistema biela-manivela: $R = \frac{l}{a} \quad L = 2a$

Valores típicos

Motores de ignição por centelha: $8 < r_c < 12$

Motores Diesel: $12 < r_c < 24$

Motores pequenos e médios: $0,8 < B/L < 1,2 \quad 3 < R < 4 \text{ cm}$

Grandes motores Diesel,
de baixa rotação: $B/L \text{ até } 0,5 \quad 5 < R < 9 \text{ cm}$

Relações entre parâmetros geométricos :

Volume do cilindro
em função do deslocamento
da biela

$$V = V_c + \frac{\pi B^2}{4} (l + a - s)$$

Distância entre o pino
da biela no pistão
e o eixo da manivela

$$s = a \cos \theta + (l^2 - a^2 \sin^2 \theta)^{1/2}$$

$\theta = \hat{\text{ângulo de manivela}}$

Área interna
da câmara de combustão

$$A = A_c + A_p + \pi B(l + a - s)$$

$A_c = \text{área superior, no topo do cilindro}$

$A_p = \text{área na cabeça do pistão}$

Velocidade média
do pistão

$$\bar{S}_p = 2LN \quad 8 < \bar{S}_p < 15 \text{ m/s}$$

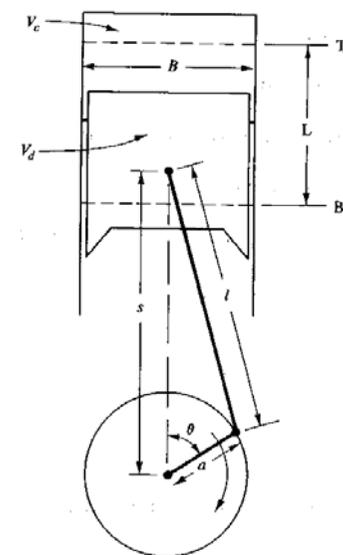
$N = \text{velocidade de rotação da manivela}$

Velocidade instantânea
do pistão

$$S_p = \frac{ds}{dt}$$

Relação das velocidades

$$\frac{S_p}{\bar{S}_p} = \frac{\pi}{2} \sin \theta \left[1 + \frac{\cos \theta}{(R^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}} \right]$$



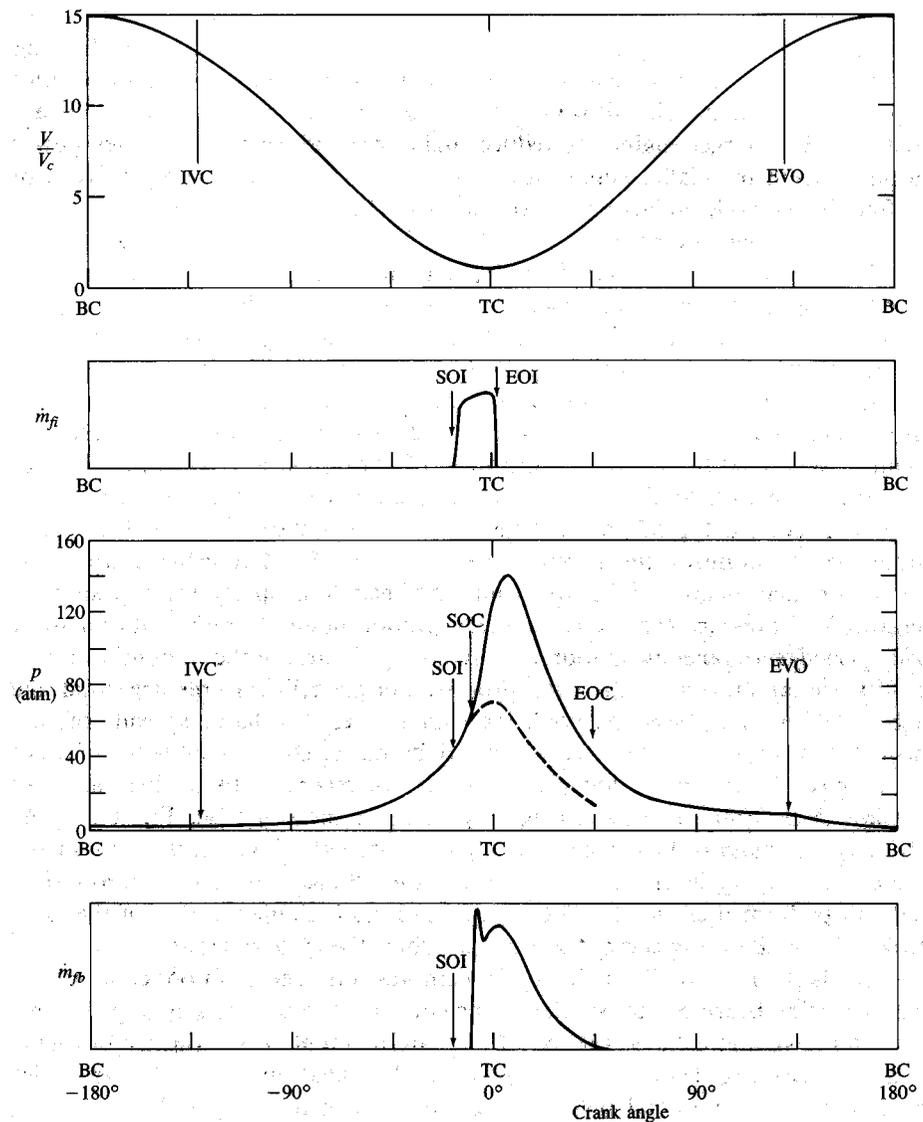
- Seqüência de eventos
- motor de 4 tempos

