

MEC - Mestrado Integrado em Engenharia Civil

LEGM - Licenciatura Bolonha em Engenharia Geológica e de Minas

TERMODINÂMICA E ESTRUTURA DA MATÉRIA 2012 - 2013

Exame de 1ª Época, 5 de Junho de 2013, 8h-10h30min

INSTRUÇÕES

- O exame tem a duração máxima de 2h30min;
- Os alunos podem entrar no exame até meia hora depois do exame se iniciar (8h30min);
- Os alunos podem desistir do exame ao fim de uma hora (9h), entregando a folha inicial do exame assinada com a palavra "Desisto";
- Cada grupo deve ser resolvido numa **folha de exame** separada;
- As respostas referentes ao **Grupo I** devem ser dadas na **1ª folha do Enunciado (páginas 1 e 2)**, devidamente identificado

Grupo I (6 valores)

Indique a resposta correta assinalando a com uma cruz. Cada resposta certa corresponde a 0,5 valores, cada resposta errada desconta 0,25 valores, quem não responder tem 0 valores.

| | |
|---|---|
| 1 – A temperatura é uma propriedade intensiva de um sistema porque a) é independente da quantidade de matéria b) depende da pressão c) não é intensiva, é uma propriedade extensiva | <input checked="" type="checkbox"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> |
| 2 – O comprimento de um carril de uma linha de comboio em aço ($\alpha=12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) é 20 metros no inverno ($T=10^{\circ}\text{C}$) e a) no verão ($T=30^{\circ}$) é 20,0480 m b) na primavera ($T=20^{\circ}\text{C}$) é 20,0024 m c) no outono (15°C) é 19,0012 m $\Delta L = \alpha L \Delta T = 12 \times 10^{-6} \times 20 \times 10 = 2,4 \times 10^{-3} \text{m}$ | <input type="radio"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="radio"/> |
| 3 – A quantidade de calor necessária para aumentar em 1°C a temperatura da água ($\rho = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$) de uma piscina olímpica (2500m^3) é, com $C_v = C_p = 4,187 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ a) 10,47 GJ b) 2,9 GWh c) 10,47 MJ $c_v = \left(\frac{\delta u}{\delta T} \right)_v \Leftrightarrow \delta u = c_v \delta T \Leftrightarrow \Delta U = m c_v \Delta T$ $\Delta U = m c_v \Delta T = 1000 \times 2500 \times 4187 \text{ J} = 10,48 \times 10^9 \text{ J}$ | <input checked="" type="checkbox"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> |
| 4 – A temperatura de evaporação da água é a) 100°C b) 100°C à pressão atmosférica c) 100°C à pressão de 1MPa | <input type="radio"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="radio"/> |
| 5 – O ponto triplo da água é um estado de pressão e temperatura a) no qual a água passa do estado solido para gasoso b) no qual os três estados coexistem em equilíbrio termodinâmico c) a partir do qual já não se conseguem distinguir os estados da matéria | <input type="radio"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="radio"/> |

