centro appunti
www.centroappunti.it
Corso Luigi Einaudi, 55/B - Torino

Appunti universitari
Tesi di laurea
Cartoleria e cancelleria
Stampa file e fotocopie
Print on demand
Rilegature

NUMERO: 872 DATA: 12/03/2014

A P P U N T I

STUDENTE: Reato

MATERIA: Termodi. Applicata e Trasm.del Calore + Eserc.

Prof. Giaretto

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.
Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTI E NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 3 di 276

carlo.cima@polito.it (giovedì 16:00 venerdì 14:00) 09/10/13

I ESERCITAZIONE

Unità di misura

Le grandezze (lunghezza, tempo, massa ecc) si possono sommare, elevare a potenza ecc (grandezze omogenee).

Grandezze primitive → grandezze da cui si ricavano altre grandezze.

Grandezze derivate → grandezze ricavate da ~~altre~~ grandezze primitive.

Di alcune grandezze esistono campioni → esempio lunghezza (frazione dell'equatore terrestre) ecc.

Ci sono grandezze direttamente misurabili e grandezze indirette.

Grandezza particolarmente importante → TEMPERATURA

Non è né direttamente, né indirettamente misurabile → la sua misura si basa sul principio zero.

Considerando 2 sistemi, posso unicamente dire in base alla direzione del flusso termico se il corpo 1 ha temperatura + alta del corpo 2 o viceversa → queste grandezze sono dette ordinabili

Per misurare la temperatura ho bisogno di una scala termometrica → cioè una scala di riferimenti tramite cui confrontare

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 3 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 5 di 276

la potenza si può anche misurare in kcal/ora.

$$1 \frac{kcal}{h} = \frac{4186.8\ J}{3600\ s} = 1.163\ W = \frac{1}{860}\ kW$$

Pressione → Pascal → è la forza esercitata da 1N su una superficie di $1\ m^2$ → viene spesso misurata anche in bar:

$1\ bar = 10^5\ Pa$

inoltre: $1\ atm = 101325\ Pa$

1 atm è la pressione esercitata sull'unità di superficie da colonna di mercurio alta 760 mm a 0°C sul livello del mare.

inoltre:

1 atmosfera tecnica (1 at) = 98066,7 Pa ≃ 98100 Pa

1 ata (atmosfera tecnica assoluta) misura la pressione assoluta (e non la differenza tra la pressione dell'oggetto e la pressione esterna)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 5 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 7 di 276

Sul piano inclinato, l'oggetto accelera; quindi bisogna sapere relazioni differenziali:

$dE_c = w\,dw$

$dE_p = g\,dz$

Quindi: $\Delta E_c = \int_1^2 w\,dw = \frac{w_2^2 - w_1^2}{2}$

$\Delta E_p = \int_1^2 g\,dz = g(z_2 - z_1)$

Quindi:

$\frac{w_2^2 - \cancel{w_1^2}^{=0}}{2} = -g\underbrace{(z_2 - z_1)}_{=-\Delta z}$ Quindi:

$w_2 = \sqrt{2g\Delta z} = 6.3\ m/s$

Consideriamo ora <u>tratto 2-3</u>

Riprendendo sempre teorema dell'energia cinetica (sopra):

$L_i = 0$
$L_t = 0$
$L_o = 0$
$\Delta E_p = 0$ → perché piano è orizzontale.

Quindi: $L_a + \Delta E_c = 0 \Rightarrow L_a + \Delta E_c = 0$

L_a varia con la distanza percorsa (linearmente)
NB: gli attriti non si modellano sempre così → l'attrito è fenomeno irreversibile

Quindi: $L_a = a\,\Delta x$

Inoltre: $\Delta E_c = \frac{\cancel{w_3^2}^{=0} - w_2^2}{2}$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 7 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 9 di 276

Ho considerando come sistema la massa alla $L_t \neq 0$. Inoltre:

$L_i = 0$

$L_0 = 0$

$L_a = 0$ (perché non viene specificato direttamente)

Quindi:

$L_t = -\Delta E_p$

Quanto vale il lavoro termico della molla?

$$L_t = \int_1^2 kz\,dz = \int_{\Delta z}^{0} kz\,dz = k\frac{(\Delta z)^2}{2}$$

(dal punto di inizio della molla)

Quindi: $k\frac{\Delta z^2}{2} = Mg\Delta z$

Esercizio A.3

Dati:

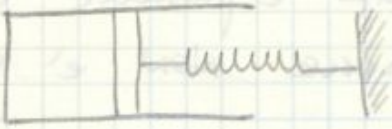
$\rho_e = 1$ at

$S = 0.1\ m^2$

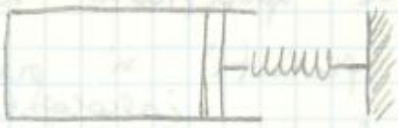
$k = 150\ \frac{kN}{m}$

$\Delta x = 10$ cm

$\Delta x^{(b)} = 20$ cm



①



②

Innanzitutto:

$\Delta V = S\Delta x = 0.01\ m^3$

Scrivo l'equazione di conservazione dell'energia globale

$L_i = L_t + L_0 + L_a + \Delta E_c + \Delta E_p$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 9 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 11 di 276

$$L_t = \frac{k\Delta x^2}{2} = 750\ J$$

applico la teorema dell'energia cinetica:

$$L_i^{(id)} = L_t^{(id)} + L_0^{(id)} + \underbrace{\Delta E_c}_{=0} + \underbrace{\Delta E_p}_{=0}$$

(come sopra)

per il caso ideale, non ci sono presenti gli attriti

allora:

$$L_i^{(id)} = \frac{k(\Delta x^{(id)})^2}{2} + pe\ \Delta V^{(id)} = 4916\ J$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 11 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 13 di 276

Applicando il modello del gas ideale:

$$l_t = -RT \int_1^2 \frac{dp}{p}$$

Quindi: $$l_t = -RT \ln \frac{p_2}{p_1}$$

Inoltre:

$R = \frac{\bar{R}}{\bar{M}}$ dove per l'ozono vale $\bar{M} = 28 \frac{kg}{kmol}$

Allora: $R = 297 \frac{J}{kg\,K}$

Ora possiamo valutare l_t:

$$l_t = -RT_1 \ln \frac{p_2}{p_1} = -296.13 \frac{kJ}{kg}$$

È negativo ed è corretto → il lavoro è negativo quando è entrante nel sistema.

Dobbiamo calcolare la portata in ~~volume~~ massa → serve la densità → ma la portata in volume NON si CONSERVA.

la densità si può ricavare essendo il reciproco del volume specifico, cioè:

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{p}{RT}$$ Quindi:

$$\rho_1 = \frac{p_1}{RT_1} = 1.1486 \frac{kg}{m^3}$$

Quindi: $$G = G_{V_1} \rho_1 = 0.04786 \frac{kg}{s}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 13 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 15 di 276

Abbiamo detto che è adiabatica tale:

$$p v^{\gamma} = cost$$

Quindi per eq. di stato: $v = \frac{RT}{p}$

Sostituisco sopra e ottengo:

$$p\left(\frac{RT}{p}\right)^{\gamma} = cost \quad \Rightarrow \quad p^{1-\gamma} T^{\gamma} = cost$$

dove quest'ultima costante contiene anche R^{γ}.

Quindi ottengo:

$$T p^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = cost$$

Posso valutare quindi $T_{2'}$:

$$T_1 p_1^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = T_{2'} p_2^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \quad \Rightarrow \quad T_{2'} = T_1 \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}$$

γ è per definizione:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

il valore dipende dalla natura del gas.

Essendo l'azoto biatomico: $\gamma = 1.4$

Quindi: $T_{2'} = 775\ K$

Ora possiamo valutare W_t:

$$W_t = -G c_p (T_{2'} - T_1)$$

dove $c_p = \frac{\gamma}{\gamma - 1} R$ Quindi:

$$W_t = -G \frac{\gamma}{\gamma - 1} R (T_{2'} - T_1) = -23.95\ kW$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 15 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 17 di 276

In particolare si ottiene:

$$p_{1''} = \sqrt{p_1 p_2} = 5.477 \text{ bar}$$

I stadio di compressione: da 1 a 1''

adiabatica:

$$-W_{t\,1-1''} = -G\frac{\gamma}{\gamma-1}R\left(T_{1''} - T_1\right)$$

è adiabatica reversibile

Ma abbiamo detto che:

$$T_{1''} = T_1\left(\frac{p_1}{p_{1''}}\right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = 477 \text{ K}$$

sostituisco nell'equazione di W_t:

$$W_{t\,1-1''} = -9.12 \text{ kW}$$

Quindi:

$$l_t = -\int_1^{1''} v\,dp = \frac{\gamma}{\gamma-1}RT_1\left[\left(\frac{p_{1''}}{p_2}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1\right]$$

(rapporto di compressione)

Con rigenerazione, il rapporto di compressione nei 2 stadi è lo stesso.

Quindi l_t nel I stadio è uguale a l_t nel II stadio (da 1''' a 2''). Allora:

$$W_{t\,1'''-2''} = -9.12 \text{ kW}$$

Quindi: $W_t = W_{t\,1-1''} + W_{t\,1'''-2''} = 18.24 \text{ kW}$

Il tratto 1'' - 1''' è isobaro. Quindi:

$$\phi = Gc_p\left(T_{1'''} - T_{1''}\right) = G\frac{\gamma}{\gamma-1}R\left(T_1 - T_{1''}\right) = -9.12 \text{ kW}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 17 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 19 di 276

alla trasformazione.

Quindi:

$$L_0 = p_0 (V_2 - V_1) = 19.62 \text{ J}$$

Inoltre:

$$L_t = k (x_2 - x_1)^2 = k \frac{(\Delta x)^2}{2} = 20 \text{ J}$$

Quindi in definitiva:

$$L_i = 39.62 \text{ J}$$

Scrivo ora l'equazione di conservazione dell'energia legata al gas:

$$Q - L_i = \Delta U = U_2 - U_1 = M c_v (T_2 - T_1)$$

Applicando l'equazione di stato ricavo:

$$T_2 = \frac{p_2 V_2}{MR}$$

Dove $p_2 = p_0 + \frac{k \Delta x}{S_p} = 2,981 \text{ bar}$

Quindi posso ricavare $T_2 = 1069 \text{ K}$

Quindi posso ricavare Q:

$$Q = L_i + M c_v (T_2 - T_1) = 689 \text{ J}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 19 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 21 di 276

$$\rho_1 = \frac{10^5}{297 \cdot 283{,}15} = 1.189 \ \frac{kg}{m^3}$$

$$\left[\frac{kg\ kg\ s^2}{m^3 \cdot J}\right]$$

da cui ricavo G_{V_1}:

$$G_{V_1} = \frac{1.189}{0.139} = 0.117 \ m^3/s$$

- portata in volume alla mandata:

come nel caso precedente:

$$G_{V_2} = \frac{G}{\rho_2}$$

Da cui: $\rho_2 = \frac{1}{v_2} = \frac{p_2}{RT_2}$

So però che si tratta di una politropica

Quindi:

$$p_1 v_1^n = p_2 v_2^n \Rightarrow v_2 = \left(\frac{p_2}{p_2}\right)^{\frac{1}{n}} v_1$$

Quindi:

$$v_2 = \left(\frac{10^5}{10^6}\right)^{0,469} \cdot \frac{1}{1.189} = 0.170 \cdot 0.841 = 0.163 \ \frac{m^3}{kg}$$

Quindi:

$$\rho_2 = \frac{1}{0.163} = 6.993 \ \frac{kg}{m^3}$$

Quindi: $G_{V_2} = \frac{0.139}{6.993} = 0.02 \ m^3/s$

- Temperatura finale del gas:

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 21 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 23 di 276

devo ricavare c_p:

$$c_p = \gamma \frac{R}{\gamma - 1} = 1.4 \cdot \frac{297}{0.4} = 1039.5 \ \frac{J}{kgK}$$

in quanto $\gamma = 1.4$

Quindi:

$$\Phi = G' c_p \Delta T + W_t = 0.139 \cdot 1039.5 \cdot (481.5 - 283.15) - 35361 =$$

$$= -6701,3 \ W.$$

Esercizio 8.4

Dati:

$M_g = 0.1 \ kg$

$\Delta z = 1 \ m$

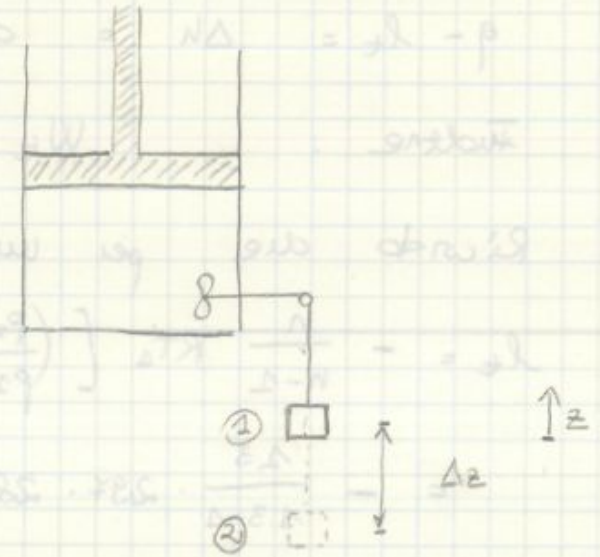
$S_p = 1 \ m^2$

$M_p = 500 \ kg$

$M_{pave} = 12660 \ kg$

$p_e = 1 \ bar$

$T_e = 25°C = T_1$



Devo ricavare il calore fornito quindi

$Q - L_i = \Delta U$ (essendo il sistema chiuso)

