

CURSO INTENSIVO

TERMODINÂMICA E APLICAÇÕES DE ENGENHARIA

EQUAÇÕES DE BALANÇO DE ENERGIA PARA SISTEMAS ABERTOS

Paulo Seleglim Jr.
Universidade de São Paulo

CURSO INTENSIVO

TERMODINÂMICA E APLICAÇÕES DE ENGENHARIA

AVISOS IMPORTANTES:

As respostas
na prova são
corrigidas com
N dígitos
(e.g. 4)
significativos

The screenshot shows the Portuguese Wikipedia page for 'Algarismo significativo'. The page title is 'Algarismo significativo' and it is in Portuguese. The article text is as follows:

Na **matemática aplicada**, **algarismos significativos** são utilizados para monitorar os erros ao se representar números reais na base 10.^[1]

Excetuando-se quando todos os números envolvidos são inteiros (por exemplo o número de pessoas numa sala), é impossível determinar o valor exato de determinada quantidade. Assim sendo, é importante indicar a margem de erro numa medição indicando os algarismos significativos, sendo estes os dígitos com significado numa quantidade ou medição. Utilizando algarismos significativos, o último dígito é sempre incerto. Desta forma, é importante utiliza-los em trabalhos científicos.

Diz-se que uma representação tem n algarismos significativos quando se admite um erro no algarismo seguinte da representação. Por exemplo, $1/7 = 0,14$ com dois algarismos significativos (já que o erro está na terceira casa decimal: $1/7 = 0,1428571429$). Analogamente, $1/30 = 0,0333$ com três algarismos significativos (erro na quinta casa decimal).

Para ilustrar, imagine que pediu a um amigo para medir a temperatura de água e ele disse-lhe que esta se encontrava à 22,0 °C. Neste caso, o algarismo duvidoso é o 0, pois não se sabe ao certo se a temperatura é por exemplo, 21,99 ou 22,01. Em suma tal remete -se ao facto dos arredondamentos serem realizados e nem sempre serem conhecidos. Para entender este conceito, imagine que um amigo seu lhe contou que na realidade a medição foi de 21,689. Nesse contexto pode-se introduzir o conceito de precisão e exactidão. 22 é um número exacto, porém 21,689 é um número mais preciso, precisará do valor preciso para realizar um cálculo matemático, por exemplo, mas didacticamente adopta-se o 22.

The screenshot shows an English Wikipedia article snippet about significant figures. The text is as follows:

For instance, if a length measurement yields 114.8 mm, using a ruler with the smallest interval between marks at 1 mm, the first three digits (1, 1, and 4, representing 114 mm) are certain and constitute significant figures. Even digits that are uncertain yet reliable are also included in the significant figures. In this scenario, the last digit (8, contributing 0.8 mm) is likewise considered significant despite its uncertainty.^[1] Therefore, this measurement contains four significant figures.

Another example involves a volume measurement of 2.98 L with an uncertainty of ± 0.05 L. The actual volume falls between 2.93 L and 3.03 L. Even if certain digits are not completely known, they are still significant if they are reliable, as they indicate the actual volume within an acceptable range of uncertainty. In this case, the actual volume might be 2.94 L or possibly 3.02 L, so all three digits are considered significant.^[1] Thus, there are three significant figures in this example.

The screenshot shows a sidebar or navigation menu with the following content:

- 35 languages
- Edit View history Tools
- Fit approximation
- $O(), \sim$
- Concepts
- Orders of approximation ·
- Analysis · Big O notation ·
- Curve fitting · False precision ·
- Significant figures
- Other fundamentals
- Approximation · Generalization error ·
- Taylor polynomial ·
- Scientific modelling
- V · T · E

CURSO INTENSIVO

TERMODINÂMICA E APLICAÇÕES DE ENGENHARIA

EQUAÇÕES DE BALANÇO DE ENERGIA PARA SISTEMAS ABERTOS

Paulo Seleglim Jr.
Universidade de São Paulo

Aula 5

Aplicação: análise termodinâmica do **Boeing 747**

1ra Lei regime permanente




**Aplicação:
análise
termodinâmica
do Saturno V**

**1ra Lei
regime
transiente**





15 ton/sec !!!
150 GW !!!








Your playlist
Curso aberto: Introdução à Egenhari...











 Details

 **Videos**

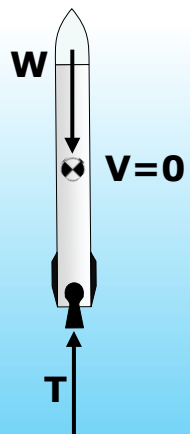
 Analytics

 Settings

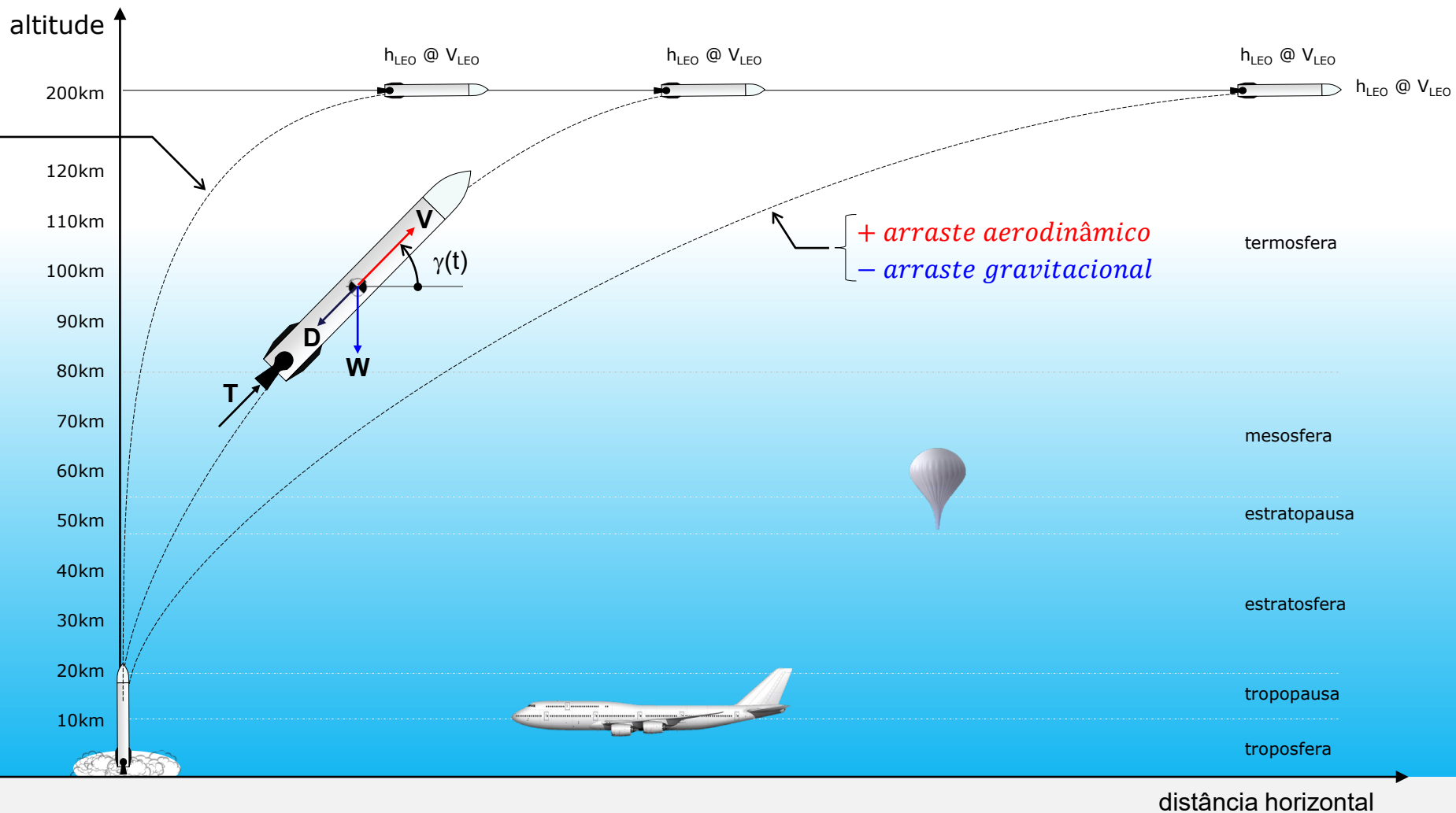
 Send feedback

Video	Visibility	Monetization	Restrictions	Date
 <p>Curso aberto: Introdução à Engenharia Aeroespacial - Prof. Seleghim, Univer... VÍDEO DE LANÇAMENTO DO CURSO ABERTO E GRATUITO: "Introdução à Engenharia Aeroespacial" - Prof. Seleghim, Universidade de São Paulo - USP. Formulário de...</p>	Public	Off	None	Oct 26, 2023 Premiered
 <p>Aula 1/10: Os foguetes e os lançamentos orbitais – análise da missão CRS2... Link para os questionários relâmpago (pop quizzes) = https://forms.gle/nP2cN5uXwi5MaaQTA Programação das aulas 20/11/2023 Os...</p>	Public	Off	None	Nov 20, 2023 Streamed
 <p>Aula 2/10: É possível alcançar o espaço sem um foguete ? (Canhões, Elevad... Link para os questionários relâmpago (pop quizzes) = https://forms.gle/nP2cN5uXwi5MaaQTA Programação das aulas 20/11/2023 Os...</p>	Public	Off	None	Nov 21, 2023 Streamed
 <p>Aula 3/10: Projeto conceitual de um foguete – otimização do estagiamento ... Link para os questionários relâmpago (pop quizzes) = https://forms.gle/nP2cN5uXwi5MaaQTA Programação das aulas 20/11/2023 Os...</p>	Public	Off	None	Nov 22, 2023 Streamed
 <p>Aula 4/10: Projeto conceitual de um foguete – otimização da trajetória de la... Link para os questionários relâmpago (pop quizzes) = https://forms.gle/nP2cN5uXwi5MaaQTA Programação das aulas 20/11/2023 Os...</p>	Public	Off	None	Nov 23, 2023 Streamed
 <p>Aula 5/10: Projeto conceitual de um foguete – motores termoquímicos e bo... Link para os questionários relâmpago (pop quizzes) = https://forms.gle/nP2cN5uXwi5MaaQTA Programação das aulas 20/11/2023 Os...</p>	Public	Off	None	Nov 24, 2023 Streamed
 <p>Aula 6/10: Projeto conceitual de um foguete – tecnologias de propulsão e c... Link para os questionários relâmpago (pop quizzes) = https://forms.gle/nP2cN5uXwi5MaaQTA Programação das aulas 20/11/2023 Os...</p>	Public	Off	None	Nov 27, 2023 Streamed
 <p>Aula 7/10: A reentrada orbital e tecnologias de pouso controlado (não espat... Link para os questionários relâmpago (pop quizzes) = https://forms.gle/nP2cN5uXwi5MaaQTA Programação das aulas 20/11/2023 Os...</p>	Public	Off	None	Nov 28, 2023 Streamed
 <p>Aula 8/10: Mecânica orbital – equações de trabalho e manobras orbitais 1/2 Link para os questionários relâmpago (pop quizzes) = https://forms.gle/nP2cN5uXwi5MaaQTA Programação das aulas 20/11/2023 Os...</p>	Public	Off	None	Nov 29, 2023 Streamed
 <p>Aula 9/10 - Mecânica orbital – equações de trabalho e manobras orbitais 2/2 Link para os questionários relâmpago (pop quizzes) = https://forms.gle/nP2cN5uXwi5MaaQTA Programação das aulas 20/11/2023 Os...</p>	Public	Off	None	Nov 30, 2023 Streamed

- arraste aerodinâmico
+ arraste gravitacional



$$\Delta V = V_{\text{exha}} \ln \left(\frac{m_0}{m_f} \right) - \int_0^{TB} \frac{\mu_\oplus}{r^2} dt = 0$$



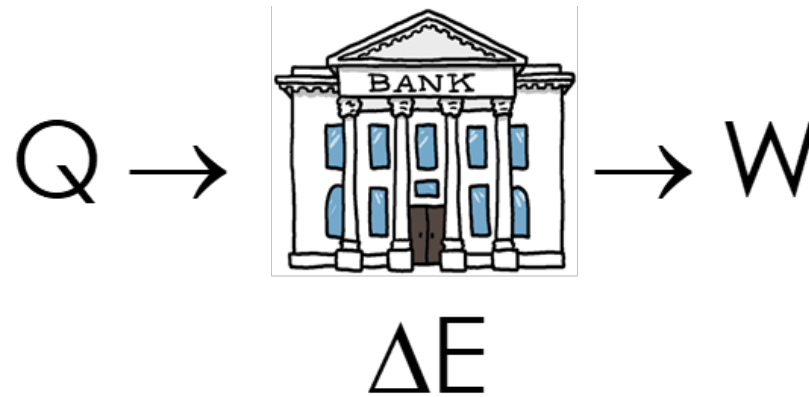
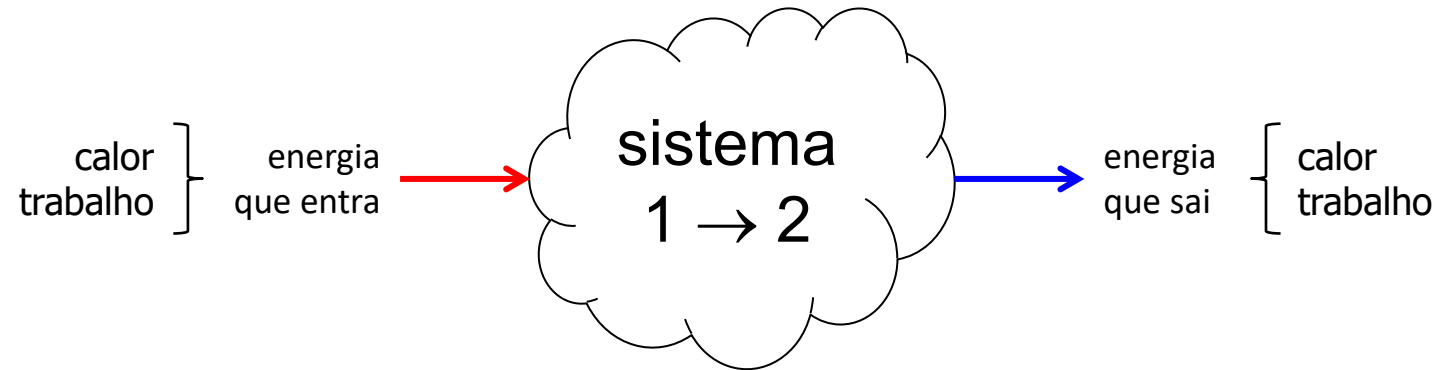
+ arraste aerodinâmico
- arraste gravitacional

$$\sin \left(\frac{8}{2} \cdot \frac{\pi}{180} \right)^2 = 4.866 \times 10^{-3}$$

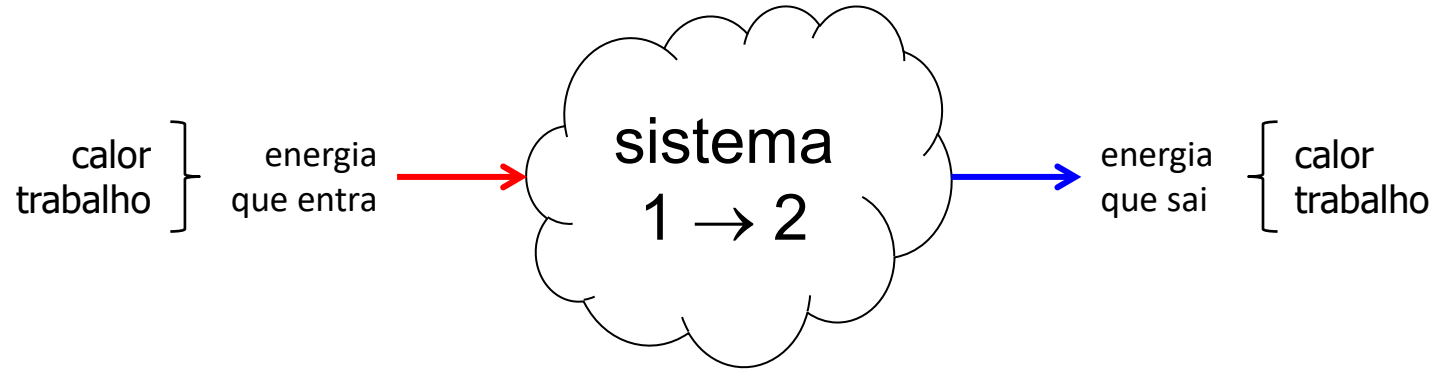
$$\Delta V(t) = g_0 I_{SP} \ln \left(\frac{m_0}{m(t)} \right) - 2g_0 I_{SP} \dot{m} \int_0^t \frac{1}{m(t)} \sin^2(\delta(t)/2) dt - \int_0^t \frac{\mu_\oplus}{r^2} \sin \gamma(t) dt - \frac{A_x}{2} \int_0^t \frac{C_x \rho V^2(t)}{m(t)} dt$$

Adequando o inventário energético para os sistemas abertos...

Princípio da conservação da energia: sistema fechado



Princípio da conservação da energia: sistema fechado



$$\Delta E = \Delta U + \Delta EC + \Delta EP$$

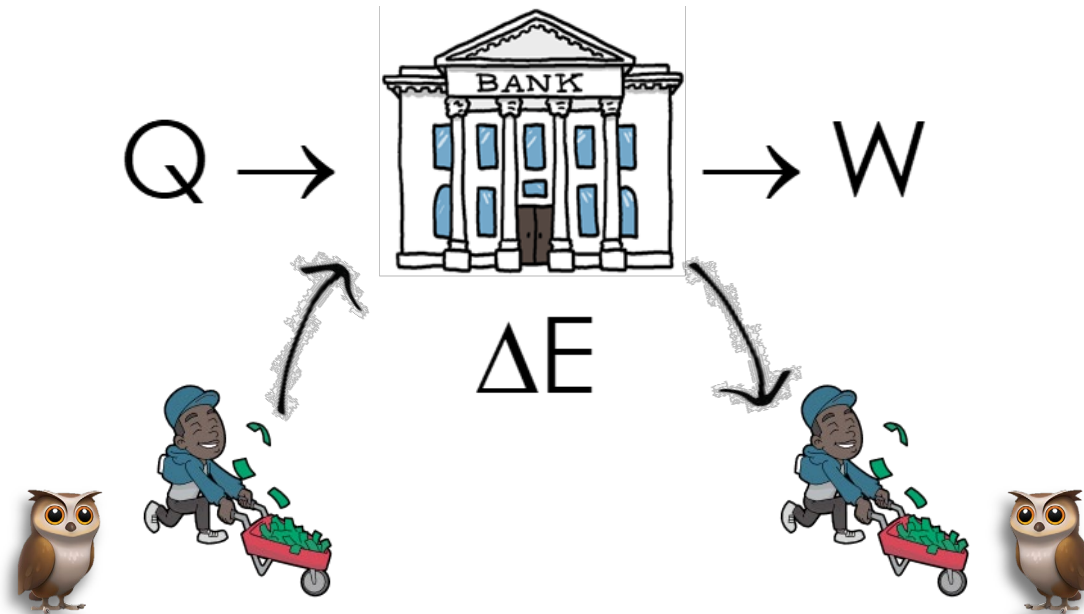
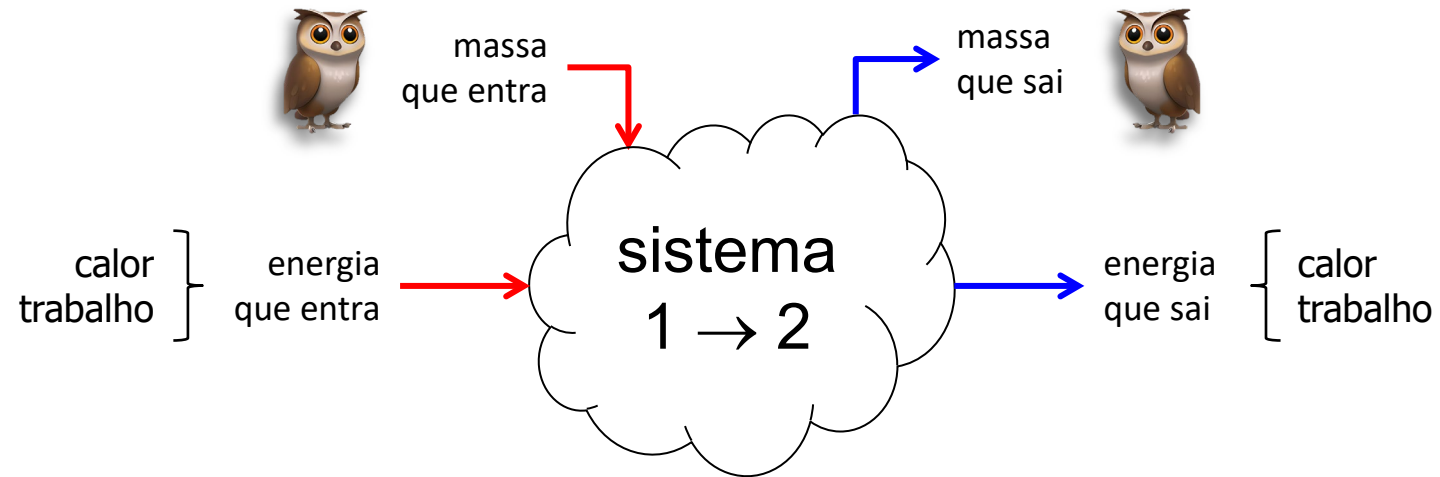
energia interna
(agitação molecular)

energia potencial
macroscópica

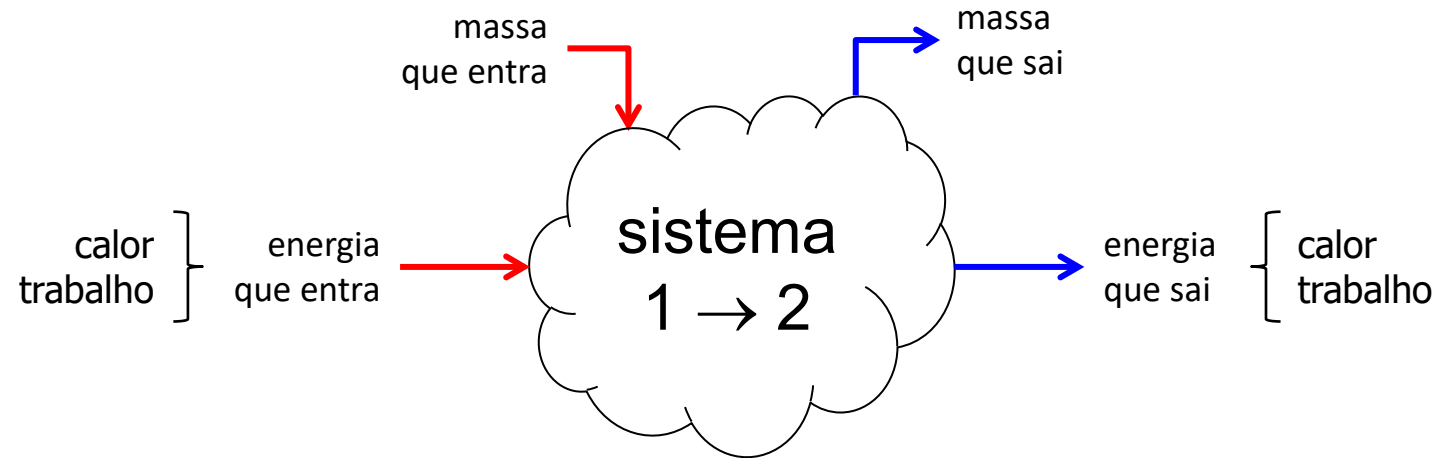
energia cinética
macroscópica



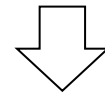
Princípio da conservação da energia: sistema aberto



Princípio da conservação da energia: **sistema aberto**



$$\Delta E = (E_{\text{entra}} - E_{\text{sai}})_{Q,W} + (E_{\text{entra}} - E_{\text{sai}})_{\text{massa}}$$



$$\frac{dE}{dt} = \left(\frac{dE_{\text{entra}}}{dt} - \frac{dE_{\text{sai}}}{dt} \right)_{Q,W} + \left(\frac{dE_{\text{entra}}}{dt} - \frac{dE_{\text{sai}}}{dt} \right)_{\text{massa}}$$



Q#1: além de calor e trabalho
quais outros fluxos podem carrear
energia para dentro ou para fora
de um sistema aberto ?

