

PMT3532 -



Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo



*Termohidráulica de Sistemas de
Geração de Potência I- Aula 05*



Prof. Dr. Alfredo Alvim
CEN- Centro Engenharia Nuclear
IPEN/CNEN- MCTIC

● CONCEITO DE DISPONIBILIDADE

①

● 2ª LEI
↓
Qualidade
de
Energia

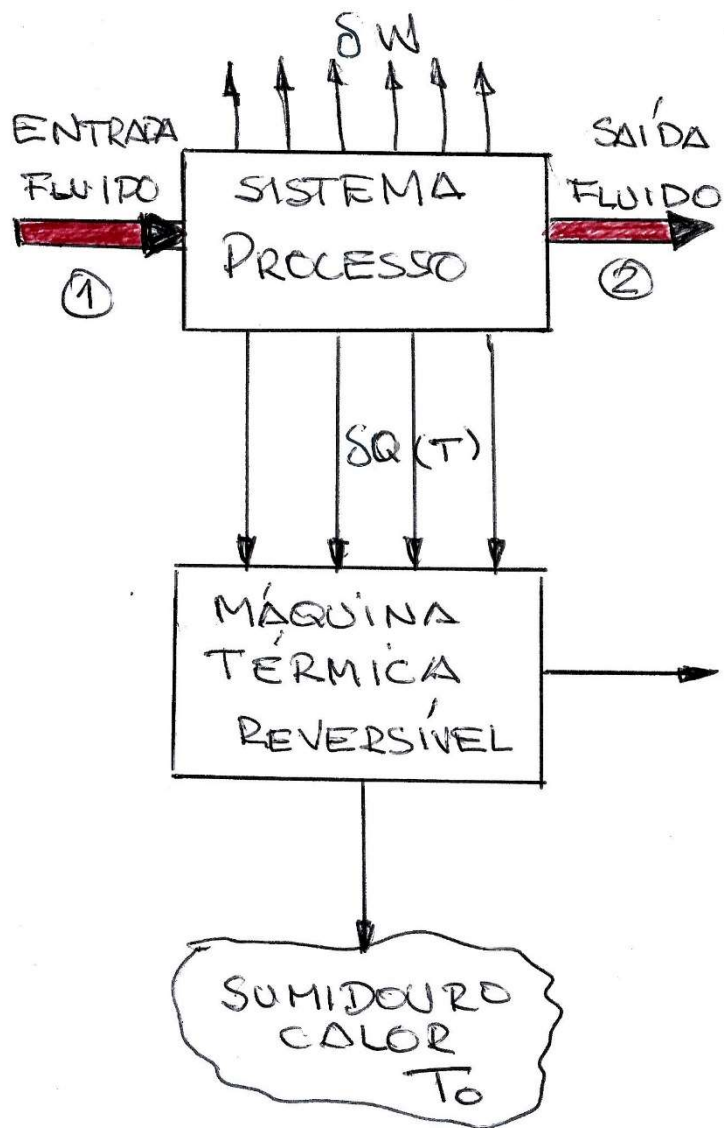
→ • $\Delta S \geq \int_A^B \frac{\delta Q}{T}$ (1) Medida da Irreversibilidade

→ Trabalho perdido em um ciclo de Potência devido a Irreversibilidades nos processos de troca de Calor, Expansão, Compressão, escoamento em Dutos, etc...

→ Processo Reversível $\Delta S = \int_A^B \frac{\delta Q}{T}$

→ Processo Irreversível $\Delta S \geq \int_A^B \frac{\delta Q}{T}$

• $\Delta S = \int_A^B \frac{\delta Q}{T} + \Delta S_{\text{geração Irreversibilidades}}$



- No escoamento há incrementos de trabalho δW , rejeitando incrementos de calor $\delta Q(T)$.
- Para se encontrar o Trabalho Máximo realizável - alimenta-se o calor $dQ(T)$ em uma Máquina Térmica Reversível.

$$\delta W' = \eta_{\max} \delta Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \delta Q \quad (2)$$

- Integrando de ① a ②

$$W' = \int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \delta Q \quad (3)$$

- Trabalho total realizado, W_u

$$W_u = \int \delta W + \int \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \delta Q \quad (4)$$

3

1ª Lei no Processo ① → ②

$$\int_1^2 \delta Q' = \int_1^2 \delta W + (H_2 - H_1) \quad (5) \quad \delta Q' = -\delta Q$$