Dove:

$\Delta U = G c_v \Delta T$

Ricavo L_i attraverso l'equazione di conservazione dell'energia cinetica:

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 23 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 25 di 276

Quindi

$$L_t = -123872 + 1646.4 = -122225.6 \text{ J}$$

Quindi ricavo L_i:

$$L_i = L_t + L_0 = -122225.6 + 33600 = -88625.6 \text{ J}$$

Riprendo il I principio scritto all'inizio e ricavo ΔU:

$$c_v = \frac{R}{\gamma - 1} = \frac{297}{0.4} = 742.5 \ \frac{J}{kg\,K}$$

Per quanto riguarda ΔT, devo ricavare T_2. Siccome il pistone si muove senza attrito, la pressione finale sarà la stessa di quella iniziale cioè:

$$p_2 = p_1 = p_e + p_{pistone} = 104900 \text{ Pa}$$

Ora per ricavare T_2 applico l'equazione di stato dei gas ideali:

$$p_2 V_2 = M_g R T_2 \rightarrow \frac{p_2 V_2}{M_g R} = T_2$$

$0.42 \rightarrow$ 5.0,084!

$$T_2 = \frac{104900 \cdot 0.42}{0.1 \cdot 297} = 1483.4 \text{ K}$$

Quindi ricavo Q:

$$Q = \Delta U + L_i = -88625.6 + (1483.4 - 298,15) \cdot 742.5 \cdot 0.1 = -88625.6 + 88004,8 = -620.8 \text{ J} \approx 0$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 25 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 27 di 276

Inoltre avro' che:

$$\Delta e_c = \frac{1}{2}\left(w_2^2 - w_1^2\right) = 20250 \ J/kg$$

Inoltre:

$$W_t = l_t \cdot G \Rightarrow l_t = \frac{W_t}{G} = 300 \ kJ/kg$$

Quindi:

$$-l_t = \Delta h + \Delta e_c = c_p \Delta T + \Delta e_c = c_p T_2 - c_p T_1 + \Delta e_c$$

$$-l_t - \Delta e_c - c_p T_2 = -c_p T_1$$

$$T_1 = \frac{l_t + \Delta e_c + c_p T_2}{c_p} = \frac{300000 + 20250 + 1006.5 \cdot 773}{1006.5}$$

$$= 1092.3 \ K = 819 \ ^\circ C$$

- Calcolo della sezione d'ingresso del dispositivo:

$$G_{aria} = \rho_1 \cdot G_{1aria}$$

Dove:

$$\boxed{G_{1aria} = w_1 \cdot A_1}$$

Ora devo solo ricavare ρ_1:

$$\rho_1 = \frac{1}{v_1} = \frac{p_1}{RT_1} = \frac{G \cdot 10^6}{287 \cdot 1092.3} =$$

$$= \frac{6000000}{313690.1} = 12.76 \ kg/m^3$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 27 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 29 di 276

III ESERCITAZIONE

23/10/13

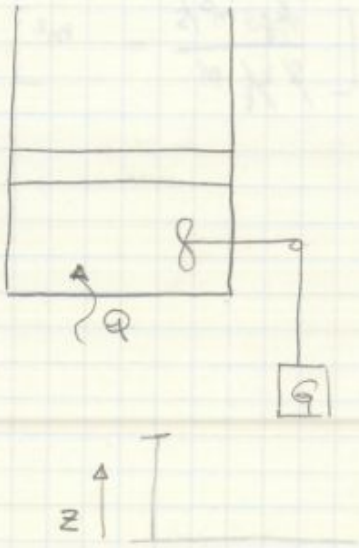
Esercizio B.G (in classe)

Dati:

$M_f = 0.1\ kg$

$N_2 \rightarrow \quad \bar{M} = 28\ kg/kmol$

$\gamma = 1.4$



$\Delta z = 1\ m$

$M_p = 500\ kg$

$M_G = 12650\ kg$

$p_0 = 1\ bar$

$V_2 = 5\ V_1 \qquad T_0 = 25\ °C$

Scriviamo l'equazione dell'energia cinetica:

$$L_i = L_t + L_0 + \Delta E_p + \Delta E_c$$

Per il gas si avrà solo questo:

$$L_{t_{gas}} = -\Delta E_p = -M_G g (z_2 - z_1) = 126097\ J$$

Sul gas sarà quindi:

$$L_t = -126097\ J$$

Tramite l'equazione di stato ricavo quindi:

$$V_1 = \frac{M_f R T_1}{p_1} = \frac{M_f \frac{\bar{R}}{\bar{M}} T_1}{p_1}$$

dove $\quad p_1 = p_0 + \frac{M_p g}{S_p} = 104905\ Pa$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 29 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 31 di 276

Ora posso calcolare:

$$L_i = L_t + L_0 = -8867\ J$$

Ora posso utilizzare il teorema di conservazione dell'energia per ricavare Q:

$$Q - L_i = \Delta U = U_2 - U_1 = M_g c_v (T_2 - T_1) =$$

$$= M_g \frac{R}{\gamma - 1} (T_2 - T_1)$$

Quindi:

$$Q = L_i + M_g \frac{R}{\gamma - 1} (T_2 - T_1) \approx 0$$

Cioè viene molto piccolo, insignificante rispetto agli altri valori energetici.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 31 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 33 di 276

$$L_i = L_t + L_0 + \underset{>0}{\Delta \not{E}_c} + \underset{=0 \text{ (come esercizio precedente)}}{\Delta \not{E}_p}$$

Ora' che:

$$L_0 = p_0 (V_2 - V_1)$$

Il lavoro tecnico che il gas compie sull'ambiente equivale alla variazione di energia potenziale della massa che viene tolta.
Quindi:

$$L_t = M_{gf} \Delta z = \rho_f S \Delta z = p_f (V_2 - V_1)$$

Quindi:

$$L_i = L_t + L_0 = p_f (V_2 - V_1) + p_0 (V_2 - V_1) =$$
$$= (p_f + p_0)(V_2 - V_1) = p_2 (V_2 - V_1)$$

Il processo e' irreversibile, perche se fosse stato reversibile avrei avuto:

$L_i^{id} = \int_1^2 p\,dV$ cosa che non accade (vista il risultato precedente).

Quindi il processo NON E' REVERSIBILE e non si possono usare le equazioni dell'adiabatica E' comunque vero che $Q = 0$
Quindi il I principio e':

$-L_i = U_2 - U_1$ Cioe':

$$-p_2 (V_2 - V_1) = M_g c_v (T_2 - T_1) = M_g \frac{R}{\gamma - 1} (T_2 - T_1)$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 33 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 35 di 276

In questo caso il processo è irreversibile, ma le relazioni valgono comunque.

Quindi:

$$ds = \frac{dh}{T} - \frac{v}{T}dp$$

$$ds = \frac{c_p dT}{T} - \frac{R}{p}dp \quad \rightarrow \text{quest'ultima vale SOLO per i GAS IDEALI}$$

Ora integro e ottengo:

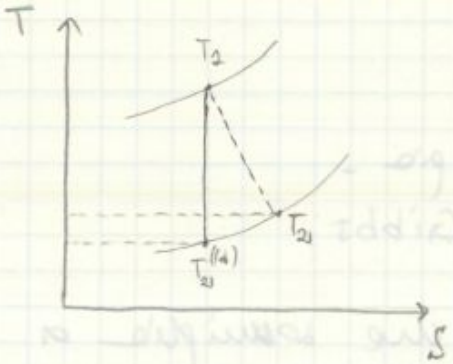
$$\Delta S = M_g \left[c_p \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) \right] = 332.3 \ J/K$$

Questa è la formula per ricavare l'effetto delle irreversibilità.

Se il processo avvenisse in modo puramente teorico come cambierebbero le equazioni?
Potrei applicare in questo caso le equazioni dell'adiabatica reversibile:

$$T_2^{(id)} = T_1 \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = 252.9 \ K$$

Perché $T_2^{(id)} < T_2$?



Quindi:

$$L_i = M_g \frac{R}{\gamma - 1}\left(T_2 - T_2^{(id)}\right) =$$

$$= 337\,983 \ J$$

(applicando teo di conservazione dell'energia)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 35 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 37 di 276

$$\Phi = \left(\frac{dU}{dt}\right)_{V_c} + G h_e \qquad (II)$$

↑ il sistema non ha ingressi e ha 1 uscita → volume di controllo trattieppato!!

Per la massa avrò:

$$0 = \left(\frac{dM}{dt}\right)_{V_c} + G \qquad (III)$$

(II) e (III) vanno integrate nel tempo.

Immediato sostituisco G in (III):

$$\Phi = \left(\frac{dU}{dt}\right)_{V_c} - \left(\frac{dM}{dt}\right)_{V_c} h_e$$

Ora devo svolgere h_e. Trovo che lo stato "e" è noto (temperatura non cambia ecc). Inoltre la valvola è legata a processo isoentalpico, quindi:

$$h_e = h_2 = u_2 + p_2 v_2$$

Lo stato nel serbatoio evolve tra stato 1 e stato 2. Io però so solo che la temperatura è costante, ma la pressione varia; ma mancando le ipotesi, $p_2 = p_e$. Siccome $T_2 = T_e$ e $p_2 = p_e$ i 2 stati sono equivalenti.

Ora integro la (II)

$$Q = \left(M_2 u_2 - M_1 u_1\right) - \left(M_2 - M_1\right)\left(u_2 + p_2 v_2\right) =$$

$$= M_2 u_2 - M_1 u_1 - M_2 u_2 - M_2 p_2 v_2 + M_1 u_2 + M_1 p_2 v_2$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 37 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 39 di 276

sostituendo i dati noti ottengo V:

$V = 13.6\ l$

NB: Nella scelta del volume di controllo bisogna fare attenzione ai dati forniti e ai comportamenti noti delle varie parti del sistema (es. valvola ecc).

Ricavo l'entropia.

$$\frac{dS}{dt} = \sum_j \frac{\dot{\phi}_j}{T_j} + \dot{\Sigma}_{irr}$$

è un'equazione di bilancio e non di conservazione per la presenza di $\dot{\Sigma}_{irr}$.

Quindi:

$$\left(\frac{dS}{dt}\right)_{VC} + \dot{\Sigma}_k \pm G_k s_k = \sum_j \frac{\dot{\phi}_j}{T_j} + \dot{\Sigma}_{irr}$$

Applichiamo l'equazione al sistema (tratteggio nero) In realtà sarebbe lo stesso anche considerando la turbina, in quanto è isoentropica pertanto ininfluente ai fini del calcolo dell'entropia.

Quindi:

$$\left(\frac{dS}{dt}\right)_{VC} + G\, s_e = \frac{\dot{\phi}}{T_1} + \dot{\Sigma}_{irr}$$

$$\left(\frac{dS}{dt}\right)_{VC} - \left(\frac{dM}{dt}\right)_{VC} s_2 = \frac{\dot{\phi}}{T_1} + \dot{\Sigma}_{irr}$$

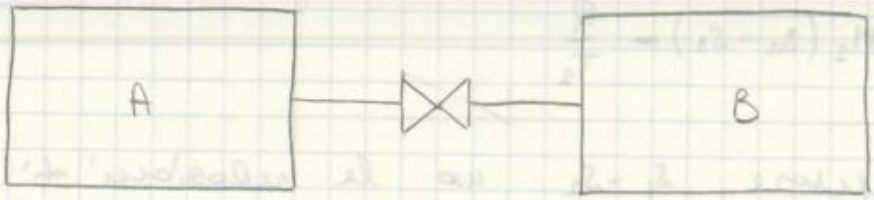
Ora integro:

$$M_2 s_2 - M_1 s_1 - (M_2 - M_1) s_2 = \frac{Q}{T_1} + S_{irr}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 39 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 41 di 276

Esercizio C.2



Dati:

$V_A = 0.2\ m^3$

$H_2 \rightarrow \quad \bar{M} = 2\ kg/kmol$

$p_1 = 12\ bar$

$T_1 = 22\ °C$

Ricavo immediatamente:

$$M_{H_2} = \frac{p_1 V_A}{R T_1} = 0.1956\ kg \quad (IV)$$

Posso scrivere la massa anche come:

$$M_{H_2} = M_A + M_B$$

Dove:

M_A = massa di idrogeno che alla fine del processo si trova ancora nel serbatoio A.

M_B = massa di idrogeno che alla fine del processo si trova ancora nel serbatoio B.