- A) A corrente de Humbolt ...
- B) A movimentação das placas tectônicas...
- C) O deslocamento da fronteira do sistema...
- D) Os fluxos de massa...
- E) É impossível saber...

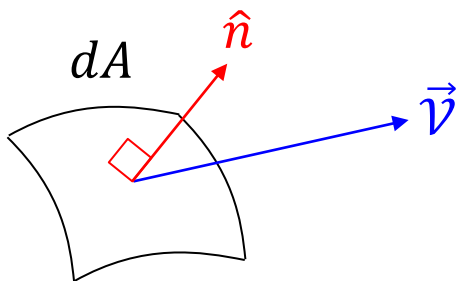
1

Equação generalizada para o balanço de massa de um sistema aberto...

Depois vamos adaptar para energia

Equação de balanço de massa: forma generalizada

$$\left(\begin{array}{c} \text{taxa de variação} \\ \text{da massa do sistema} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{fluxo total de} \\ \text{massa entrando} \end{array} \right) = 0$$



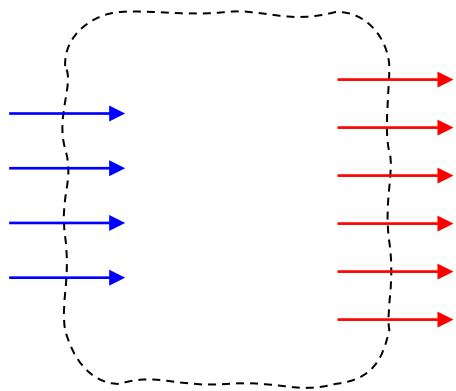
$$\frac{d}{dt} M + \int_{SC} \rho(\vec{V} \cdot \vec{n}) dA = 0$$

$$\frac{d}{dt} \int_{VC} \rho dV + \int_{SC} \rho(\vec{V} \cdot \vec{n}) dA = 0$$

Attention to
Filler Words

Equação de balanço de massa: forma generalizada

$$\left(\begin{array}{c} \text{taxa de variação} \\ \text{da massa do sistema} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{fluxo total de} \\ \text{massa entrando} \end{array} \right) = 0$$

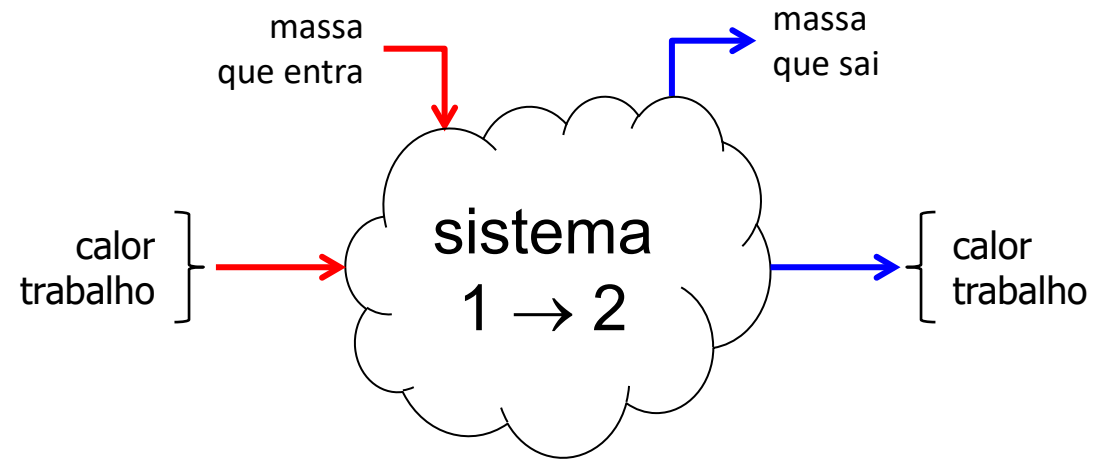


$$\frac{d}{dt}M + \left(\sum_{\text{saídas}} m_{\text{sai},k} - \sum_{\text{entradas}} m_{\text{ent},k} \right) = 0$$

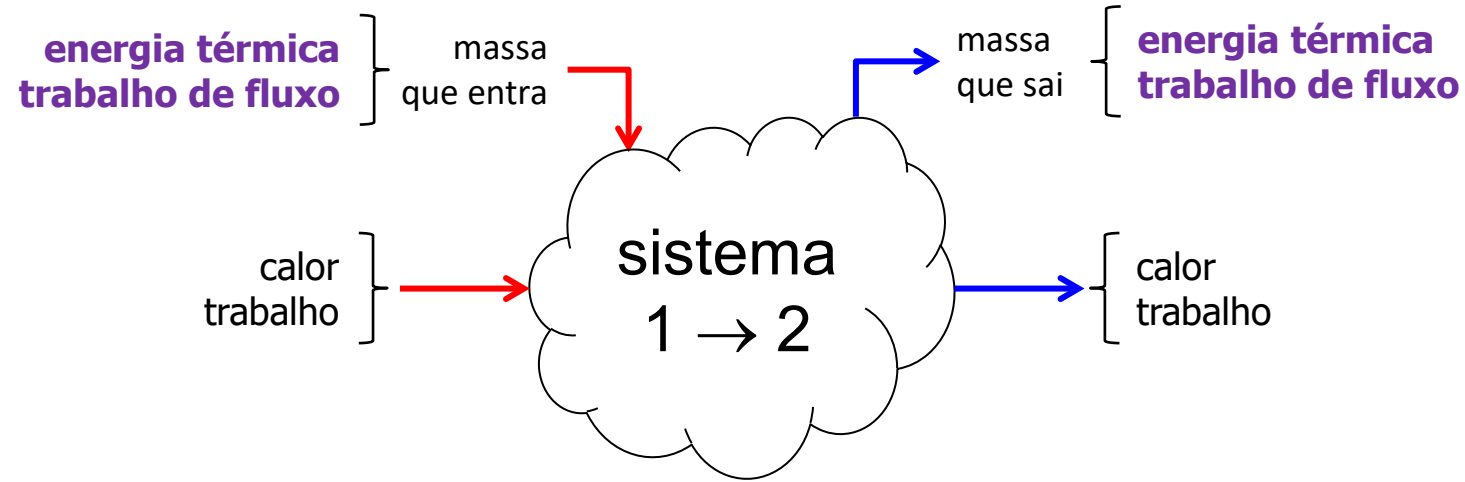
$$\frac{d}{dt}M + \left(\sum_{\text{saídas}} \rho_k V_{n,k} A_k - \sum_{\text{entradas}} \rho_k V_{n,k} A_k \right) = 0$$

Calculando a energia associada aos fluxos
de massa...

Princípio da conservação da energia: sistema aberto



Princípio da conservação da energia: sistema aberto



transporte de energia térmica

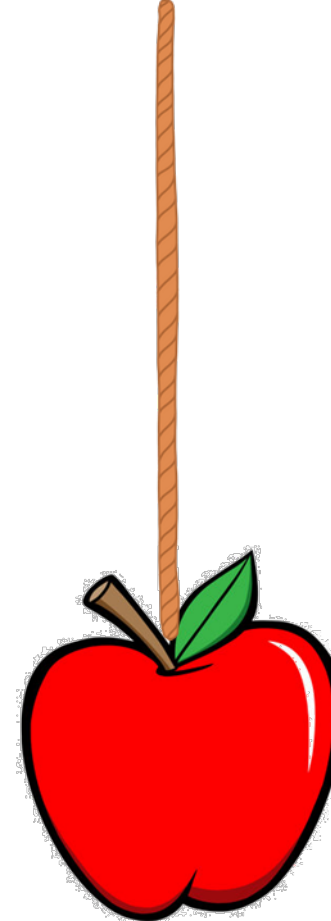
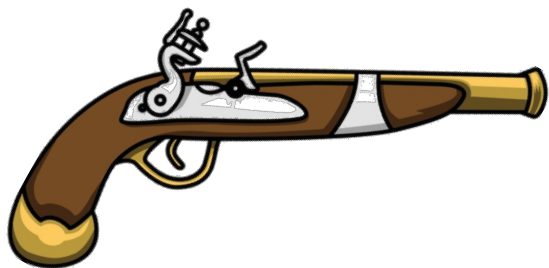


Energia térmica, ou interna ($u + ep + ec$), associada ao fluxo de massa entrando/saindo do VC e que deve ser contabilizado

trabalho de fluxo



Trabalho mecânico ($\text{força} \times \text{deslocamento}$) necessário para que um elemento de massa entre/saia do VC...

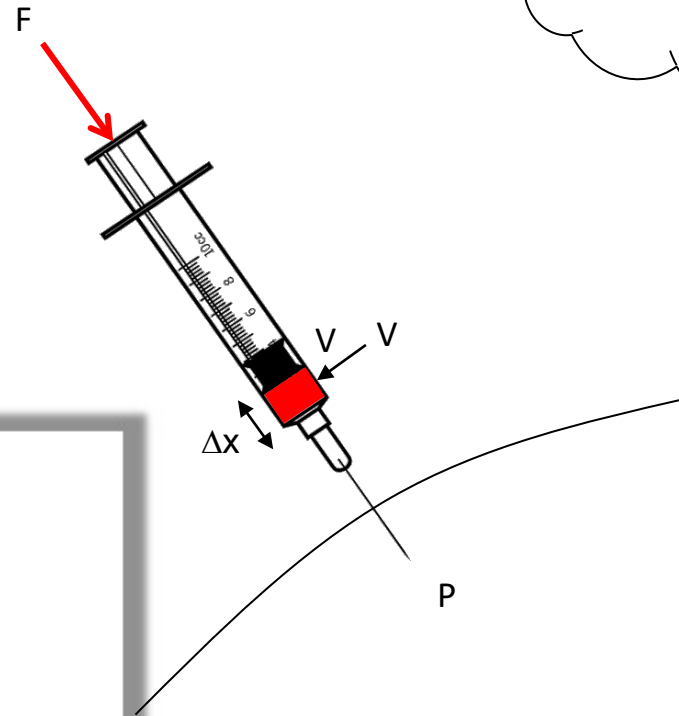
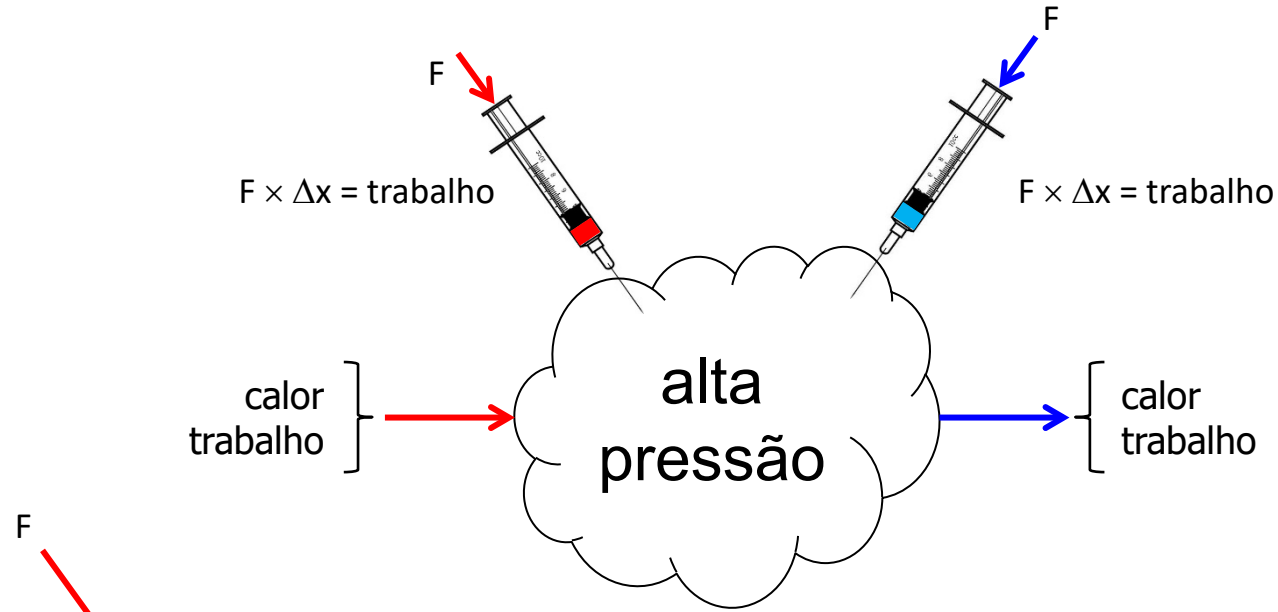


$E = 0$

$E \neq 0$

Energia pode ser transferida para o sistema pela incorporação de massa...

Trabalho necessário para entrar no sistema: trabalho de fluxo...

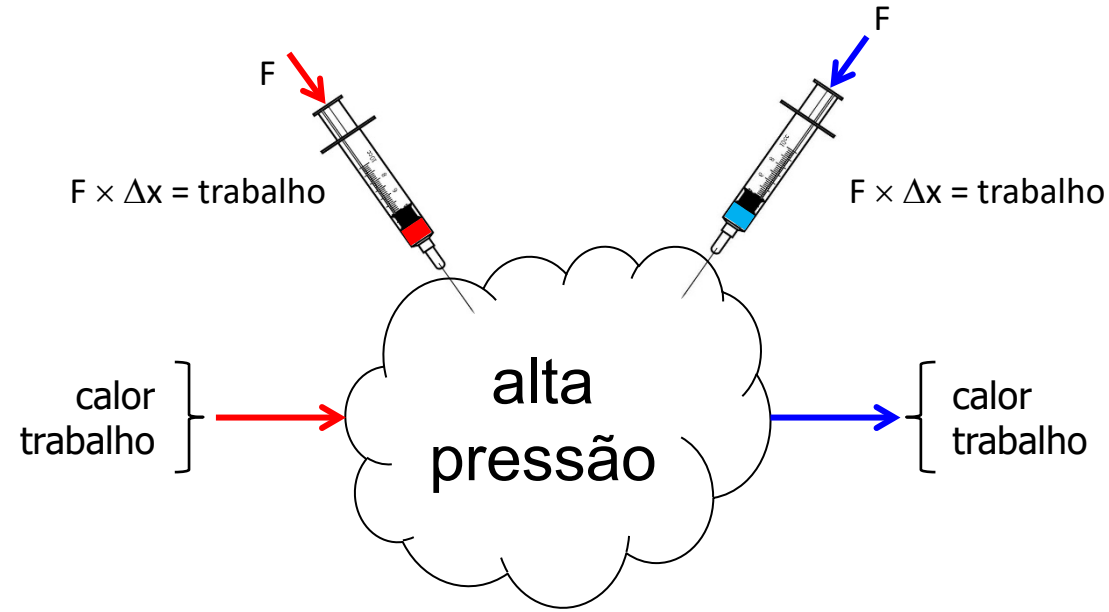


$$W_{\text{fluxo,e}} = F \times \Delta x = PA \cdot \Delta x$$

$$W_{\text{fluxo,e}} = F \times \Delta x = P \cdot (A \cdot \Delta x)$$

$$W_{\text{fluxo,e}} = P \cdot (A \cdot \Delta x) = P \cdot V$$

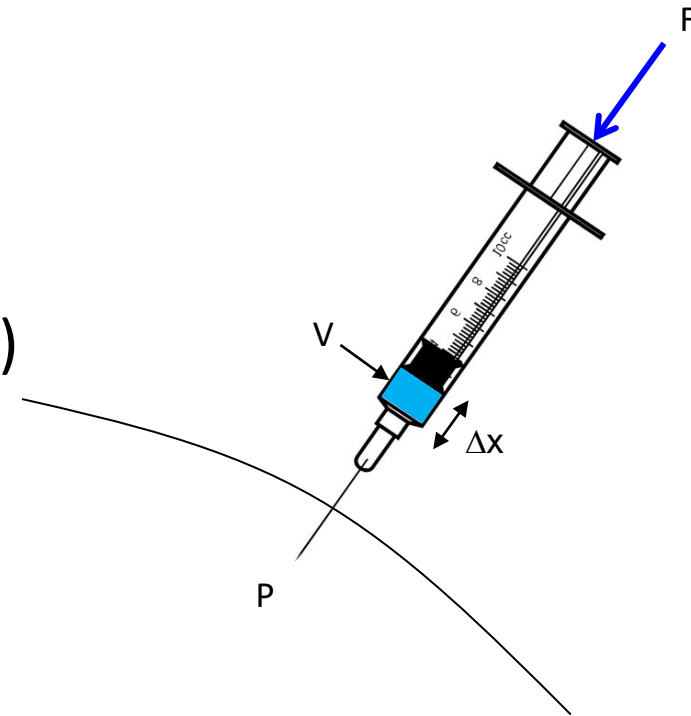
Trabalho necessário para entrar no sistema: trabalho de fluxo...



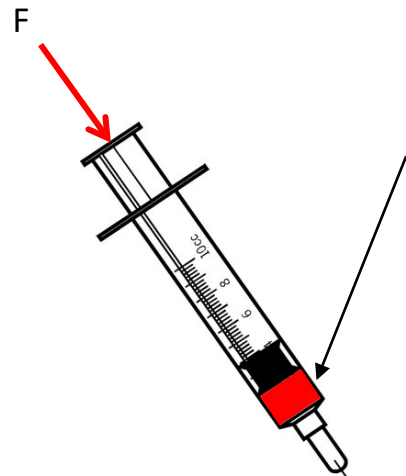
$$W_{\text{fluxo},s} = F \times \Delta x = PA \cdot \Delta x$$

$$W_{\text{fluxo},s} = F \times \Delta x = P \cdot (A \cdot \Delta x)$$

$$W_{\text{fluxo},s} = P \cdot (A \cdot \Delta x) = P \cdot V$$



Energia total associada ao fluxo de massa entrando/saindo...



$$\begin{cases} E = m \cdot (u + gz + V^2 / 2) \\ E = \rho V \cdot (u + gz + V^2 / 2) \end{cases}$$

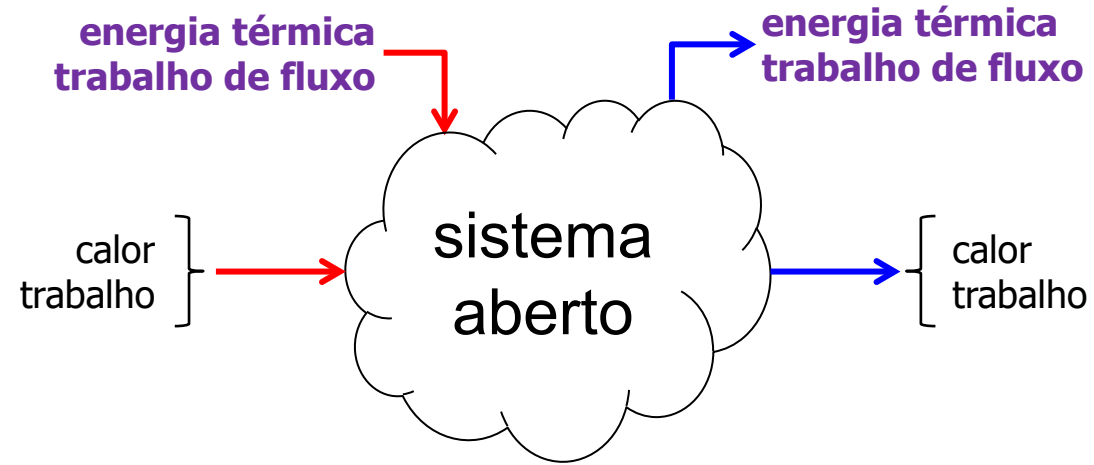
energia interna
+
trabalho de fluxo

$$\begin{cases} \theta = E + W_{\text{fluxo}} \\ \theta = m \cdot (u + gz + V^2 / 2) + (F \cdot \Delta x) \\ \theta = m \cdot (u + gz + V^2 / 2) + m \cdot (Pv) \end{cases}$$

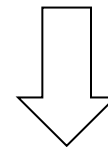
$$\theta = m \cdot (h + gz + V^2 / 2)$$

Formulando o inventário de energia para um sistema aberto...

