



# Universidade Federal de Santa Catarina

Campus Joinville

## Simulação numérica de MCI usando AVL-BOOST

UNIDADE 2 – CONCEITOS FUNDAMENTAIS EM MOTORES  
DE COMBUSTÃO INTERNA



Prof. Leonel R. Cancino, Dr. Eng.

[l.r.cancino@ufsc.br](mailto:l.r.cancino@ufsc.br)



Engenharia Automotiva  
CTJ - Centro Tecnológico de Joinville

# Ementa

- ✓ Introdução
- ✓ Conceitos fundamentais em motores de combustão interna
- ✓ Programas para simulação de MCI
- ✓ Modelagem de MCI usando AVL-BOOST
- ✓ Simulações numéricas usando AVL-BOOST

# Conteúdo programático

UNIDADE 2 – Conceitos fundamentais em motores de combustão interna

2.1 – Ciclo a volume constante (Otto).

2.2 – Ciclo a pressão constante (Diesel).

2.3 – Parâmetros/relações geométricas em MCI.

2.4 – Potência, torque, pressão média efetiva, consumo específico, eficiência volumétrica

2.5 – Carburação e sistemas de injeção (Otto e Diesel).

2.6 – Sistemas de distribuição, diagrama de comando de válvulas



# Uma comparação rápida....

## ➤ Ciclo Otto

- ✓ IGNIÇÃO POR CENTELHA
- ✓ Combustão iniciada por uma vela de ignição
- ✓ Aplicações para baixa potência
- ✓ Leves e de baixo custo

## ➤ Ciclo Diesel

- ✓ IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO
- ✓ Combustão espontânea sob a alta pressão da mistura
- ✓ Aplicações para média e alta potência
- ✓ Maior economia de combustível





# Uma comparação rápida....

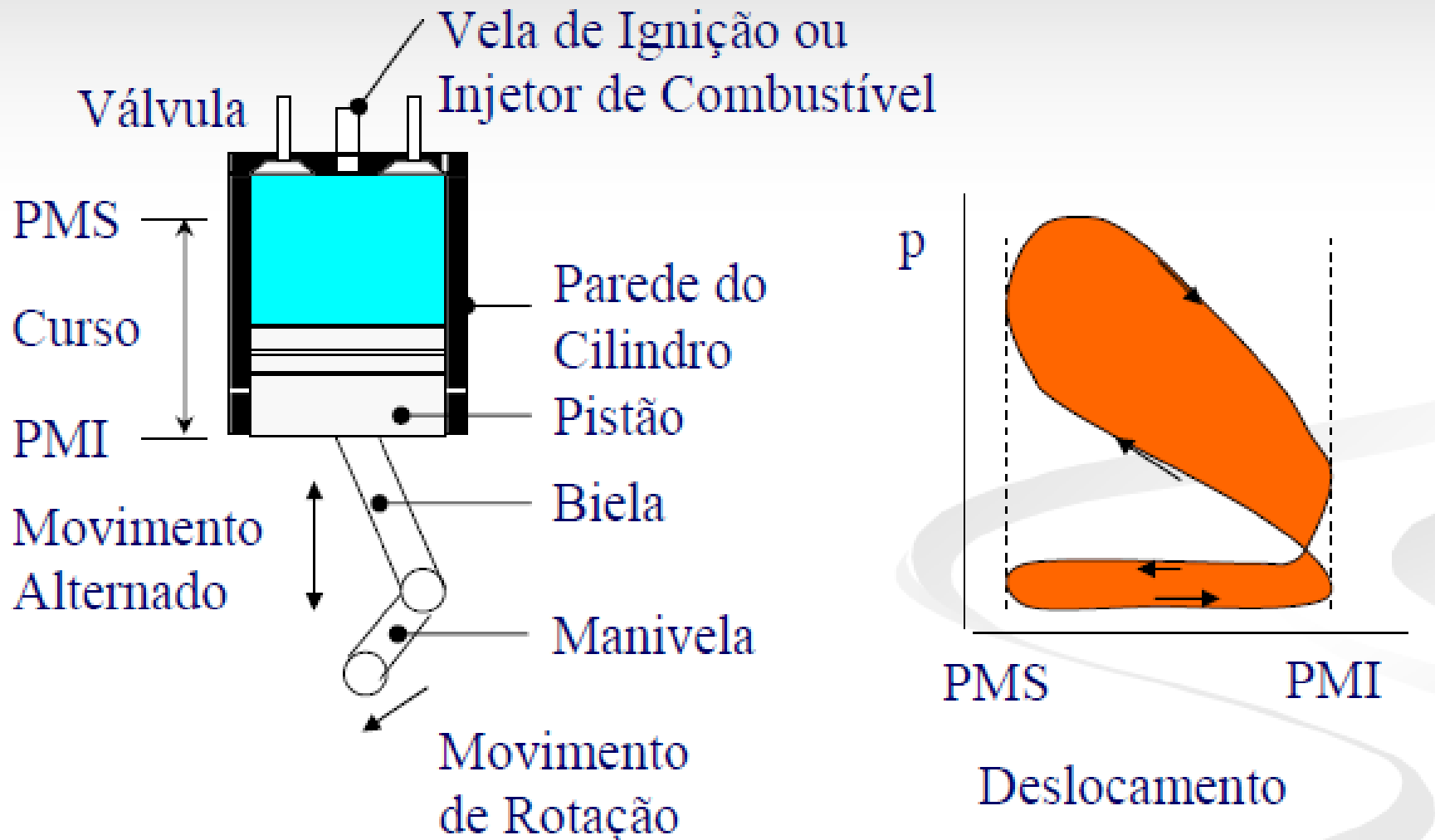
## ➤ **Ciclo Otto**

- ✓ IGNIÇÃO POR CENTELHA
- ✓ **Combustão iniciada por uma vela de ignição**
- ✓ Aplicações para baixa potência
- ✓ Leves e de baixo custo

## ➤ **Ciclo Diesel**

- ✓ IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO
- ✓ **Combustão espontânea sob a alta pressão da mistura**
- ✓ Aplicações para média e alta potência
- ✓ Maior economia de combustível

# Ciclos em motores....



# Ciclos em motores....

1. Ciclo Otto
2. Ciclo Diesel

# Ciclos indicados (reais)

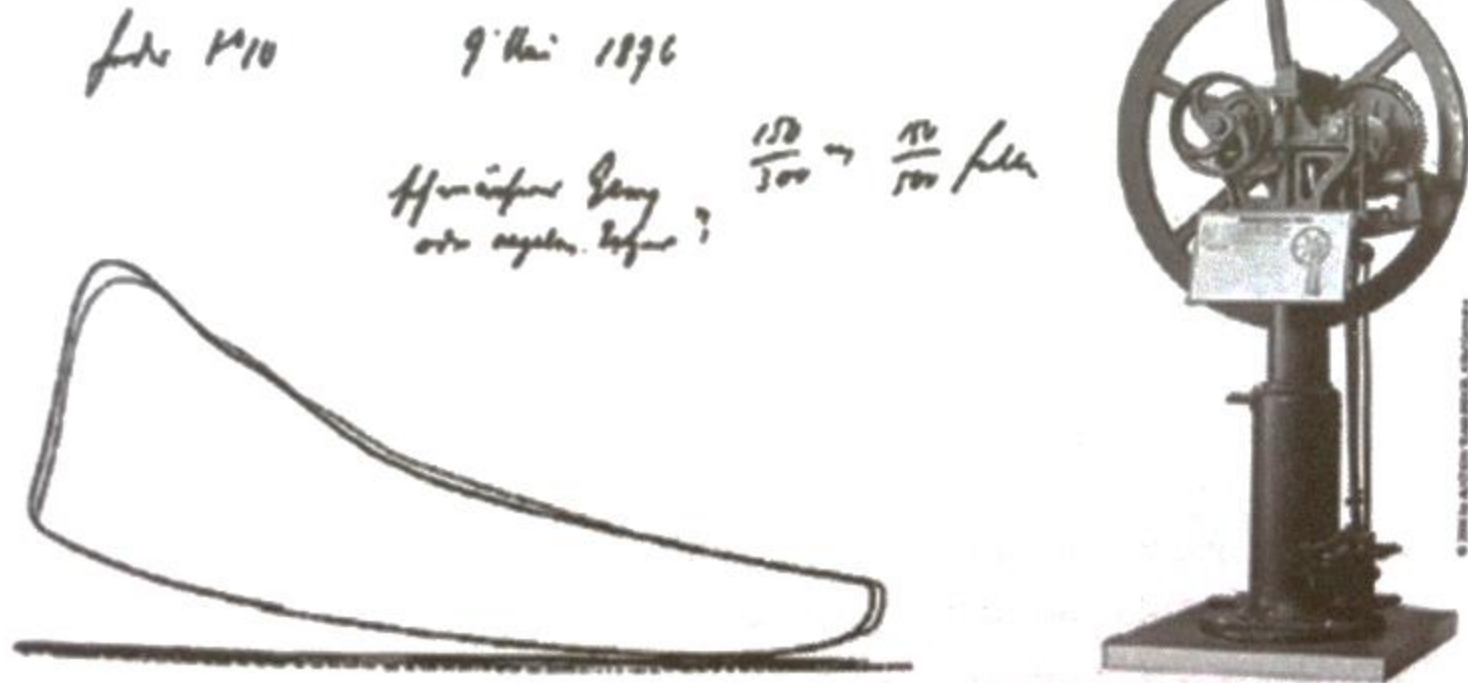


Figura 2.5 – Diagrama de pressão – Otto 1876. [G]

# Ciclos indicados (reais)

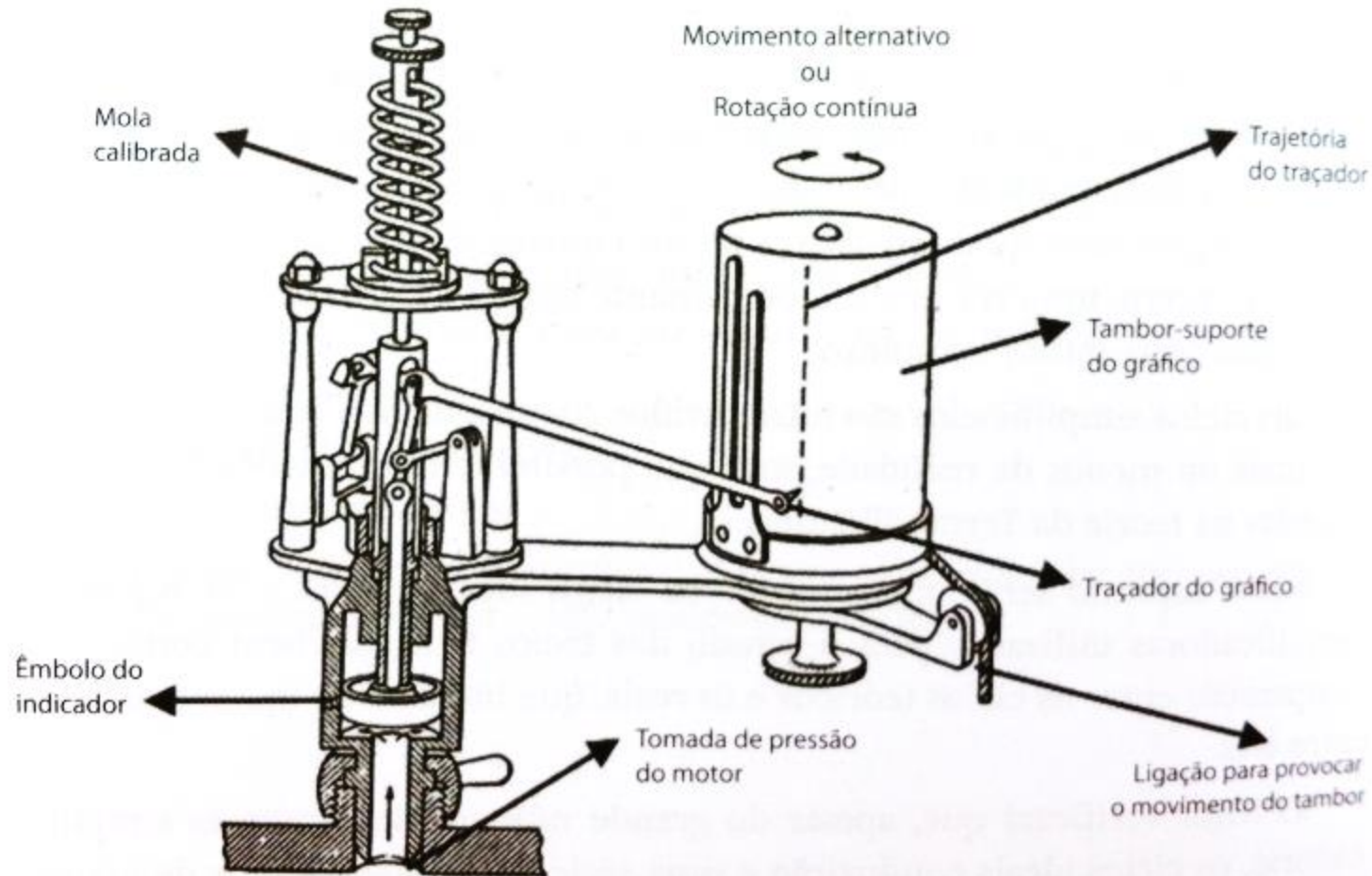


Figura 2.1 – Esquema de um indicador mecânico de pressões. [G]

# Ciclos indicados (reais)

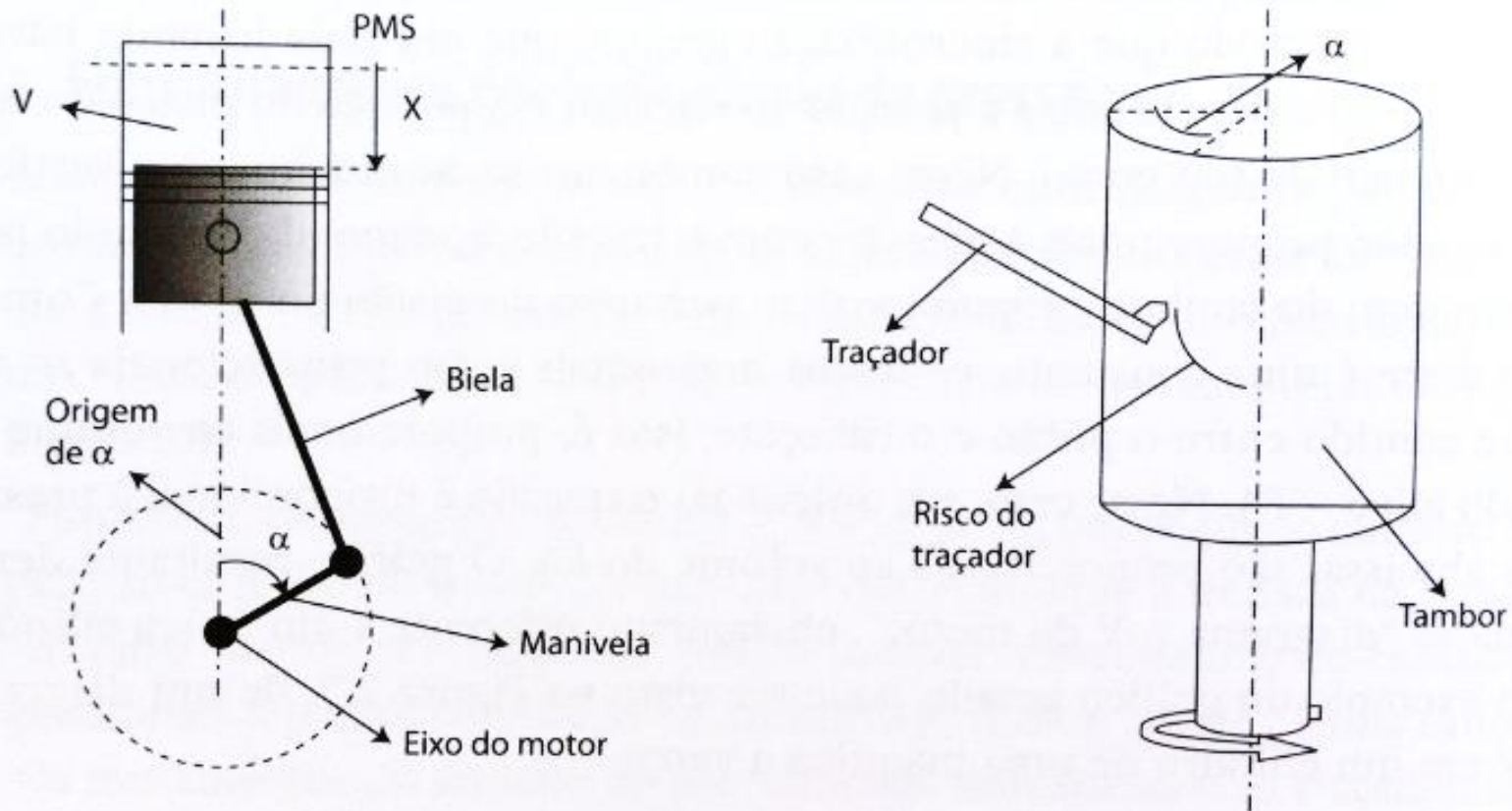
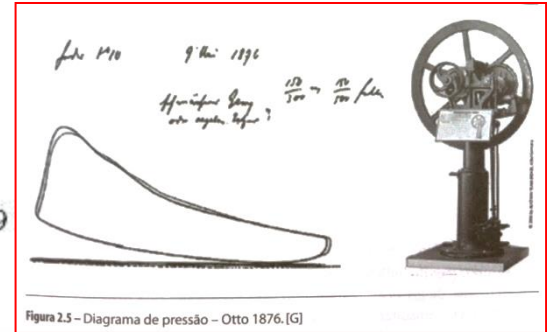
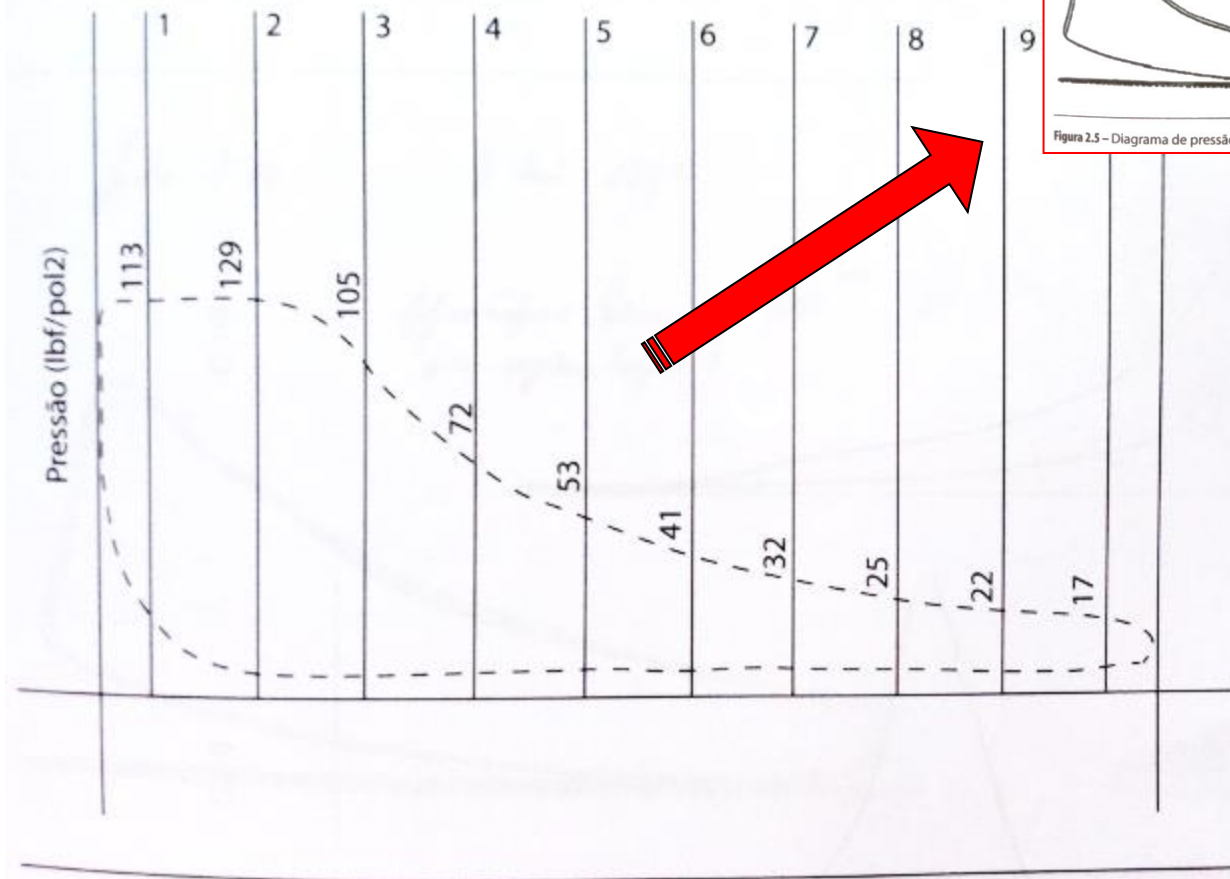


Figura 2.3 – Esquema do traçador do diagrama  $p - \alpha$  do motor.



# Ciclos indicados (reais)



p <sub>caldeira</sub>	165 lbf/pol2
	11,4 bar
p <sub>receptor</sub>	10 lbf/pol2
	0,7 bar

n	95 rpm
diâmetro	22 pol
	558,8 mm
curso	42 pol
	1066,8 mm
V <sub>pistão</sub>	133 pol/s
	3,378 m/s

Figura 2.2 – Exemplo de um diagrama p – V de indicador mecânico de pressões. [1]



# Ciclos indicados (reais)

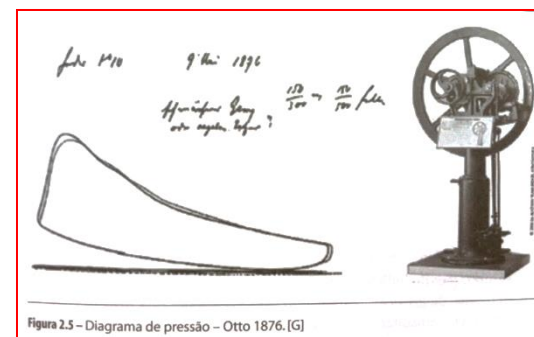


Figura 2.5 – Diagrama de pressão – Otto 1876. [G]

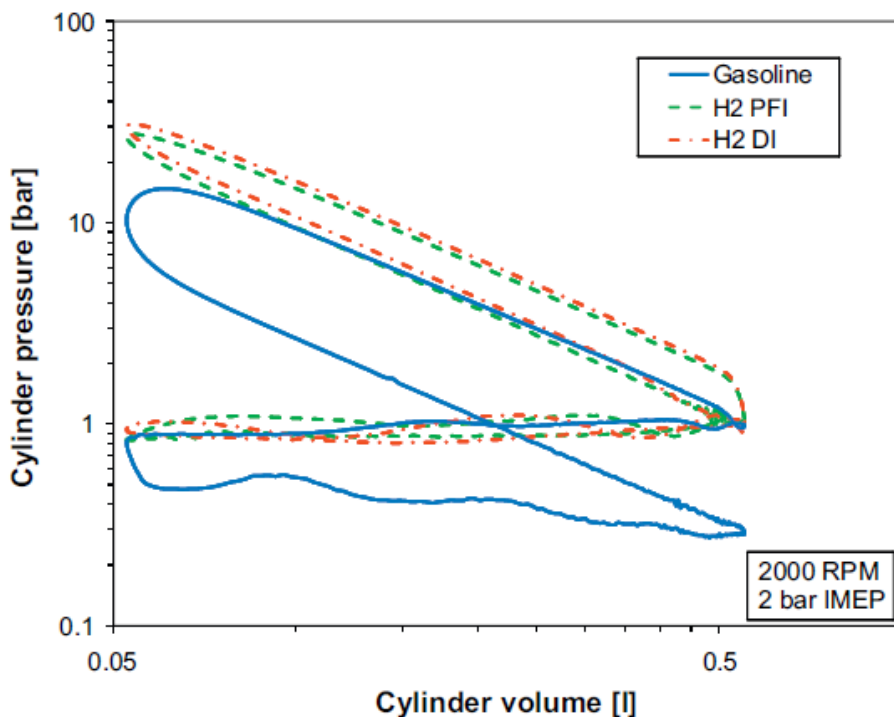


Fig. 11. Pressure versus volume diagrams at 2 bar IMEP for gasoline (stoichiometric throttled), hydrogen PFI and hydrogen DI (lean WOT).

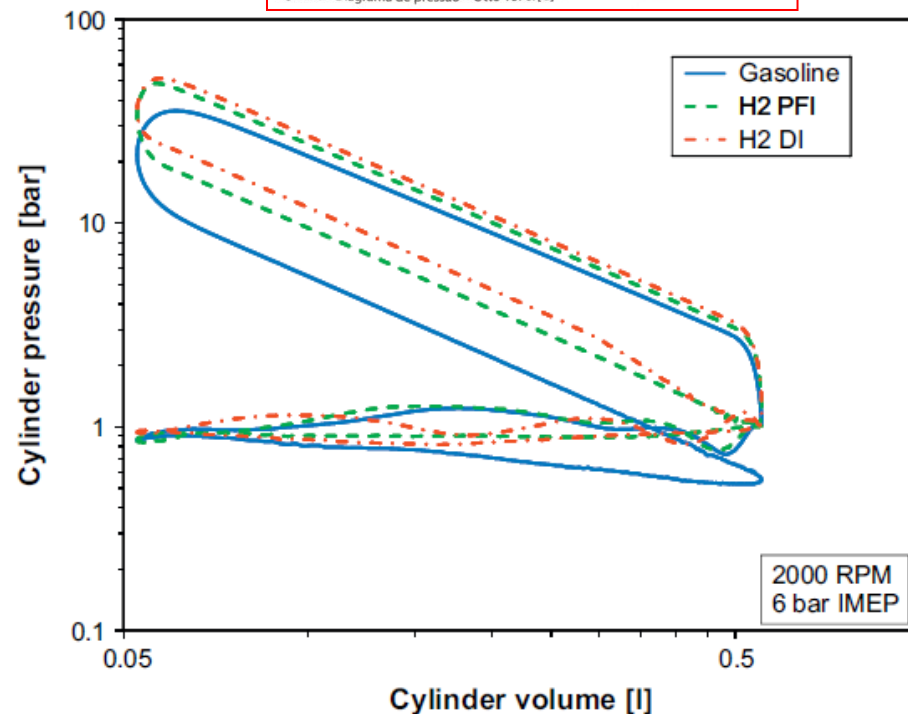
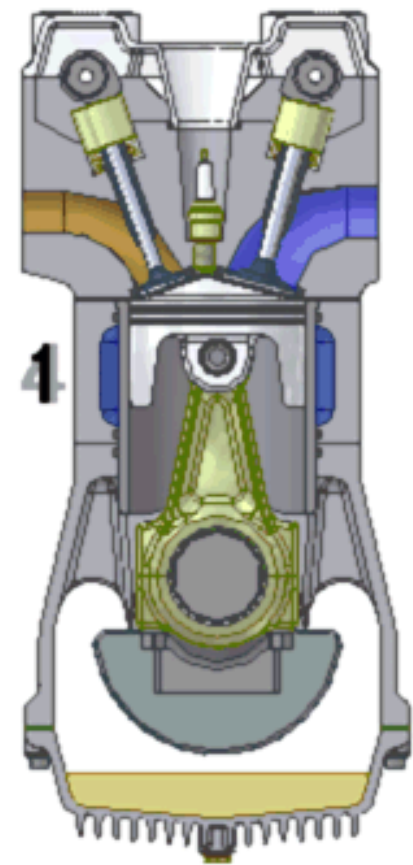
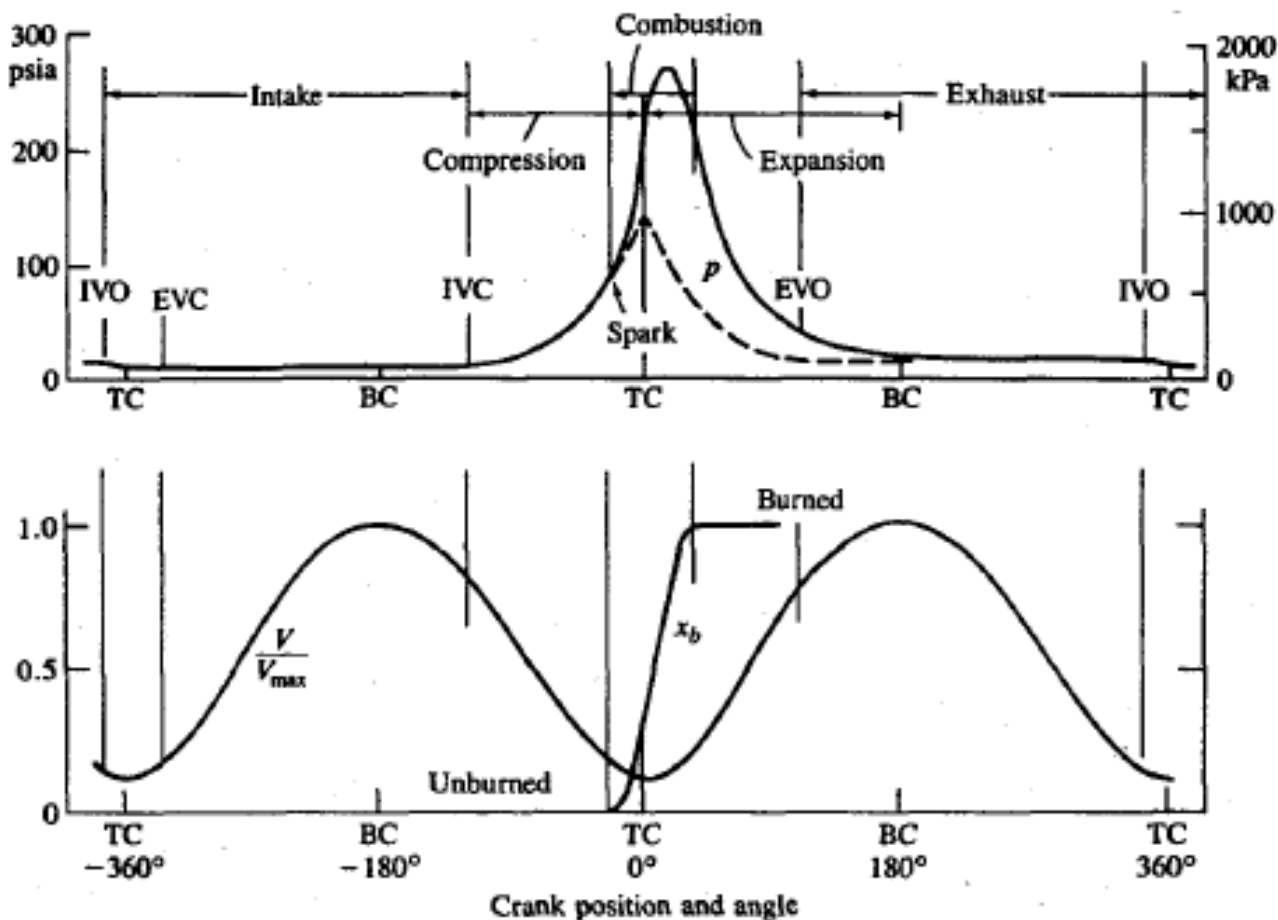


Fig. 12. Pressure versus volume diagrams at 6 bar IMEP for gasoline, hydrogen PFI and hydrogen DI.

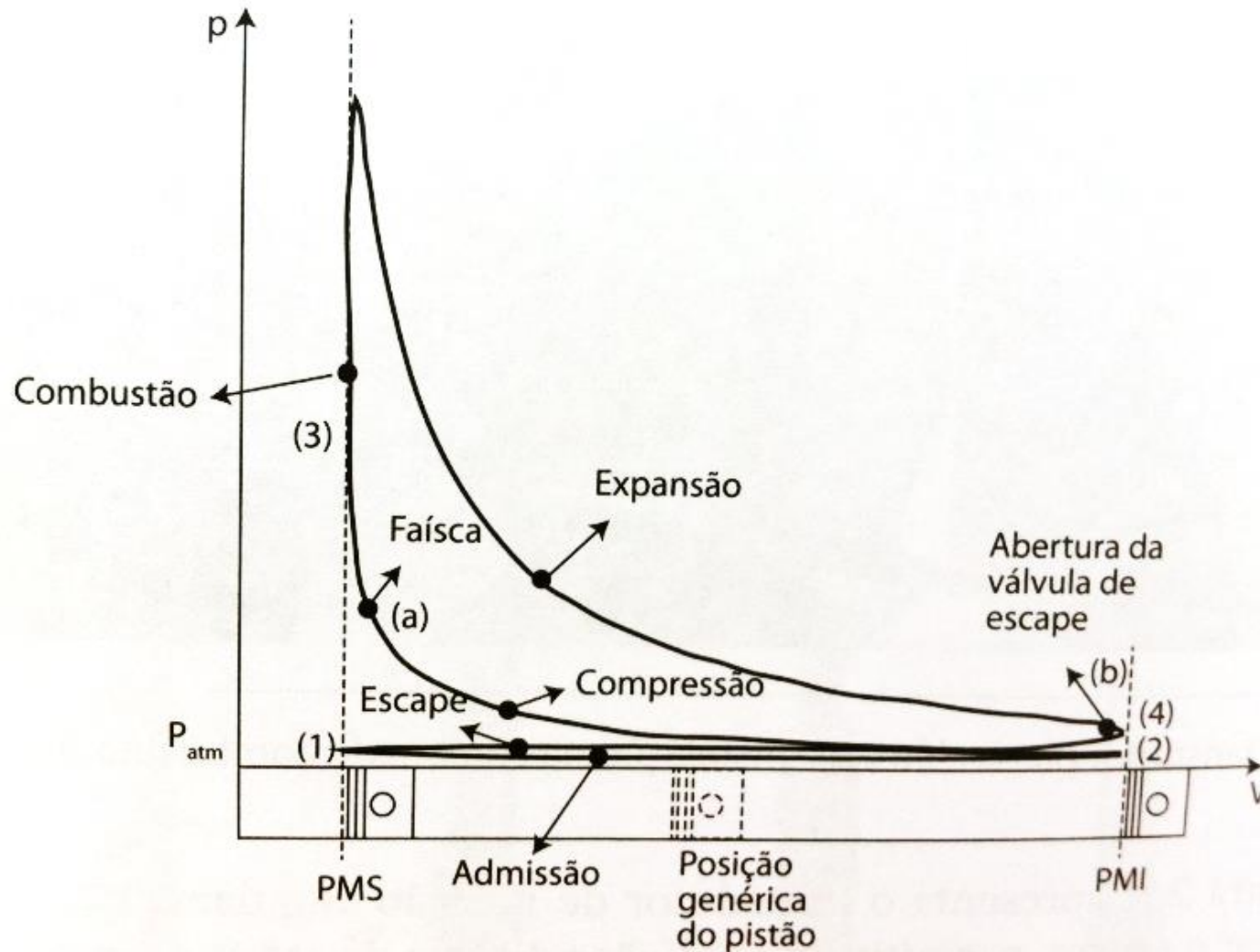


# Diagrama de **pressão**, **volume**, produtos de combustão

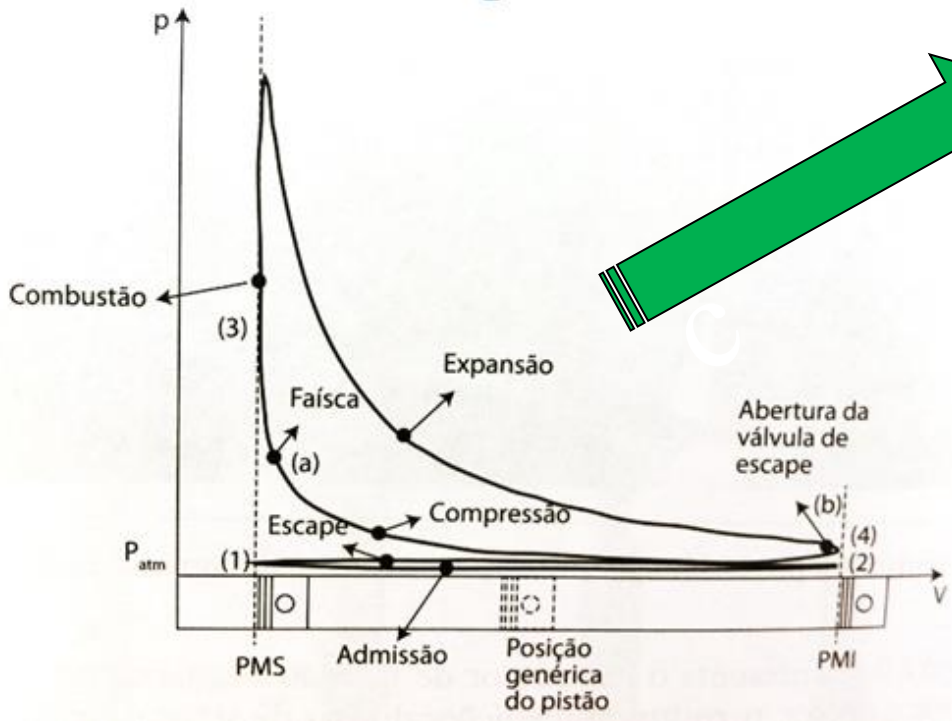
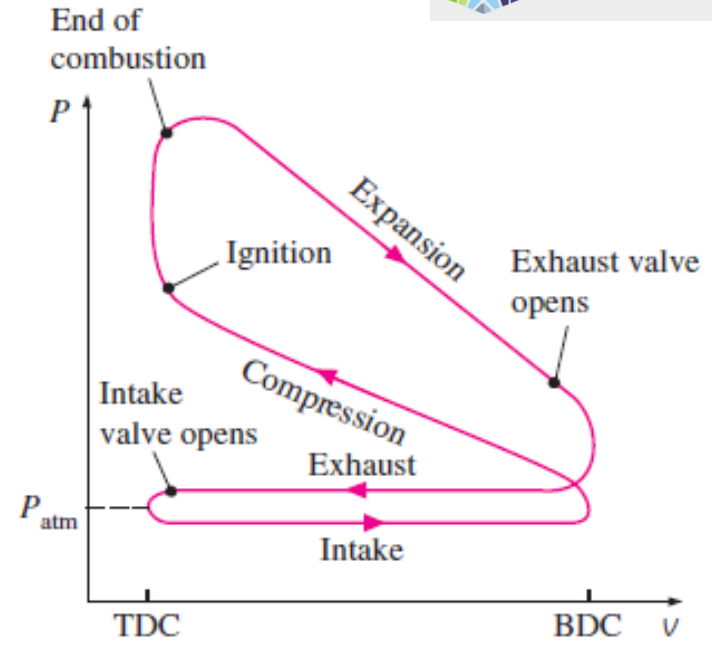


**FIGURE 1-8**  
 Sequence of events in four-stroke spark-ignition engine operating cycle. Cylinder pressure  $p$  (solid line, firing cycle; dashed line, motored cycle), cylinder volume  $V/V_{max}$ , and mass fraction burned  $x_b$ , are plotted against crank angle.

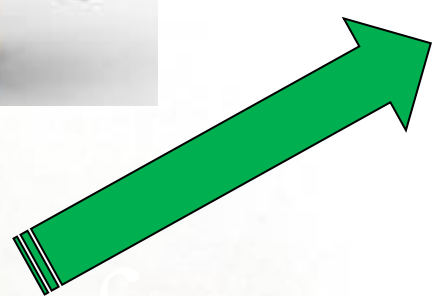
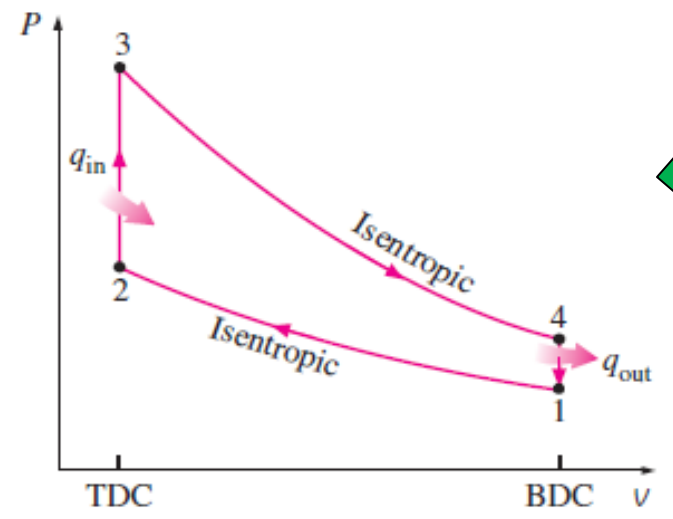
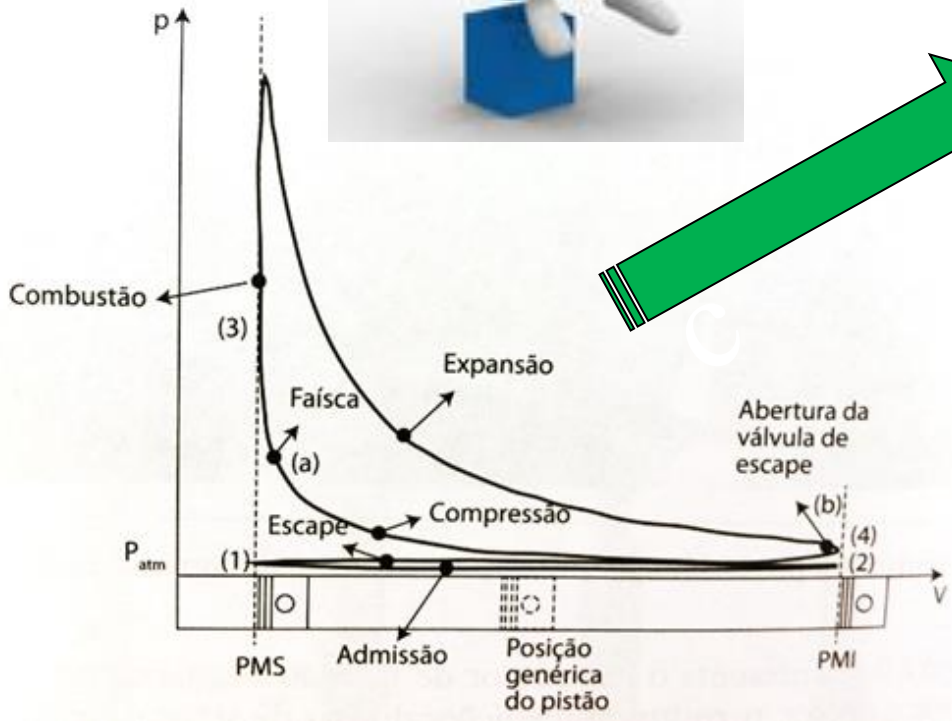
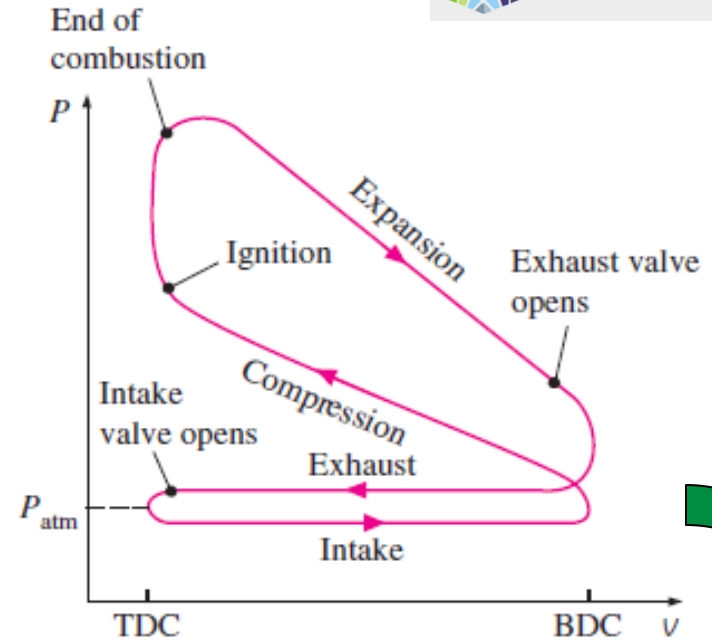
# Ciclos reais... (indicados)



# Ciclos em motores....

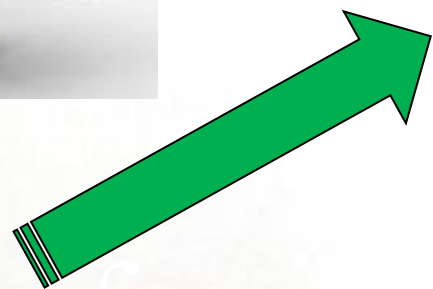
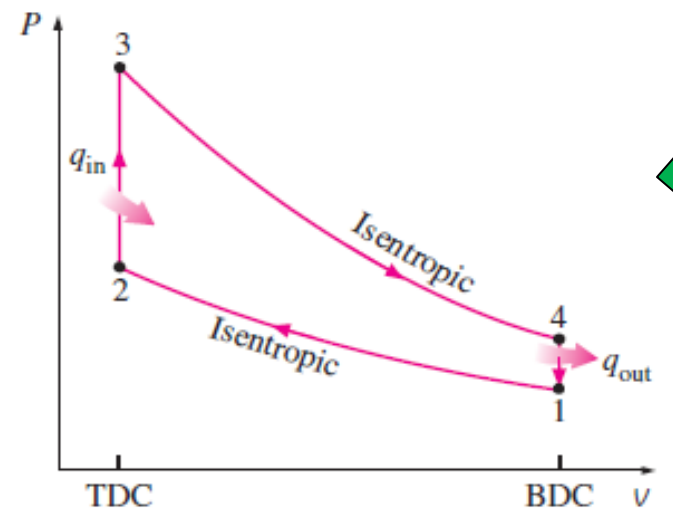
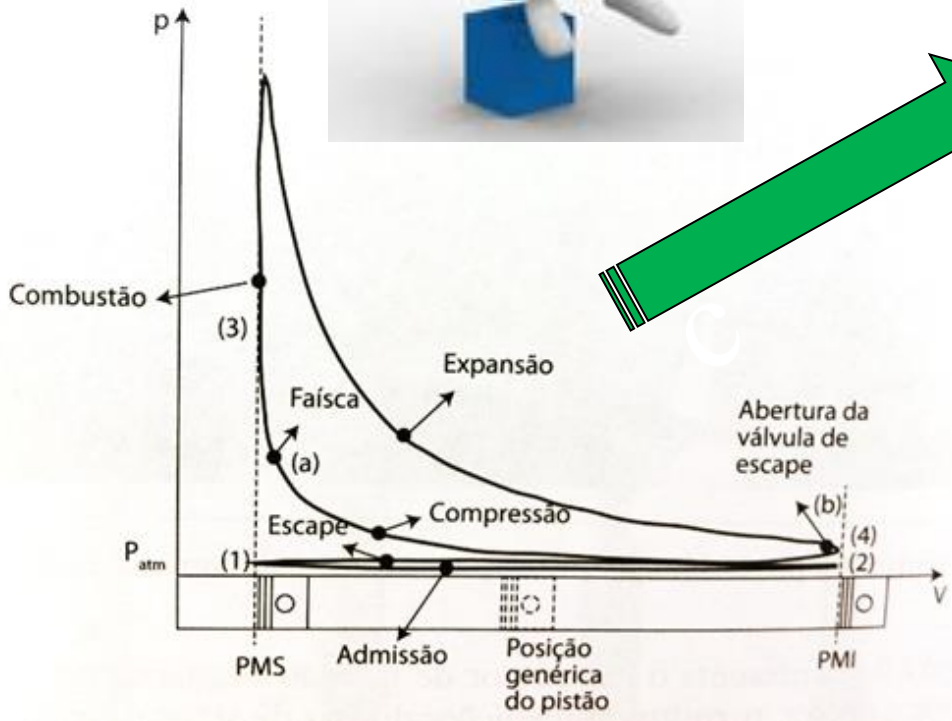
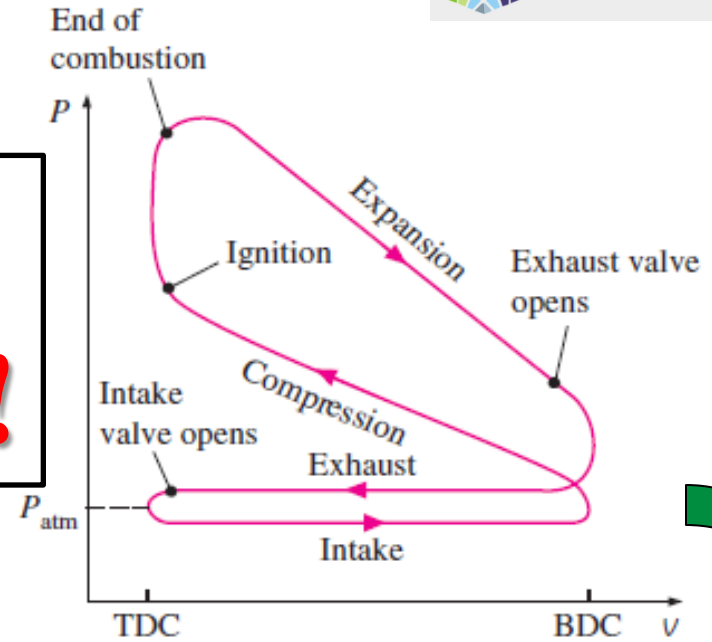


# Ciclos em motores....



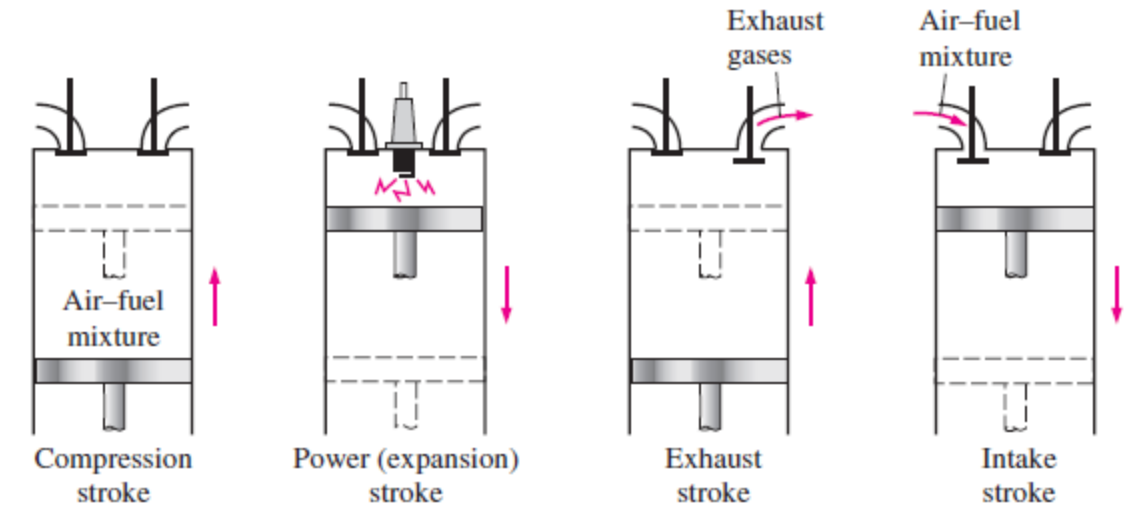
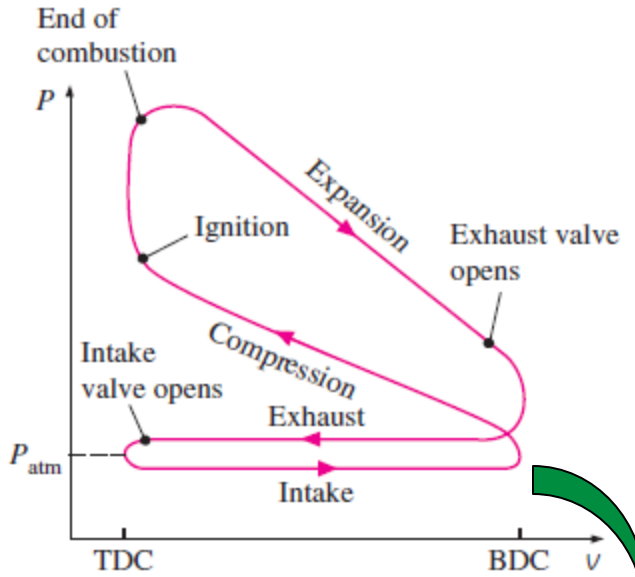
# Ciclos em motores....