Quindi inserendo (IV) avrò:

$$p_1 V_A = (M_A + M_B) R T_2$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 41 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 43 di 276

Il processo in A è espansione adiabatica, approssimabile come adiabatica reversibile.
Allora posso scrivere:

$$T_{2A}\, p_2^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = T_1\, p_1^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}$$

$$T_{2A} = T_1 \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = 215.6\ K$$

$$M_A = \frac{p_2 V_A}{R T_{2A}} = 0.0892\ kg$$

Per calcolare la temperatura finale in B sfrutto il fatto che $u_1 = u_2$
Quindi:

$$(M_A + M_B)\, T_1 = M_A T_{2A} + M_B T_{2B}$$

$$T_{2B} = \frac{M_A + M_B}{M_B} T_1 - \frac{M_A}{M_B} T_{2A} = 361.7\ K$$

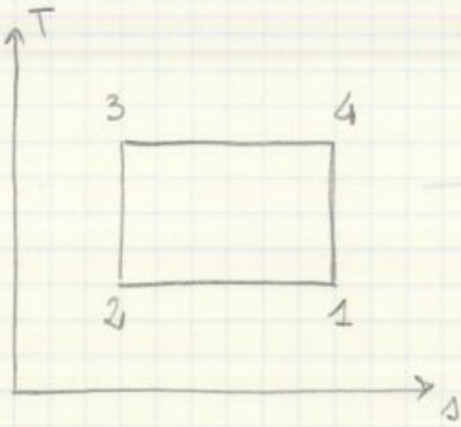
In B avviene compressione quindi è corretto che salga la temperatura

Per calcolare l'entropia generata - se considero l'entropia estensiva, gode della proprietà di additività. Si può pensare alla massa iniziale come costituita dalla massa che rimane in A e quella che passa in B. Quindi l'entropia è la variazione di entropia della massa che è rimasta in A (è zero! perché è trasf. adiabatica reversibile, quindi isoentropica) somma a variazione di entropia della massa

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 43 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 45 di 276

Un ciclo di Carnot sul diagramma T-S è dato da:



Le trasformazioni sono 2 isoterme e 2 adiabatiche, tutte reversibili. Essendo le trasformazioni 2-3 e 4-1 adiabatiche reversibili, sono anche isoentropiche. Quindi:

$$S_3 - S_2 = S_1 - S_4 = 0$$

Non influenzano quindi la variazione di entropia. Per quanto riguarda le isoterme, si ottiene la variazione di entropia come in precedenza:

$$S_2 - S_1 = Q\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right) = 0 \text{ (essendo isoterme)}$$

$$S_4 - S_3 = Q\left(\frac{1}{T_4} - \frac{1}{T_3}\right) = 0 \text{ (essendo isoterme)}$$

Quindi anche per le isoterme vale:

$$S_2 - S_1 = S_4 - S_3 = 0$$

Quindi complessivamente $\Delta S = 0$, cioè ai fini del calcolo dell'entropia, la presenza o meno di una macchina di Carnot tra serbatoio 1 e 3 è irrilevante.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 45 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 47 di 276

Quindi:

$$dS = -R\frac{dp}{p}$$

Quindi ricavo che:

$$\Delta S_e = \int_{t_1}^{t_2} -R\frac{dp}{p} = -R\left(\frac{1}{p_2} - \frac{1}{p_2}\right) =$$

$$= -\frac{R}{2}$$

- Quindi: $\Delta S_{TOT} = \Delta S_{gas} + \Delta S_e$
- Inoltre scrivo il I principio per la trasformazione isoterma:

$$Q - L_i = \cancel{\Delta U}^{=0} \Rightarrow Q = L_i$$

Ma x il teorema dell'energia cinetica:

$$L_i = \cancel{L_t}^{=0} + L_a + \cancel{L_0}^{=0} + \cancel{\Delta E_p}^{=0} + \cancel{\Delta E_c}^{=0}$$

$$L_i = L_a$$

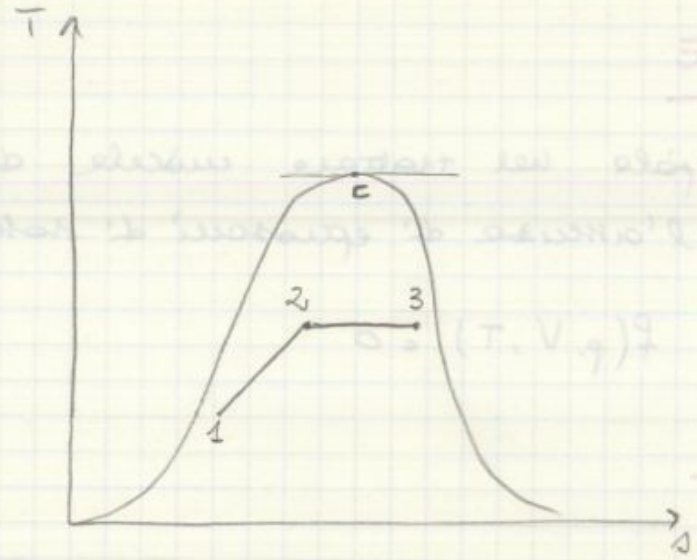
Quindi $Q = L_a$

Ma considerando l'entropia:

$$\Delta S = \frac{Q}{T} \quad \text{Quindi:} \quad L_a = Q = \Delta S_{TOT} \cdot T_e$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 47 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 49 di 276



Nota che il punto critico è il punto estremo di esistenza del liquido - Il punto critico è caratterizzato da una certa temperatura e da una certa pressione -

Noi abbiamo inizialmente un vapore umido, quindi avendo la pressione, ricavo la temperatura da tabelle di saturazione:

$T_1 = 99{,}6\ °C$

(Teoricamente per valori che non sono sulla curva limite di uso il diagramma di Mollier) Sempre da tabelle ricavo che ad 1 bar:

$v_{1L} = 0.0010434\ \frac{m^3}{kg}$ (Nota l'unità di misura!!)

$v_{1V} = 1.694\ \frac{m^3}{kg}$

NB: nelle tabelle la differenza delle entalpie del vapore e del liquido rappresenta il calore latente.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 49 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 51 di 276

Quindi posso ricavare:

$$u = h - pv$$

Ma: $h\left[\frac{kJ}{kg}\right]$; $p[bar]$; $v\left[\frac{m^3}{kg}\right]$

Quindi: h si moltiplica per 1000 e si porta in J/kg, e la pressione si porta in Pascal, così il calcolo viene esatto.

Quindi:

$$u_1 = h_1 - p_1 v_1 = 438.3 \ \frac{kJ}{kg}$$

Ci manca ancora ricavare la massa:

$$M_1 = \frac{V}{v_1} = 8.346 \ kg$$

Tutto ciò per lo stato 1.

Sullo stato 2 sappiamo molto poco, devo sapere in quale stato si trova il fluido a valle della trasformazione 1-2.

So solo che si trova a 21 bar. Da tabelle ricavo che:

$$v_{2L} = 0.0011809 \ \frac{m^3}{kg}$$

Per ricavare il valore a 21 bar che (non è nelle tabelle) faccio un'interpolazione lineare:

$$\frac{x - x_0}{x_1 - x_0} = \frac{y - y_0}{y_1 - y_0}$$

Inoltre ricavo:

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 51 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 53 di 276

$h_{2L} = 920.0 \frac{kJ}{kg}$; $h_{2V} = 2799.4 \frac{kJ}{kg}$

$s_{2L} = 2.47021 \frac{kJ}{kg\,K}$; $s_{2V} = 6.32152 \frac{kJ}{kg\,K}$

Da cui ricavo:

$h_2 = x_2 h_{2V} + (1-x_2) h_{2L} = 1256.7 \frac{kJ}{kg}$

$s_2 = 3.16 \frac{kJ}{kg}$

$u_2 = h_2 - p_2 v_2 = 1218.9 \frac{kJ}{kg}$

Applico il principio di conservazione dell'energia alla trasformazione 1-2:

$Q_{1-2} - L_{1-2} = \Delta U = U_2 - U_1$

$L_{1-2} = 0$ (recipiente rigido)

Quindi: → escludo la massa costante

$Q_{1-2} = M_2 u_2 - M_1 u_1 = M_1 (u_2 - u_1) = 6515\ kJ$

Per quanto riguarda lo stato 3. Abbiamo più informazioni; sappiamo che le condizioni saturo non saturo perché non variano né la pressione né la temperatura. Quindi posso scrivere:

$h_3 = x_3 h_{2V} + (1-x_3) h_{2L} = 2611.7 \frac{kJ}{kg}$

$v_3 = x_3 v_{2V} + (1-x_3) v_{2L} = 0.08556 \frac{m^3}{kg}$

$s_3 = 5.9364 \frac{kJ}{kg\,K}$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 53 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 55 di 276

$$\bar{T} = \frac{\Delta h}{\Delta s} \qquad (\text{è temperatura termodinamica media})$$

ma usando questa $\bar{T}$ si ammettono irreversibilità interne (ipotesi corretta), le irreversibilità però stanno nel fatto che il fluido sta sempre in contatto con una fonte a 260°C (maggiore della temperatura di saturazione a 21 bar) → ciò crea irreversibilità esterne.

Quindi devo considerare come T la temperatura della sorgente per considerare anche queste irreversibilità. Quindi:

$$s_2 - s_1 = \frac{Q_{1-2}}{T_s} + s_{irr\,1-2}$$

$$m_2 s_2 - m_1 s_1 = \frac{Q_{1-2}}{T_s} + S_{irr\,1-2} \quad \Rightarrow \quad S_{irr\,1-2} = 2{,}78 \ \frac{kJ}{K}$$

Nello stato 2-3 il fluido si trova in transitorio quindi:

$$\left(\frac{dS}{dt}\right)_{vc} + G s_u = \frac{\dot{\phi}}{T} + \dot{\Sigma} i_{irr} \qquad \text{da cui integrando:}$$

$$m_3 s_3 - m_2 s_2 - (m_3 - m_2)\, s_{2V} = \frac{Q_{2-3}}{T_s} + S_{irr\,2-3}$$

Quindi:

$$S_{irr\,2-3} = 2{,}17 \ \frac{kJ}{K}$$

Quindi $S_{irr} = S_{irr\,1-2} + S_{irr\,2-3} = 4{,}95 \ \frac{kJ}{K}$

FINE

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 55 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 57 di 276

$$\Delta u_{1-2} = \cancel{c_v (T_2 - T_1)}^{=0} - a\left(\frac{1}{v_2} - \frac{1}{v_1}\right)$$

essendo la trasformazione 1-2 isoterma

Se applico al processo 1-2 il teorema di conservazione dell'energia otteng:

$$q_{1-2} - l_{1-2} = \Delta u_{1-2} \Rightarrow q_{1-2} = (u_2 - u_1) + l_{1-2} =$$

$$= \cancel{-a\left(\frac{1}{v_2} - \frac{1}{v_1}\right)} + RT_1 \left(\frac{v_2 - b}{v_1 - b}\right) + \cancel{a\left(\frac{1}{v_2} - \frac{1}{v_1}\right)}$$

Quindi:

$$q_{1-2} = RT_1 \ln\left(\frac{v_2 - b}{v_1 - b}\right)$$

È simile a quella ricavata per gas ideale, solo che il volume specifico è ora corretto col covolume.

Il processo 2-3 è adiabatica reversibile, quindi è isentropica.

Quindi:

$$\cancel{s_3 - s_2}^{=0} = c_v \ln\left(\frac{T_3}{T_2}\right) + R \ln\left(\frac{v_3 - b}{v_2 - b}\right)$$

(essendo isentropica)

da cui ricavo:

$$\ln\left(\frac{v_3 - b}{v_2 - b}\right) = -\frac{c_v}{R} \ln\left(\frac{T_3}{T_2}\right)$$

$$\frac{v_3 - b}{v_2 - b} = \left(\frac{T_2}{T_3}\right)^{\frac{c_v}{R}}$$

dove $\frac{c_v}{R} = \frac{3}{2}$ per gas monoatomico

e vale $\frac{5}{2}$ per gas biatomico.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 57 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 59 di 276

la capacità produttiva di un sistema.
È definito come rapporto tra effetto utile e la spesa per ottenere tale effetto. La macchina di Carnot ha come effetto utile il lavoro netto del ciclo e la spesa è il calore. Ma il calore somministrato al gas è quello della trasf. 3-4 (perché nella trasf 1-2 la macchina cede calore).
Quindi:

$$\eta = \frac{l_n}{q_{3-4}} = \frac{q_{3-4} - |q_{1-2}|}{q_{3-4}} = 1 - \frac{|q_{1-2}|}{q_{3-4}}$$

Ma:

$$1 - \frac{|q_{1-2}|}{q_{3-4}} = 1 - \frac{RT_1 \ln\left(\frac{v_1 - b}{v_2 - b}\right)}{RT_3 \ln\left(\frac{v_4 - b}{v_3 - b}\right)} \quad (I)$$

La costante di elasticità R del gas di V.d.W. coincide con la costante di elasticità R del gas ideale.

Inoltre:

$$S_1 - S_2 = S_4 - S_3 \rightarrow$$ lo si ricava anche solo osservando il grafico

Dove:

$$S_1 - S_2 = c_v \ln\left(\frac{T_1}{T_2}\right) + R \ln\left(\frac{v_1 - b}{v_2 - b}\right)$$

$$S_4 - S_3 = c_v \ln\left(\frac{T_4}{T_3}\right) + R \ln\left(\frac{v_4 - b}{v_3 - b}\right)$$

→ ricavate dalle equazioni di Gibbs considerando l'ipotesi di V.d.W.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 59 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 61 di 276

06/11/13

V ESERCITAZIONE

(Esercizio in cui acqua non è a condizioni di vapore saturo).

Esercizio D.3

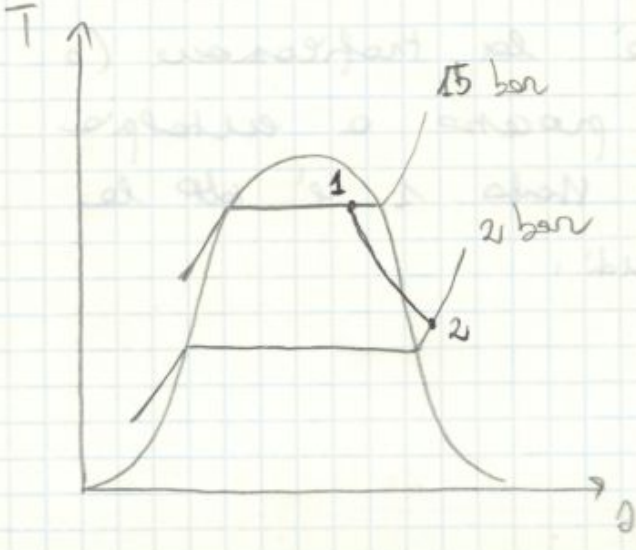
Dati:

$p_1 = 15$ bar

$p_2 = 2$ bar

$T_2 = 150\,°C$

Lo stato 1 è per definizione uno stato di liquido - vapore. Dello stato 2 conosco temperatura e pressione.
Quindi con i dati tabelle di saturazione e controllo la temperatura di saturazione a pressione di 2 bar: scopro che la temperatura di saturazione a 2 bar è circa 120 °C.
Quindi 150°C > 120°C, quindi nello stato 2 l'acqua è in condizione di vapore surriscaldato, fuori quindi da curva limite.