= $\delta Q \rightarrow$ Calor entrando na Máquina (+)

- $\delta Q' \rightarrow$ Calor saindo do sistema (-)

$$\int_1^2 \delta W = \int_1^2 \delta Q' - (H_2 - H_1) \quad (6)$$

- Combinando (6) e (4)

$$W_u = (H_1 - H_2) + T_0 \int_1^2 \frac{\delta Q'}{T} \quad (7)$$

- Pela desigualdade de Clausius $(S_2 - S_1) \geq \int_1^2 \frac{\delta Q'}{T}$

$$W_u \leq (H_1 - H_2) - T_0 (S_1 - S_2) \quad (8)$$

- $W_{u\max} \rightarrow$ Processo 1 \rightarrow 2 Reversível

(4)

$$W_{u\max} = (H_1 - T_0 S_1) - (H_2 - T_0 S_2) \quad (9)$$

- Função Disponibilidade $\rightarrow \Lambda = H - T_0 S$

$$\Lambda = m \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) - T_0 S \quad \left. \begin{array}{l} \text{Expressão} \\ \text{geral} \end{array} \right\}$$

$$W_{u\max} = \Lambda_1 - \Lambda_2 \quad (10)$$

- Disponibilidade = $\Lambda_1 - (H_0 - T_0 S_0)$ (11)

Disponibilidade = Exergia \rightarrow Máximo Trabalho Útil que pode ser obtido por um Sistema em Processo Reversível de um Estado inicial ao Morto.

⑤

- ESTADO MORTO \rightarrow Estado de equilíbrio com o meio ambiente, T_0, S_0, P_0 ,
Exergia = $X_0 = 0$ no estado Morto,

- IRREVERSIBILIDADE (I) \rightarrow destruição de Exergia ou trabalho perdido

$$\underline{I} = W_{\text{umax}} - W_u = T_0 \left(- \int \frac{\delta Q'}{T} + (S_2 - S_1) \right) \quad (12)$$

Processo reversível

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q'}{T} \quad \rightarrow \quad I = 0$$

6

— VOLUME DE CONTROLE REGIME PERMANENTE

$$W_{\text{umax}} = W_{\text{REV}} = \sum \dot{m}_e \left(h_e - T_0 s_e + \frac{V_e^2}{2} + g z_e \right) - \sum \dot{m}_s \left(h_s - T_0 s_s + \frac{V_s^2}{2} + g z_s \right)$$

$$I = \sum \dot{m}_s T_0 s_s - \sum \dot{m}_e T_0 s_e - T_0 \int \frac{\delta Q'}{T}$$

— VOLUME CONTROLE REGIME VARIADO

$$W_{\text{umax}} = W_{\text{REV}} = \sum m_e \left(h_e - T_0 s_e + \frac{V_e^2}{2} + g z_e \right) - \sum m_s \left(h_s - T_0 s_s + \frac{V_s^2}{2} + g z_s \right) \\ + m_2 \left(u_2 - T_0 s_2 + \frac{V_2^2}{2} + z_2 g \right) - m_1 \left(u_1 - T_0 s_1 + \frac{V_1^2}{2} + z_1 g \right)$$

$$I = \sum m_s T_0 s_s - \sum m_e T_0 s_e + m_2 T_0 s_2 - m_1 T_0 s_1 - T_0 \int \frac{\delta Q'}{T}$$