**Modelagem termodinâmica!!!!**

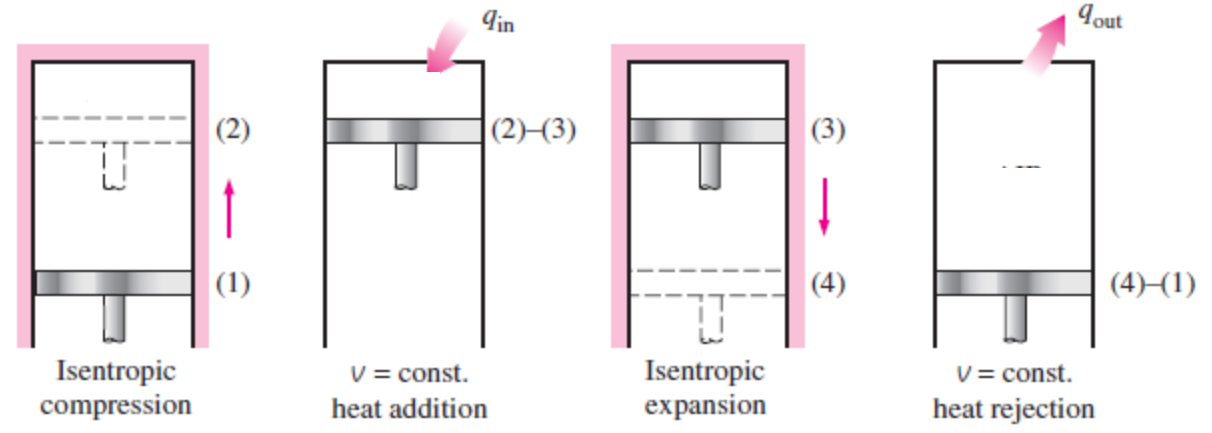
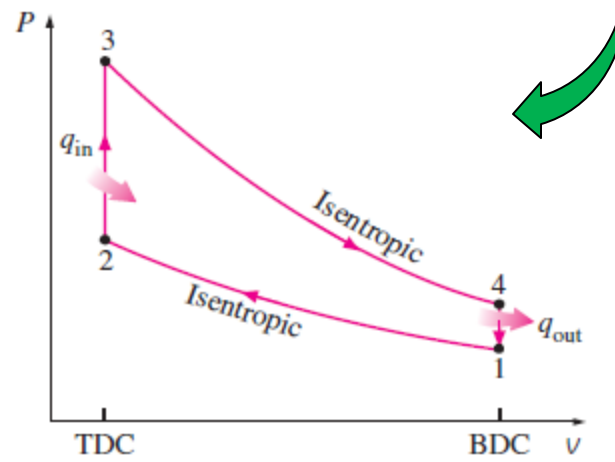




# Ciclos em motores....

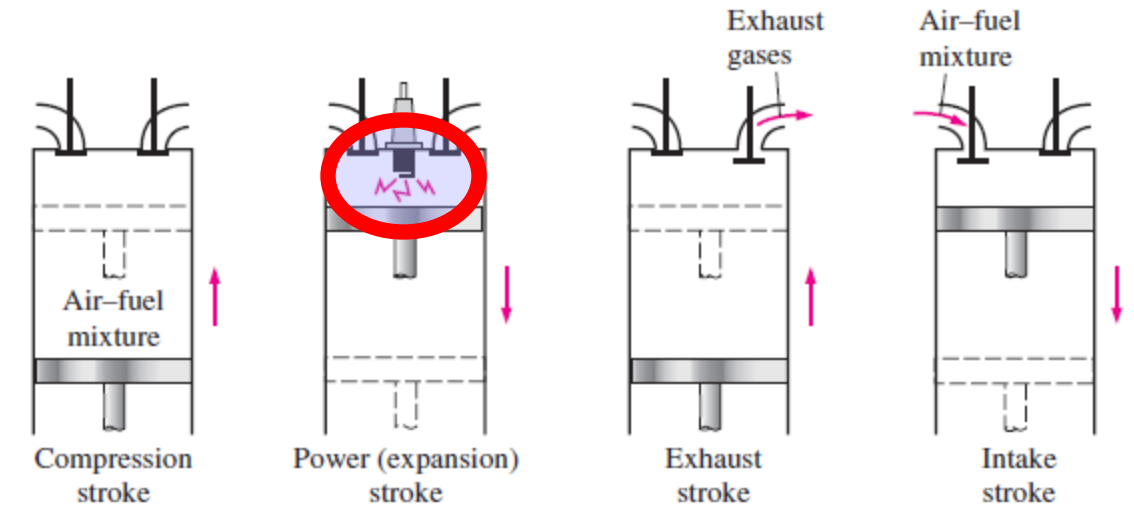
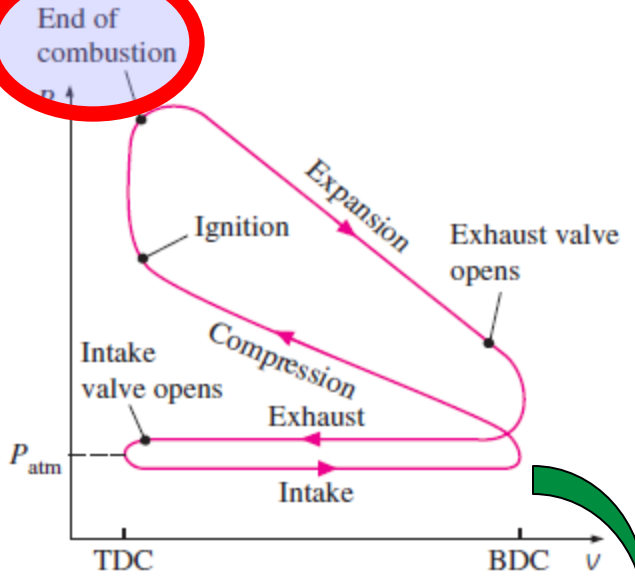


(a) Actual four-stroke spark-ignition engine

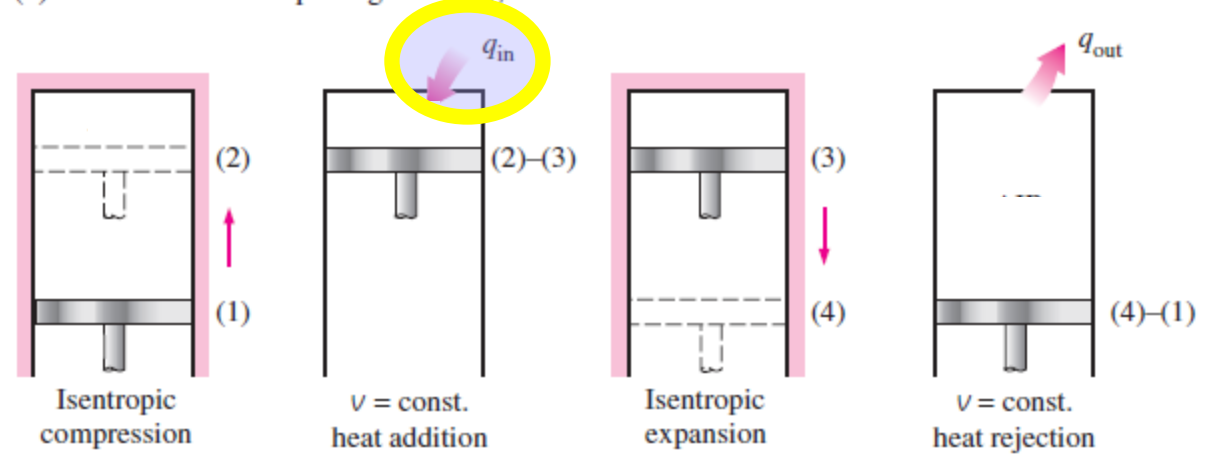
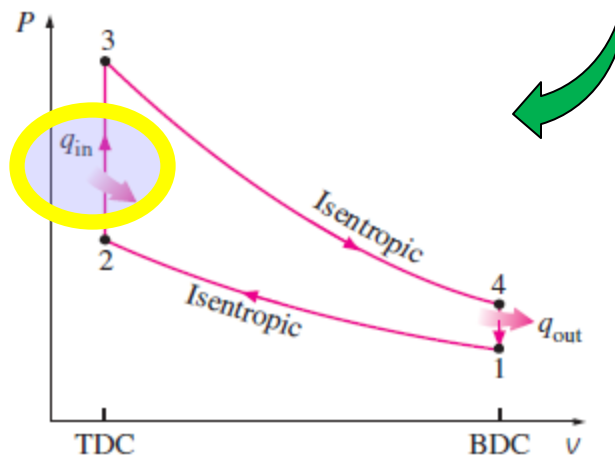


(b) Ideal Otto cycle

# Ciclos em motores....

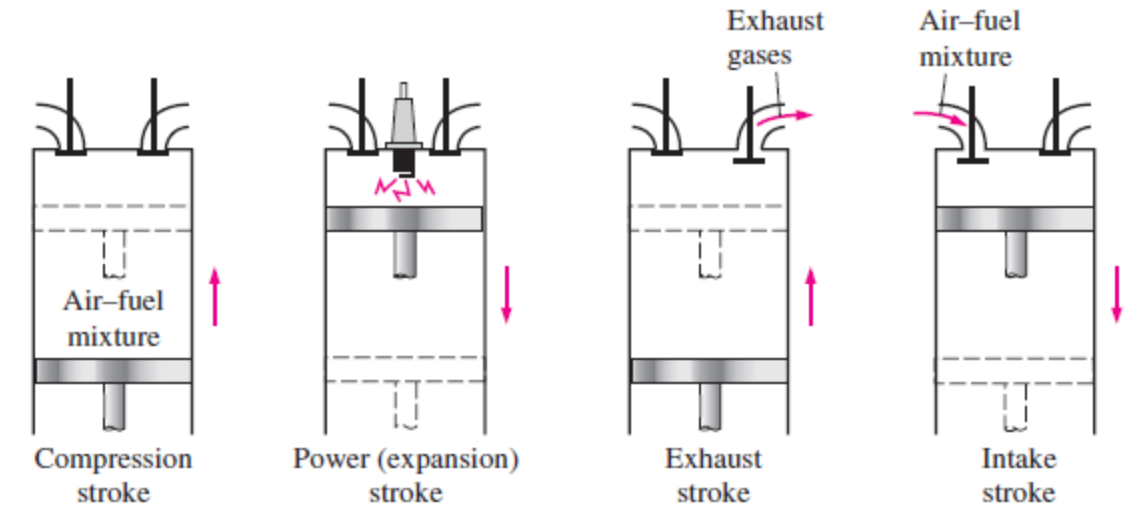
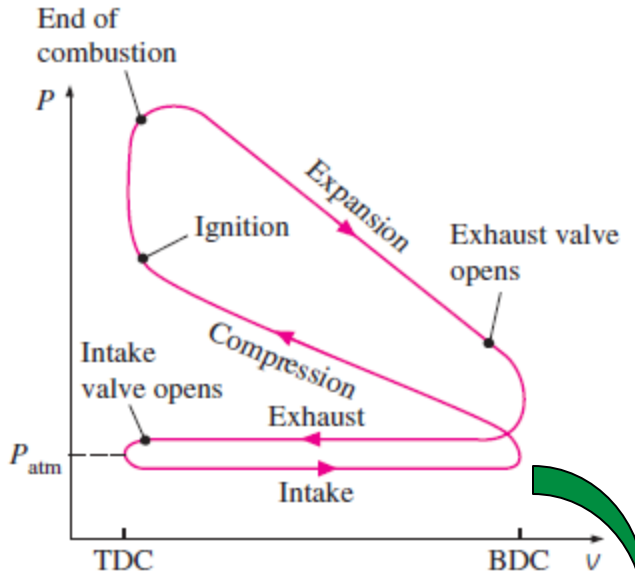


(a) Actual four-stroke spark-ignition engine

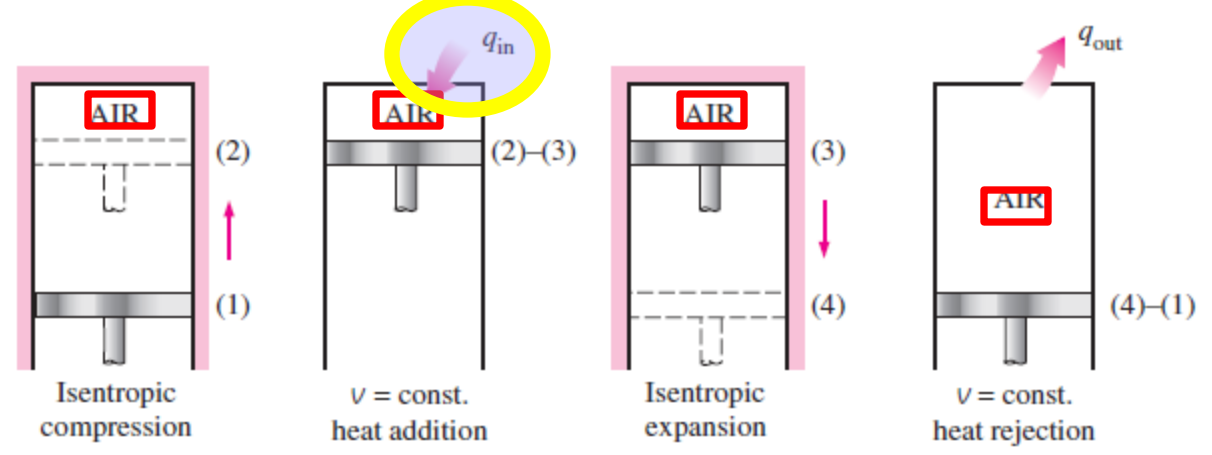
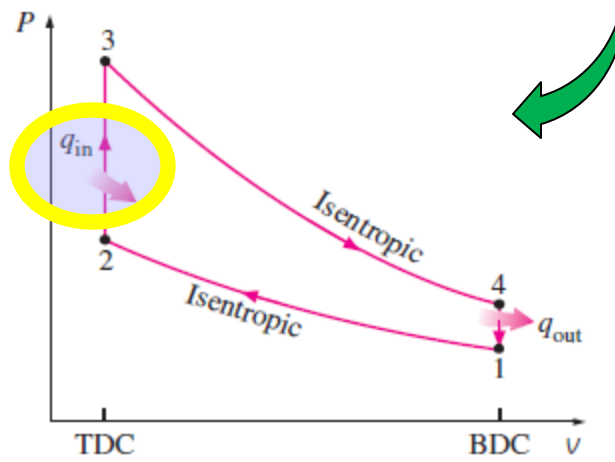


(b) Ideal Otto cycle

# Ciclos em motores....



(a) Actual four-stroke spark-ignition engine

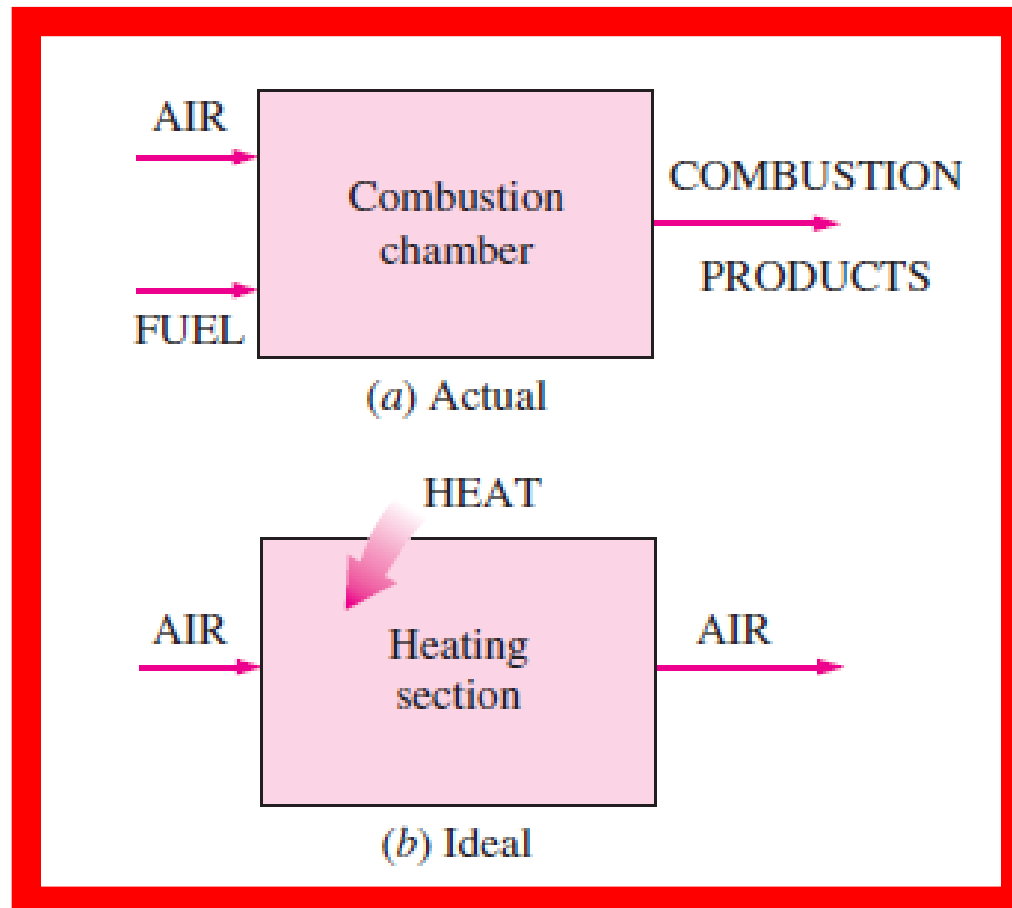


(b) Ideal Otto cycle



# Ciclos em motores....

- ✓ Hipóteses do padrão a ar



# Ciclos em motores....

- Hipóteses do ciclo padrão a ar
- ✓ O fluido de trabalho é o ar, o qual circula continuamente num circuito fechado, sempre se comportando como um gás ideal.
- ✓ Todos os **processos** que formam o ciclo são **internamente reversíveis**
- ✓ O processo de combustão é substituído por um processo de fornecimento de calor de uma fonte externa,
- ✓ O processo de exaustão é substituído por um processo de rejeição de calor que restaura o fluido de trabalho ao seu estado inicial.

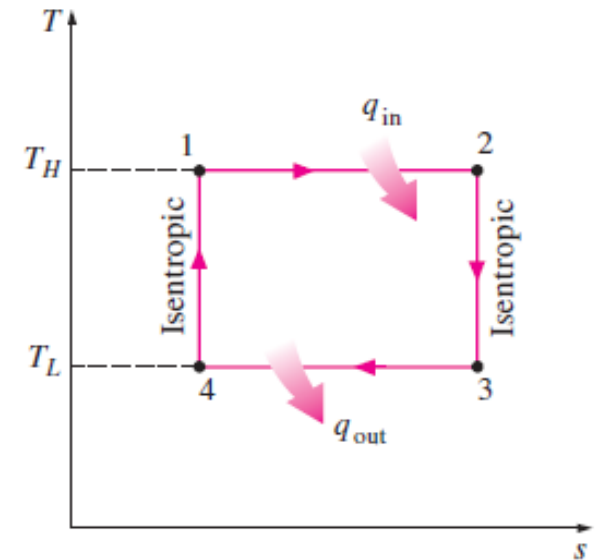
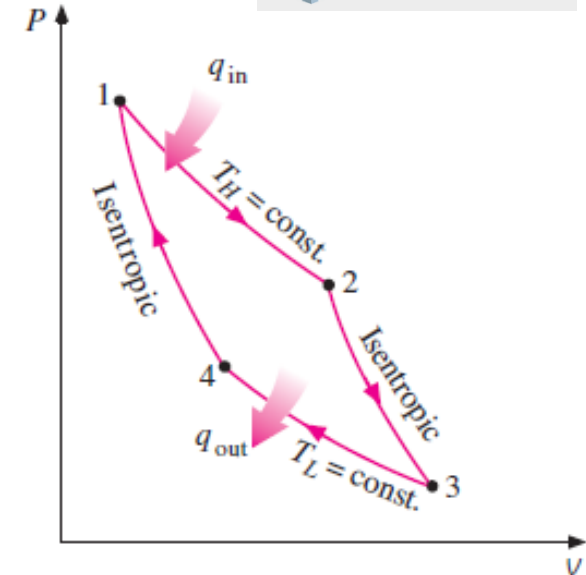
# Ciclos em motores....

- ✓ Ciclo de Carnot
- ✓ Ciclo Otto ideal
- ✓ Ciclo Diesel ideal

# Ciclo de Carnot

1. Compressão isentrópica,
2. Fornecimento isotérmico de calor,
3. Expansão isentrópica,
4. Rejeição isotérmica de calor.

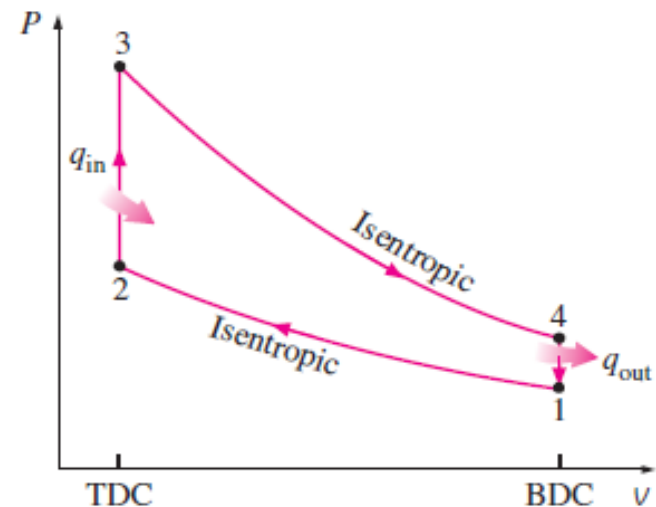
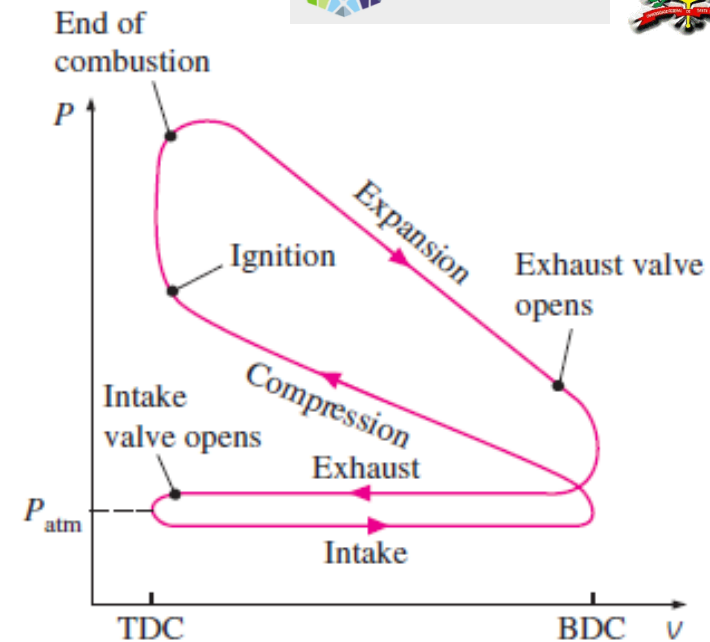
$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_F}{T_Q}$$



# Ciclo Otto ideal

1. Compressão isentrópica,
2. Fornecimento de calor a **volume** constante,
3. Expansão isentrópica,
4. Rejeição de calor a **volume** constante.

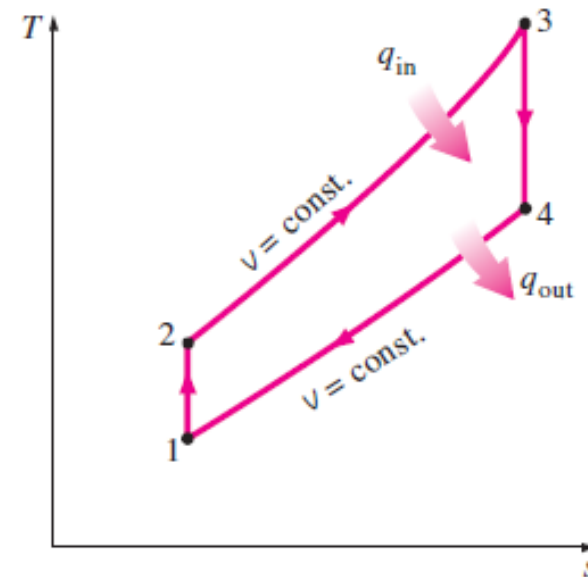
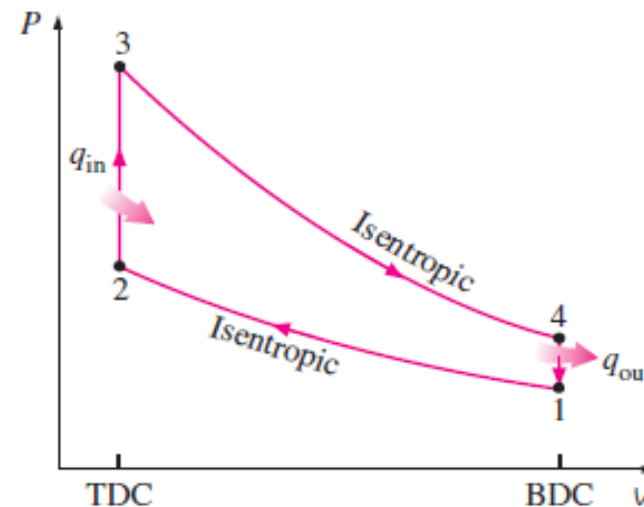
$$\eta_{t-Otto} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$$



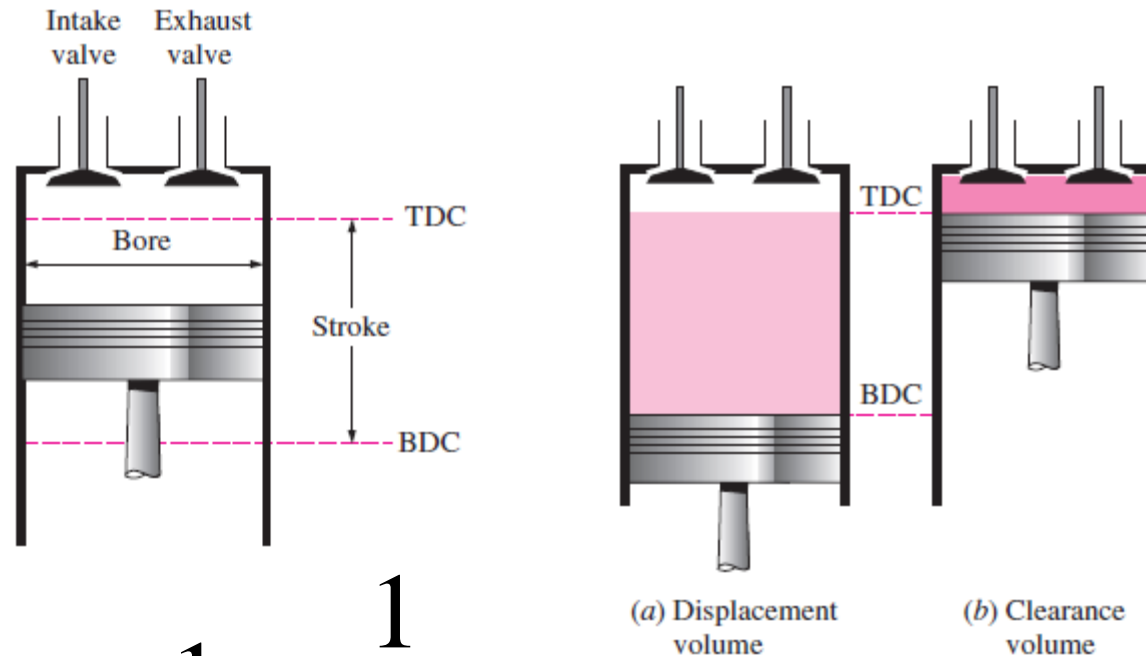
# Ciclo Otto ideal

1. Compressão isentrópica,
2. Fornecimento de calor a **volume** constante,
3. Expansão isentrópica,
4. Rejeição de calor a **volume** constante.

$$\eta_{t-Otto} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$$



# Ciclo Otto ideal



$$\eta_{t-Otto} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$$

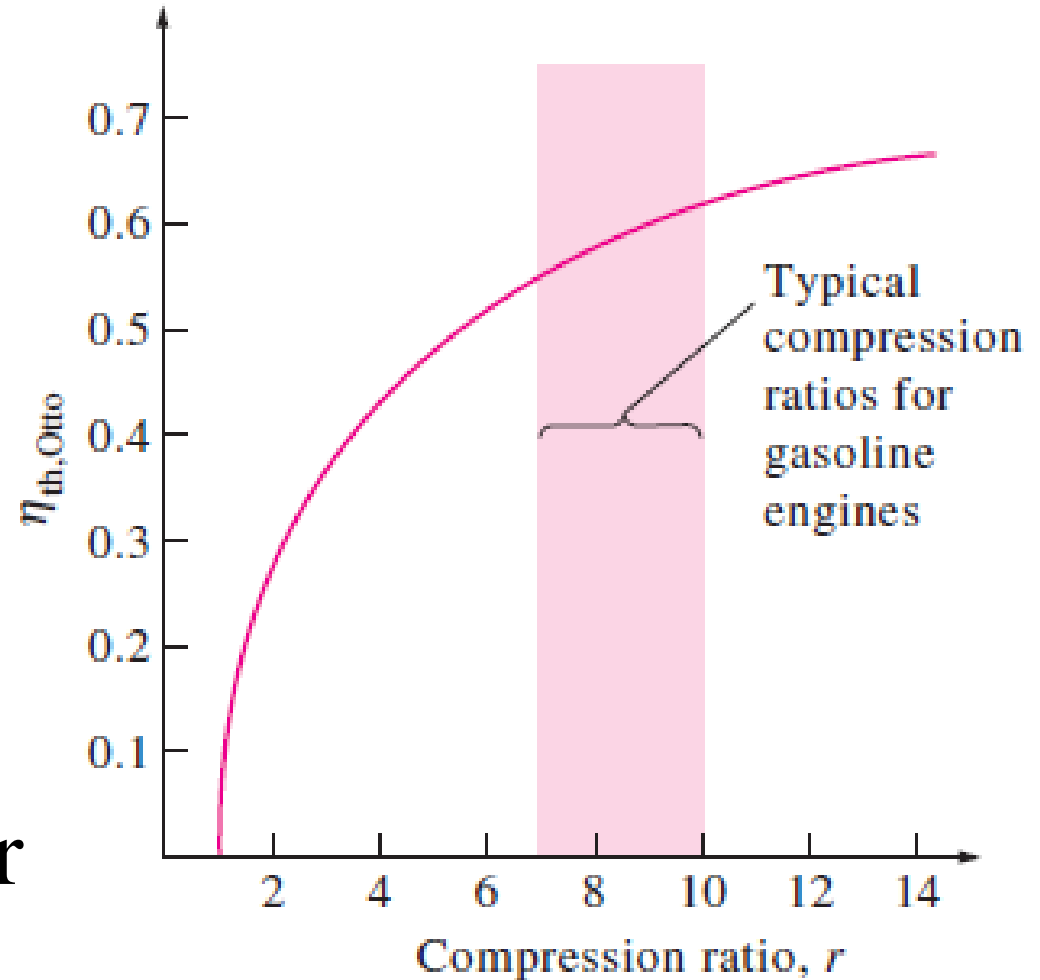
$$r = \frac{\text{Volume}_{\max}}{\text{Volume}_{\min}} = \frac{\text{Volume}_{\text{Ponto Morto Inferior}}}{\text{Volume}_{\text{Ponto Morto Superior}}}$$

$$k = \frac{c_p}{c_v}$$

# Ciclo Otto ideal

$$\eta_{t-Otto} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$$

$$k = \frac{c_p}{c_v} \approx 1,4 \quad \Rightarrow \quad \text{Ar}$$

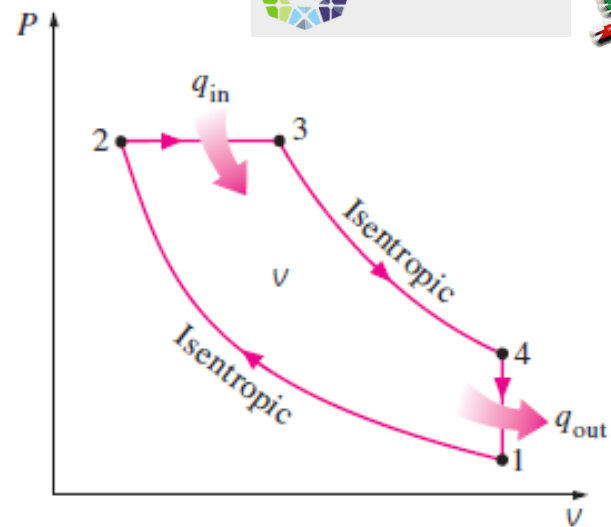




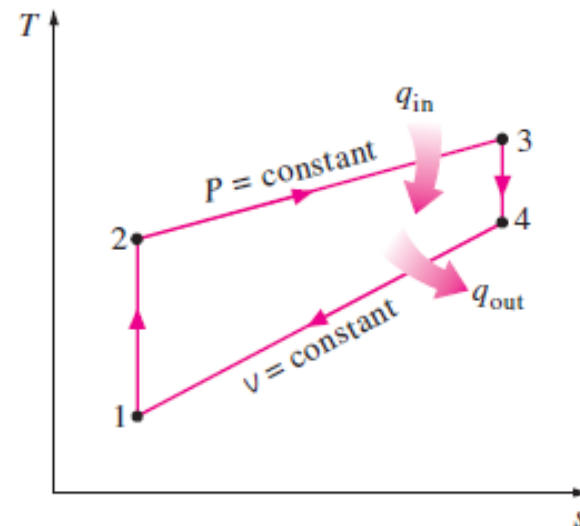
# Ciclo Diesel ideal

1. Compressão isentrópica,
2. Fornecimento de calor a **pressão** constante,
3. Expansão isentrópica,
4. Rejeição de calor a **volume** constante.

$$\eta_{t-Diesel} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \left[ \frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)} \right]$$



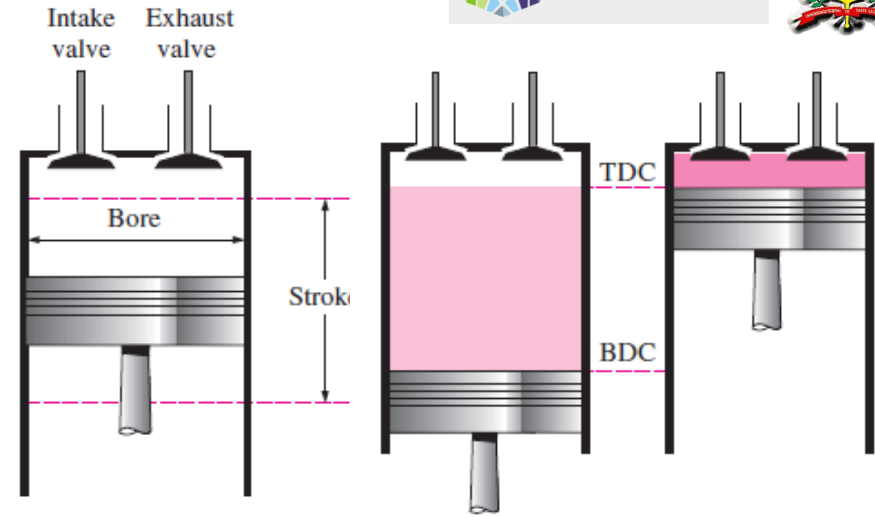
(a) P- v diagram



(b) T-s diagram

# Ciclo Diesel ideal

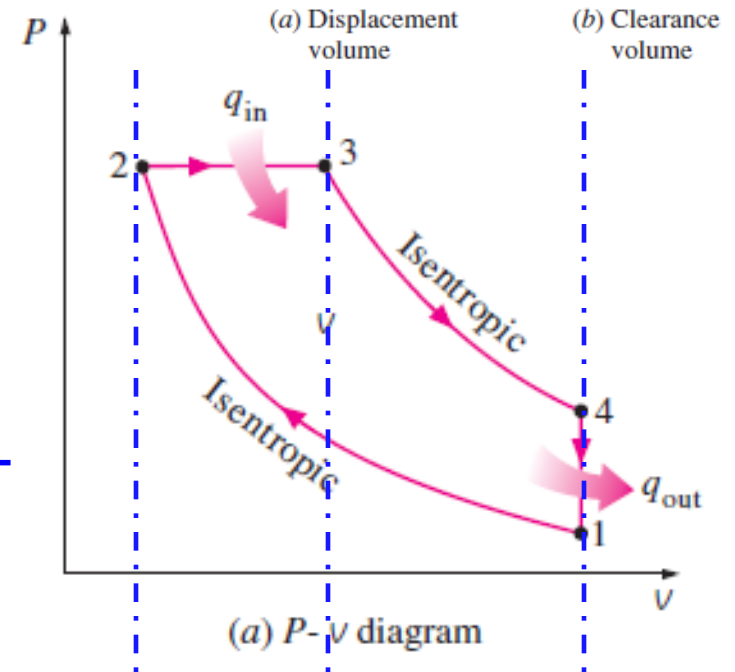
$$\eta_{t-Diesel} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \left[ \frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)} \right]$$



$$r = \frac{Volume_{max}}{Volume_{min}} = \frac{Volume_{\text{Ponto Morto Inferior}}}{Volume_{\text{Ponto Morto Superior}}}$$

$$k = \frac{c_p}{c_v}$$

$$r_c = \frac{V_3}{V_2} = \frac{v_3}{v_2}$$



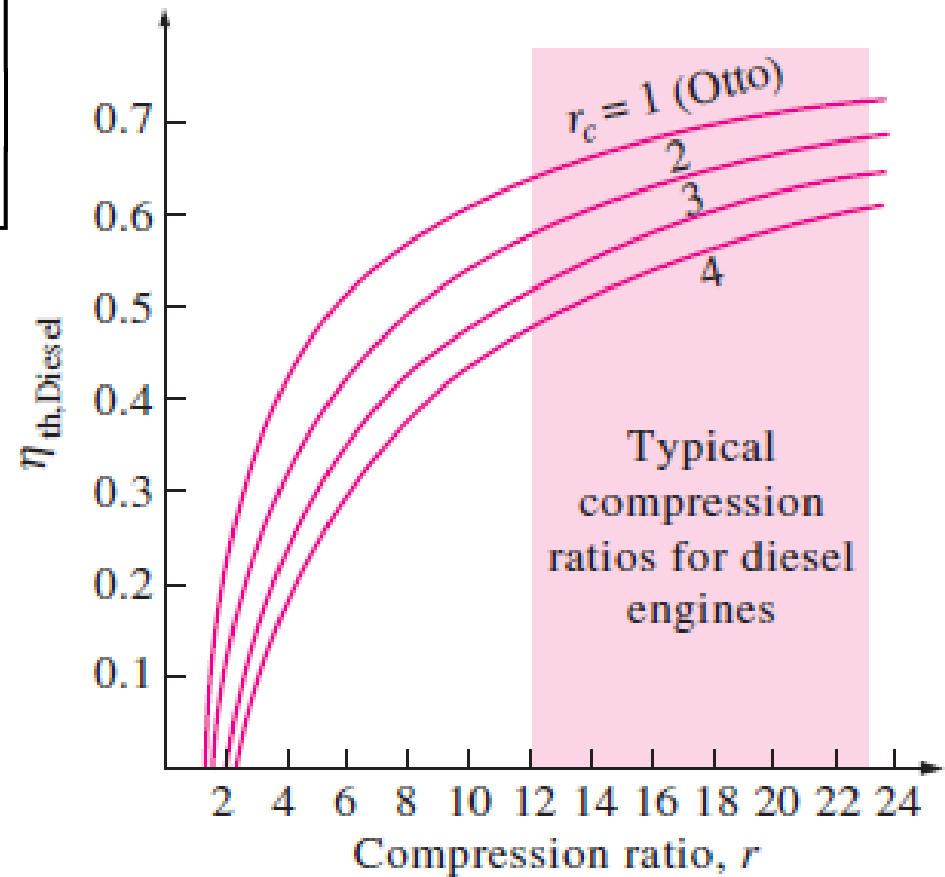
# Ciclo Diesel ideal

$$r_c = 1 \Rightarrow \eta_{t-Diesel} = \eta_{t-Otto}$$

$$\eta_{t-Diesel} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \left[ \frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)} \right]$$

$$r_c = \frac{V_3}{V_2} = \frac{v_3}{v_2}$$

$$k = \frac{c_p}{c_v} \approx 1,4 \Rightarrow \text{Ar}$$



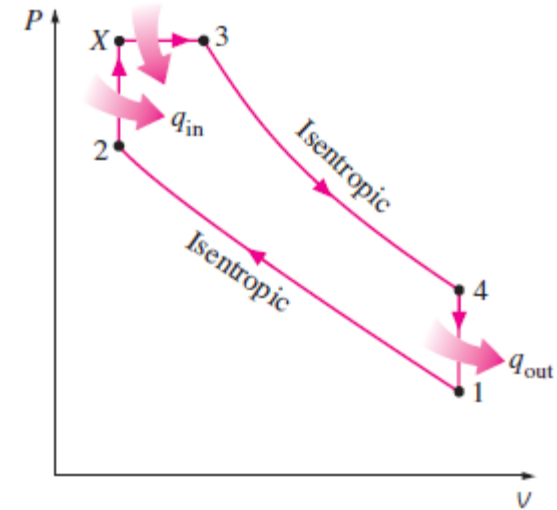
# Ciclos em motores....

- ✓ Ciclo de Carnot
- ✓ Ciclo Otto ideal
- ✓ Ciclo Diesel ideal

$$\eta_{Carnot} > \eta_{t-Otto} > \eta_{t-Diesel}$$

# Ciclo Dual ou Mixto

1. Compressão isentrópica,
2. Fornecimento de calor em **duas etapas**, uma parcela a **volume constante** e outra parcela **pressão constante**,
3. Expansão isentrópica,
4. Rejeição de calor a volume constante.



$$r_c = \frac{V_3}{V_2} = \frac{v_3}{v_2} \quad \eta_{t-Dual} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \frac{\frac{p_3}{p_2} (r_c)^k - 1}{\left(\frac{p_3}{p_2} - 1\right) + k \left(\frac{p_3}{p_2}\right) (r_c - 1)}$$



# Ciclos ideais Otto, Dual e Diesel

$$\eta_{t-Otto} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$$

$$\eta_{t-Dual} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \frac{\frac{p_3}{p_2} (r_c)^k - 1}{\left(\frac{p_3}{p_2} - 1\right) + k \left(\frac{p_3}{p_2}\right) (r_c - 1)}$$

$$\eta_{t-Diesel} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \left[ \frac{r_c^k - 1}{k (r_c - 1)} \right]$$

# Formulação termodinâmica

$$\frac{T_1}{T_2} = \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{k-1}$$

$$Q_{2-3} = U_3 - U_2 = mc_v (T_3 - T_2)$$

$$\frac{p_3 V_3}{T_3} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad \rightarrow \quad p_3 = p_2 \left( \frac{T_3}{T_2} \right) \left( \frac{V_2}{V_3} \right)$$

- Formulação termodinâmica simples: processos de compressão e expansão isentrópicos...