| | |
|--------|--|
| Nome | |
| Número | |

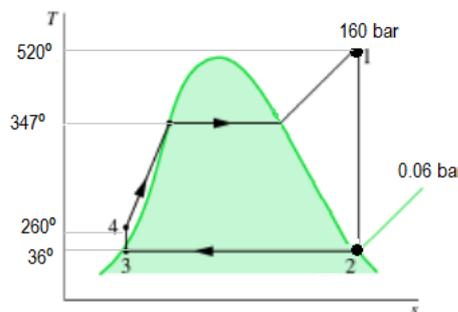
| | |
|--|---|
| <p>6 – O calor latente de fusão de uma substância</p> <p>a) é a quantidade de energia para efetuar qualquer mudança de fase</p> <p>b) é a quantidade de energia para passar do estado líquido para o estado sólido</p> <p>c) é igual ao calor latente de evaporação</p> | <p><input type="radio"/></p> <p><input checked="" type="radio"/></p> <p><input type="radio"/></p> |
| <p>7 – A pressão de uma mole de um gás perfeito num recipiente de 1 m³ a uma temperatura de 300 K é</p> <p>d) 2,49 kPa</p> <p>e) pressão atmosférica</p> <p>f) depende do gás perfeito</p> $PV = nRT, \left\{ \begin{array}{l} R = 8,3145 \text{ kJ/kg} \times K \\ n^{\circ} \text{ moles} \end{array} \right. \Leftrightarrow P = \frac{1 \times 8,3145 \times 300}{1} = 2,49 \times 10^3 \text{ Pa}$ | <p><input checked="" type="radio"/></p> <p><input type="radio"/></p> <p><input type="radio"/></p> |
| <p>8 – Num sistema termodinâmico, a variação de energia entre dois estados</p> <p>a) é sempre igual à variação de energia interna</p> <p>b) é a variação de energia cinética e potencial</p> <p>c) é igual à variação de energia interna, cinética e potencial</p> | <p><input type="radio"/></p> <p><input type="radio"/></p> <p><input checked="" type="radio"/></p> |
| <p>9 – Num sistema, a variação de entropia de um processo irreversível é dado pela</p> <p>a) transferência de entropia através da superfície</p> <p>b) entropia gerada no processo</p> <p>c) soma da transferência de entropia através da superfície e à entropia gerada no processo</p> $\Delta S \geq \oint_1^2 \frac{\delta Q}{T} = \oint_1^2 \frac{\delta Q}{T} + S_{gen}$ | <p><input type="radio"/></p> <p><input type="radio"/></p> <p><input checked="" type="radio"/></p> |
| <p>10– Na análise “ar-padrão” nos ciclos de gás</p> <p>a) considera-se que o combustível na câmara de combustão é ideal</p> <p>b) considera-se que o ar está sempre à mesma temperatura</p> <p>c) considera-se que o ar é um gás ideal</p> | <p><input checked="" type="radio"/></p> <p><input type="radio"/></p> <p><input type="radio"/></p> |
| <p>11 – A cor do laser tem a ver com</p> <p>a) o comprimento de onda dos fótons emitidos laser</p> <p>b) temperatura do material do laser</p> <p>c) coloração da lente</p> | <p><input checked="" type="radio"/></p> <p><input type="radio"/></p> <p><input type="radio"/></p> |
| <p>12 – Um eletrão muda de nível de energia num átomo</p> <p>a) qualquer que seja a energia</p> <p>b) se receber um valor bem determinado de energia</p> <p>c) se receber energia por choque com outro eletrão</p> | <p><input type="radio"/></p> <p><input checked="" type="radio"/></p> <p><input type="radio"/></p> |

Grupo II (8 valores)

A Central Termoelétrica de Sines opera segundo um ciclo de Rankine, em que cada grupo gerador tem uma caldeira e uma turbina que a determinado momento estão **aproximadamente** a funcionar nos seguintes estados:

| Caldeira Mague | Turbina Mague/ ABB |
|---|---|
| Produção de vapor: 264 kg/s | Temperatura do vapor à entrada: 520°C |
| Temperatura de entrada da água: 260°C (líquido comprimido) | Pressão do vapor à entrada: 160 bar |
| Temperatura de saída do vapor sobreaquecido: 520°C | Pressão máxima do vapor à entrada: 167 bar |
| Temperatura máxima de saída do vapor sobreaquecido: 535°C | Pressão à saída: 0,06 bar (vapor saturado) |
| | Potência da turbina: 360 MW |

- a) Desenhe o diagrama Ts do ciclo, indicando os valores já conhecidos no gráfico **(1,5 valor)**



- b) Calcule a quantidade de calor por unidade de tempo que é necessária para gerar o vapor sobreaquecido. **(2 valor)**

$$Q_{in} = \dot{m}(h_1 - h_4) = 264 \text{ kg/s} \times (3353,3 - 1138,8) = 584,628 \text{ kJ/s}$$

Diretamente da tabela de vapor sobreaquecido temos $h_1 = 3353,3 \text{ kJ/kg}$

Diretamente da tabela de líquido comprimido temos $h_4 = 1138,8 \text{ kJ/kg}$

(A utilização de $\dot{Q} = \dot{m}C_p\Delta T$ não é correcta, pois a água muda de fase e é necessário entrar com o calor latente de fusão à pressão de 160 bar, bem como o calor específico do vapor sobreaquecido de água)

- c) Calcule a potência da turbina e compare com o valor indicado na tabela da turbina e explique as diferenças **(2 valores)**

$$\text{A potência da turbina é dada por } \dot{W}_t = \dot{m}(h_1 - h_2)$$

Diretamente da tabela de vapor sobreaquecido temos $h_1 = 3353,3 \text{ kJ/kg}$

Diretamente da tabela de vapor saturado temos que $h_2 = 2567,4 \text{ kJ/kg}$

$$\text{Então } \dot{W}_t = \dot{m}(h_1 - h_2) = 264 \text{ kg/s} \times (3353,3 - 2567,4) = 207,48 \text{ MJ/s}$$

