



CAPÍTULO 9 – SISTEMAS DE POTÊNCIA A GÁS

DISCIPLINA: TERMODINÂMICA II

PROF. DR. SANTIAGO DEL RIO OLIVEIRA

- O fluido de trabalho é sempre um gás, ao contrário dos sistemas de potência a vapor, onde o fluido de trabalho é alternadamente vaporizado e condensado.

- Podem ser divididos em:

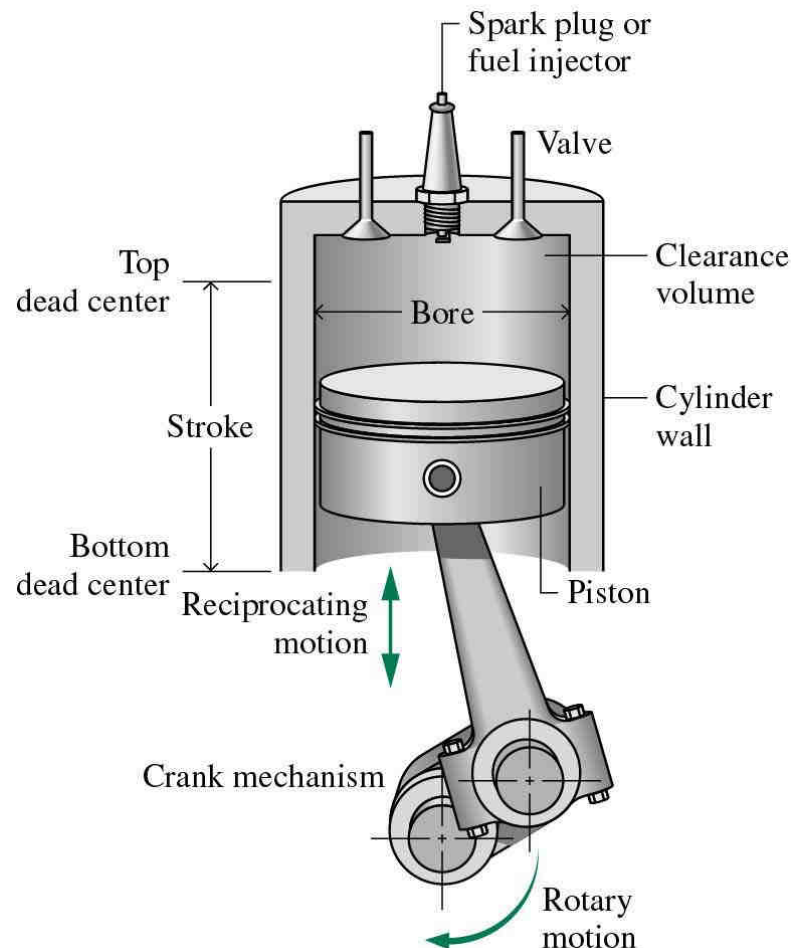
1) Motores de combustão interna {
ignição por centelha
ignição por compressão

2) Turbinas a gás

MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

- Utilizado em automóveis, caminhões e ônibus. Os processos ocorrem dentro de **arranjos cilindro pistão** com movimento alternativo.
- Num motor com ignição por **centelha** uma **mistura de combustível e ar** é incendiada por uma vela. São amplamente utilizados em sistemas que requerem até 225 kW (300 HP), que são aplicações leves e de baixo custo, como por exemplo, em automóveis de passeio.
- Num motor com ignição por **compressão** o **ar** é comprimido até pressão e temperatura elevadas o suficiente para que a combustão ocorra espontaneamente quando o combustível for injetado.
- São amplamente utilizados em aplicações onde se buscam economia e potência elevadas, como por exemplo, ônibus, caminhões, locomotivas e navios.

3.1 TERMINOLOGIA DE MOTORES



Calibre (bore): diâmetro do pistão.

Curso (stroke): distância que o pistão se move em uma direção.

