

Prova scritta di Fisica Tecnica 1 – Fila A

22 dicembre 2006

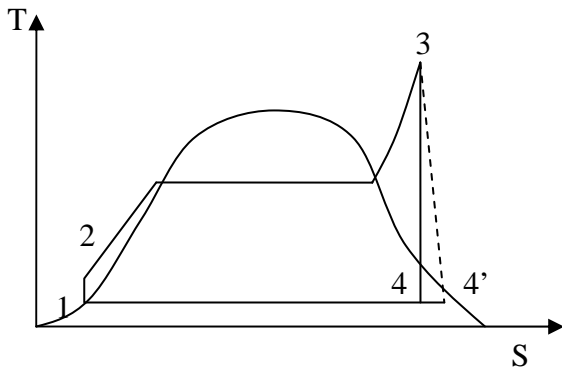
Esercizio n. 1

Un impianto a vapore per la produzione di energia elettrica opera secondo un ciclo Rankine con le seguenti caratteristiche: portata di vapore evolvente pari a 120 kg/s; pressione in caldaia pari a 80 bar; temperatura di ingresso in turbina pari a 600 °C; pressione al condensatore pari a 0.08 bar; titolo all'uscita della turbina pari a 0.94.

Determinare:

1. l'efficienza del ciclo;
2. il rendimento isoentropico della turbina;
3. la potenza meccanica prodotta.

Soluzione Esercizio n. 1



Dalle tabelle del vapore saturo ricavo: $p_1=0.08$ bar; $x_1=0$; $H_1=173.9$ kJ/kg

Trascuro il lavoro della pompa, quindi posso dire: $H_2=H_1=173.9$ kJ/kg

Dalle tabelle per il vapore surr. trovo: $p_3=80$ bar; $T_3=600$ °C; $H_3=3639.5$ kJ/kg; $S_3=7.0191$ kJ/kgK

Del punto 4 (fine espansione reversibile) posso dire: $p_4=0.08$ bar; $S_4=S_3=7.0191$ kJ/kgK $< S_{v(0.08 \text{ bar})}$

Quindi il punto 4 si trova nella zona del vapore saturo, il suo titolo vale:

$$x_4 = \frac{S_4 - S_{L4}}{\left(\frac{r}{T}\right)_4} = \frac{7.0191 - 0.5926}{7.6370} = 0.84$$

Nota il titolo posso calcolare l'entalpia:

$$H_4 = H_{L4} + r_4 x_4 = 173.9 + 2403.2 \cdot 0.84 = 2192.6 \text{ kJ/kg}$$

L'entalpia del punto 4' invece la calcolo dal titolo indicato nel testo:

$$H_{4'} = H_{L4} + r_4 x_{4'} = 173.9 + 2403.2 \cdot 0.94 = 2432.9 \text{ kJ/kg}$$

A questo punto posso calcolare i punti richiesti:

$$\text{L'efficienza del ciclo varrà: } \eta = \frac{L}{Q_1} = \frac{H_3 - H_{4'}}{H_3 - H_2} = \frac{3639.5 - 2432.9}{3639.5 - 173.9} = \mathbf{0.35}$$

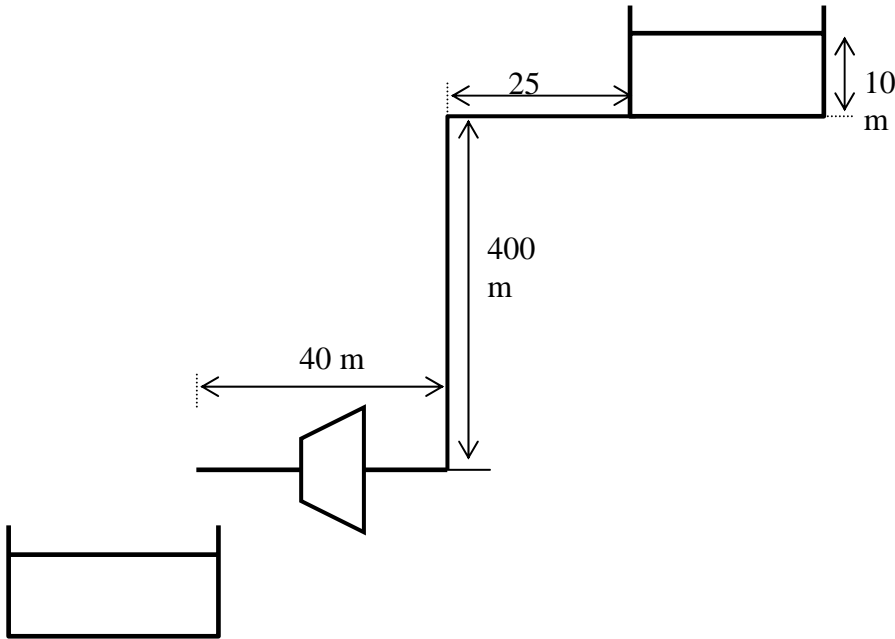
$$\text{Il rendimento isoentropico dell'espansore varrà: } \rho_E = \frac{H_3 - H_{4'}}{H_3 - H_4} = \frac{3639.5 - 2432.9}{3639.5 - 2192.6} = \mathbf{0.83}$$

