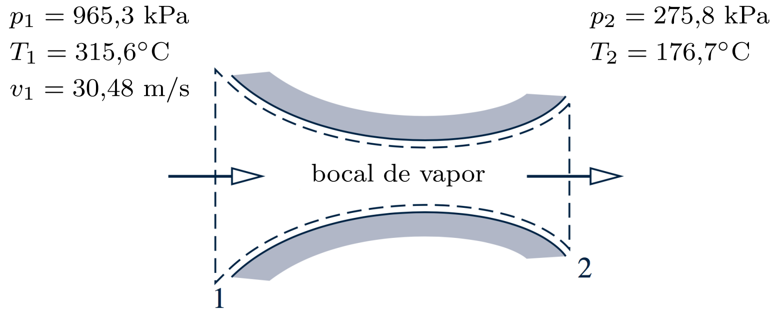
Data: 17/05/2017

Professor: Emílio G. F. Mercuri

(1) (50.0 pontos) Vapor d'água é admitido em um bocal que opera em regime permanente a $p_1 = 965{,}3$ kPa, $T_1 = 315{,}6°$C com uma velocidade $v_1 = 30{,}48$ m/s. A pressão e a temperatura na descarga são $p_2 = 275{,}8$ kPa e $T_2 = 176{,}7°$C. Não ocorre transferência de calor significativa entre o bocal e sua vizinhança, e a variação de energia potencial entre a entrada e a saída pode ser desprezada. Determine a eficiência do bocal.



Solução da Questão 1:

A eficiência do bocal é obtida pela equação:

$$\eta_{\text{bocal}} = \frac{\text{energia cinética real de saída}}{\text{energia cinética isoentrópica de saída}} = \frac{v_2^2/2}{v_{2s}^2/2} = \frac{v_2^2}{v_{2s}^2}$$

Necessitamos encontrar a energia cinética específica real na saída do bocal e a energia cinética específica que seria atingida na saída, em uma expansão isoentrópica a partir do estado de admissão especificado e a pressão de saída dada.

Balanço da taxa de massa e energia para o volume de controle:

$$\frac{dm_{\text{vc}}}{dt} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s \qquad \frac{dE_{\text{vc}}}{dt} = \dot{Q}_{\text{vc}} - \dot{W}_{\text{vc}} + \sum \dot{m}_e(h_e + \frac{1}{2}v_e^2 + gZ_e) - \sum \dot{m}_s(h_s + \frac{1}{2}v_s^2 + gZ_s)$$

Com uma entrada e uma saída em regime permanente, que engloba o bocal, as equações acima podem ser escritas como:
Balanço de massa:

$$0 = \dot{m}_e - \dot{m}_s \qquad \rightarrow \qquad \dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m}$$

Balanço de Energia:

$$0 = \dot{Q}_{\text{vc}} - \dot{W}_{\text{vc}} + \dot{m}(h_e + \frac{1}{2}v_e^2 + gZ_e) - \dot{m}(h_s + \frac{1}{2}v_s^2 + gZ_s)$$

Fazendo $\Delta\text{EP} = 0$, processo adiabático e trabalho de eixo nulo:

$$0 = \dot{m}(h_1 + \frac{1}{2}v_1^2) - \dot{m}(h_2 + \frac{1}{2}v_2^2)$$

$$\frac{v_2^2}{2} = h_1 - h_2 + \frac{v_1^2}{2}$$

Esta equação se aplica tanto para a expansão real quanto para a expansão isentrópica.

A partir das tabelas de saturação da água nota-se de que na entrada do bocal tem-se vapor d'água superaquecido. Consultando a Tabela B.1.3 obtém-se os dados de vapor d'água superaquecido, reescritos aqui nas tabelas 1, 2 e 3.