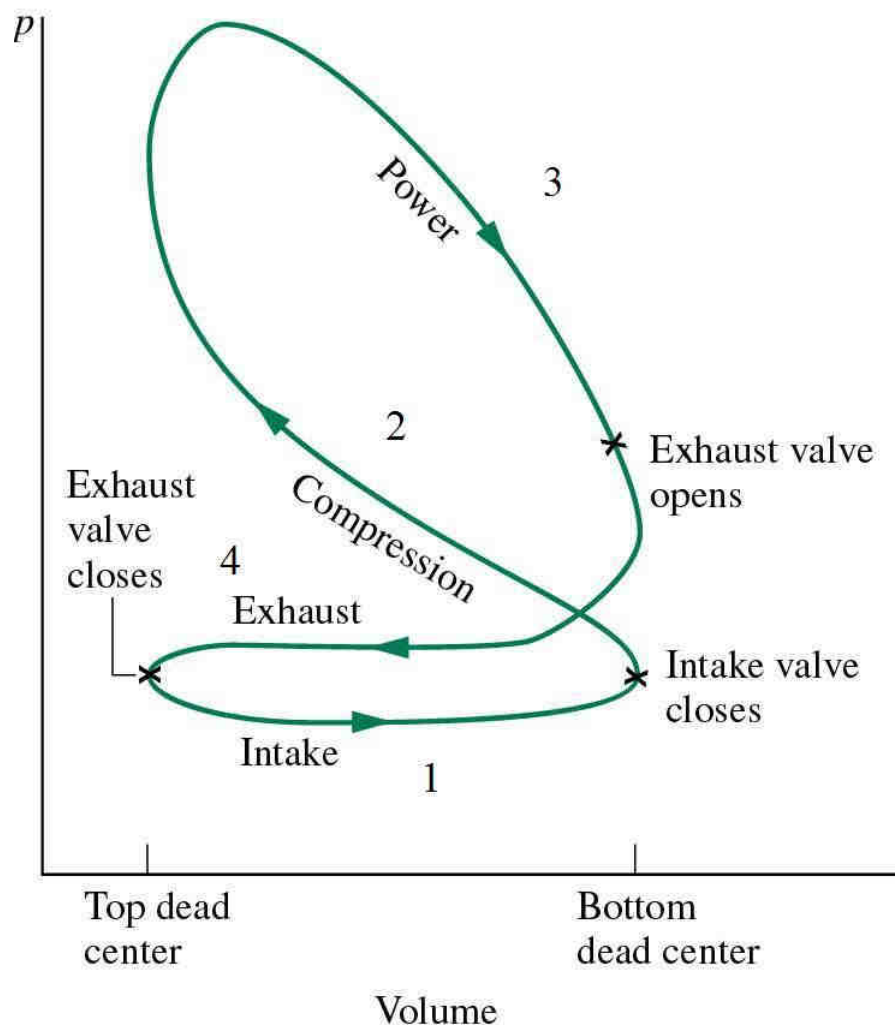
Ponto morto superior (PMS): posição onde o volume de cilindro é mínimo (volume morto).

Ponto morto inferior (PMI): posição onde o volume de cilindro é máximo.

Volume de deslocamento: volume percorrido pelo pistão quando ele se desloca do PMS ao PMI.

Taxa de compressão (r): volume no PMI devido pelo volume no PMS.

$$r = \frac{\text{Volume no PMI}}{\text{Volume no PMS}}$$



1 (Admissão) – Com a válvula de admissão (intake valve) aberta, o pistão executa um curso de admissão quando aspira uma carga fresca para dentro do cilindro. Num motor com ignição por centelha a carga é uma mistura de ar e combustível. Num motor com ignição por compressão a carga é somente ar.

2 (Compressão) – Com ambas as válvulas fechadas, o pistão passa por um curso de compressão, elevando a temperatura e pressão da carga. Esta fase exige o fornecimento de trabalho do pistão para o conteúdo do cilindro. Um processo de combustão é iniciado (ambas as válvulas fechadas), resultando em uma mistura gasosa de alta pressão e alta temperatura. Num motor com ignição por centelha a combustão é induzida por uma vela. Num motor com ignição por compressão a combustão é iniciada pela injeção de combustível no ar quente comprimido.

3 (Potência) – A mistura gasosa se expande e trabalho é realizado sobre o pistão à medida que este retorna ao PMI.

4 (Exaustão) – Os gases queimados são expulsos do cilindro através da válvula de escape (exhaust valve) aberta.

- Embora os motores de combustão interna percorram *ciclos mecânicos*, o conteúdo do cilindro não executa um *ciclo termodinâmico*, uma vez que matéria é introduzida com uma composição e posteriormente descarregada com uma composição diferente.
- **Pressão média efetiva (pme)**: pressão teórica constante que, se atuasse no pistão durante o curso de potência, produziria o mesmo trabalho líquido que o realmente produzido em um ciclo.

$$p_{me} = \frac{\text{trabalho líquido para um ciclo}}{\text{volume de deslocamento}}$$

- **Análise de ar-padrão**: modelo simplificado para análise de motores de combustão interna.
- Numa análise real, deveriam ser levados em consideração: o processo de combustão dentro do cilindro; efeitos de irreversibilidades associadas com atrito, diferença de temperatura e diferença de pressão; transferência de calor

entre os gases no cilindro e as paredes do cilindro; trabalho necessário para carregar e descarregar o cilindro.

- Devido a essa complexidade, uma análise realista de um motor de combustão interna é feita através de uma simulação computacional.
- Dessa maneira, as seguintes hipóteses são feitas para uma análise termodinâmica elementar:

1) Uma quantidade fixa de ar modelado como gás ideal é o fluido de trabalho.

2) O processo de combustão é substituído por uma transferência de calor de uma fonte externa.

3) Não existem processos de admissão e descarga como num motor real.

4) Todos os processos são internamente reversíveis.