Tanto a caldeira como a turbina não estão a operar nas condições máximas, pelo que a turbina está a operar com potência mais baixa

- d) Calcule o rendimento assumindo que a potência da bomba de água é 1% da potência da turbina **(1,5 valor)**.

$$\eta = \frac{W_t}{Q_{in}} = \frac{207,48 \times 99\%}{584,63} = 35,13\%$$

Este rendimento é ligeiramente mais baixo do que seria expectável num ciclo de Rankine (perto dos 40%), o que era expectável, pois a turbina não está a operar à potência máxima (o rendimento real de Sines é cerca de 38%)

| | |
|--------|--|
| Nome | |
| Número | |

- e) Compare o rendimento de um ciclo de Carnot com as mesmas temperaturas de operação e comente **(1 valor)**.

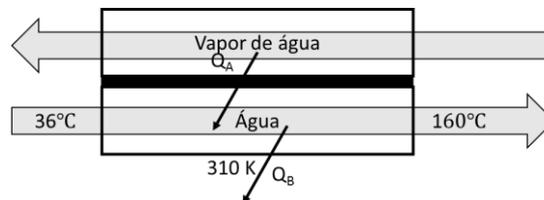
$$\eta_{max} = 1 - \frac{T_C}{T_H} = 1 - \frac{36,16 + 273,15}{520 + 273,15} = 1 - 0,3837 = 61,63\%$$

Como seria de esperar, este rendimento é substancialmente superior ao do ciclo, mas ainda assim, pela segunda lei da termodinâmica, inferior a 100%.

Nota: Se não resolveu as alíneas b) e c) considere que a caldeira fornece uma potência de 600 MW e que a turbina tem a potência da tabela (360 MW).

Grupo III (6 valores)

Na Central Termoelétrica de Sines existe um sistema de regeneração (pré-aquecimento) de água, que aumenta a temperatura da água à saída do condensador de 36°C (líquido) para 160°C. Assuma que isso é feito, de forma simplificada, num permutador onde a água é aquecida por vapor de água retirado à turbina.



Nota: Para a água considere $C_p = 4,187 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ e $\rho = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$

- a) Sabendo que o caudal de água é de 264 kg/s, calcule qual a quantidade de calor Q_A por unidade de tempo que é fornecido à água. **(1 valor)**

O calor trocado por unidade de tempo corresponde à energia necessária para aumentar a temperatura do caudal de água que passa no permutador:

$$\dot{Q}_A = \dot{m}C_p\Delta T = 264 \times 4,187 \times 10^3 \times (160 - 36) = 137 \text{ MW}$$

- b) Calcule a área de contacto do permutador, considerando que nestas condições a resistência térmica total é $0,01 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$. **(1,5 valor)**

O calor calculado na alínea anterior é transferido do vapor para água através da área metálica de contacto que os separa. Designando o inverso do coeficiente de transmissão de calor total (U) por R_{total} , a transferência de calor é dada por:

$$\dot{Q}_A = \frac{A}{R_{total}}\Delta T \Leftrightarrow A = \frac{\dot{Q}_A R_{total}}{\Delta T} = \frac{137 \times 10^6 \times 0,01}{(520 - 98)} = 3246 \text{ m}^2$$

O vapor é da turbina, por isso considerámos que está a 520°C, e considerámos ainda a temperatura média da água, 98°C ($T_m = \frac{160+36}{2} = 98$)

- c) Explique quais os mecanismos de transmissão de calor incluídos no termo de resistência térmica da alínea b). **(1 valor)**

Os processos físicos presentes no coeficiente de transmissão de calor total são a condução no material que separa a água do vapor (área metálica de contacto) e as convecções entre a água e o material de separação e entre o vapor e o material de separação. As resistências térmicas associadas a estes três processos de transferência de calor estão em série, entre a água e o vapor.

| | |
|--------|--|
| Nome | |
| Número | |

- d) Considerando que a superfície exterior do permutador no seu ponto médio tem uma temperatura de 310 K, que a temperatura do local onde se encontra o permutador é de 293 K e que o coeficiente de convecção natural nestas condições é de 10 W/m²K, calcule o calor \dot{Q}_B por unidade de tempo e por unidade de área trocado entre o permutador e o exterior neste ponto médio. **(1 valor)**