**Volume varrido
pelo pistão**

**Taxa de injeção
de combustível**

Pressão

**Taxa de queima
de combustível**



Ângulo de manivela

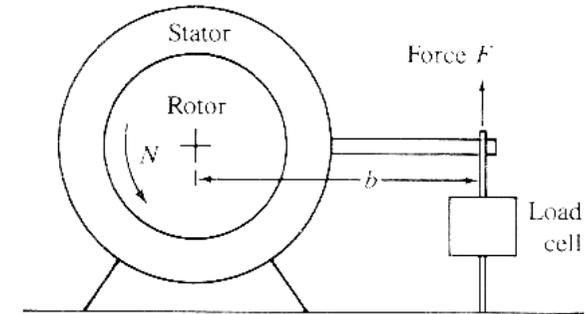
•potência, trabalho, eficiência mecânica

Torque: $T = Fb$

F = força medida no dinamômetro

b = braço do dinamômetro

Potência $P = 2\pi NT$



$W_{c,i}$ Trabalho indicado : é o trabalho realizado pelos gases sobre o pistão, somente nos processos de compressão e expansão. O termo “indicado” refere-se a que é obtido em base ao ciclo termodinâmico realizado pelos gases.

W_p Trabalho “de bombeamento”: do trabalho entregue pelo motor, parte é gasta nos processos de exaustão e admissão, esta parte é denominada

“trabalho de bombeamento”, este valor resta-se do trabalho indicado. Isto acontece nos motores naturalmente aspirados. Nos motores supercarregados, o trabalho de bombeamento soma-se ao trabalho indicado.

Trabalho líquido por ciclo: tirando o trabalho de bombeamento do trabalho bruto, resta o trabalho líquido.

A potência do motor pode ser calculada a partir do trabalho por ciclo, levando em conta o tipo de motor (2 ou 4 tempos), e o número de revoluções, assim:

$$\text{Potência por cilindro: } P_i = \frac{W_{c,i}N}{n_R} \quad \left\{ \begin{array}{l} n_R = 1 \text{ (2 tempos)} \\ n_R = 2 \text{ (4 tempos)} \end{array} \right.$$

Potência bruta = potência líquida + potência de fricção

Na potência de fricção se consideram reunidas todas as perdas devidas ao bombeamento da carga no motor, atrito mecânico das peças do motor, etc.