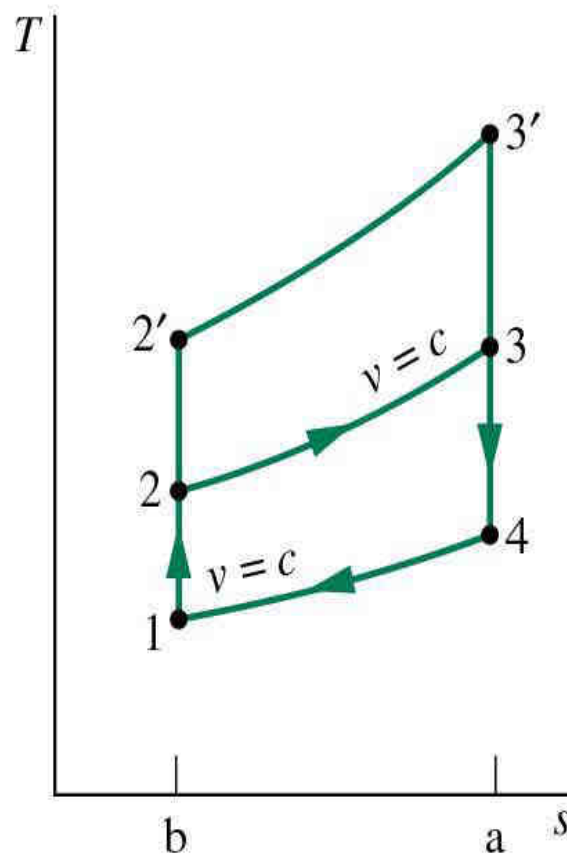
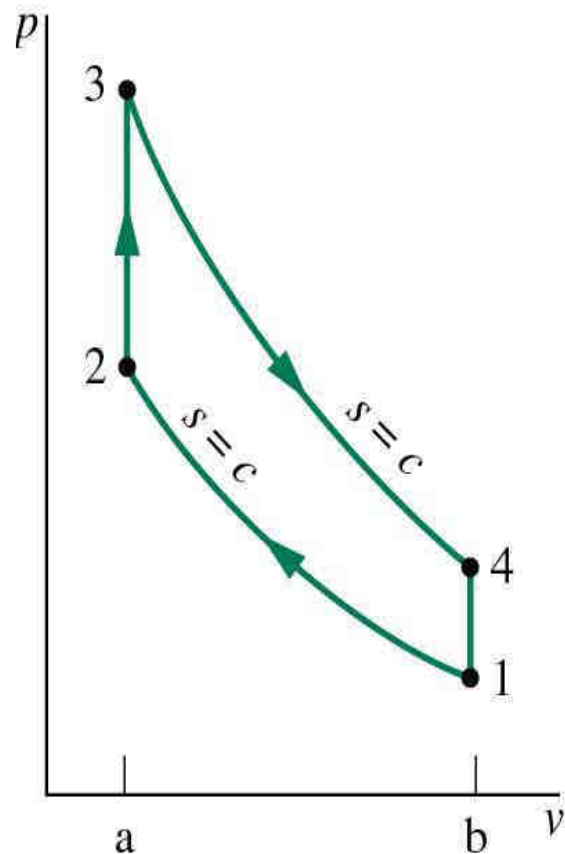
5) Os calores específicos do ar são considerados constantes e avaliados na temperatura ambiente (análise de ar-padrão frio).

- Dessa forma, evita-se lidar com a complexidade do processo de combustão e com a mudança de composição durante a combustão.
- Essa análise simplificada é conhecida como **análise de ar-padrão**.

3.2 CICLO DE AR-PADRÃO OTTO (Nikolaus Otto)

- **Ciclo ideal** que idealiza o funcionamento de **motores de combustão interna de ignição por centelha**.
- O **processo de combustão** é substituído por uma **adição de calor instantânea** quando o pistão está no PMS (**a volume constante**).
- O ciclo Otto é composto por **4 processos internamente reversíveis em série**.
- Nos processos **1-2** e **3-4** **trabalho está envolvido** enquanto nos processos **2-3** e **4-1** **calor está envolvido**.
- Os 4 processos são modelados por um **balanço de energia para sistema fechado** considerando que variações de energia cinética e potencial são desprezíveis:

$$Q - W = \Delta U \Rightarrow Q - W = m(u_f - u_i) \Rightarrow Q/m - W/m = u_f - u_i$$



Processo 1-2: compressão isoentrópica do ar conforme o pistão se move do PMI para o PMS.

Processo 2-3: transferência de calor a volume constante para o ar a partir de uma fonte externa enquanto o pistão está no PMS.

Processo 3-4: expansão isoentrópica do ar conforme o pistão se move do PMS para o PMI.

Processo 4-1: transferência de calor a volume constante do ar enquanto pistão está no PMI.

- Como os 4 processos são internamente reversíveis tem-se:

Área 1-2-a-b-1 ($p-v$): **trabalho fornecido** por unidade de massa durante o processo de compressão.

Área 3-4-b-a-3 ($p-v$): **trabalho executado** por unidade de massa durante o processo de expansão.

(Área 3-4-b-a-3) – (Área 1-2-a-b-1) = Área 1-2-3-4 (*trabalho líquido obtido no diagrama $p-v$*).

Área 2-3-a-b-2 ($T-s$): **calor fornecido** por unidade de massa.

Área 1-4-a-b-1 ($T-s$): **calor rejeitado** por unidade de massa.

(Área 2-3-a-b-2) – (Área 1-4-a-b-1) = Área 1-2-3-4 (*calor líquido absorvido no diagrama $T-s$*).

- Transferências de energia nos processos do ciclo Otto por unidade de massa:

Processo 1-2

$$\frac{W_{12}}{m} = u_2 - u_1$$

Processo 2-3

$$\frac{Q_{23}}{m} = u_3 - u_2$$

Processo 3-4

$$\frac{W_{34}}{m} = u_3 - u_4$$

Processo 4-1

$$\frac{Q_{41}}{m} = u_4 - u_1$$

- Trabalho líquido obtido: $\frac{W_{ciclo}}{m} = \frac{W_{34}}{m} - \frac{W_{12}}{m} = (u_3 - u_4) - (u_2 - u_1)$

- Calor líquido absorvido: $\frac{Q_{ciclo}}{m} = \frac{Q_{23}}{m} - \frac{Q_{41}}{m} = (u_3 - u_2) - (u_4 - u_1)$

- Eficiência térmica: $\eta = \frac{W_{ciclo}/m}{Q_{23}/m} = \frac{(u_3 - u_4) - (u_2 - u_1)}{u_3 - u_2} \Rightarrow \eta = 1 - \left(\frac{u_4 - u_1}{u_3 - u_2} \right)$

- Nas expressões do balanço de energia, todas as quantias são positivas.