Inventário de energia no VC... (regime permanente)



$$\left[\begin{array}{l} \text{energia total (líquida)} \\ \text{entrando no VC} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{taxa de variação da} \\ \text{energia interna do VC} \end{array} \right]$$



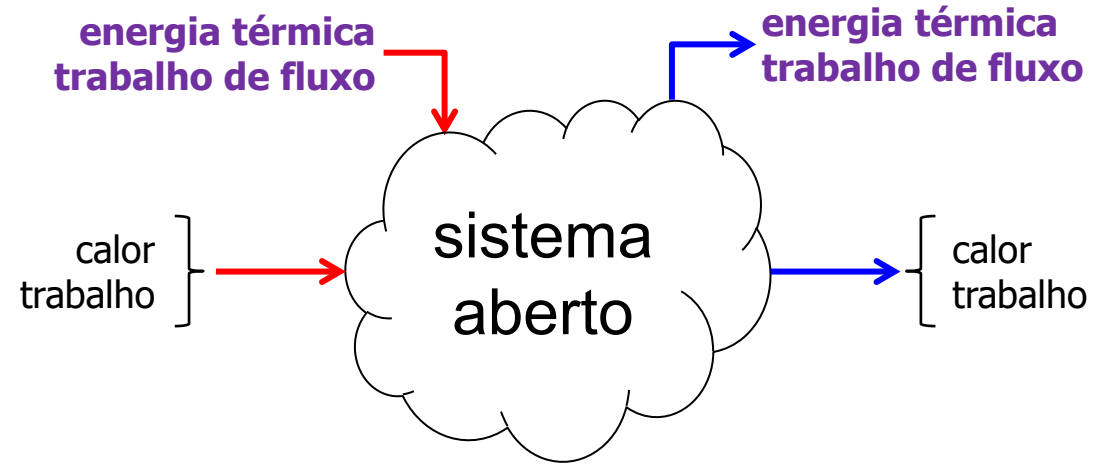
regime permanente

$$\left[\begin{array}{l} \text{energia total (líquida)} \\ \text{entrando no VC} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \mathbf{0} \end{array} \right]$$



Attention to
Filler Words

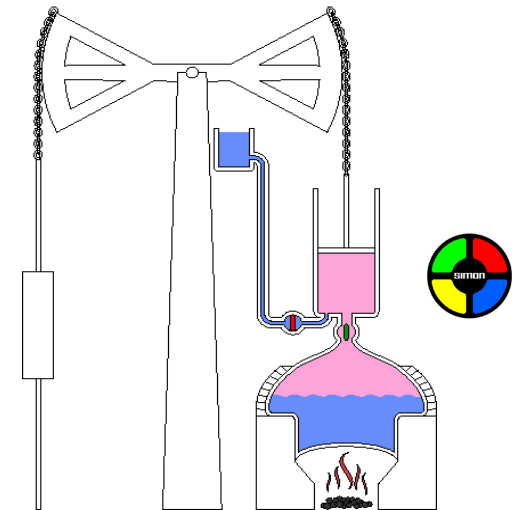
Inventário de energia no VC... (regime permanente)



$$\dot{Q}_e + \dot{W}_e + \sum_{\text{entra}} \dot{m}_k \theta_k = \dot{Q}_s + \dot{W}_s + \sum_{\text{sai}} \dot{m}_k \theta_k$$

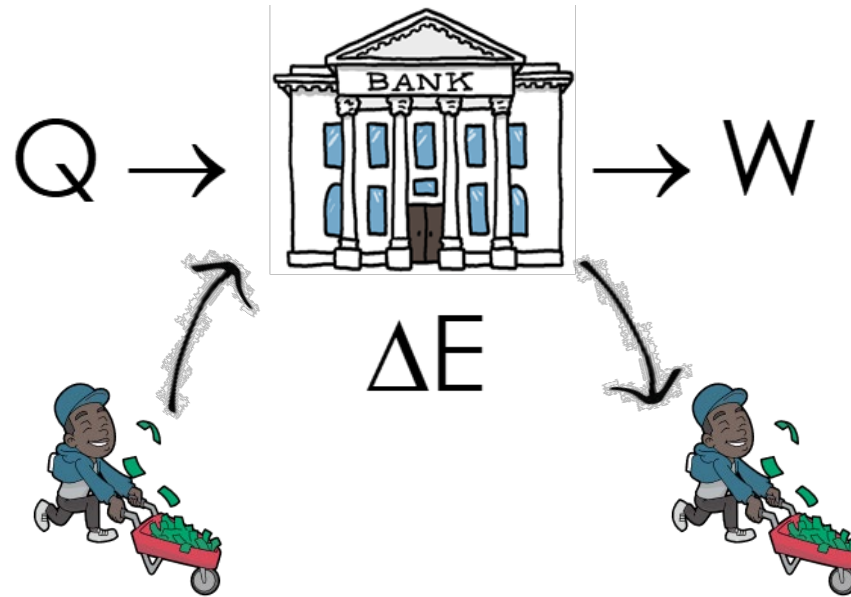
$$(\dot{Q}_e - \dot{Q}_s) - (\dot{W}_s - \dot{W}_e) = \sum_{\text{sai}} \dot{m}_k \theta_k - \sum_{\text{entra}} \dot{m}_k \theta_k$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_{\text{sai}} \dot{m}_k \theta_k - \sum_{\text{entra}} \dot{m}_k \theta_k$$



Inventário de energia no VC... (regime permanente)

$$\dot{Q} - \dot{W} + \sum_{entra} \dot{m}_k \cdot \left(h_k + gz_k + \frac{V_k^2}{2} \right) - \sum_{sai} \dot{m}_k \cdot \left(h_k + gz_k + \frac{V_k^2}{2} \right) = 0$$

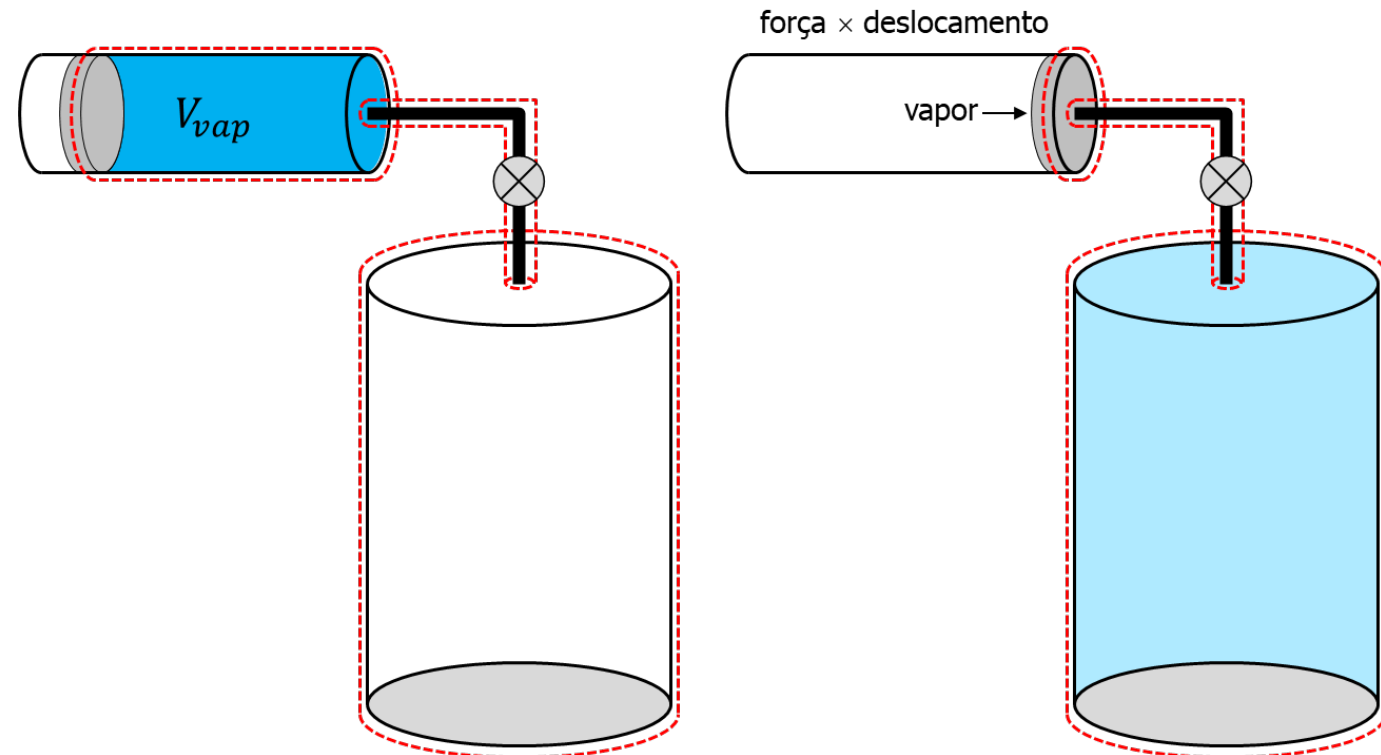
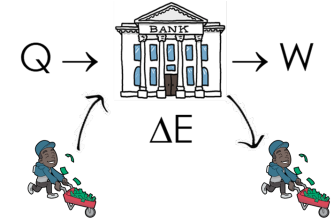


Um tanque rígido e isolado, inicialmente evacuado, é conectado através de uma válvula a uma linha de fornecimento que transporta vapor a 1 MPa e 300°C. A válvula é então aberta e o vapor flui lentamente para o tanque até que a pressão atinja 1 MPa, momento em que a válvula é fechada. Determine a temperatura final do vapor no tanque. (Ex. 5 – 12)

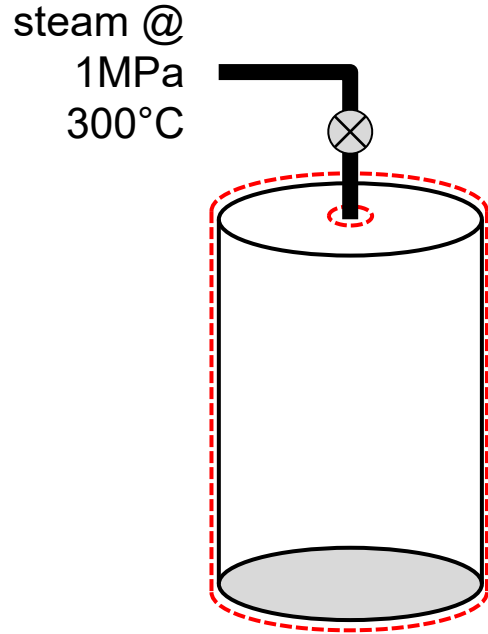
SEM0233: TERMODINÂMICA E APLICAÇÕES DE ENGENHARIA 1:40:39	Aula 4: TERMODINÂMICA E APLICAÇ... Prof. Paulo Seleglim Jr. / Universidade de São Paulo Segunda-feira das 16 - 18h00 ...
SEM0233: TERMODINÂMICA E APLICAÇÕES DE ENGENHARIA 1:40:26	Aula 3.4: TERMODINÂMICA E APLICA... Prof. Paulo Seleglim Jr. / Universidade de São Paulo Segunda-feira das 16 - 18h00 ...
SEM0233: TERMODINÂMICA E APLICAÇÕES DE ENGENHARIA 22:56	Aula 3.3: TERMODINÂMICA E APLICA... Prof. Paulo Seleglim Jr. / Universidade de São Paulo Segunda-feira das 16 - 18h00 ...
SEM0233: TERMODINÂMICA E APLICAÇÕES DE ENGENHARIA 30:18	Aula 3.2: TERMODINÂMICA E APLICA... Prof. Paulo Seleglim Jr. / Universidade de São Paulo Segunda-feira das 16 - 18h00 ...
SEM0233: TERMODINÂMICA E APLICAÇÕES DE ENGENHARIA 52:39	Aula 3.1: TERMODINÂMICA E APLICA... Prof. Paulo Seleglim Jr. / Universidade de São Paulo Segunda-feira das 16 - 18h00 ...
SEM0233: TERMODINÂMICA E APLICAÇÕES DE ENGENHARIA 1:43:59	Aula 2.2: TERMODINÂMICA E APLICA... Prof. Paulo Seleglim Jr. / Universidade de São Paulo Segunda-feira das 16 - 18h00 ...



$$Q - W = \Delta E$$



Um tanque rígido e isolado, inicialmente evacuado, é conectado através de uma válvula a uma linha de fornecimento que transporta vapor a 1 MPa e 300°C. A válvula é então aberta e o vapor flui lentamente para o tanque até que a pressão atinja 1 MPa, momento em que a válvula é fechada. Determine a temperatura final do vapor no tanque. (Ex. 5 – 12)



$$Q - W + \sum_{in} m_k h_k - \sum_{out} m_k h_k = \Delta E = m_{fin} u_{fin} - m_{ini} u_{ini}$$

$$\Delta m h_{in} = m_{fin} u_{fin} \rightarrow h_{ini} = u_{fin} \quad pq \quad \Delta m = m_{fin}, m_{ini} = 0$$

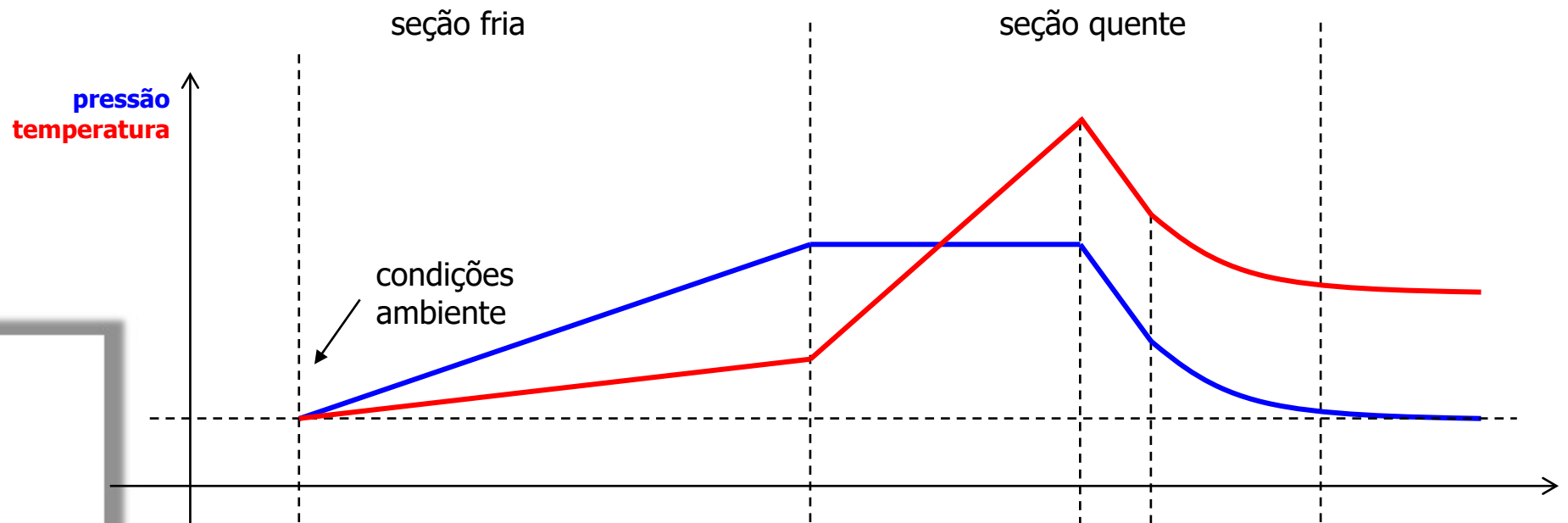
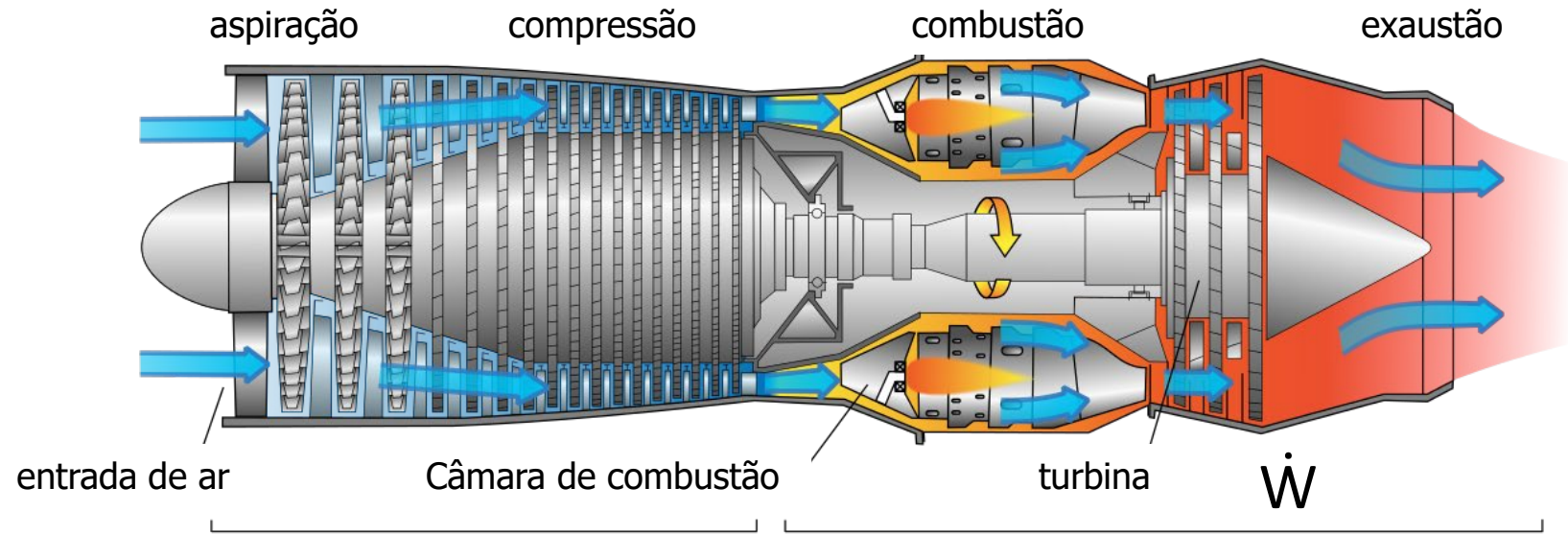
REFPROP (water) - NIST Reference Fluid Properties (DLL version 9,1)

File Edit Options Substance Calculate Plot Window Help Cautions

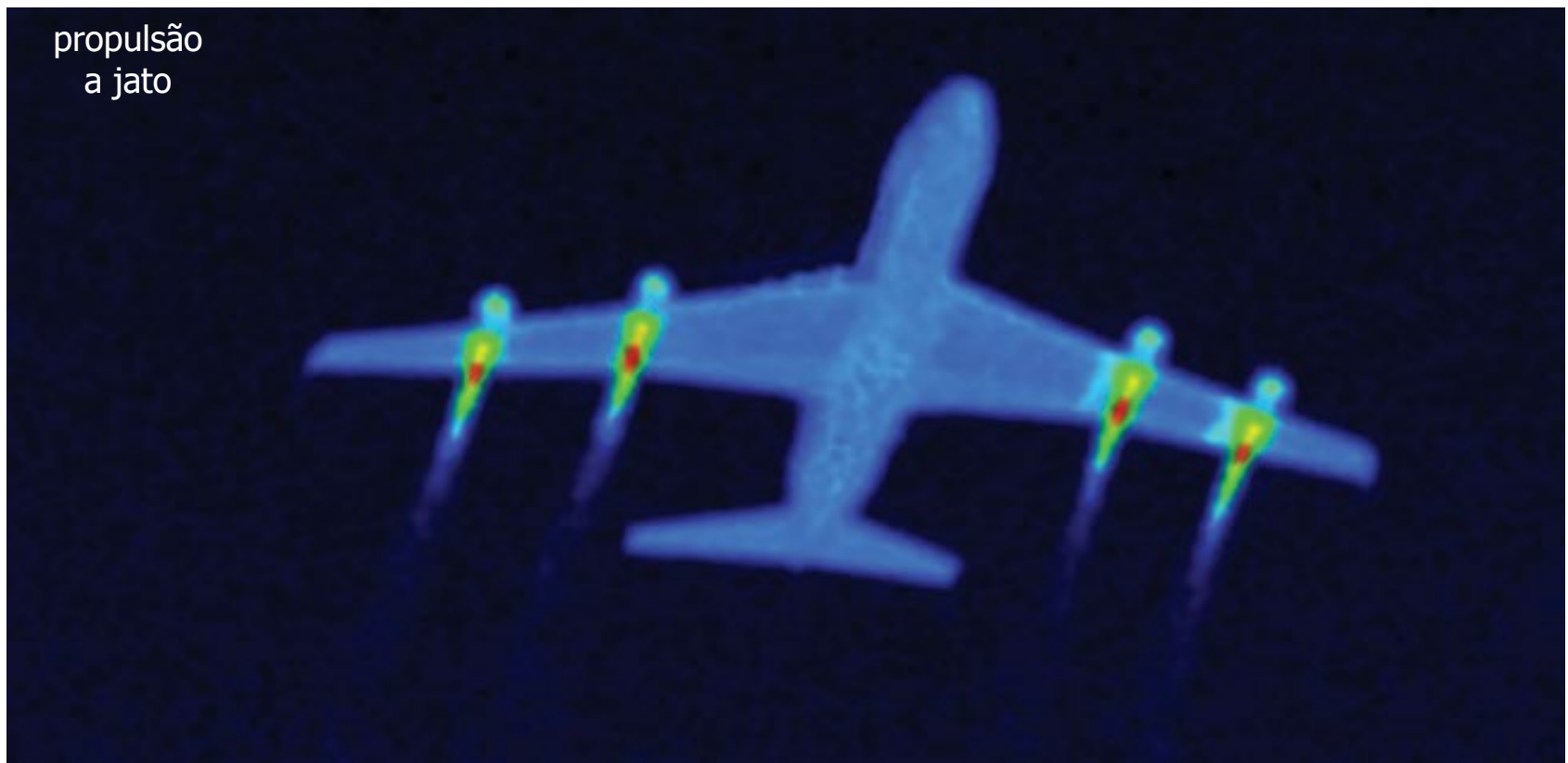
1: water: Specified state points

	Temperature (°C)	Pressure (MPa)	Density (kg/m ³)	Int. Energy (kJ/kg)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg-K)	Cp (kJ/kg-K)
1	300,0000	1,000000	3,876151	2793,645	3051,632	7,124624	2,142490
2	456,4467	1,000000	2,998442	3051,632	3385,139	7,639065	2,147769
3							