# Comparação entre ciclos

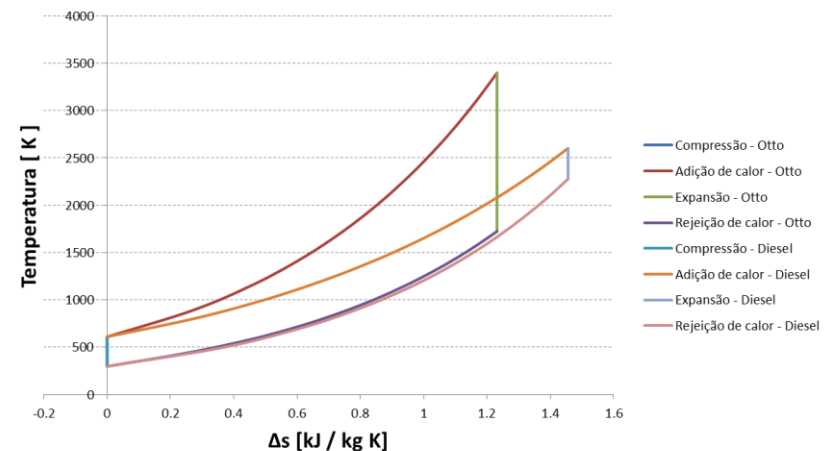
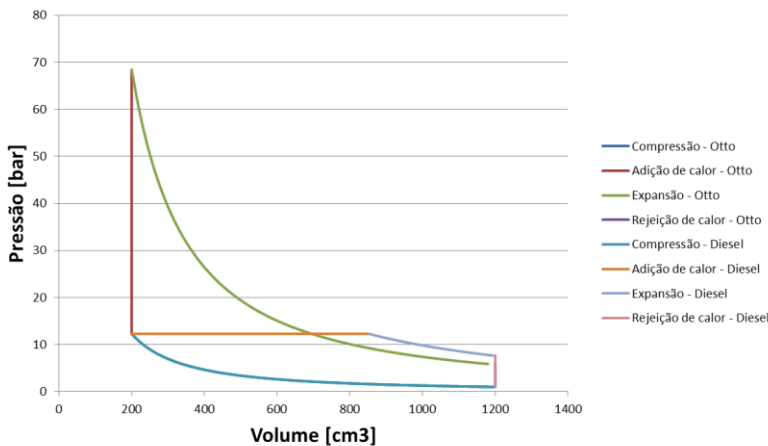
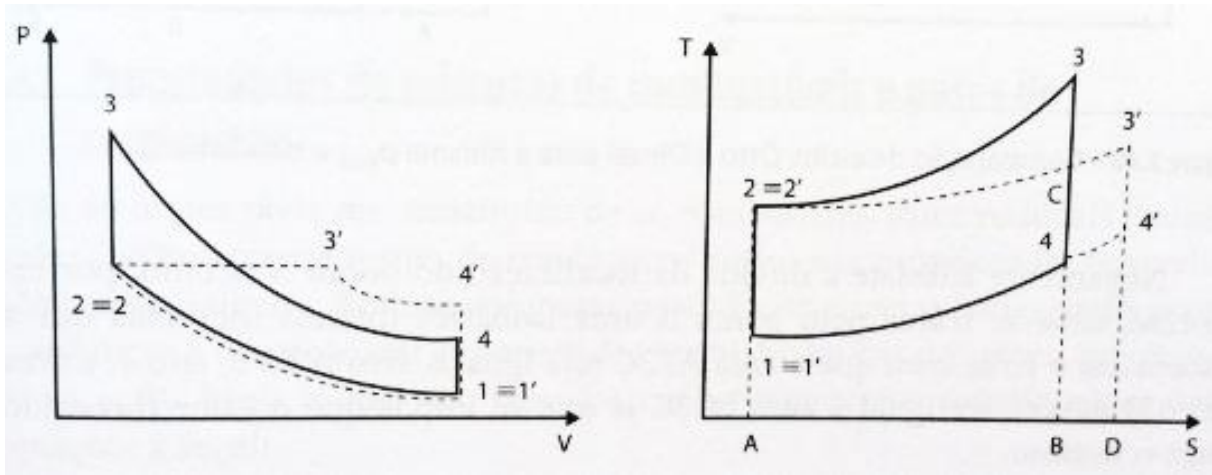
Ciclo Otto		
rc	6	
Vcc	200 cm <sup>3</sup>	
p1	101.33 kPa	
T1	298 K	
k	1.4 air	
Vt-pmi	1200 cm <sup>3</sup>	0.0012 m <sup>3</sup>
Vt-pms	200 cm <sup>3</sup>	0.0002 m <sup>3</sup>
rho	1.225 kg/m <sup>3</sup>	
Ru	8314.4 cm <sup>3</sup> kPa / K mol	
Rair	0.2869 kJ / kg K	kPa m <sup>3</sup> / kg K
cv_air	0.71725 kJ / kg K	
air_mass	0.001422 kg	

Ciclo Diesel		
rc	6	
Vcc	200 cm <sup>3</sup>	
p1	101.33 kPa	
T1	298 K	
k	1.4 air	
Vt-pmi	1200 cm <sup>3</sup>	0.0012 m <sup>3</sup>
Vt-pms	200 cm <sup>3</sup>	0.0002 m <sup>3</sup>
rho	1.225 kg/m <sup>3</sup>	
Ru	8314.4 cm <sup>3</sup> kPa / K mol	
Rair	0.2869 kJ / kg K	kPa m <sup>3</sup> / kg K
cv_air	0.71725 kJ / kg K	
air_mass	0.001422 kg	
cp-air	1.00415 kJ / kg K	

Comparação de ciclos Otto e Diesel para a mesma  $r$  e o mesmo  $Q$   
 (linha continua – Otto, linha tracejada – Diesel)

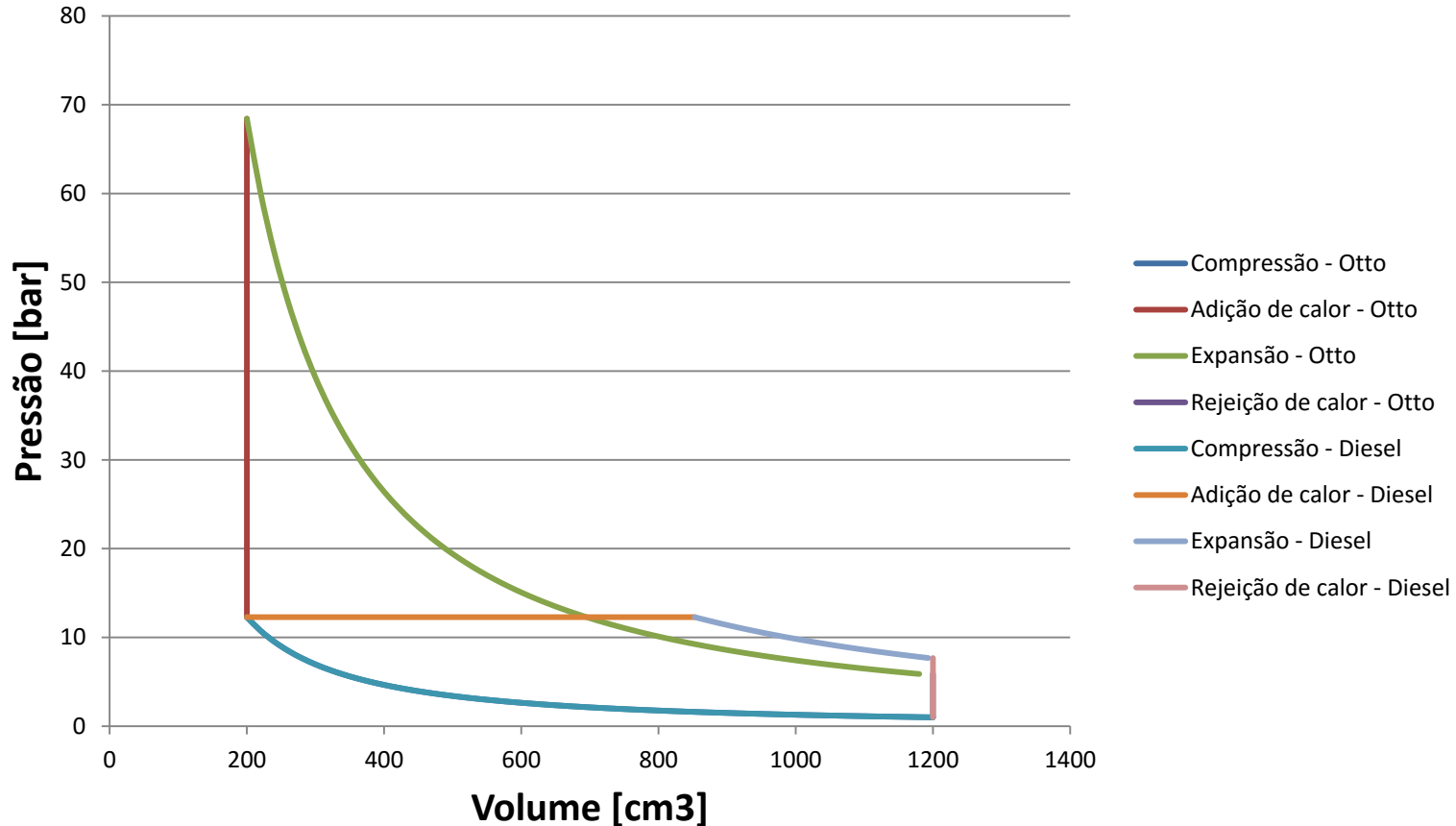


# Comparação entre ciclos



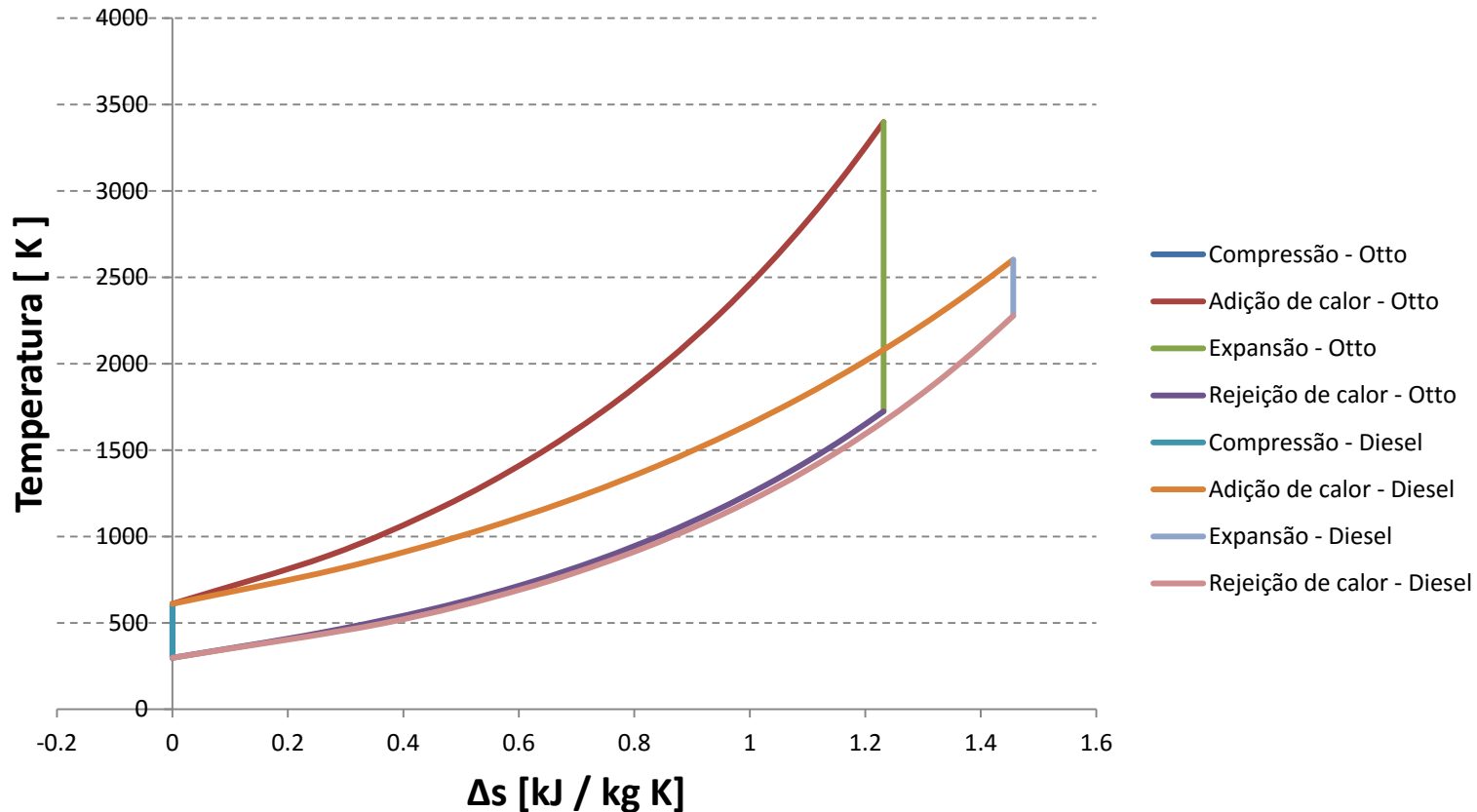
Comparação de ciclos Otto e Diesel para a mesma  $r$  e o mesmo  $Q$   
 (linha continua – Otto, linha tracejada – Diesel)

# Comparação entre ciclos



Comparação de ciclos Otto e Diesel para a mesma  $r$  e o mesmo  $Q$   
 (linha continua – Otto, linha tracejada – Diesel)

# Comparação entre ciclos



Comparação de ciclos Otto e Diesel para a mesma  $r$  e o mesmo  $Q$   
 (linha continua – Otto, linha tracejada – Diesel)

# Comparação entre ciclos

Para a mesma razão de compressão

$$\eta_{t-Diesel} < \eta_{t-Dual} < \eta_{t-Otto}$$

Para a mesma temperatura máxima de ciclo

$$\eta_{t-Diesel} > \eta_{t-Dual} > \eta_{t-Otto}$$

Comparação de ciclos Otto, dual e Diesel para a mesma  $r$ , e para a mesma temperatura máxima  $T_3$  de ciclo

# Ciclo Otto – padrão a ar

$$\eta_{t-Otto} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$$

$$k = \frac{c_p}{c_v} \approx 1,4 \Rightarrow \text{Ar}$$

r	k					
	1.45	1.4	1.35	1.3	1.25	1.2
	$\eta_t$ (%)					
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	26.80	24.21	21.54	18.77	15.91	12.94
3	39.00	35.56	31.92	28.08	24.02	19.73
4	46.41	42.57	38.44	34.02	29.29	24.21
5	51.53	47.47	43.07	38.30	33.13	27.52
6	55.35	51.16	46.59	41.58	36.11	30.12
7	58.34	54.08	49.39	44.22	38.52	32.24
8	60.77	56.47	51.70	46.41	40.54	34.02
9	62.80	58.48	53.65	48.27	42.26	35.56
10	64.52	60.19	55.33	49.88	43.77	36.90
11	66.01	61.68	56.80	51.29	45.09	38.10
12	67.31	62.99	58.09	52.55	46.27	39.16
13	68.47	64.16	59.25	53.67	47.34	40.13
14	69.50	65.20	60.29	54.69	48.30	41.01
15	70.44	66.15	61.24	55.62	49.19	41.82
16	71.28	67.01	62.11	56.47	50.00	42.57
17	72.06	67.80	62.90	57.26	50.75	43.26
18	72.77	68.53	63.64	57.98	51.45	43.90

# Ciclo Otto – padrão a ar

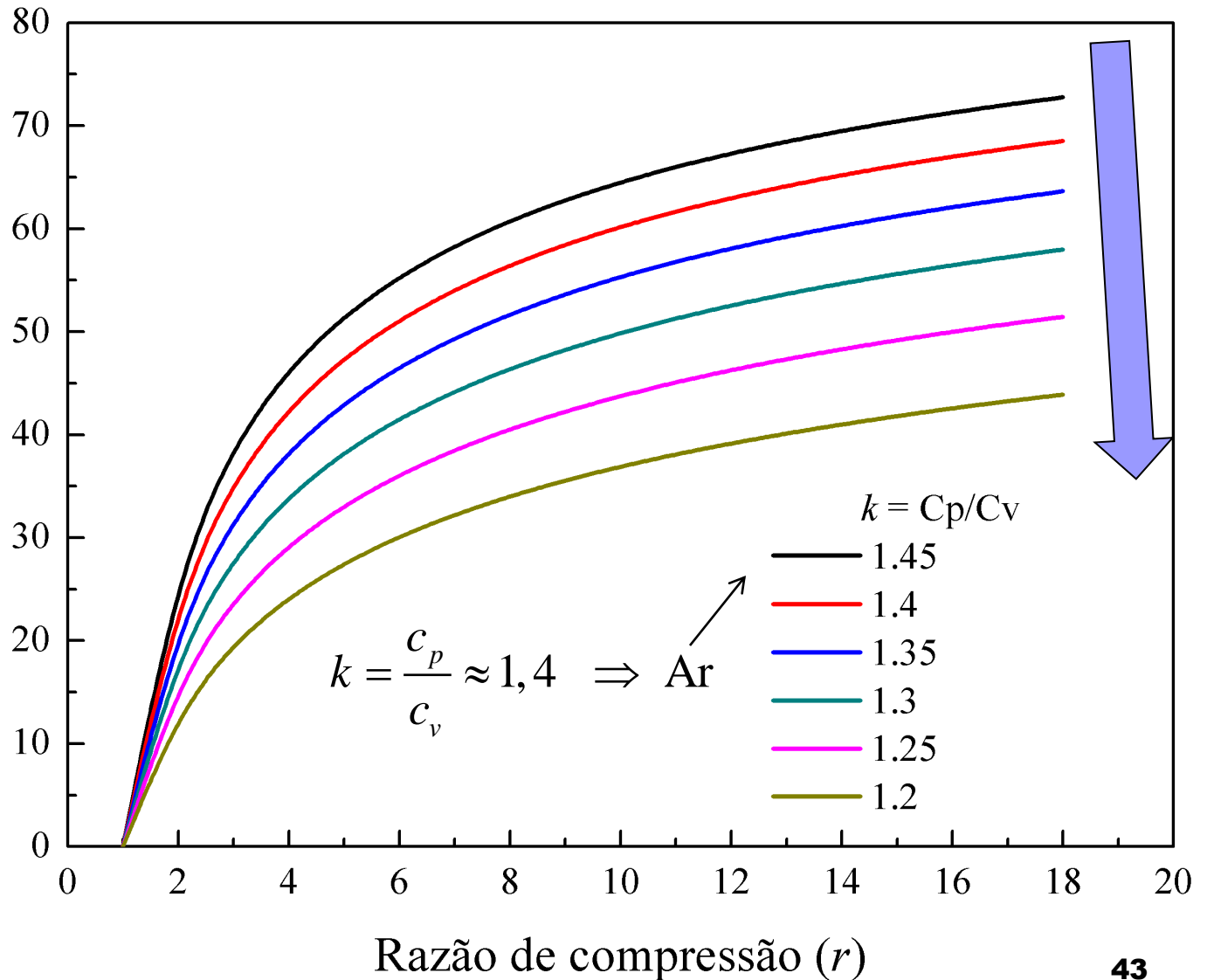
$$\eta_{t-Otto} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$$

$$k = \frac{c_p}{c_v} \approx 1,4 \Rightarrow \text{Ar}$$

r	k					
	1.45	1.4	1.35	1.3	1.25	1.2
	ηt (%)					
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	26.80	24.21	21.54	18.77	15.91	12.94
3	39.00	35.56	31.92	28.08	24.02	19.73
4	46.41	42.57	38.44	34.02	29.29	24.21
5	51.53	47.47	43.07	38.30	33.13	27.52
6	55.35	51.16	46.59	41.58	36.11	30.12
7	58.34	54.08	49.39	44.22	38.52	32.24
8	60.77	56.47	51.70	46.41	40.54	34.02
9	62.80	58.48	53.65	48.27	42.26	35.56
10	64.52	60.19	55.33	49.88	43.77	36.90
11	66.01	61.68	56.80	51.29	45.09	38.10
12	67.31	62.99	58.09	52.55	46.27	39.16
13	68.47	64.16	59.25	53.67	47.34	40.13
14	69.50	65.20	60.29	54.69	48.30	41.01
15	70.44	66.15	61.24	55.62	49.19	41.82
16	71.28	67.01	62.11	56.47	50.00	42.57
17	72.06	67.80	62.90	57.26	50.75	43.26
18	72.77	68.53	63.64	57.98	51.45	43.90

# Ciclo Otto – padrão a ar

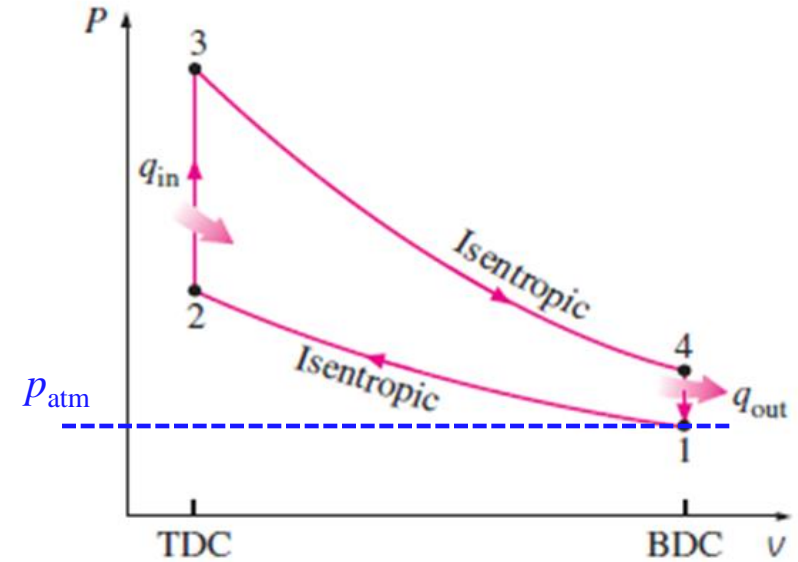
$$\eta_{t-Otto}(\%) = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$$



# Ciclo Otto – padrão a ar

Conceitos definidos a partir do ciclo padrão a ar:

Trabalho do ciclo:



$$W_{\text{ciclo}} = \oint p dv$$

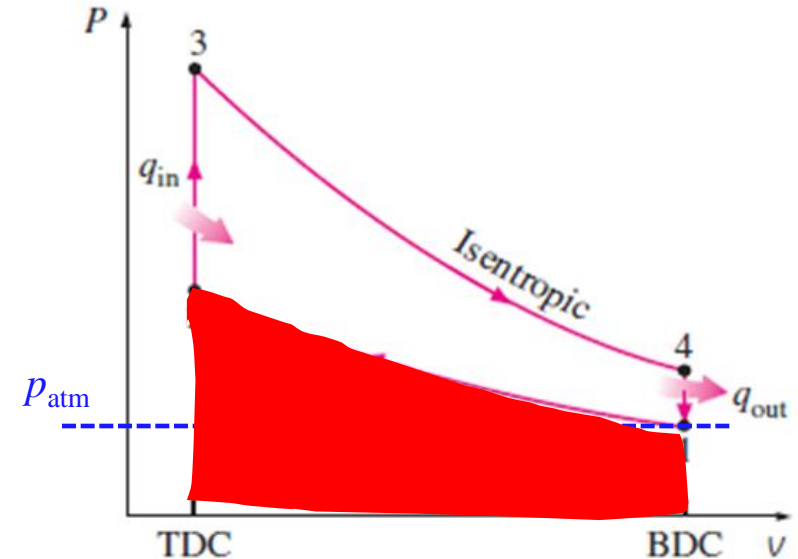


# Ciclo Otto – padrão a ar

Conceitos definidos a partir do ciclo padrão a ar:

Trabalho do ciclo:

$$W_{\text{compressão}} = U_2 - U_1$$



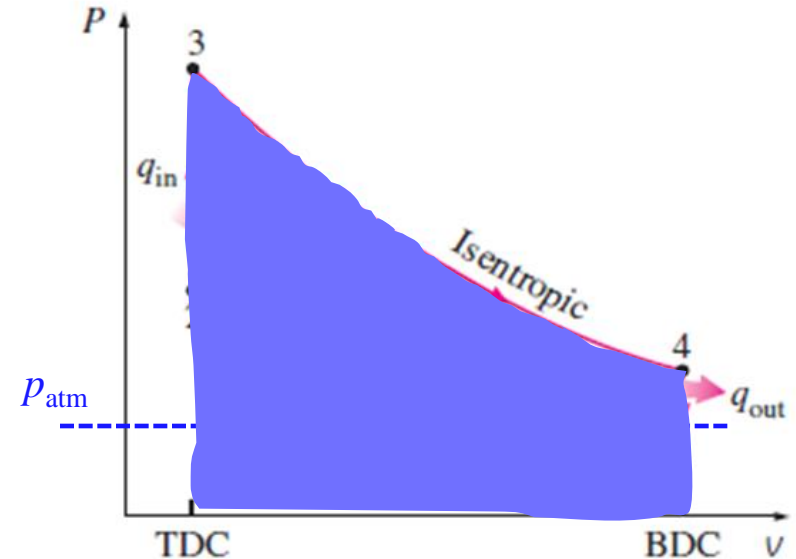
## Trabalho de compressão

# Ciclo Otto – padrão a ar

Conceitos definidos a partir do ciclo padrão a ar:

Trabalho do ciclo:

$$W_{\text{expansão}} = U_3 - U_4$$



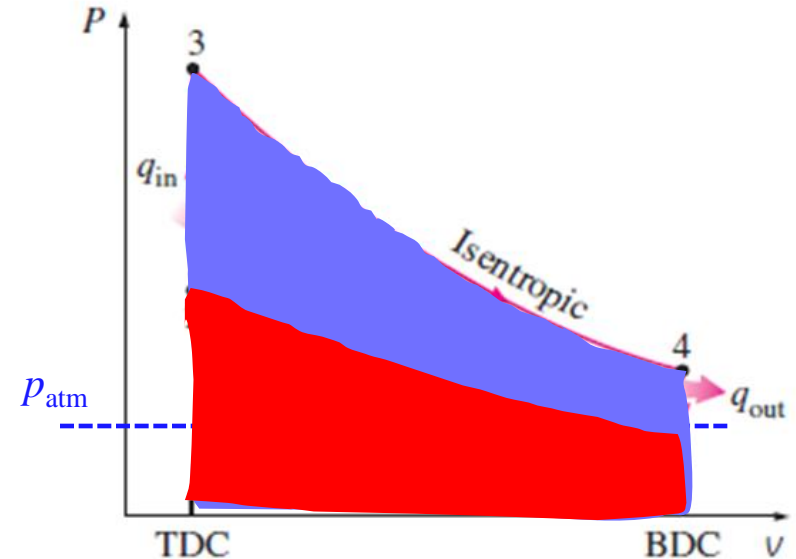
Trabalho de expansão

# Ciclo Otto – padrão a ar

Conceitos definidos a partir do ciclo padrão a ar:

Trabalho do ciclo:

$$W_{\text{expansão}} = U_3 - U_4$$



Trabalho de expansão

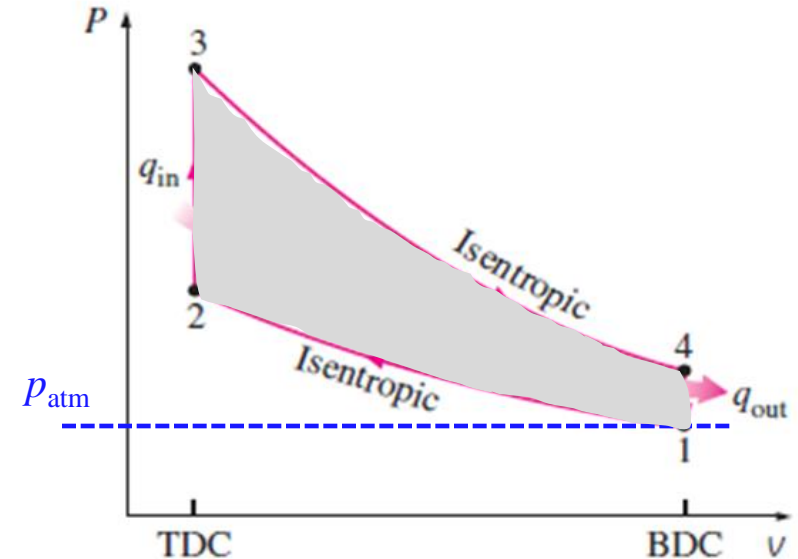
Trabalho de compressão

# Ciclo Otto – padrão a ar

Conceitos definidos a partir do ciclo padrão a ar:

Trabalho do ciclo:

$$W_{\text{ciclo}} = \oint p dv$$



## Trabalho do ciclo

# Ciclo Otto – padrão a ar

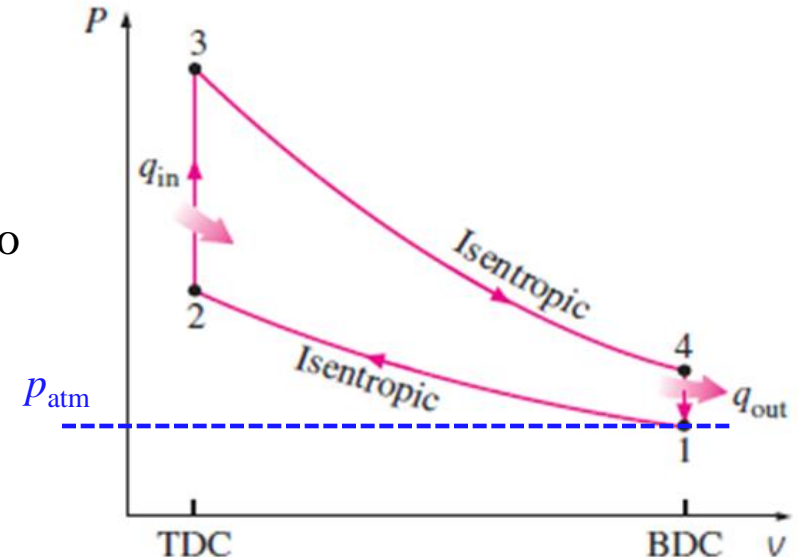
Conceitos definidos a partir do ciclo padrão a ar:

## Trabalho do ciclo:

$$W_{\text{ciclo}} = W_{\text{expansão}} - W_{\text{compressão}}$$

$$W_{\text{expansão}} = U_3 - U_4$$

$$W_{\text{compressão}} = U_2 - U_1$$



$$W_{\text{ciclo}} = m \cdot c_v \cdot \left[ (T_3 - T_4) - (T_2 - T_1) \right]$$

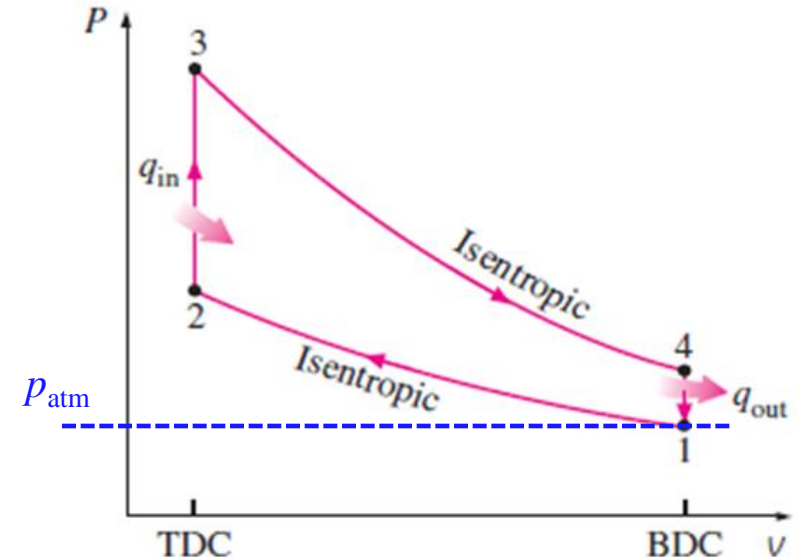
$$c_v = \left( \frac{du}{dT} \right)_{\text{volume constante}} \Rightarrow c_v dT = du$$

# Ciclo Otto – padrão a ar

Conceitos definidos a partir do ciclo padrão a ar:

## Pressão média do ciclo:

Por definição, a pressão média do ciclo é uma pressão que se fosse aplicada constantemente na cabeça do pistão, ao longo de um curso, realizaria o mesmo trabalho do ciclo

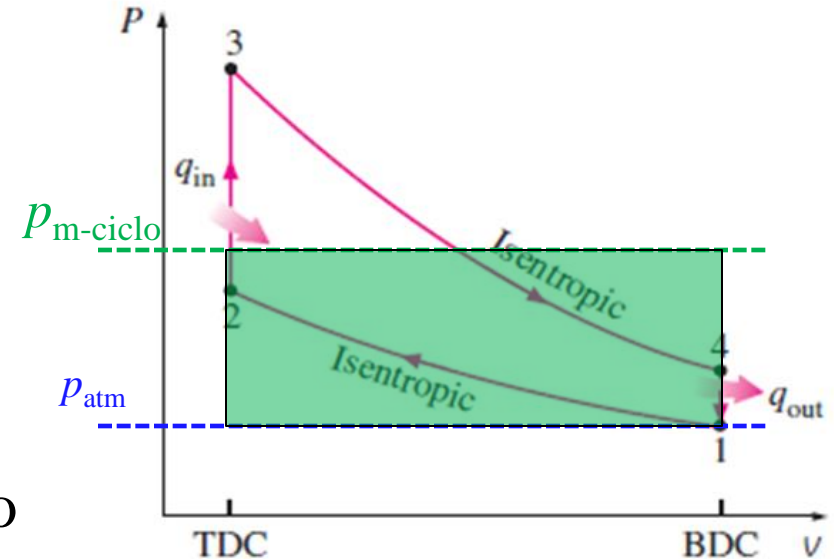


# Ciclo Otto – padrão a ar

Conceitos definidos a partir do ciclo padrão a ar:

## Pressão média do ciclo:

Por definição, a **pressão média do ciclo** é uma pressão que se fosse aplicada constantemente na cabeça do pistão, ao longo de um curso, realizaria o mesmo trabalho do ciclo



# Ciclo Otto – padrão a ar

Conceitos definidos a partir do ciclo padrão a ar:

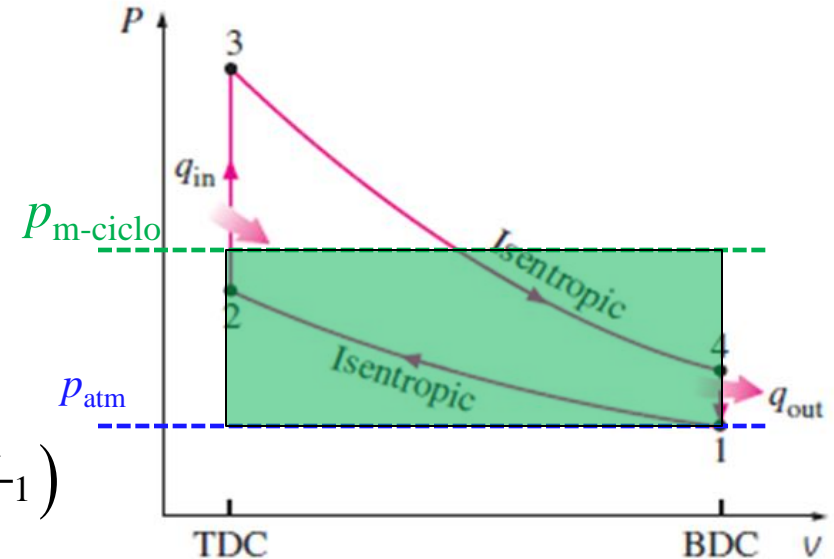
## Pressão média do ciclo:

$$W_{\text{ciclo}} = \oint p dv = \int_{pms}^{pmi} p_{m\text{-ciclo}} dV = (V_2 - V_1)$$

$$V_2 - V_1 = V_{du} \text{ (cilindrada unitária)}$$

$$W_{\text{ciclo}} = p_{m\text{-ciclo}} V_{du}$$

$$p_{m\text{-ciclo}} = \frac{W_{\text{ciclo}}}{V_{du}}$$



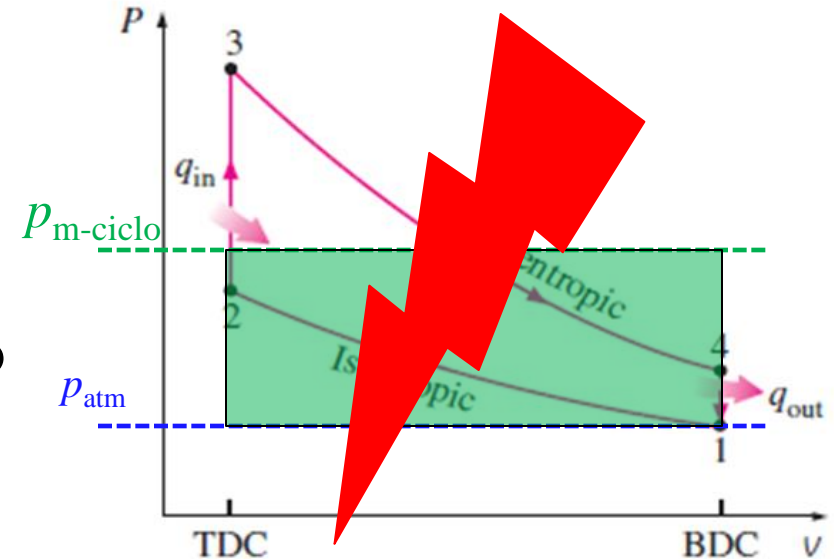


# Ciclo Otto – padrão a ar

Conceitos definidos a partir do ciclo padrão a ar:

## Potência do ciclo:

Por definição, a **potência do ciclo** é o trabalho do ciclo por unidade de tempo. Pode ser determinada multiplicando o trabalho de ciclo pelo número de vezes que é realizado na unidade de tempo (frequência de realização do ciclo)



# Ciclo Otto – padrão a ar

Conceitos definidos a partir do ciclo padrão a ar:

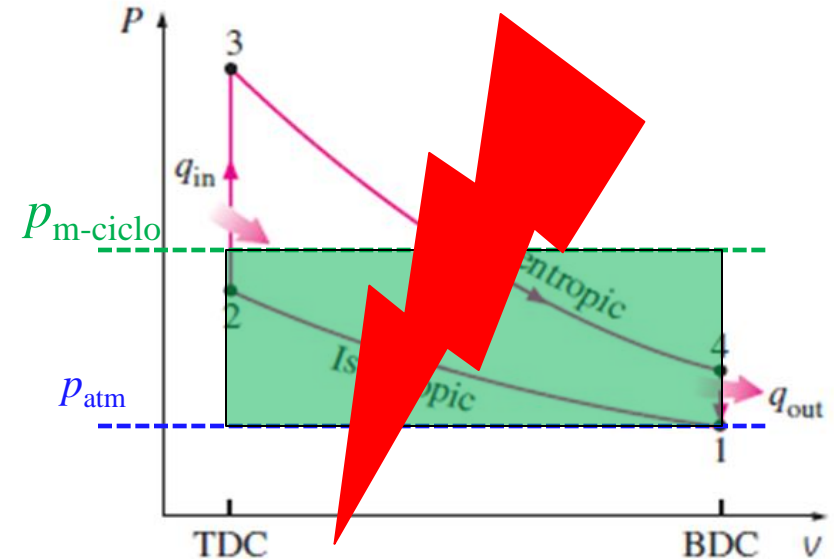
## Potência do ciclo:

$$P_{ciclo} = W_{ciclo} \frac{n}{x}$$

$$P_{ciclo} = \frac{P_{m-ciclo} \cdot V_{du} \cdot n}{x}$$

$x$  = fator de tempos,  $x = 1$  para motor 2T, e  $x = 2$  para motor 4T,  $n$  = rotação do motor

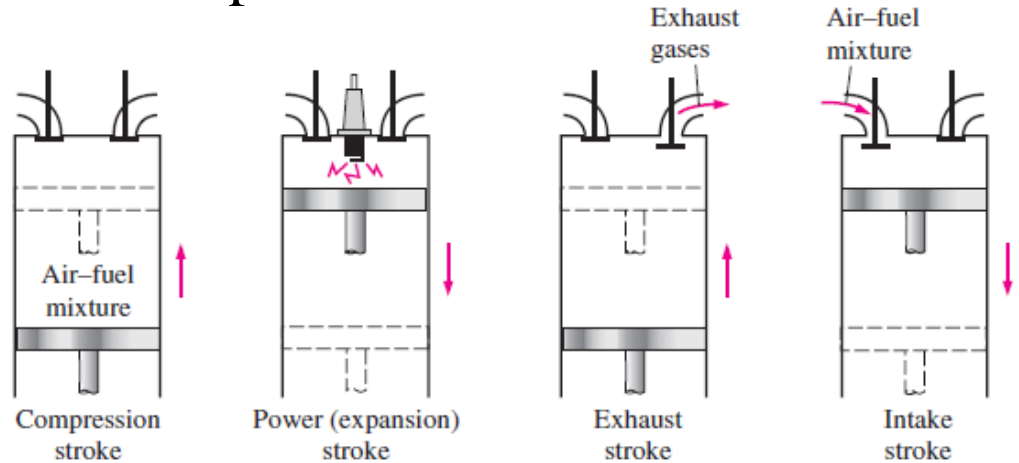
*Para motores semelhantes, a potência é função da cilindrada (tamanho) e da rotação*



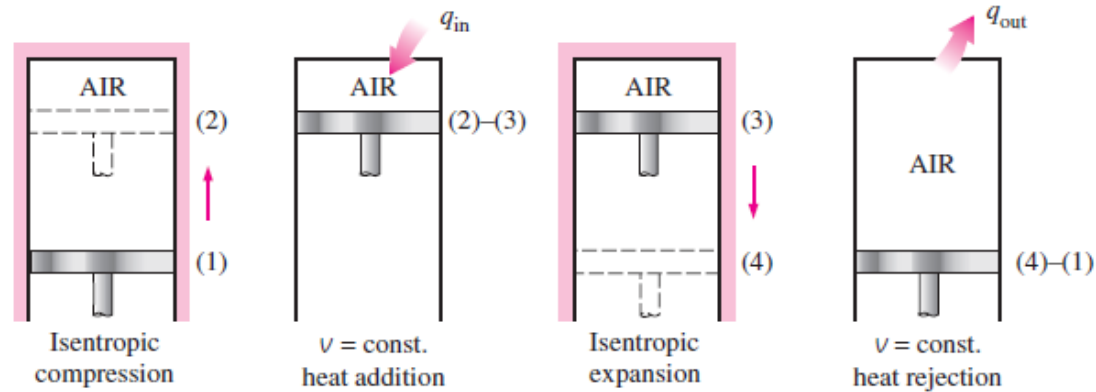
# Ciclo Otto – padrão a ar

Conceitos definidos a partir do ciclo padrão a ar:

## Fração residual de gases:



(a) Actual four-stroke spark-ignition engine

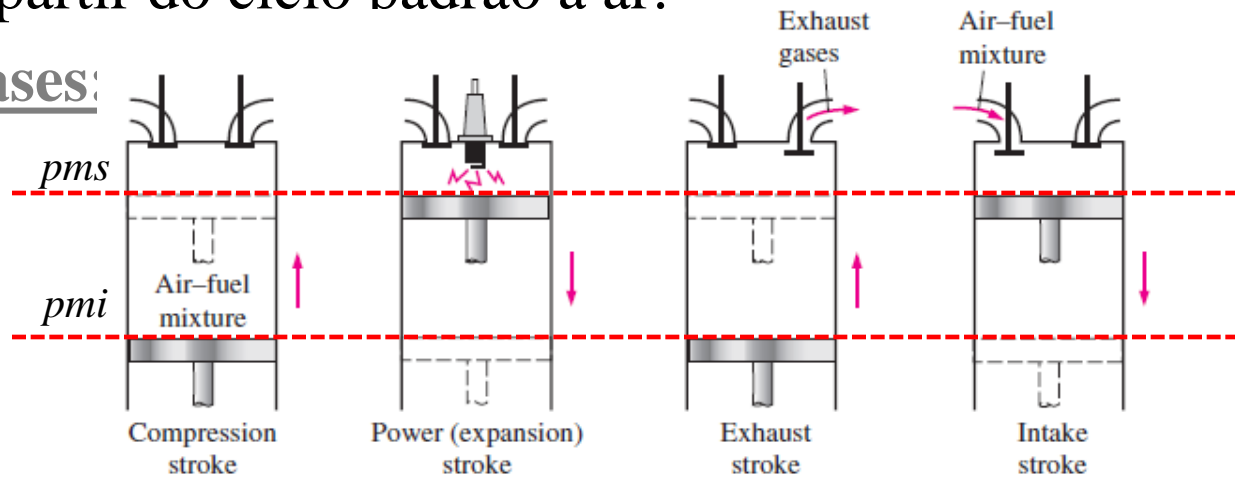


(b) Ideal Otto cycle

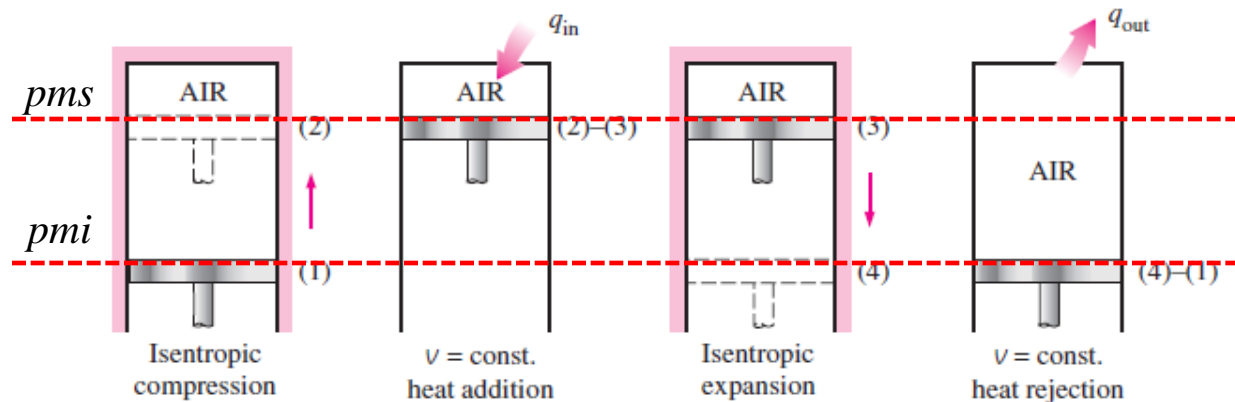
# Ciclo Otto – padrão a ar

Conceitos definidos a partir do ciclo padrão a ar:

Fração residual de gases:



(a) Actual four-stroke spark-ignition engine



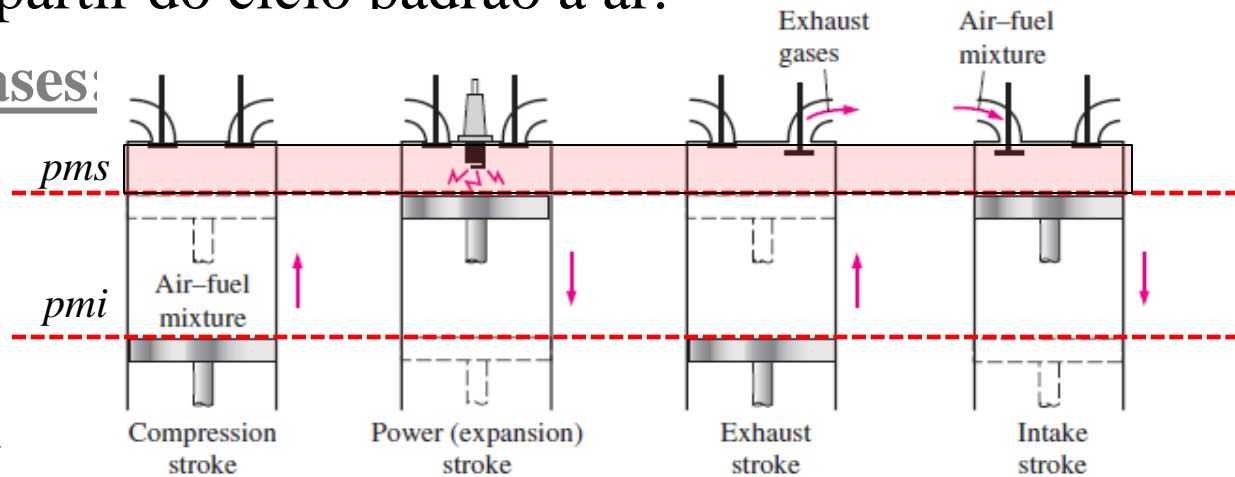
(b) Ideal Otto cycle

# Ciclo Otto – padrão a ar

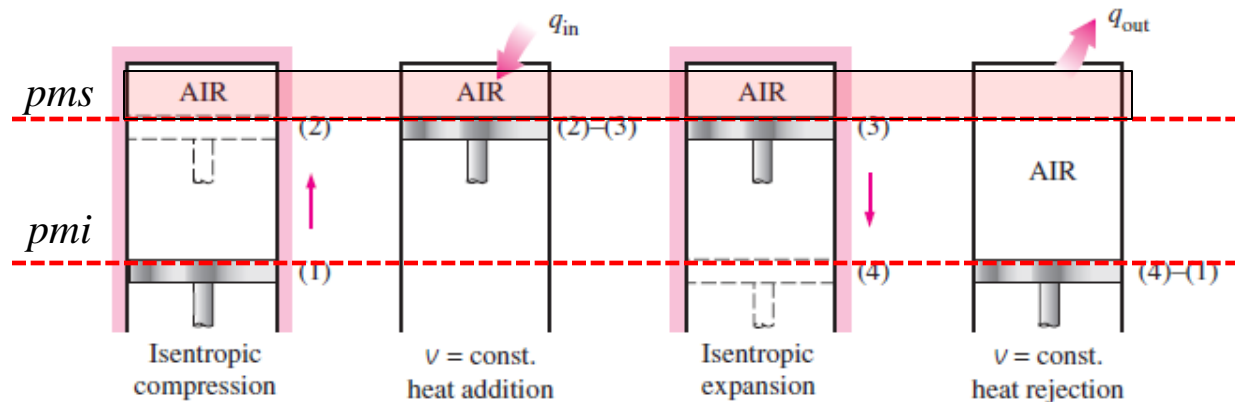
Conceitos definidos a partir do ciclo padrão a ar:

Fração residual de gases:

Volume da câmara de combustão do motor!!!