$m_s \rightarrow$ massa que sai

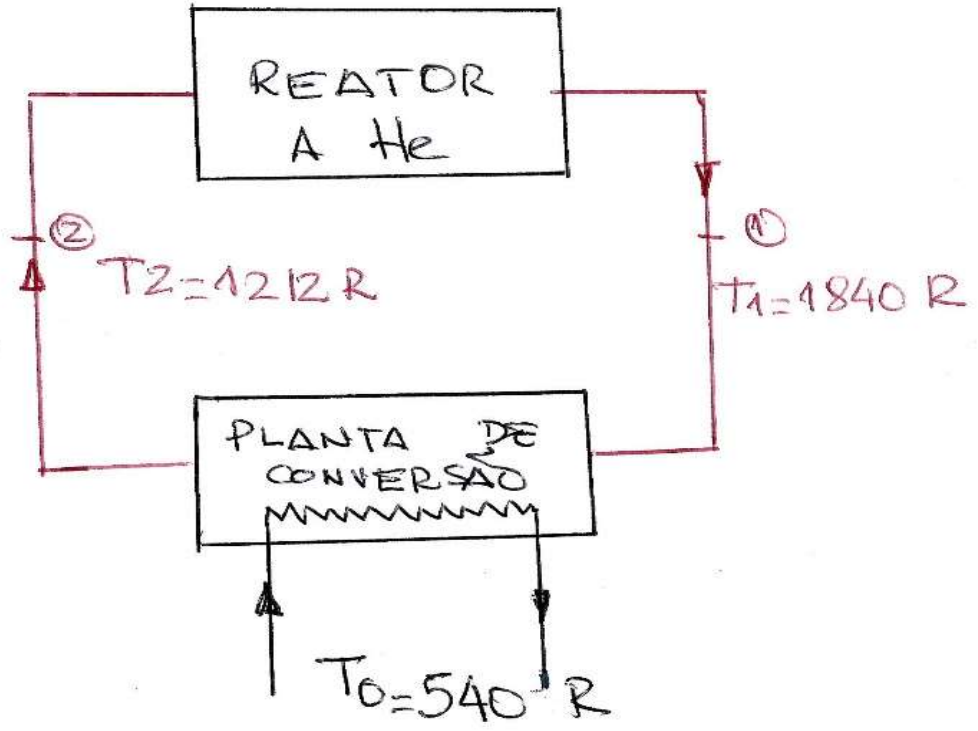
m_2 - massa final

$m_e \rightarrow$ massa que entra

m_1 - massa inicial

EXEMPLO 1

(7)



$$W_{u,max} = \Delta \Lambda = \Delta h - T_0 \Delta s$$

$$C_{p,He} = 1,24 \text{ BTU/lbm}\cdot\text{R}$$

$$\begin{aligned} \Delta h &= C_{p,He} (T_1 - T_2) = \\ &= 1,24 (1840 - 1212) = 778,72 \\ &\text{BTU/lbm} \end{aligned}$$

$$\Delta s = \int_2^1 \frac{\delta Q}{T} = \int_2^1 c_p \frac{dT}{T} = c_{p,He} \ln \frac{T_1}{T_2}$$

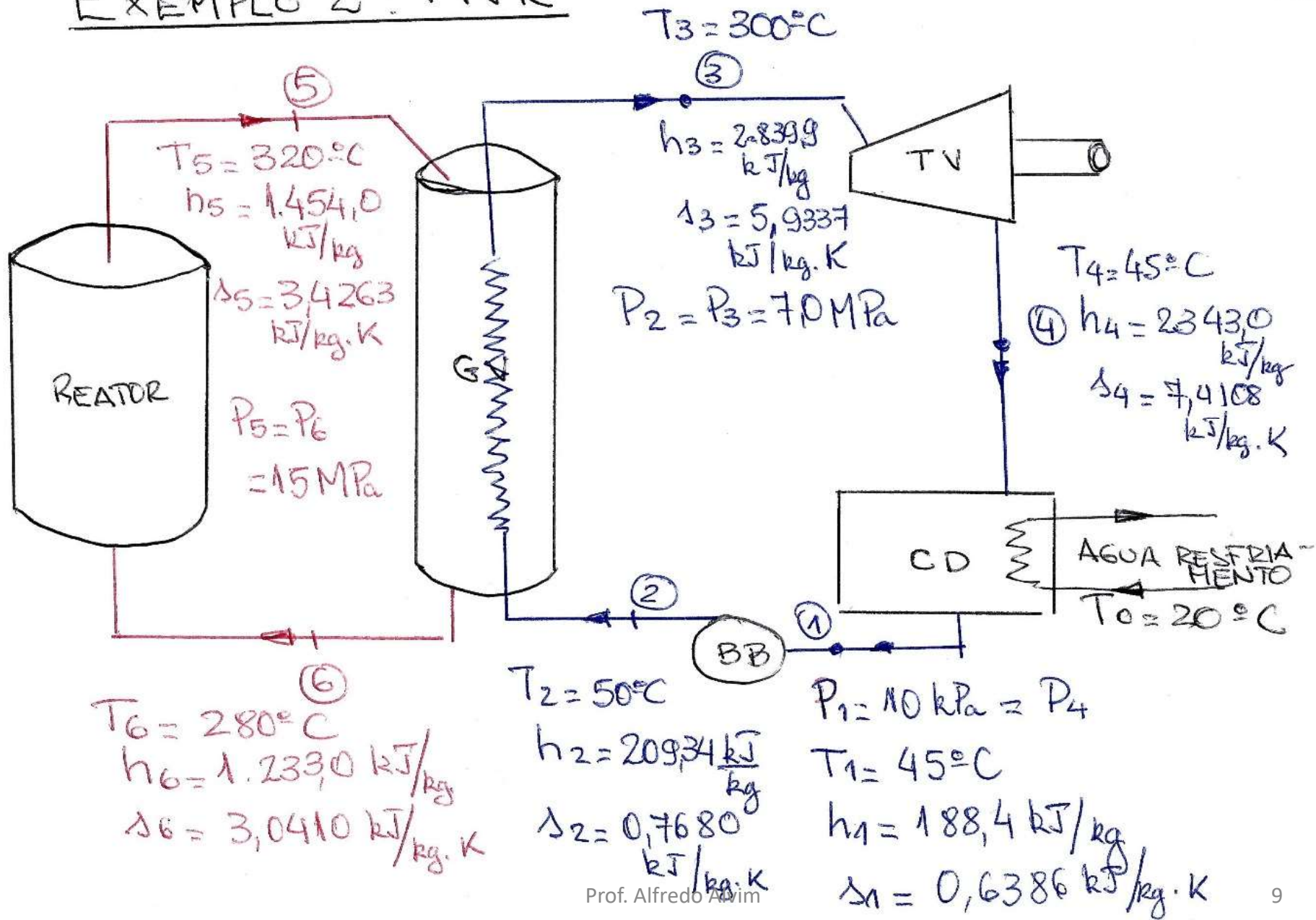
$$\Delta s = s_1 - s_2 = 0,5177 \frac{\text{BTU}}{\text{lbm}\cdot\text{R}}$$