Eficiência Mecânica

$$\eta_m = \frac{\text{Potência líquida}}{\text{Potência bruta}}$$

Eficiência de conversão do combustível

$$\eta_f = \frac{P}{\dot{m}_f Q_{HV}}$$

\dot{m}_f = vazão de combustível [kg/s]

Q_{HV} = poder calorífico do combustível [kJ/kg]

•potência de rodagem

Denomina-se *potência de rodagem* à potência necessária para impulsionar um veículo numa estrada plana a velocidade constante.

Ela depende das características do veículo (tamanho, forma, peso) e da velocidade, na forma:

$$P_r = \left(C_R M_v g + \frac{1}{2} \rho_a C_D A_v S_v^2 \right) S_v$$

C_R = coeficiente de resistência à rodagem $0,012 < C_R < 0,015$

M_v = massa do veículo

g = aceleração da gravidade

ρ_a = densidade do ar ambiente

C_D = coeficiente de arraste

$0,3 < C_D < 0,5$

A_v = área frontal do veículo

S_v = *velocidade* do veículo

- **pressão média efetiva**

É um valor indicativo, determinado a partir da potência por ciclo, por cilindro:

$$mep = \frac{Pn_R}{V_d N}$$

Conceitualmente, a pressão média efetiva seria igual à pressão *constante que os gases teriam que ter dentro do cilindro para produzir o mesmo efeito que é produzido na condição real, que implica numa pressão variando ao longo dos processos*

- **consumo específico de combustível**

$$sfc = \frac{\dot{m}_f}{P} \left[\frac{kg}{kJ} \right]$$

- **relação ar / combustível**

$$A / F = \frac{\dot{m}_{ar}}{\dot{m}_f} \quad \text{ou} \quad F / A = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_{ar}}$$

Razão de equivalência
combustível /ar,
na combustão

$$\phi = \frac{\dot{m}_f / \dot{m}_{ar}}{\left(\dot{m}_f / \dot{m}_{ar} \right)_{\text{estequiométrica}}}$$

Razão de equivalência
ar /combustível

$$\lambda = \frac{\dot{m}_{ar} / \dot{m}_f}{\left(\dot{m}_{ar} / \dot{m}_f \right)_{\text{estequiométrica}}}$$

- eficiência volumétrica

Onde:

$$\eta_v = \frac{n_R \dot{m}_{ar}}{\rho_{ar,i} V_d N}$$

\dot{m}_{ar} = vazão de ar que entra no motor

m_{ar} = massa de ar que entra em cada admissão

Ou:

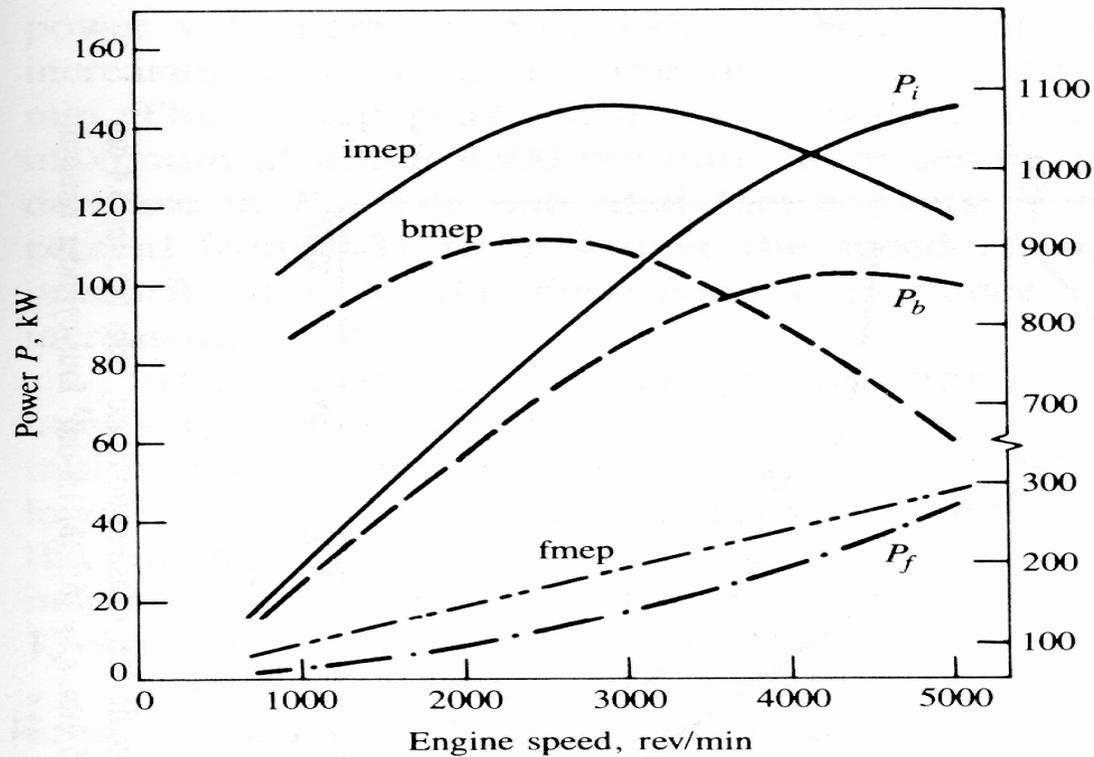
$\rho_{ar,i}$ = densidade do ar na entrada do motor