$$\text{La potenza meccanica vale: } P = (H_3 - H_{4'}) \cdot \dot{m} = (3639.5 - 2432.9) \cdot 120 = \mathbf{144.8 \text{ MW}}$$

Esercizio n. 2

Una centrale idroelettrica sfrutta il dislivello tra due laghi artificiali rappresentati in figura per produrre energia elettrica. Sapendo che la portata d'acqua è pari a 250 litri/sec, alla temperatura di 10°C e che il diametro del condotto (tubi saldati) è di 350 mm, determinare:

1. la velocità dell'acqua nel condotto;
2. il carico d'attrito dovuto alle perdite di carico (trascurare quelle concentrate);
3. la potenza meccanica ottenuta dalla turbina supposta ideale.



Soluzione Esercizio n. 2

Si consideri la sezione 1 sul pelo libero del serbatoio 1 e la sezione 2 nello sbocco della tubazione in fondo.

$$h_{a1,2} + h_{el,2} + (z_2 - z_1) + \frac{(w_2^2 - w_1^2)}{2g} + \frac{(p_2 - p_1)}{\rho g} = 0$$

$$p_2 = p_1 = p_{atm}$$

$$z_2 - z_1 = 400 + 10 = 410 \text{ m}$$

$$w_1 = 0 \Rightarrow w_2^2 - w_1^2 = w_2^2 = w^2 \text{ (poichè la sezione della tubazione è costante)}$$

$$\text{velocità dell'acqua: } w = \frac{250 \cdot 10^{-3}}{\frac{\pi D^2}{4}} = 2.6 \text{ m/s}$$

$$\text{Re} = \frac{wD}{\nu} = \frac{2.6 \cdot 0.35}{1.307 \cdot 10^{-6}} = 7 \cdot 10^5 \left. \vphantom{\frac{wD}{\nu}} \right\} \rightarrow f \cong 0.015$$

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{60 \cdot 10^{-6}}{0.35} = 0.00017$$

$$\text{carico d'attrito: } h_{a1,2} = \frac{w^2}{2g} \left[\frac{L}{D} f(\text{Re}, \frac{\varepsilon}{D}) \right] = \frac{2.6^2}{2 \cdot 9.81} \frac{25 + 400 + 40}{0.35} 0.015 = 6.9 \text{ m}$$

$$z_2 - z_1 = -410 \text{ m}$$

$$h_{el,2} = -h_{a1,2} - (z_2 - z_1) - \frac{(w_2^2)}{2g} = -6.9 + 410 - \frac{2.6^2}{2 \cdot 9.81} = 403 \text{ m}$$

$$\text{potenza della turbina: } P = gh_{el,2} \cdot \dot{m} = gh_{el,2} \cdot G \cdot \rho = 9.81 \cdot 403 \cdot 250 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 = 988 \text{ kW}$$

Prova scritta di Fisica Tecnica 1 - A
14 dicembre 2001

Esercizio n.1

Un impianto motore a vapore eroga una potenza netta pari a 70 MW. Il ciclo compiuto dal fluido consiste in un doppio surriscaldamento (temperatura finale di entrambi i surriscaldamenti pari a 500 °C) e doppia espansione. I due stadi di turbina sono caratterizzati da un rendimento isoentropico di espansione pari a 0.85 e la prima espansione avviene tra 80 e 25 bar. Sapendo che la pressione al condensatore è 0.08 bar, si richiede di valutare:

1. La portata di vapore evolvente;
2. La frazione utilizzata del ciclo;
3. La portata di refrigerante (acqua) al condensatore nell'ipotesi che la differenza di temperatura tra ingresso e uscita debba essere contenuta in 10 °C.
4. La portata totale di combustibile ($H_i=48000$ kJ/kg), con un rendimento di combustione $\eta_c=0.9$.