Aplicação: análise de motores de propulsão a jato e turboélice



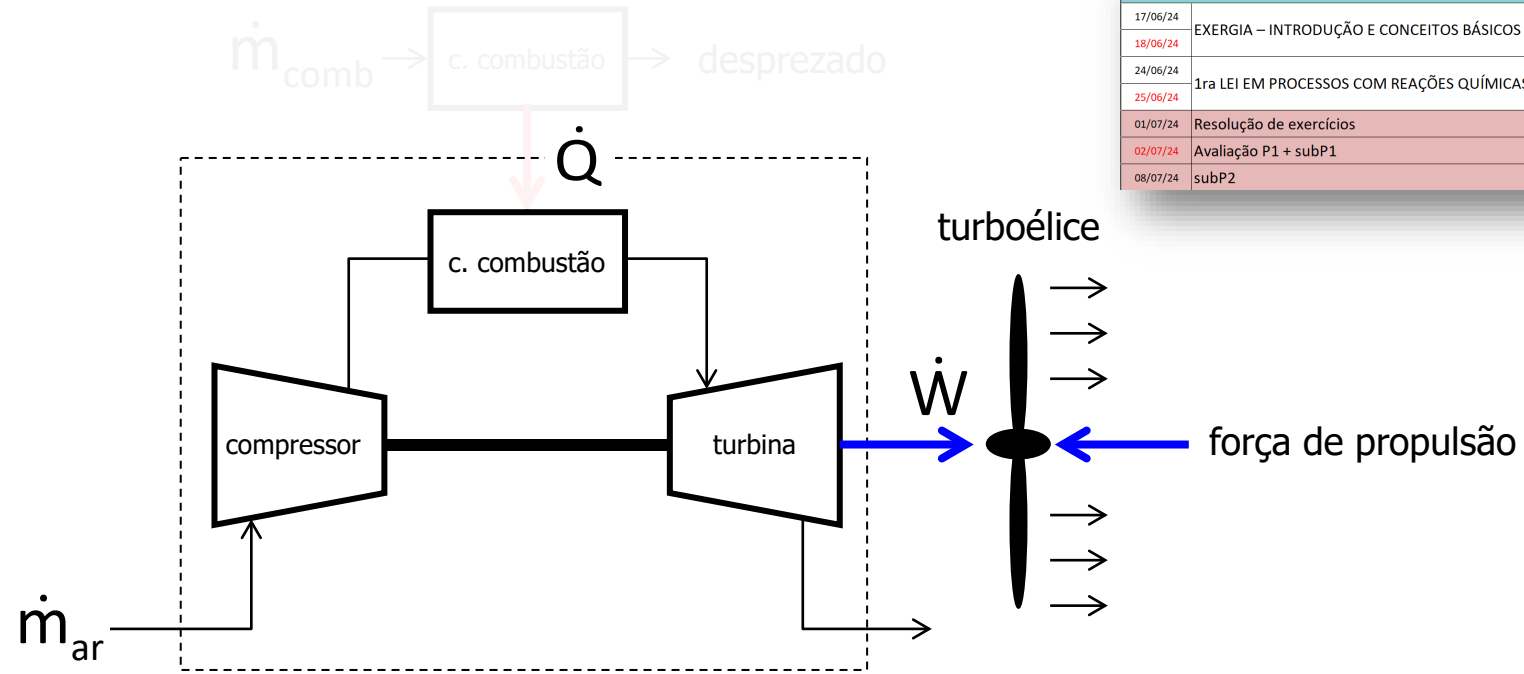
propulsão
a jato



turboélice



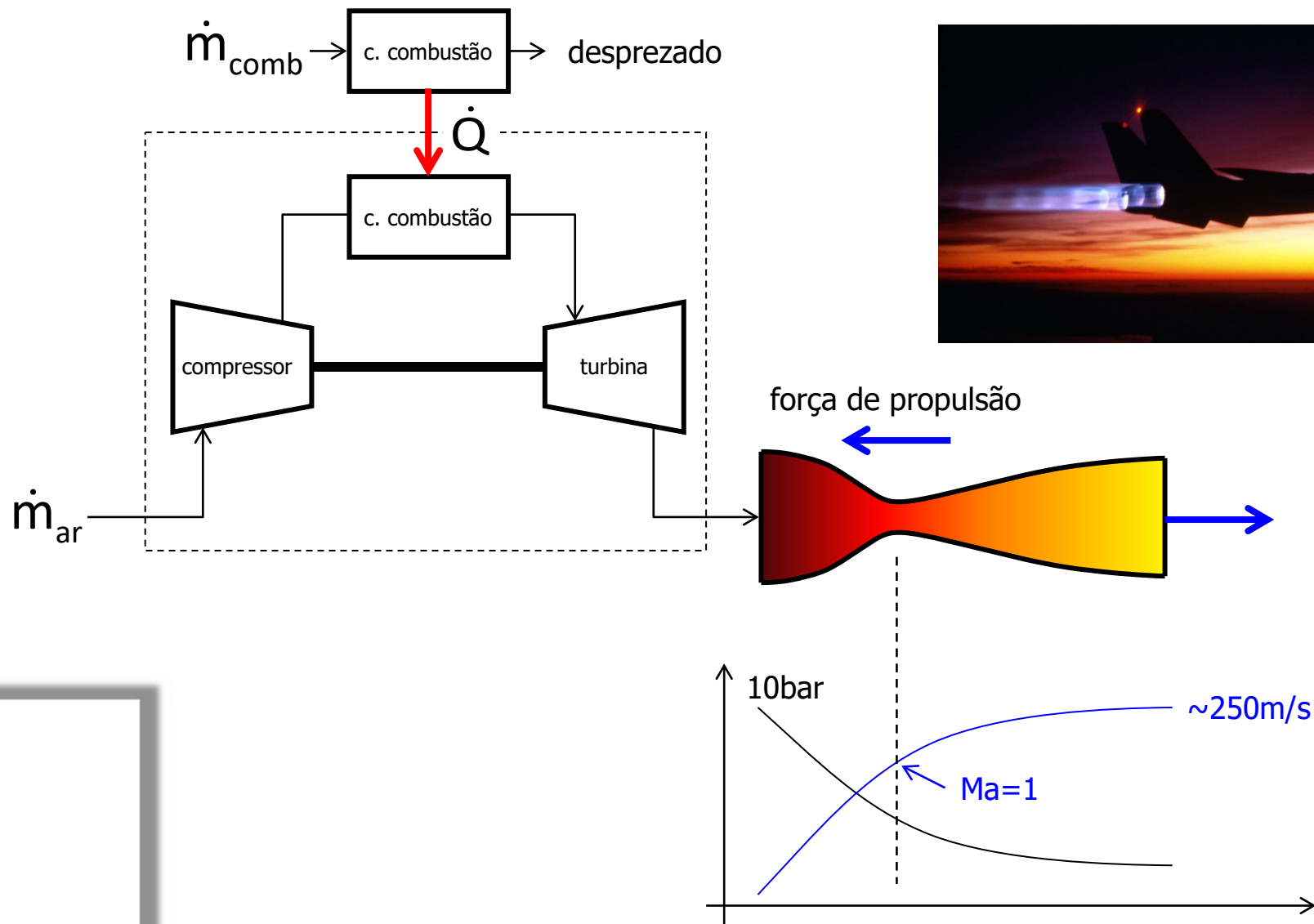
Modelo simplificado: motores turboélice



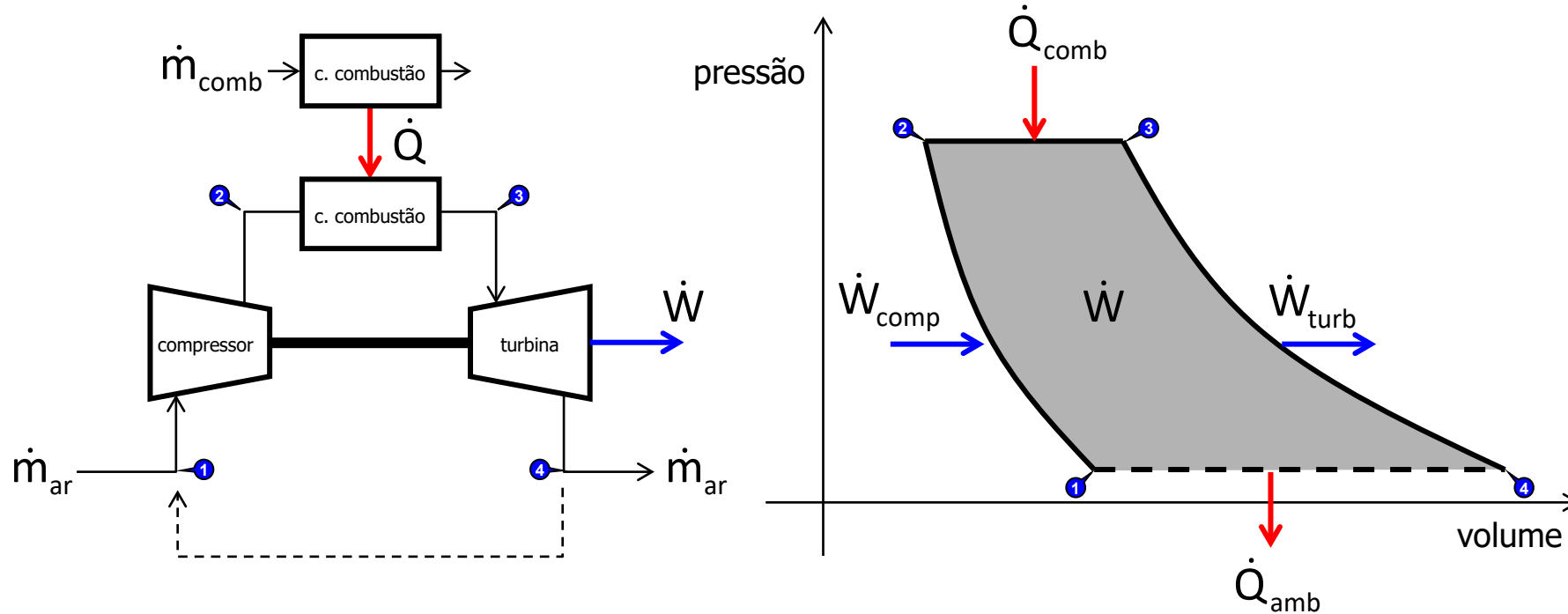
SEM0233 TERMODINÂMICA 1	
17/06/24	
18/06/24	EXERGIA – INTRODUÇÃO E CONCEITOS BÁSICOS / estudo de caso
24/06/24	1ra LEI EM PROCESSOS COM REAÇÕES QUÍMICAS / Lei de Hess e temperatura adiabática de chama
25/06/24	
01/07/24	Resolução de exercícios
02/07/24	Avaliação P1 + subP1
08/07/24	subP2



Modelo simplificado: motores a jato

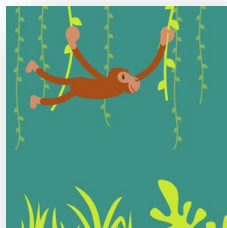


Análise termodinâmica – ciclo de Brayton

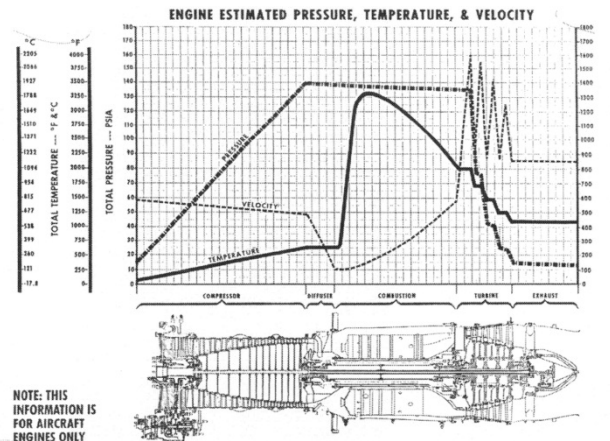
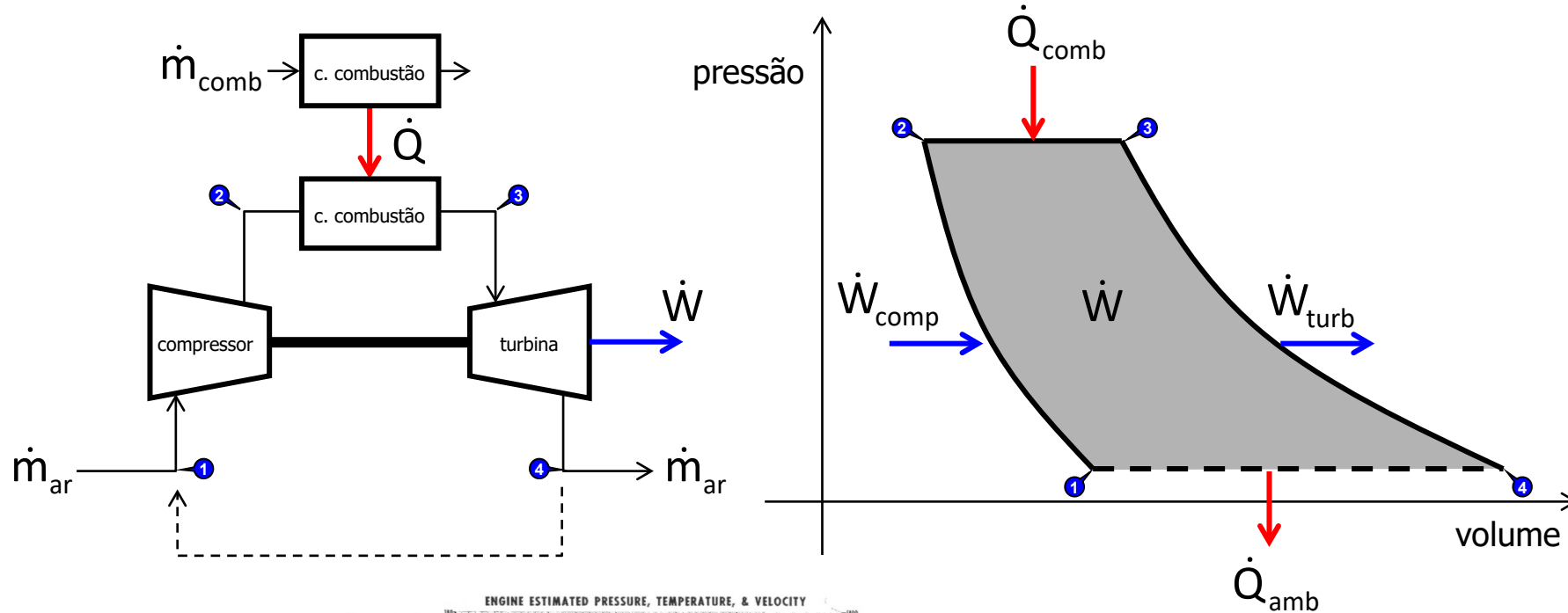


Análise termodinâmica

⇒ “PASSO ZERO”: Determinação das propriedades de estado



Análise termodinâmica – ciclo de Brayton



estimativas práticas

P2=10bar

T2=?????

P1=1bar

T1=25°C

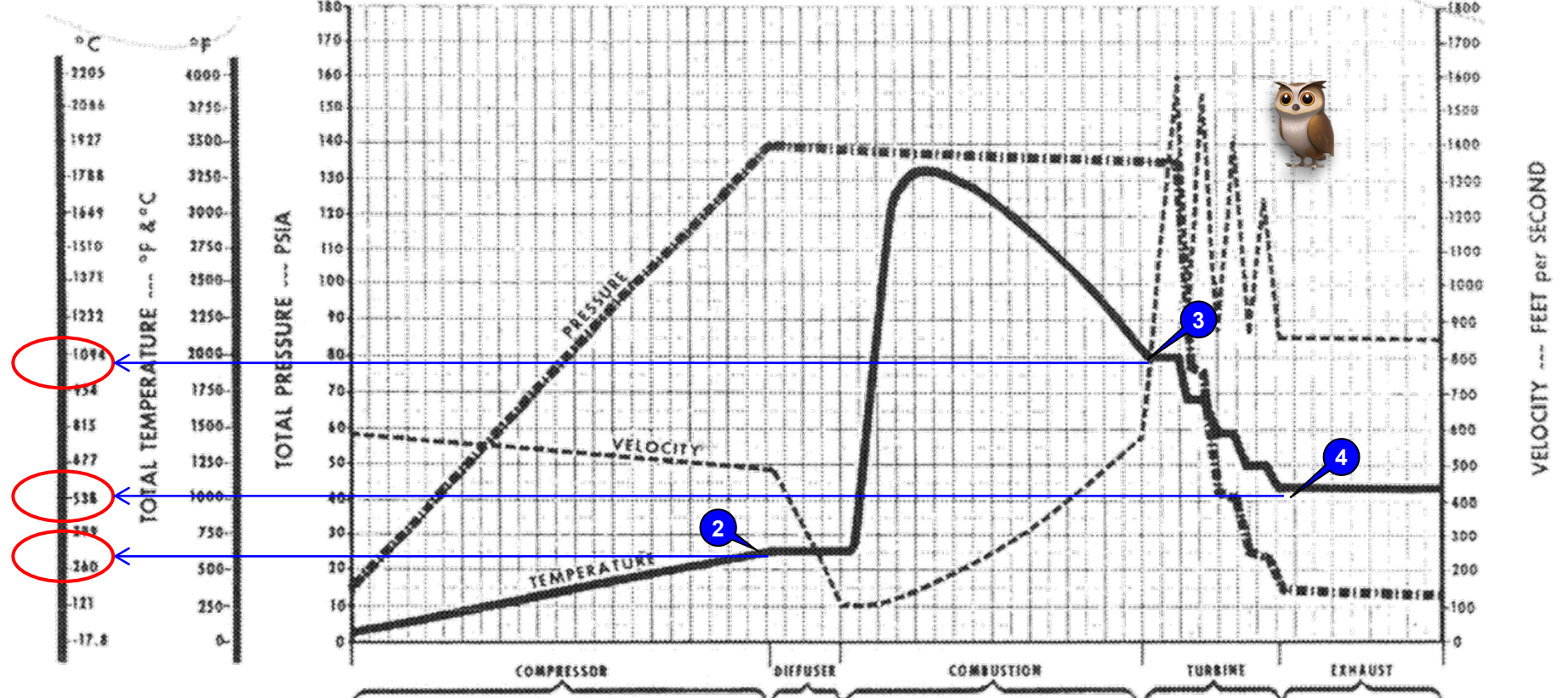
P3=10bar

T3=?????

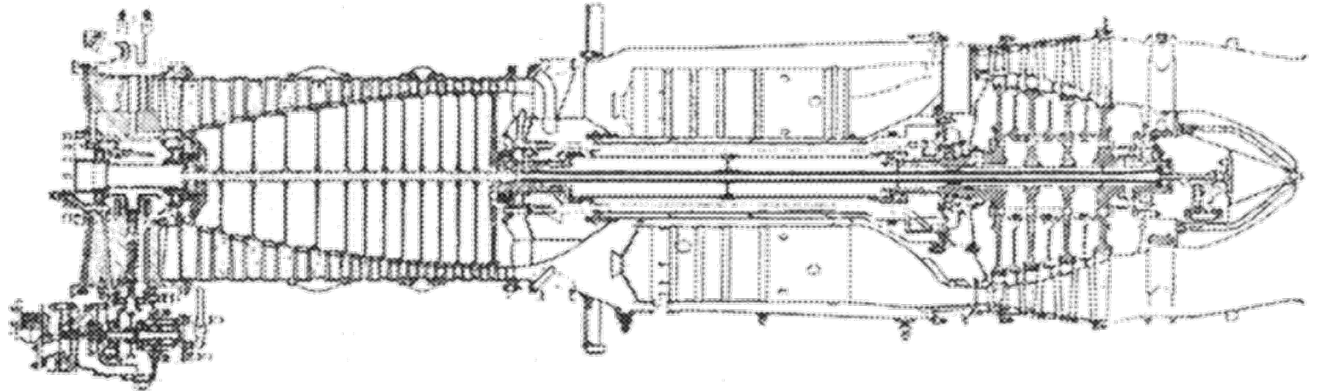
P4=1bar

T4=?????

ENGINE ESTIMATED PRESSURE, TEMPERATURE, & VELOCITY



NOTE: THIS INFORMATION IS FOR AIRCRAFT ENGINES ONLY





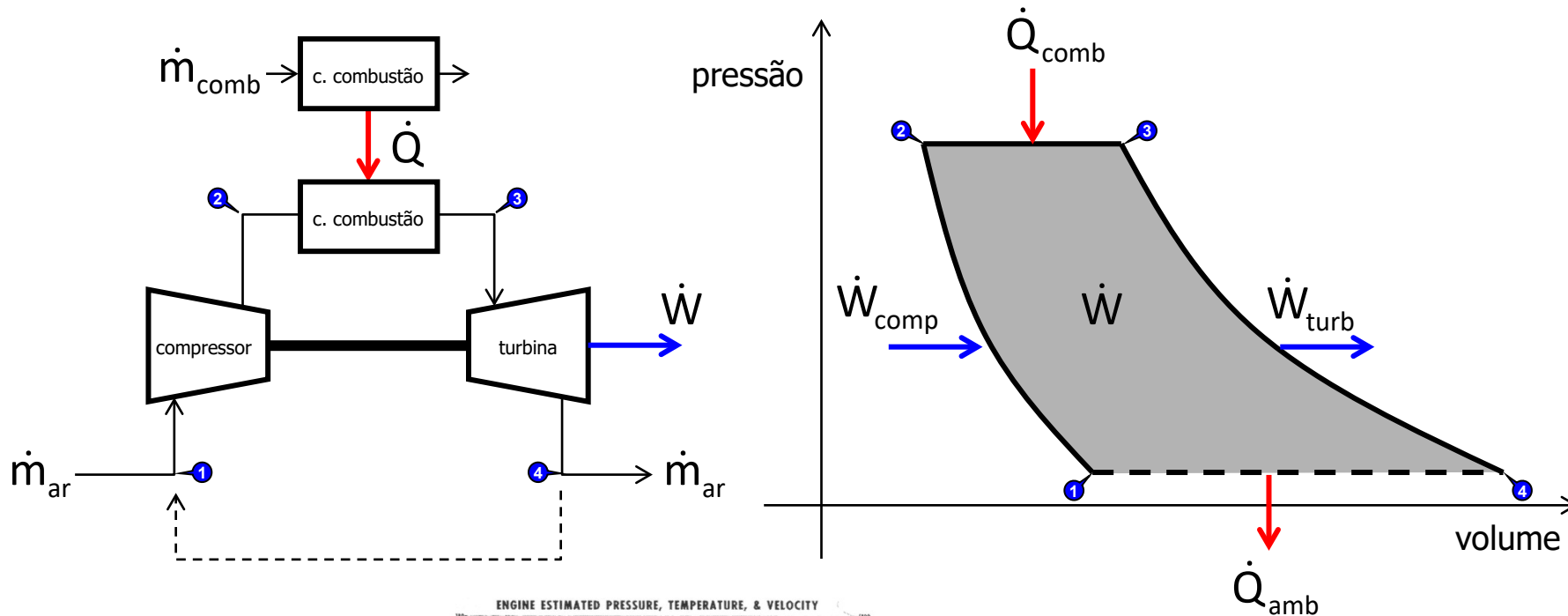
Q#2: por que a velocidade dos gases oscila a jusante da câmara de combustão ?