Trata-se de calor trocado por convecção entre a superfície exterior do permutador do lado da água e o ar. O seu fluxo na zona média do permutador será:

$$\dot{Q}_B = h\Delta T = 10 \times (310 - 293) = 170 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

- e) Lembrando que no ponto médio a temperatura da água é de 98°C, calcule a entropia gerada por unidade de tempo e por unidade de área devido ao fluxo de calor calculado na alínea d). **(1,5 valor)**

O calor é transferido da água para o ambiente. Quer na água quer no ambiente a transferência do calor é reversível pois dá-se em equilíbrio térmico (assume-se que quer a água quer o ambiente são reservatórios de calor com temperatura constante no tempo). A irreversibilidade ocorre na fronteira, na zona em que o calor passa da temperatura da água para a temperatura ambiente. Podemos então utilizar a equação da variação de entropia da fronteira para calcular a entropia gerada por unidade de tempo e por unidade de área:

$$\Delta \dot{S}_{\text{fronteira}} = \sum \frac{\dot{Q}_i}{T_i} + \dot{S}_{\text{gen}}$$

Como o processo é estacionário (não varia no tempo) a entropia da fronteira, que é uma função de estado, também não varia. Os calores que atravessam a fronteira são o calor calculado na alínea d) a entrar à temperatura da água e a sair à temperatura ambiente:

$$0 = \frac{\dot{Q}_B}{T_{\text{água}}} - \frac{\dot{Q}_B}{T_{\text{ambiente}}} + \dot{S}_{\text{gen}} \Leftrightarrow \dot{S}_{\text{gen}} = \frac{\dot{Q}_B}{T_{\text{ambiente}}} - \frac{\dot{Q}_B}{T_{\text{água}}} = \frac{170}{293} - \frac{170}{371} = 0,12 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

| Líquido Saturado, Vapor Saturado | | | | | | | | | |
|----------------------------------|-----------|--|----------------|-------------------------|----------------|------------------|----------------|-------------------|----------------|
| Pressão (bar) | Temp (°C) | Volume Específico (m ³ /kg) | | Energia Interna (kJ/kg) | | Entalpia (kJ/kg) | | Entropia kJ/(kgK) | |
| | | Líquido Saturado | Vapor Saturado | Líquido Saturado | Vapor Saturado | Líquido Saturado | Vapor Saturado | Líquido Saturado | Vapor Saturado |
| 0,04 | 28,96 | 1,0040 | 34,800 | 121,45 | 2415,2 | 121,46 | 2554,4 | 0,4226 | 8,4746 |
| 0,06 | 36,16 | 1,0064 | 23,739 | 151,53 | 2425,0 | 151,53 | 2567,4 | 0,5210 | 8,3304 |
| 0,08 | 41,51 | 1,0084 | 18,103 | 173,87 | 2432,2 | 173,88 | 2577,0 | 0,5926 | 8,2287 |
| 0,10 | 45,81 | 1,0102 | 14,674 | 191,82 | 2437,9 | 191,83 | 2584,7 | 0,6493 | 8,1502 |
| 0,20 | 60,06 | 1,0172 | 7,649 | 251,38 | 2456,7 | 251,40 | 2609,7 | 0,8320 | 7,9085 |

| Vapor Sobreaquecido (P=160bar, Tsat=347,44°C) | | | | |
|---|--|-------------------------|------------------|-------------------|
| Temp (°C) | Volume Específico (m ³ /kg) | Energia Interna (kJ/kg) | Entalpia (kJ/kg) | Entropia kJ/(kgK) |
| Sat | 0,00931 | 2431,7 | 2580,6 | 5,2455 |
| 360 | 0,01105 | 2539,0 | 2715,8 | 5,4614 |
| 400 | 0,01426 | 2719,4 | 2947,6 | 5,8175 |
| 440 | 0,01652 | 2839,4 | 3103,7 | 6,0429 |
| 480 | 0,01842 | 2939,7 | 3234,4 | 6,2215 |
| 520 | 0,02013 | 3031,1 | 3353,3 | 6,3752 |
| 560 | 0,02172 | 3117,8 | 3465,4 | 6,5132 |
| 600 | 0,02323 | 3201,8 | 3573,5 | 6,6399 |
| 640 | 0,02467 | 3284,2 | 3678,9 | 6,7580 |
| 700 | 0,02674 | 3406,0 | 3833,9 | 6,9224 |
| 740 | 0,02808 | 3486,7 | 3935,9 | 7,0251 |