$$\eta_v = \frac{m_{ar}}{\rho_{ar,i} V_d}$$

V_d = cilindrada

N = número de revoluções

**Motor de 6 cilindros, IC,
 $V_d = 3,8$ litros, $B = 96,8$ mm,
 $L = 86$ mm, $r_c = 8,6$**



P_i = potência indicada
 P_f = potência de atrito
 P_b = potência líquida = $P_i - P_f$

$imep$ = pressão indicada média equivalente

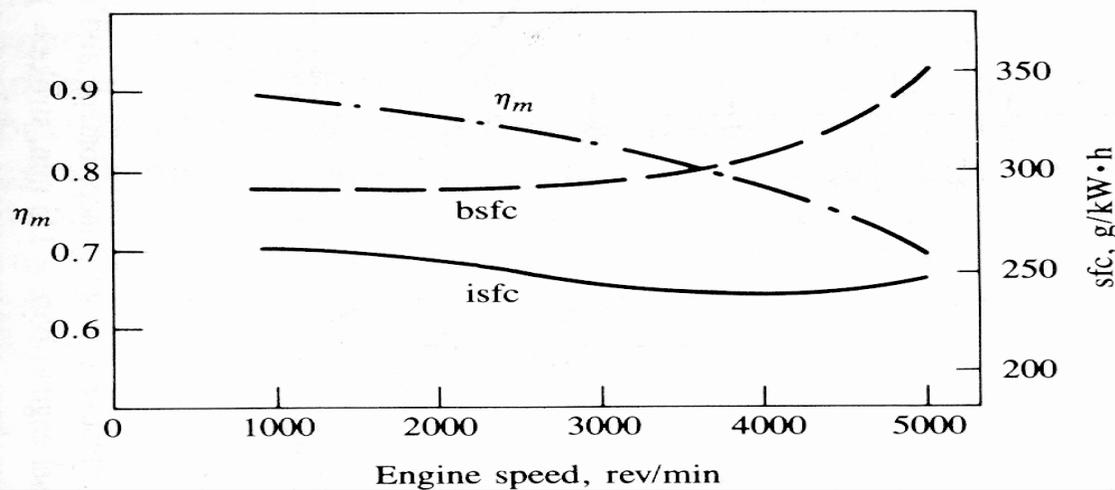
$bmep$ = pressão líquida média equivalente

$fmeq$ = pressão de atrito média equivalente

η_m = eficiência mecânica

$bsfc$ = consumo específico de combustível

$isfc$ = consumo indicado de combustível



• Fator de correção para a potência

A pressão, umidade e temperatura do ar ambiente, afetam a quantidade de ar que é admitida no cilindro, e portanto, a performance do motor.

Uma correção entre as condições padrão e as condições reais de medição é necessária.