(a) Actual four-stroke spark-ignition engine



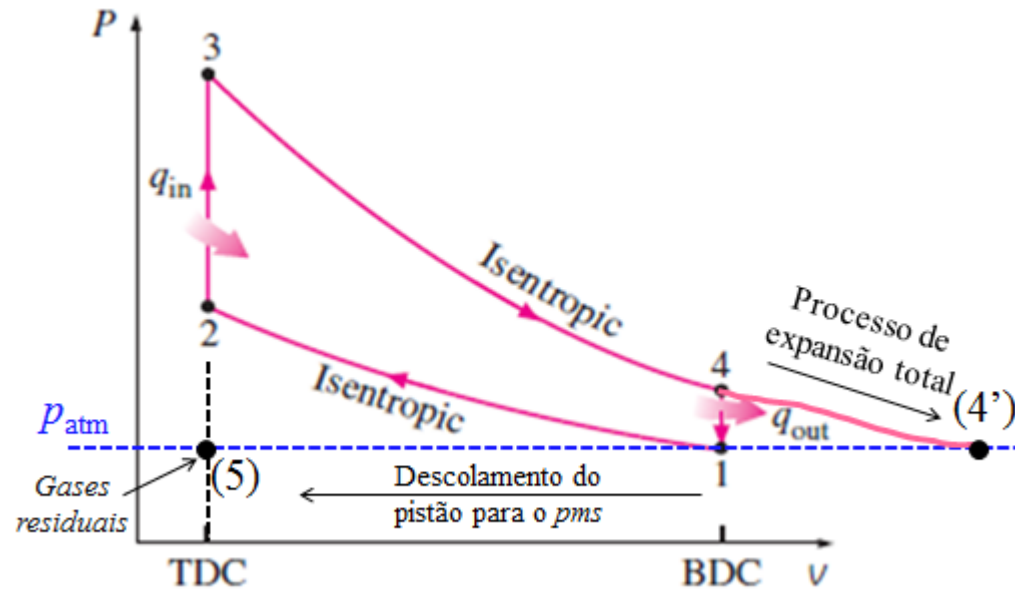
(b) Ideal Otto cycle

# Ciclo Otto – padrão a ar

Conceitos definidos a partir do ciclo padrão a ar:

## Fração residual de gases:

No final do processo de exaustão, mais dentro do cilindro permanece uma massa de gases produtos de combustão, massa esta que fará parte da massa total da mistura no próximo ciclo.



$$f_{rg} = \frac{m_{residual}}{m_{total}} = \frac{m_{residual}}{m_{ar} + m_{combustível} + m_{residual}}$$

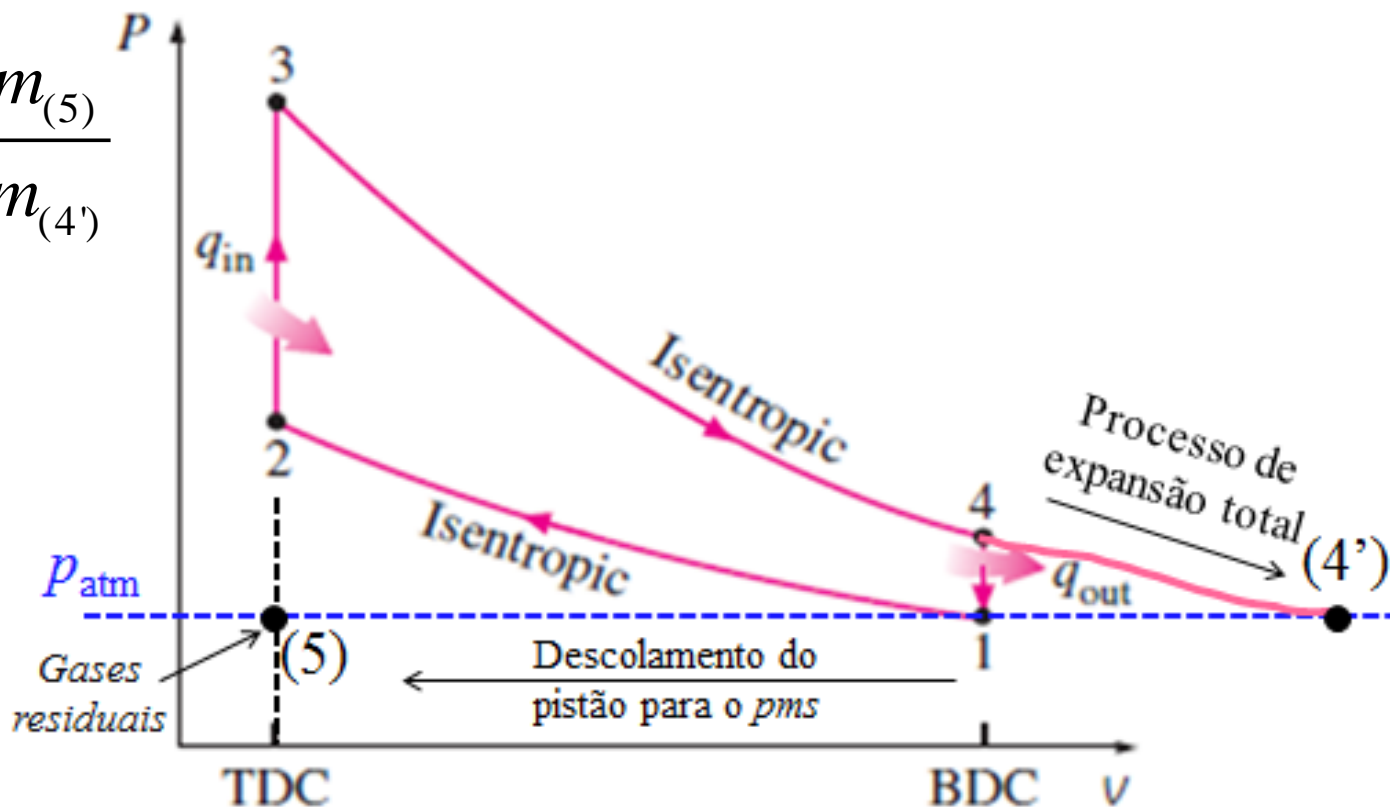
# Ciclo Otto – padrão a ar

Conceitos definidos a partir do ciclo padrão a ar:

Fração residual de gases:

$$f_{rg} = \frac{m_{residual}}{m_{total}} = \frac{m_{(5)}}{m_{(4')}}$$

$$f_{rg} = \frac{\frac{V_{(5)}}{v_{(5)}}}{\frac{V_{(4')}}{v_{(4')}}}$$



# Ciclo Otto – padrão a ar

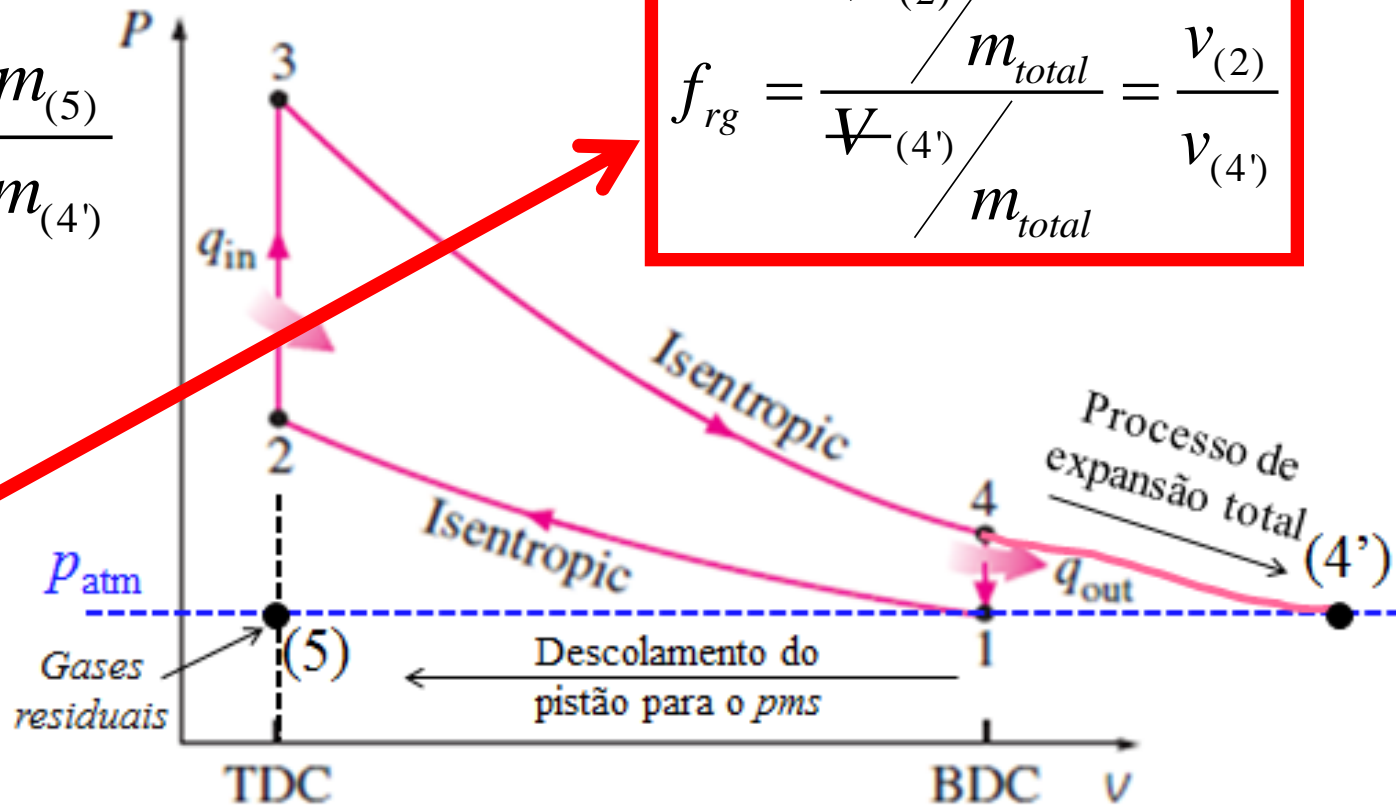
Conceitos definidos a partir do ciclo padrão a ar:

Fração residual de gases:

$$f_{rg} = \frac{m_{residual}}{m_{total}} = \frac{m_{(5)}}{m_{(4')}}$$

$$f_{rg} = \frac{\frac{V_{(5)}}{v_{(5)}}}{\frac{V_{(4')}}{v_{(4')}}}$$

$$f_{rg} = \frac{\frac{V_{(2)}}{m_{total}}}{\frac{V_{(4')}}{m_{total}}} = \frac{V_{(2)}}{V_{(4')}}$$





# Ciclo Otto – padrão a ar

## Exemplo.

Um ciclo Otto padrão a ar tem uma razão de compressão de  $r = 9.5$ . no início da compressão a temperatura é de  $27\text{ °C}$  e a pressão  $100\text{ kPa}$ . O calor é fornecido ao ciclo à razão de  $3\text{MJ/kg}$ . Dados  $k = 1.4$ ,  $R = 287\text{ J/kgK}$  e imaginando que o ciclo represente um motor a 4T, de cilindrada  $1600\text{ cm}^3$ , a  $4500\text{ rpm}$ , determinar:

- A eficiência térmica do ciclo
- As propriedades  $p$ ,  $T$  e  $v$  em cada ponto do diagrama  $p$ - $v$
- A pressão média do ciclo
- A potência do ciclo
- A fração residual dos gases

# Ciclo Otto – padrão a ar

G:\Joinville\2014-2\EMB 5304 – Motores de Combustão Interna I - LRCancino\arquivo 05 - Exemplo - Otto padrão a ar.mw\* - [Server 1] - Maple 13

File Edit View Insert Format Table Drawing Plot Spreadsheet Tools Window Help

Text Math Drawing Plot Animation Hide

2D Input Times New Roman 12 B I U

[> restart :  
**Exemplo.**  
 Um ciclo Otto padrão a ar tem uma razão de compressão de  $r = 9.5$ . no início da compressão a temperatura é de  $27^\circ\text{C}$  e a pressão  $100\text{ kPa}$ . O calor é fornecido ao ciclo à razão de  $3\text{ MJ/kg}$ . Dados  $k = 1.4$ ,  $R = 287\text{ J/kgK}$  e imaginando que o ciclo represente um motor a 4T, de cilindrada  $1600\text{ cm}^3$ , a  $4500\text{ rpm}$ , determinar:  
 a) A eficiência térmica do ciclo  
 b) As propriedades  $p$ ,  $T$  e  $v$  em cada ponto do diagrama  $p-v$   
 c) A pressão média do ciclo  
 d) A potência do ciclo  
 e) A fração residual dos gases

**(a) Eficiência térmica:**

[>  $\text{Eficiência}_{\text{térmica - Otto}} := 1 - \frac{1}{r^{(k-1)}};$   
 $\text{Eficiência}_{\text{térmica - Otto}} := 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$  (1)

[>  $r := 9.5; k := 1.4;$   
 $r := 9.5$   
 $k := 1.4$  (2)

[>  $\text{Eficiência}_{\text{térmica - Otto}} := 1 - \frac{1}{r^{(k-1)}};$   
 $\text{Eficiência}_{\text{térmica - Otto}} := 0.5936403684$  (3)

[> **(b) Propriedades  $p$ ,  $T$  e  $v$  em cada ponto do diagrama  $p-v$**

Ponto 1

.5.  
00  
.4,  
T,

# PARÂMETROS E CURVAS CARACTERÍSTICAS



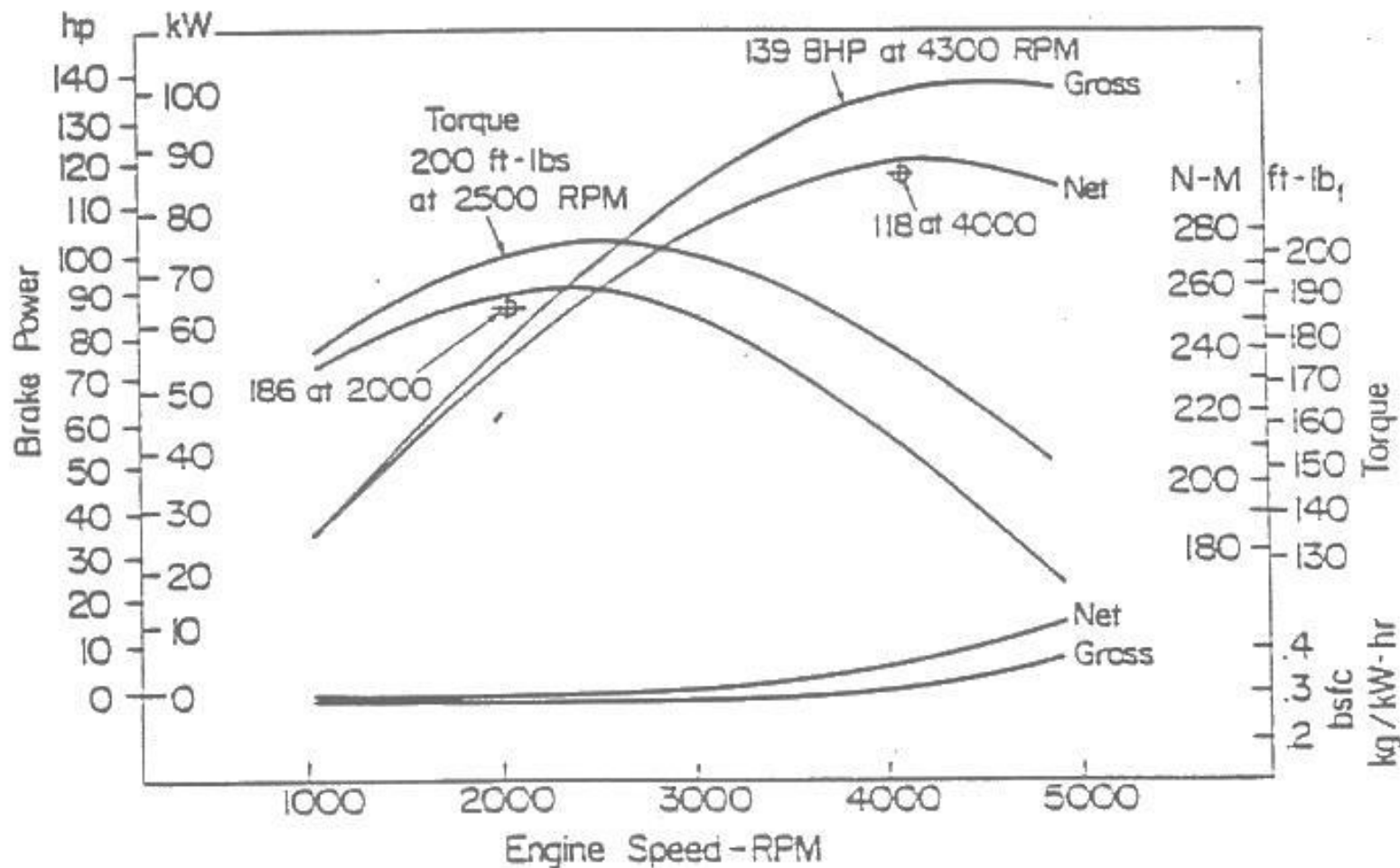
**Jaguar C-X75**



**Fiat 850 Sport Spider**



# PARÂMETROS E CURVAS CARACTERÍSTICAS



# PARÂMETROS E CURVAS CARACTERÍSTICAS

ENGINE LOMBARDINI

## 15LD 500 DIESEL



### TECHNICAL DATASHEET

Number of cylinders	1
Number of cm <sup>3</sup>	505
NB (in Kw)	8.2
Number of horse powers	11.1
Weight (in Kg)	48

### APPLICATION

Farm machinery ; Rotary hoes ; Lawn mowers ; Ciment mixer ; Dumpers ; Mini Dumper ; Mini Excavator ; Motor compressor ; Vibrating plate ; Roller ; Asphalt cutter ; Generator ; Refrigerating groups ; Motor welder ; Motor sweepers ; Aerial platform ; Cars



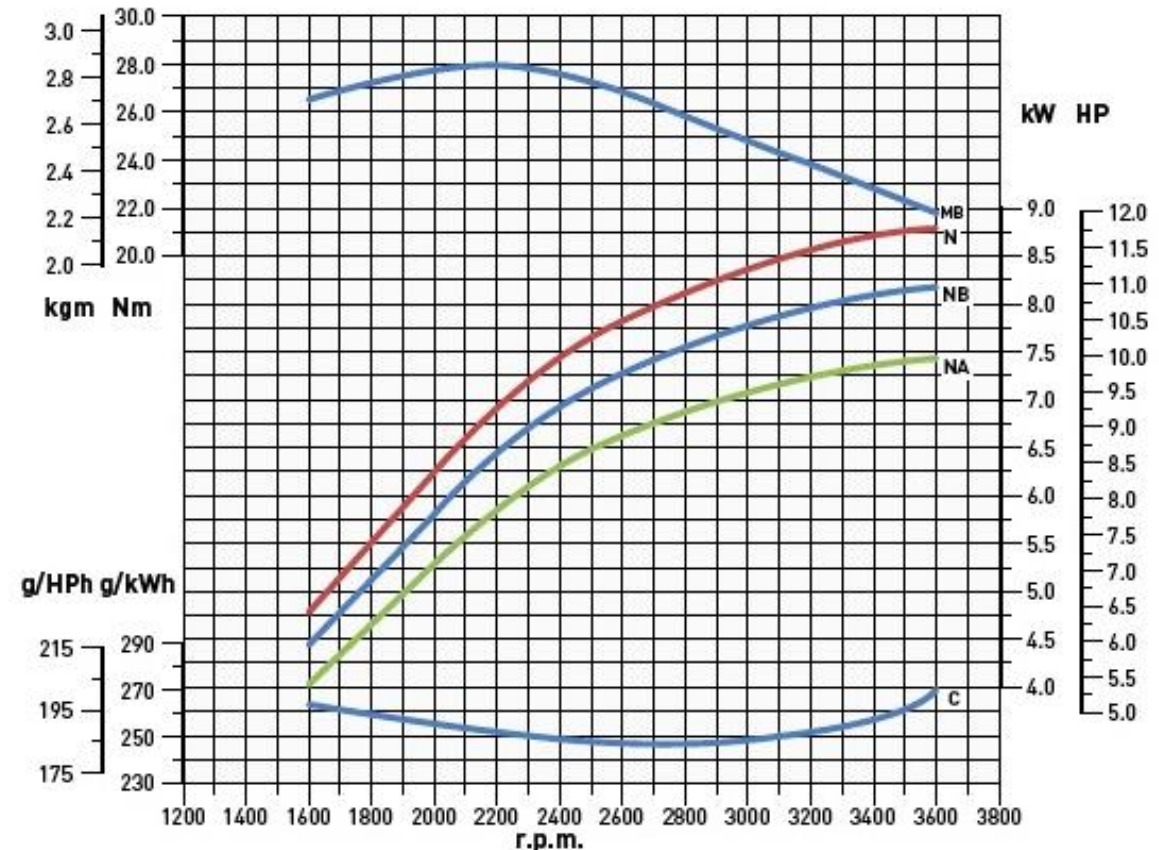


# PARÂMETROS E CURVAS CARACTERÍSTICAS

## ENGINE LOMBARDINI 15LD 500 DIESEL



### COURBES DE PERFORMANCE



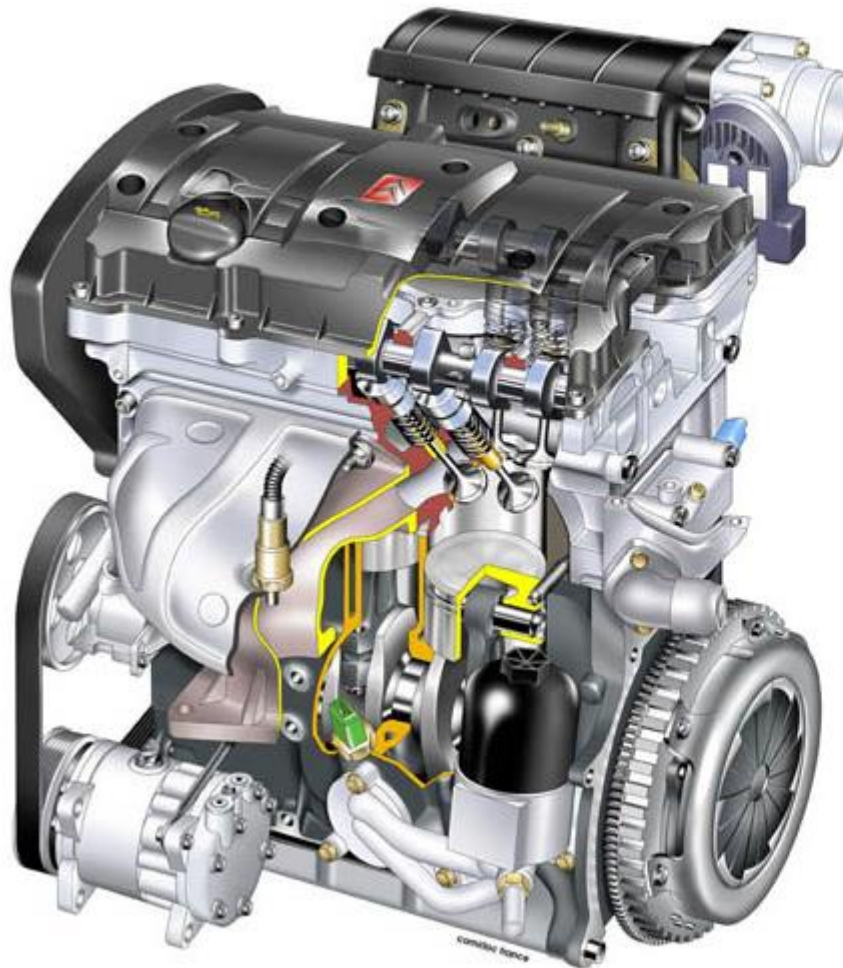
**N** - Courbe de puissance - 80/1269/CE E-ISO 1585  
**NB** - Courbe de puissance - ISO 3046/1 - IFN  
**NA** - Courbe de puissance - ISO 3046/1 - ICXN

**MB** - Courbe de couple - (en courbe NB)  
**C** - Consommation spécifique - (en courbe NB)

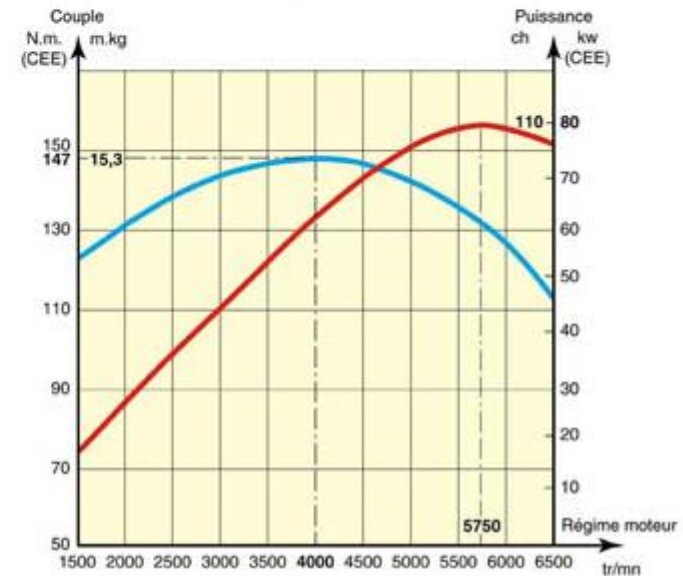


# PARÂMETROS E CURVAS CARACTERÍSTICAS

## CITROËN Moteur 1.6 16V



**TU 5JP4**

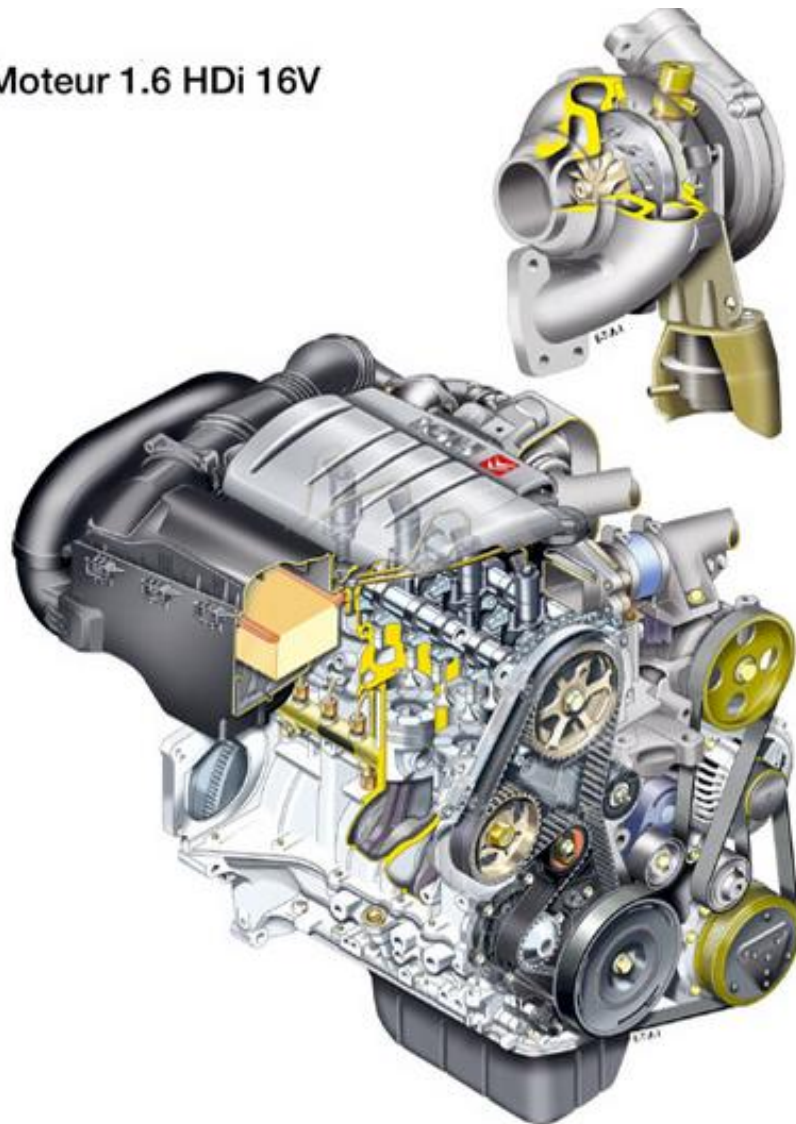


**GASOLINE ENGINE TU 5JP4 - 1.6L 16v**  
Performance curve of gasoline engine TU5JP4.

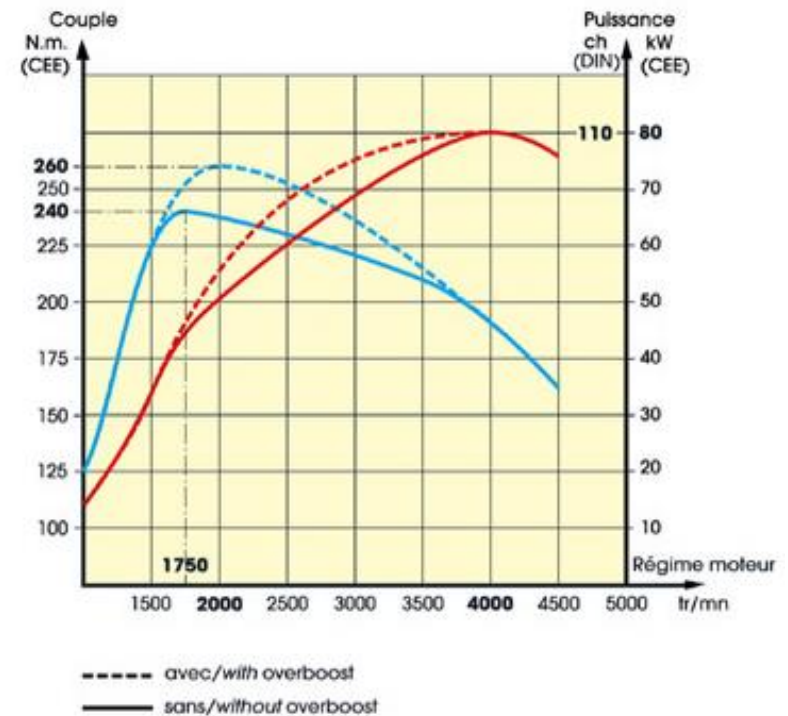


# PARÂMETROS E CURVAS CARACTERÍSTICAS

Moteur 1.6 HDi 16V



**DIESEL ENGINE DV6 TED4 - 1.6L 16v**  
Performance of diesel engine DV6TED4.

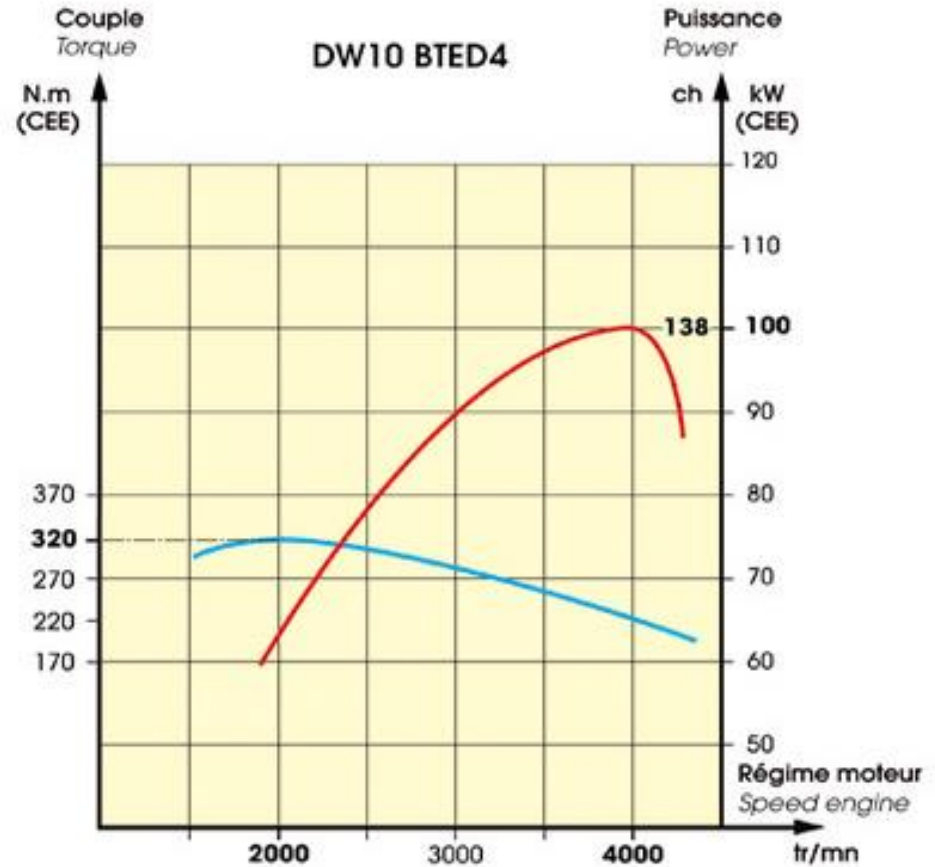
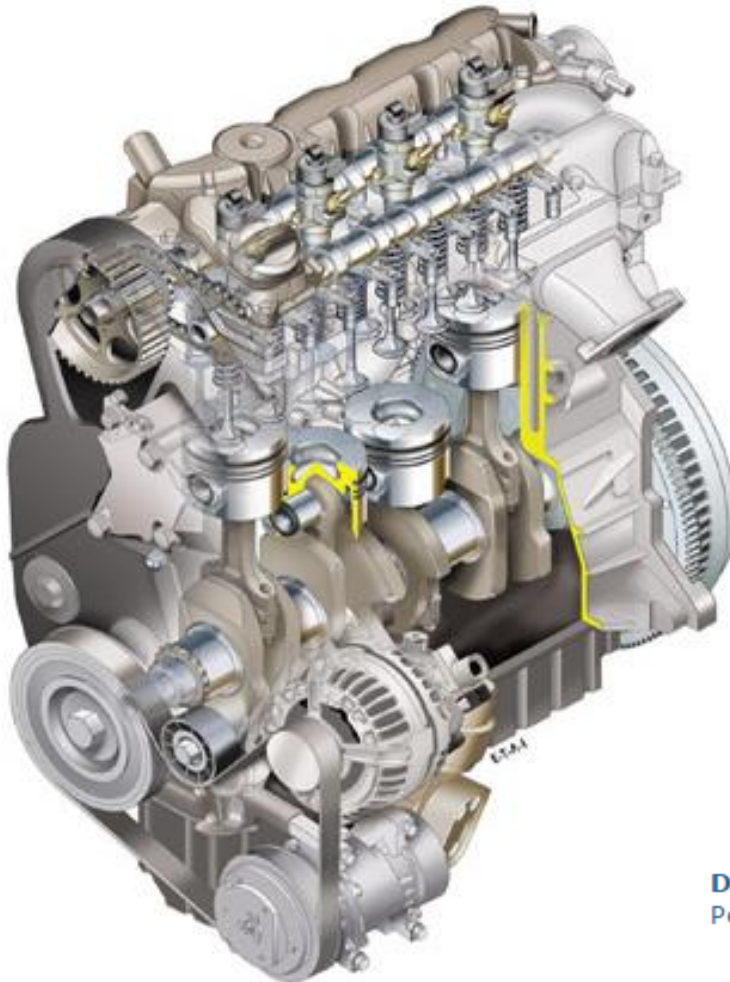






# PARÂMETROS E CURVAS CARACTERÍSTICAS

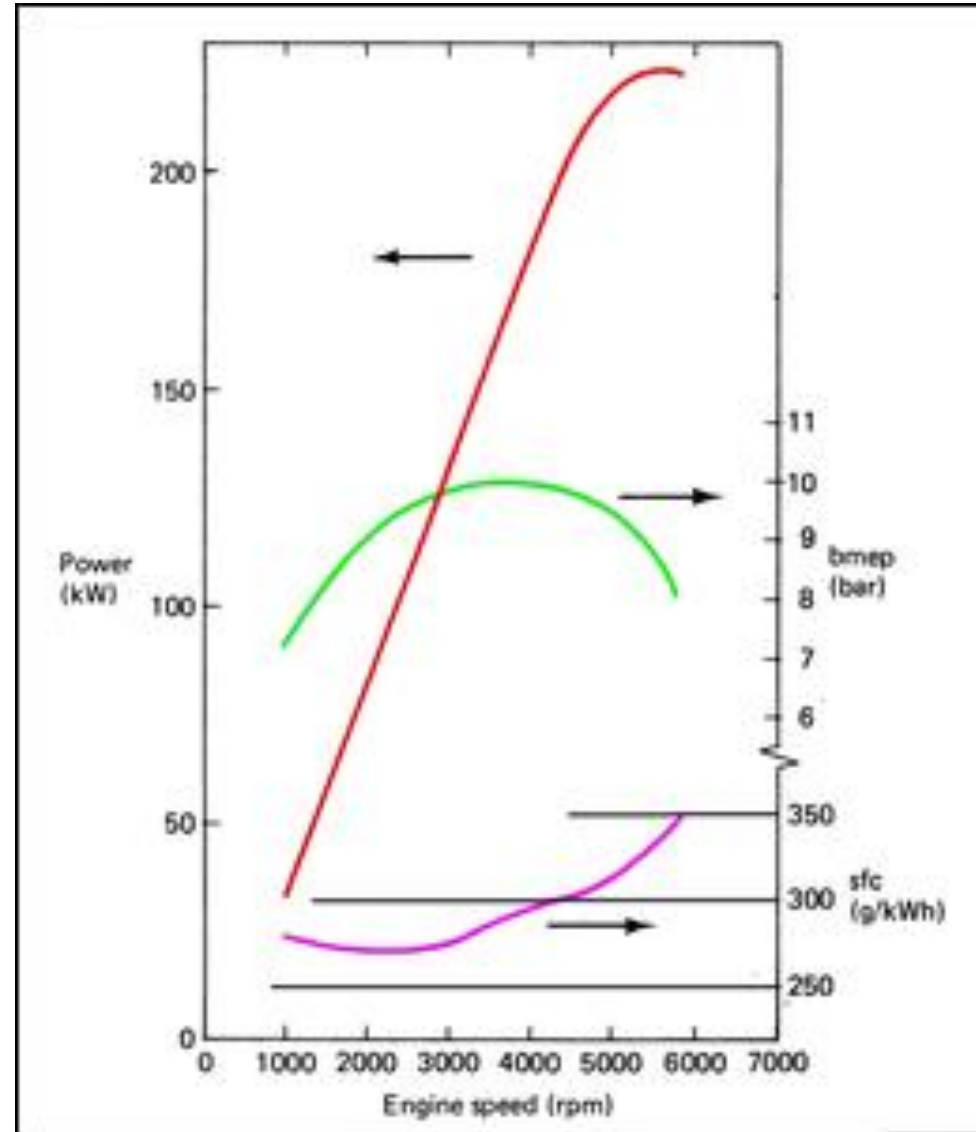
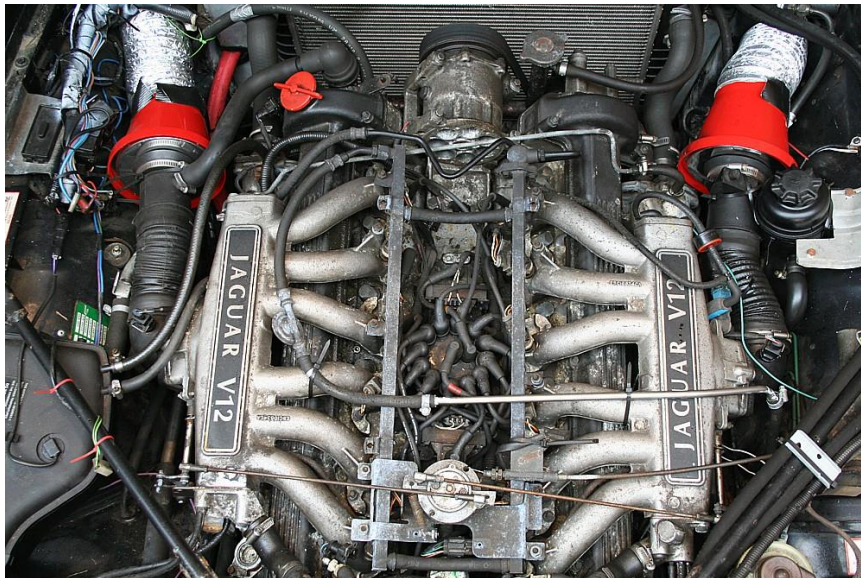
Moteur 2.0 HDi - 138 ch (DIN)  
2.0 HDi engine - 138 hp (DIN)



**DIESEL ENGINE DW10 BTED4 - 2.0L 16v**  
Performance of engine DW10 BTED4.

# PARÂMETROS E CURVAS CARACTERÍSTICAS

1. Gráfico de desempenho de um motor: **Jaguar V12 HE** – 12 cilindros!!!!





# PARÂMETROS E CURVAS CARACTERÍSTICAS

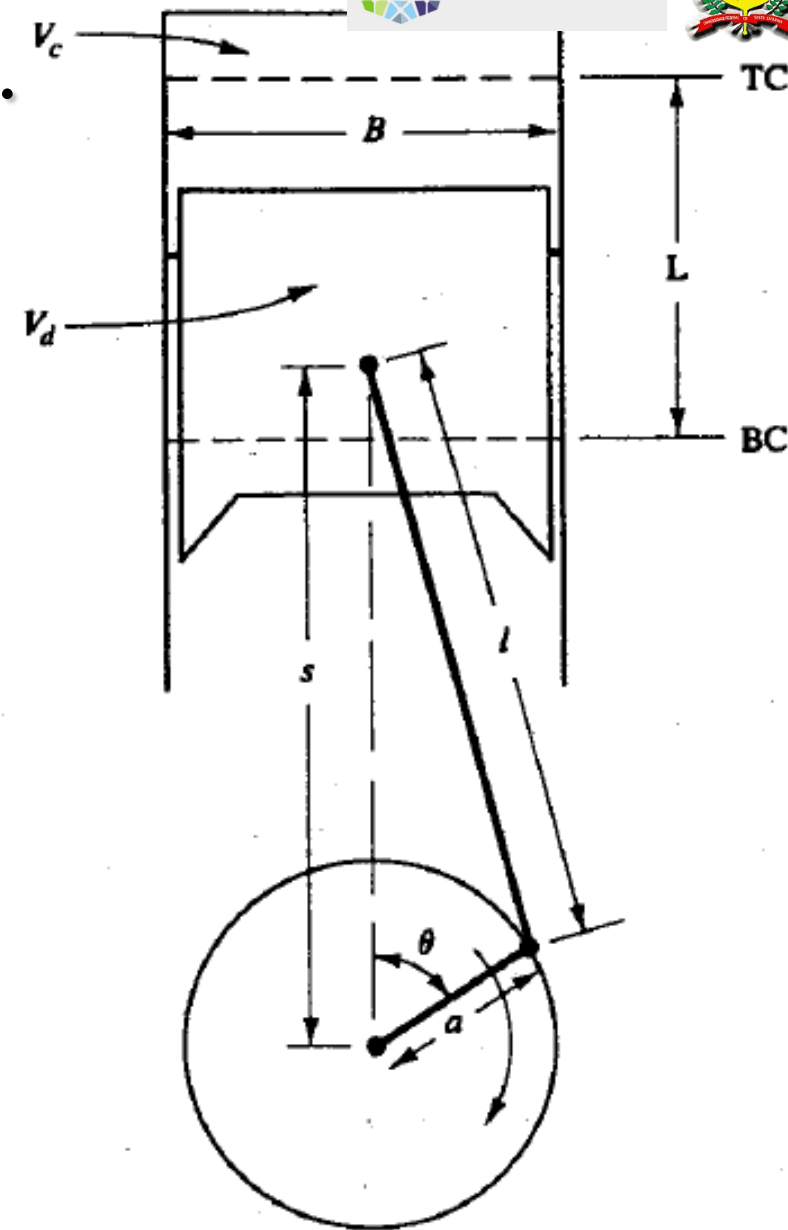
1. Parâmetros de operação
  - ✓ Relações geométricas básicas
2. Fatores mais importantes para o usuário
  - ✓ Desempenho do motor
  - ✓ Consumo e custo de combustível
  - ✓ Ruído e emissões
  - ✓ Custo inicial do motor e custo de instalação
  - ✓ Confiabilidade, durabilidade, manutenção e custos de operação

**Desempenho, eficiência, emissões.**

# Propriedades geométricas.

## Geometria básica de um motor (mecanismo)

- $B$  = diâmetro do cilindro
- $L$  = curso (deslocamento pistão)
- $l$  = comprimento da biela
- $a$  = comprimento do braço da manivela
- $s$  = distância do eixo do virabrequim ao pino do pistão
- $V_c$  = volume morto
- $V_d$  = volume deslocado
- $\theta$  = ângulo de rotação da manivela



# Propriedades geométricas.

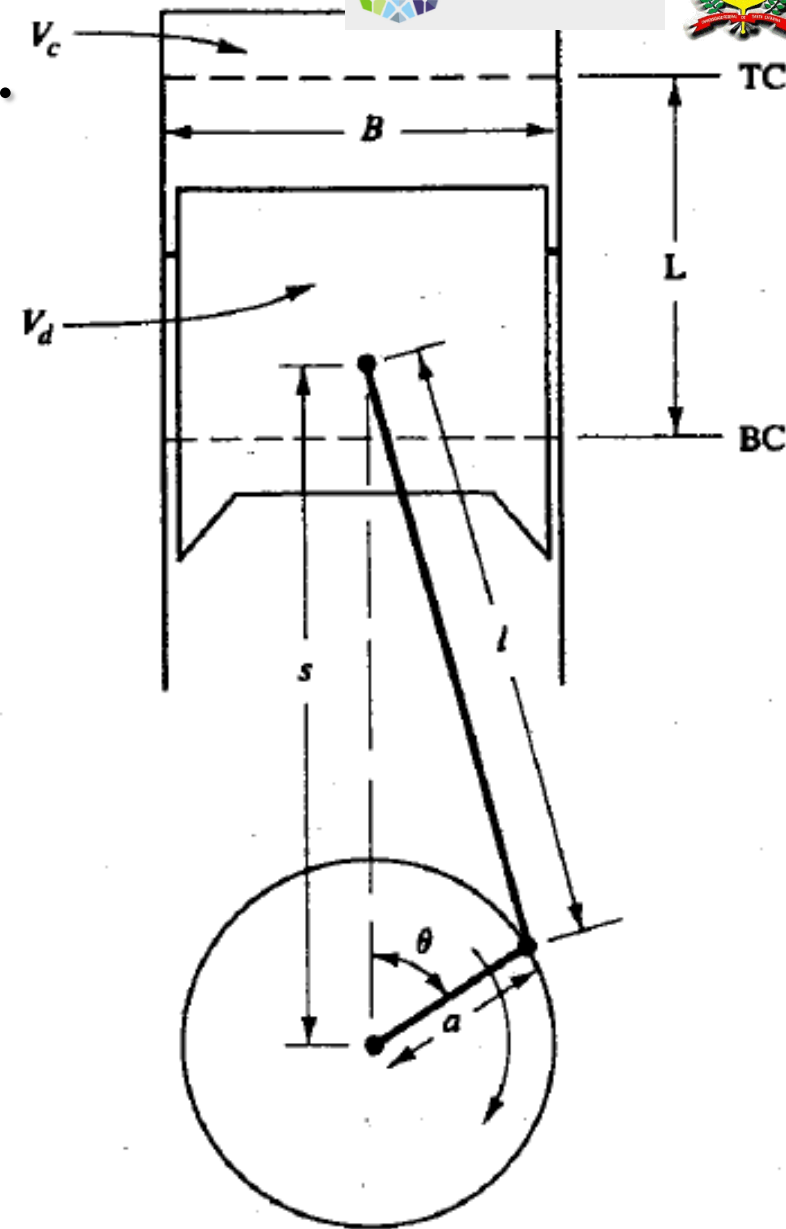
## Geometria básica de um motor (mecanismo)

### Razão de compressão

$$r_c = \frac{V_d + V_c}{V_c}$$

### Razão diâmetro de cilindro/deslocamento do pistão

$$R_{bs} = \frac{B}{L}$$





# Propriedades geométricas.

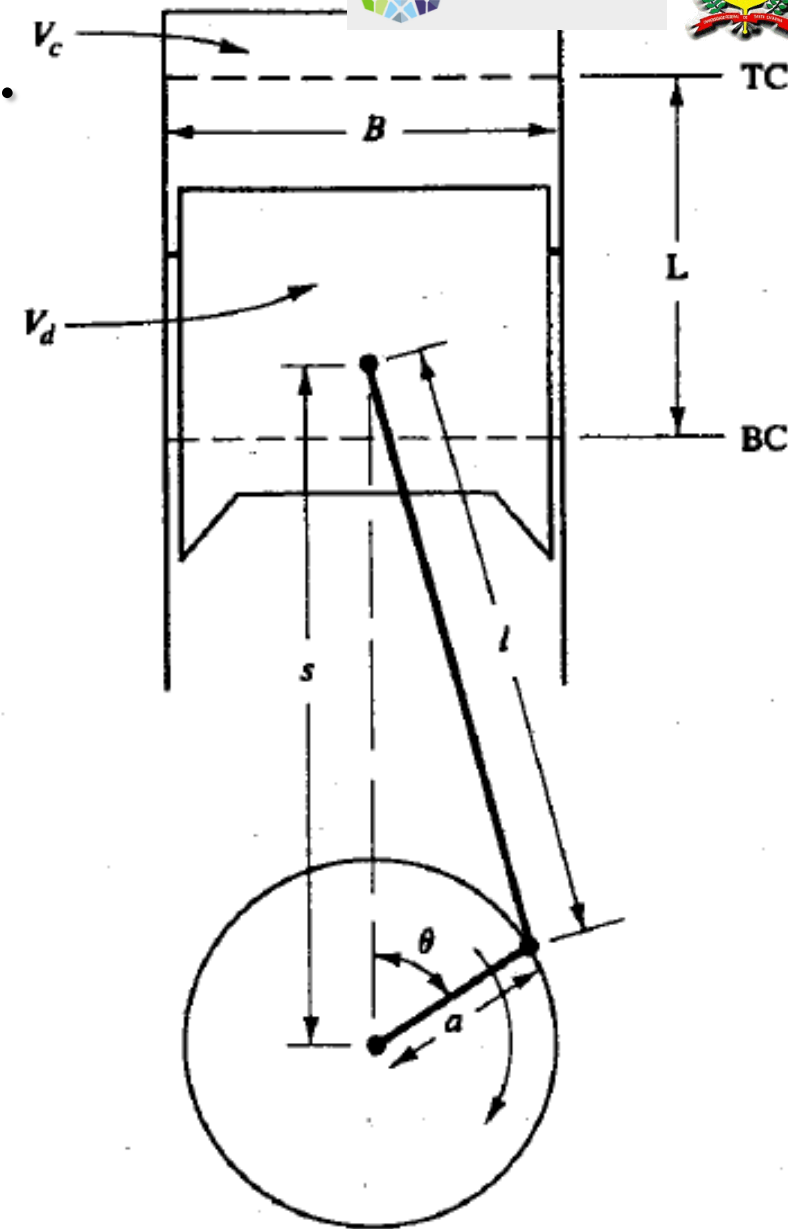
## Geometria básica de um motor (mecanismo)

Razão comprimento biela / comprimento manivela

$$R = \frac{l}{a}$$

Relação deslocamento do pistão / comprimento da manivela

$$L = 2a$$



# Propriedades geométricas.

Valores típicos (aproximados) são:

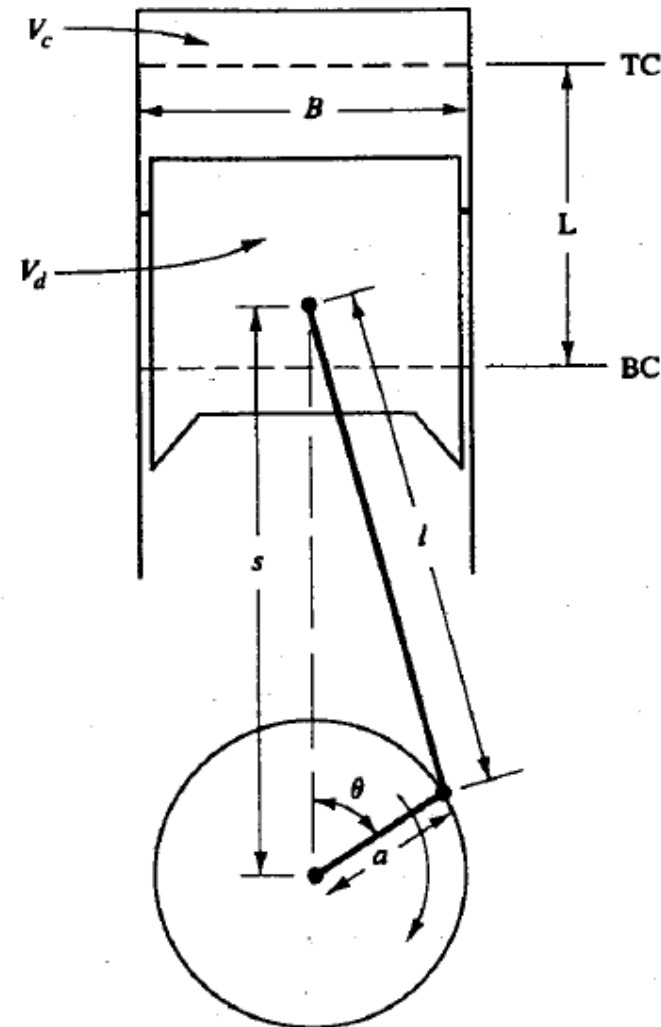
$r_c$	8 a 12 para motores de ignição por faísca
	12 a 24 para motores de ignição por compressão
$R_{bs}$	0,8 a 1,2 para motores pequenos e médios
	0,5 para motores CI grandes
$R$	3 a 4 para motores pequenos e médios
	5 a 9 para motores CI grandes

$$r_c = \frac{V_d + V_c}{V_c}$$

$$R = \frac{l}{a}$$

$$R_{bs} = \frac{B}{L}$$

$$L = 2a$$



# Propriedades geométricas.

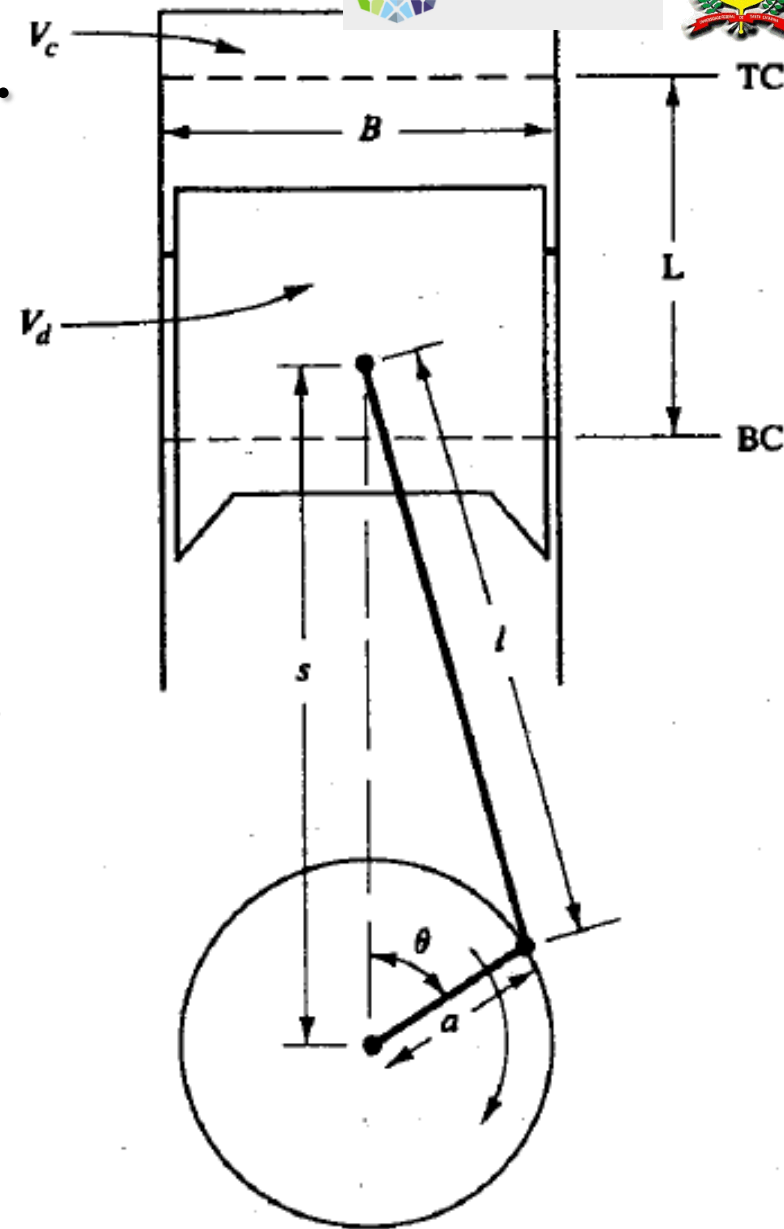
## Geometria básica de um motor (mecanismo)