- A) Devido à compressibilidade do escoamento...
- B) Devido a movimentação das placas tectônicas...
- C) Porque a fronteira do sistema se desloca...
- D) Há conversão de energia térmica em cinética nos estatores da turbina ...
- E) É impossível saber...

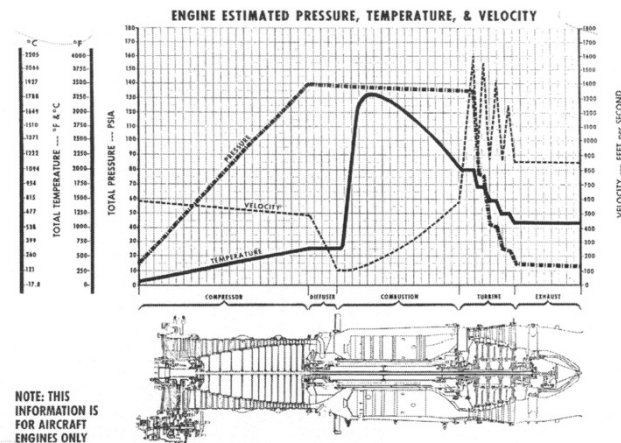
2

Estimativa das variáveis termodinâmicas...

Análise termodinâmica – ciclo de Brayton



Attention to Filler Words



estimativas práticas

$P_2 = 10 \text{ bar}$

$T_2 \approx 290^\circ\text{C}$

$P_1 = 1 \text{ bar}$

$T_1 = 25^\circ\text{C}$

$P_3 = 10 \text{ bar}$

$T_3 \approx 1094^\circ\text{C}$

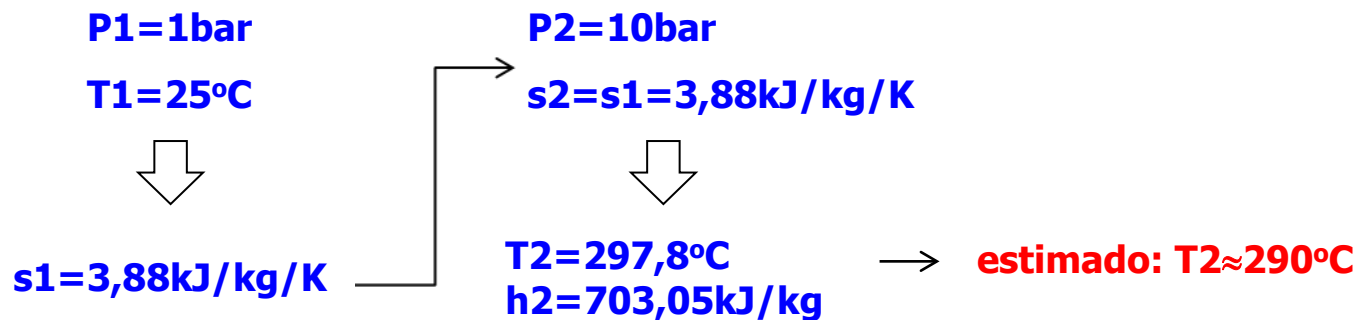
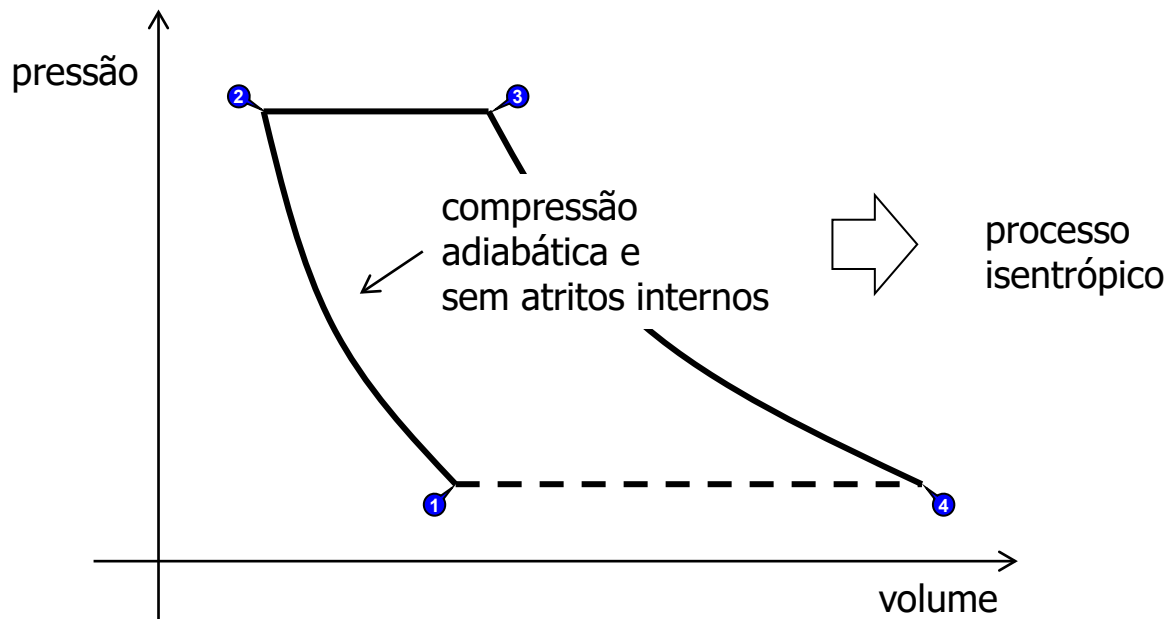
$P_4 = 1 \text{ bar}$

$T_4 \approx 570^\circ\text{C}$

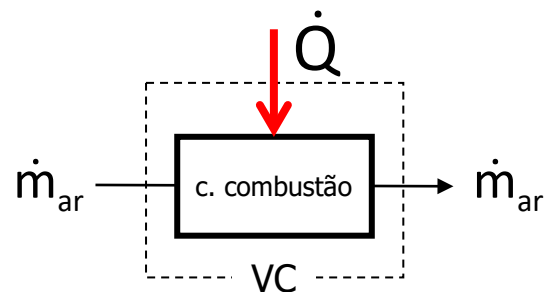
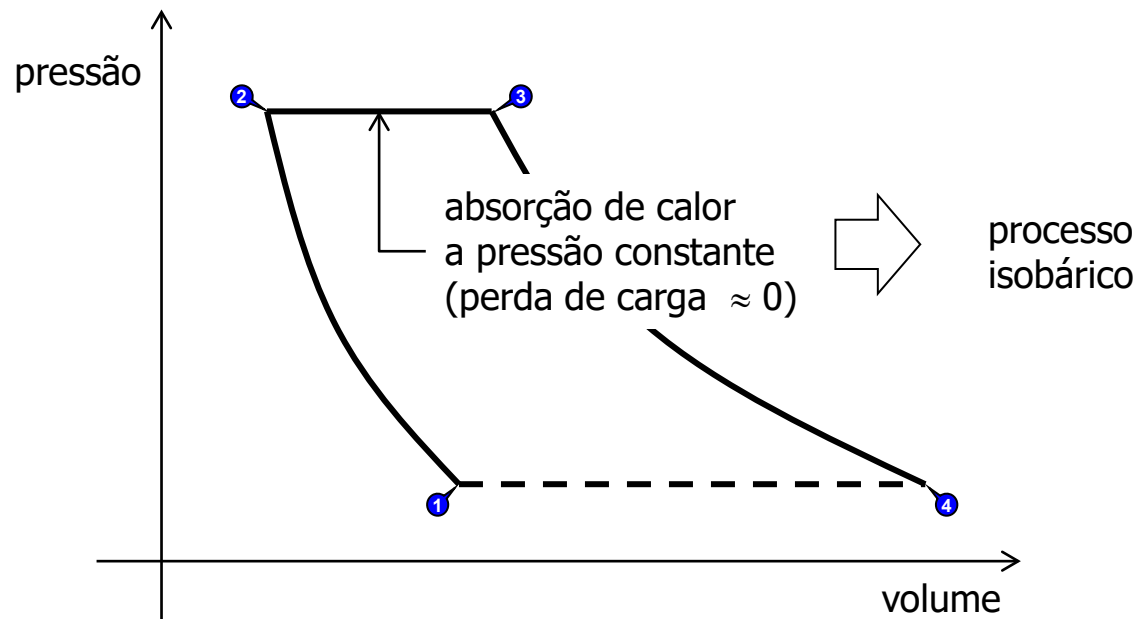
Determinação das propriedades em (2)



Asno de Buridan



Determinação das propriedades em (3)



$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_{sai} \dot{m}_k \theta_k - \sum_{entra} \dot{m}_k \theta_k$$

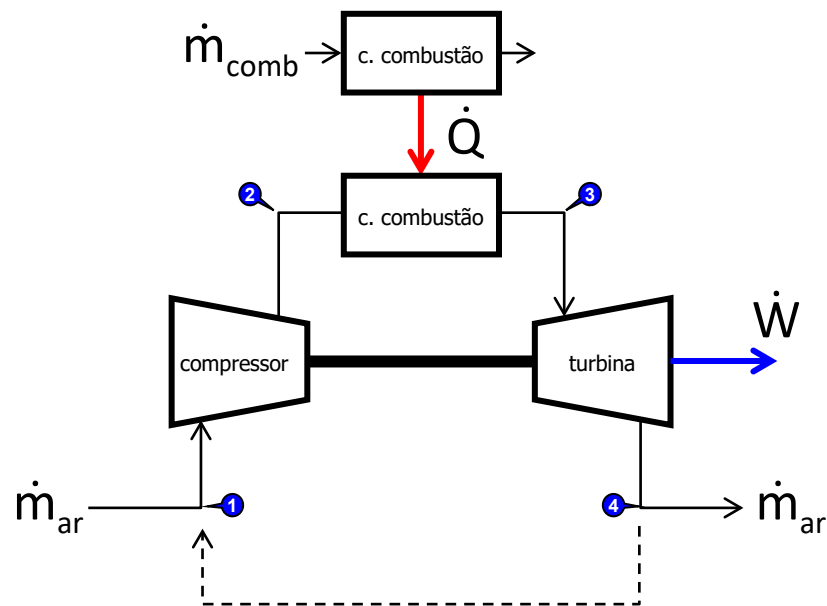
$$\dot{Q} = \dot{m}_{ar} \cdot \left[\left(h + \cancel{gz} + \cancel{\frac{v^2}{2}} \right)_3 - \left(h + \cancel{gz} + \cancel{\frac{v^2}{2}} \right)_2 \right]$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_{ar} \cdot (h_3 - h_2) \quad \Rightarrow \quad \dot{Q} / \dot{m}_{ar} = h_3 - h_2$$

Determinação das propriedades em (3)

$$\dot{Q} = \dot{m}_{\text{comb}} \cdot (\eta_{\text{comb}} \text{PCI}_{\text{comb}}) = \dot{m}_{\text{ar}} \cdot (h_3 - h_2)$$

$$h_3 = h_2 + \dot{m}_{\text{comb}} / \dot{m}_{\text{ar}} \cdot \eta_{\text{comb}} \cdot \text{PCI}_{\text{comb}}$$

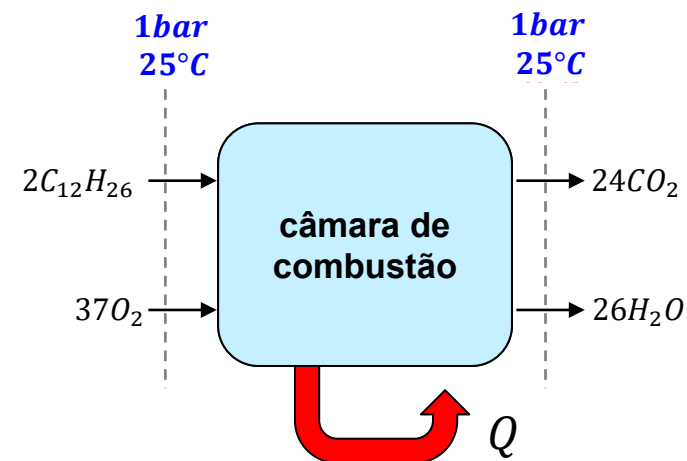
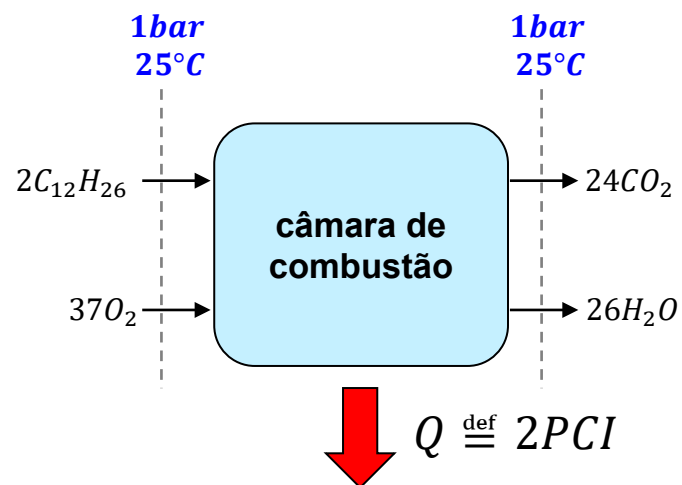
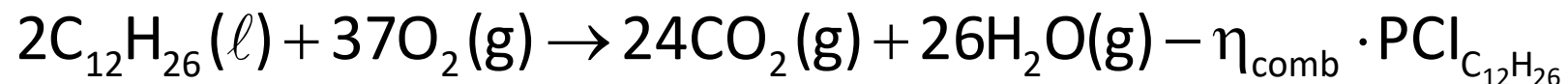


Determinação das propriedades em (3)

$$\dot{Q} = \dot{m}_{\text{comb}} \cdot (\eta_{\text{comb}} \text{PCI}_{\text{comb}}) = \dot{m}_{\text{ar}} \cdot (h_3 - h_2)$$

$$h_3 = h_2 + \dot{m}_{\text{comb}} / \dot{m}_{\text{ar}} \cdot \eta_{\text{comb}} \cdot \text{PCI}_{\text{comb}}$$

Equação estequiométrica de combustão

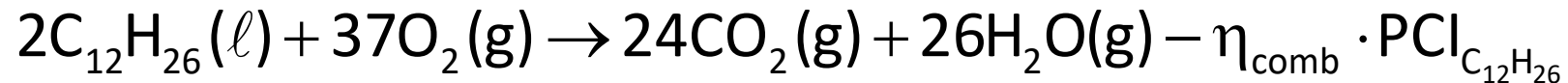


Determinação das propriedades em (3)

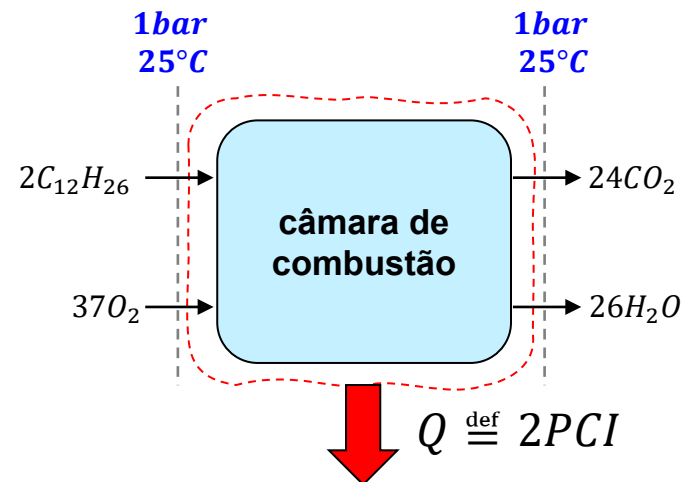
$$\dot{Q} = \dot{m}_{\text{comb}} \cdot (\eta_{\text{comb}} \text{PCI}_{\text{comb}}) = \dot{m}_{\text{ar}} \cdot (h_3 - h_2)$$

$$h_3 = h_2 + \dot{m}_{\text{comb}} / \dot{m}_{\text{ar}} \cdot \eta_{\text{comb}} \cdot \text{PCI}_{\text{comb}}$$

Equação estequiométrica de combustão



últimas aulas...



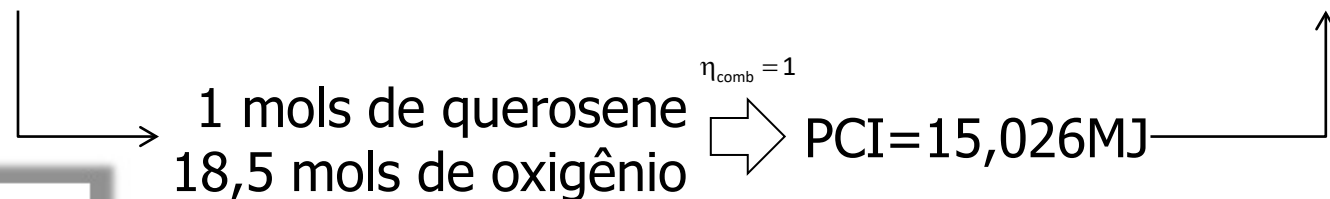
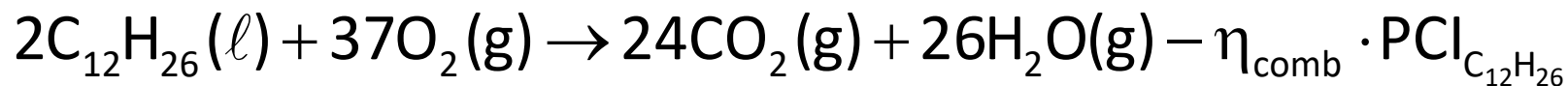
$$\left\{ \begin{array}{l} 2H_{\text{C}_{12}\text{H}_{26}} + 37H_{\text{O}_{2,g}} = 24H_{\text{CO}_2} + 26H_{\text{H}_2\text{O}} - Q \\ Q = 24H_{\text{CO}_2} + 26H_{\text{H}_2\text{O}} - 2H_{\text{C}_{12}\text{H}_{26}} - 37H_{\text{O}_{2,g}} \\ Q = \dots = 30,52 \text{MJoules} \end{array} \right.$$

Determinação das propriedades em (3)

$$\dot{Q} = \dot{m}_{\text{comb}} \cdot (\eta_{\text{comb}} \text{PCI}_{\text{comb}}) = \dot{m}_{\text{ar}} \cdot (h_3 - h_2)$$

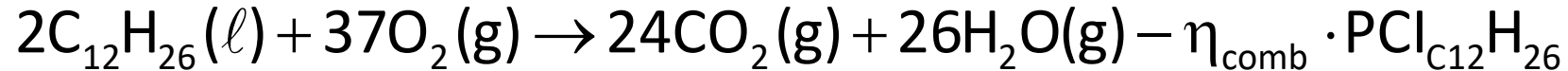
$$h_3 = h_2 + \dot{m}_{\text{comb}} / \dot{m}_{\text{ar}} \cdot \eta_{\text{comb}} \cdot \text{PCI}_{\text{comb}}$$

Equação estequiométrica de combustão



$$M_{\text{C}_{12}\text{H}_{26}} = 170,3\text{g/mol} \Rightarrow \text{PCI} = \frac{15,026\text{MJ}}{2 \cdot 170,3 \cdot 10^{-3}\text{kg}} = 44,19\text{MJ/kg}$$

Determinação das propriedades em (3)



Les SLIDES suivantes sont
ANTI-PÉDAGOGIQUE

32,0g/mol → 1,184kg de oxigênio

170,3g/mol → 0,341kg de querosene

Cálculo da massa de ar para combustão estequiométrica

Major constituents of dry air, by volume^[6]

Gas		Volume ^(A)	
Name	Formula	in ppmv ^(B)	in %
Nitrogen	N ₂	780,840	78.084
Oxygen	O ₂	209,460	20.946
Argon	Ar	9,340	0.9340
Carbon dioxide	CO ₂	397	0.0397
Neon	Ne	18.18	0.001818
Helium	He	5.24	0.000524
Methane	CH ₄	1.79	0.000179
Not included in above dry atmosphere:			
Water vapor ^(C)	H ₂ O	10–50,000 ^(D)	0.001%–5% ^(D)

notes:
^(A) volume fraction is equal to mole fraction for ideal gas only, also see [volume \(thermodynamics\)](#)
^(B) ppmv: parts per million by volume
^(C) Water vapor is about 0.25% by mass over full atmosphere
^(D) Water vapor strongly varies locally^[4]

$$0,78084 \cdot N_2 + 0,20946 \cdot O_2 + 0,00934 \cdot Ar = 1 \text{ mol}$$

$$\begin{array}{ccc} \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ 28 \text{ g/mol} & 32 \text{ g/mol} & 40 \text{ g/mol} \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ 21,86 \text{ g} & 6,70 \text{ g} & 0,37 \text{ g} \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ 0,7555 \text{ kg} & + & 0,2316 \text{ kg} & + & 0,0129 \text{ kg} & = & 1 \text{ kg} \end{array}$$

Determinação das propriedades em (3)

Cálculo da massa de ar que contém 1,181kg de oxigênio

1 kg de ar \longrightarrow 0,232kg de oxigênio
x kg de ar \longrightarrow 1,184kg de oxigênio \Rightarrow 5,112kg de ar

Cálculo da razão ar/combustível

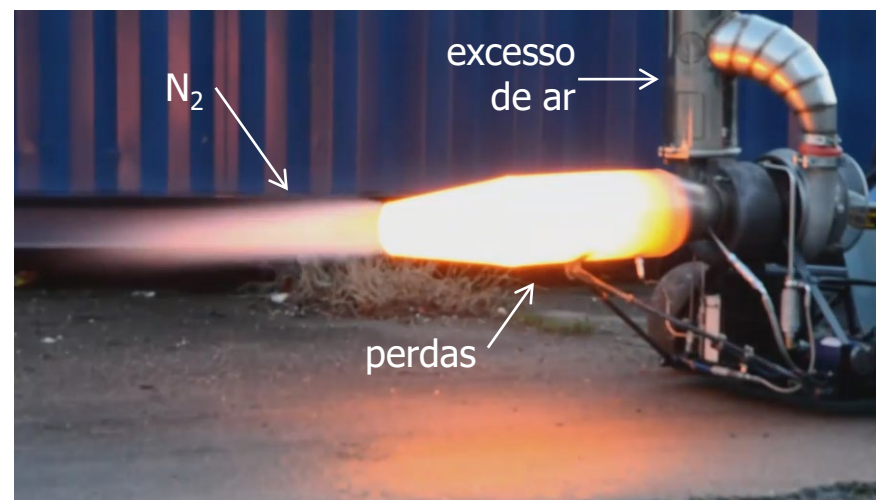
$$\frac{\dot{m}_{\text{comb}}}{\dot{m}_{\text{ar}}} = \frac{0,341\text{kg}}{5,112\text{kg}} = 0,066705$$

Rendimento da combustão

$$\eta_{\text{comb}} = \text{PCI} / \dot{Q}_{\text{útil}}$$

$$\eta_{\text{comb}}^{\text{arb}} = 0,333$$

A ser elaborado em
uma aula
específica...