Soluzione Esercizio n.1

Stato	T [°C]	x	P [bar]	H [kJ/kg]	S [kJ/kgK]
6	41.54	0	0.08	173.9	0.5926
1			80	181.9	
2	500		80	3398.8	6.7262
3	320		25	3057.5	6.7262
3'			25	3108.7	
4	500		25	3461.7	7.3240
5	41.54	0.88	0.08	2288.7	7.3240
5'	41.54	0.95	0.08	2464.7	

1. Potenza:

$$L_{eTOT} = [(H_2 - H_{3'}) + (H_4 - H_{5'}) - (H_1 - H_6)] = 1279.1 \text{ kJ/kgK}$$

$$P = \dot{m} [(H_2 - H_{3'}) + (H_4 - H_{5'}) - (H_1 - H_6)] = \dot{m} \cdot L_{eTOT}$$

$$\dot{m} = \frac{P}{L_{eTOT}} = 54.7 \text{ kg/s}$$

2. Frazione utilizzata:

$$\eta = \frac{L_{eTOT}}{Q'}$$

$$Q' = (H_2 - H_1) + (H_4 - H_3) = 3570 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta = 0.358$$

3. Portata di refrigerante al condensatore:

$$\dot{m} \cdot (H_{5'} - H_6) = \dot{m}_{H_2O} \cdot c_{pH_2O} \cdot \Delta T_{H_2O}$$

$$\dot{m}_{H_2O} = \frac{\dot{m} \cdot (H_{5'} - H_6)}{c_{pH_2O} \cdot \Delta T_{H_2O}} = 2993.5 \text{ kg/s}$$

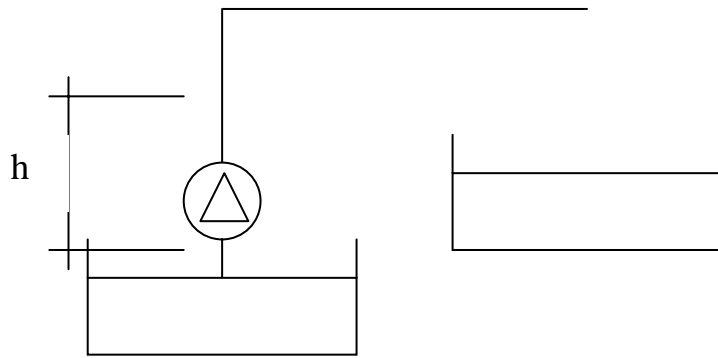
4. Portata di combustibile:

$$\dot{m} \cdot Q' = \dot{m}_{comb} \cdot \eta_c \cdot H_i$$

$$\dot{m}_{comb} = \frac{\dot{m} \cdot Q'}{\eta_c \cdot H_i} = 4.52 \text{ kg/s}$$

Esercizio n.2

Una pompa che fornisce una pressione relativa di mandata pari a 50 kPa consente il deflusso di una portata di olio (densità $\rho=825 \text{ kg/m}^3$, viscosità dinamica $\mu=200 \times 10^{-4} \text{ kg/ms}$) attraverso un condotto (lunghezza 20 m, diametro interno 25.4 mm, scabrezza $50 \text{ }\mu\text{m}$, dislivello $h=4 \text{ m}$) fino ad un serbatoio posizionato più in alto ed a pressione atmosferica (vedi figura). Trascurando le perdite di carico concentrate, si valuti la portata effluente nell'ipotesi (da verificare) che il moto all'interno del condotto sia laminare.



Soluzione Esercizio n.2

$$\text{Eq. Bernoulli: } h_{a12} + h_{e12} + \frac{p_2 - p_1}{\gamma} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} + z_2 - z_1 = 0$$

h_{e12} è nullo perché la sezione 1 è scelta a valle della pompa.

$\frac{w_2^2 - w_1^2}{2g}$ è nullo perché la sezione di passaggio è costante così come la densità.