Relação distancia do eixo do virabrequim / pino do pistão

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

Velocidade instantânea do pistão

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



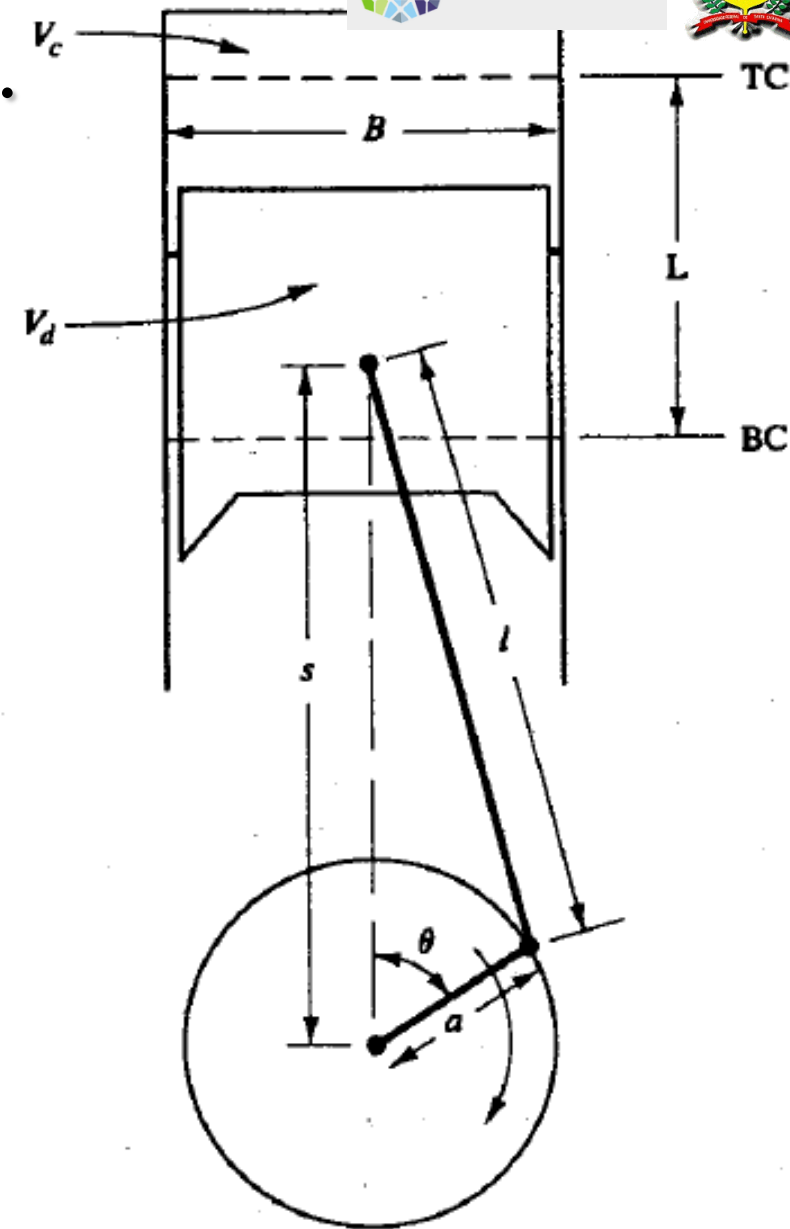


# Propriedades geométricas.

## Geometria básica de um motor (mecanismo)

### Velocidade média do pistão

$$\bar{S}_p = 2LN$$





# Parametrização de parâmetros de desempenho

- A velocidade média do pistão é frequentemente o parâmetro mais apropriado que a rotação  $N$  para correlacionar parâmetros de desempenho do motor. A velocidade média do pistão  $\bar{s}_p$  é calculada por:

$$\bar{s}_p = 2LN$$

onde  $N$  é a velocidade de rotação do virabrequim em revoluções /segundo

- Estes valores são limitados por questões de inércia e lubrificação. O valor de 15 m/s é normalmente o limite de motores de automóvel leves e motores grandes (estacionários e marinhos) são limitados em 8 m/s

Valores médios (aproximados) são

$$8 \text{ m/s} < \bar{s}_p < 15 \text{ m/s}$$

# Propriedades geométricas.

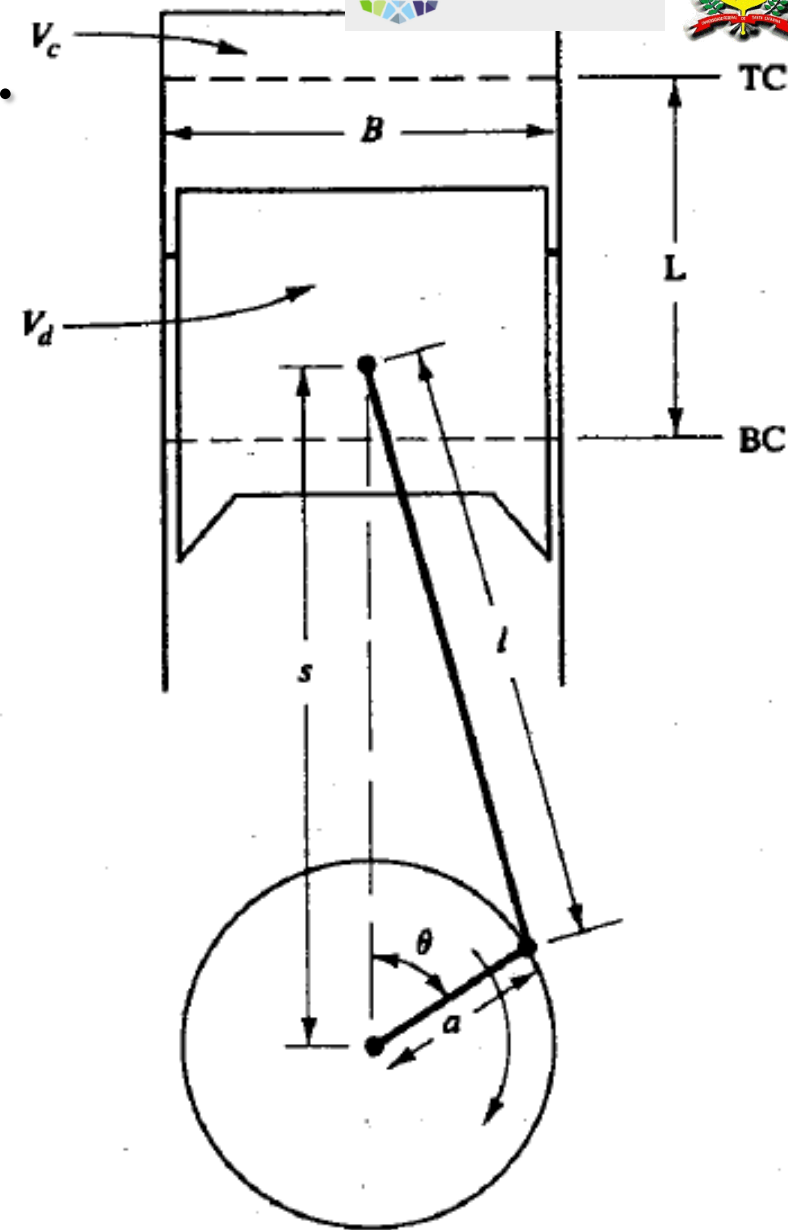
## Geometria básica de um motor (mecanismo)

### Velocidade média do pistão

$$\bar{S}_p = 2LN$$

### Relação de velocidades

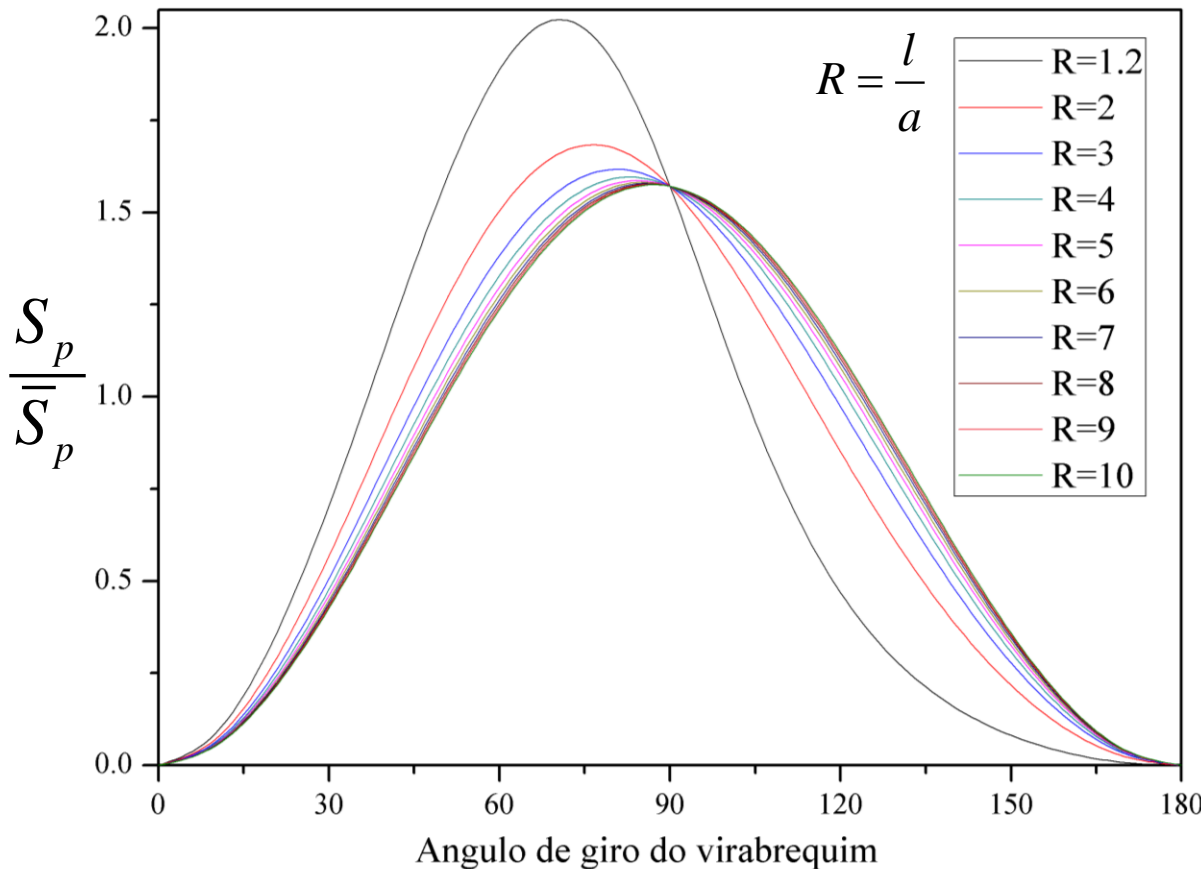
$$\frac{S_p}{\bar{S}_p} = \frac{\pi}{2} \sin \theta \left[ 1 + \frac{\cos \theta}{(R^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}} \right]$$



# Propriedades geométricas.

## Relação de velocidades

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



$$\bar{S}_p = 2LN$$

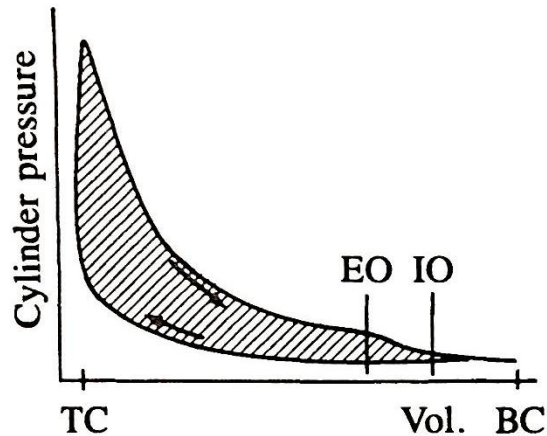
Valores limitados por questões de inercia e lubrificação. O valor de 15 m/s é normalmente o limite de motores de automóvel, motores grandes (estacionários de marinhos) são limitados em 8 m/s.

# Parâmetros indicados

São os parâmetros relacionados ao trabalho realizado *pele* ou *sobre* o **fluido**, e são obtidos a partir do diagrama  $p-v$  para o motor. O trabalho líquido executado pelo gás sobre o pistão é obtido da integração da área contida no interior do laço no diagrama  $p-v$ :

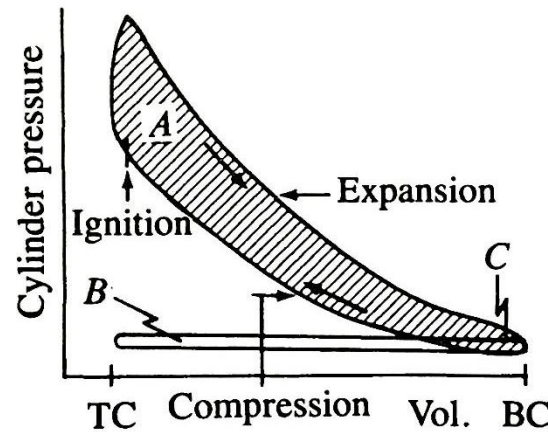
$$W_{c,i} = \oint p dV$$

2-stroke



(a)

4-stroke

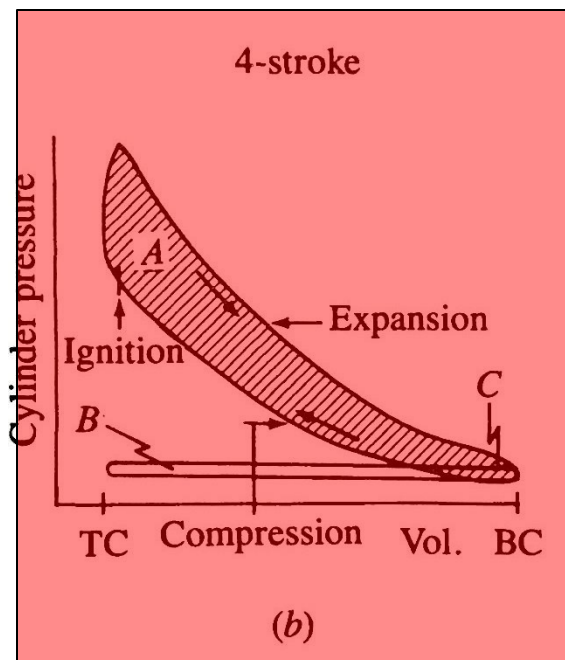
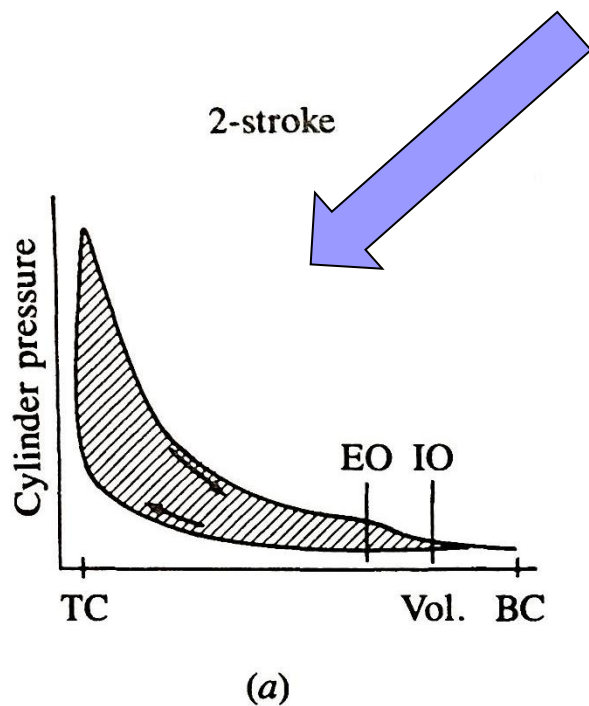


(b)

# Parâmetros indicados

São os parâmetros relacionados ao trabalho realizado *pele* ou *sobre* o **fluido**, e são obtidos a partir do diagrama  $p-v$  para o motor. O trabalho líquido executado pelo gás sobre o pistão é obtido da integração da área contida no interior do laço no diagrama  $p-v$ :

$$W_{c,i} = \oint p dV$$



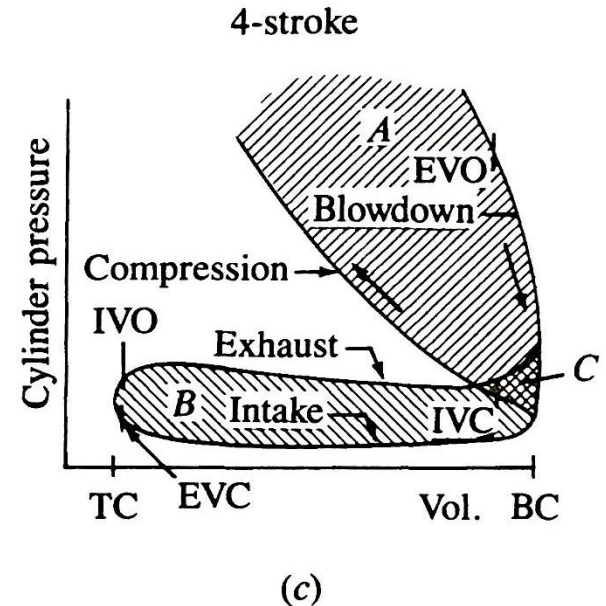
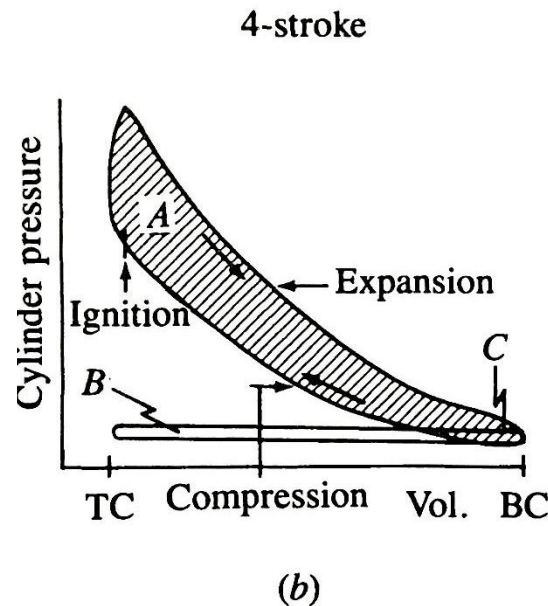
# Parâmetros indicados

São os parâmetros relacionados ao trabalho realizado *pele* ou *sobre* o **fluido**, e são obtidos a partir do diagrama  $p-v$  para o motor. O trabalho líquido executado pelo gás sobre o pistão é obtido da integração da área contida no interior do laço no diagrama  $p-v$ :

$$W_{c,i} = \oint pdV$$

$$W_{c,ig}$$

$$W_{c,in}$$





# Parâmetros indicados

São os parâmetros relacionados ao trabalho realizado *pele* ou *sobre* o **fluido**, e são obtidos a partir do diagrama  $p-v$  para o motor. O trabalho líquido executado pelo gás sobre o pistão é obtido da integração da área contida no interior do laço no diagrama  $p-v$ :

$$W_{c,i} = \oint pdV$$

$$W_{c,ig} = W_{c,i} = \oint pdV$$

$$W_{c,in} = W_{c,i} - W_p$$

$$W_{c,in} = \oint pdV - W_p$$

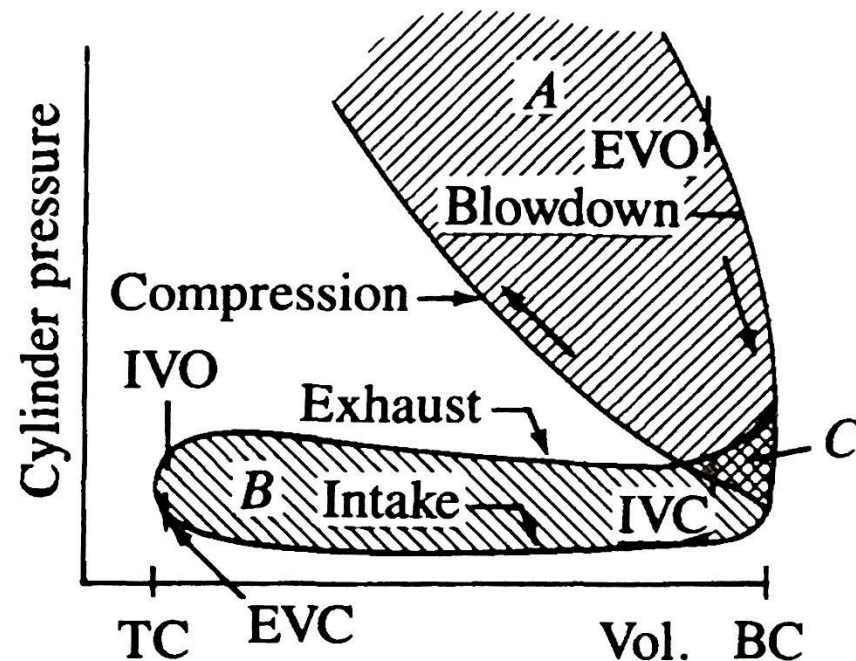
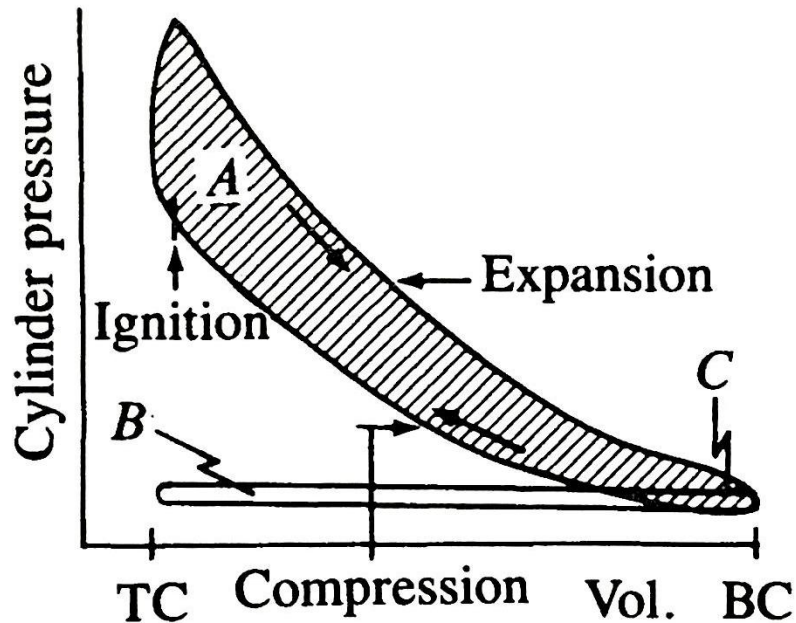
**Trabalho indicado bruto por ciclo** = trabalho executado pelo gás durante os processos de compressão e expansão

**Trabalho indicado líquido por ciclo** = trabalho executado pelo gás durante os 4 processos de admissão, compressão, expansão e exaustão

**Trabalho de bombeamento** = trabalho executado pelo/sobre o gás durante os processos de admissão e exaustão



# Parâmetros indicados

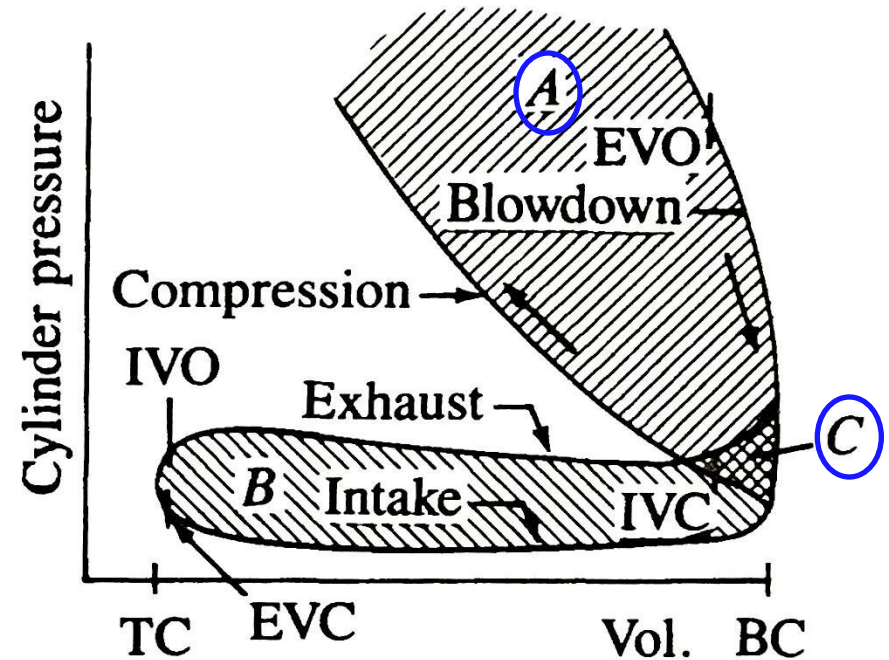
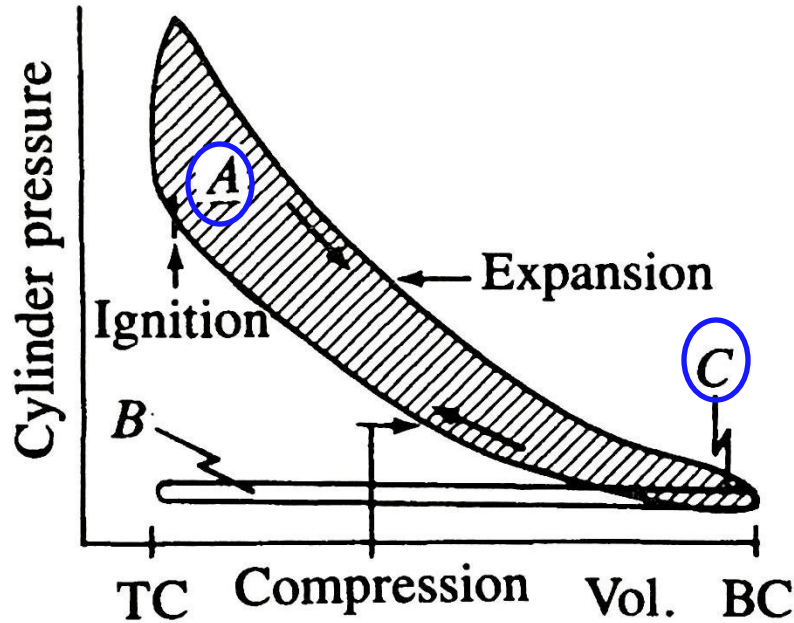


$W_{c,ig}$  = **Trabalho indicado bruto por ciclo** = trabalho executado pelo gás durante os processos de compressão e expansão (área A + área C)

$W_{c,in}$  = **Trabalho indicado líquido por ciclo** = trabalho executado pelo gás durante os 4 processos de admissão, compressão, expansão e exaustão (área A + área C – {área B + área C})

$W_p$  = **Trabalho de bombeamento** = trabalho executado pelo/sobre o gás durante os processos de admissão e exaustão {área B + área C}

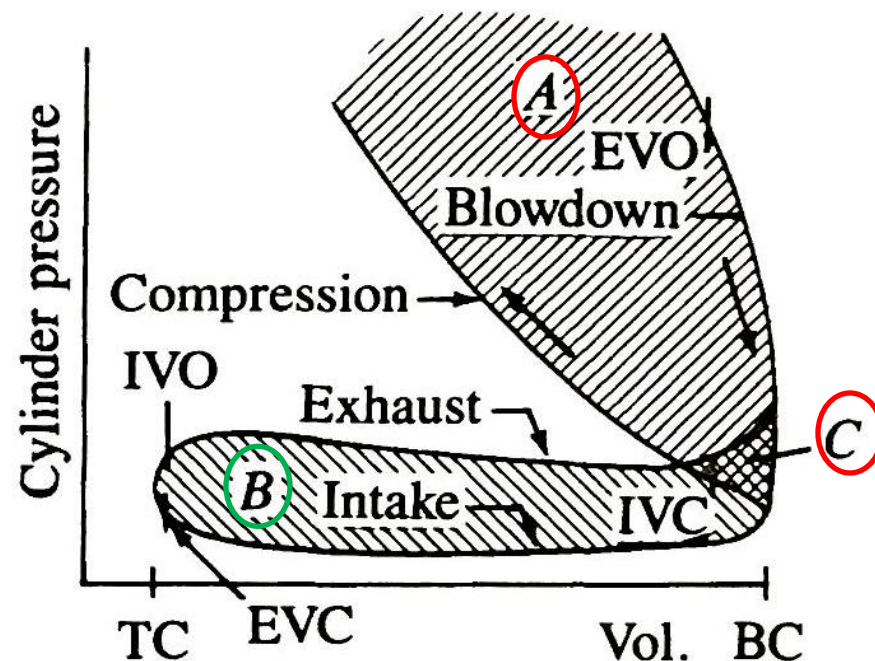
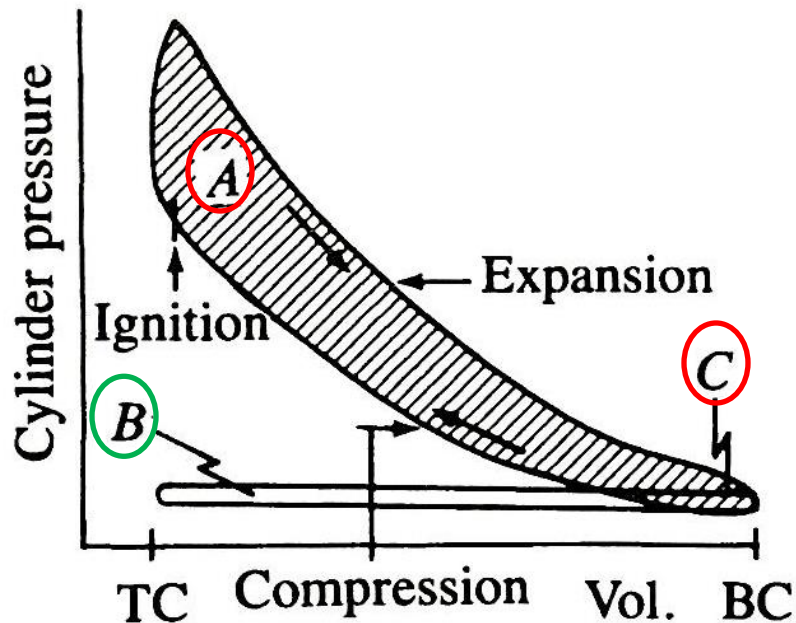
# Parâmetros indicados



$W_{c,ig} =$  **Trabalho indicado bruto por ciclo** = trabalho executado pelo gás durante os processos de compressão e expansão (área A + área C)

área A + área C

# Parâmetros indicados

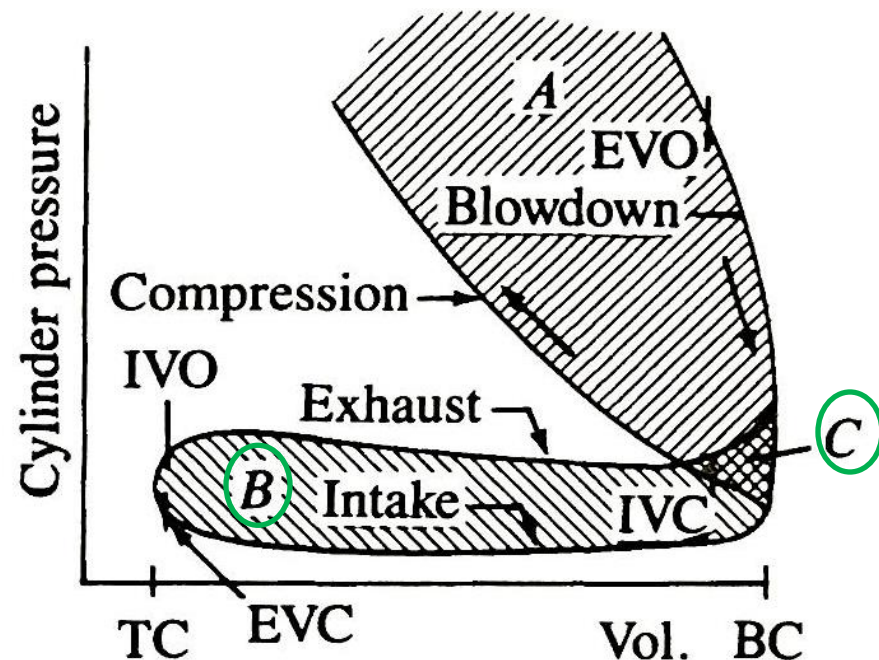
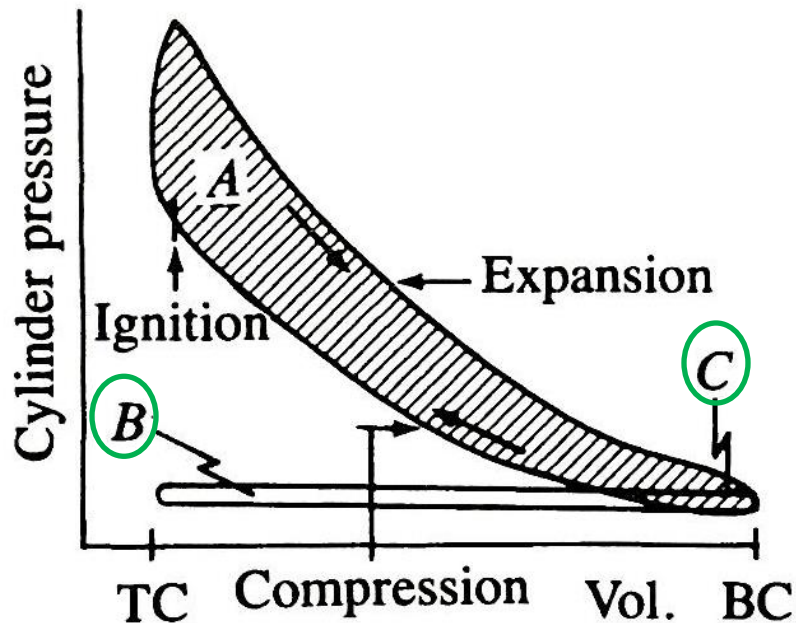


$W_{c,in} =$  **Trabalho indicado líquido por ciclo** = trabalho executado pelo gás durante os 4 processos de admissão, compressão, expansão e exaustão (área A + área C – {área B + área C})

$$\text{área A} + \text{área C} - \{ \text{área B} + \text{área C} \}$$



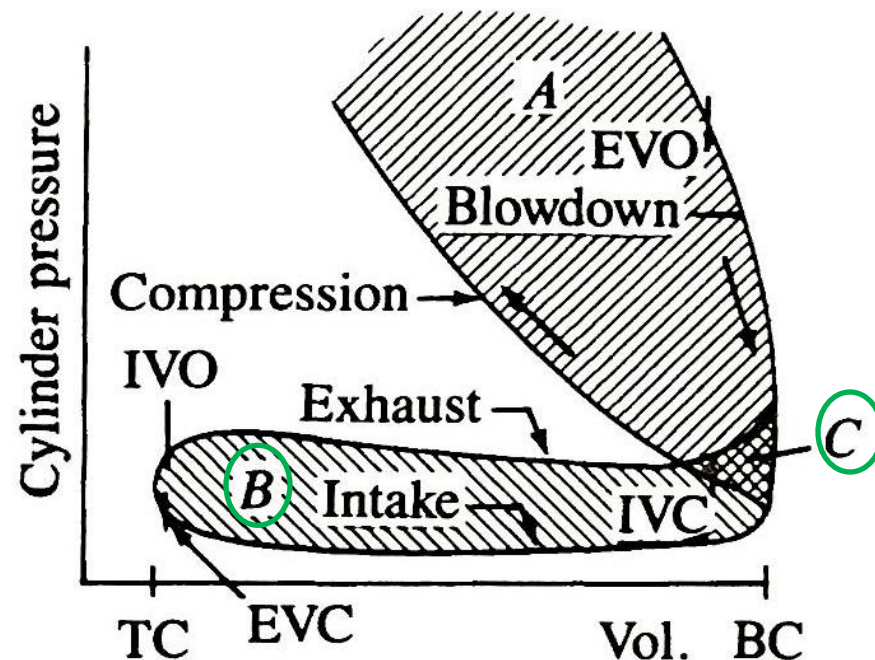
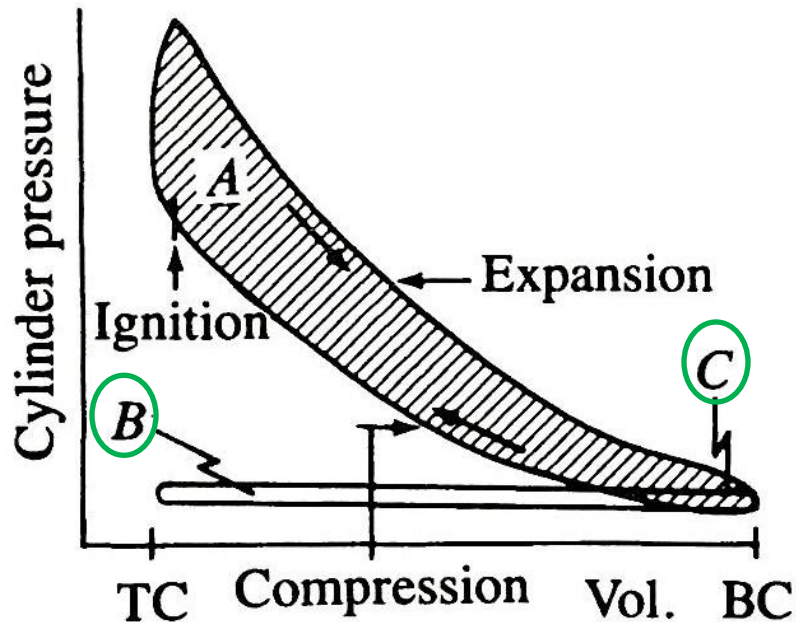
# Parâmetros indicados



$W_p =$  **Trabalho de bombeamento** = trabalho executado pelo/sobre o gás durante os processos de admissão e exaustão {área B + área C}

{ área B + área C }

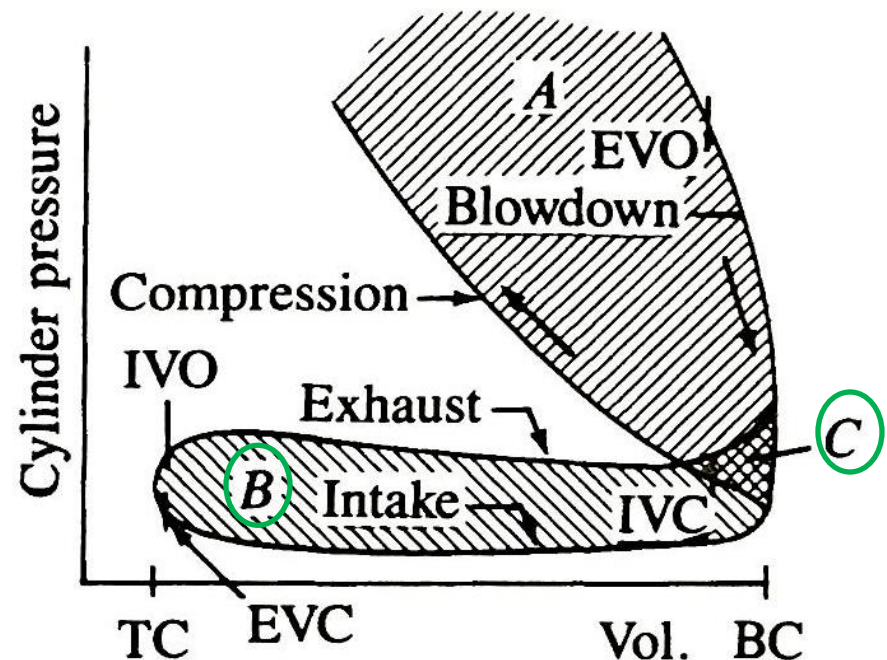
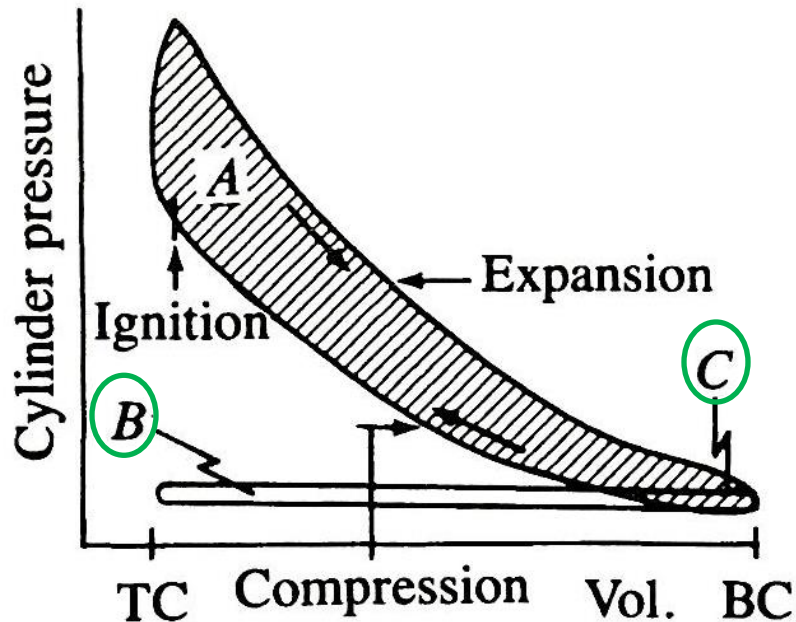
# Parâmetros indicados



$W_p =$  **Trabalho de bombeamento** = trabalho executado **pelo/sobre** o gás durante os processos de admissão e exaustão {área B + área C}

Tem **valor negativo** se a pressão na admissão é inferior à pressão da exaustão (motores naturalmente aspirados)

# Parâmetros indicados



$W_p =$  **Trabalho de bombeamento** = trabalho executado pelo/sobre o gás durante os processos de admissão e exaustão {área B + área C}

Tem **valor positivo** se a pressão na admissão é superior à pressão da exaustão (motores com turbocompressor)



# Parametrização de parâmetros de desempenho

## Parâmetros de desempenho:

- Potência máxima e rotação na potência máxima
- Torque máximo e rotação no torque máximo

**Problema:**

Dependem do tamanho do motor



# Parâmetros de freio (testes em dinamômetro)

- **Torque do motor,  $T(N\cdot m)$ :** é uma medida da capacidade do motor de produzir trabalho

$$T = Fb$$

Onde  $F(N)$  é a carga do motor e  $b(m)$  é o braço de alavanca na medição em dinamômetro de freio. Também é utilizada a unidade kgf-m (1 N-m = 0,101971 kgf-m)

- **Trabalho de freio por revolução  $W_{r,b}(J)$ :** É o trabalho executado pelo motor a cada 360 graus de variação do ângulo do virabrequim (1 rotação)

$$W_{r,b} = 2\pi T$$

- **Potência de freio  $P_b(W)$ :** é o valor calculado a partir das medições de torque e rotação

$$P_b = W_{r,b}N = 2\pi TN$$

Unidades práticas são kW e hp (1kW = 0,7457 hp)





# Parâmetros de freio (testes em dinamômetro)

- **Rotação do motor,  $N(\text{rev/s})$ :** é a velocidade de rotação do eixo de manivelas em revoluções por segundo

$$N = \text{rpm}/60$$

Este valor é medido diretamente no eixo do dinamômetro por métodos mecânicos, elétricos ou de interferência (estroboscópica)

- **Frequência do motor  $\omega(\text{rad/s})$ :** derivado da rotação do motor, é uma outra forma de expressá-la:

$$\omega = 2\pi N$$

A relação entre a velocidade angular  $\omega$  em  $\text{rad/s}$  é a variação do ângulo do virabrequim  $\theta$  em graus é:

$$\omega = \frac{\pi}{180} \frac{d\theta}{dt}$$



# Parametrização de parâmetros de desempenho

- **Pressão média efetiva de freio  $p_{bme}$  (Pa):** é o trabalho de freio executado dividido pelo volume de ar deslocado por ciclo

$$p_{bme} = \frac{W_{r,b} n_R}{V_d} = \frac{P_b n_R}{N V_d}$$

Onde  $n_R$  é o número de revoluções da manivela para cada ciclo,  $n_R = 2$  para 4-tempos,  $n_R = 1$  para 2-tempos

## Valores máximos típicos (aproximados) na rotação de torque máximo:

Motores de SI, aspirados naturalmente: 850 a 1050 kPa

Motores de SI, turbocomprimidos: 1250 a 1700 kPa

Motores de CI, aspirados naturalmente: 700 a 900 kPa

Motores de CI, turbocomprimidos: 1000 a 1200 kPa

Motores de CI, turbocomprimidos, com resfriamento intermediário 1000 a 1400 Kpa

Motores de IC, 2-tempos, grandes: até 1600 Kpa



# Parametrização de parâmetros de desempenho

- **Pressão média efetiva de freio  $p_{bme}$  (Pa):** é o trabalho de freio executado dividido pelo volume de ar deslocado por ciclo

$$p_{bme} = \frac{W_{r,b} n_R}{V_d} = \frac{P_b n_R}{N V_d}$$

Onde  $n_R$  é o número de revoluções da manivela para cada ciclo,  $n_R = 2$  para 4-tempos,  $n_R = 1$  para 2-tempos

Tipo de motor	$P_{bme}$ (bar)
Motores de motocicletas	12
Motores de competição (F-1)	16
Motores SI automotivos	13
Motores SI automotivos com turbocompressor	17
Motores CI para caminhões com turbocompressor	22
Motores diesel automotivos com turbocompressor	20

# Apresentação de parâmetros de desempenho

**Table** Comparison of a Large Diesel Engine with an Automotive Gasoline Engine and a Model Airplane Engine

CHARACTERISTICS	MODEL AIRPLANE <sup>a</sup>	AUTOMOTIVE <sup>b</sup>	LARGE DIESEL <sup>a</sup>
<b>Extensive</b>			
Bore, mm	12.6	89	737
Stroke, mm	13.1	80	1016
Displacement (one cylinder), l	$1.6 \times 10^{-3}$	0.498	433
Power per cylinder, watt	100	$1.68 \times 10^4$	$5.29 \times 10^5$
Engine speed, rpm	11,400	5000	164
Mass per cylinder, kg	0.12	34.3	$3.56 \times 10^4$
Power per liter <sup>3</sup> , Watt/l	$6.25 \times 10^4$	$3.37 \times 10^4$	$1.22 \times 10^3$
<b>Intensive</b>			
Bmep, atm	3.2	8.0	4.5
Mean piston speed, m/s	5.0	13.3	5.6
Specific output, Watt/cm <sup>2</sup>	80	270	124
Mass/displacement, kg/l	75	82	69

<sup>a</sup>From Taylor (1977), Chapter 11. (Both engines are two-stroke, loop scavenged. Model airplane has crankcase compression.)

<sup>b</sup>GM, L-4 engine, four stroke.



## Parâmetros de desempenho em dinamômetro (freio)

- **Eficiência volumétrica  $\eta_v(ad.)$ :** é a razão entre a vazão volumétrica média de ar admitida no cilindro sobre a vazão que seria admitida nas condições de temperatura e pressão do ambiente.

$$\eta_v = \frac{2\dot{m}_a}{\rho_{a,i} V_d N} = \frac{m_a}{\rho_{a,i} V_d}$$

Onde  $\dot{m}_a$  (kg/s) é a vazão média de ar por ciclo de mistura,  $\rho_{a,i}$  (kg/m<sup>3</sup>) é a massa específica média da mistura na admissão e  $m_a$  (kg) é a massa de ar admitida no cilindro por ciclo.