Quindi devo usare diagramma di Mollier. Posso lavorare interpolando l'isoterma a 150°C con l'isobara a 2 bar

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 61 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 63 di 276

se è uno stato di vapore umido, lo stato 1 sarà caratterizzato da un titolo:

$$x_1 = \frac{h_1 - h_{1L}}{h_{1V} - h_{1L}} = 0.93$$

Posso determinare anche l'entropia dello stato 1

$$s_1 = (1-x_1)\, s_{1L} + x_1 s_{1V} = 6.3994 \ \frac{kJ}{kg\,K}$$

Quindi:

$$\Delta s = s_2 - s_1 = 0.85 \ \frac{kJ}{kg\,K}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 63 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 65 di 276

Esercizio D.6

Dati:

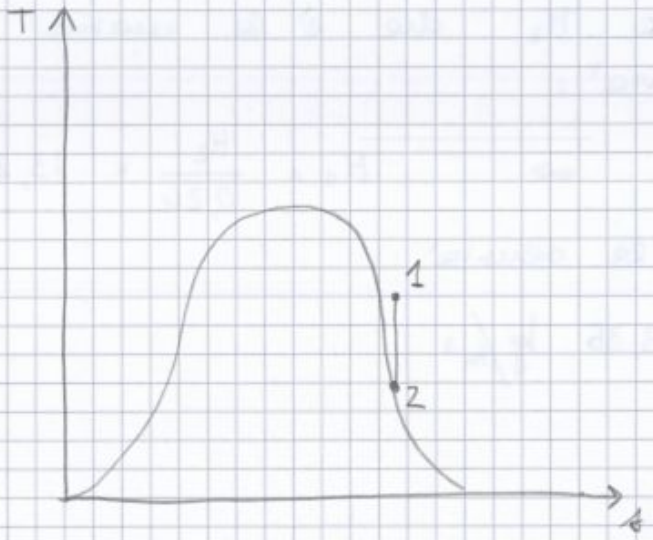
$V = 1\ m^3$

$T_1 = 400\ °C$

$p_1 = 50\ bar$

$M_{spillata} = 0{,}76\ M$ iniziale

? T_2, e_i



Confrontando la temperatura T_1 con quella di saturazione a 50 bar, noto che sono oltre la curva limite. Quindi dal diagramma di Mollier ricavo:

$s_1 = 6{,}76\ kJ/kg\ K$

Siccome il II principio implica:

$\Delta s = s_2 - s_1 = \frac{\delta Q}{T} + s_{irr} = 0$ (trasf. reversibile)

$= 0$ (termicamente isolato)

Allora:

$s_2 = s_1$ come da dispensa.

Quindi: $s_2 = 6{,}76\ kJ/kg\ K$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 65 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 67 di 276

Esercizio D.6

Dati:

$n_{O_2} = 2$ mol ($\overline{M}_{O_2} = 32$ kg/kmol)

$n_{N_2} = 4$ mol ($\overline{M}_{N_2} = 28$ kg/kmol)

$T = 600$ K

$V_{O_2} = 3\ m^3$

$V_{N_2} = 5\ m^3$

① ②

Quindi applico eq. di stato del gas ideale ai componenti:

$$p_{1O_2} = \frac{n_{O_2} \overline{R} T}{V_{O_2}} = 2.214 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

Attenzione! le moli sono espresse in [mol] e non in [kmol] quindi ne fatta conversione perché $\overline{R}$ è dipendente da [kmol].

$$p_{1N_2} = \frac{n_{N_2} \overline{R} T}{V_{N_2}} = 2.661 \cdot 10^6 \text{ Pa}.$$

Quindi nello stato 2:

$$p_2 = \frac{n \overline{R} T}{V} = \frac{(n_{O_2} + n_{N_2}) \overline{R} T}{V_{N_2} + V_{O_2}} = 2.696 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

Per calcolare le pressioni parziali dei 2 gas

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 67 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 69 di 276

Il processo è ovviamente irreversibile isotermo. Quindi facendo i calcoli:

$$S_2 - S_1 = n_{O_2} \bar{R} \ln\left(\frac{P_{1O_2}}{P_{2O_2}}\right) + n_{N_2} \bar{R} \ln\left(\frac{P_{2N_2}}{P_{2N_2}}\right) = 31.96 \frac{J}{K}$$

pressioni assolute

pressioni parziali

Siccome il sistema è adiabatico, $S_2 - S_1$ coincide con l'entropia generata nel processo:

$$S_2 - S_1 = S_{irr}.$$

Si genera l'entropia di mescolamento. Il processo è irreversibile.

Se le temperature dei gas fossero state diverse all'inizio, mi ricordo che il contenitore è RIGIDO e ADIABATICO ciò implica che:

$$U_1 = U_2$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 69 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 71 di 276

Quindi:

$$V_{2CO_2} = n_{CO_2} \frac{\bar{R} T_{2CO_2}}{p_2}$$

$$V_{2aria} = n_{aria} \frac{\bar{R} T_{2aria}}{p_2}$$

la pressione p_2 è uguale perché (più correttamente perché i componenti) allo stato finale siamo in equilibrio barometrico.
Sappiamo inoltre che poiché è isotermo, quindi:

$$T_1 = T_2 = T_{2CO_2} = T_{2aria}$$

dunque i volumi sono sommabili, allora:

$$V_{2CO_2} + V_{1aria} = V_{2CO_2} + V_{2aria}$$

ciò fa concludere che $p_1 = p_2$!! Solo perché IL PROCESSO È ISOTERMO !!!

Scriviamo ora il I principio:

$$Q - L_{1-2} = \Delta U = 0 \quad \rightarrow \text{perché il processo è isotermo.}$$

<u>la minima quantità di lavoro fornita dall'esterno è il lavoro reversibile</u>, quindi:

$$L_{1-2}^{rev} = Q_{1-2}^{rev}$$

Quindi:

$$S_2 = n_{CO_2}\left[\overline{c_{p CO_2}} \ln\left(\frac{T_2}{T_0}\right) - \bar{R} \ln\left(\frac{p_{2CO_2}}{p_0}\right)\right] + n_{aria}\left[c_{p aria} \ln\left(\frac{T_2}{T_0}\right) + - \bar{R} \ln\left(\frac{p_{2aria}}{p_0}\right)\right]$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 71 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 73 di 276

Riassunto.

$$Tds = dU + pdV$$
$$\delta Q = dU + dL$$

} se il processo è reversibile queste 2 equazioni sono equivalenti (anche a livello numerico)

Se il processo è irreversibile queste due relazioni continuano a valere, ma non + equivalenti!!

• PSICROMETRIA •

Studio delle miscele aria-vapore. Sua applicazione fondamentale è la climatizzazione degli ambienti. Le grandezze specifiche sono riferite alla massa di aria secca, semplicemente perché il vapore cambia stato, e l'aria secca no quindi:

$$x = \frac{M_v}{M_a} \quad ; \quad h = \frac{H}{M_a} \quad ; \quad \varphi = \frac{M_v}{M_{vs|T}}$$

massa di vapore che potrebbe a condizioni di saturazione quel volume e per quella temperatura

dove H entalpia:

$$h = \frac{h_a M_a + h_v M_v}{M_a} = h_a + x h_v =$$

$$= c_{p_a}(T - T_{rif})$$

Il riferimento è $T_{rif} = 0°C$

Quindi posso lasciare T in gradi °C.

Invece:

h_v a per lo stato di riferimento assumo acqua

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 73 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 75 di 276

Esercizio D.8

Dati:

$G_A = 1.09$ kg/s

$T_A = 26$ °C
$\varphi_A = 0.5$
} condizioni in un ambiente climatizzato d'estate

$G_E = 0.12$
$T_E = 36$ °C
$\varphi_E = 0.7$
} condizioni esterne in estate

$p = 1$ atm

Negli impianti di climatizzazione l'aria si preleva dall'esterno; se le condizioni esterne sono estreme devo però spendere molta energia per trattarla. Quindi si può prendere una parte di aria dall'esterno, miscelarla e trattare la miscela (così si fa ricircolare l'aria ambiente) → ovviamente con limitazioni.

Tutti i processi dell'aria umida sono processi isobari

Quindi ricavo:

$$x_A = 0.622 \cdot \frac{\varphi_A p_{vsA}}{p - \varphi_A p_{vsA}}$$

Dalle tabelle ricavo p_{vs}:

$p_{vsA} = 0.03363$ bar

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 75 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 77 di 276

ora le due portate si miscelano:

$$G_A h_A + G_E h_E = G_M h_M \ (I) \Rightarrow \quad G_M = G_A + G_E \ (II)$$

Essendo il sistema adiabatico e isobaro allora i flussi entalpici si compensano. Da un'altra combinando (I) e (II)

$$h_M = \frac{G_A h_A + G_E h_E}{G_A + G_E}$$

NB: la "portata d'aria" in psicrometria è la portata d'aria secca non la portata d'aria totale

Quindi:

$$h_M = 56.96 \ \frac{kJ}{kg}$$

Se faccio l'ipotesi che la miscelazione non produca cambiamento di stato del vapore (cioè non produca condensazione), posso scrivere l'equazione di conservazione della massa di vapore.

$$G_A x_A + G_E x_E = G_M x_M$$

Quindi:

$$x_M = \frac{G_A x_A + G_E x_E}{G_A + G_E} = 0.01181$$

Ora ci viene richiesta la temperatura.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 77 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 79 di 276

~~dobbiamo~~ Quindi per ricavare la temperatura devo interpolare ~~i~~ valori:

$$\frac{T_{HR} - 16}{17 - 16} = \frac{p_{VSHR} - p_{VS16°C}}{p_{VS17°C} - p_{VS16°C}}$$

Ricavo quindi:

$$T_{HR} = 16.58\ °C$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 79 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 81 di 276

Dobbiamo calcolare il rapporto volumetrico di compressione:

$$r_v = \frac{v_1}{v_2}$$

La trasformazione 1-2 (compressione) è adiabatica reversibile quindi:

$$T_1 v_1^{\gamma-1} = T_2 v_2^{\gamma-2} \quad \Rightarrow \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\gamma-1} = r_v^{\gamma-1}$$

Quindi posso ricavare r_v:

$$r_v = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{1/\gamma-1} = 5.136$$

Se il ciclo è completamente reversibile internamente:

$$\eta = 1 - r_v^{1-\gamma} = 0.68$$

Viene inoltre dicesto rapporto tra pressioni massima e minima cioè p_3/p_1.
Quindi ricavo da equazioni di stato:

$$v_3 = \frac{RT_3}{p_3} \qquad v_1 = \frac{RT_1}{p_1}$$

La trasformazione 2-3 è isocora quindi:

$v_3 = v_2$ Quindi:

$$r_v = \frac{v_1}{v_2} = \frac{RT_1}{p_1} \cdot \frac{p_3}{RT_3}$$ Quindi:

$$\frac{p_3}{p_2} = \frac{T_3}{T_1} r_v = 29.64$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 81 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 83 di 276

Ricavare l'uguaglianza:

$$T_1 T_3 = T_2 T_4 \quad \Rightarrow \quad T_4 = \frac{T_1 T_3}{T_2} = 864.41\ K.$$

Esercizio E 2

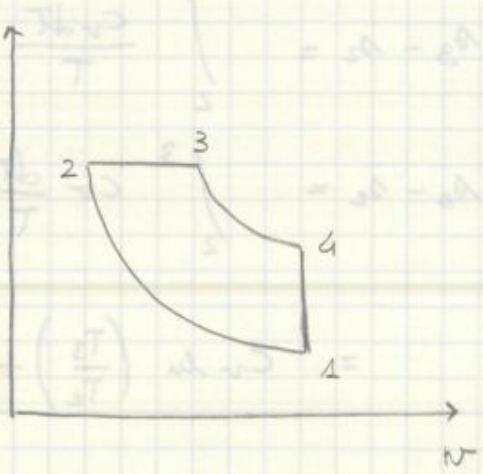
Dati:

$T_1 = 30\ °C$

$p_1 = 15\ psi$

$T_2 = 600\ °C$

$T_3 = 1700\ °C$



Il rendimento del ciclo Diesel è:

$$\eta = 1 - (r_v)^{1-\gamma} \frac{r_c^{\gamma} - 1}{\gamma (r_c - 1)}$$

Essendo 1-2 adiabatica reversibile:

$$T_1 v_1^{\gamma-1} = T_2 v_2^{\gamma-1} \quad \Rightarrow \quad \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{\gamma-1} = r_v^{\gamma-1}$$

Quindi:

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} \frac{(T_3/T_2)^{\gamma} - 1}{\gamma (T_3/T_2 - 1)} = 0.416$$