Determinação das propriedades em (3)

Cálculo do salto entálpico

$$h_3 - h_2 = \dot{m}_{\text{comb}} / \dot{m}_{\text{ar}} \cdot \eta_{\text{comb}} \cdot \text{PCI}_{\text{comb}}$$

$$h_3 - 703,05 \text{ kJ/kg} = 0,066705 \cdot 0,333 \cdot 44,19 \cdot 10^3 \text{ kJ/kg}$$

$$h_3 = 1684,644 \text{ kJ/kg}$$

P3=10bar

h3=1684,644kJ/kg

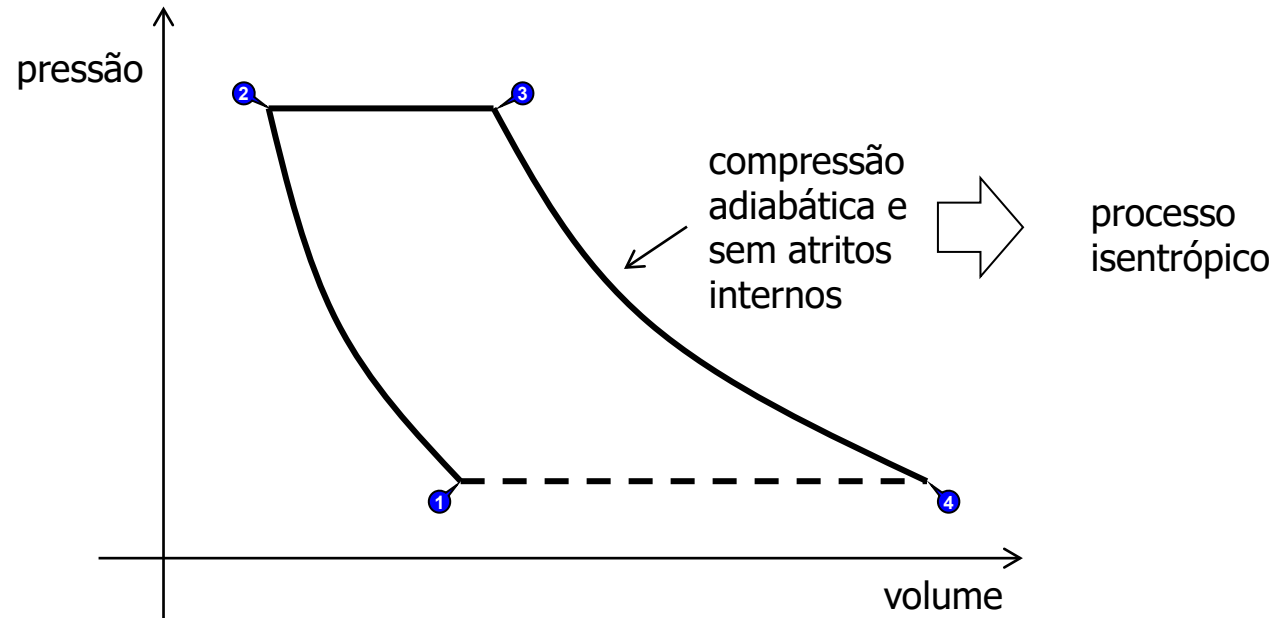


T3=1161,6°C

s3=4,9208kJ/kg/K

→ **estimado: T3≈1094°C**

Determinação das propriedades em (4)



$P_3 = 10\text{bar}$

$h_3 = 1684,644\text{kJ/kg}$



$T_3 = 1161,6^\circ\text{C}$

$s_3 = 4,9208\text{kJ/kg/K}$

$P_4 = 1\text{bar}$

$s_4 = 4,9208\text{kJ/kg/K}$



$T_4 = 535,9^\circ\text{C}$

$h_4 = 958,6\text{kJ/kg}$

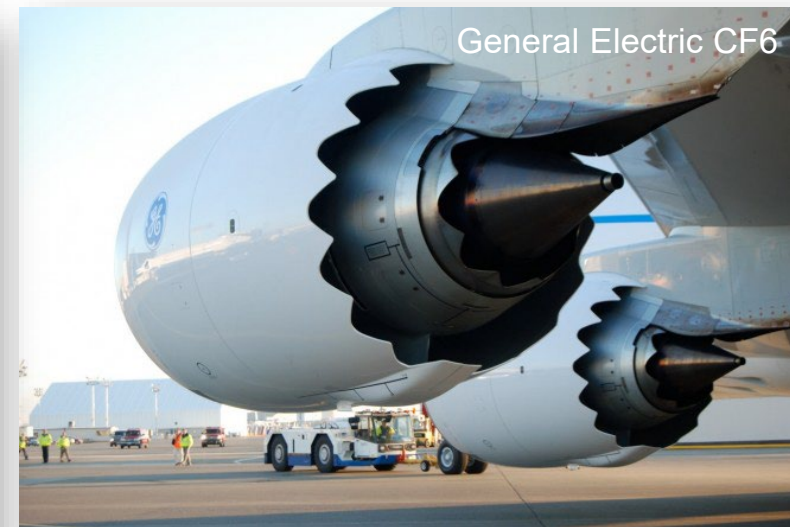
→ **estimado: $T_3 \approx 570^\circ\text{C}$**

Comparando com o Boeing 747 ...

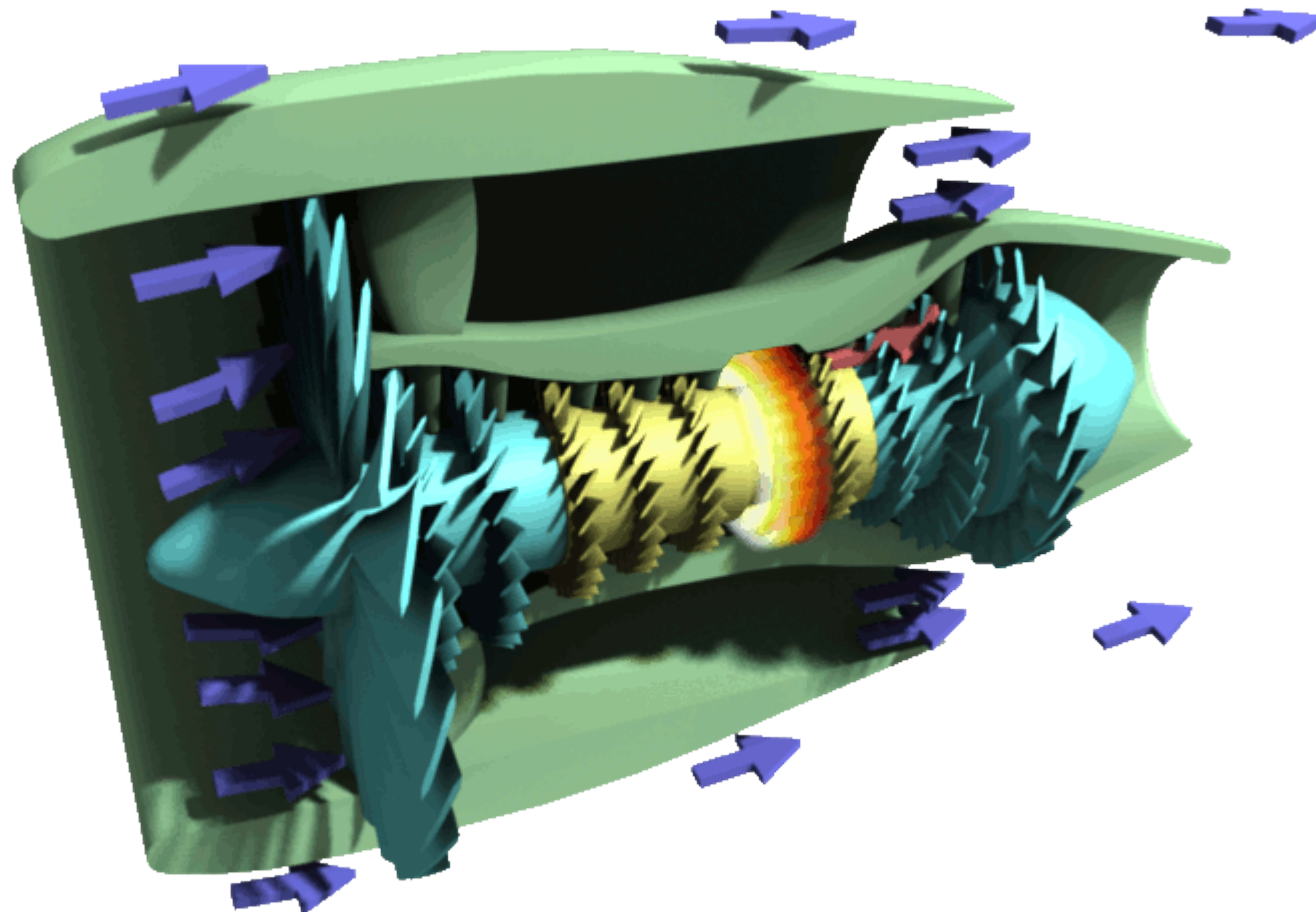
Configurações e motores que equipam o Boeing 747

Aplicação:
análise
termodinâmica
do **Boeing 747**

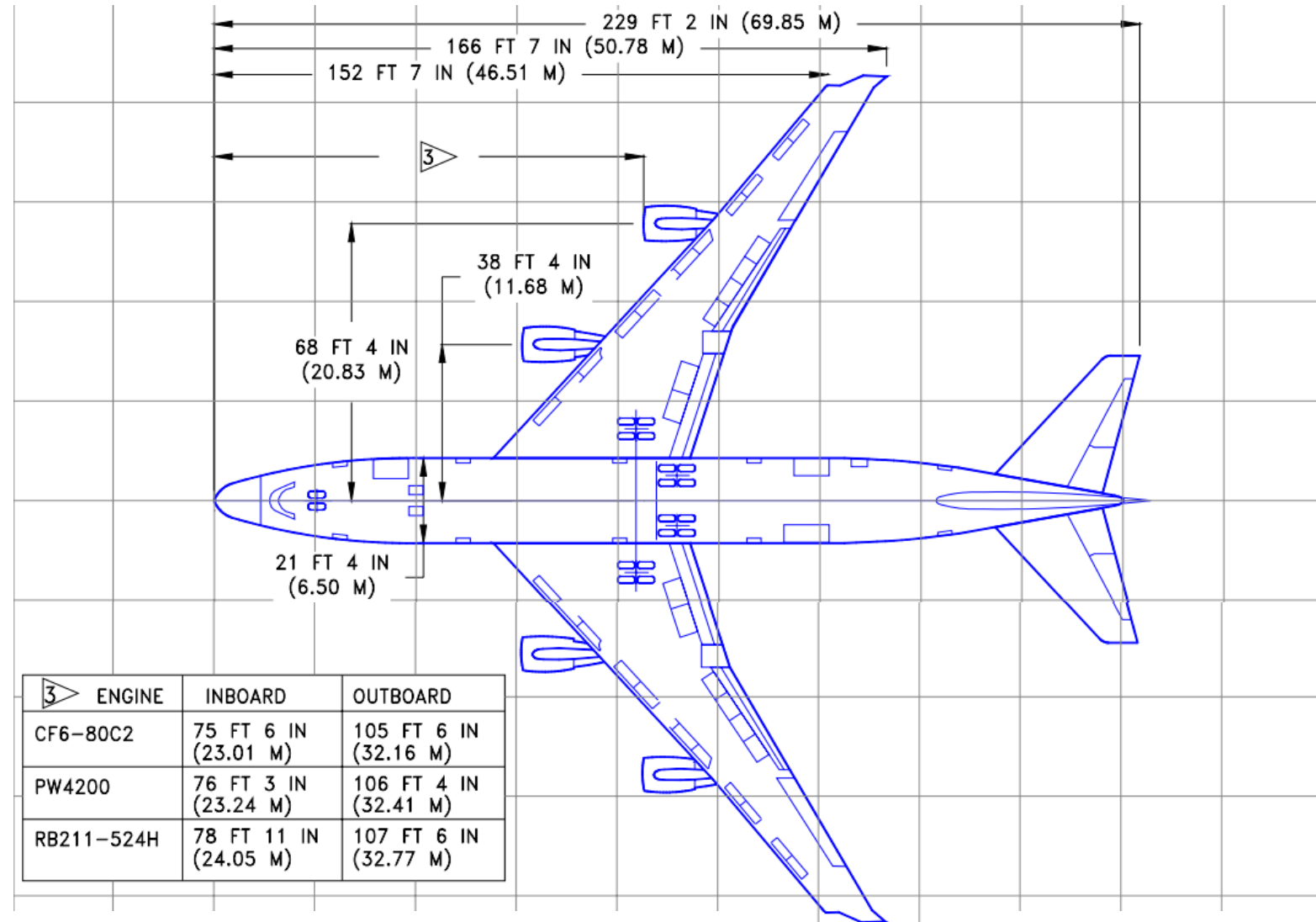
1ra Lei
regime
permanente



Configurações e motores que equipam o Boeing 747

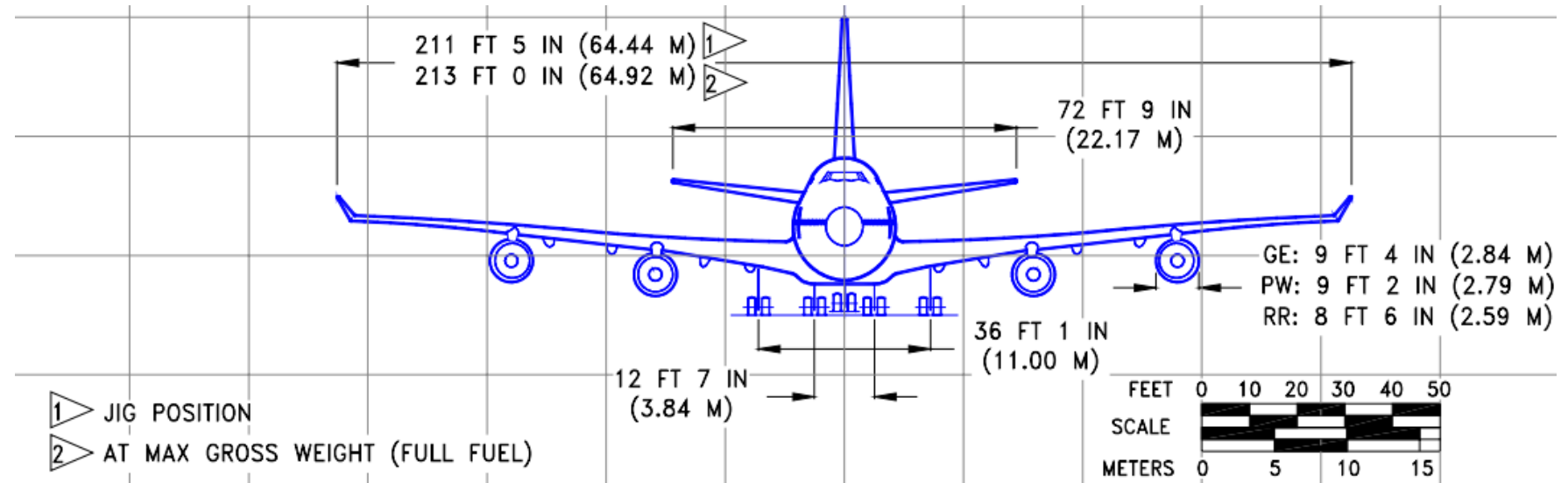
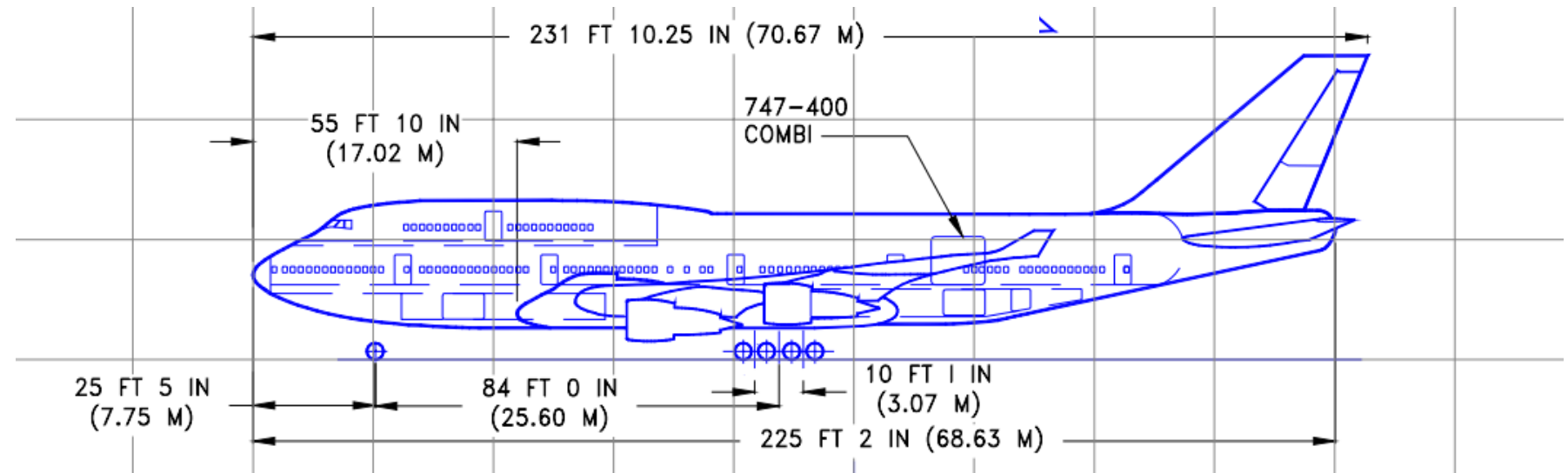


Configurações e motores que equipam o Boeing 747



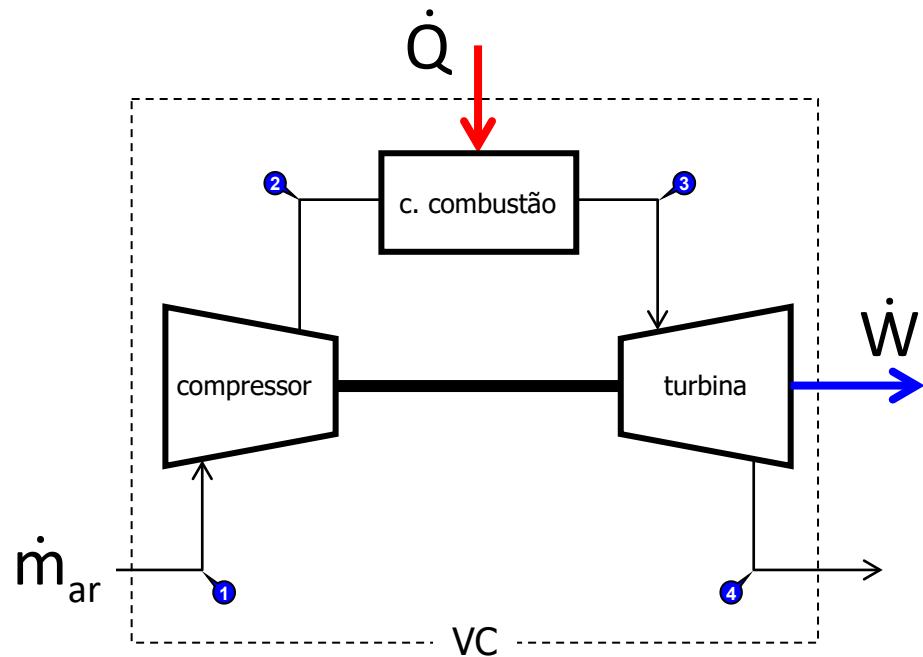
Attention to
Filler Words

Configurações e motores que equipam o Boeing 747



Configurações e motores que equipam o Boeing 747

Measurement	747-100B	747-200B	747-300	747-400 747-400ER	747-8I
Maximum cargo capacity	6,190 ft ³ (175.3 m ³) = 30xLD1			6,025 ft ³ (170.5 m ³) ER: 5,599 ft ³ (158.6 m ³)	5,705 ft ³ (161.5 m ³)
Operating empty weight	358,000 lb (162,400 kg)	383,000 lb (174,000 kg)	392,800 lb (178,100 kg)	393,263 lb (178,756 kg) ER: 406,900 lb (184,600 kg)	472,900 lb (214,503 kg)
Maximum takeoff weight	735,000 lb (333,390 kg)	833,000 lb (377,842 kg)		875,000 lb (396,890 kg) ER: 910,000 lb (412,775 kg)	987,000 lb (447,696 kg)
Cruising speed (at 35,000 ft (11,000 m) altitude)	Mach 0.84 (555 mph, 893 km/h, 481 knots)			Mach 0.85 (567 mph, 913 km/h, 493 kn) ER: Mach 0.855 (570 mph, 918 km/h, 495 kn)	Mach 0.855 (570 mph, 918 km/h, 495 kn)
Maximum speed	Mach 0.89 (594 mph, 955 km/h, 516 kn)			Mach 0.92 (614 mph, 988 km/h, 533 kn)	
Maximum fuel capacity	48,445 U.S. gal (40,339 imp gal/183,380 L)	52,410 U.S. gal (43,640 imp gal/199,158 L)		57,285 U.S. gal (47,700 imp gal/216,840 L) ER: 63,705 U.S. gal (53,045 imp gal/241,140 L)	64,225 U.S. gal (53,478 imp gal/243,120 L)
Engine models (x 4)	PW JT9D-7A/-7F/-7J RR RB211-524B2 GE CF6-45A2 (747SR)	PW JT9D-7R4G2 GE CF6-50E2 RR RB211-524D4	PW JT9D-7R4G2 GE CF6-80C2B1 RR RB211-524D4	PW 4062 GE CF6-80C2B5F RR RB211-524G/H ER: GE CF6-80C2B5F	GENx-2B67
Engine thrust (per engine) estático	PW 46,500 lbf (207 kN) RR 50,100 lbf (223 kN)	PW 54,750 lbf (244 kN) GE 52,500 lbf (234 kN) RR 53,000 lbf (236 kN)	PW 54,750 lbf (244 kN) GE 55,640 lbf (247 kN) RR 53,000 lbf (236 kN)	PW 63,300 lbf (282 kN) GE 62,100 lbf (276 kN) RR 59,500/60,600 lbf (265/270 kN) ER: GE 62,100 lbf (276 kN)	66,500 lbf (296 kN)