- Análise de **ar-padrão**: u_1, u_2, u_3 e u_4 obtidos da **Tabela A.22**.
- **Taxa de compressão**: $r = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3}$; ($V_2 = V_3$ e $V_1 = V_4$)
- Para **processos isoentrópicos** 1-2 e 3-4 com c_p e c_v variáveis (somente ar):

$$\frac{v_{r2}}{v_{r1}} = \frac{V_2}{V_1} \Rightarrow \frac{v_{r2}}{v_{r1}} = \frac{1}{r} \quad \text{ou} \quad \frac{v_{r1}}{v_{r2}} = r$$

$$\frac{v_{r4}}{v_{r3}} = \frac{V_4}{V_3} \Rightarrow \frac{v_{r4}}{v_{r3}} = r \quad \text{ou} \quad \frac{v_{r3}}{v_{r4}} = \frac{1}{r}$$

- v_r é volume relativo e $v_r = v_r(T)$ obtido da **Tabela A.22**.
- Para **análise de ar-padrão frio** (c_p e c_v constantes) para os processos 1-2 e 3-4:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = r^{k-1} \quad \text{ou} \quad \frac{T_1}{T_2} = \frac{1}{r^{k-1}}$$

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{V_3}{V_4} \right)^{k-1} \Rightarrow \frac{T_4}{T_3} = \frac{1}{r^{k-1}} \quad \text{ou} \quad \frac{T_3}{T_4} = r^{k-1}$$

- $k = c_p / c_v$ é a razão de calores específicos.
- Eficiência térmica em função da taxa de compressão (análise ar-padrão frio):

$$\eta = 1 - \underbrace{\left(\frac{u_4 - u_1}{u_3 - u_2} \right)}_{\text{Ar padrão}} = 1 - \underbrace{\frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_v(T_3 - T_2)}}_{\text{Ar padrão frio}} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \left(\frac{T_4/T_1 - 1}{T_3/T_2 - 1} \right)$$

- Mas $\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3/r^{k-1}}{T_2/r^{k-1}} = \frac{T_3}{T_2}$ de tal forma que $\left(\frac{T_4/T_1 - 1}{T_3/T_2 - 1}\right) = 1$ e $\frac{T_1}{T_2} = \frac{1}{r^{k-1}}$. Assim:

$$\eta = 1 - \left(\frac{u_4 - u_1}{u_3 - u_2} \right) = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_v(T_3 - T_2)} \Rightarrow \eta = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$$

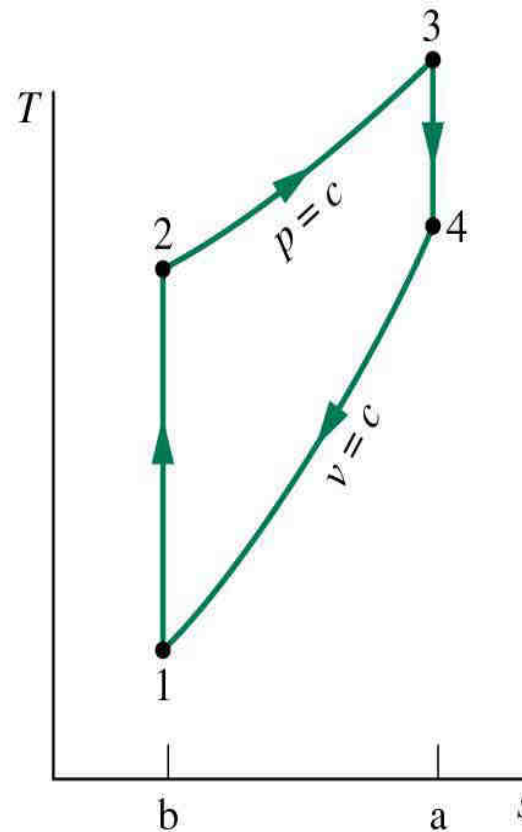
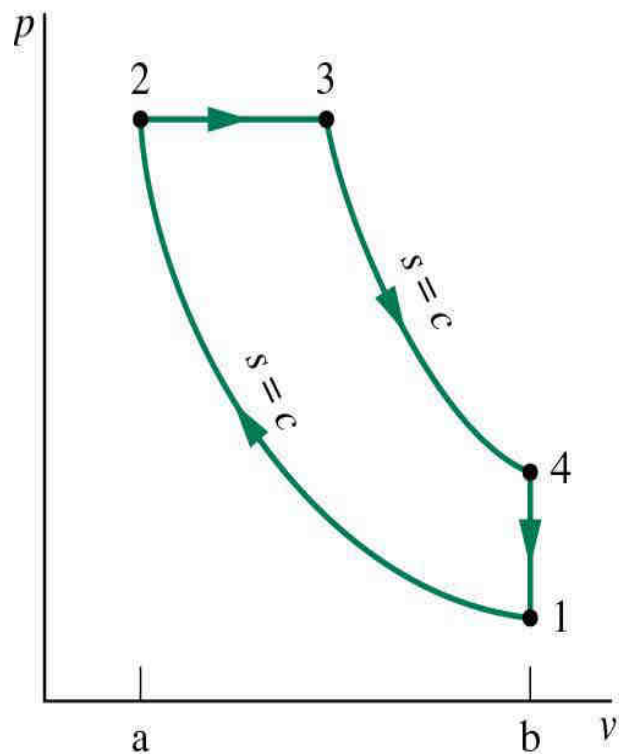
- Pressão média efetiva:

$$\text{PME} = \frac{\text{trabalho líquido para um ciclo}}{\text{volume de deslocamento}} = \frac{W_{\text{ciclo}}}{V_1 - V_2} = \frac{W_{\text{ciclo}}}{V_1(1 - V_2/V_1)} = \frac{W_{\text{ciclo}}}{V_1(1 - 1/r)}$$

3.3 CICLO DE AR-PADRÃO DIESEL (Rudolf Diesel)

- **Ciclo ideal** que idealiza o funcionamento de **motores de combustão interna de ignição por compressão**.
- A **adição de calor** ocorre durante um **processo à pressão constante**, quando o pistão se encontra no **PMS**. O ciclo Diesel consiste em **4 processos internamente reversíveis em série**.
- Nos processos **1-2** e **3-4** **trabalho está envolvido** enquanto no processo **2-3** tanto **trabalho** quanto **calor** estão envolvidos e no processo **4-1** **calor** está envolvido.
- Os 4 processos são modelados por um **balanço de energia para sistema fechado** considerando que variações de energia cinética e potencial são desprezíveis:

$$Q - W = \Delta U \Rightarrow Q - W = m(u_f - u_i) \Rightarrow Q/m - W/m = u_f - u_i$$



Processo 1-2:
compressão isentrópica
do ar conforme o pistão
se move do PMI para o
PMS.

Processo 2-3:
transferência de calor a
pressão constante para o
ar a partir de uma fonte
externa (1ª parte do
curso de potência).

Processo 3-4: expansão
isentrópica do ar
conforme o pistão se
move para o PMI.

Processo 4-1:
transferência de calor a
volume constante do ar
enquanto pistão está no
PMI.

- Como os 4 processos são internamente reversíveis tem-se:

Área 1-2-a-b-1 ($p-v$): **trabalho fornecido** por unidade de massa durante o processo de compressão.

Área 2-3-4-b-a-2 ($p-v$): **trabalho executado** por unidade de massa durante o processo de expansão.

$(\text{Área } 2-3-4-b-a-2) - (\text{Área } 1-2-a-b-1) = \text{Área } 1-2-3-4$ (*trabalho líquido obtido no diagrama $p-v$*).

Área 2-3-a-b-2 ($T-s$): **calor fornecido** por unidade de massa.

Área 1-4-a-b-1 ($T-s$): **calor rejeitado** por unidade de massa.

$(\text{Área } 2-3-a-b-2) - (\text{Área } 1-4-a-b-1) = \text{Área } 1-2-3-4$ (*calor líquido absorvido obtido no diagrama $T-s$*).

- Transferências de energia nos processos do ciclo Diesel por unidade de massa:

Processo 1-2

$$\frac{W_{12}}{m} = u_2 - u_1$$

Processo 2-3

$$\frac{Q_{23}}{m} = h_3 - h_2$$

Processo 3-4

$$\frac{W_{34}}{m} = u_3 - u_4$$

Processo 4-1

$$\frac{Q_{41}}{m} = u_4 - u_1$$

- Para o processo 2-3 que envolve tanto trabalho quanto calor tem-se:

$$Q_{23} - W_{23} = m(u_3 - u_2) \Rightarrow Q_{23} = W_{23} + m(u_3 - u_2) \Rightarrow Q_{23} = p(V_3 - V_2) + m(u_3 - u_2)$$

$$Q_{23} = pm(v_3 - v_2) + m(u_3 - u_2) \Rightarrow \frac{Q_{23}}{m} = p_3v_3 - p_2v_2 + u_3 - u_2$$

$$\frac{Q_{23}}{m} = (u_3 + p_3v_3) - (u_2 + p_2v_2) \Rightarrow \frac{Q_{23}}{m} = h_3 - h_2$$

- Trabalho líquido obtido:

$$\frac{W_{ciclo}}{m} = \frac{W_{23}}{m} + \frac{W_{34}}{m} - \frac{W_{12}}{m} = (h_3 - h_2) - (u_3 - u_2) + (u_3 - u_4) - (u_2 - u_1)$$

- Calor **líquido** absorvido: $\frac{Q_{ciclo}}{m} = \frac{Q_{23}}{m} - \frac{Q_{41}}{m} = (h_3 - h_2) - (u_4 - u_1)$
- **Eficiência térmica**: $\eta = \frac{W_{ciclo}/m}{Q_{23}/m} = \frac{Q_{ciclo}/m}{Q_{23}/m} = 1 - \frac{Q_{41}/m}{Q_{23}/m} \Rightarrow \eta = 1 - \left(\frac{u_4 - u_1}{h_3 - h_2} \right)$
- Análise de **ar-padrão**: u_1, h_2, h_3 e u_4 obtidos da **Tabela A.22**.
- **Taxa de compressão**: $r = \frac{V_1}{V_2}$; $(p_2 = p_3 \text{ e } V_1 = V_4)$
- **Razão de corte**: $r_c = \frac{V_3}{V_2}$
- Para **processos isoentrópicos** 1-2 e 3-4 com c_p e c_v variáveis (somente ar):