Tabela 1. **Vapor d'água superaquecido (Tabela B.1.3)** $p = 800$ kPa (170,43°C)

T (°C)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
300,0	3056,43	7,2327
350,0	3161,68	7,4088

Tabela 2. **Vapor d'água superaquecido (Tabela B.1.3)** $p = 1000$ kPa (179,91 °C)

T (°C)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
300,0	3051,15	7,1228
350,0	3157,65	7,3010

Em seguida são executadas 6 interpolações para obter a entalpia específica e entropia específica no estado 1. Primeiro obtém-se os 4 valores em vermelho da tabela 3 e depois os 2 valores em verde abaixo.

TABELA 3. **Interpolações para a pressão** $p_1 = 965{,}3$ kPa

T (°C)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
300,0	3052,30	7,1468
315,6	3085,45	7,2023
350,0	3158,53	7,3246

O mesmo procedimento é realizado para obter a entalpia do estado 2:

Tabela B.1.3 $p = 200$ kPa (120,23°C)

T (°C)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
150,0	2768,80	7,2795
200,0	2870,46	7,5066

Tabela B.1.3 $p = 300$ kPa (133,55°C)

T (°C)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
150,0	2760,95	7,0778
200,0	2865,54	7,3115

Interpolações $p_2 = 275{,}8$ kPa

T (°C)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
150,0	2762,67	7,1219
176,7	2818,17	7,2459
200,0	2866,62	7,3541

Agora pode-se calcular a Energia Cinética 2 (EC_2):

$$\mathrm{EC}_2 = \frac{v_2^2}{2} = h_1 - h_2 + \frac{v_1^2}{2} = 3085{,}45 - 2818{,}17 + \frac{30{,}48^2}{2} \times \frac{1}{1000} = 267{,}74\,\mathrm{kJ/kg} \quad \blacksquare$$

$$v_2 = 731{,}76\,\mathrm{m/s}$$

Para o bocal isentrópico, pode-se interpolar a entalpia correspondente à entropia inicial $s_1 = 7{,}2023$ kJ/kg K.

h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
2762,67	7,1219
$h_s = 2798{,}6478$	7,2023
2866,62	7,3541

$$(\mathrm{EC}_2)_s = \frac{v_{2s}^2}{2} = h_1 - h_{2s} + \frac{v_1^2}{2} = 3085{,}45 - 2798{,}6478 + \frac{30{,}48^2}{2} \times \frac{1}{1000} = 287{,}27\,\mathrm{kJ/kg}$$

$$v_{2s} = 757{,}98\,\mathrm{m/s}$$

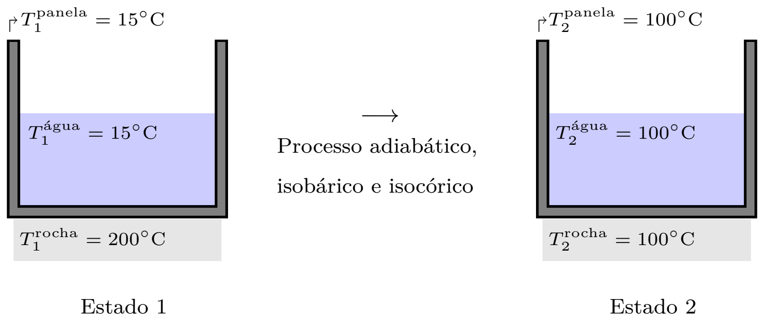
A eficiência do bocal é, portanto:

$$\eta_{\mathrm{bocal}} = \frac{\mathrm{EC}_2}{\mathrm{EC}_{2s}} = \frac{267{,}74}{287{,}27} = 0{,}9320 = 93{,}2\% \quad \blacksquare$$

A principal irreversibilidade em bocais é o atrito entre o gás ou líquido escoando e a parede do bocal. O efeito do atrito leva a uma menor energia cinética na saída e, portanto, uma menor velocidade na saída, quando comparada com a que seria atingida em uma expansão isentrópica para uma mesma pressão.