| Líquido Comprimido (P=160bar, T _{sat} =347,44°C) | | | | |
|---|--|-------------------------|------------------|-------------------|
| Temp (°C) | Volume Específico (m ³ /kg) | Energia Interna (kJ/kg) | Entalpia (kJ/kg) | Entropia kJ/(kgK) |
| 160 | 0,00109 | 667,26 | 684,72 | 1,9249 |
| 180 | 0,00112 | 753,15 | 770,99 | 2,1197 |
| 220 | 0,00117 | 929,04 | 947,83 | 2,4935 |
| 260 | 0,00125 | 1113,7 | 1113,8 | 2,8559 |
| 300 | 0,00137 | 1315,2 | 1337,2 | 3,2236 |

Formulário de TEM (5 de Junho 2013)

| Leis da termodinâmica | Ciclo Vapor |
|---|--|
| $W = \int_1^2 PdV$ $h = u + Pv$ $c_v = \left(\frac{\delta u}{\delta T}\right)_v$ $c_p = \left(\frac{\delta h}{\delta T}\right)_p$ 1ª Lei da Termodinâmica: $\Delta E = Q - W$, $\Delta E = \Delta PE + \Delta KE + \Delta U$ 1ª Lei da Termodinâmica: (sistemas abertos): $\dot{Q} - \dot{W} = \sum \dot{m}_{out} \left(h_{out} + \frac{v_{out}^2}{2} + gz_{out} \right) - \sum \dot{m}_{in} \left(h_{in} + \frac{v_{in}^2}{2} + gz_{in} \right)$ 2ª Lei da Termodinâmica: $\eta = 1 - \frac{Q_C}{Q_H} \leq 1 - \frac{T_C}{T_H}$ $\Delta S \geq \oint_1^2 \frac{\delta Q}{T} = \oint_1^2 \frac{\delta Q}{T} + S_{gen}$ $S_{gen} = \Delta S_{sistema} + \Delta S_{exterior} \geq 0$ $TdS = dU + PdV$ Expansão linear $\Delta L = \alpha L \Delta T$ Rendimentos de ciclos de Carnot: $\eta_{max} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$ $COP_{BC,max} = \frac{T_H}{T_H - T_C}$ $COP_{F,max} = \frac{T_C}{T_H - T_C}$ | $\frac{\dot{W}_b}{\dot{m}} = h_2 - h_1$ $\frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}} = h_3 - h_2$ $\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}} = h_3 - h_4$ $\frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{m}} = h_4 - h_1$ $\eta = \frac{W_{net}}{Q_{in}}$ |
| | Gases Perfeitos |
| | $PV = nRT$, n n ^o moles $R = 8,3145 \text{ J}/(\text{K} \cdot \text{mol})$ $PV = mR_{gas}T$, $R_{gas} = R/M_{gas}$, $c_v = \frac{3}{2}R$ $c_p = \frac{5}{2}R$ $C_p = C_v + R$ $\Delta s = u \bar{C}_v \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) - R \ln \left(\frac{v_2}{v_1} \right)$ $\Delta s = \bar{C}_p \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) - R \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$ |
| Transmissão de calor | Física Quântica e Estrutura da Matéria |
| Lei de Fourier $\dot{q} = kA \frac{T_1 - T_2}{L}$ $\ddot{q} = k \frac{T_1 - T_2}{L}$ $\dot{q} = UA \Delta T$, $U = \frac{1}{R} = \frac{1}{1/h_1 + L_A/k_A + L_B/k_B + L_C/k_C + 1/h_4}$ Lei de arrefecimento de Newton: $\dot{q} = hA(T_s - T_f)$, $\ddot{q} = h(T_s - T_f)$ Lei de Stefan-Boltzmann $\ddot{q} = \epsilon \sigma T^4$ | Energia de um fóton: $E = hf$ Constante de Plank: $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ Js}$ Momento linear de um fóton: $p = \frac{h}{c}$ Comprimento de onda de uma partícula $\lambda = \frac{h}{p}$ $\frac{1}{\lambda_n} = RZ^2 \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$, $R = 1.097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ |

| | |
|--------|--|
| Nome | |
| Número | |

Transferência entre 2 corpos com um fator de forma de 1

$$\dot{q} = A_1 \epsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

Constante Boltzmann $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$

Lei de Wien $T = \frac{2,897768 \times 10^{-3} mK}{\lambda_{max}}$