Esta eficiência mede a capacidade do motor de prover o máximo de enchimento do cilindro com ar de combustão

**Valores típicos máximos (aproximados):**

0,8 – 0,9 para motores SI aspirados naturalmente

## Parâmetros de desempenho em dinamômetro (freio)

- **Eficiência de combustão  $\eta_c(ad.)$ :** é a fração de combustível entregue ao motor que de fato é convertida em energia.

$$\eta_c = \frac{H_R(Tp) - H_P(Tp)}{m_f Q_{HV}}$$

A energia carregada pelos gases combustíveis que deixam o motor é  $1 - \eta_c$

Em uma análise aproximada de motores pode-se considerar que a combustão ocorre externamente ao fluido, e que a taxa de transferência de calor da fonte quente para o fluido de trabalho é

$$Q_H = m_f Q_{HV}$$

Quando a eficiência de combustão  $\eta_c$  é baixa, pode-se ainda corrigir este valor por

$$Q_H = \eta_c m_f Q_{HV}$$



## Parâmetros de desempenho em dinamômetro (freio)

- **Eficiência de combustão  $\eta_c(ad.)$ :** é a fração de combustível entregue ao motor que de fato é convertida em energia.

$$\eta_c = \frac{H_R(Tp) - H_P(Tp)}{m_f Q_{HV}}$$

A energia carregada pelos gases combustíveis que deixam o motor é  $1 - \eta_c$

Em uma análise aproximada de motores pode-se considerar que a combustão ocorre externamente ao fluido, e que a taxa de transferência de calor da fonte quente para o fluido de trabalho é

$$Q_H = m_f Q_{HV}$$

Quando a eficiência de combustão  $\eta_c$  é baixa, pode-se ainda corrigir este valor por

$$Q_H = \eta_c m_f Q_{HV}$$

# Combustíveis

- **Razão de massa ar combustível (A/F)(ad.):** é a razão entre as massas de ar e combustível admitidas na câmara de combustão

$$(A/F) = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} = \frac{m_a}{m_f}$$

Valores típicos (aproximados):

$12 \leq (A/F) \leq 18$  motores SI

$18 \leq (A/F) \leq 70$  motores CI

Analogamente, pode ser definida razão combustível-ar:

$$(F/A) = \frac{1}{(A/F)} = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} = \frac{m_f}{m_a}$$





## Parâmetros de desempenho em dinamômetro (freio)

- **Eficiência de conversão de combustível  $\eta_f$  (ad.):** é a razão entre o trabalho produzido pelo motor e a energia do combustível

$$\eta_f = \frac{W_c}{m_f Q_{r,f}} = \frac{P}{\dot{m}_f Q_{r,f}} = \frac{1}{sfc Q_{r,f}}$$

Onde  $\dot{m}_f$  (kg/s) é a vazão média por ciclo de combustível e  $Q_{r,f}$  (J) é o calor de reação da mistura de combustível e ar. Esta eficiência mede a capacidade do motor de converter a energia do combustível em trabalho, é uma eficiência baseada na primeira Lei da Termodinâmica

### Valores típicos (aproximados):

$Q_{r,f}$  está na faixa de 42 a 44 MJ / kg de combustível

$\eta_f$  é da ordem de 0,42 para motores CI

$\eta_f$  é da ordem de 0,31 para motores SI

## Parâmetros de desempenho em dinamômetro (freio)

- **Consumo específico de combustível  $sfc$  ( $kg/J$ ):** é uma medida do consumo de combustível por potência desenvolvida pelo motor.

$$sfc = \frac{\dot{m}_f}{P}$$

Onde  $\dot{m}_f$  ( $kg/s$ ) é a vazão média de combustível por ciclo. Unidades práticas são  $g/kW-h$  e  $lbm/hp-h$  ( $1 g/Kw-h = 1/3,6 \mu g/J = 0,001644 lbm/hp-h$ )

### Valores típicos (aproximados):

270  $g/kW-h$  ( $0.47 lbm/hp-h = 75 \mu g/J$ ) em motores SI

200  $g/kW-h$  ( $0.32 lbm/hp-h = 55 \mu g/J$ ) em motores CI

## Parâmetros de desempenho em dinamômetro (freio)

- **Consumo específico de combustível  $sfc$  (kg/J):** é uma medida do consumo de combustível por potência desenvolvida pelo motor.

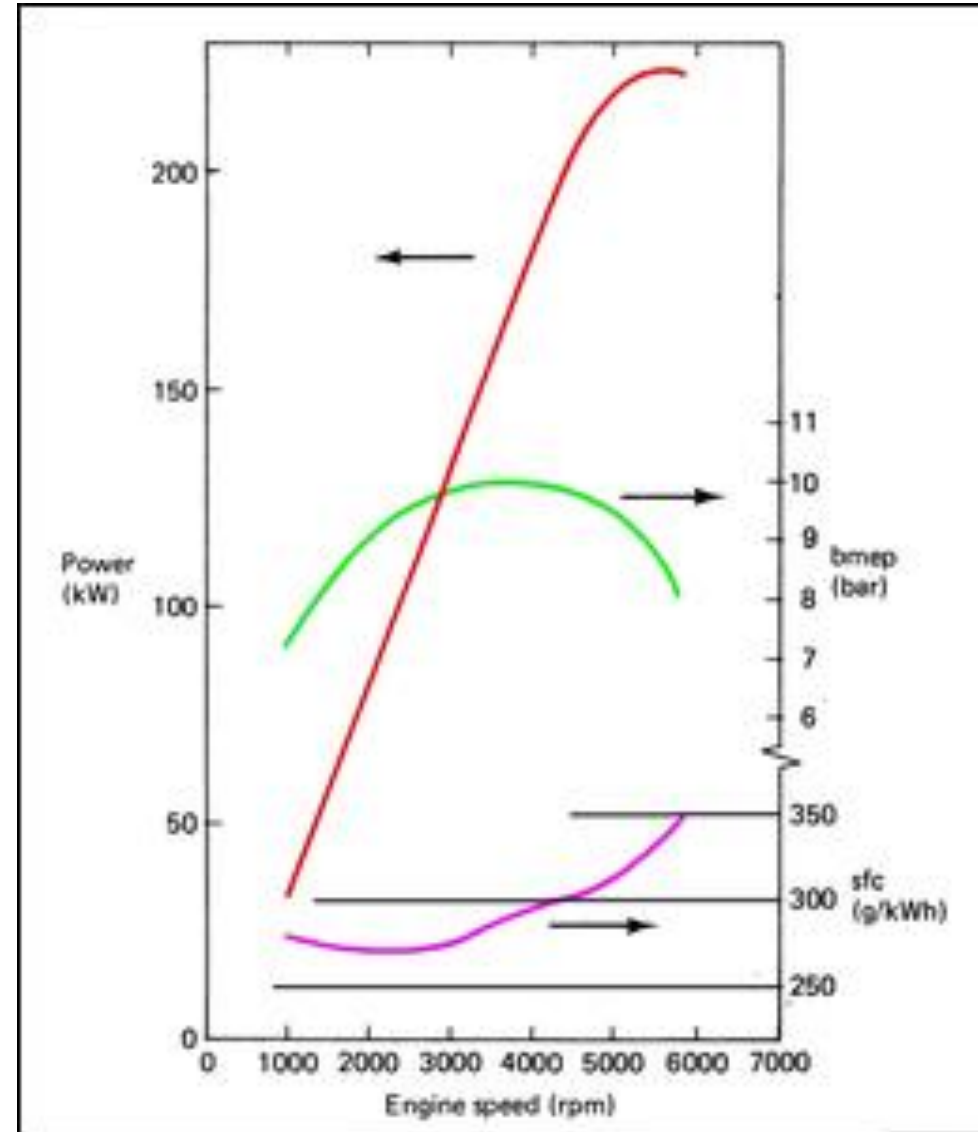
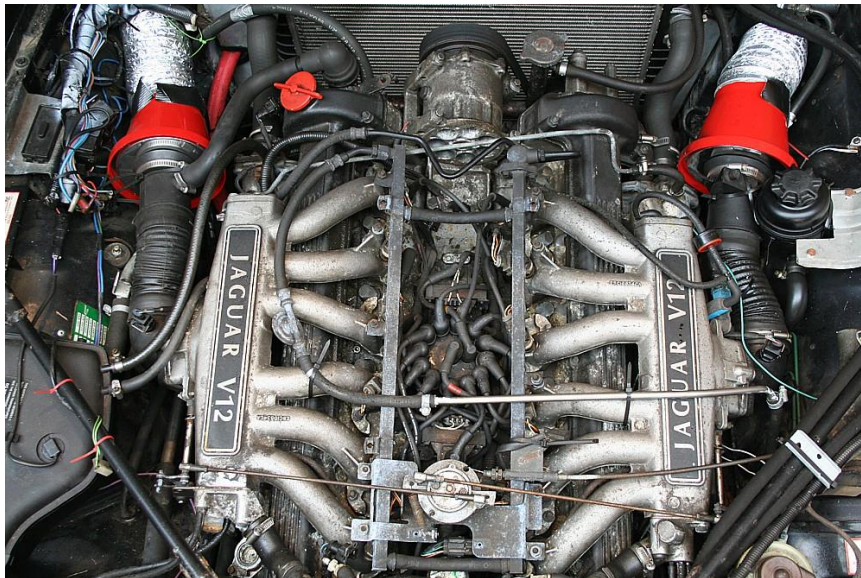
$$sfc = \frac{\dot{m}_f}{P}$$

Onde  $\dot{m}_f$  (kg/s) é a vazão média de combustível por ciclo. Unidades práticas são g/kW-h e lbm/hp-h ( $1 \text{ g/Kw-h} = 1/3,6 \mu\text{g/J} = 0,001644 \text{ lbm/hp-h}$ )

Tipo de motor	SFC mínimo (kg/kW-h)	$\eta_t$ máxima (%)
Motores pequenos	0,350	25
Motores de motocicleta	0,270	32
Motores SI automotivos	0,250	35
Motores CI automotivos com injeção	0,240	35
Motores CI automotivos com injeção e turbocompressor	0,200	42
Motores CI para caminhões com turbocompressor	0,190	45

# PARÂMETROS E CURVAS CARACTERÍSTICAS

1. Gráfico de desempenho de um motor: **Jaguar V12 HE** – 12 cilindros!!!!



## Parâmetros de desempenho em dinamômetro (freio)

- **Emissão específica  $sI$  (kg/J):** é a vazão de poluente emitido dividida pela potência desenvolvida pelo motor.

$$sI = \frac{\dot{m}_i}{P}$$

Onde  $\dot{m}_i$  (kg/s) é a vazão média de poluente  $i$  (NO<sub>x</sub>, CO, HC, Particulados). Unidades práticas são g/kW-h e lbm/hp-h. Frequentemente as emissões são caracterizadas em ppm (partes-por-milhão) do volume de gases do escapamento.

- **Emissão específica  $EI_i$  (ad.):** é a vazão de poluente emitido dividida pela vazão total de gases na descarga.

$$EI_i = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_f}$$

Onde  $i$  é o poluente (NO<sub>x</sub>, CO, HC, particulados) a unidade prática é (g/s) / (kg/s)



# Relação entre parâmetros de desempenho

$$P_b = \frac{\eta_f m_a Q_{HV} (F/A)}{n_R}$$

$$P_b = \frac{\eta_f \eta_v N V_d Q_{HV} \rho_{a,i} (F/A)}{2}$$

$$T = \frac{\eta_f \eta_v V_d Q_{HV} \rho_{a,i} (F/A)}{4\pi}$$

$$p_{bme} = \eta_f \eta_v Q_{HV} \rho_{a,i} (F/A)$$

$$\frac{P_b}{A_p} = \frac{\eta_f \eta_v N L Q_{HV} \rho_{a,i} (F/A)}{2}$$

$$\frac{P_b}{A_p} = \frac{\eta_f \eta_v \bar{S}_p Q_{HV} \rho_{a,i} (F/A)}{4}$$

Estas relações mostram de forma direta, a importância no desempenho no motor de:

1. Alta eficiência de conversão de combustível
2. Alta eficiência volumétrica
3. O incremento na potencia (para razão de compressão/volume descolado fixa) aumentando a densidade do ar na admissão
4. Valor máximo da razão ar-combustível a ser usado eficientemente (queimado eficientemente) no motor
5. Valores altos de velocidade média do pistão

# Parâmetros indicados - freio

São os parâmetros relacionados ao trabalho realizado *pele* ou *sobre* o **fluido**, e são obtidos a partir do diagrama  $p-v$  para o motor. O trabalho líquido executado pelo gás sobre o pistão é obtido da integração da área contida no interior do laço no diagrama  $p-v$ :

$$W_{c,i} = \oint pdV$$

$$W_{c,ig} = W_{c,i} = \oint pdV$$

$$W_{c,in} = W_{c,i} - W_p$$

$$W_{c,in} = \oint pdV - W_p$$

**Trabalho indicado bruto por ciclo** = trabalho executado pelo gás durante os processos de compressão e expansão

**Trabalho indicado líquido por ciclo** = trabalho executado pelo gás durante os 4 processos de admissão, compressão, expansão e exaustão

**Trabalho de bombeamento** = trabalho executado pelo/sobre o gás durante os processos de admissão e exaustão



# Parâmetros indicados - freio

O trabalho líquido executado pelo gás sobre o pistão é obtido da integração da área contida no interior do laço no diagrama  $p-v$ :

$$W_{c,i} = \oint p dV \qquad P_i = \frac{W_{c,i} N}{n_R}$$

$W_{c,i}$  = Trabalho líquido por ciclo

$P_i$  = **Potência indicada por ciclo** = representa a taxa de transferência de trabalho dos gases para o pistão

# Parâmetros indicados - freio

O trabalho líquido executado pelo gás sobre o pistão é obtido da integração da área contida no interior do laço no diagrama  $p-v$ :

$$W_{c,i} = \oint p dV \quad P_i = \frac{W_{c,i} N}{n_R}$$

$W_{c,i}$  = Trabalho líquido por ciclo

$P_i$  = **Potência indicada por ciclo** = representa a taxa de transferência de trabalho dos gases para o pistão

$P_b = \frac{\eta_f m_a Q_{HV} (F/A)}{n_R} =$  **Potência de freio Pb(W):** é o valor calculado a partir das medições de torque e rotação

# Parâmetros indicados - freio

O trabalho líquido executado pelo gás sobre o pistão é obtido da integração da área contida no interior do laço no diagrama  $p-v$ :

$$W_{c,i} = \oint p dV \quad P_i = \frac{W_{c,i} N}{n_R}$$

$W_{c,i}$  = Trabalho líquido por ciclo

$P_i$  = **Potência indicada por ciclo** = representa a taxa de transferência de trabalho dos gases para o pistão

$P_b = \frac{\eta_f m_a Q_{HV} (F/A)}{n_R} =$  **Potência de freio Pb(W):** é o valor calculado a partir das medições de torque e rotação

$P_{ig} = P_b + P_f$        $P_f =$  **Potência de atrito Pf(W):** é a potência necessária para movimentar os componentes (atrito)

# Parâmetros indicados - freio

O trabalho líquido executado pelo gás sobre o pistão é obtido da integração da área contida no interior do laço no diagrama  $p-v$ :

$$W_{c,i} = \oint p dV \quad P_i = \frac{W_{c,i} N}{n_R}$$

$$\eta_m = \frac{P_b}{P_{ig}} = 1 - \frac{P_f}{P_{ig}}$$

$W_{c,i}$  = Trabalho líquido por ciclo

$P_i$  = **Potência indicada por ciclo** = representa a taxa de transferência de trabalho dos gases para o pistão

$P_b = \frac{\eta_f m_a Q_{HV} (F/A)}{n_R} =$  **Potência de freio  $P_b(W)$** : é o valor calculado a partir das medições de torque e rotação

$P_{ig} = P_b + P_f$        $P_f =$  **Potência de atrito  $P_f(W)$** : é a potência necessária para movimentar os componentes (atrito)

# Parâmetros indicados - freio

## Eficiência mecânica

- ✓ Já que a potência de atrito inclui a potência requerida para realizar a troca de gases (admissão e exaustão), a eficiência mecânica depende da posição da válvula de borboleta, assim como do projeto do motor e da velocidade de rotação do mesmo.

$$\eta_m = \frac{P_b}{P_{ig}} = 1 - \frac{P_f}{P_{ig}}$$

- ✓ Valores usuais de  $\eta_m$  em motores são de entorno de 90% para válvula de borboleta totalmente aberta e velocidades entre 1800 e 2400 rpm, caindo para 75% na velocidade máxima, e indo para valor de zero, no caso mais crítico da válvula de borboleta fechada.

# Parâmetros

$$\eta_m = \frac{P_b}{P_{ig}} = 1 - \frac{P_f}{P_{ig}}$$

## Indicados

- ✓ Aqueles obtidos da área do laço no diagrama  $p-v$

$$P_i = \frac{W_{c,i} N}{n_R}$$

$T_i$

$P_{ime}$

$isfc$

## de freio

- ✓ Aqueles obtidos de medições do dinamômetro

$$P_b = \frac{\eta_f m_a Q_{HV} (F/A)}{n_R} =$$

$$P_b = \frac{\eta_f \eta_v N V_d Q_{HV} \rho_{a,i} (F/A)}{2}$$

$$T_b = \frac{\eta_f \eta_v V_d Q_{HV} \rho_{a,i} (F/A)}{4\pi}$$

$$P_{bme} = \eta_f \eta_v Q_{HV} \rho_{a,i} (F/A)$$

$bsfc$



# SISTEMAS DE DOSAGEM DE COMBUSTÍVEL

## ❖ Gerenciamento do motor - Otto

- ✓ O sistema de gerenciamento do motor se encarrega de realizar o desejo do motorista, por exemplo, a aceleração para uma determinada potência do motor.
- ✓ Este sistema regula todas as funções do motor de tal forma que o torque necessário esteja disponível
- ✓ A potência entregue pelo motor é determinada pelo torque da embreagem e pela rotação
- ✓ O torque da embreagem é resultante do torque gerado pelo processo de combustão reduzido pelo torque necessário para o trabalho de bombeamento, assim como o torque necessário para o funcionamento dos sistemas secundários (sistema de condicionamento de ar, etc.)





# SISTEMAS DE DOSAGEM DE COMBUSTÍVEL

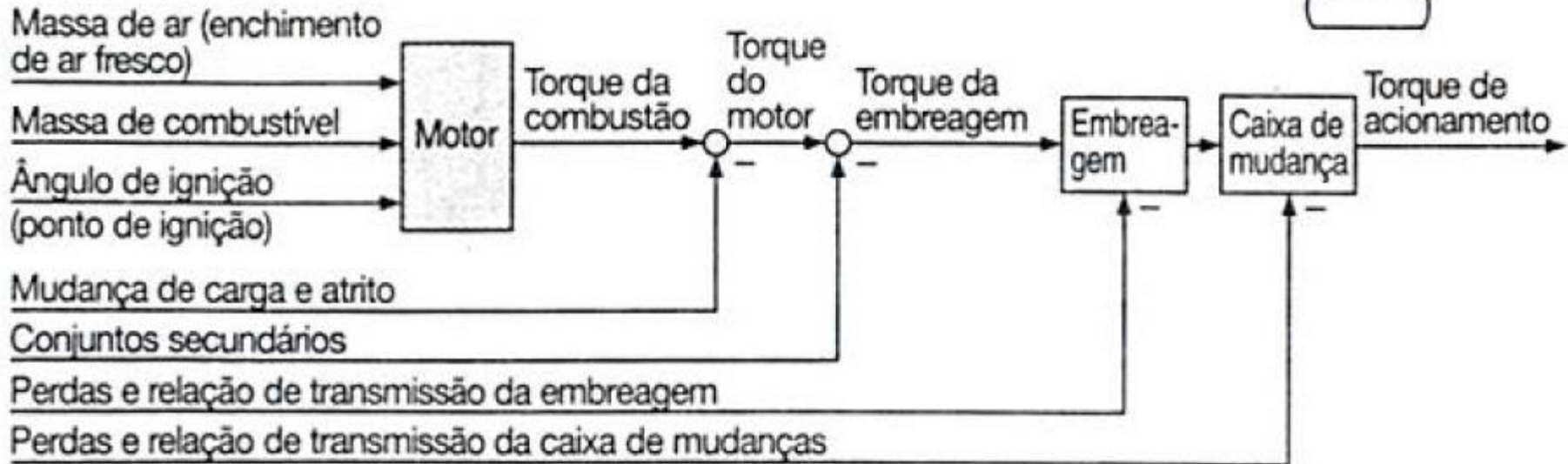
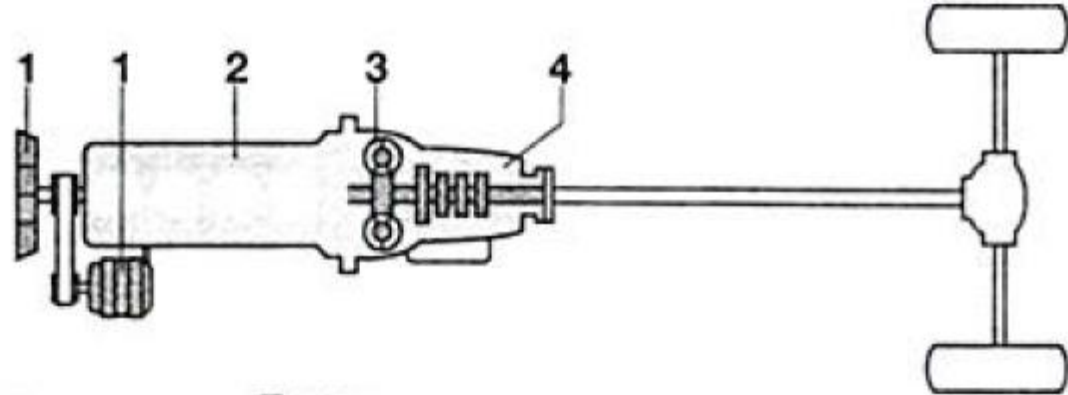
## ❖ Gerenciamento do motor - Otto

- ✓ O torque de combustão é gerado no tempo (curso) de combustão/expansão e é principalmente determinado por:
  - **Massa de ar para combustão** (disponível no cilindro após o fechamento das válvulas)
  - **Massa de combustível disponível no cilindro**
  - Ponto (no ciclo) no qual acontece a combustão
- ✓ Há também outros fatores que influenciam:
  - **Composição da mistura**
  - **Como acontece a combustão da mistura** (evolução do processo de combustão)
- ✓ A função principal do gerenciamento do motor é coordenar os diversos sistemas secundários para ajustar o torque gerado pelo motor e satisfazer ao mesmo tempo as diversas exigências. (emissões, consumo, potência, conforto, segurança)

# Gerenciamento do motor

## Torques na árvore de transmissão

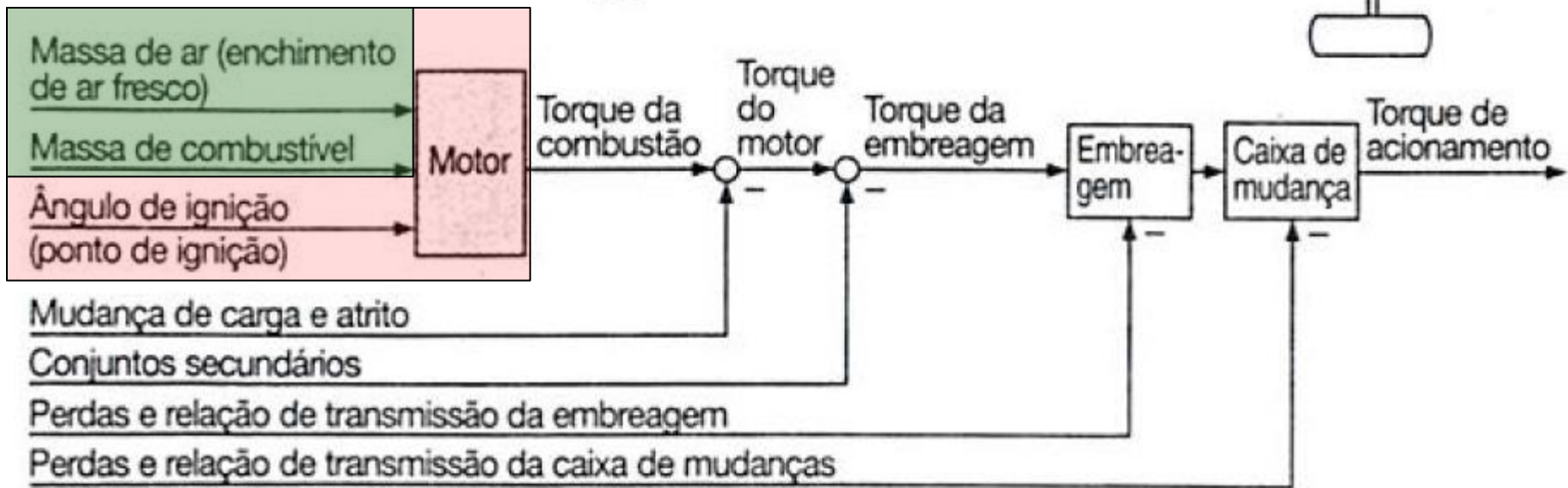
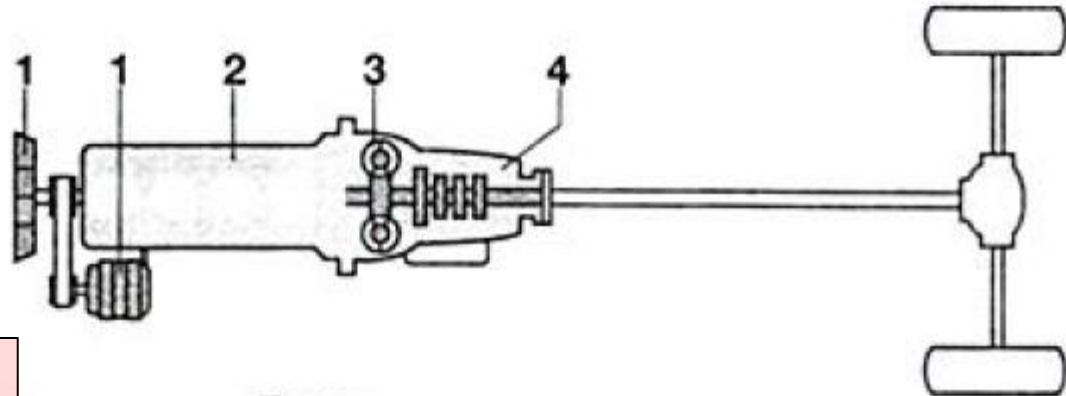
- 1 conjuntos secundários (alternador, compressor do ar condicionado, etc.)
- 2 motor
- 3 embreagem
- 4 caixa de mudança



# Gerenciamento do motor

## Torques na árvore de transmissão

- 1 conjuntos secundários (alternador, compressor do ar condicionado, etc.)
- 2 motor
- 3 embreagem
- 4 caixa de mudança





# SISTEMAS DE DOSAGEM DE COMBUSTÍVEL

## ❖ Gerenciamento do motor - Otto

- ✓ O sistema de gerenciamento controla principalmente os seguintes subsistemas:
  - Controle de enchimento
  - Alimentação de combustível
  - Formação de mistura
  - Ignição



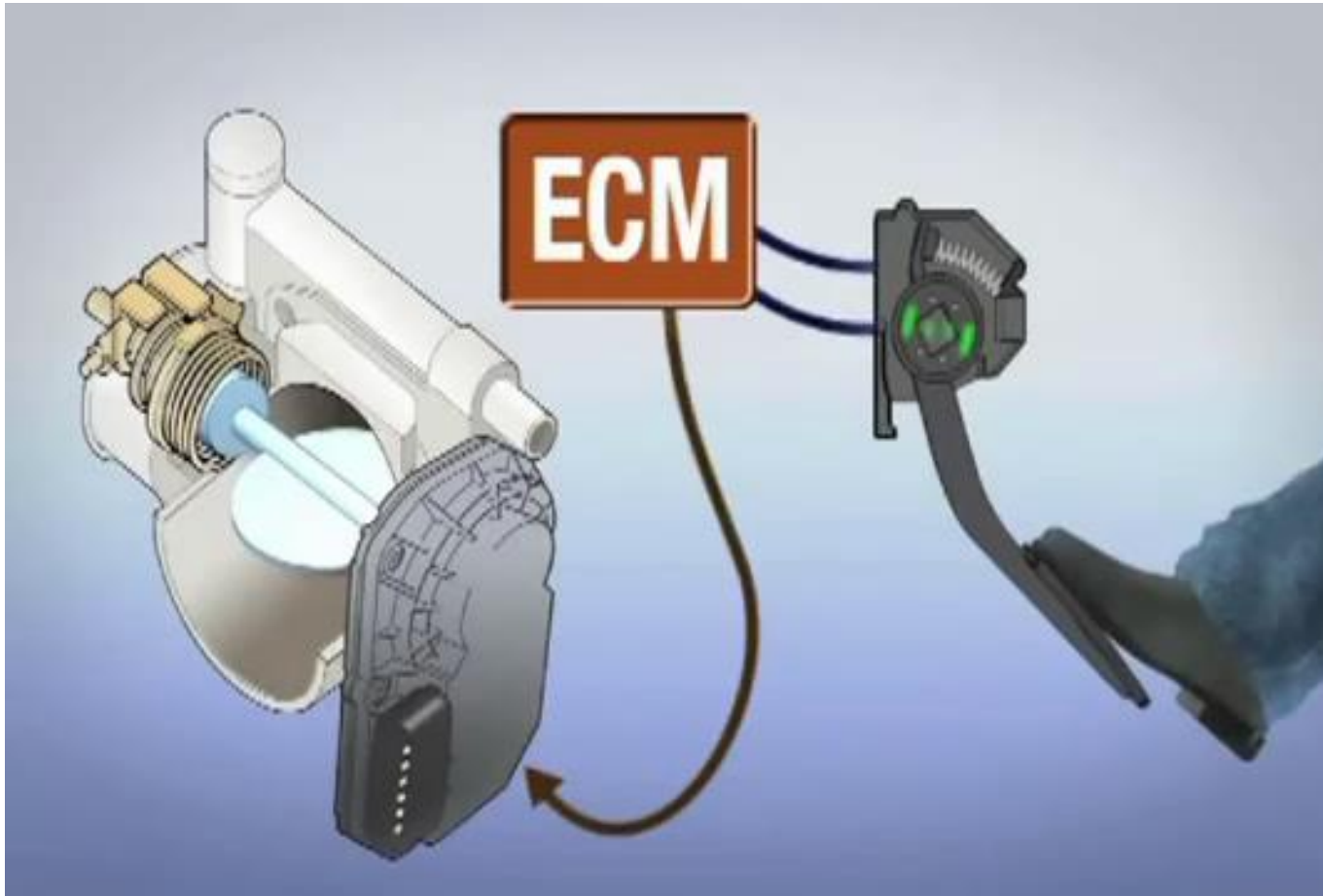
# SISTEMAS DE DOSAGEM DE COMBUSTÍVEL

## ❖ Gerenciamento do motor

- ✓ O sistema de gerenciamento controla principalmente os seguintes subsistemas:
  - **Controle de enchimento**
  - ✓ Em sistemas de comando de motor com acelerador eletrônico (EGAS), o controle da admissão de ar no cilindro é realizado por um sistema secundário e a borboleta é acionada eletronicamente. É influenciado pelo sistema de comando de válvulas, e recirculação de gases de escape. Em sistemas convencionais, o motorista comanda a abertura da válvula diretamente através do pedal do acelerador.

# SISTEMAS DE DOSAGEM DE COMBUSTÍVEL

## ❖ Gerenciamento do motor







# SISTEMAS DE DOSAGEM DE COMBUSTÍVEL

## ❖ Gerenciamento do motor

- ✓ O sistema de gerenciamento controla principalmente os seguintes subsistemas:
  - **Alimentação de combustível**
  - ✓ O subsistema de alimentação de combustível tem a função de alimentar o motor sempre com a quantidade necessária de combustível, no nível de pressão necessária, na faixa de operação do motor
  - ✓ No nível de pressão necessário basicamente se diferencia entre formação de mistura dentro do cilindro (injeção direta), ou externa (injeção indireta)





# SISTEMAS DE DOSAGEM DE COMBUSTÍVEL

## ❖ Gerenciamento do motor

- ✓ O sistema de gerenciamento controla principalmente os seguintes subsistemas:
  - **Formação de mistura**
  - ✓ No subsistema de formação de mistura é calculada a massa de combustível requerida para a massa de ar admitida no cilindro, e a partir disso o tempo de injeção otimizado. Na injeção direta, deve ser levado ainda em conta o tipo de funcionamento dos injetores: Injeção em etapas ou estratificada.

# SISTEMAS DE DOSAGEM DE COMBUSTÍVEL

## ❖ Gerenciamento do motor





# SISTEMAS DE DOSAGEM DE COMBUSTÍVEL

## ❖ Gerenciamento do motor

- ✓ O sistema de gerenciamento controla principalmente os seguintes subsistemas:

- **Ignição**

- ✓ O subsistema de ignição determina, finalmente, o ângulo da árvore de manivelas no qual a faísca dá início ao processo de combustão, no tempo certo para aproveitar ao máximo a energia contida no combustível.



# SISTEMAS DE DOSAGEM DE COMBUSTÍVEL

## ❖ Formação de mistura

- ✓ Princípios básicos
- ✓ Um motor precisa de uma determinada relação ar-combustível para a operação.
- ✓ No caso dos motores Otto, a queima total teórica acontece idealmente na relação 14,7:1, é e chamada de relação estequiométrica.

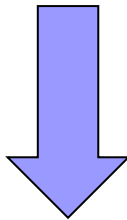
$$\lambda = \phi^{-1} = \frac{\left(\frac{A}{F}\right)_{real}}{\left(\frac{A}{F}\right)_s}$$

- ✓ O consumo específico de combustível depende principalmente desta razão de mistura. Para que a queima aconteça “realmente” completa é necessário um excesso de ar, limitado pelos “limites de inflamabilidade da mistura”

# SISTEMAS DE DOSAGEM DE COMBUSTÍVEL

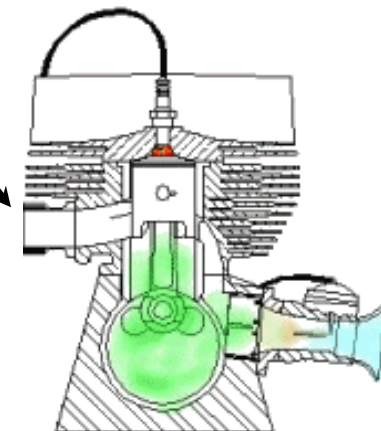
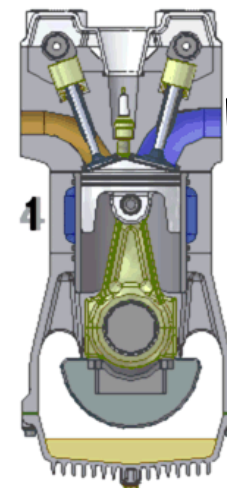
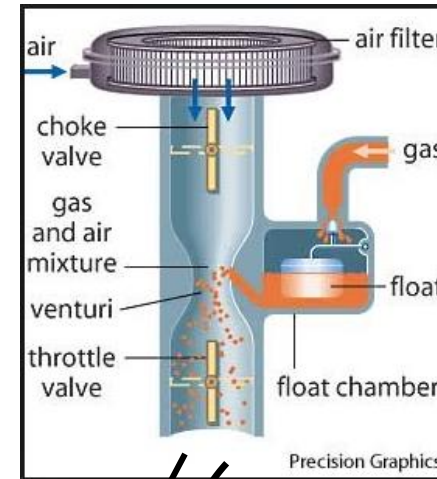
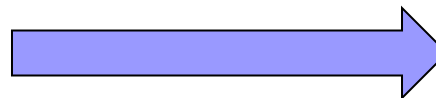
## ❖ Formação de mistura

- ✓ Princípios básicos



- ✓ Sistema carburado
- ✓ Sistema de injeção de combustível.

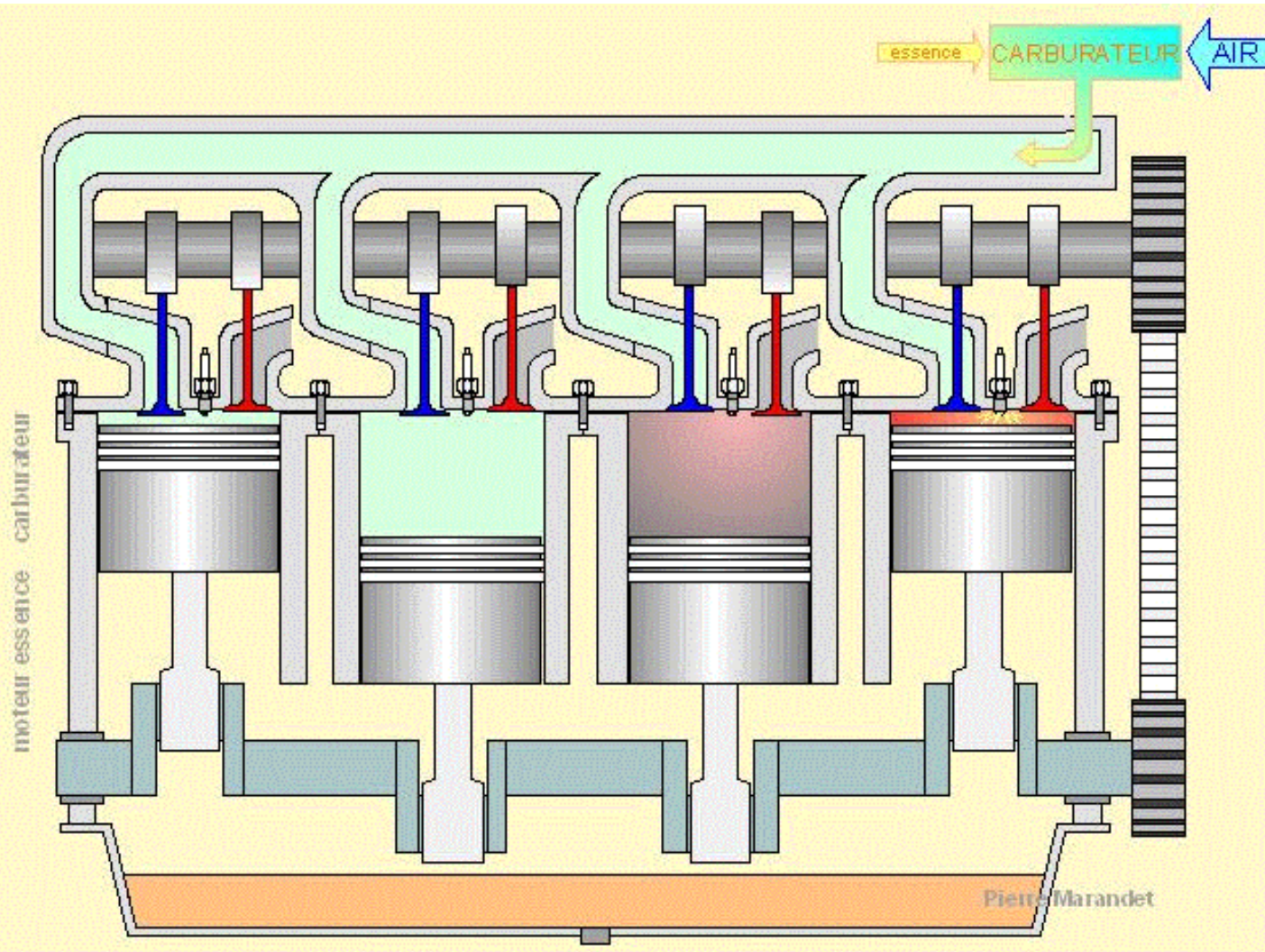
# Tipos de alimentação - Carburador







# Tipos de alimentação - Carburador





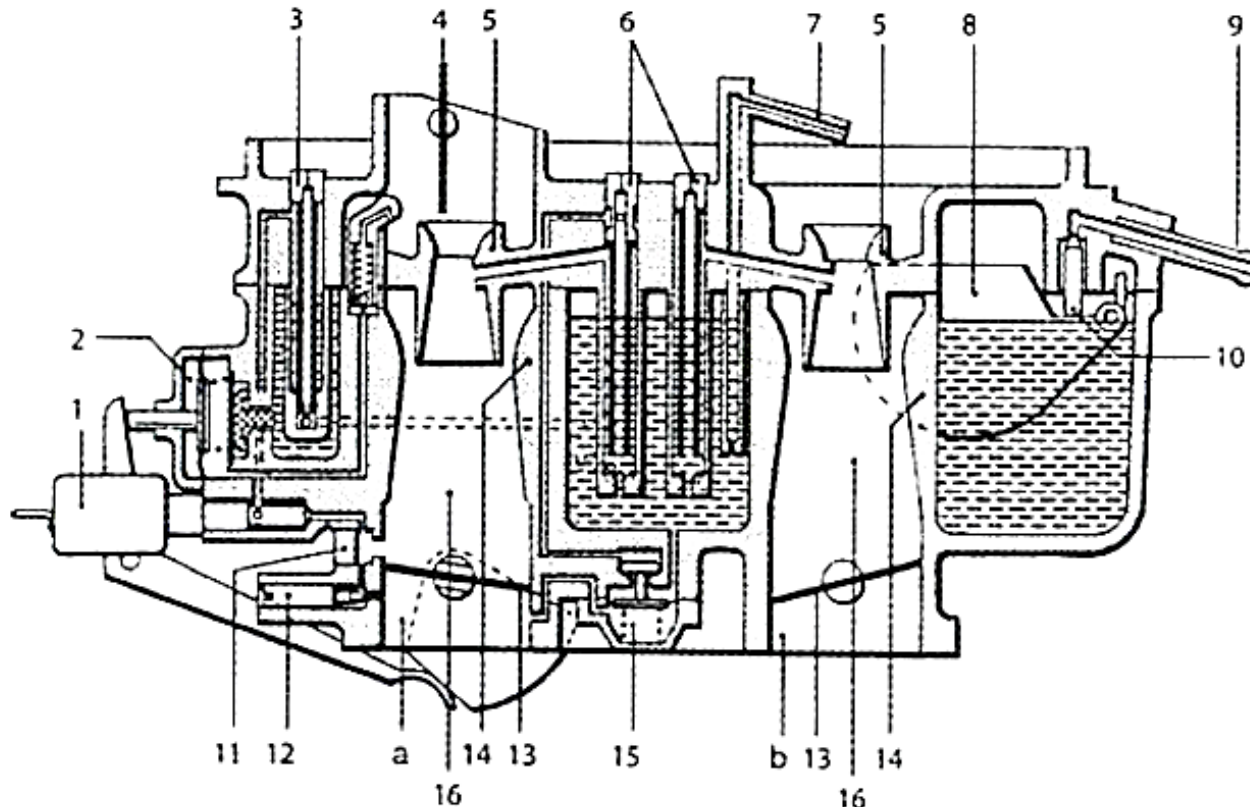


# Tipos de alimentação - Carburador

*Esquema de um carburador de registro.*

a) 1º estágio, b) 2º estágio.

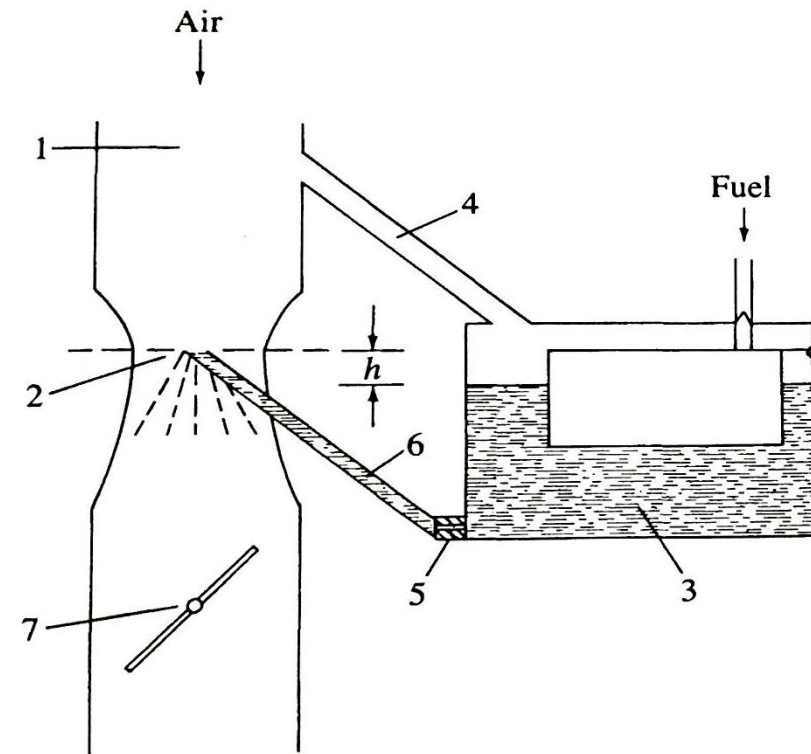
1 válvula de corte de marcha lenta, 2 bomba aceleradora, 3 sistema de marcha lenta, 4 borboleta afogadora, 5 difusor secundário, 6 sistemas principais com tubos emulsionadores, 7 enriquecimento de plena carga, 8 bóia, 9 entrada de combustível, 10 válvula de agulha da bóia, 11 tampão do bypass, 12 parafuso de regulagem (mistura de marcha lenta), 13 borboletas de aceleração, 14 difusores, 15 válvula controladora de marcha lenta, 16 câmara de mistura.



# Tipos de alimentação - Carburador

## Deficiências do carburador

1. Em baixa rotação a mistura torna-se muito pobre em combustível
2. Em rotação média, a estequiometria torna-se um pouco mais rica, mais não da conta para o novo fluxo de ar que está entrando
3. Quando a válvula de borboleta abre completamente, a estequiometria da mistura permanece quase constante (não chega a 1.1)
4. Não compensa direito o caráter transiente do escoamento na admissão.
5. Não compensa variações de densidade do ar (variação na altitude)





# Tipos de alimentação - Carburador

## Sistemas auxiliares do carburador

1. **Sistema de partida a frio:** composto por uma segunda borboleta que proporciona arraste de combustível por todos os orifícios proporcionando uma mistura rica assegurando a facilidade de iniciar o funcionamento do motor a frio
2. **Sistema de marcha lenta e progressão:** Garante uma passagem suave da marcha lenta para rotações mais elevadas através de furos situados estrategicamente acima da borboleta, introduzindo combustível paulatinamente com a carga.
3. **Sistema principal:** constituído de uma saída (ligada à cuba) que fornece o combustível na garganta do Venturi.
4. **Sistema de aceleração rápida:** insere, por meio de uma bomba de membrana, quantidade adicional de combustível, sempre que há uma brusca abertura da borboleta, compensando assim a entrada de ar adicional.