Adotam-se como condições padrão uma pressão de ar seco de 736,6 mmHg, pressão do vapor de água 9,65 mmHg, e uma temperatura de 29,4 °C.

O coeficiente de correção da potência é:

$$P_{i,s} = C_F P_{i,m}$$

Onde o subíndice m, indica valores nas condições de medida e s, valores em condições padrão.

Considerando que a potência de fricção não seja afetada pelas condições ambiente, a potência *de freio* é:

$$P_{b,s} = C_F P_{i,m} - P_{f,m}$$

O fator de correção é dado por:

$$C_F = \frac{p_{s,d}}{p_m - p_{v,m}} \left(\frac{T_m}{T_s} \right)^{1/2}$$

onde :

$p_{s,d}$ = pressão absoluta do ar seco, padrão

p_m = pressão absoluta do ar, ambiente

$p_{v,m}$ = pressão parcial do vapor de água, ambiente

T_m = temperatura ambiente

T_s = temperatura padrão

Explicação:

A base para o fator de correção é o escoamento de um gás através de uma restrição de seção = A_E

$$\dot{m} = \frac{A_E p_o}{\sqrt{RT_o}} \left\{ \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{p}{p_o} \right)^{2/\gamma} - \left(\frac{p}{p_o} \right)^{(\gamma+1)/\gamma} \right] \right\}^{1/2}$$

Assumindo que a relação de pressões se mantenha constante, a vazão de ar que entra no motor dependerá de:

$$\dot{m}_a \propto \frac{p_o}{\sqrt{T_o}}$$

Por este motivo, o fator de correção inclui somente os efeitos de pressão e temperatura.

• Correção da eficiência volumétrica

A eficiência volumétrica depende do cociente da vazão mássica do ar e a densidade. Por sua vez, a densidade é proporcional ao cociente da temperatura e pressão.

O fator de correção resulta então:

$$C_{F'} = \frac{\eta_{v,s}}{\eta_{v,m}} = \left(\frac{T_s}{T_m} \right)^{1/2}$$

- Relações entre parâmetros de performance

Potência $P = \frac{\eta_f m_{ar} N Q_{HV} (F / A)}{n_R}$ $P = \frac{\eta_f \eta_v N V_d \rho_{ar,i} Q_{HV} (F / A)}{n_R}$
 $n_R = 1 \text{ ou } 2$

torque $T = \frac{\eta_f \eta_v V_d \rho_{ar,i} Q_{HV} (F / A)}{n_R 2\pi}$

Pressão média efetiva $mep = \eta_f \eta_v \rho_{ar,i} Q_{HV} (F / A)$

Potência específica = potência por unidade de área da seção do pistão

$\frac{P}{A_P} = \frac{\eta_f \eta_v N L \rho_{ar,i} Q_{HV} (F / A)}{n_R}$ ou $\frac{P}{A_P} = \frac{\eta_f \eta_v \bar{S}_p \rho_{ar,i} Q_{HV} (F / A)}{2n_R}$

Eficiência de conversão da energia do combustível:

$$\eta_f = \frac{W_c}{m_f Q_{HV}} = \frac{P}{\dot{m}_f Q_{HV}}$$

Eficiência de combustão:

$$\eta_c = \frac{(H_r - H_p)_{p_0, T_0}}{m_f Q_{HV}}$$

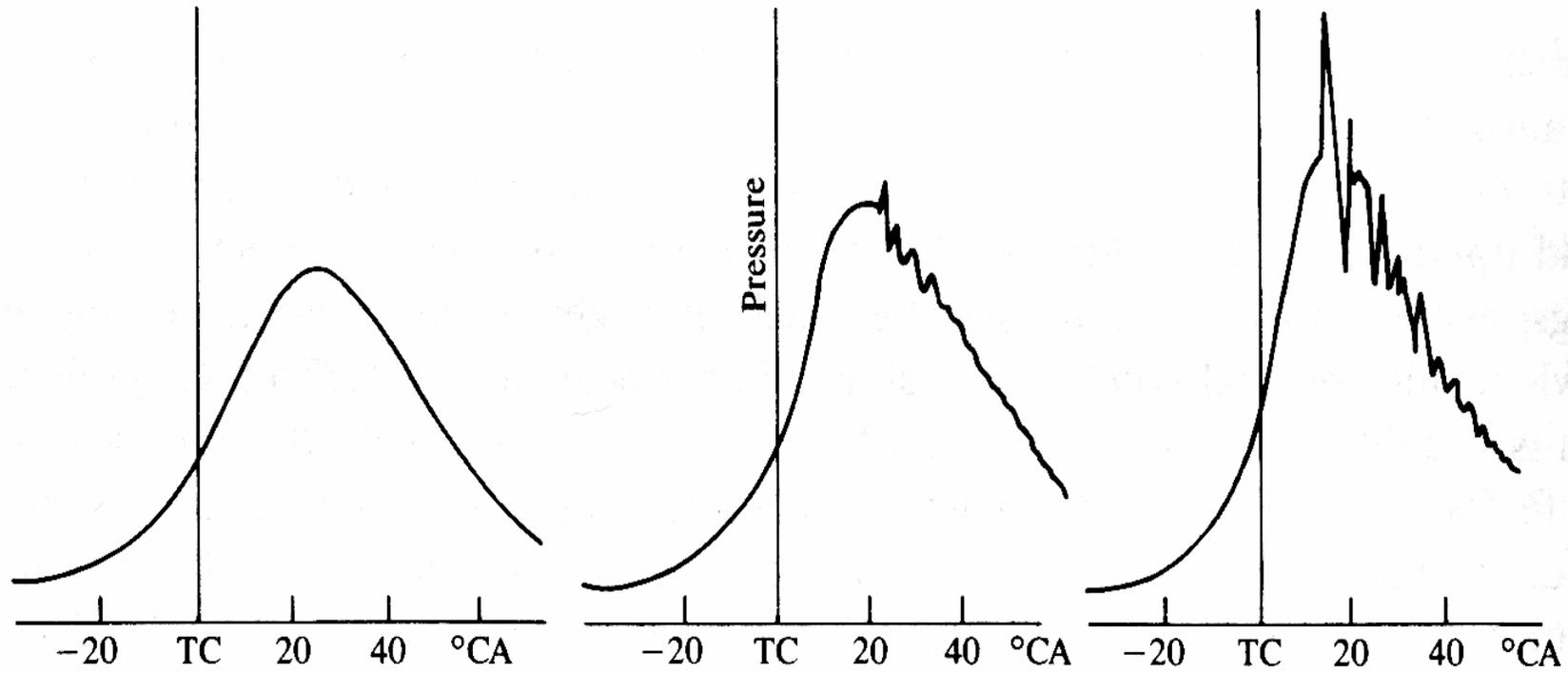
Eficiência de primeira lei do ciclo motor, ou eficiência de conversão térmica:

$$\eta_t = \frac{W_c}{(H_r - H_p)_{p_0, T_0}} = \frac{W_c}{\eta_c m_f Q_{HV}} = \frac{\eta_f}{\eta_c}$$

Eficiência de segunda lei do ciclo motor, ou eficiência de conversão da energia livre da reação de combustão:

$$\eta_a = \frac{W_c}{(B_p - B_r)_{p_0, T_0}}$$

Detonação no motor



(a) Normal combustion,
spark 28°BTC

(b) Slight knock,
spark 28°BTC

(c) Intense knock,
spark 32°BTC

Octanagem

A ocorrência de detonação no motor depende fundamentalmente do tipo de combustível, mas também das características do motor.

O *número de octanos* é uma medida da maior ou menor tendência do combustível de apresentar o fenômeno de detonação no motor.

A escala de octanagem *foi definida arbitrariamente:*

		Escala
n-heptano	$n-C_7H_{16}$	0
isooctano	C_8H_{18}	100

Determinação da octanagem de um combustível

É feita segundo dois tipos de procedimentos:

Norma ASTM D-2699 - método de pesquisa

Norma ASTM D - 2700 - método do motor

Os valores obtidos são ligeiramente diferentes, sendo sempre menores àqueles referentes ao método do motor.