$$\frac{v_{r2}}{v_{r1}} = \frac{V_2}{V_1} \Rightarrow \frac{v_{r2}}{v_{r1}} = \frac{1}{r} \quad \text{ou} \quad \frac{v_{r1}}{v_{r2}} = r$$

$$\frac{v_{r4}}{v_{r3}} = \frac{V_4}{V_3} \Rightarrow \frac{v_{r4}}{v_{r3}} = \frac{\overset{=V_1}{V_4}}{V_2} \frac{V_2}{V_3} = \frac{V_1}{V_2} \frac{V_2}{V_3} \Rightarrow \frac{v_{r4}}{v_{r3}} = \frac{r}{r_c} \quad \text{ou} \quad \frac{v_{r3}}{v_{r4}} = \frac{r_c}{r}$$

- v_r é volume relativo e $v_r = v_r(T)$ obtido da **Tabela A.22**.
- No **processo 2-3**, a equação do gás ideal simplifica-se com $p_3 = p_2$ para:

$$\frac{T_2}{V_2} = \frac{T_3}{V_3} \Rightarrow T_3 = \frac{V_3}{V_2} T_2 \Rightarrow T_3 = r_c T_2$$

- Para **análise de ar-padrão frio** (c_p e c_v constantes) para os processos 1-2 e 3-4:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = r^{k-1} \quad \text{ou} \quad \frac{T_1}{T_2} = \frac{1}{r^{k-1}}$$

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{V_3}{V_4} \right)^{k-1} \Rightarrow \frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{r_c}{r} \right)^{k-1} \quad \text{ou} \quad \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{r}{r_c} \right)^{k-1}$$

- $k = c_p / c_v$ é a razão de calores específicos.
- Eficiência térmica em função da taxa de compressão e da razão de corte (análise ar-padrão frio):

$$\eta = 1 - \underbrace{\left(\frac{u_4 - u_1}{h_3 - h_2} \right)}_{\text{Ar padrão}} = 1 - \underbrace{\frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)}}_{\text{Ar padrão frio}} = 1 - \frac{T_1}{kT_2} \left(\frac{T_4/T_1 - 1}{T_3/T_2 - 1} \right)$$

- Mas $\frac{T_3}{T_2} = r_c$ de tal forma que $\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3(r_c/r)^{k-1}}{T_2(1/r)^{k-1}} = \frac{T_3}{T_2} r_c^{k-1} = r_c r_c^{k-1} = r_c^k$ e $\frac{T_1}{T_2} = \frac{1}{r^{k-1}}$. Assim:

$$\eta = 1 - \left(\frac{u_4 - u_1}{h_3 - h_2} \right) = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} \Rightarrow \eta = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \left[\frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)} \right]$$

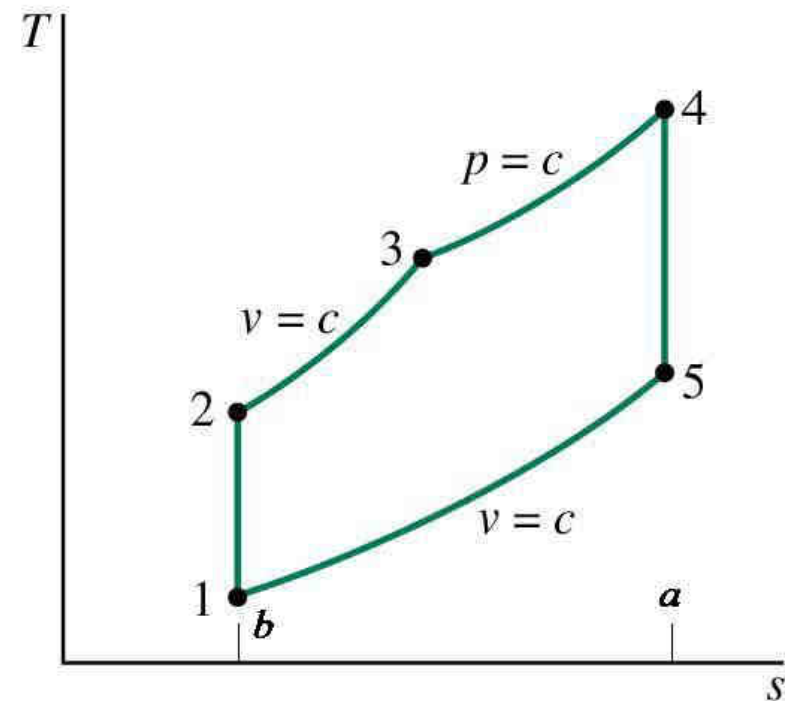
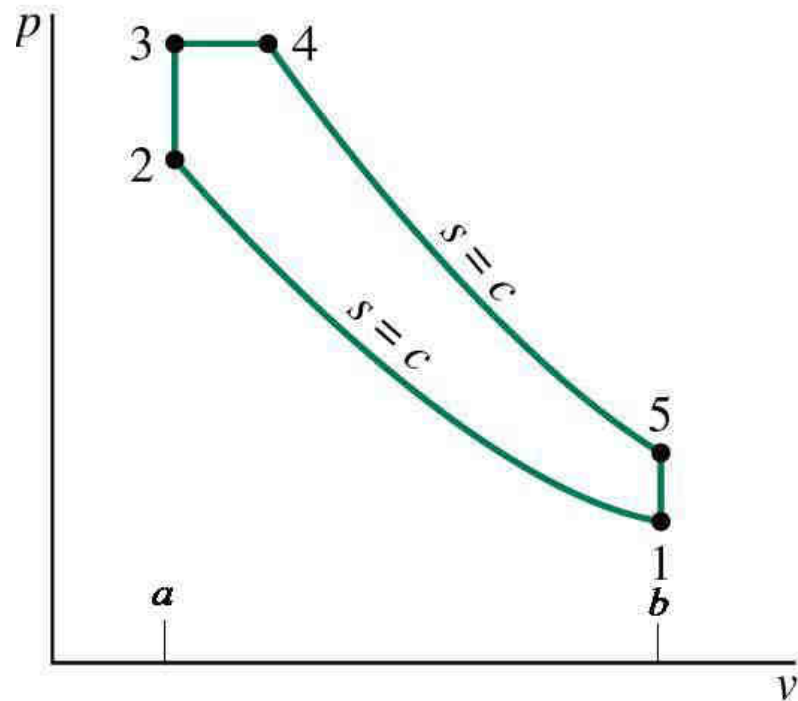
- **Pressão média efetiva:**