$$T_0 \Delta s = 279,55 \frac{\text{BTU}}{\text{lbm}}$$

$$W_{u,max} = 778,72 - 279,55 = 499,2 \text{ BTU/lbm}$$

EXEMPLO 2: PWR

8



9

$$W_{u_{max}} = \dot{A}_5 - \dot{A}_6 = (h_5 - h_6) - T_0(s_5 - s_6)$$

Balanco no GV $M_{\text{agua}}(h_5 - h_6) = M_v(h_3 - h_2)$

$$W = \frac{M_{\text{agua}}}{M_{\text{vapor}}} = \frac{h_3 - h_2}{h_5 - h_6} = \frac{2839,9 - 209,34}{1454,0 - 1233,0} = 11,903 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg vapor}}$$

$$T_0 = 293 \text{ K}$$

$$W_{u_{max}} = (1454 - 1233) + (293)(3,041 - 3,4263) = 111,107 \frac{\text{kJ}}{\text{kg agua}}$$

$$W_{u_{max}} = (11,903)(111,107) = 1286,80 \text{ kJ/kg vapor}$$

$$W_{\text{UTIL}} = W_{TV} - W_{BB} = (h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)$$

$$= (2839,9 - 2103,6) - (209,34 - 188,5)$$

$$W_{\text{UTIL}} = 715,46 \text{ kJ/kg vapor}$$

- IRREVERSIBILIDADES, I

$$I = W_{\text{max}} - W_{\text{util}} = 571,34 \text{ kJ/kg vapor}$$

• CÁLCULO DAS IRREVERSIBILIDADES

A) GERADOR DE VAPOR (GV) Sistema aberto com 2 correntes de fluido cruzando fronteiras, mas sem troca de calor com o meio. Assim $\int_{\text{GV}} \frac{\delta Q'}{T} = 0$

$$\begin{aligned} \Delta s &= W(s_6 - s_5) + (s_3 - s_2) \\ &= 11,903(3,0411 - 3,4263) + (5,9337 - 0,7038) = 0,6437 \end{aligned}$$

$$I_{\text{GV}} = T_0 \Delta s = (293 \text{ K}) \left(0,6437 \frac{\text{kJ}}{\text{kg vapor} \cdot \text{K}} \right) = 188,60 \text{ kJ/kg vapor}$$

$$I_{\text{GV}} = 188,60 \text{ kJ/kg vapor}$$

B) TURBINA A VAPOR (TV) → Sistema aberto
com uma corrente de fluido cruzando fronteiras
mas sem troca de calor com o Ambiente → $\int_{TV} \frac{\delta Q'}{T} = 0$