Consumo de um motor: 0,8kg/s de querosene

$$\dot{Q} = \dot{m}_{\text{comb}} \cdot (\eta_{\text{comb}} \text{PCI}_{\text{comb}})$$

$$\dot{Q} = 0,8 \text{kg/s} \cdot (0,333 \cdot 44,19 \text{MJ/kg})$$

$$\dot{Q} = 11,7722 \text{MW}$$

Inventário de energia no volume de controle

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}_{\text{ar}} \cdot \left[\left(h + \cancel{gz} + \frac{\cancel{v^2}}{2} \right)_s - \left(h + \cancel{gz} + \frac{\cancel{v^2}}{2} \right)_e \right]$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}_{\text{ar}} \cdot (h_4 - h_1) \quad m_{\text{C}_{12}\text{H}_{26}} = 0,066705 \cdot m_{\text{ar}}$$

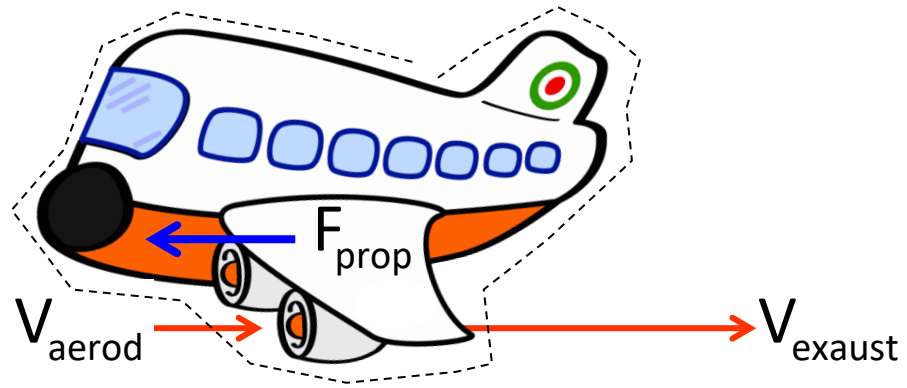
$$11,7722 \text{MW} - \dot{W} = \frac{0,8 \text{kg/s}}{0,066705} \cdot (958,6 - 424,5) \cdot 10^{-3} \text{MJ/kg}$$

$$\dot{W} = 5,367 \text{MW}$$

$$\eta = \dot{W} / \dot{Q}$$

$$\eta = 45,6\%$$

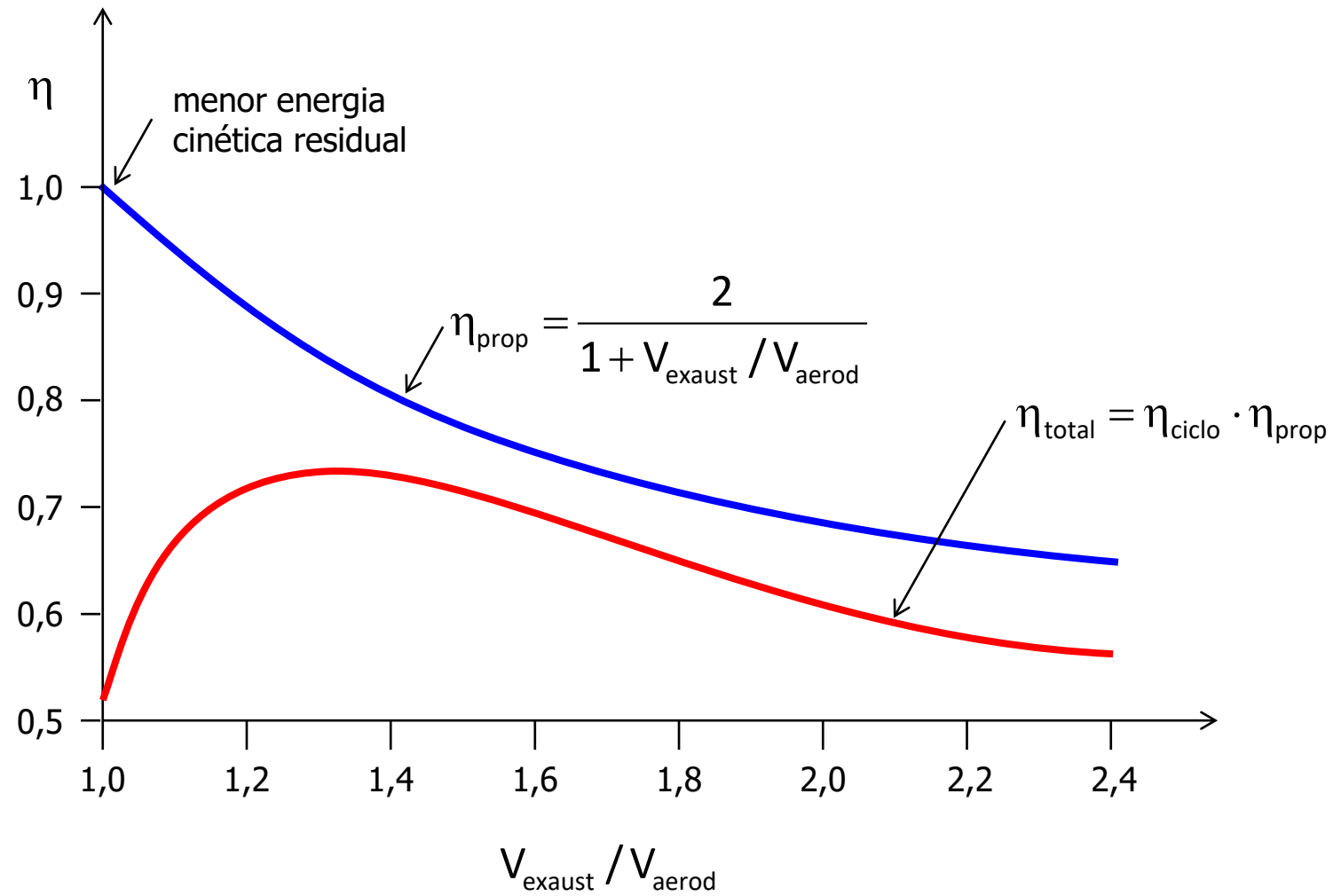
Attention to
Filler Words



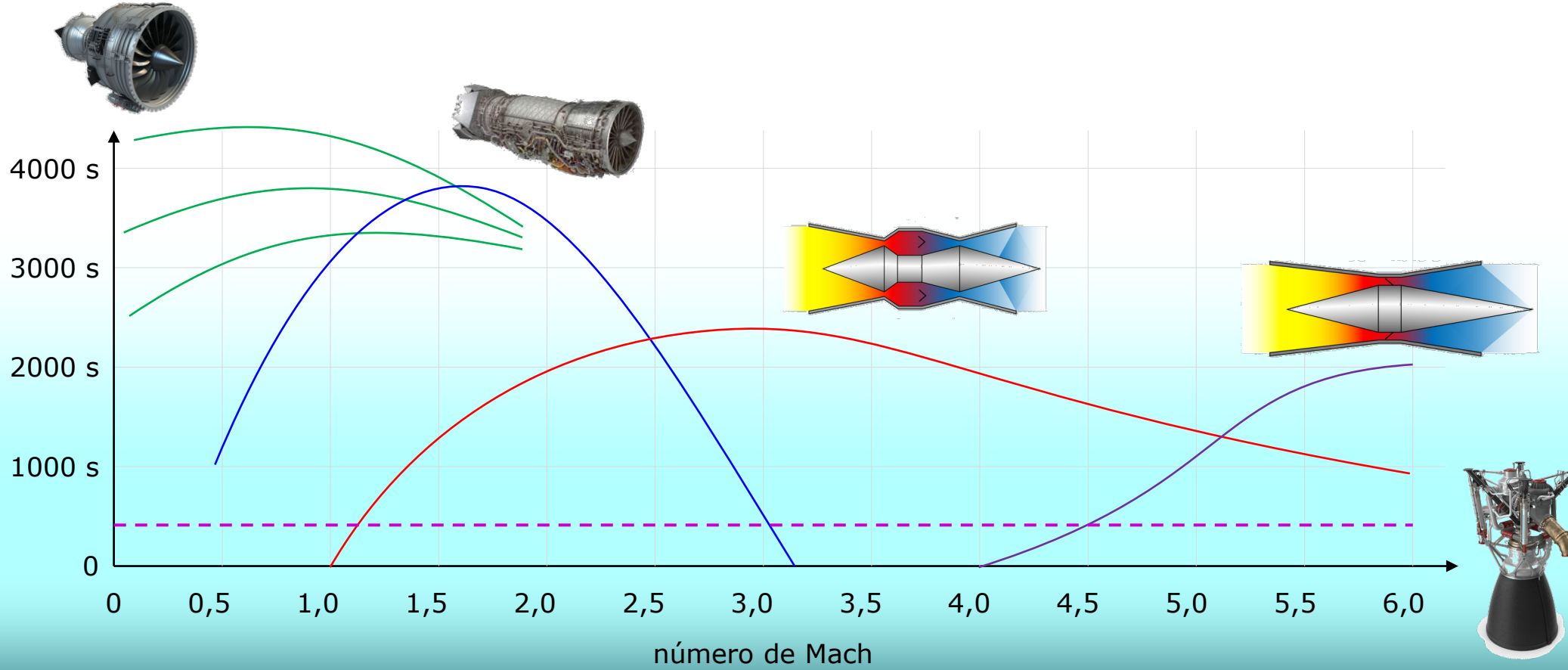
$$\eta_{\text{prop}} = \frac{F_{\text{prop}} \cdot V_{\text{aerod}}}{\frac{\dot{m}_{\text{exhaust}} V_{\text{exhaust}}^2}{2} - \frac{\dot{m}_{\text{aspirac}} V_{\text{aerod}}^2}{2}}$$

$$F_{\text{prop}} \cong \dot{m}_{\text{ar}} (V_{\text{exhaust}} - V_{\text{aerod}}) \quad \dot{m}_{\text{aspirac}} \cong \dot{m}_{\text{ar}} \cong \dot{m}_{\text{exhaust}}$$

$$\eta_{\text{prop}} = \frac{2}{1 + \frac{V_{\text{exhaust}}}{V_{\text{aerod}}}}$$

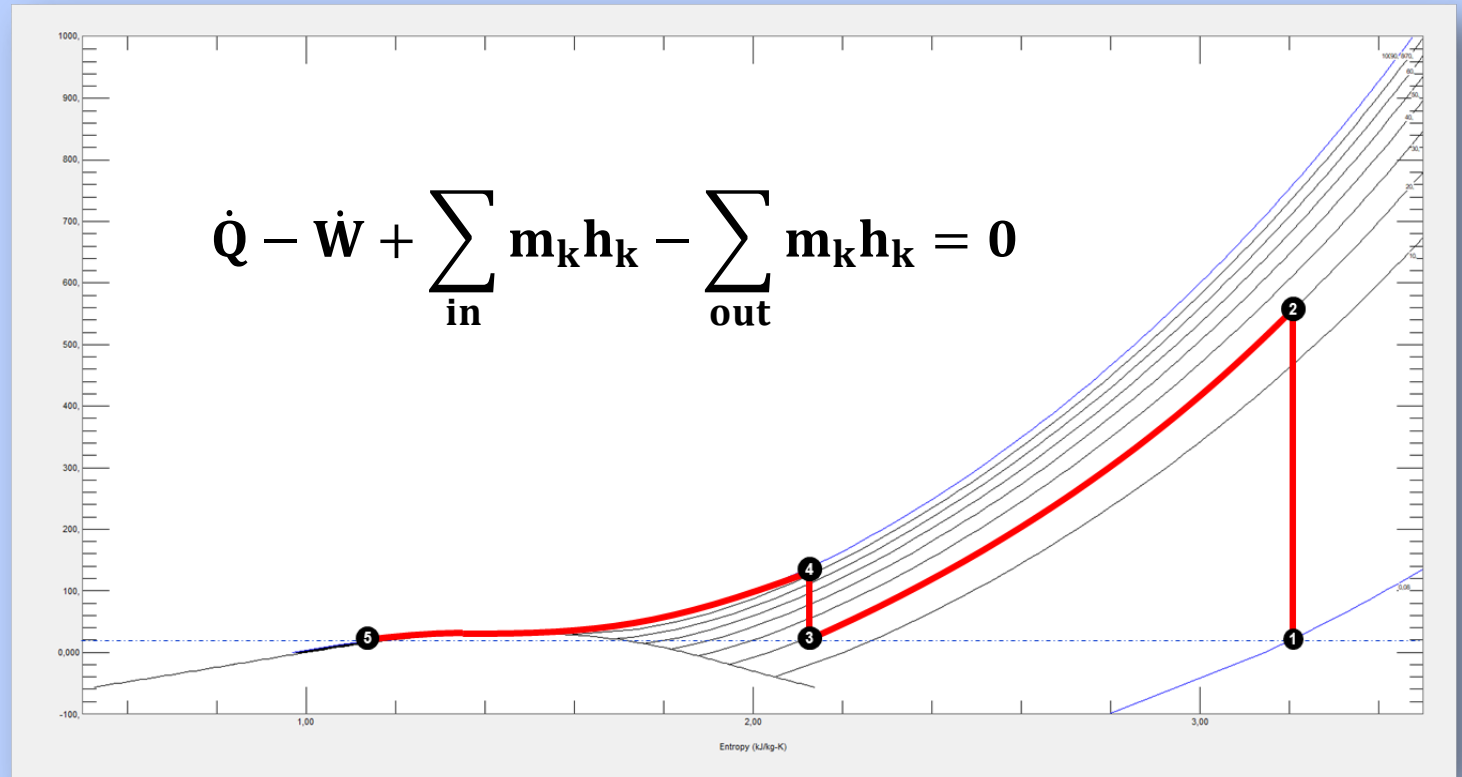
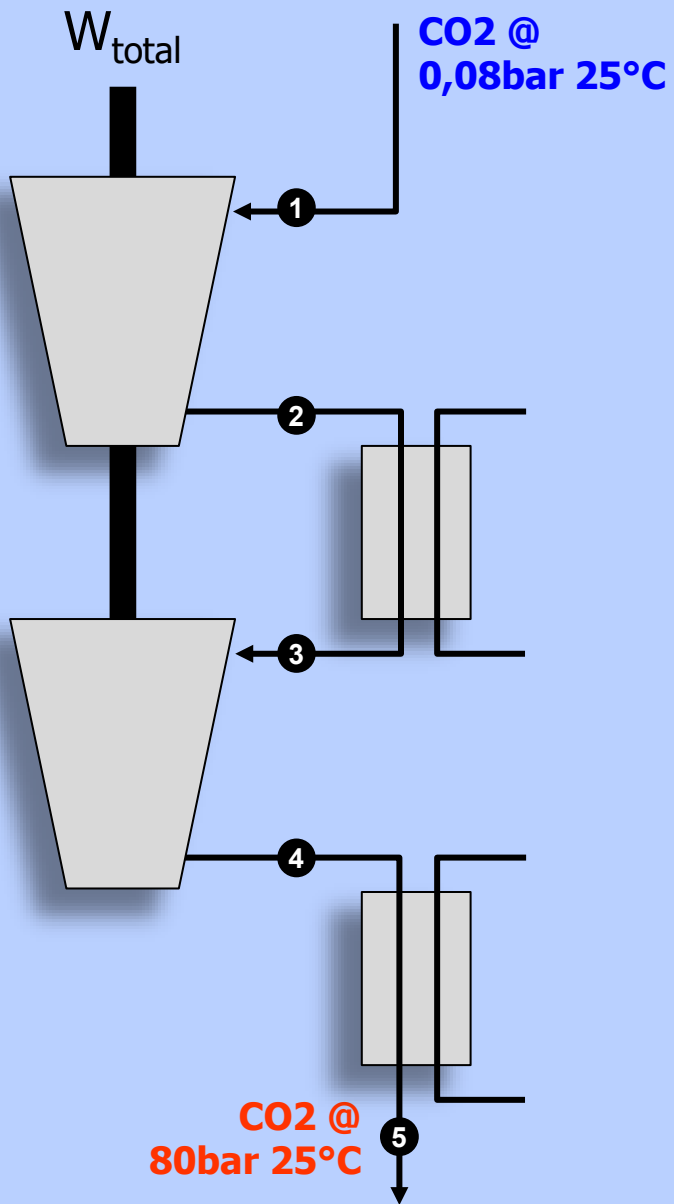


$$I_{SP} = \frac{F_{prop}}{g \cdot \dot{m}_{fuel}}$$



ASPIRADO → NÃO ASPIRADO → ASPIRADO

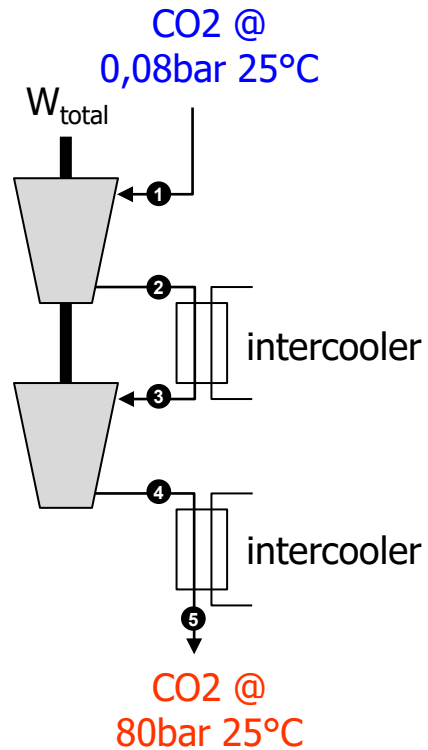
turboélice → turbofan → turbojato → ramjet → scramjet



+ TUTORIAL EXCEL

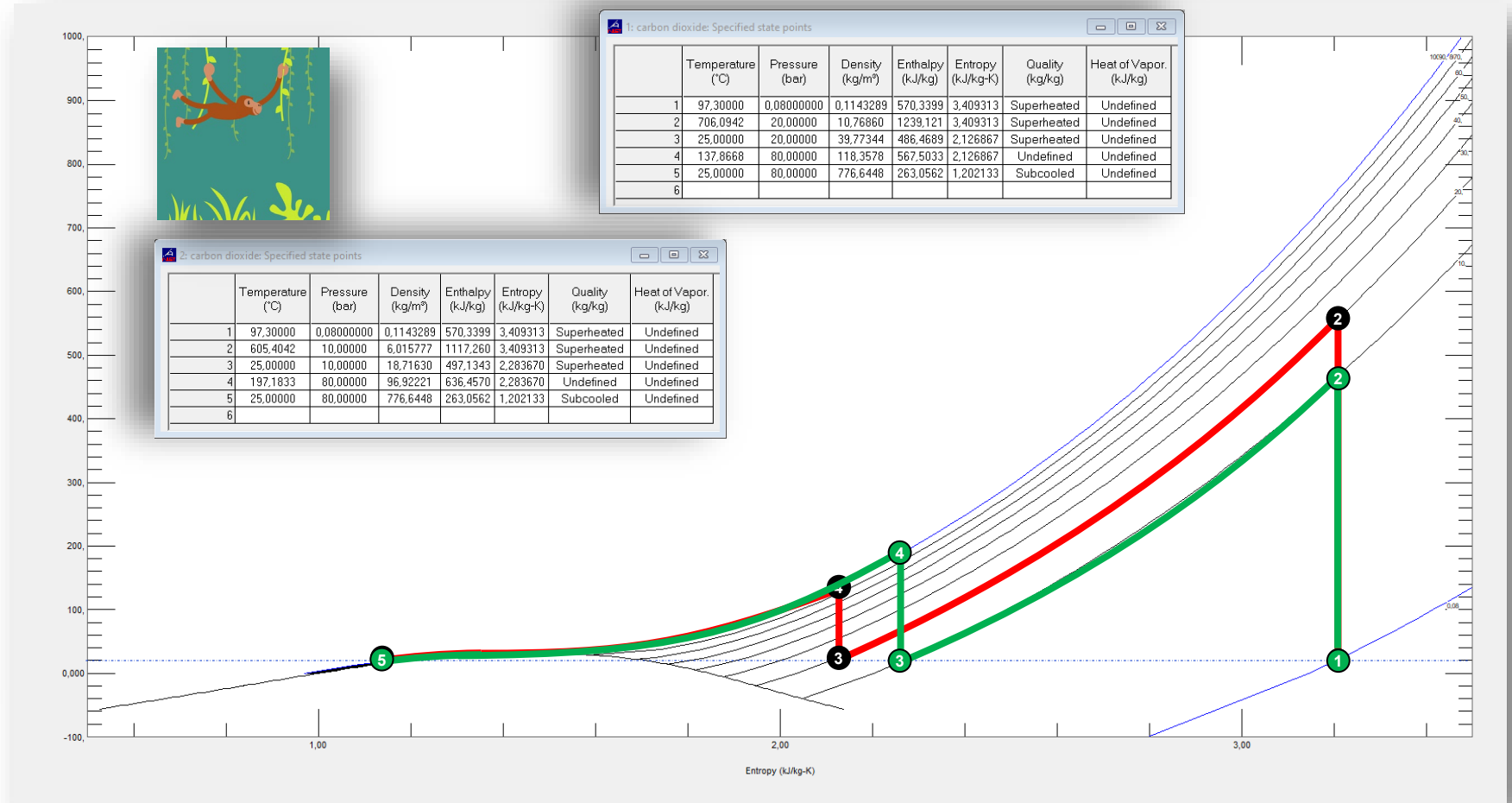


Deve-se dimensionar um compressor de dois estágios para aspirar 1kg/s de CO_2 a $0,08\text{bar}$ e 25°C e entregá-lo a 80bar e 25°C . Determine a **potência de acionamento mínima** para esta operação e...