$$\text{PME} = \frac{\text{trabalho líquido para um ciclo}}{\text{volume de deslocamento}} = \frac{W_{\text{ciclo}}}{V_1 - V_2} = \frac{W_{\text{ciclo}}}{V_1(1 - V_2/V_1)} = \frac{W_{\text{ciclo}}}{V_1(1 - 1/r)}$$

3.4 CICLO DE AR-PADRÃO DUAL

- Os diagramas $p-v$ de motores de combustão interna reais **não são bem descritos pelos ciclos Otto e Diesel**.
- Um ciclo que pode melhor aproximar as **variações de pressão** é o ciclo de ar-padrão Dual.
- O ciclo Dual é composto pelos mesmos tipos de processos dos ciclos Otto e Diesel.
- Os processos do ciclo Dual são os seguintes:
 1. **Processo 1-2: Compressão isentrópica do ar** conforme o pistão se move do PMI para o PMS.
 2. **Processo 2-3: Transferência de calor a volume constante** para o ar a partir de uma fonte externa enquanto o pistão está no PMS.

3. **Processo 3-4: Transferência de calor a pressão constante** para o ar a partir de uma fonte externa (1ª parte do curso de potência).
4. **Processo 4-5: Expansão isoentrópica do ar** conforme o pistão se move para o PMI.
5. **Processo 5-1: Rejeição de calor a volume constante** enquanto o pistão está no PMI.



- Como os 5 processos são internamente reversíveis tem-se:

Área **1-2-a-b-1** ($p-v$): **trabalho fornecido** por unidade de massa durante o processo de compressão.

Área **3-4-5-b-a-3** ($p-v$): **trabalho executado** por unidade de massa durante o processo de expansão.

$(\text{Área } 3-4-5-b-a-3) - (\text{Área } 1-2-a-b-1) = \text{Área } 1-2-3-4-5-1$ (***trabalho líquido obtido no diagrama $p-v$***).

Área **2-3-4-a-b-2** ($T-s$): **calor fornecido** por unidade de massa.

Área **1-5-a-b-1** ($T-s$): **calor rejeitado** por unidade de massa.

$(\text{Área } 2-3-4-a-b-2) - (\text{Área } 1-5-a-b-1) = \text{Área } 1-2-3-4-5-1$ (***calor líquido absorvido obtido no diagrama $T-s$***)

- Transferências de energia no ciclo Dual por unidade de massa:

Processo 1-2	Processo 2-3	Processo 3-4	Processo 4-5	Processo 5-1
$\frac{W_{12}}{m} = u_2 - u_1$	$\frac{Q_{23}}{m} = u_3 - u_2$	$\frac{Q_{34}}{m} = h_4 - h_3$	$\frac{W_{45}}{m} = u_4 - u_5$	$\frac{Q_{51}}{m} = u_5 - u_1$

- Para o processo 3-4 que envolve tanto trabalho quanto calor tem-se:

$$Q_{34} - W_{34} = m(u_4 - u_3) \Rightarrow Q_{34} = W_{34} + m(u_4 - u_3) \Rightarrow Q_{34} = p(V_4 - V_3) + m(u_4 - u_3)$$

$$Q_{34} = pm(v_4 - v_3) + m(u_4 - u_3) \Rightarrow \frac{Q_{34}}{m} = p_4 v_4 - p_3 v_3 + u_4 - u_3$$

$$\frac{Q_{34}}{m} = (u_4 + p_4 v_4) - (u_3 + p_3 v_3) \Rightarrow \frac{Q_{34}}{m} = h_4 - h_3$$

- Trabalho líquido obtido:

$$\frac{W_{ciclo}}{m} = \frac{W_{34}}{m} + \frac{W_{45}}{m} - \frac{W_{12}}{m} = (h_4 - h_3) - (u_4 - u_3) + (u_4 - u_5) - (u_2 - u_1)$$

- Calor líquido absorvido: $\frac{Q_{ciclo}}{m} = \frac{Q_{23}}{m} + \frac{Q_{34}}{m} - \frac{Q_{51}}{m} = (u_3 - u_2) + (h_4 - h_3) - (u_5 - u_1)$

- Eficiência térmica: $\eta = \frac{W_{ciclo}/m}{Q_{23}/m + Q_{34}/m} = \frac{Q_{23}/m + Q_{34}/m - Q_{51}/m}{Q_{23}/m + Q_{34}/m}$

$$\eta = 1 - \frac{Q_{51}/m}{Q_{23}/m + Q_{34}/m} = 1 - \frac{(u_5 - u_1)}{(u_3 - u_2) + (h_4 - h_3)}$$

- Análise de ar-padrão: u_1, u_2, u_3, u_5, h_3 e h_4 obtidos da **Tabela A.22**.