Infatti:

$$r_c = \frac{v_3}{v_2} = \frac{v_3}{v_1} \cdot \frac{v_1}{v_2} = r_v \frac{v_3}{v_1} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{1}{1-\gamma}} \cdot \frac{RT_3}{p_3} \cdot \frac{p_1}{RT_1}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 83 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 85 di 276

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = T_1 \left(\frac{p_b}{p_a}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = T_1 r_p^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 535.5\ K$$

Per calcolare T_4 si sfrutta l'uguaglianza:

$$T_4 = \frac{T_1 T_3}{T_2} = 427.4\ K$$

Il compressore e la turbina realizzano trasf. adiabatiche, quindi:

$$l_n = l_{t,c} + l_{t,e} = c_p (T_1 - T_2) + c_p (T_3 - T_4)$$

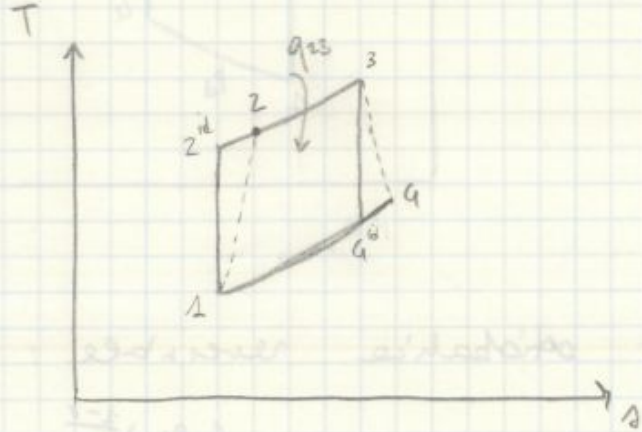
Quindi:

$$l_n = R \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[T_1 - T_2 + T_3 - T_4 \right] = 422.3\ \frac{kJ}{kg}$$

Ricorda che il fluido ha le proprietà dell'aria.
Inoltre:

$$\eta = 1 - r_p^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = 0.496$$

Cosa succede se compressore ed espansore sono adiabatici IRREVERSIBILI ??



i punti 2^{id} e 4^{id} coincidono con 2 e 4 del calcolo precedente cioè:

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 85 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 87 di 276

più basso di quello del caso ideale.
Si nota che nel caso reale q_{23} è leggermente minore rispetto al caso ideale.

NB: il rendimento isentropico è noto a priori.

La quantità di calore somministrata al fluido (poiché una parte di energia meccanica viene convertita in energia termica) fa sì che il fluido si dilata; ciò in compressione non mi aiuta, ma in espansione sì.

Per coprire la perdita di attrito ho bisogno di un modello.
Ho bisogno di una trasf. politropica in particolare tale che la perdita di lavoro degli attriti interni è uguale al calore scambiato lungo una politropica tra 1 e 2 di espansione inoltre:

$$l_{e\,i,c} = q_{12} = c_c (T_2 - T_1)$$

dove:

$$p_1 v_1^{n_c} = p_2 v_2^{n_c}$$

è la politropica ipotizzata per ricavare il contributo del lavoro di attrito.

$$T_1 p_1^{\frac{1-n_c}{n_c}} = T_2 p_2^{\frac{1-n_c}{n_c}}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1-n_c}{n_c}} = r_p^{\frac{n_c-1}{n_c}}$$

Quindi:

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 87 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 89 di 276

Esercizio EG

Dati:

Stato 1:

$p_1 = 1{,}5$ bar

$T_1 = 200$ °C

la trasf. 1-2:

$H(h_2 - h_1) = 600$ kJ

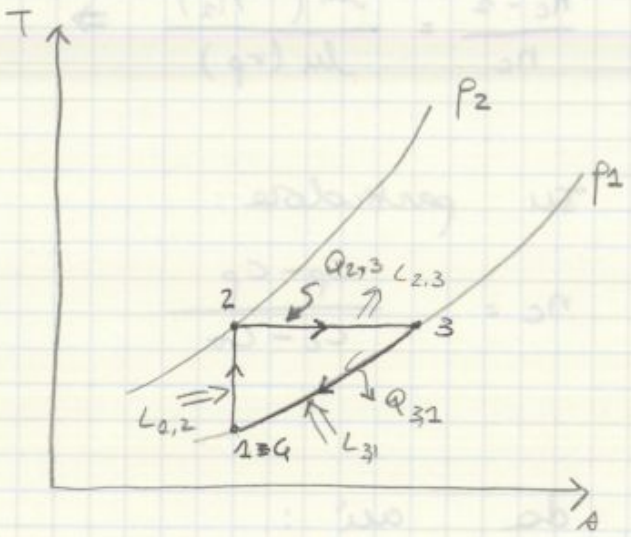
Stato 3:

$T_3 = T_2$

$p_3 = p_1$

Stato G:

coincide con stato 1.



Per trasf. 1-2 essendo adiabatica reversibile cioè isoentropica, scambia solo lavoro (L_{1-2})
Invece la trasf. 2-3 è isoterma quindi viene somministrato calore (Q_{2-3}) e viene fornito calore all'ambiente esterno (L_{2-3}).
Infine lungo 3-G si ha cessione di calore e fornitura di lavoro.

$Q - L_i = \Delta H = H(h_2 - h_1)$

$= H c_p (T_2 - T_1)$

Essendo 1-2 adiabatica:

$T_1 p_1^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = T_2 p_2^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \Rightarrow p_1 v_1^{\gamma} = p_2 v_2^{\gamma}$ $\quad L_i = H c_p (T_2 - T_1)$

la trasf. 2-3 è isoterma quindi:

$T_2 = \frac{p_2 v_2}{R} = \frac{p_3 v_3}{R} = \frac{p_1 v_3}{R}$

dove $v_1 = \frac{RT_1}{p_1}$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 89 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 91 di 276

Trasformazione 3-1:

$$q_{3,1} = c_p(T_1 - T_3) = -400 \ \frac{kJ}{kg}$$

$$l_{3,1} = q_{3,1} - c_v(T_1 - T_3) = c_p(T_1 - T_3) - c_v(T_1 - T_3) =$$

$$= (T_1 - T_3)(c_p - c_v) = R(T_1 - T_3) = -116.3 \ \frac{kJ}{kg}$$

Il lavoro netto scambiato è la somma dei termini di lavoro:

$$l_n = l_{1,2} + l_{2,3} + l_{3,1} = 134.5 \ \frac{kJ}{kg}$$

$$q_n = \underbrace{q_{1,2}}_{=0} + q_{2,3} + q_{3,1} = 134.5 \ \frac{kJ}{kg}$$

Vale perché è una trasformazione chiusa.
Calcolo il rendimento:

$$\eta = \frac{l_n}{q_{2,3}} = 0.252$$

$q_{2,3}$ è quella spesa è il calore entrante

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 93 di 276

Quindi:

$$T_{a^{id}} = 42.2\ °C \quad \begin{cases} v_1 = 1.0088 \cdot 10^{-3}\ m^3/kg \\ h_1 = 176.8\ kJ/kg \\ s_1 = 0.6018\ kJ/kg\,K \end{cases}$$

Quindi:

$$h_{av} = 2577.3\ \frac{kJ}{kg} \qquad s_{1v} = 8.2137\ \frac{kJ}{kg\,K}$$

posso quindi ricavare il titolo di a^{id}:

$$x_a{}^{id} = \frac{s_{a^{id}} - s_1}{s_v - s_1} = 0,716$$

Quindi:

$$h_{a^{id}} = (1 - x_{a^{id}})\, h_1 + x_{a^{id}}\, h_{av} = 1896.3\ \frac{kJ}{kg}$$

Ora ho caratterizzato lo stato ideale.
Posso caratterizzare lo stato reale 4 in questo modo:

$$\eta_{ise} = \frac{l_e}{l_e{}^{id}} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{a^{id}}} \qquad \text{da cui ricavo:}$$

$$h_4 = h_3 - (h_3 - h_{a^{id}})\,\eta_{ise} = 2077.1\ \frac{kJ}{kg}$$

Da cui ricavo il titolo:

$$x_4 = \frac{h_4 - h_1}{h_{av} - h_1} = 0.792$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 93 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 95 di 276

$$|q_{uscente}| = h_a - h_1 = 1900.3 \ \frac{kJ}{kg}$$

Quindi:

$$\eta = 1 - \frac{|q_{uscente}|}{q_{entrante}} = 0.276$$

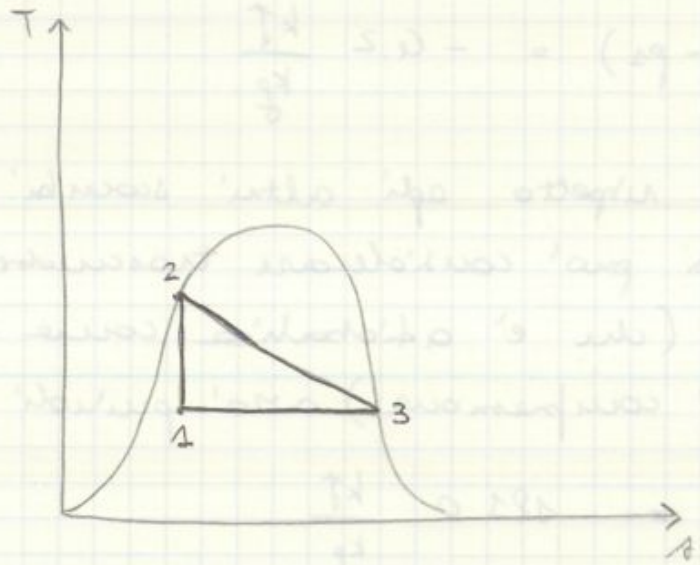
Esercizio F.2

Dati:

$M = 1$ kg

$p_1 = 1$ bar $= p_3$

$x_1 = 0,2847$



Come sempre si valutano i parametri di stato nei capisaldi e si fanno i conti.

× lo stato 1:

$$h_{1L} = 417.51 \ \frac{kJ}{kg} \qquad h_{1v} = 2675.6 \ \frac{kJ}{kg}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 95 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 97 di 276

$u_1 = h_1 - p_1 v_1 = 1012.0 \ \frac{kJ}{kg}$

Quindi: $u_2 = h_2 - p_2 v_2 = 1205.8 \ \frac{kJ}{kg}$

Ugualmente:

$u_3 = 2510.5 \ \frac{kJ}{kg}$

Applichiamo ora il I principio alle 3 trasformazioni:

$-l_{12} = u_2 - u_1 \Rightarrow \quad l_{12} = u_1 - u_2 = -193.8 \ \frac{kJ}{kg}$

La trasf 3-1 è isobara reversibile:

$$l_{31} = \int_3^1 p\,dv = p_3 (v_1 - v_3) = -121.1 \ \frac{kJ}{kg}$$

La trasf. 2-3 avviene sia con scambio di calore che con scambio di lavoro. Ma la trasf. 2-3 è reversibile. Quindi:

$$q_{23} = \int_2^3 T\,ds = \bar{T}(s_3 - s_2)$$

Dove $\bar{T}$ è la temperatura media di trasformazione. La trasf. 2-3 è di fatto lineare, quindi:

$$q_{23} = \bar{T}(s_3 - s_2) = \frac{T_3 + T_2}{2}(s_3 - s_2) =$$

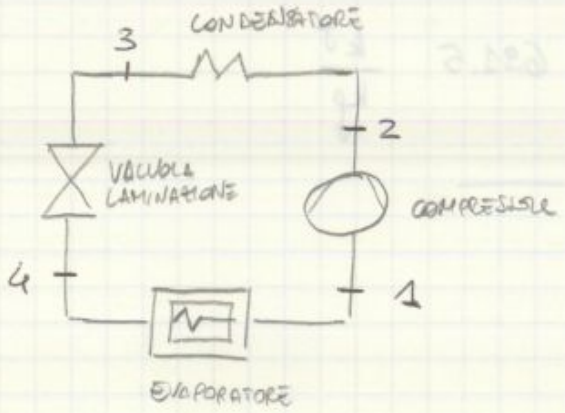
$= 1996.2 \ \frac{kJ}{kg}$

vale solo se sembra LINEARE!!

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 97 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 99 di 276

nel compressore)



I parametri di stato negli stati 1 e 3 si leggono da tabelle di saturazione dell'R 134a. Quindi:

$$h_1 = 382.6 \ \frac{kJ}{kg}$$

$$s_1 = 1.7475 \ \frac{kJ}{kg}$$

Ugualmente nello stato 3:

$$h_3 = 243.65 \ \frac{kJ}{kg} = h_4$$

essendo gli stati 3 e 4 connessi da trasformazione che è isoentalpica.

Lo stato 2 è stato di vapore surriscaldato quindi non posso usare le tabelle. Ma posso dire che:

$$s_2 = s_1 \qquad e \qquad p_2 = p_c$$

Devo ricavare l'entalpia. Quindi da diagramma:

$$h_2 = 425.81 \ \frac{kJ}{kg}$$

(ovviamente diagramma di Mollier non è con curve → quindi va bene approssimare).

Applico I principio al compressore, ↳ è adiabatico reversibile

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 101 di 276

NB: le isoentropiche non sono parallele
Quindi il fatto che 2' non sia parallelo a 2 fa sì che aumenti anche il denominatore di COP.
Infatti questo sistema (l'aggiunta del rigeneratore) protegge il compressore, che quindi lavora bene, e fa aumentare numeratore di COP.