(2) (50.0 pontos) Uma rocha de granito ($m_{\text{rocha}} = 5$ kg) foi aquecida até 200°C. Uma panela de ferro ($m_{\text{panela}} = 1$ kg) com água a 15°C é colocada sobre a rocha e o sistema composto pela rocha + panela + água atingem equilíbrio térmico a $T_2 = 100$°C. O sistema composto pelos três elementos (rocha + panela + água) sofre um processo adiabático de equilíbrio térmico saindo do estado 1 ao estado 2 conforme a figura abaixo. O conjunto está a 100 kPa (pressão atmosférica):

a) Qual é a massa d'água dentro da panela?
b) Qual a geração de entropia no sistema causada pelo processo?



Variação da entropia para sólidos:

$s_2 - s_1 \approx c_{\text{sólido}} \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$

Calores específicos para sólidos:

$c_{\text{granito}} = 0{,}89$ kJ/(kg K)

$c_{\text{ferro}} = 0{,}42$ kJ/(kg K)

Variação da entropia para líquidos (água):

$s_2 - s_1 \approx s_{l2}^{sat} - s_{l1}^{sat}$

usar valores tabelados de líquido saturado a certa T

Solução da Questão 2:

Como se trata de um processo adiabático e não há fluxo de massa entrando nem saindo do sistema podemos usar as leis para um sistema fechado (massa de controle).

A resolução irá se basear na Primeira e Segunda Leis integradas ao longo do tempo do Estado 1 até o Estado 2.

1ª Lei:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = (m_2 e_2 - m_1 e_1)_{\text{mc}} = {}_1Q_2 - {}_1W_2$$

A massa do sistema é composta por 3 elementos (rocha + água + panela) e não há transferência de calor nem trabalho de eixo. Além disso, a energia específica é igual a energia interna uma vez que não há variação de energia cinética nem potencial do sistema, portanto:

$$U_2 - U_1 = (m_2 u_2 - m_1 u_1)_{\text{sistema}} = 0$$

$$m_{\text{rocha}}(u_2^{\text{rocha}} - u_1^{\text{rocha}}) + m_{\text{água}}(u_2^{\text{água}} - u_1^{\text{água}}) + m_{\text{panela}}(u_2^{\text{panela}} - u_1^{\text{panela}}) = 0$$

Usando a aproximação de calores específicos constantes:

$$m_{\text{rocha}} c_{\text{granito}} (T_2 - T_1)_{\text{rocha}} + m_{\text{água}} (u_2^{\text{liq.sat.}} - u_1^{\text{liq.sat.}})_{\text{água}} + m_{\text{panela}} c_{\text{ferro}} (T_2 - T_1)_{\text{panela}} = 0$$

Podemos obter a massa da água utilizando a partir da primeira lei acima. Da tabela de água saturada adota-se o valor da energia interna específica da água como líquido saturado para os Estados 1 e 2.

$$m_{\text{água}} = \frac{m_{\text{rocha}} c_{\text{granito}} (T_1 - T_2)_{\text{rocha}} + m_{\text{panela}} c_{\text{ferro}} (T_1 - T_2)_{\text{panela}}}{(u_2^{\text{liq.sat.}} - u_1^{\text{liq.sat.}})_{\text{água}}}$$

$$m_{\text{água}} = \frac{5 \times 0{,}89(200 - 100) + 1 \times 0{,}42(15 - 100)}{(418{,}91 - 62{,}98)} = \frac{5(89) + 0{,}42(-85)}{355{,}93} = 1{,}0377 = 1{,}15\,\text{kg} \quad \blacksquare$$

2ª Lei:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = (m_2 s_2 - m_1 s_1)_{\text{mc}} = \int_0^t \sum \frac{\dot{Q}_{\text{vc}}}{T_{sc}} dt + {}_1S_{2,\text{ger}}$$

Como se trata de um processo adiabático:

$${}_1S_{2,\text{ger}} = m_{\text{rocha}}(s_2 - s_1)_{\text{rocha}} + m_{\text{água}}(s_2 - s_1)_{\text{água}} + m_{\text{panela}}(s_2 - s_1)_{\text{panela}}$$