Supponendo il regime laminare il fattore d'attrito vale: $\lambda = \frac{64}{\text{Re}}$

Sostituendo nell'eq. Di Bernoulli:

$$\frac{32Lwv}{gD^2} - \frac{\Delta p_{\text{pompa}}}{g\rho} + h = 0$$

$$w = \left(\frac{\Delta p_{\text{pompa}}}{g\rho} - h \right) \frac{gD^2\rho}{32Lw\mu} = 0.888 \text{ m/s}$$

$$\text{Re} = \frac{wD\rho}{\mu} = 930 < 2300 \text{ Regime laminare verificato}$$

Prova scritta di Fisica Tecnica 1 - B
14 dicembre 2001

Esercizio n.1

Un impianto motore a vapore opera con una pressione massima in caldaia di 90 bar. Il vapore prodotto entra in turbina a 480 °C ed espande fino alla pressione 0.05 bar e titolo finale 0.88. La potenza prodotta è pari a 25 MW. Si chiede di calcolare:

1. il rendimento isoentropico dell'espansore;
2. la portata massica di vapore che compie il ciclo;
3. la frazione utilizzata;
4. La portata di refrigerante (acqua) al condensatore nell'ipotesi che la differenza di temperatura tra ingresso e uscita debba essere contenuta in 10 °C.

Soluzione Esercizio n.1

Stato	T [°C]	x	P [bar]	H [kJ/kg]	S [kJ/kgK]
2	480		90	3333.7	6.5863
3	32.9	0.77	0.05	2004.1	6.5863
3'	32.9	0.88	0.05	2270.7	
4	32.9		0.05	137.8	
1			90	146.8	

1. Rendimento isoentropico dell'espansore:

$$\rho_E = \frac{H_2 - H_{3'}}{H_2 - H_3} = 0.8$$

2. Portata massica:

$$L_{eTOT} = (H_2 - H_{3'}) - (H_1 - H_4) = 1054 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{m} = \frac{P}{L_{eTOT}} = 23.72 \text{ kg/s}$$

3. Frazione utilizzata:

$$\eta = \frac{L_{eTOT}}{Q'}$$

$$Q' = (H_2 - H_1) = 3187 \text{ kJ/kg}$$

$$\eta = 0.33$$

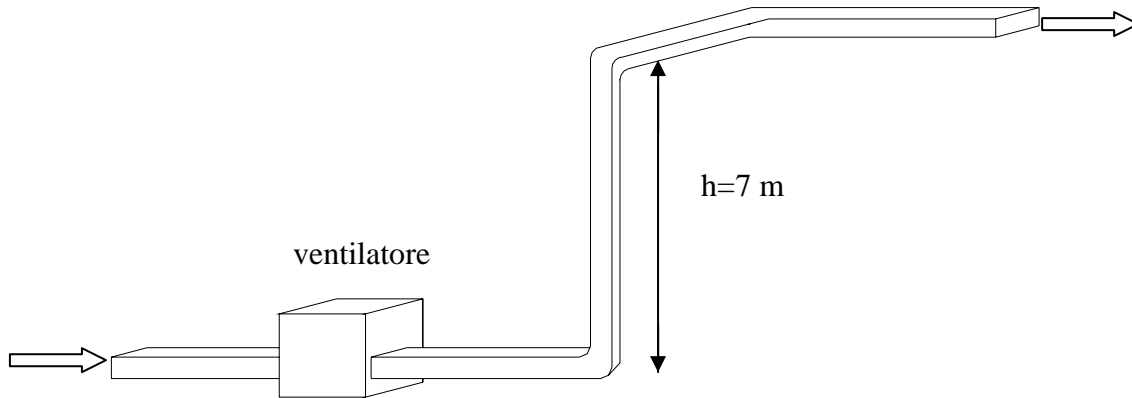
4. Portata di refrigerante al condensatore:

$$\dot{m} \cdot (H_{3'} - H_4) = \dot{m}_{H_2O} \cdot c_{pH_2O} \cdot \Delta T_{H_2O}$$

$$\dot{m}_{H_2O} = \frac{\dot{m} \cdot (H_{3'} - H_4)}{c_{pH_2O} \cdot \Delta T_{H_2O}} = 1208.6 \text{ kg/s}$$

Esercizio n.2

Un ventilatore aspira in regime permanente una portata d'aria pari a $6000 \text{ m}^3/\text{h}$ alla pressione di 98 kPa e alla temperatura di $40 \text{ }^\circ\text{C}$ (viscosità dinamica $\mu=1.9 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$). Un canale in lamiera metallica di sezione rettangolare ($300 \times 400 \text{ mm}$, scabrezza $1500 \text{ }\mu\text{m}$, lunghezza complessiva 100 m , dislivello 7 m) adduce l'aria ad un locale in cui la pressione è 100 kPa (vedi figura). Ipotizzando la densità dell'aria costante lungo il condotto, valutare la potenza del ventilatore (il cui rendimento è pari a 0.75). Si trascurino le perdite di carico concentrate all'imbocco e all'uscita del canale e si utilizzi come coefficiente di forma per le perdite localizzate dovute alle curve il valore 0.5 .