11

$$\Delta s = s_4 - s_3 = (6,6578 - 5,9337) = 0,7241$$

$$I_{TV} = T_0 \cdot \Delta s = (293)(0,7241) = 212,16$$

$$I_{TV} = 212,16 \text{ kJ/kg v}$$

C) CONDENSADOR (CD) → Sistema aberto com
2 correntes de fluido cruzando as fronteiras mas
sem troca de calor através paredes $\int_{CD} \frac{\delta Q'}{T} = 0$

$$I_{CD} = T_0 \left(\Delta s_{\text{condensado}} + \Delta s_{\text{água resfriamento}} \right)$$

$$\Delta s_{\text{condensado}} = s_1 - s_4 = (0,6386 - 6,6578)$$

$$= -6,0192 \text{ kJ/kgv}$$

12

$$\Delta s_{\text{agua}} = \frac{Q_{\text{TROCA DO}}}{T_0} = \frac{h_4 - h_1}{T_0} = \frac{2103,6 - 188,5}{293}$$

$$\Delta s_{\text{agua}} = 6,5362$$

$$I_{CD} = (293)(-6,0192 + 6,5362) = 151,481$$

$$I_{CD} = 151,481 \text{ kJ/kgv}$$

D) BOMBA (BB) → Sistema aberto com uma corrente de fluido cruzando fronteiras mas sem troca de calor com o meio → $\int_{BB} \delta Q'/T = 0$

$$I_{BB} = T_0 \Delta s = T_0 (s_2 - s_1) = (293)(0,7038 - 0,6386) = 19,104$$

$$I_{BB} = 19,104 \text{ kJ/kgv}$$

- IRREVERSIBILIDADE CICLO POTÊNCIA

$$\begin{aligned} I &= I_{GV} + I_{TV} + I_{CD} + I_{BB} = \\ &= 188,60 + 212,16 + 151,48 + 19,10 = 578,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kgv}} \end{aligned}$$

$$I = 578,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kgv}}$$

CICLO
POTENCIA

Para melhorar o desempenho do ciclo devemos melhorar os projetos do GV, da turbina (TV) e do condensador (CD). São os grandes responsáveis pela Irreversibilidade.

• E) REATOR -(R) → Sistema aberto

14

consistindo de uma fonte de calor (combustível) e água escoando pelo núcleo. Não há troca de calor com o meio

$$\int_R \frac{SQ}{T} = 0$$

$$I_R = T_0 (\Delta s_{\text{fonte}} + \Delta s_{\text{água}})$$

$$\Delta s_{\text{fonte}} = \int \frac{SQ}{T_{\text{fonte}}} \quad \therefore \quad T_{\text{fonte}} \rightarrow \infty$$
$$\Delta s_{\text{fonte}} \approx 0$$

$$I_R = 293 \text{ (W)} (s_5 - s_6) = 293 (11,903) (3,4263 - 3,041)$$

$$I_R = 1.343,76 \text{ kJ/kg} \checkmark$$

• TRABALHO ÚTIL PERDIDO

$$I_R = 1.343,76 \text{ kJ/kgv}$$

$$I_{Gv} = 188,60 \text{ kJ/kgv}$$

$$I_{Tv} = 212,16 \text{ kJ/kgv}$$

$$I_{Cd} = 151,48 \text{ kJ/kgv}$$

$$I_{BB} = 19,10 \text{ kJ/kgv}$$

$$\underline{1.915,10 \text{ kJ/kgv}}$$

• TRABALHO ÚTIL REALIZADO

$$W_T = h_3 - h_4 = 2.839,9 - 2.103,6 = 736,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$W_B = h_1 - h_2 = 188,5 - 209,34 = -20,84 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\underline{715,46 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}$$

• Exergia = DISPONIBILIDADE = X

$$X = 1.915,10 + 715,46 = 2.630,56 \frac{\text{kJ}}{\text{kgv}}$$

$$w_u/x = 0,28 = 28\%$$

FIM 5ª AULA

até semana que vem se cuidem