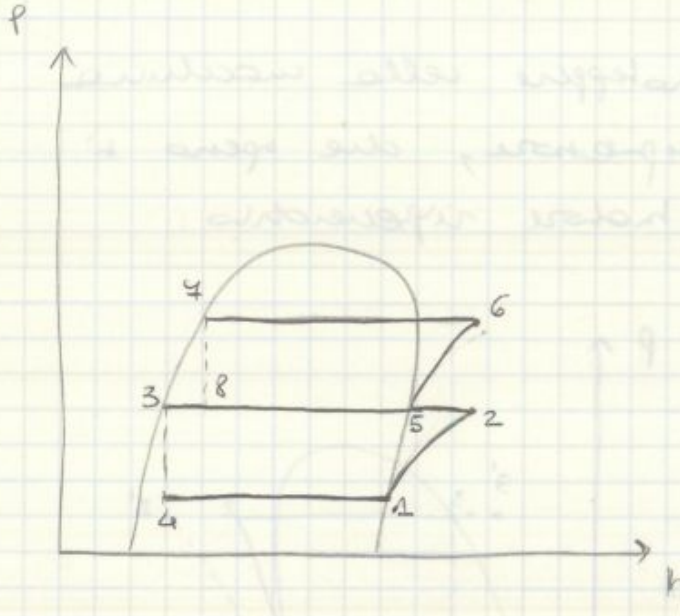
Esercizio F5

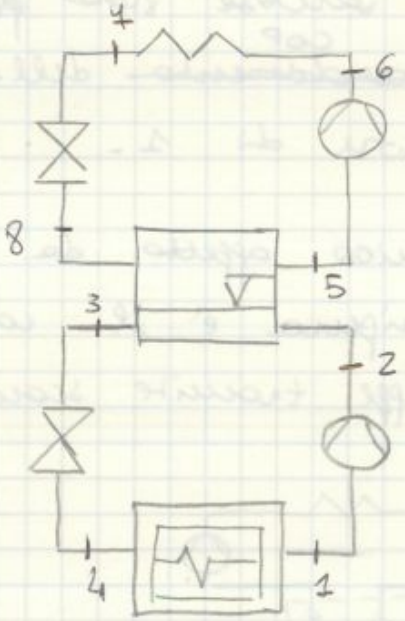
Dati:

$T_E = -35°C$ $\qquad \phi_E = 50 \frac{Mcal}{h}$

$T_C = 50°C$

$p_i = \sqrt{p_E p_C}$





NB T_E e T_C ~~si riferiscono a~~ sono le temperature a cui avviene il cambiamento di stato.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 101 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 103 di 276

$h_3 = 176.89 \ \frac{kJ}{kg} = h_4$ essendo la laminazione isoentalpica.

Ora del circuito dell'evaporatore (o circuito di bassa pressione) sappiamo tutto.
Possiamo ora valutare i parametri di stato di 5 che è stato saturo a pressione p_i:

$h_5 = 398.72 \ \frac{kJ}{kg}$

$s_5 = 1,7270 \ \frac{kJ}{kg\,K}$

Lo stato 7 è liquido saturo a 13.18 bar:
$h_7 = 271,62 \ \frac{kJ}{kg} = h_8$

Lo stato 6 è vapore surriscaldato a 13.18 bar con entropia pari a s_5. Quindi:

$h_6 = 423.88 \ \frac{kJ}{kg}$ e $T_6 = 55.3\,°C$ (da Mollier)

Il separatore separa il circuito di alta temperatura da quello di bassa temperatura; quindi le portate sono diverse nei 2 circuiti!
Quindi nel scrivere il I principio:

$$|W_{b,c}| = G_E (h_2 - h_1) - G_c (h_6 - h_5)$$

Devo applicare il I principio al separatore → non ci sono nel separatore né scambi di potenza termica né di potenza meccanica:

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 103 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 105 di 276

27/11/13

VIII ESERCITAZIONE

Esercizio (fotocopia)

Dati:

$G_0 = 45 \text{ kg/h}$

$p_5 = 1 \text{ atm}$

$p_1 = 1 \text{ atm}$

$t_1 = 25 °C$

$p_2 = 1{,}02 \text{ atm}$

$t_2 = t_1$

$\eta_{iT} = 0.5$

Nel tragitto il compressore è schematizzato con un solo rombo, ma in realtà è a + stadi.

Nota che in una somma di calore esiste sempre una differenza di temperatura tra le 2 componenti al suo interno; se la differenza di temperatura è nulla, si dice che lo scambiatore ha estensione infinita.

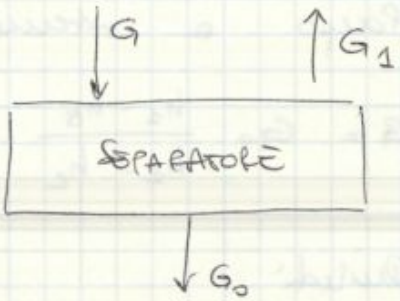
Siamo molto lontani da una linea limite, siamo quasi a comportamento da gas.
Consideriamo ~~la tabella~~ ~~la diagramma~~ il diagramma e leggiamo:

$$h_1 = 116{,}5 \frac{BTU}{lb} = 270{,}98 \frac{kJ}{kg}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 105 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 107 di 276

$G = G_0 + G_1$



cioè :

$G_1 = G - G_0$

Quindi sommando :

$G(h_2 - h_3) = (G - G_0)(h_1 - h_6)$ (I)

Perché ~~sicuro~~ sommisco G_1 con $G - G_0$?
Perché la resa dell'impianto è :

$$\varepsilon = \frac{G_0}{G}$$

Nel separatore entra :
G nello stato a
ed esce :
G_1 nello stato 6 e G_0 nello stato 5.
Quindi posso scrivere la conservazione dell'energia come :

$G h_a = G_0 h_5 + G_1 h_6$ (II)

Lo stato a è stato di uscita da valvola di laminazione. Quindi :

$h_a = h_3$

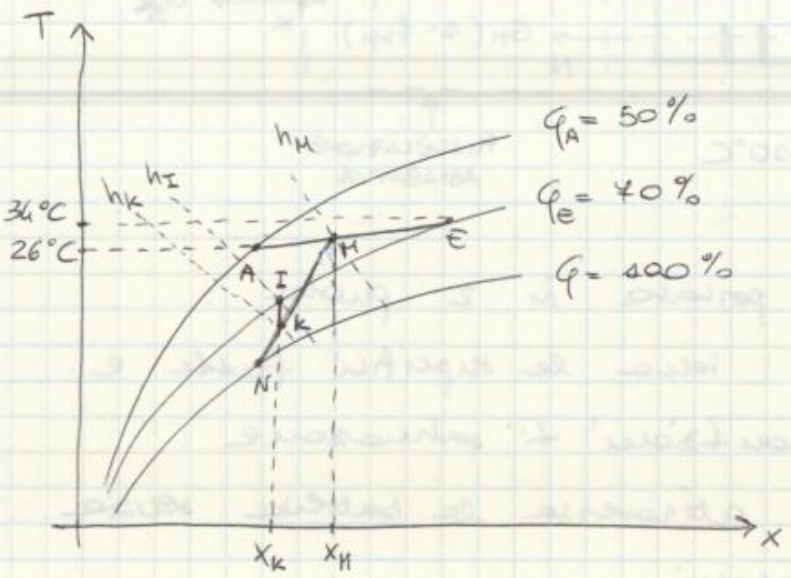
Inoltre sommisco a G_1, $G - G_0$ e ottengo che (I) diventa :

$G h_3 = G_0 h_5 + (G - G_0) h_6$ (III)

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 107 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 109 di 276

Esercizio D.9



Dati:

T_H = 26,81 °C

h_H = 57,039 $\frac{kJ}{kg}$

x_H = 0,01181 kg_v/kg_a

G_H = 1,21 kg/s

Lo stato I:

T_I = 18°C ; φ_I = 70%

Quindi:

trasf M-K → in batteria di raffreddamento e deumidificazione

trasf K-I → in batteria di postriscaldamento (stato saturo).

Inoltre: T_{AL} = 10°C

Determiniamo la potenza scambiata nelle 2 batterie, il fattore di by-pass e la portata.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 109 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 111 di 276

$p_{V_N} = p_{SAT}(T_N) \simeq 1227 \ Pa$

ricavo l'entalpia di N:

$h_N = c_{p_a} T_N + x_N (r_0 + c_{p_V} T_N)$

(la temperatura è in centigradi). Quindi sostituendo:

$h_N = 29{,}2 \ \frac{kJ}{kg_a}$

Caratterizziamo lo stato K:
deve avere lo stesso titolo della miscela di aria umida nello stato I, quindi:

$x_I = 0{,}622 \ \frac{p_{V_I}}{p - p_{V_I}}$

Inoltre:

$\varphi_I = \frac{p_{V_I}}{(p_{SAT}(T_I))} \rightarrow$ da tabelle

Quindi: $x_I = 0{,}0092 \ \frac{kg_V}{kg_a} = x_K$

Possiamo anche ricavare l'entalpia:

$h_I = 61{,}2 \ \frac{kJ}{kg_a}$

Ci concentriamo ora sul processo di miscelazione adiabatica. Scrivo il I principio per sistemi aperti per la miscelazione:

$\frac{dU}{dt} = \cancel{\Phi}^{=0} - \cancel{W}^{=0} + (f_{bp} G_M) h_M + (1 - f_{bp}) G_M h_N - G_M h_K$

$\frac{dU}{dt} = 0$ (stazionario); $\Phi = 0$ (adiabatica); $W = 0$; $(f_{bp} G_M) h_M + (1 - f_{bp}) G_M h_N$: mpresso; $G_M h_K$: uscita

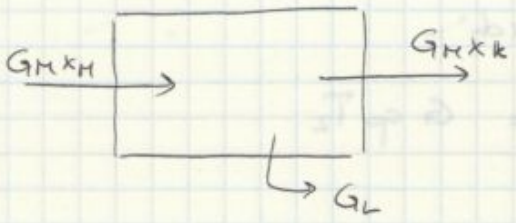
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 111 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 113 di 276

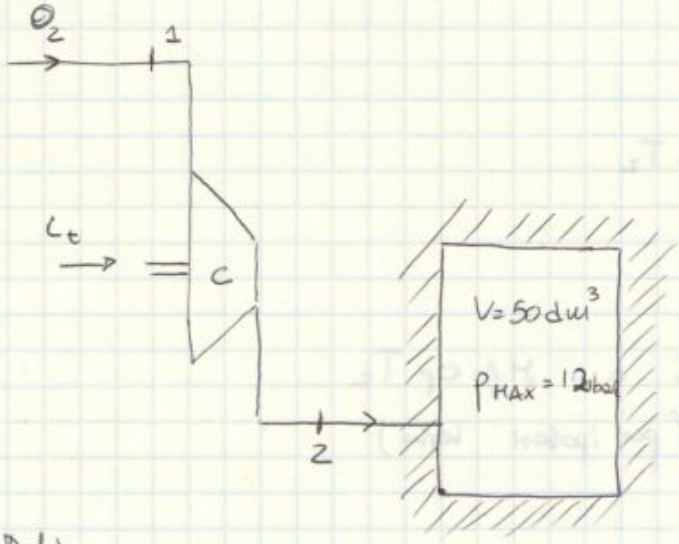
Inoltre vuole che:

$$G_L = G_H (x_H - x_K) \cong 11.3 \ \frac{kg}{h}$$

Nella batteria di raffreddamento:



Esercizio C.5



Dati:

$p_1 = 1$ bar

$T_1 = 25$ °C

$\beta = \frac{p_2}{p_1} = \text{costante} = 12$ (perché considero p_2 come p_{MAX})

Inoltre:

$M_{O_2} = 52 \ \frac{kg}{kmol}$ e $\gamma = 1,4$

? $M_{f\,mole}$, L_{tc}, s_{IAR}.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 113 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 115 di 276

$$M_f = \frac{p_{max} V}{R^* T_2} = 272 \text{ g}$$

Calcolo il lavoro tecnico di compressione applicando il I principio per sistemi aperti nel compressore:

$$W_t = G(h_1 - h_2)$$

Quindi [illegible]:

$$L_{t_c} = M_f c_p (T_1 - T_2) \cong -76{,}24 \text{ kJ}$$

Infine devo ricavare l'entropia.
Scrivo il II principio per sistemi aperti (per la bombola):

$$\frac{dS}{dt} = \cancel{\frac{\dot{Q}}{T}}^{=0 \text{ (adiabatico)}} + G s_2 + \dot{\Sigma}_{IRR}$$

Integrando:

$$\Delta S = M_f s_2 + S_{IRR}$$

$$S_f - S_i = M_f s_2 + S_{IRR}$$

Quindi:

$$S_{IRR} = S_f - S_i - M_f s_2$$

$$S_{IRR} = M_f (s_f - s_2)$$

Sfruttiamo le relazioni di Gibbs per ricavare s_f e s_2:

$$T ds + v dp = c_p dT$$

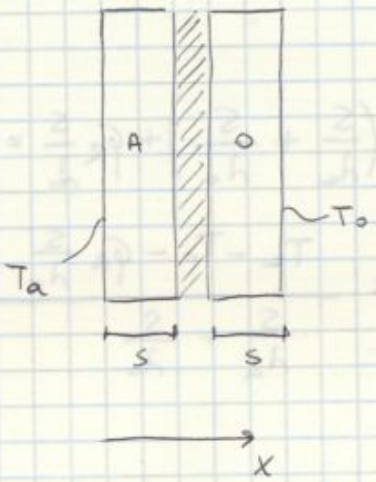
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 115 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 117 di 276

04/12/13

IX ESERCITAZIONE

Esercizio G.1



Dati:

$\lambda_a = 30 \frac{kcal}{h\,m\,°C}$

$\lambda_o = 40 \frac{kcal}{h\,m\,°C}$

$T_a = 100\,°C$

$T_o = 50\,°C$

$\varphi_R = 20 \frac{kW}{m^2}$

$s = 50\ mm$

Supponiamo che il problema sia stazionario e che l'unica direzione significativa sia x.
Ipotizzo poiché che il sistema sia monodimensionale
Quindi in ogni punto del sistema il flusso che attraversa una strato è costante.
Quindi:

$$\varphi_a = \frac{\lambda_a}{s}(T_a - T_R)$$

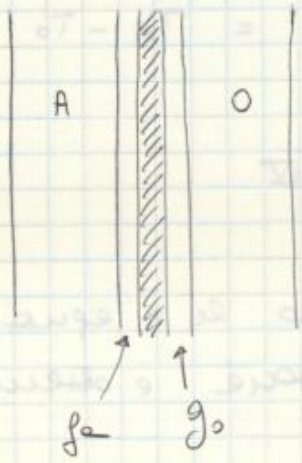
dove T_R è la temperatura della resistenza.
La scelta del verso del flusso è arbitraria.
Ugualmente:

$$\varphi_o = \frac{\lambda_o}{s}(T_R - T_o)$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 117 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 119 di 276

Nel caso di contatto fra 2 materiali, si possono trovare cavità d'aria, oppure delle regioni lunghe e strette in cui nell'aria si ha flusso conduttivo e non convettivo; un modello di tutto ciò può essere:



$\delta_a = \delta_0 = 1$ mm

$\lambda_F = 0{,}03 \frac{W}{m^2}$ (conducibilità dell'aria)

Inoltre il rapporto tra superficie di contatto e la superficie totale del sistema è:

$\frac{S_{ca}}{S} = \frac{S_{co}}{S} = 0{,}02$ (il resto è aria)

Rimangono validi i dati precedenti; ma diventano significative anche la temperatura interna dello strato di ottone e dello strato di acciaio.