Soluzione Esercizio n.2

Applicando l'eq. dei gas perfetti:

$$\rho = \frac{P}{R_1 T} = 1.091 \text{ kg/m}^3$$

La portata massica risulta: $\dot{m} = G \cdot \rho = 1.82 \text{ kg/s}$

La velocità è pari a: $w = \frac{G}{\text{Area}} = 13.9 \text{ m/s}$

Il diametro equivalente (sezione non circolare):

$$D_{\text{eq}} = \frac{4 \text{Area}}{\text{Perimetro}} = 0.343 \text{ m}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{Re} = \frac{w D_{\text{eq}} \rho}{\mu} = 2.74 \times 10^5 \\ \frac{\varepsilon}{D_{\text{eq}}} = 0.00437 \end{aligned} \right\} \rightarrow \lambda \cong 0.03 \text{ dal diagramma di Moody}$$

$$\text{Eq. Bernoulli: } h_{a12} + h_{e12} + \frac{p_2 - p_1}{\gamma} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} + z_2 - z_1 = 0$$

$\frac{w_2^2 - w_1^2}{2g}$ è nullo perché la sezione di passaggio è costante così come la densità.

$$h_m = |h_{e12}| = \frac{w^2}{2g} \left(\lambda \frac{L}{D_{\text{eq}}} + \sum_i \lambda'_i \right) + \frac{p_2 - p_1}{\gamma} + z_2 - z_1 = 294.8 \text{ m}$$

$$P = \frac{h_m \cdot g \cdot \dot{m}}{\eta_{\text{vent}}} = 7.02 \text{ kW}$$

Prova scritta di Fisica Tecnica 1 - A
13 dicembre 2002

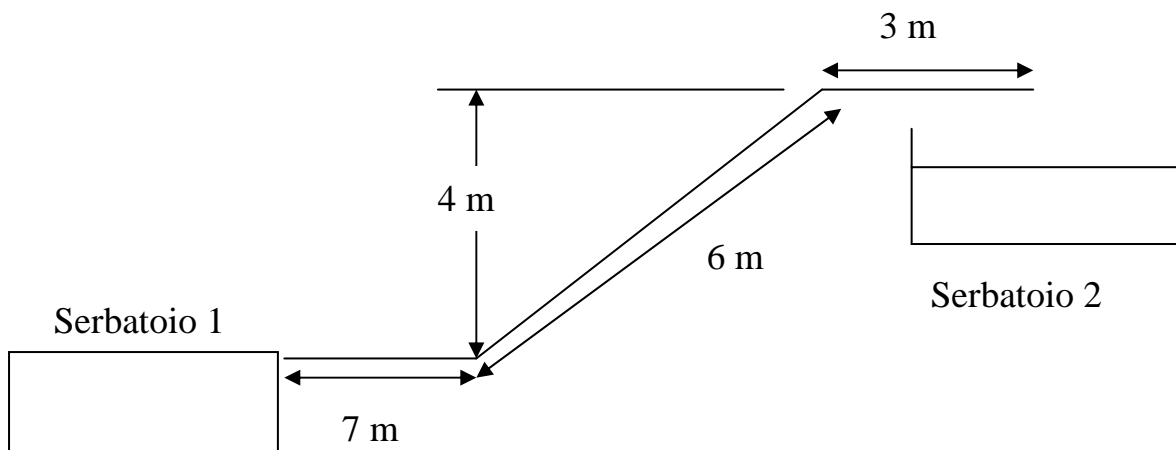
Esercizio n.1

Un impianto motore a vapore a semplice surriscaldamento eroga una potenza netta pari a 65 MW. Il vapore esce dalla caldaia in condizioni di pressione e temperatura pari a 75 bar e 600 °C. Il rendimento isoentropico di espansione è pari a 0.85. Sapendo che la pressione al condensatore è 0.05 bar, si richiede di valutare:

5. Il titolo di vapore all'uscita della turbina;
6. La portata di vapore evolvente;
7. La frazione utilizzata del ciclo;
8. La portata di refrigerante (acqua) al condensatore nell'ipotesi che la differenza di temperatura tra ingresso e uscita sia di 10 °C.
9. La portata di combustibile ($H_i=45000$ kJ/kg), con un rendimento di combustione $\eta_c=0.9$.