Utilizando as aproximações sugeridas no enunciado:

$$(s_2 - s_1)_{\text{rocha}} \approx c_{\text{granito}} \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = 0{,}89 \ln\left(\frac{100 + 273{,}15}{200 + 273{,}15}\right) = 0{,}89 \ln\left(\frac{373{,}15}{473{,}15}\right) = -0{,}2113\,\text{kJ/(kg K)}$$

$$(s_2 - s_1)_{\text{panela}} \approx c_{\text{ferro}} \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) = 0{,}42 \ln\left(\frac{100 + 273{,}15}{15 + 273{,}15}\right) = 0{,}42 \ln\left(\frac{373{,}15}{288{,}15}\right) = 0{,}1086\,\text{kJ/(kg K)}$$

$$(s_2 - s_1)_{\text{água}} \approx s_{l2}^{sat} - s_{l1}^{sat} = 1{,}3068 - 0{,}2245 = 1{,}0823\,\text{kJ/(kg K)}$$

$${}_1S_{2,\text{ger}} = m_{\text{rocha}}(s_2 - s_1)_{\text{rocha}} + m_{\text{água}}(s_2 - s_1)_{\text{água}} + m_{\text{panela}}(s_2 - s_1)_{\text{panela}}$$

$${}_1S_{2,\text{ger}} = 5(-0{,}2113) + 1(1{,}0823) + 1{,}15(0{,}1086) = 0{,}138744 = 0{,}15\,\text{kJ/(kg K)} \quad \blacksquare$$

Relações Matemáticas

$$\frac{dm_{\text{vc}}}{dt} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s \qquad \frac{dE_{\text{vc}}}{dt} = \dot{Q}_{\text{vc}} - \dot{W}_{\text{vc}} + \sum \dot{m}_e(h_e + \frac{1}{2}v_e^2 + gZ_e) - \sum \dot{m}_s(h_s + \frac{1}{2}v_s^2 + gZ_s)$$

$$(m_2 - m_1)_{\text{vc}} = \sum m_e - \sum m_s \qquad E_2 - E_1 = Q_{\text{vc}} - W_{\text{vc}} + \sum m_e(h_e + \frac{1}{2}v_e^2 + gZ_e) - \sum m_s(h_s + \frac{1}{2}v_s^2 + gZ_s)$$

$$P\nu = RT \qquad PV = mRT = n\bar{R}T \qquad n = \frac{m}{M} \qquad PV^n = C \qquad \oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

$$\eta_{\text{térmico real}} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \leq 1 - \frac{T_L}{T_H} \qquad \beta_{\text{real}}^{\text{ref}} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} \leq \frac{T_L}{T_H - T_L} \qquad \beta_{\text{real}}^{\text{B.C.}} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} \leq \frac{T_H}{T_H - T_L}$$

$$\nu P_e + \frac{1}{2}v_e + gz_e = \nu P_s + \frac{1}{2}v_s + gz_s + w \qquad w = -\int_e^s \nu \, dP$$

$$\frac{dS_{\text{vc}}}{dt} = \sum \dot{m}_e s_e - \sum \dot{m}_s s_s + \sum \frac{\dot{Q}_{\text{vc}}}{T_{sc}} + \dot{S}_{\text{ger}} \qquad (m_2 s_2 - m_1 s_1)_{\text{vc}} = \sum m_e s_e - \sum m_s s_s + \int_0^t \sum \frac{\dot{Q}_{\text{vc}}}{T_{sc}} dt + {}_1S_{2\text{ger}}$$

$$\eta_{\text{turbina}} = \frac{w}{w_s} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \qquad \eta_{\text{compressor}} = \frac{w_s}{w} = \frac{h_1 - h_{2s}}{h_1 - h_2} \qquad \eta_{\text{bocal}} = \frac{v_2^2/2}{v_{2s}^2/2} = \frac{v_2^2}{v_{2s}^2}$$