# Tipos de alimentação – Injeção

## ➤ **Sistemas de injeção**

Em motores de ignição por faísca, existem basicamente dois sistemas,

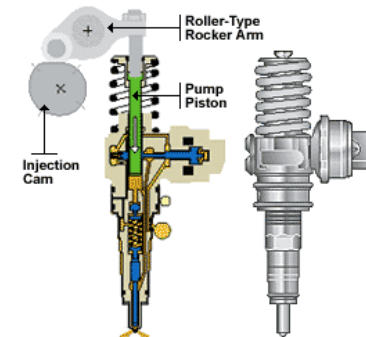
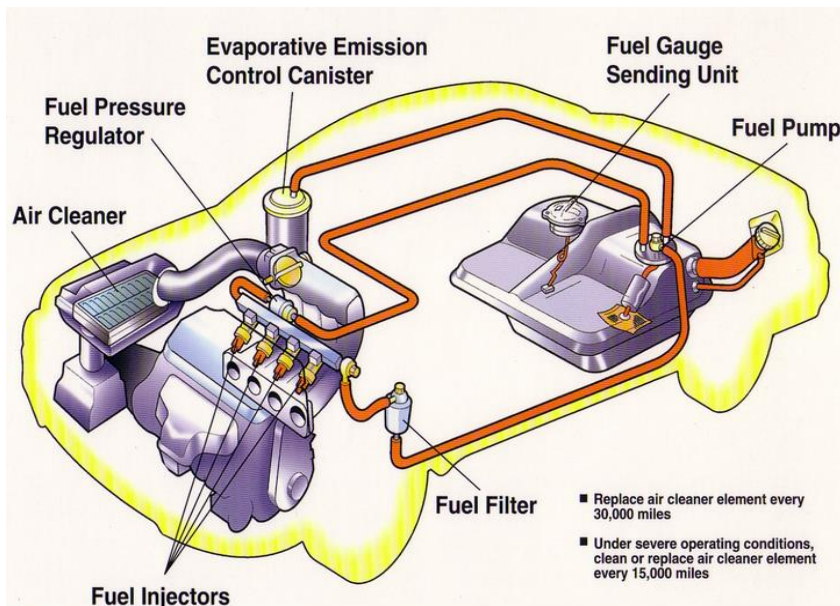
- (a) Injeção mecanicamente controlada
- (b) Injeção eletronicamente controlada

As vantagens em relação ao sistema carburado são varias:

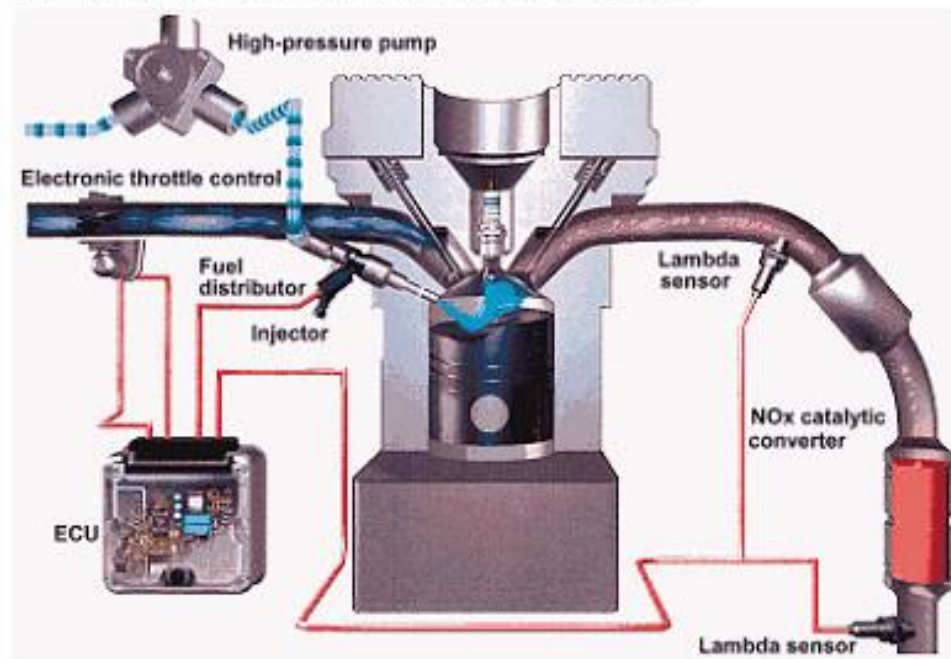
- ✓ Aumento da eficiência volumétrica
- ✓ Controle da estequiometria da mistura
- ✓ Resposta mais rápida às variações da posição da válvula de borboleta
- ✓ Controle mais preciso da estequiometria em partida à frio, e aquecimento



# Tipos de alimentação – Injeção



## Electronic Fuel Injection and Throttle Control



### Injeção pode ser feita:

- ✓ Diretamente na câmara de combustão ou um pouco antes, no duto de admissão (Otto)
- ✓ Diretamente na câmara de combustão (Diesel)

# Tipos de alimentação – Injeção

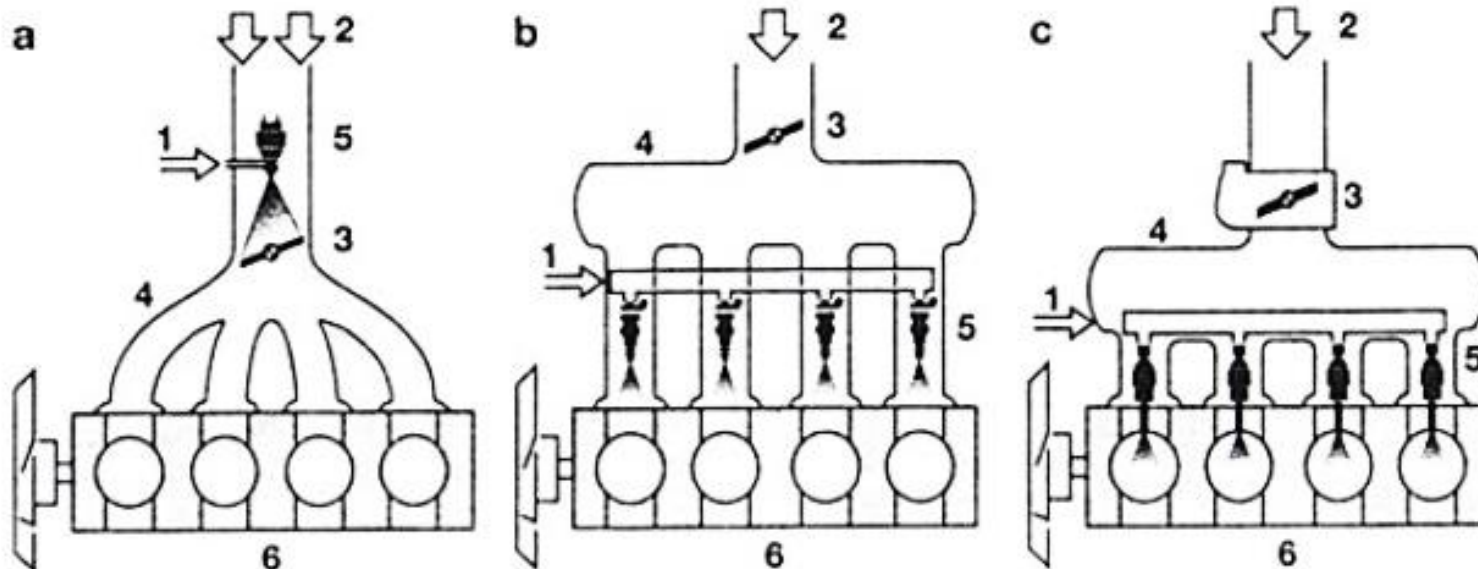
## ➤ **Sistemas de injeção:**

- Sistema monoponto
- Sistema multiponto

**Representação esquemática dos sistemas de injeção.**

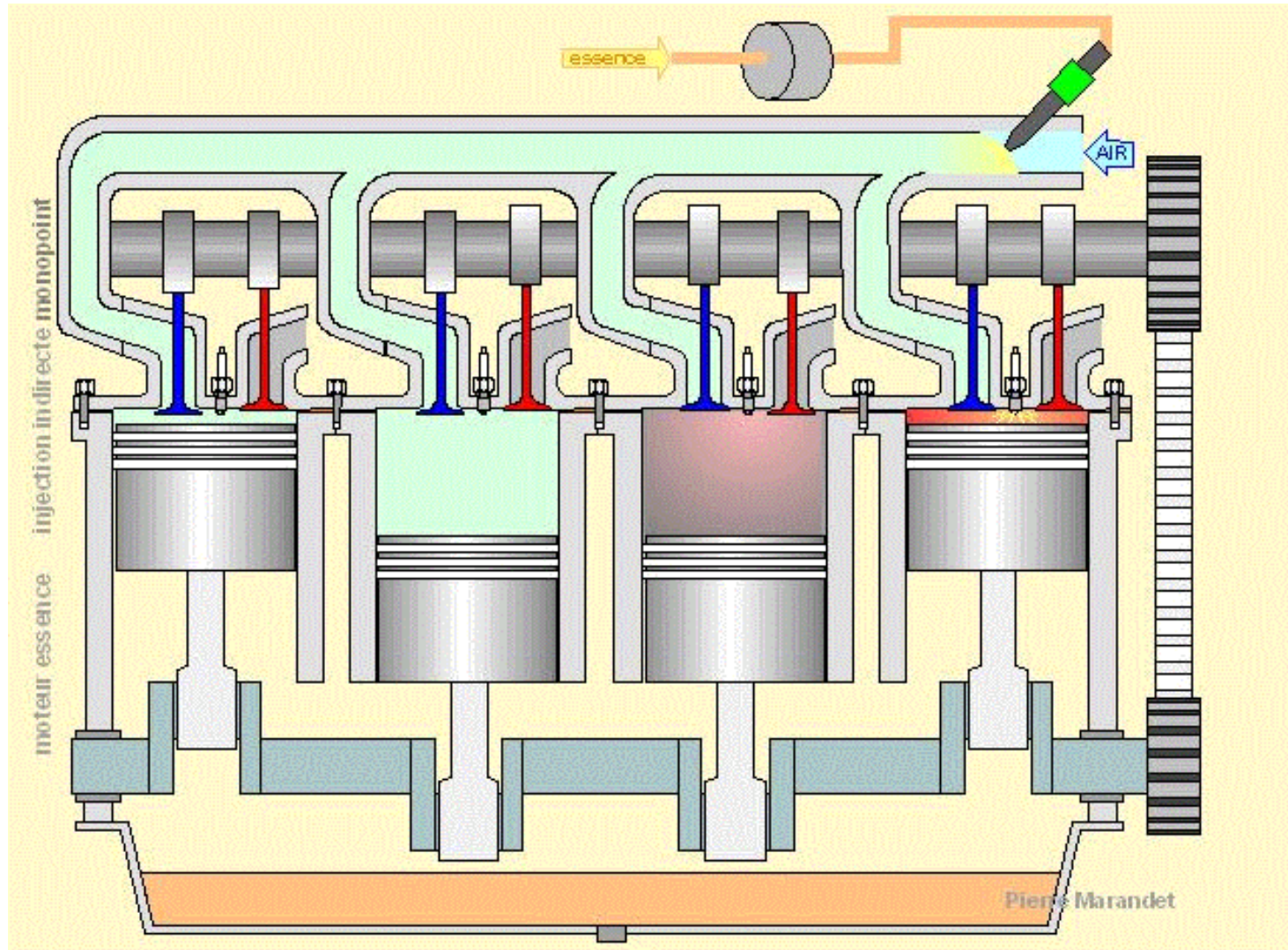
*a injeção central, b injeção individual, c Injeção direta de gasolina.*

1 combustível, 2 ar, 3 borboleta de aceleração, 4 coletor de admissão, 5 válvula injetora, 6 motor, 7 unidade de comando da borboleta (EGAS), 8 válvula injetora de alta pressão



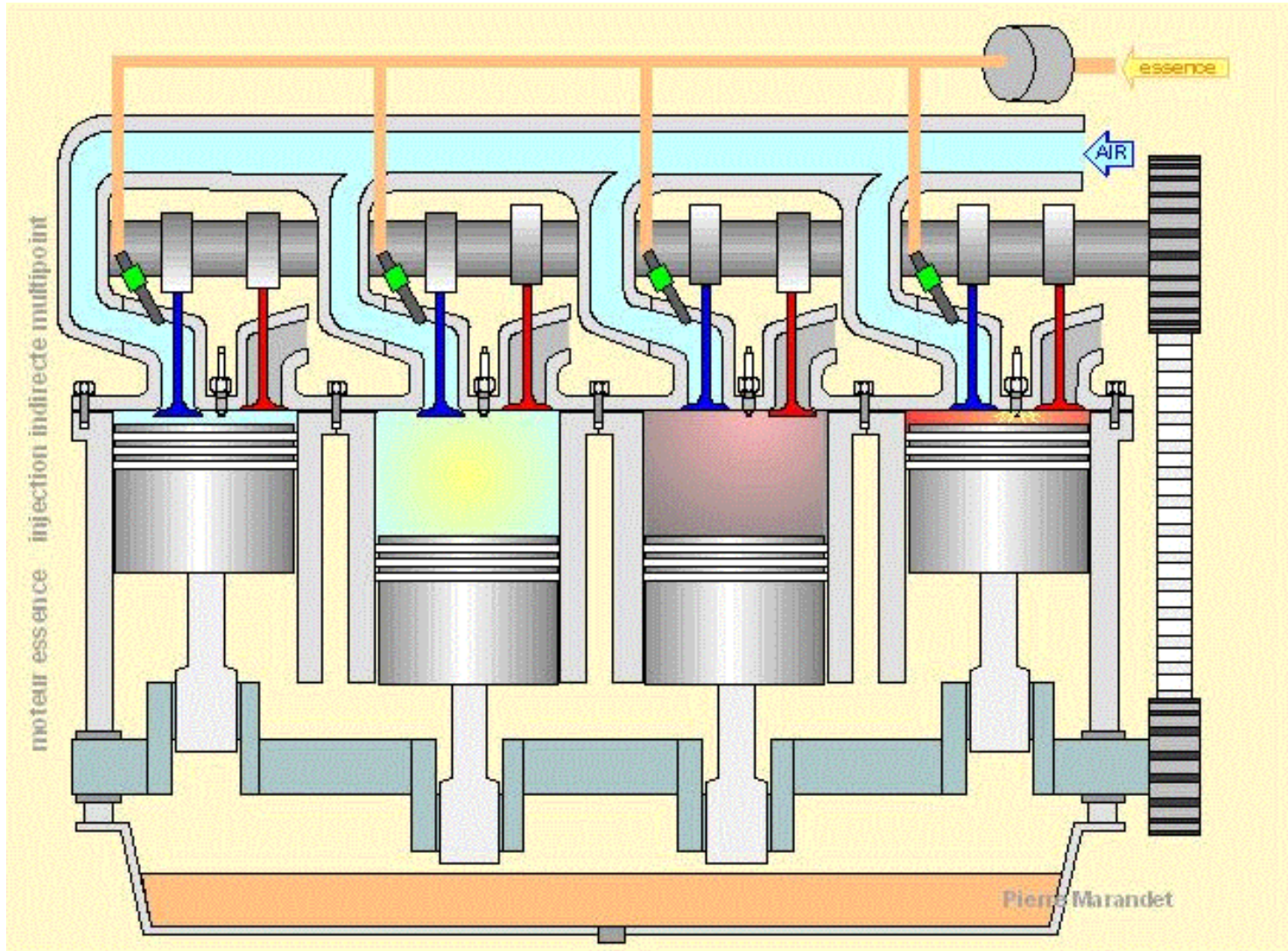


# Injeção monoponto

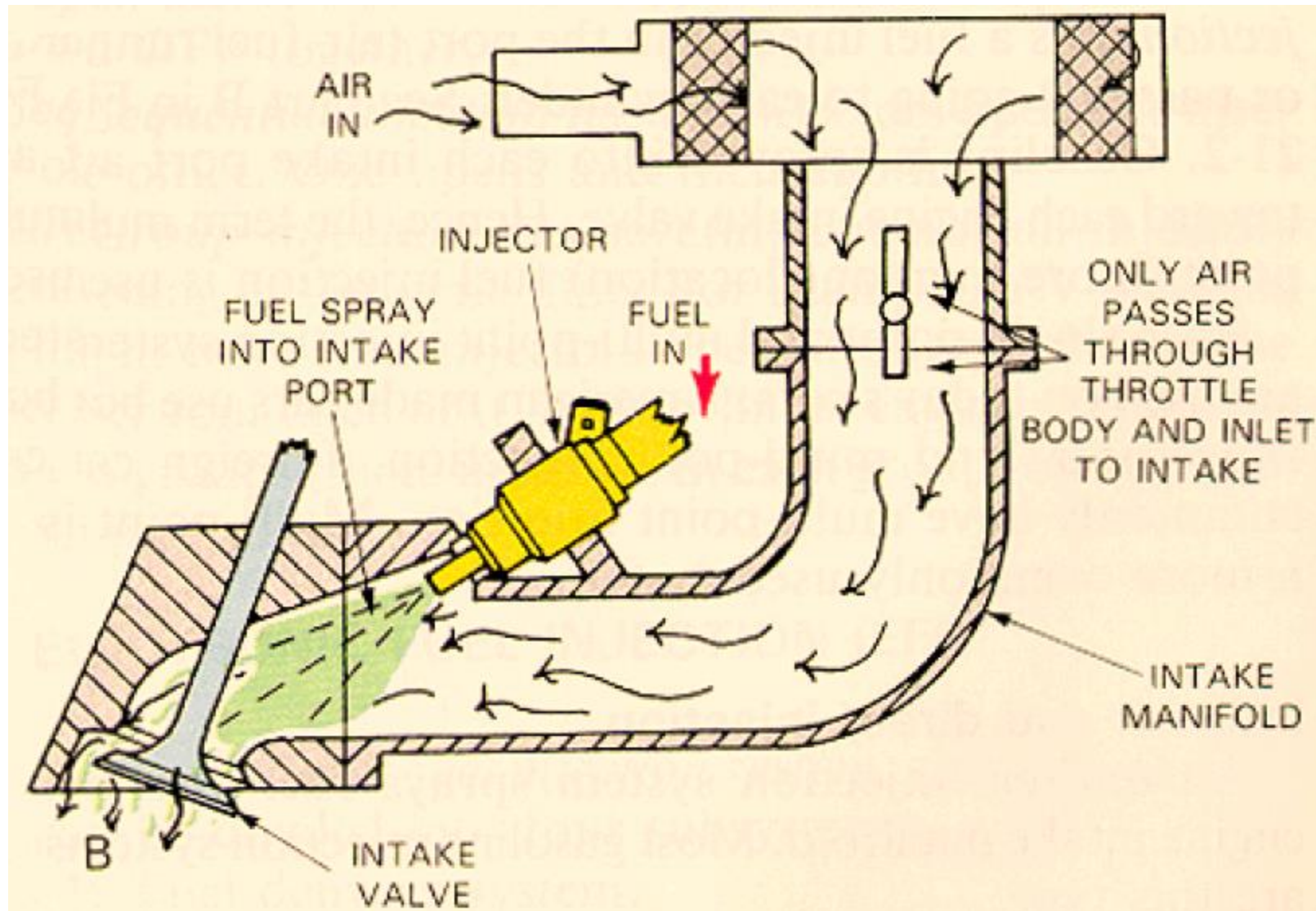




# Injeção multiponto



# Injeção multiponto



# Tipos de alimentação – Injeção

## ➤ Sistemas de injeção

Em motores de ignição por faísca, existem basicamente dois sistemas,

### (a) Injeção mecanicamente controlada

- Não possui sistema eletrônico de gerenciamento
- Injeta combustível continuamente
- Apresenta controles de partida a frio, marcha lenta, aceleração parcial e aceleração total.

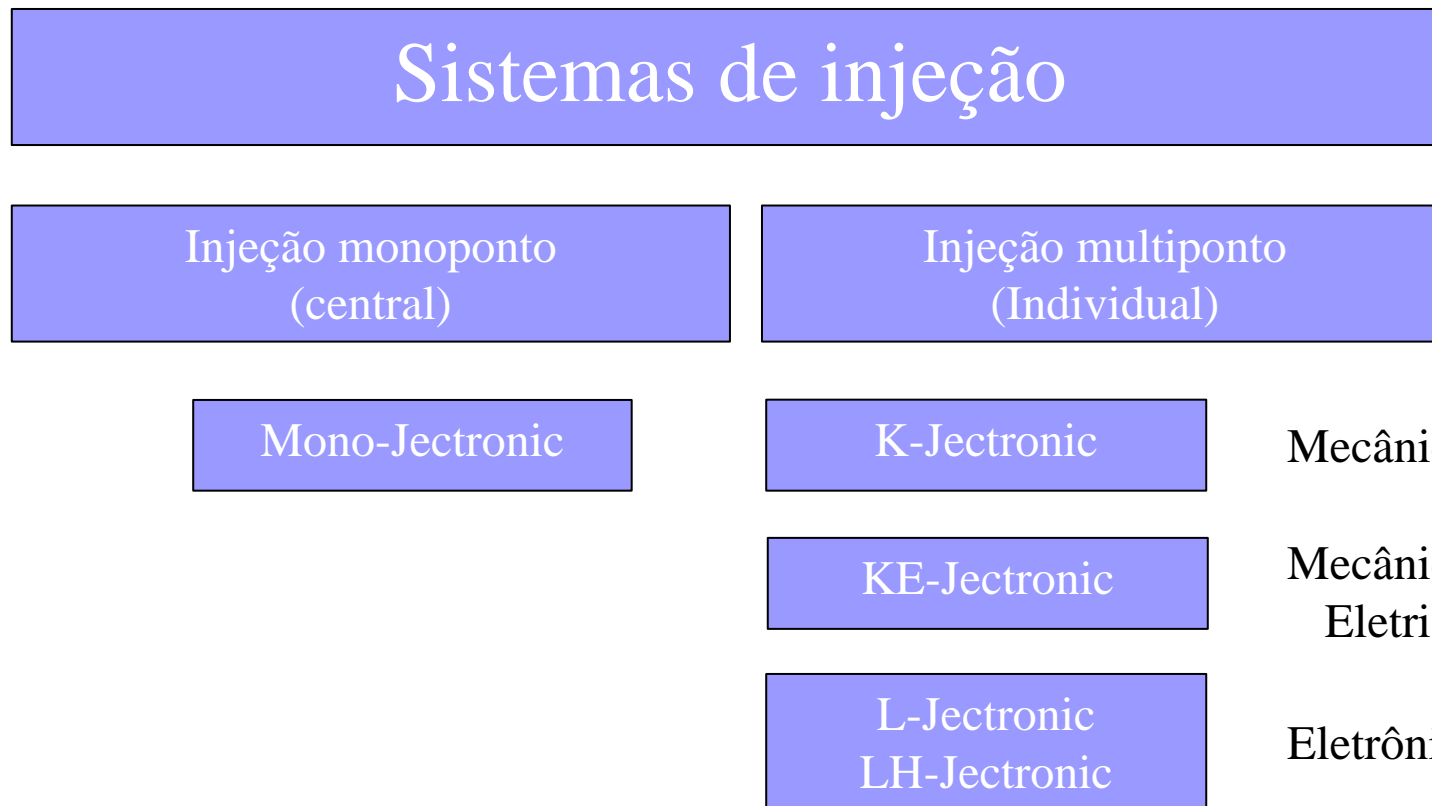
### (b) Injeção eletronicamente controlada

- Quanto à tecnologia: Analógica ou digital
- Quanto ao número de injetores: monoponto (*single point*) ou multiponto (*multipoint*)
- Quanto à sequência de injeção: simultânea (*full group*), semissequencial fasado ou sequencial fasado.

As

# Tipos de alimentação – Injeção

## ➤ Sistemas de injeção da BOSCH (resumo)







# Injeção direta – motor Otto - GDI

## ❖ Sistema GDI - *Gasoline Direct Injection*

- ✓ A injeção direta de combustível também vem sendo usada em motores de ignição for faísca
- ✓ Esta aplicação mostra as suas vantagens nos motores de ignição por compressão
- ✓ Ao contrário da injeção indireta, somente escoar ar no sistema de admissão até a câmara de combustão, e somente lá o combustível é injetado por um injetor fixado diretamente no cabeçote do motor.
- ✓ Basicamente há dois modos de operação:
  - Operação homogênea
  - Operação estratificada

# Injeção direta – motor Otto - GDI

## ❖ Sistema GDI - *Gasoline Direct Injection*

Fornecimento de combustível para um sistema GDI  
(exemplo com retorno de combustível e regulador de pressão)

### Circuito de baixa pressão (primária)

1. Tanque de combustível
2. Bomba elétrica de combustível com limitador de pressão e filtro
3. Válvula de desligamento
4. Regulador de pressão
5. Linha de combustível

### Circuito de alta pressão

6. Linha de retorno de combustível
7. Bomba de alta pressão
8. Galeria de combustível
9. Injetor de alta pressão
10. Válvula de controle de pressão
11. Sensor de pressão de combustível

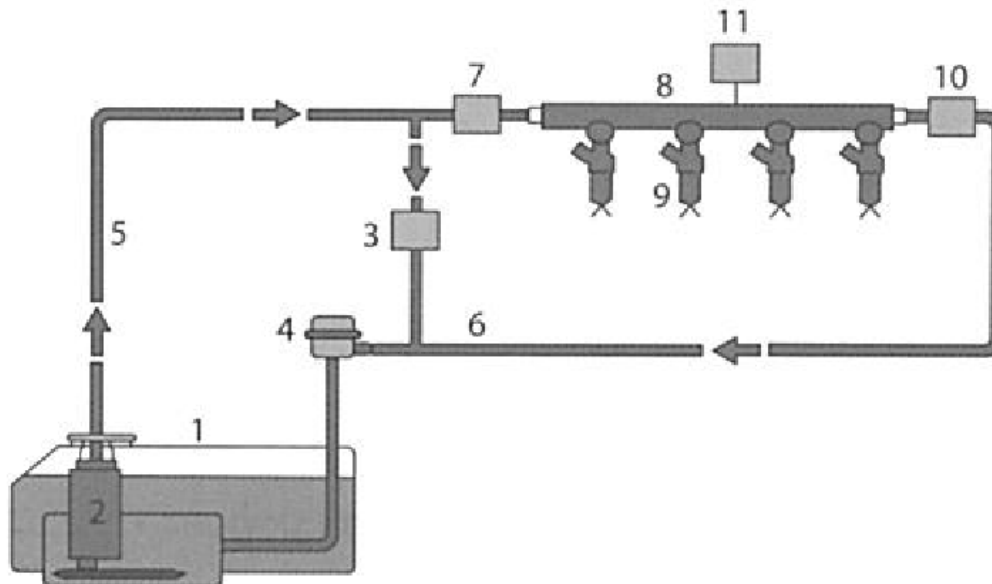


Figura 8.42 – Sistema de combustível do sistema Bosch MED Motronic.



# Injeção direta – motor Otto - GDI

## ❖ Sistema GDI - *Gasoline Direct Injection*

- ✓ Basicamente há dois modos de operação:
  - **Operação homogênea**

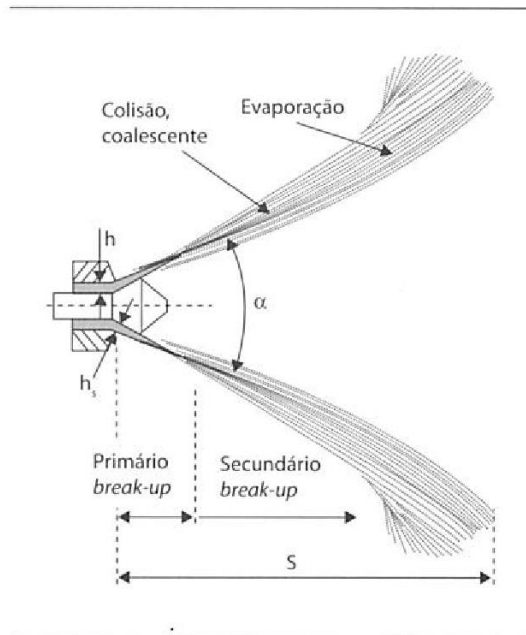
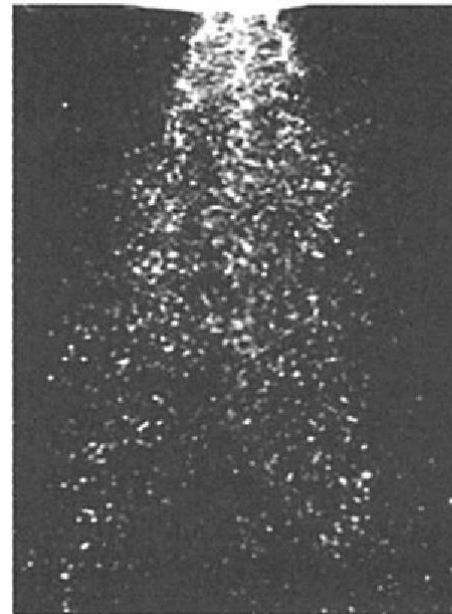
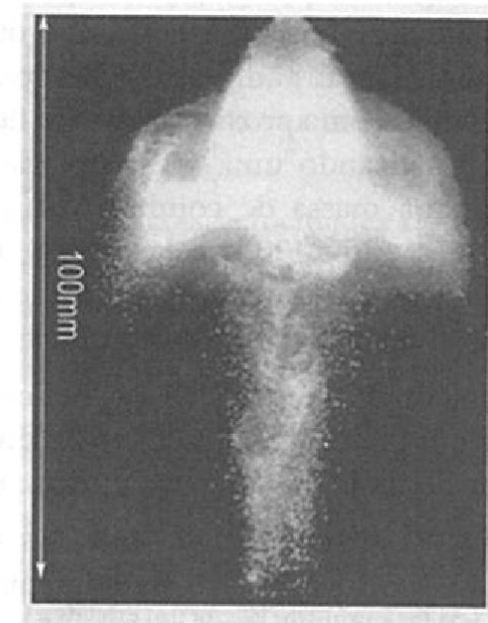


Figura 8.31 – Mecanismo de atomização em injetor do tipo hollow-cone. [6]

Injeção indireta



Injeção direta



	PFI	GDI	Diesel
Pressão de injeção (bar)	2,5 – 4,5	40 - 130	500 - 2000
Diametro Sauter (μm)	85 - 200	14 - 24	8



# SISTEMAS DE DOSAGEM DE COMBUSTÍVEL

## ❖ Gerenciamento do motor - **Diesel**

- ✓ O sistema de gerenciamento do motor se encarrega de realizar o desejo do motorista, por exemplo, a aceleração para uma determinada potência do motor.
- ✓ Este sistema regula todas as funções do motor de tal forma que o torque necessário esteja disponível
- ✓ A potência entregue pelo motor é determinada pelo torque da embreagem e pela rotação
- ✓ O torque da embreagem é resultante do torque gerado pelo **processo de combustão** reduzido pelo torque necessário para o trabalho de bombeamento, assim como o torque necessário para o funcionamento dos sistemas secundários



# SISTEMAS DE DOSAGEM DE COMBUSTÍVEL

## ❖ Gerenciamento do motor - **Diesel**

- ✓ O torque de combustão é gerado no tempo (curso) de combustão/expansão e é principalmente determinado por:
  - **Massa de ar para combustão** (disponível no cilindro após o fechamento das válvulas)
  - **Massa de combustível disponível no cilindro**
  - Ponto (no ciclo) no qual acontece a combustão
- ✓ Há também influencias menores:
  - **Composição da mistura**
  - **Como acontece a combustão da mistura** (evolução do processo de combustão)
- ✓ A função principal do gerenciamento do motor é coordenar os diversos sistemas secundários para ajustar o torque gerado pelo motor e satisfazer ao mesmo tempo as diversas exigências. (emissões, consumo, potência, conforto, segurança)



# SISTEMAS DE DOSAGEM DE COMBUSTÍVEL

## ❖ Gerenciamento do motor - **Diesel**

- ✓ Função principal do gerenciamento do motor
- ✓ Ajustar o torque gerado pelo motor ou em algumas aplicações ajustar uma determinada rotação dentro da faixa de funcionamento permitida
- ✓ No motor Diesel, o tratamento de gases de escape e a redução de ruído são feitos internamente no motor: controlando o processo de combustão
- ✓ Isto é feito também pelo sistema de gerenciamento do motor, alterando as seguintes grandezas:
  - Enchimento do cilindro (sobrealimentação)
  - Acondicionamento da temperatura do ar na admissão
  - Composição da mistura no cilindro (EGR)
  - Ponto de injeção e pressão de injeção
  - Curva de injeção

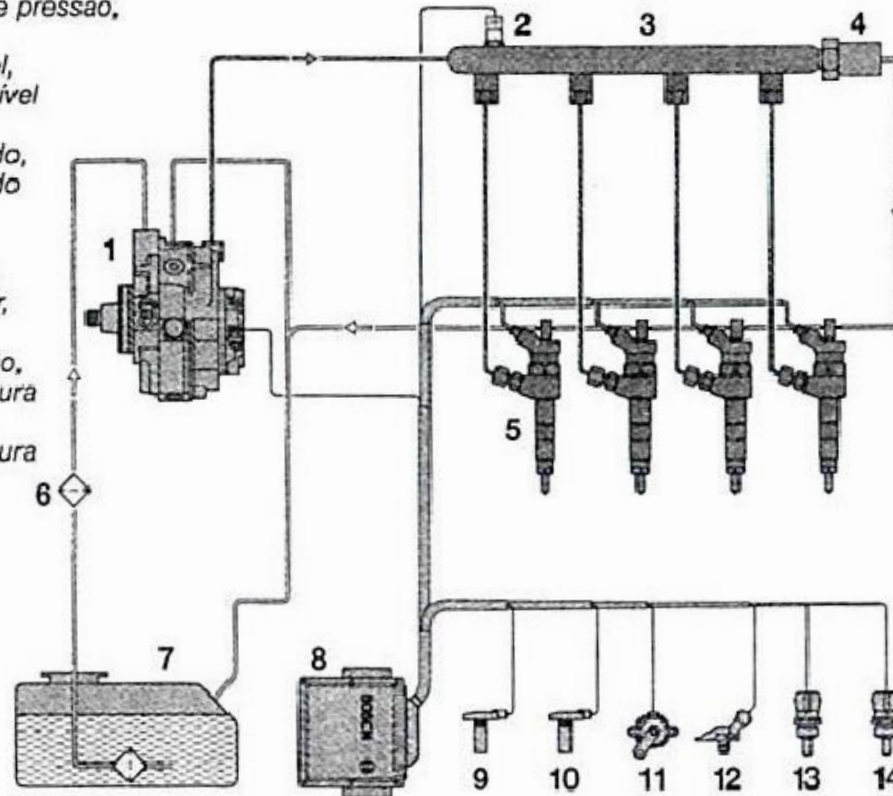


# Tipos de alimentação – Injeção Diesel

## ➤ Sistema *Common Rail*

**Sistema Common Rail para veículos de passeio com bomba de alta pressão controlada por débito**

- 1 bomba de alta pressão CP3,
- 2 sensor de pressão do rail,
- 3 galeria de combustível "Common Rail"
- 4 válvula limitadora de pressão,
- 5 injetores,
- 6 filtro de combustível,
- 7 tanque de combustível com pré-filtro,
- 8 unidade de comando,
- 9 sensor de rotação do motor,
- 10 sensor de fase,
- 11 sensor do curso do pedal do acelerador,
- 12 sensor de pressão de sobrealimentação,
- 13 sensor de temperatura do ar,
- 14 sensor de temperatura do motor.



# Tipos de alimentação – Injeção Diesel

## ➤ Sistema *Common Rail*







# Tipos de alimentação – Injeção Diesel

## ➤ Sistema *Common Rail*



**COMMON RAIL SYSTEM**

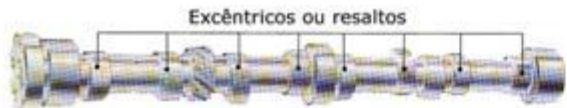
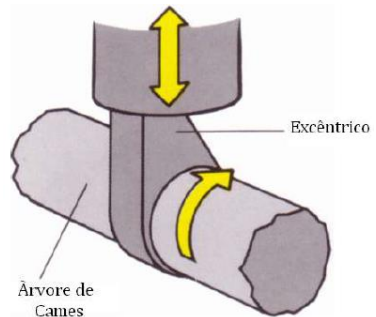
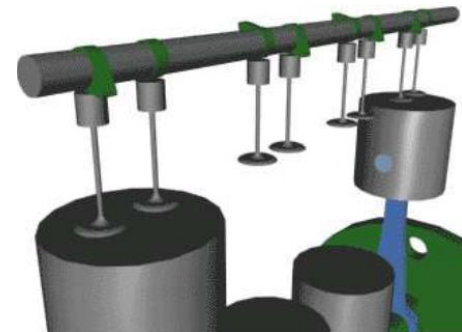
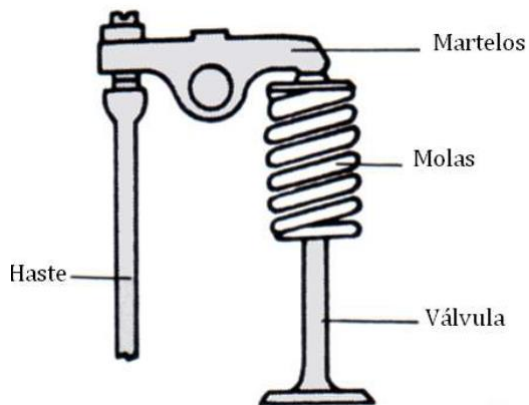
# Sistemas de distribuição

- Chama-se sistema de distribuição o conjunto de elementos que governam a admissão de mistura ar/combustível (motores Otto) ou ar (motores Diesel) nos cilindros, e **posteriormente** a saída dos gases queimados.
- São requisitos fundamentais para um sistema de distribuição eficiente, que cada válvula se mantenha aberta o tempo necessário para uma boa admissão de mistura ou ar, a lavagem do cilindro, e a completa expulsão dos gases queimados. Que funcione suave e eficientemente nos mais variados regimes de rotação do motor.

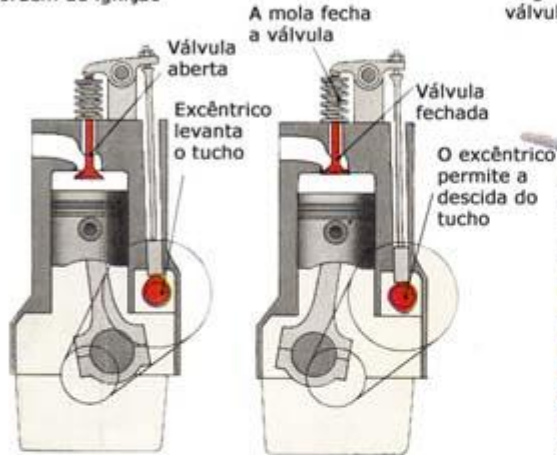


# Sistemas de d

## ACIONAMENTO DAS VÁLVULAS POR MEIO DE HASTES IMPULSORA



**COMANDO DE VÁLVULAS**, este eixo de aço forjado ou de ferro fundido, é polido e endurecido de maneira a oferecer a máxima resistência ao desgaste dos excêntricos. A disposição dos excêntricos está de acordo com a ordem de ignição

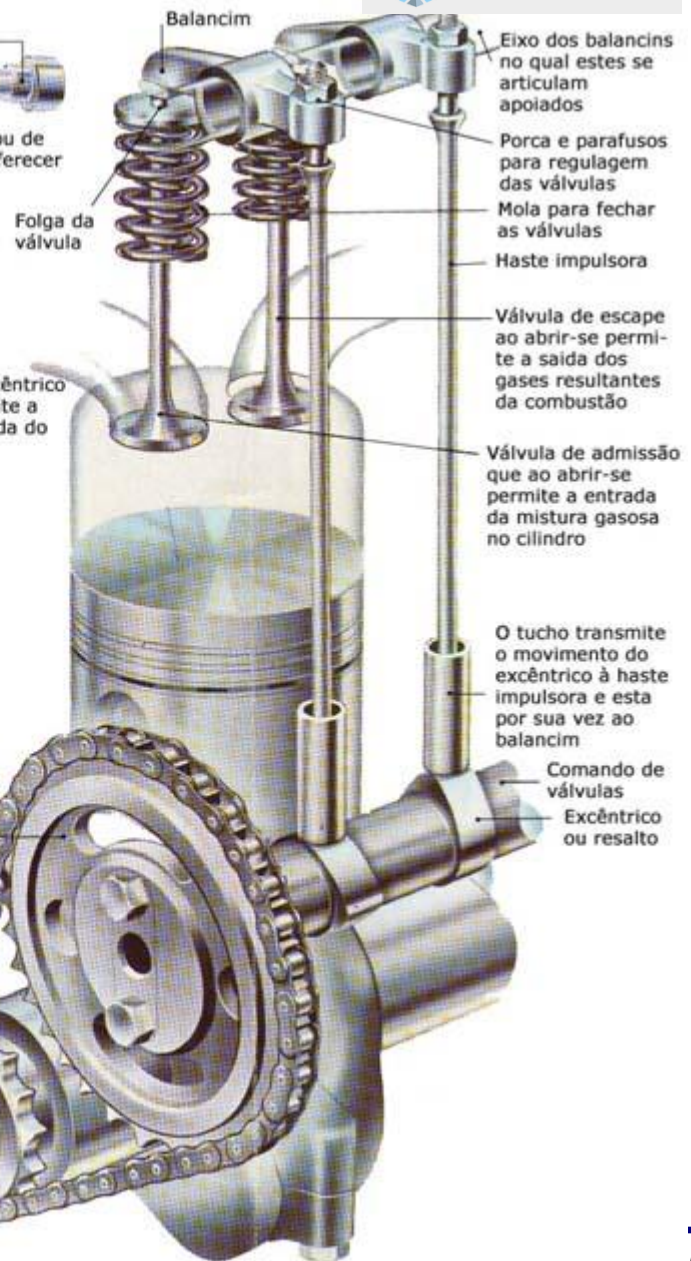


**FUNCIONAMENTO DAS VÁLVULAS**  
Um excêntrico aciona uma haste impulsora e um balancim. Quando o tucho e a haste impulsora são levantados, o balancim atua impelindo a válvula para baixo

Num motor de 4 tempos a engrenagem do comando roda a metade do número das rotações do girabrequim



Outro tipo de balancim. Alguns motores apresentam balancins de chapa de aço estampado que atuam sobre uma rotula



- Eixo dos balancins no qual estes se articulam apoiados
- Porca e parafusos para regulagem das válvulas
- Mola para fechar as válvulas
- Haste impulsora
- Válvula de escape ao abrir-se permite a saída dos gases resultantes da combustão
- Válvula de admissão que ao abrir-se permite a entrada da mistura gasosa no cilindro
- O tucho transmite o movimento do excêntrico à haste impulsora e esta por sua vez ao balancim
- Comando de válvulas
- Excêntrico ou resalto

## Sistemas de distribuição

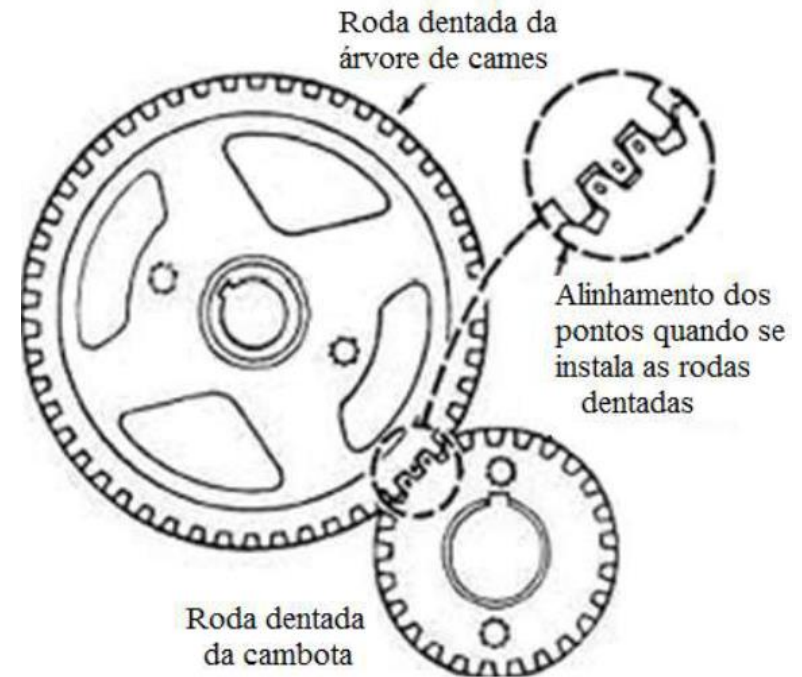
### ➤ Engrenagens de distribuição.

- ✓ Transmitem o movimento do virabrequim à árvore de came (comando de válvulas). Estas engrenagens são construídas usualmente de aço semi-duro, para acionamentos por corrente. São de aço ou materiais plásticos estratificados, para acionamento por meio de engrenagens.
- ✓ Como a árvore de came gira à metade da velocidade do virabrequim, a relação de transmissão das engrenagens de distribuição é de 1:2 (motores a 4 tempos).



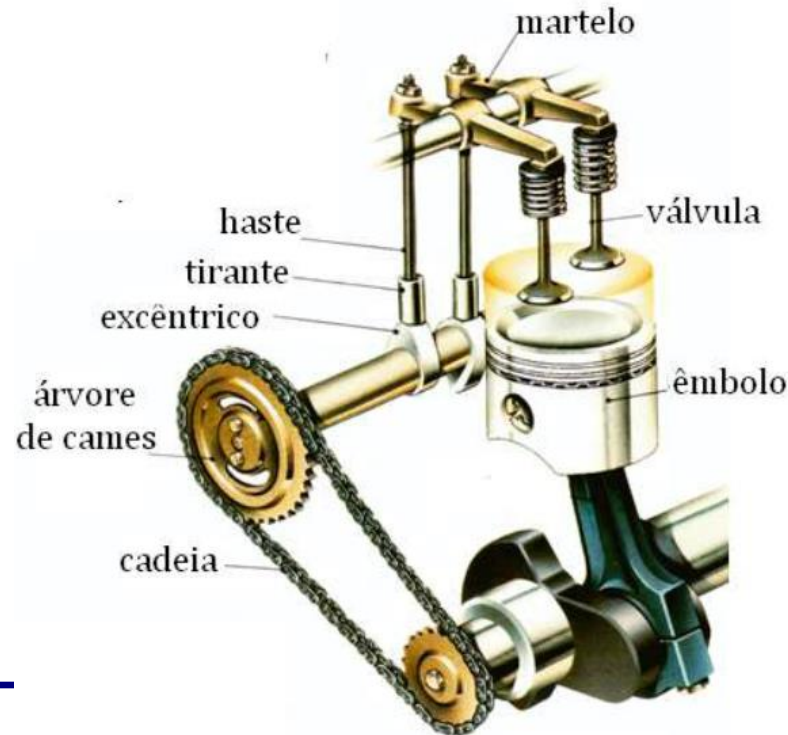
# Sistemas de distribuição

## ➤ Engrenagens de distribuição



# Sistemas de distribuição

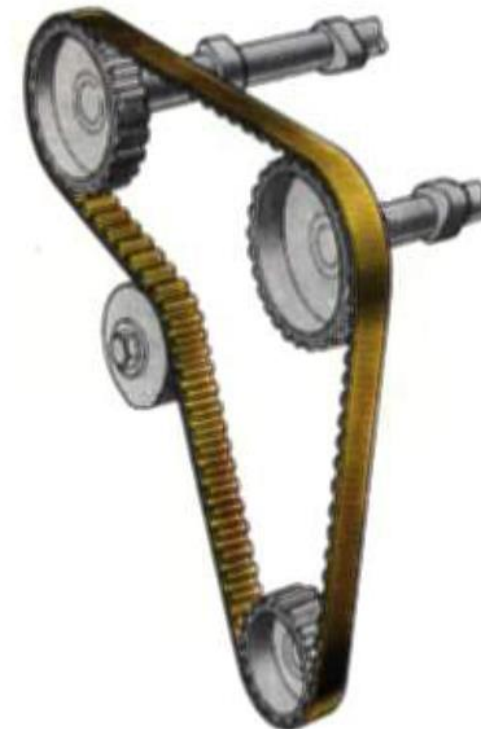
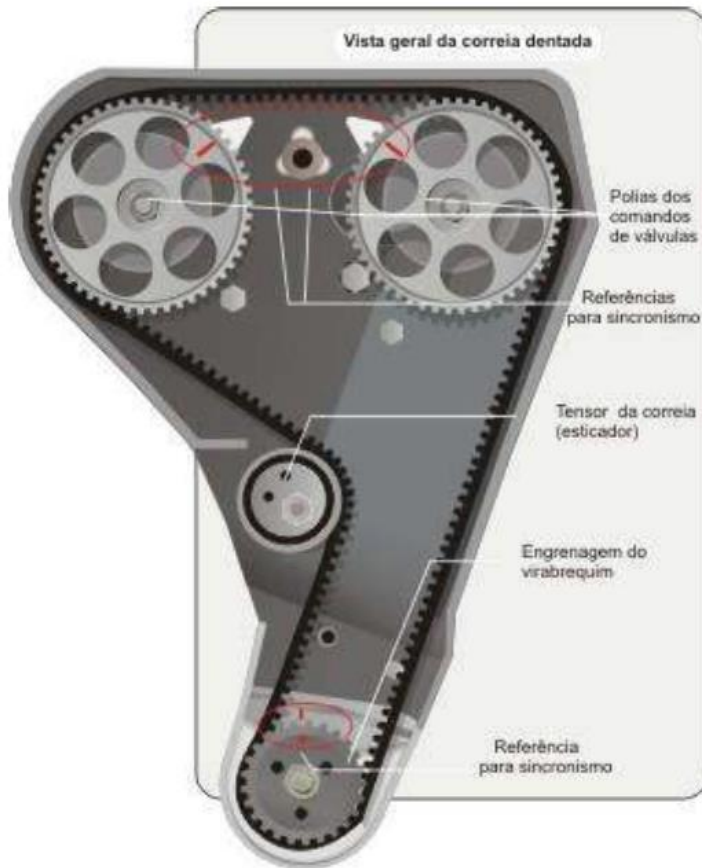
## ➤ Transmissão por corrente.





# Sistemas de distribuição

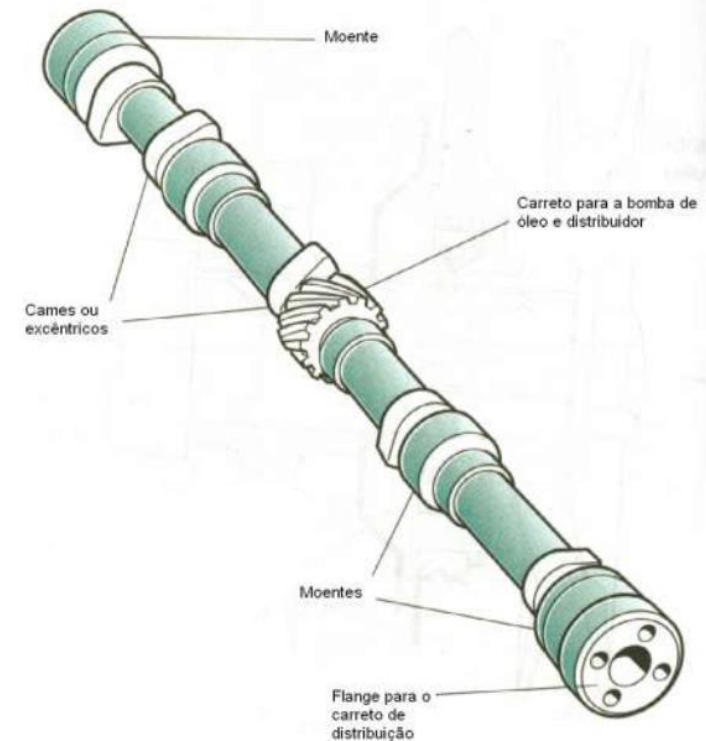
## ➤ Transmissão por correia.



# Sistemas de distribuição

## ➤ Árvore de cames.

- ✓ A árvore de cames ou comando de válvulas - é um eixo que tem solidário a ele ressaltos ou excêntricos (cames), destinados a agir sobre os impulsadores das válvulas em tempos precisos.



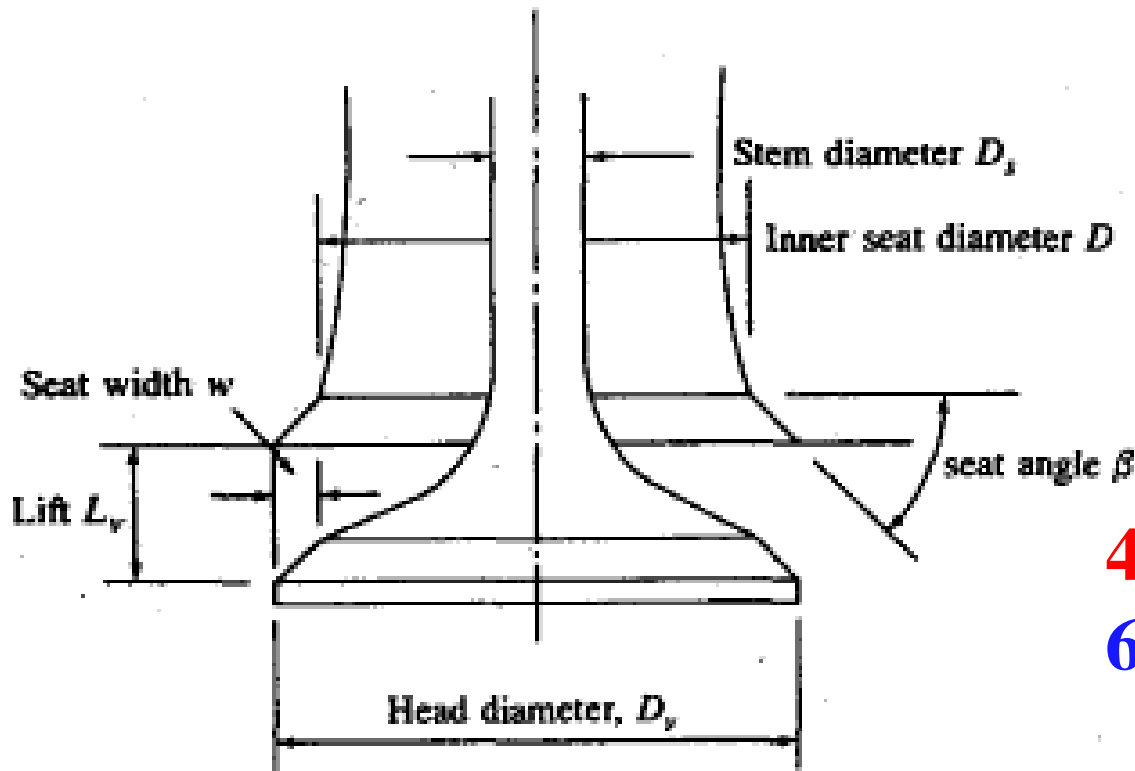
# Sistemas de distribuição

## ➤ Válvula.

- ✓ A válvula de haste é hoje universalmente usada nos motores de quatro tempos. São elas que regulam a entrada e saída de gases no cilindro.
- ✓ As válvulas de admissão são de aço, de aço ao níquel ou cromo-níquel. A passagem da mistura fresca mantém a sua temperatura a cerca de 523 a 573 K (250 a 300 °C).
- ✓ As válvulas de escape são de uma liga de aço, de forte teor de níquel, de cromo e de tungstênio. O cromo torna o aço inoxidável; o tungstênio mantém uma forte resistência mecânica à temperatura elevada; o níquel melhora a resistência.
- ✓ As válvulas de escape suportam a passagem de gases a temperaturas elevadas (973 a 1023 K - 700 a 750 °C). À plena potência elas funcionam geralmente na cor vermelha escura.