Esercizio n.2

Il circuito schematizzato in figura è costituito da un tubazione in acciaio di diametro interno 120mm che collega un serbatoio 1 alla pressione di 1.4 bar ad un serbatoio 2 alla pressione atmosferica. Trascurando le perdite di carico concentrate e considerando che il fattore di attrito sia indipendente da Reynolds (moto turbolento completamente sviluppato), determinare la portata di acqua defluente (temperatura dell'acqua pari a 70 °C).



Prova scritta di Fisica Tecnica 1 - B
13 dicembre 2002

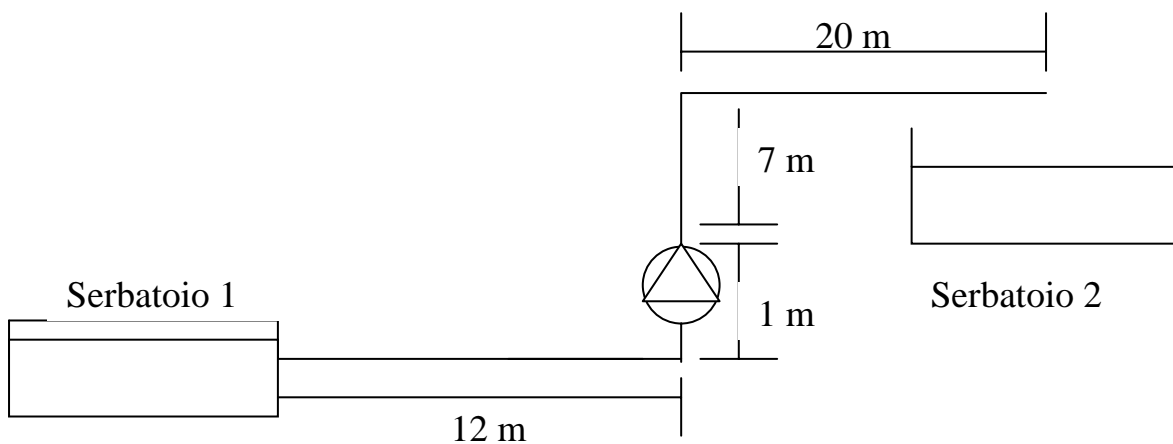
Esercizio n.1

Un impianto motore a vapore a semplice surriscaldamento presenta una frazione utilizzata pari a 0.32. Il ciclo si svolge tra le pressioni di 80 bar e 0.08 bar, con una portata di vapore evolvente pari a 125 ton/h. La massima temperatura del ciclo è pari a 580 °C. Si chiede di calcolare:

5. Il titolo di vapore all'uscita della turbina;
6. La potenza dell'impianto;
7. Il rendimento isoentropico dell'espansore ρ_E ;
8. La portata d'acqua di refrigerazione al condensatore nell'ipotesi che la differenza di temperatura tra ingresso e uscita sia pari a 10 °C;
9. La portata di combustibile ($H_i=48000$ kJ/kg) in caldaia, per cui si assuma un rendimento di combustione pari a $\eta_c=0.9$.

Esercizio n.2

Nel circuito rappresentato in figura è presente una pompa che permette il deflusso di una portata d'acqua di 24 l/min alla temperatura di 50 °C dal serbatoio 1 al serbatoio 2, quest'ultimo alla pressione atmosferica. La tubazione di collegamento ha un diametro interno pari a 25.4 mm e una scabrezza assoluta 50 μ m. Trascurando le perdite di carico concentrate, valutare la pressione vigente nella sezione del circuito subito a valle della pompa.



Prova scritta di Fisica Tecnica 1
17 dicembre 2002

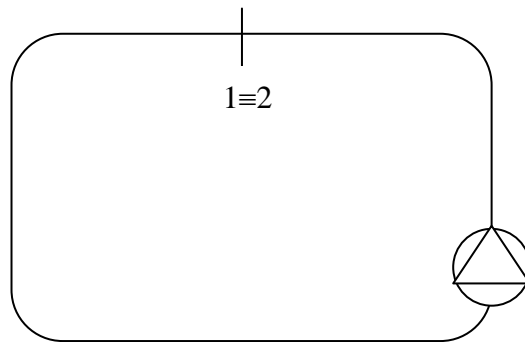
Esercizio n.1

Un impianto motore a vapore opera con una pressione massima in caldaia di 80 bar. Il vapore prodotto entra in turbina a 500 °C ed espande fino alla pressione 0.08 bar e titolo finale 0.88. La potenza prodotta è pari a 27 MW. Si chiede di calcolare:

10. il rendimento isoentropico dell'espansore;
11. la portata massica di vapore che compie il ciclo;
12. la frazione utilizzata;
13. La portata di refrigerante (acqua) al condensatore nell'ipotesi che la differenza di temperatura tra ingresso e uscita debba essere contenuta in 10 °C.