Attention to
Filler Words

Deve-se dimensionar um compressor de dois estágios para aspirar 1kg/s de CO₂ a 0,08bar e 25°C e entregá-lo a 80bar e 25°C. Determine a potência de acionamento mínima para esta operação e...



PROCESSO DE COMPRESSÃO

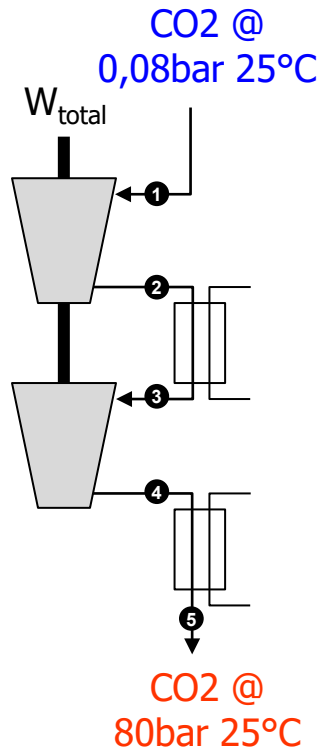


ADIABÁTICO, SEM ATRITO OU OUTRAS IRREVERSIBILIDADES...



$s = cte$

Deve-se dimensionar um compressor de dois estágios para aspirar 1kg/s de CO2 a 0,08bar e 25°C e entregá-lo a 80bar e 25°C. Determine a potência de acionamento mínima para esta operação e...



$$Q_{12} - W_{12} + \dot{m}(h_1 - h_2) = 0$$

$$W_{12} = \dot{m}(h_1 - h_2)$$

$$Q_{34} - W_{34} + \dot{m}(h_3 - h_4) = 0$$

$$W_{34} = \dot{m}(h_3 - h_4)$$

$$Q_{23} - W_{23} + \dot{m}(h_2 - h_3) = 0$$

$$Q_{23} = \dot{m}(h_3 - h_2)$$

$$Q_{45} - W_{45} + \dot{m}(h_4 - h_5) = 0$$

$$Q_{45} = \dot{m}(h_4 - h_5)$$

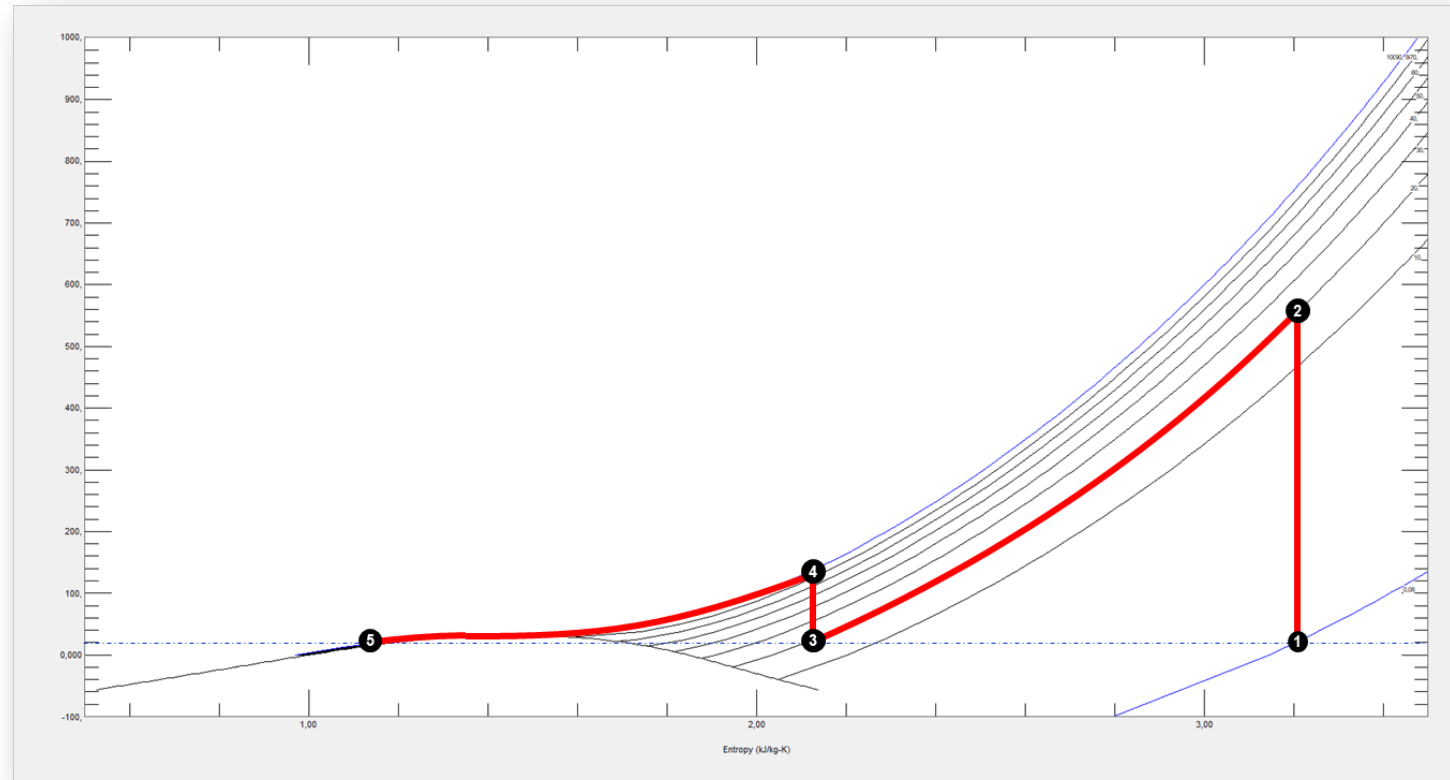
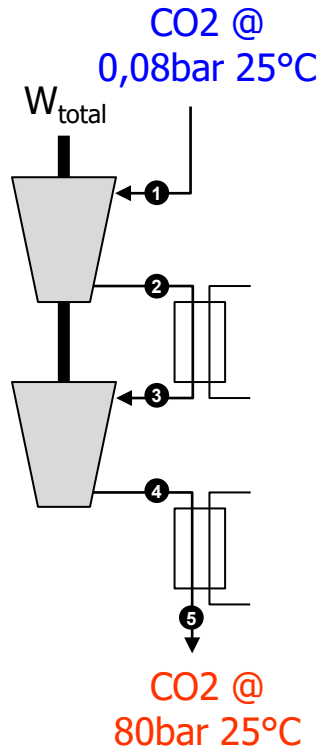
$$W_{total}/\dot{m} = (h_1 - h_2) + (h_3 - h_4)$$

$$Q_{total}/\dot{m} = (h_3 - h_2) + (h_4 - h_5)$$

$$W_{total} = (h_1 - h_2) + (h_3 - h_4)$$

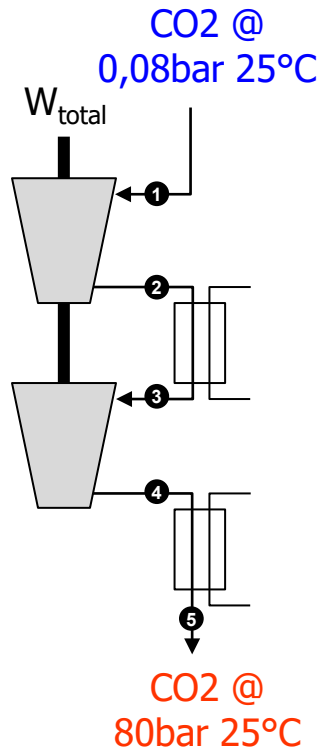
$$W_{total} = (h_1 - h(s_2 = s_1, P)) + (h(25^\circ C, P) - h(s_3 = s_4, 80bar))$$

$$s_3 = s(P, 25^\circ C)$$

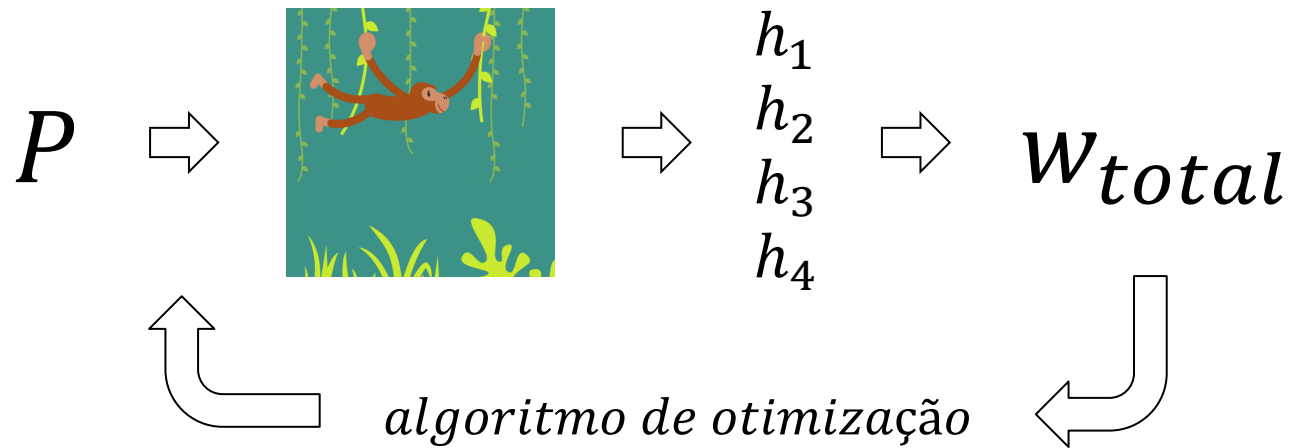


$$w_{total} = (h_1 - h_2) + (h_3 - h_4)$$

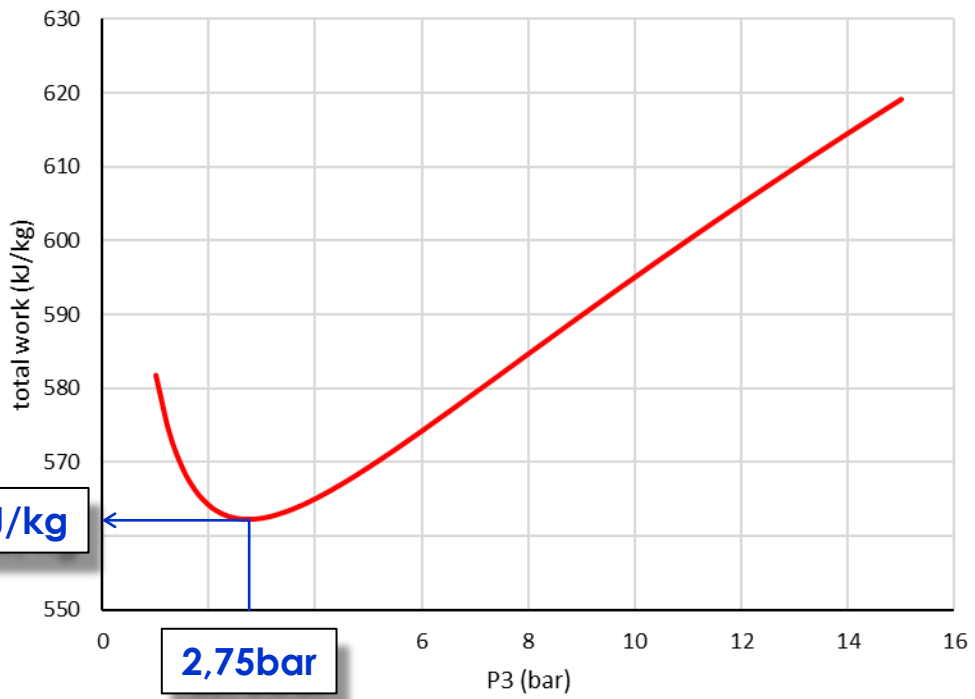
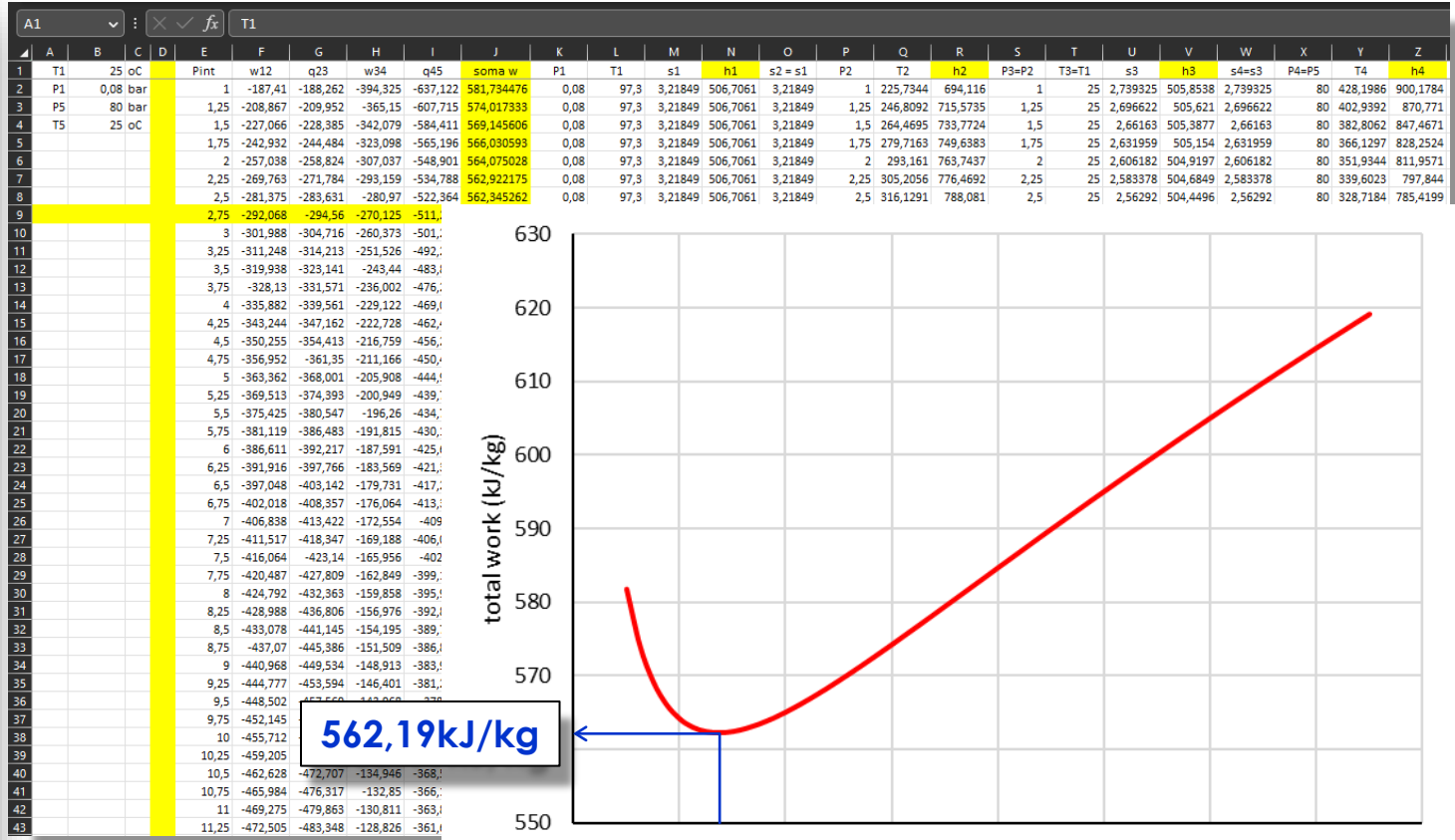
$$w_{total} = (h_1 - h(s_2 = s_1, P)) + (h(25^\circ\text{C}, P) - h(s_3 = s_4, 80\text{bar}))$$



\Rightarrow $\begin{cases} \text{Minimizar: } w_{total}(P) \\ \text{sujeito a } T_2 \leq T_{max} = 1000^\circ\text{C (e.g.)} \end{cases}$



método da marreta



$$h_1 = 506,71 \text{ kJ/kg/K}$$

$$h_2 = 798,77 \text{ kJ/kg/K}$$

$$h_3 = 504,21 \text{ kJ/kg/K}$$

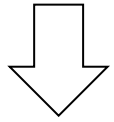
$$h_4 = 774,34 \text{ kJ/kg/K}$$

$$W_{total} = (h_1 - h_2) + (h_3 - h_4) = \dots$$

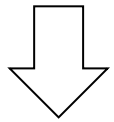
$$W_{total} = \dots = -562,19 \text{ kJ/kg}$$

$$W_{total} = 1 \cdot 562,19 = 562,19 \text{ kW}$$

Newton – Raphson



$$\frac{df}{dx} = 0$$



Método de Newton



método do relojoeiro suíço

$$f(P) = (h_1 - h(s_2, P)) + (h(s(P, 25^\circ\text{C}), P) - h(s(P, 25^\circ\text{C}), 80\text{bar}))$$



$$\text{Newton - Raphson: } f(x) = 0 \rightarrow x_{k+1} = x_k - \frac{f(x_k)}{f'(x_k)}$$

$$f'(x) = 0 \rightarrow f'(x) = g(x)$$

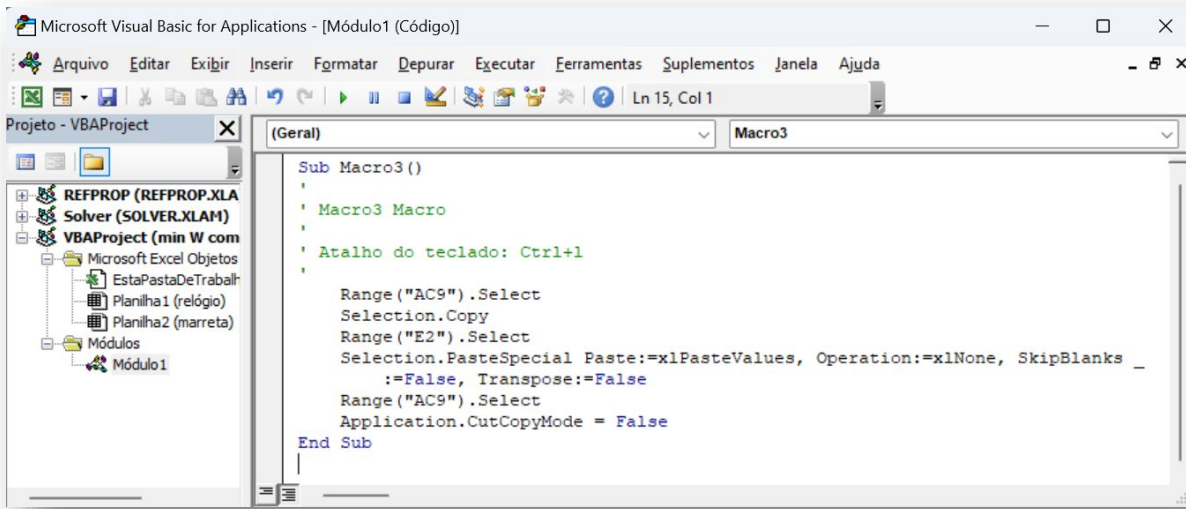
$$\text{Newton - Raphson: } g(x) = 0 \rightarrow x_{k+1} = x_k - \frac{g(x_k)}{g'(x_k)} = x_k - \frac{f'(x_k)}{f''(x_k)} \leftarrow \text{Newton}$$

$$f'(x) \cong \frac{f(x + \varepsilon) - f(x - \varepsilon)}{2\varepsilon}$$

$$f''(x) \cong \frac{f'(x + \varepsilon) - f'(x - \varepsilon)}{2\varepsilon} = \dots$$

$$f''(x) \cong \frac{f(x + \varepsilon) - 2f(x) + f(x - \varepsilon)}{\varepsilon^2}$$





	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD		
1	T1	25	oC	P	P1	T1	s1	h1	s2=s1	P2	T2	h2	P3=P2	T3=T1	s3	h3	s4=s3	P4=P5	T4	h4	P5	T5	h5	w12	q23	w34	q45	soma w				
2	P1	0,08	bar	2,734361	0,08	25	3,21849	506,7061	3,21849	2,734361	325,5315	798,1288	2,734361	25	2,545472	504,2285	2,545472	80	319,5695	774,9981	80	25	263,0562	-291,423	-293,9	-270,77	-511,942	562,192318				
3	P5	80	bar	2,834361	0,08	25	3,21849	506,7061	3,21849	2,834361	329,3297	802,2013	2,834361	25	2,538464	504,1341	2,538464	80	315,9297	770,8571	80	25	263,0562	-295,495	-298,067	-266,723	-507,801	562,218199				
4	T5	25	oC	2,634361	0,08	25	3,21849	506,7061	3,21849	2,634361	321,6096	793,9318	2,634361	25	2,552732	504,3229	2,552732	80	323,3616	779,3154	80	25	263,0562	-287,226	-289,609	-274,993	-516,259	562,218199				
5																																
6	eps	0,1																														
7																																
8																																
9																																
10																																

$$P_{k+1} = P_k - \frac{f'(P_k)}{f''(P_k)}$$

f'(P)= 0
 f''(P)= 5,17621139
 Pk+1 = 2,73436067

$P = 2,734bar$



Q#3: qual método de otimização foi usado para calcular o trabalho mínimo no exemplo anterior?

- A) O método de Newton...
- B) O método das placas tectônicas...
- C) O algoritmo de Bulirsch–Stoer...
- D) O método da formiguinha...
- E) A equação de Sazon-Pomarola...

3

Curso de Termodinâmica

1ª Lei

sistemas abertos 1/2



aula 05/20