# Sistemas de distribuição

## ➤ Válvula.



**45° – escape**  
**60° – admissão**

# Sistemas de distribuição

## ➤ Motores multiválvulas.

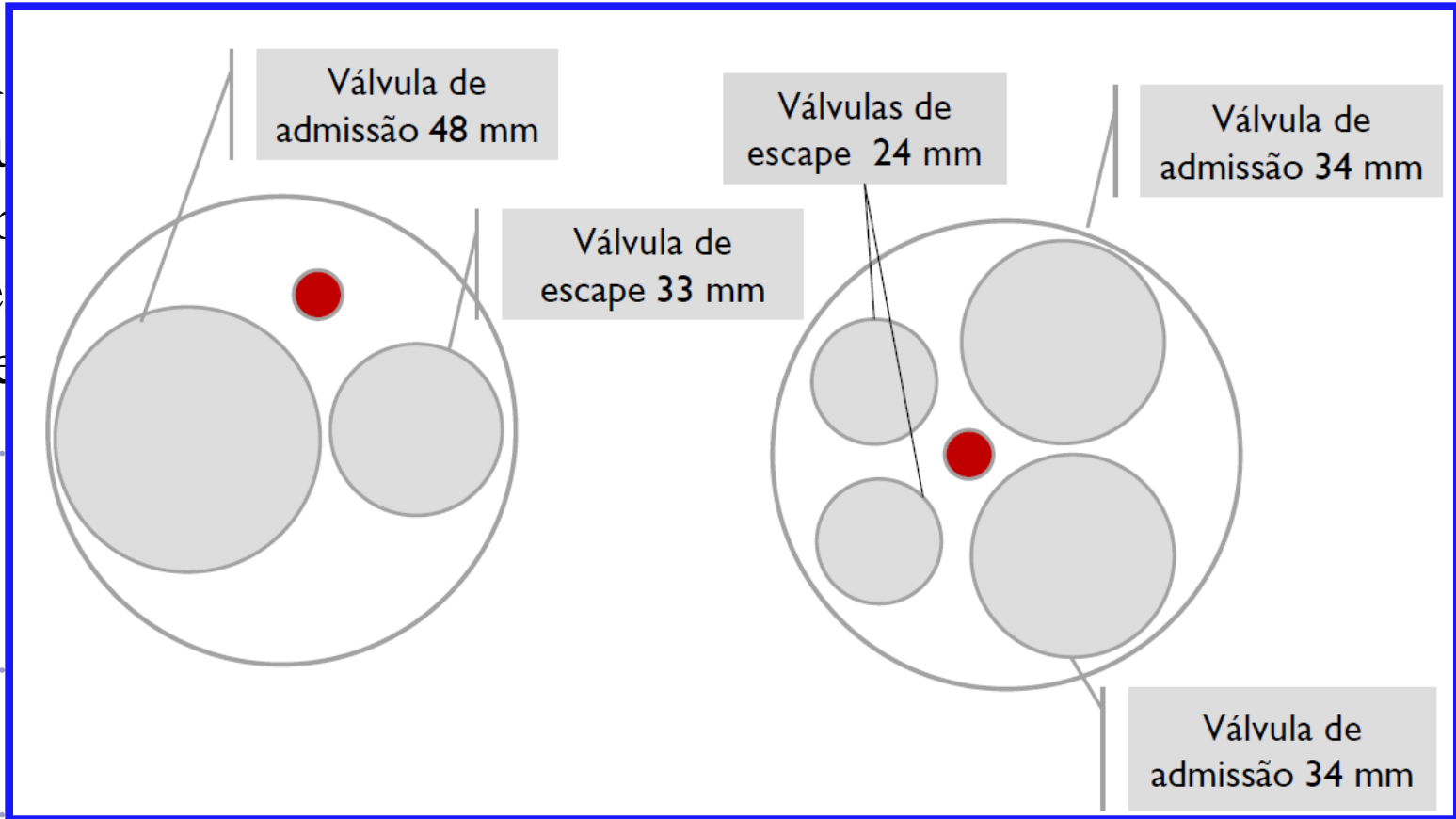
- ✓ A utilização de motores multiválvulas (motores com mais de duas válvulas por cilindro) é uma das soluções adotadas para se obter motores com potências elevadas. Os motores multiválvulas têm entre outras, as seguintes vantagens em relação aos motores de apenas duas válvulas por cilindro:
  1. Aumento da capacidade de enchimento do cilindro (maior rendimento volumétrico), o que se traduz num aumento apreciável da potência;
  2. Bom rendimento e potência a altos regimes de rotação do motor;
  3. Possibilidade de funcionar com maiores relações de compressão.

# Sistemas de distribuição

## ➤ Motores multiválvulas.

✓

A  
du  
ob  
tê  
de  
1.  
2.  
3.



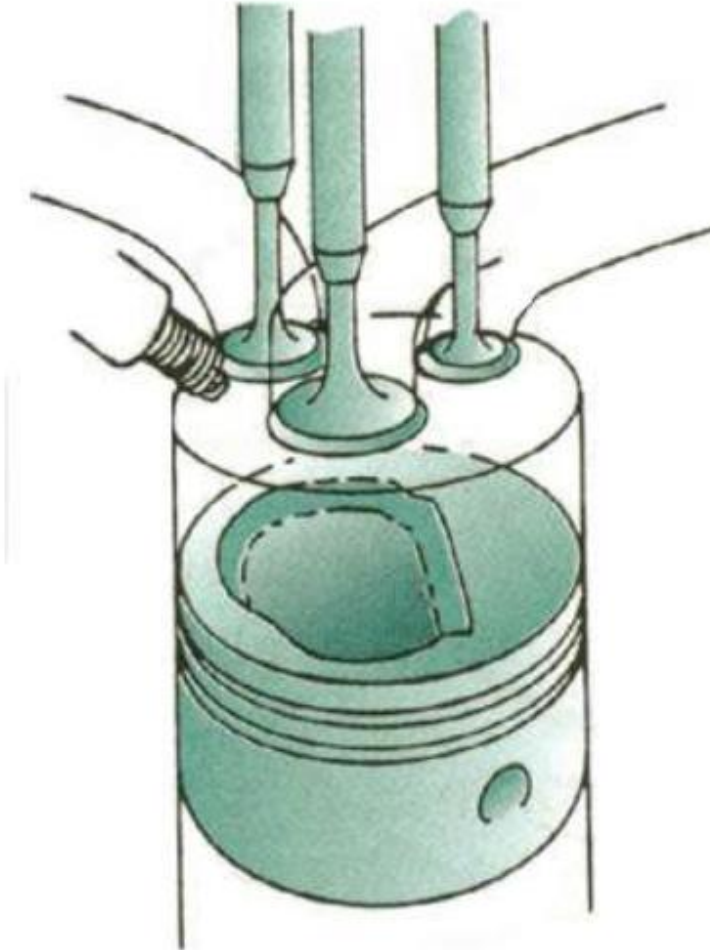
de  
a se  
ulas  
ores  
maior  
ento  
do  
de

compressão.



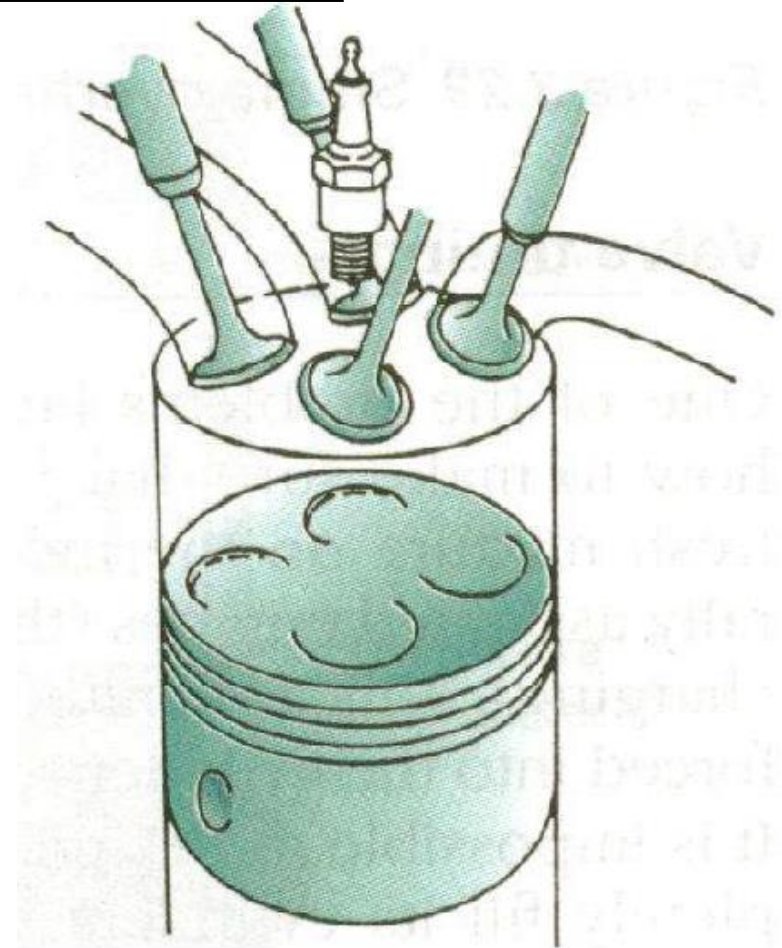
# Sistemas de distribuição

## ➤ Motor de três válvulas por cilindro.



# Sistemas de distribuição

- Motor de quatro válvulas por cilindro.



# Sistemas de distribuição

## ➤ Cameless engine.



FREEVALVE



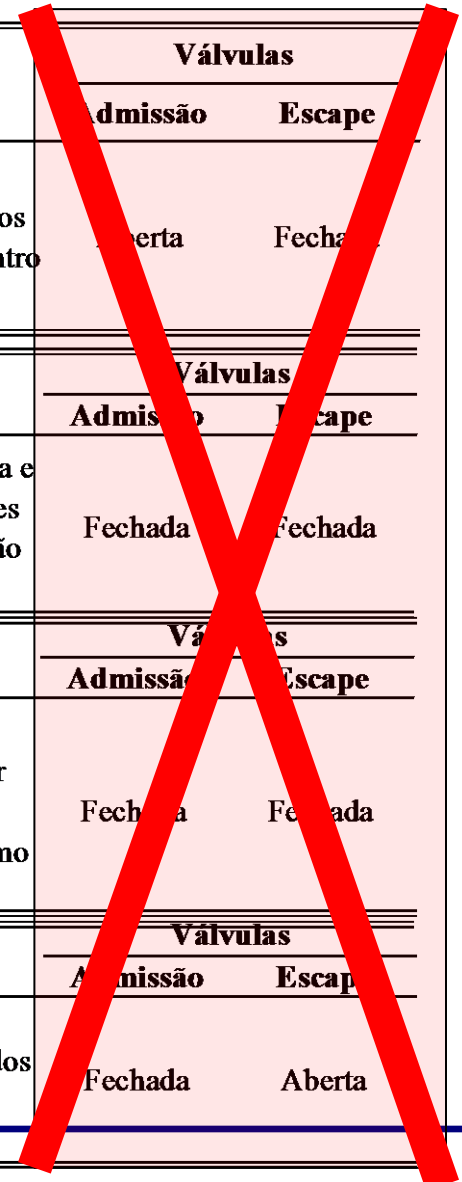
# Diagrama de comando de válvulas

Tempo	Movimento do pistão	Processo no cilindro	Válvulas	
			Admissão	Escape
I	Admissão PMS => PMI	Aspiração da mistura nos motores carburados. Aspiração do ar fresco nos motores com formação de mistura dentro do cilindro	Aberta	Fechada
Tempo	Movimento do pistão	Processo no cilindro	Válvulas	
Admissão	Escape			
II	Compressão PMI => PMS	Compressão isentrópica, a temperatura e a pressão aumentam e um pouco antes do PMS é acionada a faísca ou injeção do combustível (autoignição)	Fechada	Fechada
Tempo	Movimento do pistão	Processo no cilindro	Válvulas	
Admissão	Escape			
III	Expansão PMS => PMI	Expansão ou tempo de trabalho. A energia química do combustível, por meio da oxidação transforma-se em energia mecânica através do mecanismo biela-manivela	Fechada	Fechada
Tempo	Movimento do pistão	Processo no cilindro	Válvulas	
Admissão	Escape			
IV	Escape PMI => PMS	Esvaziamento do cilindro ou escape dos gases queimados	Fechada	Aberta



# Diagrama de comando de válvulas

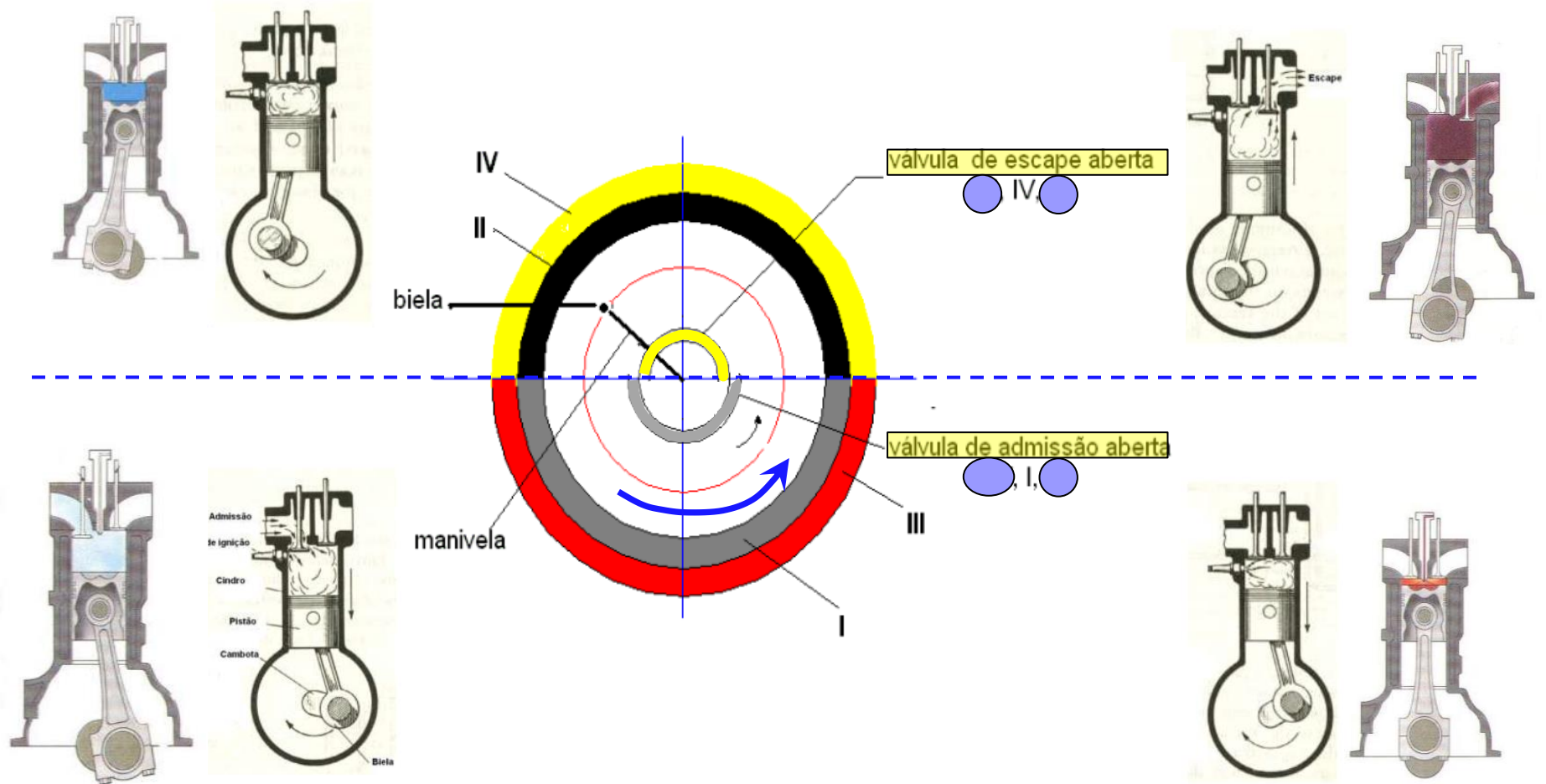
Tempo	Movimento do pistão	Processo no cilindro	Válvulas	
			Admissão	Escape
I	Admissão PMS => PMI	Aspiração da mistura nos motores carburados. Aspiração do ar fresco nos motores com formação de mistura dentro do cilindro	Aberta	Fechada
II	Compressão PMI => PMS	Compressão isentrópica, a temperatura e a pressão aumentam e um pouco antes do PMS é acionada a faísca ou injeção do combustível (autoignição)	Fechada	Fechada
III	Expansão PMS => PMI	Expansão ou tempo de trabalho. A energia química do combustível, por meio da oxidação transforma-se em energia mecânica através do mecanismo biela-manivela	Fechada	Fechada
IV	Escape PMI => PMS	Esvaziamento do cilindro ou escape dos gases queimados	Fechada	Aberta





# Diagrama de comando de válvulas

## 1. Motor a quatro tempos... Diagrama circular de regulação

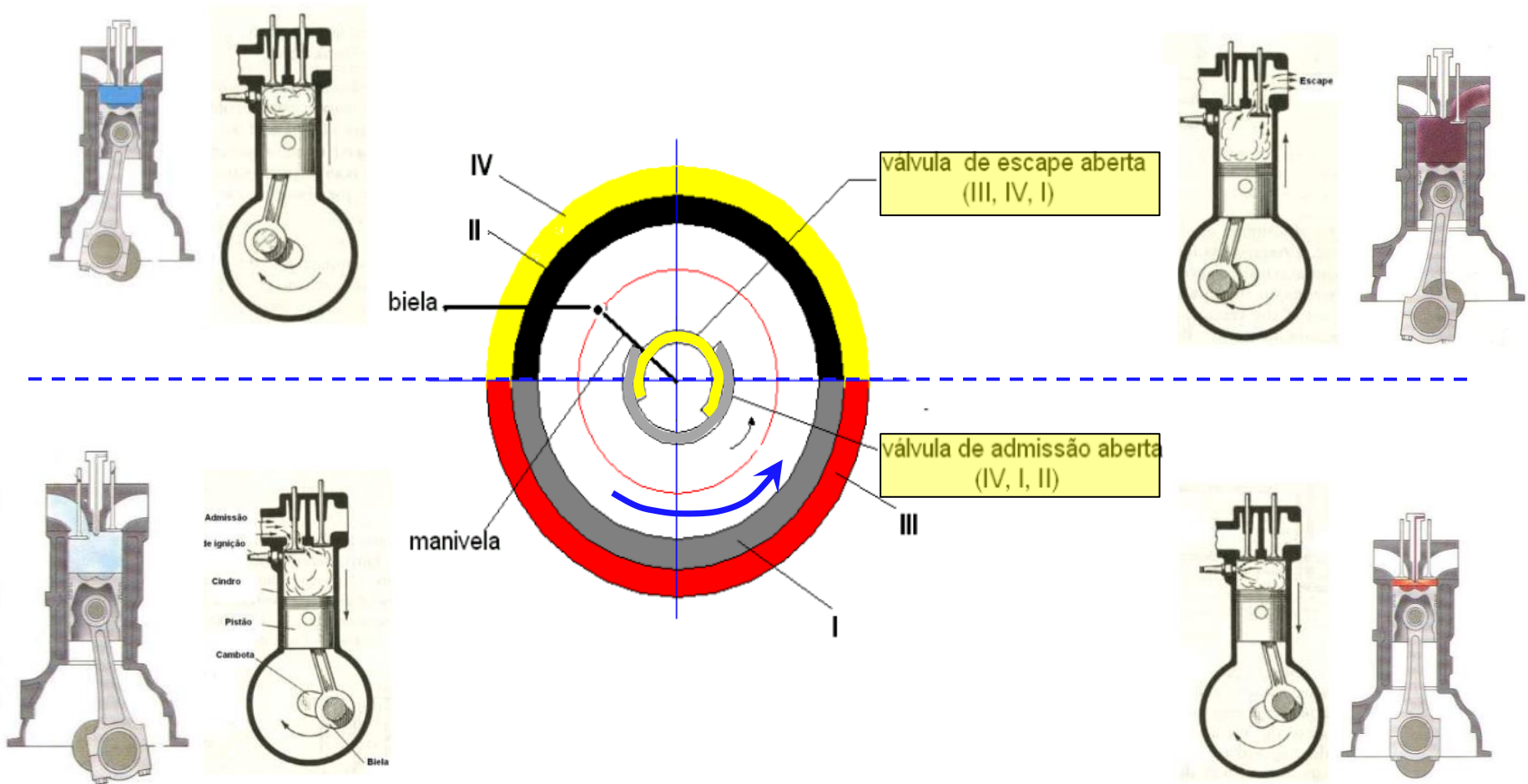






# Diagrama de comando de válvulas

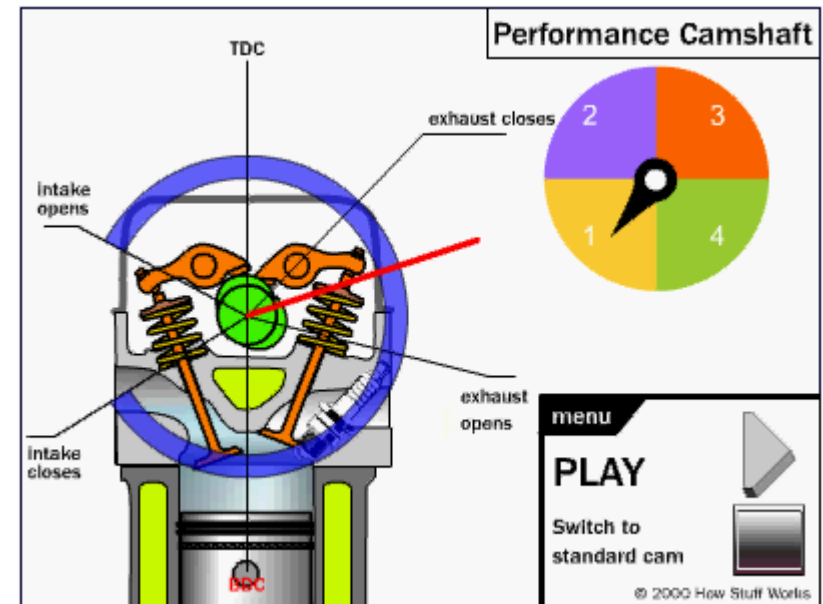
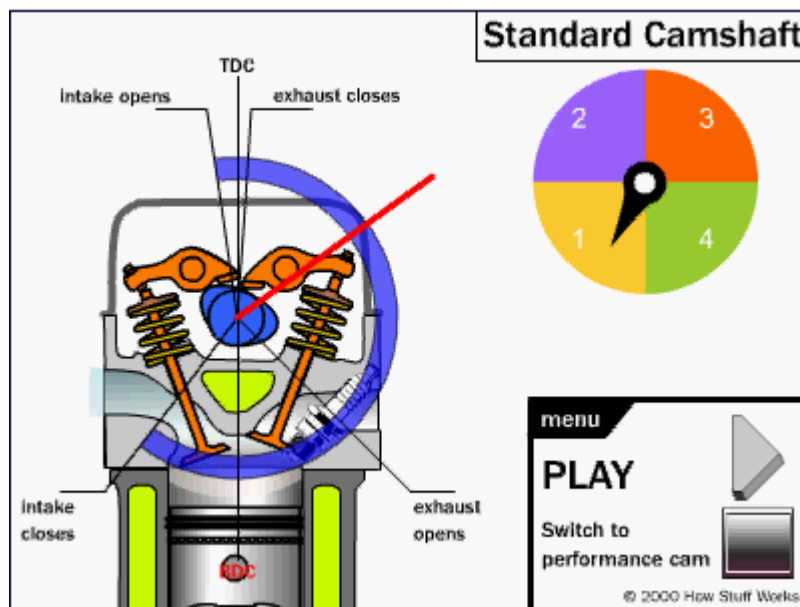
## 1. Motor a quatro tempos... Diagrama circular de regulação





# Diagrama de comando de válvulas

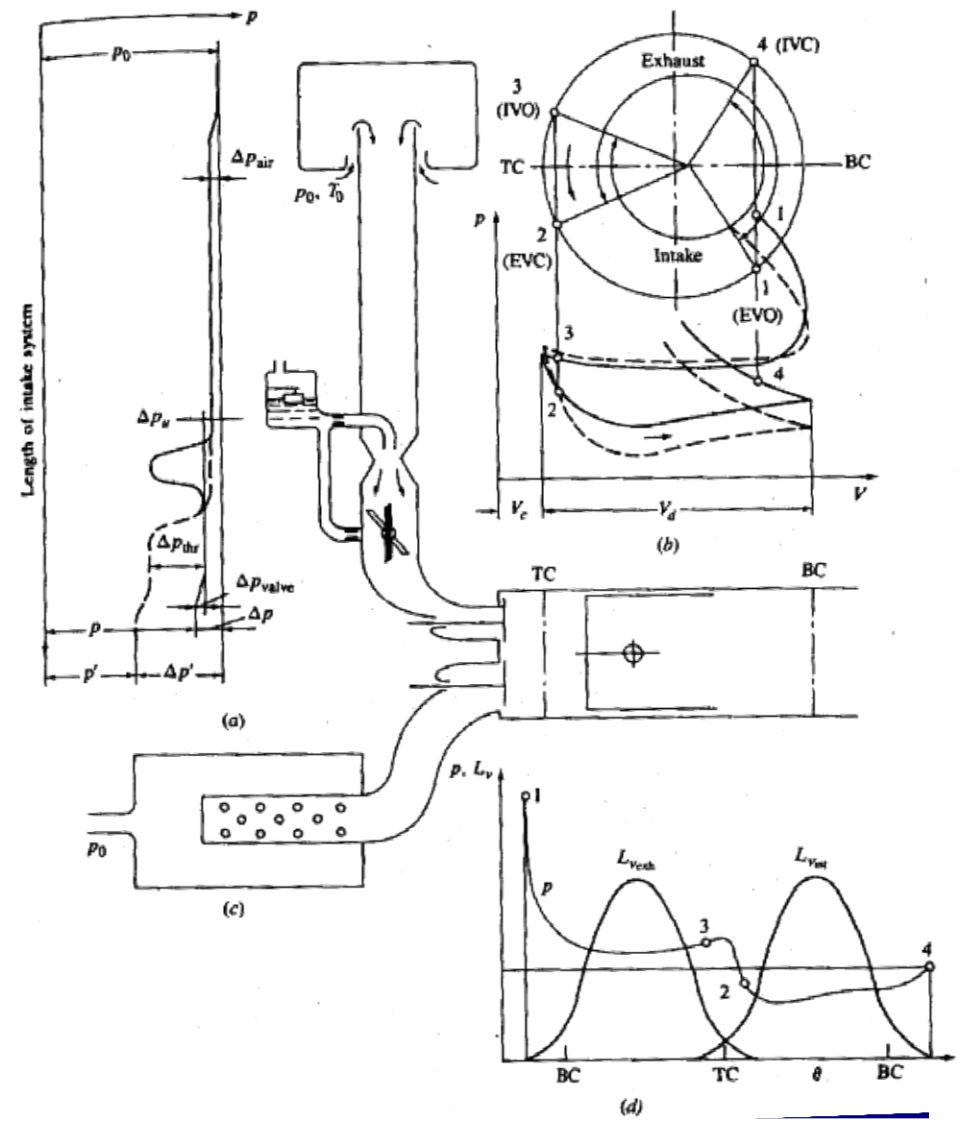
1. Motor a quatro tempos... Diagrama circular de regulação





# Diagrama de comando de válvulas

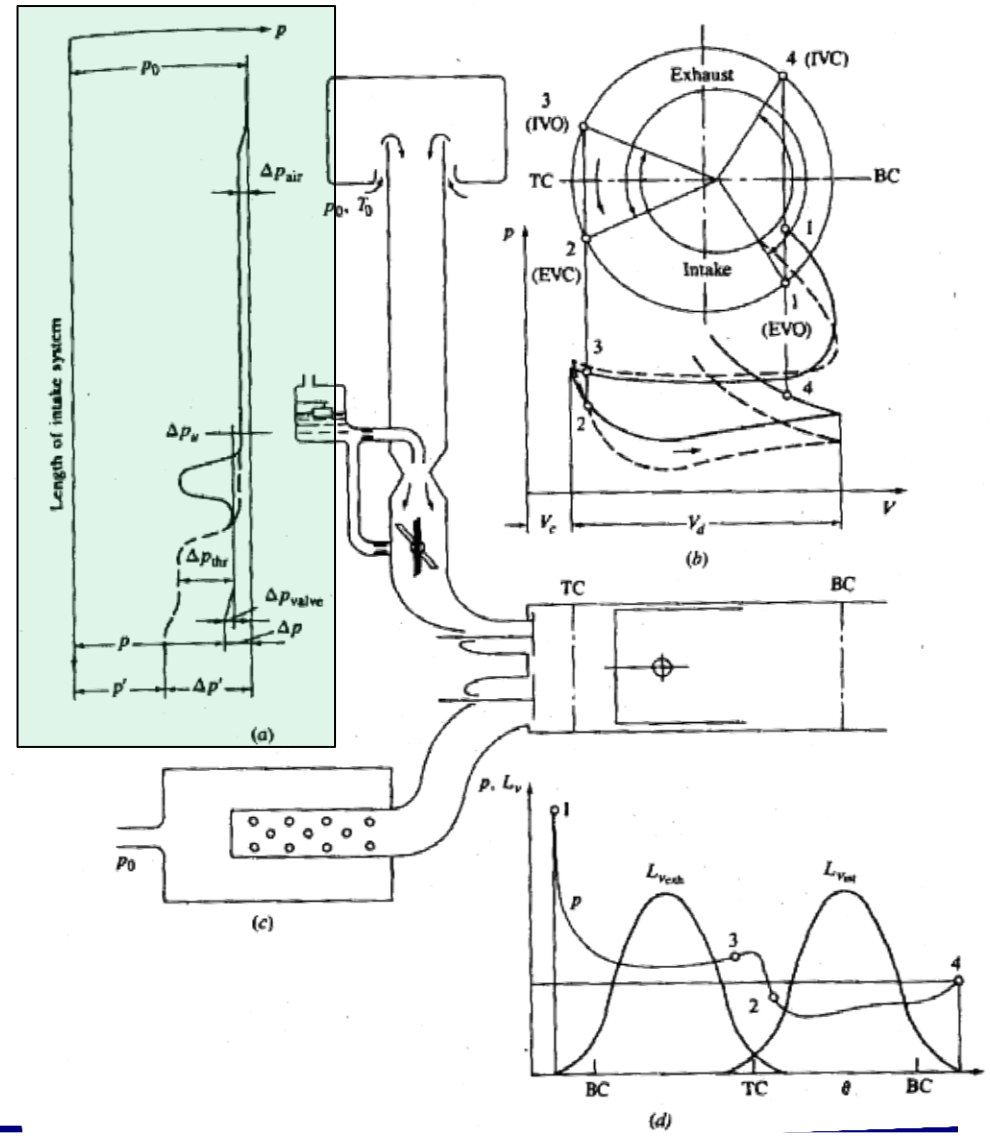
- Motor a quatro tempos...
- ✓ Diagrama circular de regulação
- a) Pressão média ao longo dos componentes na admissão
- b) Diagrama de válvula e diagrama  $p-V$
- c) Sistema de exaustão
- d) Pressão no cilindro e comprimento de abertura de válvula





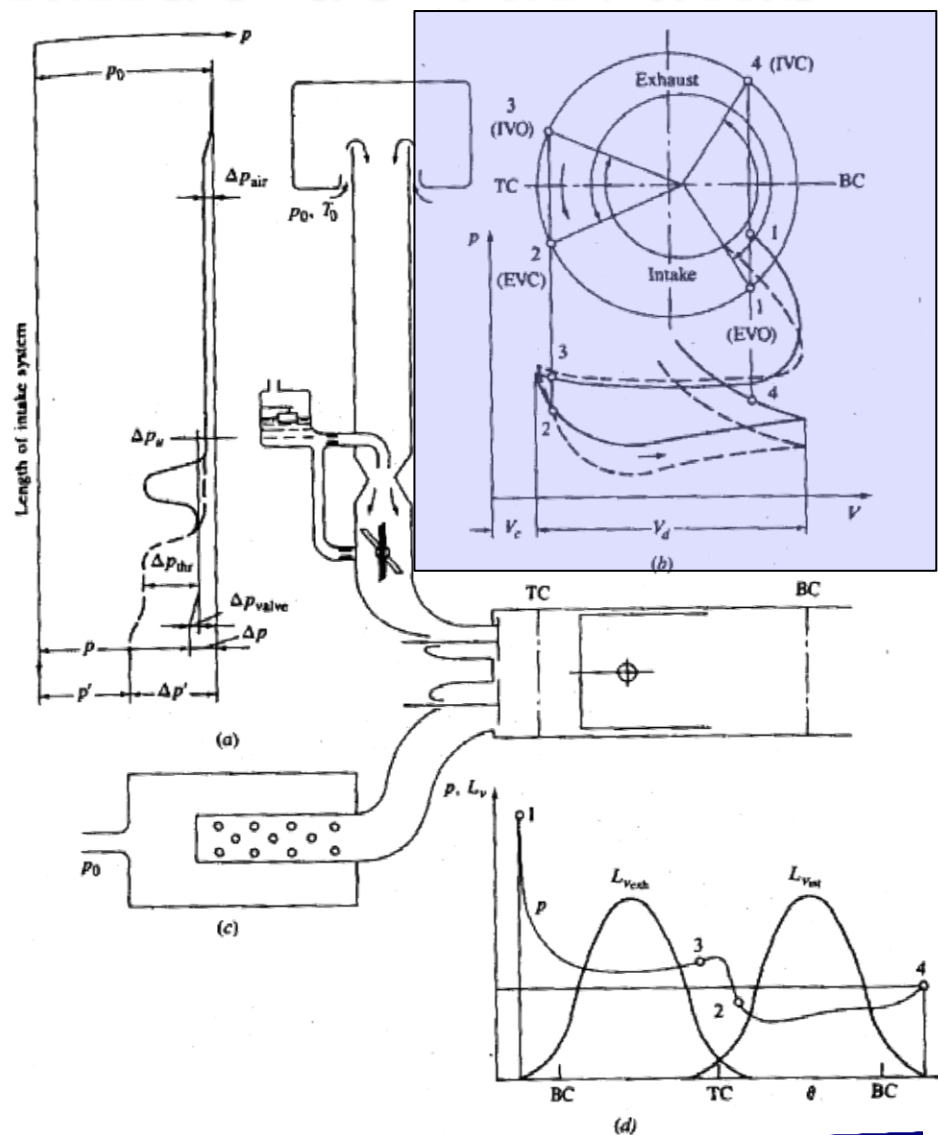
# Diagrama de comando de válvulas

- Motor a quatro tempos...
- ✓ Diagrama circular de regulação
- a) Pressão média ao longo dos componentes na admissão
- b) Diagrama de válvula e diagrama  $p-V$
- c) Sistema de exaustão
- d) Pressão no cilindro e comprimento de abertura de válvula



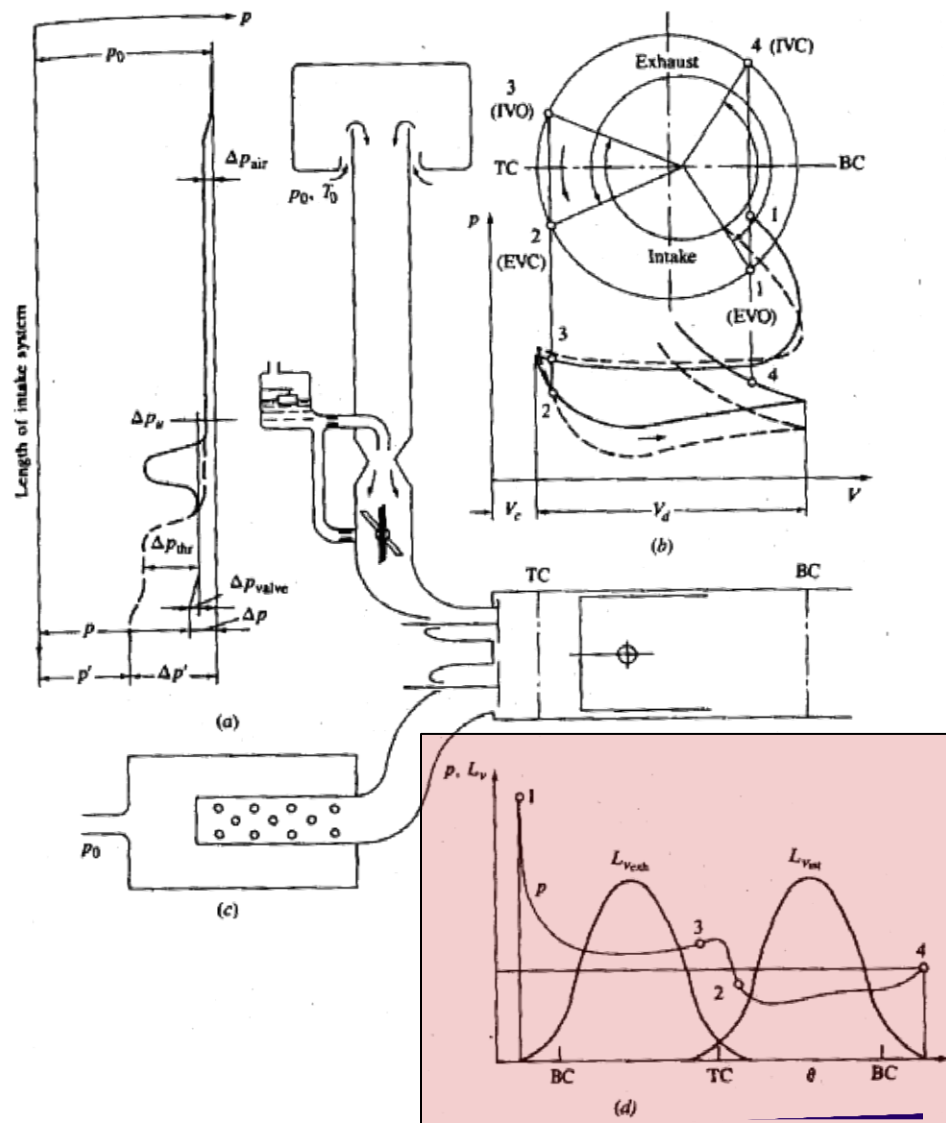
# Diagrama de comando de válvulas

- Motor a quatro tempos...
- ✓ Diagrama circular de regulação
- a) Pressão média ao longo dos componentes na admissão
- b) Diagrama de válvula e diagrama  $p-V$
- c) Sistema de exaustão
- d) Pressão no cilindro e comprimento de abertura de válvula



# Diagrama de comando de válvulas

- Motor a quatro tempos...
- ✓ Diagrama circular de regulação
- a) Pressão média ao longo dos componentes na admissão
- b) Diagrama de válvula e diagrama  $p-V$
- c) Sistema de exaustão
- d) **Pressão no cilindro e comprimento de abertura de válvula (elevação da válvula)**

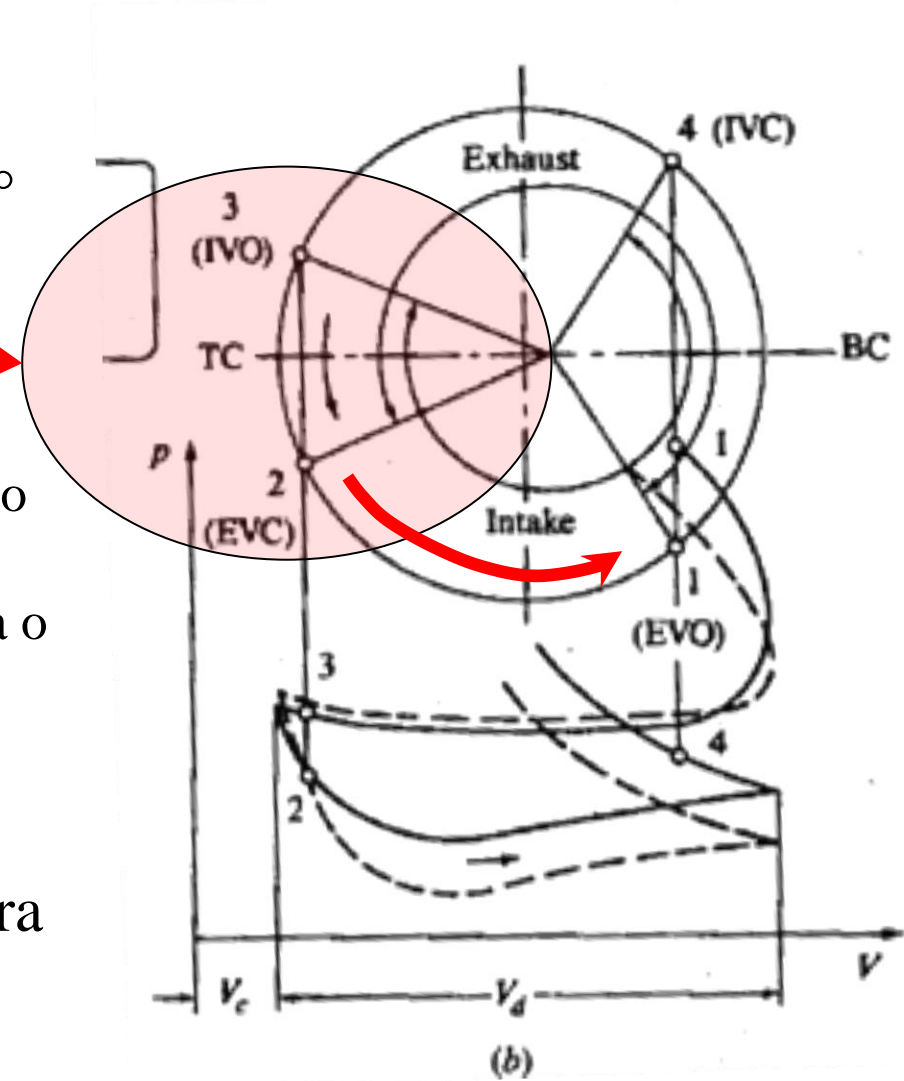






# Diagrama de comando de válvulas

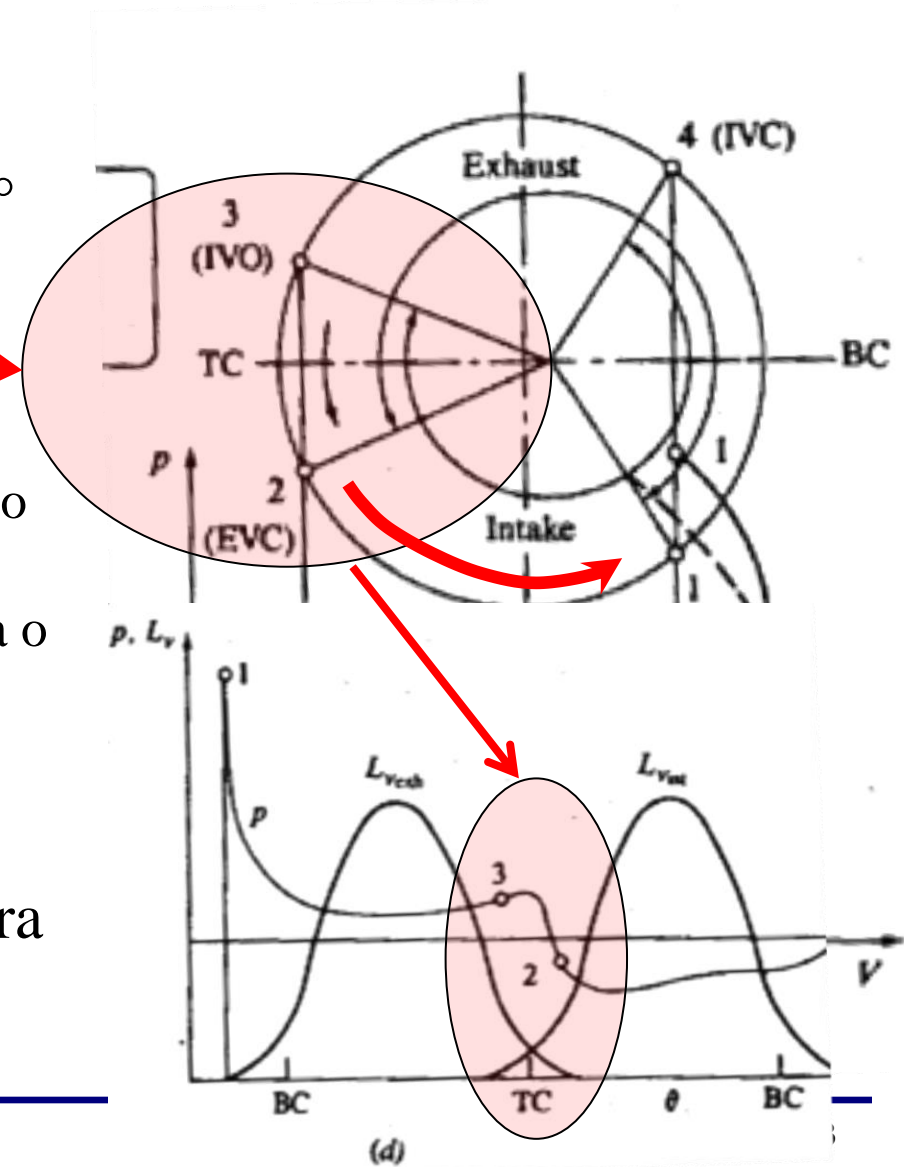
- A válvula de exaustão fecha ~ 15° – 30° depois do PMS.
- A válvula de admissão abre 10° – 20° antes do PMS
- **Cruzamento de válvulas** →
- $p_i / p_e < 1$ 
  - ❑ Retorno de gases de exaustão para o cilindro,
  - ❑ Passagem de gases do cilindro para o coletor de admissão
- A vantagem do cruzamento de válvulas é mais evidente em motores de alta rotação, melhora a eficiência volumétrica





# Diagrama de comando de válvulas

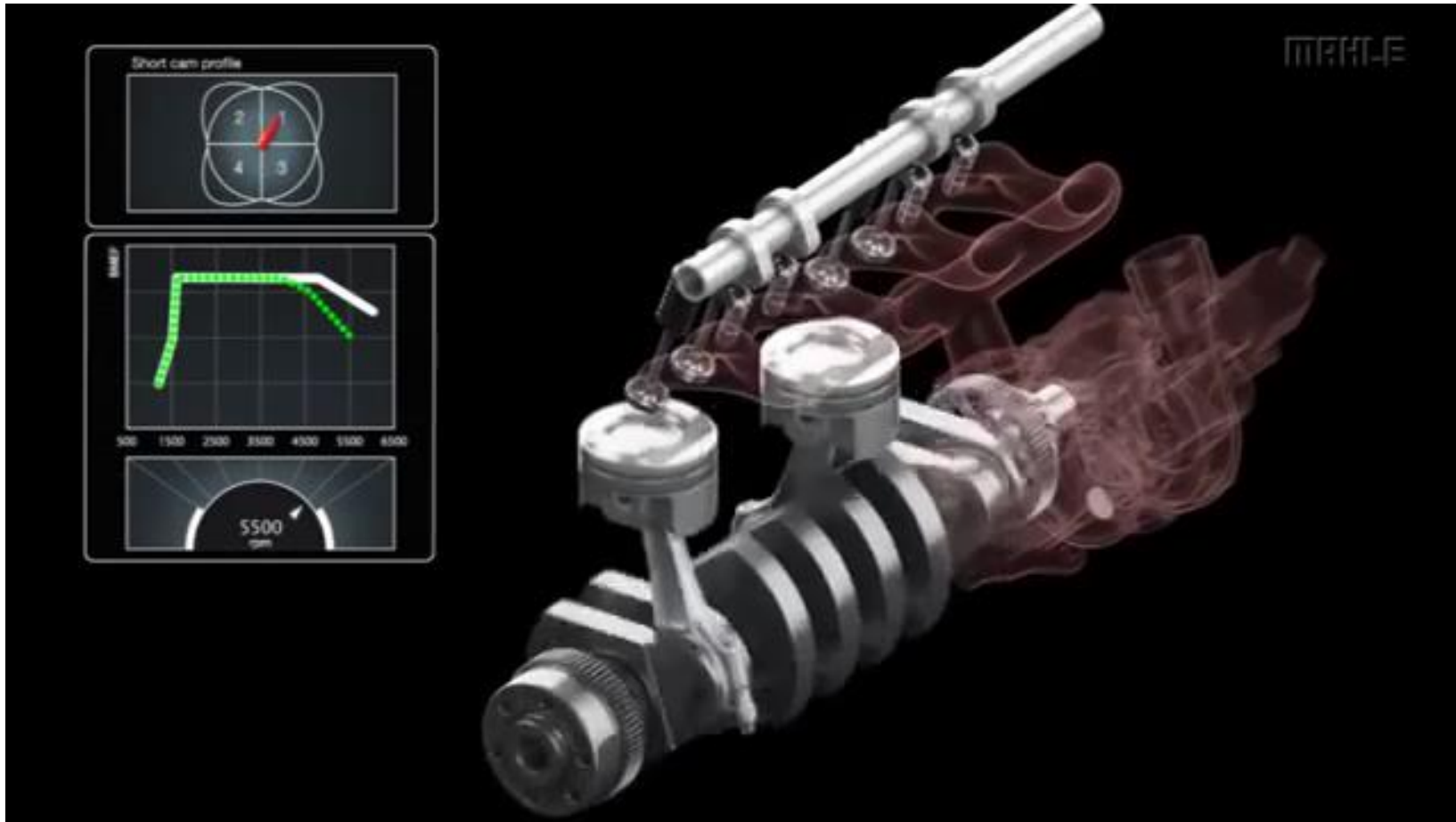
- A válvula de exaustão fecha ~ 15° – 30° depois do PMS.
- A válvula de admissão abre 10° – 20° antes do PMS
- **Cruzamento de válvulas**
- $p_i / p_e < 1$ 
  - ❑ Retorno de gases de exaustão para o cilindro,
  - ❑ Passagem de gases do cilindro para o coletor de admissão
- A vantagem do cruzamento de válvulas é mais evidente em motores de alta rotação, melhora a eficiência volumétrica





# Diagrama de comando de válvulas

1. Motor a quatro tempos. Temp. de cruzamento de válvulas curto



# Diagrama de comando de válvulas

1. Motor a quatro tempos. Temp. de cruzamento de válvulas longo