Esercizio n.2

Una portata di 8 kg/s di acqua percorre il circuito chiuso (in acciaio) schematizzato in figura. Determinare la potenza necessaria alla pompa per mantenere tale portata, sapendo che il diametro della tubazione è 80 mm e che la lunghezza complessiva del circuito è pari a 30 m. Si trascurino le resistenze localizzate e si consideri una temperatura dell'acqua pari a 50°C. Si consideri inoltre unitario il rendimento della pompa.

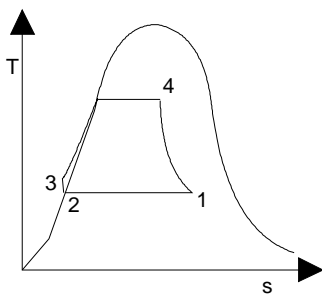


Prova scritta di Fisica Tecnica 1
5 dicembre 2003

Esercizio n.1

Una portata di vapore di 2500 m³/ora, nelle condizioni iniziali di p₁=2 bar e titolo x₁=0.75, viene raffreddata sino alle condizioni di liquido saturo in un serpentino refrigerante. Successivamente il fluido viene compresso in fase liquida fino alla pressione p₃=5 bar e quindi riscaldato in una caldaia a pressione costante. Infine, mediante una espansione di Joule-Thomson, il fluido ritorna nelle condizioni iniziali. Determinare il titolo del vapore all'uscita della caldaia, e la potenza termica ceduta al vapore all'interno della caldaia.

Soluzione Esercizio 1:



punto 1:

Dalle tabelle del vapore p₁= 2 bar:

$$v_l=0.0010608 \text{ m}^3/\text{kg}; v_v=0.8854 \text{ m}^3/\text{kg};$$

$$h_l=504.7 \text{ kJ/kg}; h_v=2706.3 \text{ kJ/kg}; r=2201.6 \text{ kJ/kg}.$$

$$v=v_l+(v_v-v_l)x=0.664315 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$h_1=h_l+rx=504.7+2201.6 \cdot 0.75=2155.9 \text{ kJ/kg}.$$

punto 2:

$$p_2=2 \text{ bar}; x=0.$$

$$h=h_l=504.7 \text{ kJ/kg}.$$

Punto 3:

p₃=5 bar; si può considerare h₃=h₂

Punto 4:

La trasformazione 4→1 è una isoentropica di Joule Thomson, per cui h₄=h₁

Dalle tabelle del vapore p₄= 5 bar:

$$h_l=640.1 \text{ kJ/kg}; h_v=2747.5 \text{ kJ/kg}; r=2107.4 \text{ kJ/kg}.$$

$$x_4=(h_4-h_l)/r=0.72.$$

La portata massica è

$$m=G/v_1=2500/0.664315/3600=1.0453 \text{ kg/s}.$$

Il flusso termico in caldaia è

$$\phi=m(h_4-h_3)= 1.726 \text{ kW}.$$

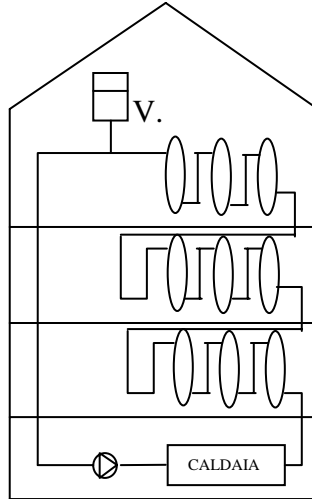
Esercizio n.2

Il circuito idraulico di un impianto di riscaldamento di un edificio a tre piani è assimilabile allo schema illustrato in figura. Nell'impianto sono presenti, in un unico anello, pompa, caldaia, corpi scaldanti, tubazioni di collegamento, raccordi, vaso di espansione.