Si può approssimare il problema ad uno di tipo elettrico.

Risultano le equazioni:

$$\varphi_a' = \frac{\lambda_a}{\delta}(T_a - \underbrace{T_{ai}}_{\text{temp. interna}}) \Rightarrow \frac{\delta}{\lambda_a}\varphi_a' = T_a - T_{ai}$$

Ma:

$$\varphi_a' = \frac{T_{ai} - T_R}{R_{tot}}$$

essendo comunque un 2% di contatto fra i materiali

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 119 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 121 di 276

$$\phi_F = \frac{S_F \Delta T}{\frac{\delta}{\lambda_F}}$$

Quindi: $\phi = \phi_c + \phi_F = \frac{S_c \Delta T}{\frac{\delta}{\lambda}} + \frac{S_F \Delta T}{\frac{\delta}{\lambda_F}} =$

$$= \frac{S \Delta T}{R_a}$$

Quindi ricavo che:

$$\frac{S \Delta T}{R_a} = \frac{S_c \Delta T}{\frac{\delta}{\lambda}} + \frac{S_F \Delta T}{\frac{\delta}{\lambda_F}}$$

Risolvo rispetto a R_a:

$$R_a = \delta \left[\frac{S_c}{S} \lambda + \frac{S_F}{S} \lambda_F \right]^{-1} = \delta \left[\frac{S_c}{S} \lambda + \frac{(1 - S_c)}{S} \lambda_F \right]^{-1}$$

Ora posso scrivere:

$$R_{ae} = \delta_e \left[\frac{S_c}{S} \lambda_e + \frac{(1 - S_c) \lambda_F}{S} \right]^{-1}$$

$$= 1{,}375 \cdot 10^{-3} \quad \frac{m^2 K}{W}$$

In modo analogo: $R_{ao} = 0{,}603 \cdot 10^{-3} \frac{m^2 K}{W}$

Quindi ho ricavato tutto per calcolare (II) quindi:

$$\varphi_a' = 6327{,}1 \quad \frac{W}{m^2}$$

Il flusso si è ridotto perché è aumentata la resistenza termica.

Inoltre: $\varphi_o' = 26372 \quad \frac{W}{m^2}$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 121 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 123 di 276

Applico Fourier:

$$q_c = \frac{T_i - T_e}{\frac{2}{\alpha} + \frac{s}{\lambda}} = -19,43 \ \frac{W}{m^2}$$

perché $\frac{1}{\alpha_i} = \frac{1}{\alpha_e}$

Quindi:

$$\Phi_{COND} = S_{TOT} \cdot q_c = -72,3 \ W$$

Quindi il flusso è entrante ed è $\Phi_{COND} = 72,3 \ W$
Ma c'è anche un flusso associato alla ventilazione
Quindi:

$$|\Phi_V| = G c_p (T_e - T_i) = 22,1 \ W$$

Quindi:

$$\Phi_{TOT} = \Phi_{COND} + \Phi_V = 94,4 \ W$$

Il frigorifero funziona come una macchina di Carnot, quindi:

$$COP = \frac{T_i}{T_e - T_i} = 7,92$$

Quindi sicuro:

$$COP = \frac{\Phi_E}{|W_t|} = \frac{\Phi_{TOT}}{|W_t|} \Rightarrow |W_t| = \frac{\Phi_{TOT}}{COP} = 11,92 \ W$$

Quindi:

$$P_{el} = \frac{|W_t|}{\eta_{el}} = 13 \ W$$

Vogliamo migliorare le condizioni quindi:

$$\Phi_{TOT}' = 0,8 \ \Phi_{TOT} = 75,52 \ W$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 123 di 276

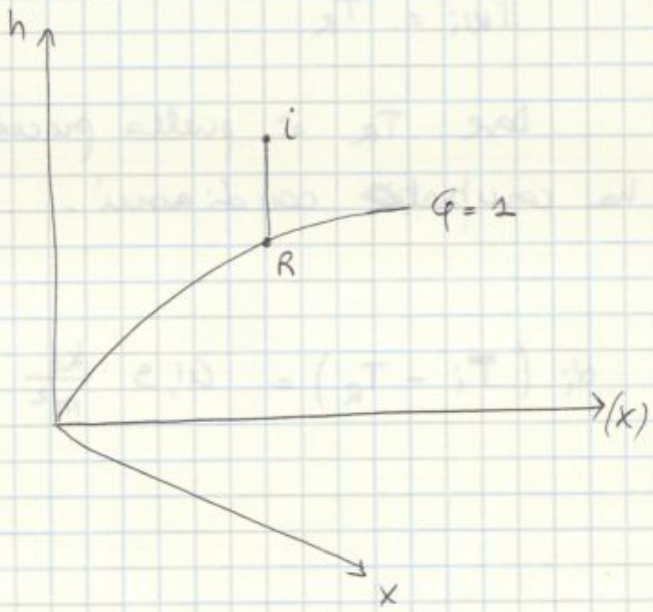
© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 125 di 276

Dalle tabelle di saturazione ricavo che a $T_i = 15°C$

$p_s = 0{,}01706$ bar

Calcolo la pressione parziale del vapore all'interno:

$p_v = UR_i \, p_s = 1364{,}8$ Pa



Quindi:

$x_R = x_i \Rightarrow \underbrace{p_{vR}}_{\text{pressione parziale del vapore allo stato di rugiada}} = p_v$

Quindi devo cercare sulle tabelle $p_v = 1364{,}8$

Non lo trovo e lo ricavo per interpolazione

ottenendo che per $p_v = 1364{,}8$ Pa

$T_R = 11{,}4\,°C$ a questa temperatura inizia la condensazione del vapore.

Se sulla faccia interna si ha T_R $(T_R = T_{wi})$, se il flusso è uniforme (sistema stazionario), posso ricavare che:

$$\varphi = \alpha_i (T_i - T_{wi}) = \alpha_i (T_i - T_R) = 41{,}9 \ \frac{W}{m^2}$$

Essendo il flusso stazionario posso scrivere:

$$\varphi = \frac{T_i - T_e}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_e}} \Rightarrow T_e = 0{,}6\,°C$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 125 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 127 di 276

Esercizio 6.6

Dati:

$\lambda = 15 \frac{W}{mK}$

$d_i = 50 \text{ mm}$

$d_e = 54 \text{ mm}$

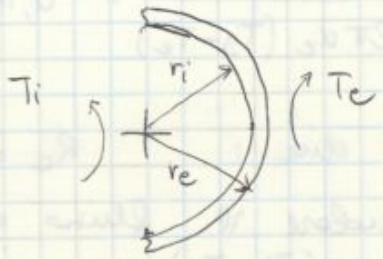
$T_i = 200 °C$

$\alpha_i = 120 \frac{W}{m^2K}$

$T_e = 15 °C$

$\alpha_e = 12 \frac{W}{m^2K}$

$T_3 = 30 °C$



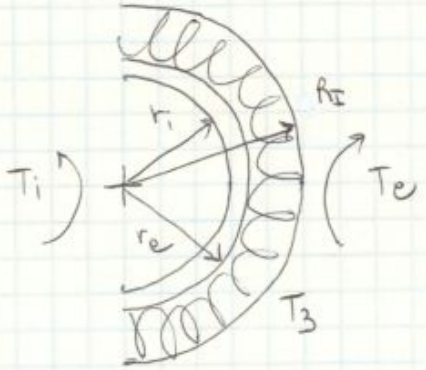
Siamo in geometria cilindrica ma possiamo ancora fare ipotesi di monodimensionalità.

Quindi:

$$\varphi_{L0} = \frac{2\pi (T_i - T_e)}{\frac{1}{r_i \alpha_i} + \frac{1}{\lambda_a} \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right) + \frac{1}{r_e \alpha_e}} = 340 \frac{W}{m}$$

Questo è il flusso disperso dal tubo nudo.

Proviamo a isolare il condotto



$$\varphi_L = \frac{\varphi_{L0}}{2} = 170 \frac{W}{m}$$

$$\Phi = \alpha_e \, 2\pi R_I L (T_3 - T_e)$$

quindi

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 127 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 129 di 276

11/12/13

X ESERCITAZIONE

Esercizio H.1

Dati:

$I = 200\ A$

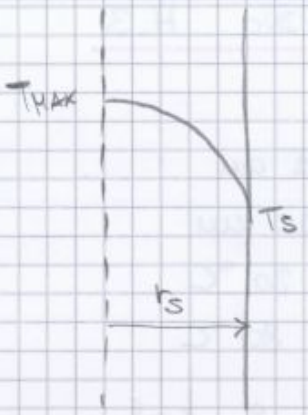
$d = 1\ in$

$L = 3\ ft$

$\rho_e = 70\ \mu\Omega\,cm$

$T_S = 176.7\ °C$

$\lambda = 19.37\ \frac{kcal}{hm°C}$



Innanzitutto:

$d = 0{,}0254\ m$ $\qquad L = 0{,}9144\ m$

$[1\ ft = 0{,}3048\ m]$

Inoltre: $\rho_e = 7 \cdot 10^{-7}\ \Omega m$

si studia equazione della conduzione con generazione interna:

$$T = T_S + \frac{H}{4\lambda}(r_S^2 - r^2) \Rightarrow T_{MAX} = T_S + \frac{H}{4\lambda} r_S^2$$

Considerato che:

$$R = \frac{\rho_e L}{\pi r_S^2} \qquad e \qquad \phi = RI$$

Inoltre:

$$H = \frac{\phi}{\pi r_S^2 L}$$ Quindi:

$$H = \frac{RI^2}{\pi r_S^2 L} = \frac{\rho_e \cancel{L} I^2}{(\pi r_S^2)^2 \cancel{L}} = \rho_e \left(\frac{I}{\pi r_S^2}\right)^2$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 129 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 131 di 276

Per l'olio:

$Bi_o = 0{,}07 < 0{,}1$

Quello dell'aria è circa 60 volte + piccolo. Quindi è lecita l'analisi a parametri concentrati o analisi zero dimensionale.