Exemplos:	pesquisa	motor
Gasolina	92-98	80-90
metano	120	120
propano	112	97
benzeno		115
metanol	106	92
etanol	107	89

DADOS DE PROJETO E OPERAÇÃO, TÍPICOS, DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

					Máximos				
	ciclos	Razão de compressão r_c	Diâmetro pistão B m	Curso/ diâmetro pistão L/B	Velocidade rev / min	Pressão média líquida atm	Potência / volume KW/ litro	Peso/ Potência Kg / kw	Melhor consumo específico g / kWh
Motores IC									
pequenos	2,4	6 - 11	0,05- 0,085	1,2 - 0,9	4500 - 7500	4 - 10	20 - 60	5,5 - 2,5	350
carros	4	8-10	0,07 - 0,1	1,1 - 0,9	4500 - 6500	7 - 10	20 - 50	4 - 2	270
caminhões	4	7-9	0,09 - 0,13	1,2 - 0,7	3600 - 5000	6,5 - 7	25 - 30	6,5 - 2,5	300
grandes	2,4	8 - 12	0,22 - 0,45	1,1 - 1,4	300 - 900	6,8 - 12	3 - 7	23 - 35	200
Wankel	4	9	0,57 l/câmara		6000 - 8000	9,5 - 10,5	35 - 45	1,6 - 0,9	300
Motores Diesel									
carros	4	17-23	0,075 - 0,1	1,2 - 0,9	4000 - 5000	5 - 7,5	18 - 22	5 - 2,5	250
caminhões	4	16 - 22	0,1 - 0,15	1,3 - 0,8	2100 - 4000	6 - 9	15 - 22	7 - 4	210
Caminhões (TC)	4	14 - 20	0,1 - 0,15	1,3 - 0,8	2100 - 4000	12 - 18	18 - 26	7 - 3,5	200
Locomotivas	4,2	12 - 18	0,15 - 0,4	1,1 - 1,3	425 - 1800	7 - 23	5 - 20	6 - 18	190
Estacionários grandes	2	10 - 12	0,4 - 1	1,2 - 3	110 - 400	9 - 17	2 - 8	12 - 50	180

Questões

3- Calcule a velocidade média do pistão, pressão média efetiva,, e potência específica, em funcionamento a plena carga, para os motores das tabelas que seguem. Comente as diferenças entre os resultados obtidos.

De ignição por centelha:

Tipo / marca	No. cilindros	Cilindrada [l]	Diâmetro cilindro [mm]	Curso pistão [mm]	Razão de compressão	Potência máxima [kW]	Rev./min (*)
Chrysler	4 - 4tempos	2,2	87,5	92	8,9	65	5.000
General Motors	6 (em V) 4 tempos	2,8	89,0	76	8,5	86	4.800
marino	2 2 tempos	0,737				41	5.500

(*) Número de revoluções a que foi obtida a potência máxima.

Diesel:

Tipo / marca	Injeção	No. cilindros	Cilin drada [l]	Diâmetro cilindro [mm]	Curso pistão [mm]	Razão de compre ssão	Potência máxima [kW]	Rev. /min (*)
Cummins	Direta turbo	6	10	125	136	16,3	168 a 246	2.100
Volks wagen	indireta	4	1,47	76,5	80		37	5.000
Caterpillar	Direta Turbo + Pós resf.	6		137,2	165,1		200 a 300	1.600 a 2100
	direta	8 em V	13,4	128	130	17	188	2.300

4.- O primeiro dos motores de ignição por centelha da tabela do problema 1 opera a uma velocidade média do pistão de 10 m/s. O fluxo de ar medido é de 60 g/s. Calcule a eficiência volumétrica para ar atmosférico em condições padrão.

5.- A eficiência efetiva de conversão de combustível de um motor de ignição por centelha é em torno de 0,3 e varia pouco com o tipo de combustível. Calcular o consumo específico efetivo de combustível para a) gasolina, b) Diesel c) gás natural.