Si hanno a disposizione i seguenti dati di progetto:

- n. 20 caloriferi (fattore ξ di perdita di carico concentrata pari a 3 per ognuno);
- fattore ξ di perdita di carico concentrata in caldaia pari a 4;
- n. 70 gomiti a 90° (fattore ξ di perdita di carico concentrata pari a 2 per ognuno);
- 300 m di tubi saldati di collegamento da ½ pollice (D_i=15 mm, $\epsilon=60 \mu\text{m}$);
- sviluppo in altezza dell'impianto: 13 m;
- portata massica $\dot{m}=0.1 \text{ kg/s}$;
- temperatura media dell'acqua circolante T=80°C.

Determinare la potenza della pompa (rendimento $\eta=0.8$).



Soluzione Esercizio 2:

Integrando l'equazione di Bernoulli tra la sezione 1 e 2 scelte coincidenti:

$$h_{a1,2} + h_{e1,2} + (z_2 - z_1) + \frac{(w_2^2 - w_1^2)}{2g} + \frac{(p_2 - p_1)}{\rho g} = 0$$

$$p_2 = p_1 \Rightarrow \Delta p = 0 \text{ (le sezioni 1 e 2 sono coincidenti)}$$

$$z_2 - z_1 = 0 \text{ (le sezioni 1 e 2 sono coincidenti)}$$

$$w_1 = w_2 \text{ (le sezioni 1 e 2 sono coincidenti)} \quad w = \frac{\dot{m}}{\rho_{H_2O} A} = \frac{q_m}{\rho_{H_2O} \frac{\pi D^2}{4}} = \frac{0.1}{1000 \pi \frac{0.015^2}{4}} = 0.57 \frac{m}{s}$$

$$h_{a1,2} = \frac{w^2}{2g} \left[f \frac{L}{D} + f' \right]$$

$$f' = 2 * 70 + 4 + 20 * 3 = 204$$

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{60 * 10^{-6}}{15 * 10^{-3}} = 0.004$$

$$\nu(80^\circ C) = 0.3648 * 10^{-6} \text{ m}^2/s$$

$$Re = \frac{wD}{\nu} = 2.34 * 10^4 > 2000 \Rightarrow \text{il moto del fluido è quindi turbolento}$$

} dal diagramma di Moody $f = 0.033$

$$h_{a1,2} + h_{e1,2} = 0 \Rightarrow \frac{w^2}{2g} \left[f \frac{L}{D} + f' \right] + h_{e1,2} = 0 \Rightarrow h_{e1,2} = -\frac{w^2}{2g} \left[f \frac{L}{D} + f' \right] = -\frac{0.57^2}{2 * 9.8} \left[0.033 \frac{300}{0.015} + 204 \right] = 14.3m$$

$$P = \frac{\dot{m} g h_{e1,2}}{\eta} = \frac{0.1 * 9.8 * 14.3}{0.8} = 17.5W$$

Prova scritta di Fisica Tecnica 1

2 aprile 2004

Esercizio n.2

Una tubazione di diametro interno $D=1.2$ m e di lunghezza $L=20$ km, collega un lago ad un sistema di vasche. Il dislivello tra il pelo libero del lago e la sezione di scarico del condotto è pari a 24m. Si determini la portata che attraversa la tubazione trascurando le perdite di carico concentrate ed assumendo un fattore di attrito $\lambda=0.02$.

Soluzione es. 2

$$h_{a1,2} + h_{e1,2} + (z_2 - z_1) + \frac{(w_2^2 - w_1^2)}{2g} + \frac{(p_2 - p_1)}{\rho g} = 0$$

$$p_2 = p_1$$

$$z_2 - z_1 = 24$$

$w_1 = 0$ (ammettendo la sezione del lago molto maggiore di quella delle vasche) \Rightarrow

$\Rightarrow w_2^2 - w_1^2 = w_2^2 = w^2$ (poichè la sezione della tubazione è costante)

$$h_{a1,2} = \frac{w^2}{2g} \left(\frac{l}{D} \lambda \right)$$

$h_{e1,2} = 0$ (non ci sono pompe)

$$\frac{w^2}{2g} \left(\frac{l}{D} \lambda \right) + z_2 - z_1 = 0 \Rightarrow w = \sqrt{\frac{2g(z_2 - z_1)}{\left(\frac{l}{D} \lambda \right)}} = \sqrt{\frac{2 * 9.8 * 24}{\left(\frac{20000}{1.2} * 0.02 \right)}} = 1.19 \frac{m}{s} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow q_m = \rho w A = \rho w \frac{\pi D^2}{4} = 1000 * 1.19 * \frac{\pi 1.2^2}{4} = 1345 \frac{kg}{s}$$