- Taxa de compressão: $r = \frac{V_1}{V_2}$; ($V_2 = V_3$ e $p_3 = p_4$ e $V_1 = V_5$)

- Razão de corte: $r_c = \frac{V_4}{V_3}$

- Razão de pressão: $r_p = \frac{p_3}{p_2}$
- Para processos isoentrópicos 1-2 e 4-5 com c_p e c_v variáveis (somente ar):

$$\frac{v_{r2}}{v_{r1}} = \frac{V_2}{V_1} \Rightarrow \frac{v_{r2}}{v_{r1}} = \frac{1}{r} \quad \text{ou} \quad \frac{v_{r1}}{v_{r2}} = r$$

$$\frac{v_{r5}}{v_{r4}} = \frac{V_5}{V_4} \Rightarrow \frac{v_{r5}}{v_{r4}} = \frac{\overbrace{V_1}^{\quad}}{\underbrace{V_3}_{V_2}} \frac{V_3}{V_4} = \frac{V_1}{V_2} \frac{V_3}{V_4} \Rightarrow \frac{v_{r5}}{v_{r4}} = \frac{r}{r_c} \quad \text{ou} \quad \frac{v_{r4}}{v_{r5}} = \frac{r_c}{r}$$

- v_r é o volume relativo e $v_r = v_r(T)$ obtido da Tabela A.22.
- No processo 2-3, a equação do gás ideal simplifica-se com $V_2 = V_3$ para:

$$\frac{p_2}{T_2} = \frac{p_3}{T_3} \Rightarrow T_3 = \frac{p_3}{p_2} T_2 \Rightarrow T_3 = r_p T_2$$

- No processo 3-4, a equação do gás ideal simplifica-se com $p_3 = p_4$ para:

$$\frac{V_3}{T_3} = \frac{V_4}{T_4} \Rightarrow T_4 = \frac{V_4}{V_3} T_3 \Rightarrow T_4 = r_c T_3$$

- Para análise de ar-padrão frio (c_p e c_v constantes) para os processos 1-2 e 4-5:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = r^{k-1} \quad \text{ou} \quad \frac{T_1}{T_2} = \frac{1}{r^{k-1}}$$

$$\frac{T_5}{T_4} = \left(\frac{V_4}{V_5} \right)^{k-1} \Rightarrow \frac{T_5}{T_4} = \left(\frac{r_c}{r} \right)^{k-1} \quad \text{ou} \quad \frac{T_4}{T_5} = \left(\frac{r}{r_c} \right)^{k-1}$$

- $k = c_p / c_v$ é a razão de calores específicos.
- T_4 pode ser escrito em função de T_2 como:

$$T_4 = r_c T_3 \Rightarrow T_4 = r_c r_p T_2$$

- T_5 pode ser escrito em função de T_2 como:

$$T_5 = T_4 \left(\frac{r_c}{r} \right)^{k-1} = r_c r_p T_2 \left(\frac{r_c}{r} \right)^{k-1} \Rightarrow T_5 = r_p \left(\frac{r_c^k}{r^{k-1}} \right) T_2$$

- Eficiência térmica em função da taxa de compressão, razão de corte e razão de pressão (análise ar-padrão frio):

$$\eta = 1 - \underbrace{\frac{(u_5 - u_1)}{(u_3 - u_2) + (h_4 - h_3)}}_{\text{Ar padrão}} = 1 - \underbrace{\frac{c_v(T_5 - T_1)}{c_v(T_3 - T_2) + c_p(T_4 - T_3)}}_{\text{Ar padrão frio}} = 1 - \frac{(T_5 - T_1)}{(T_3 - T_2) + k(T_4 - T_3)}$$

- Sabe-se que $T_1 = \frac{T_2}{r^{k-1}}$; $T_3 = r_p T_2$; $T_4 = r_c r_p T_2$ e $T_5 = r_p \left(\frac{r_c^k}{r^{k-1}} \right) T_2$ de tal forma:

$$\eta = 1 - \frac{\left[r_p \left(\frac{r_c^k}{r^{k-1}} \right) T_2 - \frac{T_2}{r^{k-1}} \right]}{(r_p T_2 - T_2) + k(r_c r_p T_2 - r_p T_2)} \Rightarrow \eta = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \left[\frac{r_p r_c^k - 1}{(r_p - 1) + k r_p (r_c - 1)} \right]$$

- Pressão média efetiva:

$$\text{PME} = \frac{\text{trabalho líquido para um ciclo}}{\text{volume de deslocamento}} = \frac{W_{\text{ciclo}}}{V_1 - V_2} = \frac{W_{\text{ciclo}}}{V_1(1 - V_2/V_1)} = \frac{W_{\text{ciclo}}}{V_1(1 - 1/r)}$$