Il raffreddamento termico è quindi di tipo esponenziale:

$$\vartheta = \vartheta_0 e^{-t/t_0}$$

t_0 è la costante di tempo del fenomeno.
Inoltre:

$$\vartheta = T - T_{AMBIENTE}$$

ϑ_0 è la valore di pura temperatura al tempo $t=0$.
Quindi:

$$t_0 = \frac{\rho c V}{\alpha S} = \frac{\rho c}{\alpha} L_x$$

Non c'è conducibilità termica, in quanto la resistenza interna dell'oggetto è trascurabile.
Quindi:

t_0 → olio 27,83 s
t_0 → aria 1739,2 s

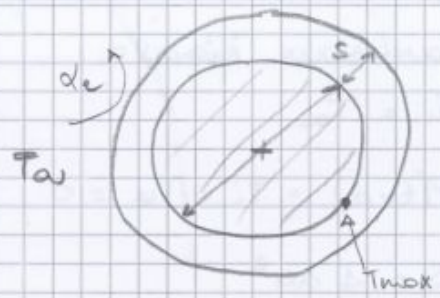
Con l'olio l'oggetto scambia molto + intensamente dio con l'aria → perché l'olio è liquido mentre aria è aeriforme → scambio termico tra solido e liquido è + facile.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 131 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 133 di 276

$T'_{500S} = 39,22\ °C$

Esercizio H.2



Dati:

$D = 2,53\ mm$

$S = 1,27\ mm$

$T_e = 48,3\ °C$

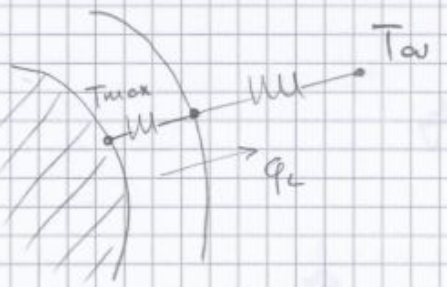
$\alpha_e = 19,52\ \frac{kcal}{h\,m^2\,°C}$

$\lambda_f = 0,113\ \frac{kcal}{h\,m\,K}$

$\rho = 0,026\ \Omega\ \frac{mm^2}{m}$

I_{max} | $T_{max} = 93,3\ °C$

Abbiamo che:



Posso scrivere che:

$$q_L = U^* \left(T_{max_f} - T_e \right)$$

Quindi:

$$U^* = \frac{1}{\frac{1}{\lambda_f 2\pi} \ln\left(\frac{D+2S}{D}\right) + \frac{1}{\alpha_e \pi (D+2S}}$$

Quindi:

$U^* = 0,284\ \frac{W}{m\,K}$

Quindi: $q_L = 52,61\ W$.

ad esempio:

$$q_L = \frac{\rho}{\pi D^2/4} \cdot I^2_{MAX} \quad \rightarrow \quad I_{MAX} = 52,61\ A$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 133 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 135 di 276

So due:

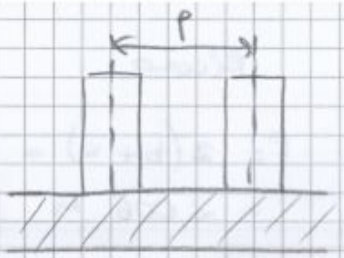
$$\tau = \frac{\rho c V}{\alpha S} = \frac{50\ \rho c V}{\phi_R (1 - e^{-3})}$$

Do qui:

$$\alpha = 19\ \frac{W}{m^2 K}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 135 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 137 di 276



Ovvero:

$S_{TOT} = S_{AL} + S_L$

Da cui:

$S_L = 2\pi r_e p$

da cui ricavo

$p = 2{,}3$ mm.

Esercizio I.2

Dati:

$b = 1000$ mm

$n = 40$

$L = 30$ mm

$s = 3$ mm

$T_0 = 40$ °C

$T_e = 20$ °C

$\lambda = 203 \frac{W}{mk}$

$\alpha_e = 4 \frac{W}{m^2 K}$

$h = 800$ mm

All'interfaccia di una superficie con l'ambiente, vi è scambio termico convettivo e radiativo.
A questo è legato il coefficiente limitante di scambio termico → in questo caso α_e è trattato come un normale coefficiente di convezione.

La dispersione nella punta può essere trascurata, quindi faccio ipotesi di aletta con punta adiabatica.

$$\vartheta(x) = \vartheta_0 \frac{\cosh[\beta(L-x)]}{\cosh[\beta L]}$$

β è il parametro d'aletta:

$$\beta = \sqrt{\frac{\alpha P}{\lambda A}}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 137 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 139 di 276

$\phi_p = \alpha (d - s) b \vartheta_0 = 2{,}38\ W$

E' il flusso disperso dal singolo interstizio.
La superficie di una singola aletta vale:

$S_{AL} = PL$

Quindi: $S_{TOT} = S_{AL} + S_p = 0{,}07718\ m^2$

Quindi:

$$\eta_{AL_{TOT}} = 1 - \frac{S_{AL}}{S_{TOT}} (1 - \eta_{AL}) = 0{,}995$$

Esercizio I.3

Dati:

$\rho_e = 0{,}196\ \mu\Omega m$

$L = 5\ mm$

$d = 0{,}1\ mm$

$T_e = 20\ °C$

$1{,}2\ m/s \leq W \leq 10\ m/s$

$T_s = 280\ °C$

$Nu = C R_e^n P_r^{0{,}33}$

Anemometro a filo ~~[illegible]~~ di platino → misura la velocità di un flusso d'aria.

Nei problemi di convezione, le proprietà del fluido vengono prese ad una temperatura media tra le 2 estreme. Quindi:

$$T_f = \frac{T_e + T_s}{2} = 150\ °C$$

A 150°C la conducibilità termica dell'aria è:

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 139 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 141 di 276

$$Nu = 0{,}903\, Re^{0{,}385} \cdot Pr^{0{,}33}$$

La densità di potenza generata per effetto Joule è:

$$H = \rho_e \left(\frac{I}{\frac{\pi d^2}{4}} \right)^2$$

Il problema è stazionario cioè la potenza generata deve essere uguale alla potenza dispersa. La potenza generata vale:

$$HV = \phi$$

In presenza di transitorio si ha accumulo. Quindi in questo caso:

$$\frac{HV}{S} = \frac{\phi}{S} = q = \alpha (T_s - T_e)$$

Devo calcolare α:

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} \Rightarrow \alpha = \frac{Nu\, \lambda}{d} \begin{cases} 489 \ \frac{W}{m^2 K} \\ 1102 \ \frac{W}{m^2 K} \end{cases}$$

I due valori a seconda di Re sostituito nella formula di Nu.

Quindi possiamo ricavare:

$$\rho_e \left(\frac{I}{\frac{\pi d^2}{4}} \right)^2 \frac{d}{4} = \alpha (T_s - T_e)$$

quindi:

$$\frac{HV}{S} = \alpha (T_s - T_e)$$

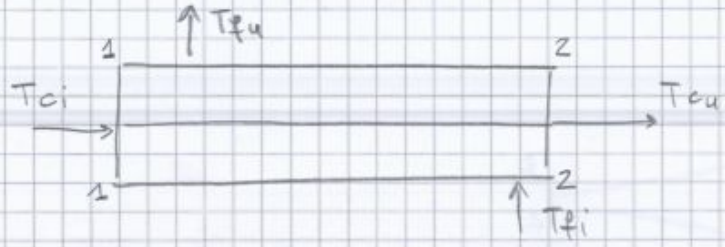
da cui ricavo I:

$$I = \begin{cases} 1{,}274 \ A \\ 1{,}916 \ A \end{cases} \qquad I = 1{,}23\, W^{0{,}1925}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 141 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 143 di 276

$$T_{fu} = T_{fi} + \frac{|\phi_c|}{G_f c_f} = 66,2\ °C$$



Il mantello è controcorrente

Per la zona 1:

$$\Delta 1 = T_{ci} - T_{fu} = 63,8\ °C$$

$$\Delta 2 = T_{cu} - T_{fi} = 30\ °C$$

Nello scambiatore la differenza di temperatura varia localmente. Quindi devo fare un'approssimazione, devo quindi fare una media. Si usa una differenza di temperatura media logaritmica.

$$\overline{T} = \frac{\Delta H}{\Delta S} = \frac{c_p (T_u - T_i)}{c_p \ln\left(\frac{T_u}{T_i}\right)} \xrightarrow{\text{possono essere tolti}} = \frac{T_u - T_i}{\ln\left(\frac{T_u}{T_i}\right)}$$

Quindi:

$$\Delta T_{mett} = \frac{\Delta 2 - \Delta 1}{\ln \frac{\Delta 2}{\Delta 1}} = \frac{\Delta 1 - \Delta 2}{\ln \frac{\Delta 1}{\Delta 2}} = 44,8\ °C$$

Quindi:

$$\phi = k_e A_e \Delta T_{mett} \qquad \text{Quindi:}$$

$$A_e = \frac{\phi}{k_e \Delta T_{mett}} = 2,532\ m^2$$

L'area di scambio è data da:

$$A_e = \pi D_e L \Rightarrow \quad L = \frac{A_e}{\pi D_e} = 26,9\ m$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 143 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 145 di 276

in questo caso le 2 configurazioni sono equivalenti.
Quindi:

$$\phi' = k_e A_e \Delta T'_{m_{eff}} = 30,2 \text{ kW}$$

$$T_{cu}' = T_{ci} - \frac{\phi'}{G_c C_c} = T_{ci} - \frac{\phi_1}{C_c} = 70,3°C$$

$$T_{fu} = T_{fi} + \frac{\phi'}{C_f} = 60,9°C$$

Esercizio J.2

Dati:
C'è un condensatore, cioè c'è un fluido in cambiamento di stato. Quindi montaggio controcorrente o equicorrente è uguale.
Continua a valere però:

$$k_i A_i = k_e A_e$$

Dove: $$k_e = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \underbrace{\cancel{R_{cond}}}_{=0} + \frac{1}{\alpha_e}}$$

perché riferito a $\frac{s}{\lambda}$ e in genere s è piccolo e λ è grande.

Allora:

$$k_e = \frac{1}{\frac{A_e}{A_i}\frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{\alpha_e}} = 871,7 \ \frac{W}{m^2 K}$$

Applico il metodo ε-NTU.
Avrò che:

$$NTU = \frac{k_e A_e}{C_{min}}$$

La capacità del fluido caldo è sicuramente maggiore.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 145 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 147 di 276

$$\varepsilon = \frac{\phi}{\phi_{MAX}} = \frac{C_{min}\,|T_u - T_i|_{MAX}}{C_{min}\,(T_{ci} - T_{fi})}$$

Quindi:

$$\varepsilon = \frac{T_{fu} - T_{fi}}{T_{ci} - T_{fi}} = \frac{T_{fu} - T_{fi}}{T_{cond} - T_{fi}}$$

Da cui:

$$T_{cond} = T_{fi} + \frac{T_{fu} + T_{fi}}{\varepsilon} = 76,6\,°C$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 147 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 149 di 276

$$F_{I-S} + F_{I-L} + \cancel{F_{I-I}}^{=0} = 1$$

Quindi:

$$F_{I-L} = 0,8$$

attraverso le relazioni di reciprocità:

$$S_S F_{S-I} = S_I F_{I-S} \quad \text{da cui:}$$

$$F_{S-I} = \frac{S_I}{S_S} F_{I-S}$$

Inoltre:

$$S_S F_{S-L} = S_I F_{I-L}$$

Essendo una superficie adiabatica, il fattore di forma tra (S) ed (L) è uguale a quello tra (I) ed (I).
Quindi

$$F_{S-L} = F_{I-L} = 0,8$$

Posso anche scrivere che:

$$F_{S-I} + F_{S-L} = 1 \quad \text{da cui ricavo comunque}$$

$$F_{S-L} = 0,8$$

Ora calcolo i flussi termici:

$$\begin{cases} \phi_I = \phi_{I-S} + \phi_{I-L} \\ \phi_S + \phi_{I-S} = \phi_{S-L} \rightarrow \left(\text{analoga} \rightarrow \phi_S = \phi_{S-I} + \phi_{S-L}\right) \\ \phi_L + \phi_{S-L} + \phi_{I-L} = 0 \end{cases}$$

Inoltre ricordo: $\phi_I + \phi_S + \phi_L = 0$

- Ricavo innanzitutto ϕ_{I-S}

$$\phi_{I-S} = \frac{E_I - E_S}{\frac{1}{S_I F_{I-S}}} = S_I F_{I-S} \sigma \left(T_I^4 - T_S^4\right)$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 149 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 151 di 276

Esercizio k.2

Dati:

$T_G = 600\,°C$

$T_C = 27\,°C$

$S_G = 0{,}5\ m^2$

$S_C = 5\ m^2$

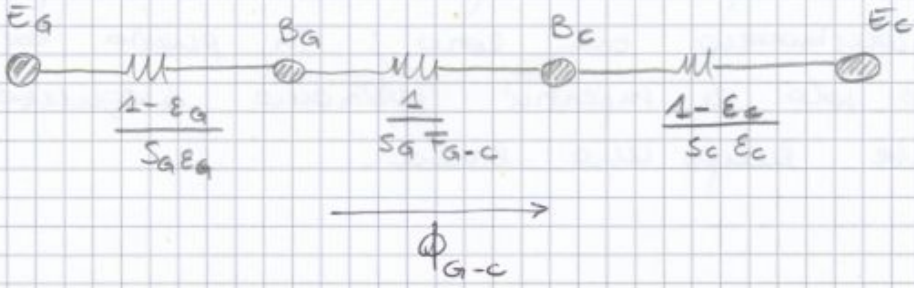
$\varepsilon_G = 35\,\%$

$\varepsilon_C = 45\,\%$

Il corpo G non vede se stesso per ipotesi (cioè $F_{G-G} = 0$)

? Φ_{G-C}

Anche qui costruisco la rete elettrica equivalente:



Dove B_G e B_C sono le radiosità dei 2 corpi.
Inoltre avrò che:

$E_G = \sigma T_G^4$

$E_C = \sigma T_C^4$

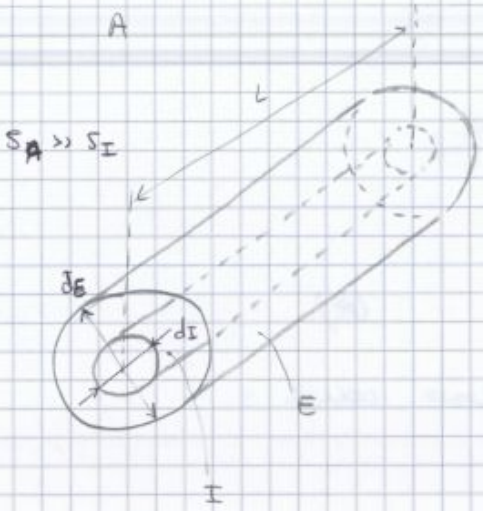
Mentre le radiosità saranno:

$B_G = \varepsilon_G E_G + r_G G$ $\qquad$ $B_C = \varepsilon_C E_C + r_C C$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 151 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 153 di 276

Esercizio K.3



Dati:

$L = 0,5\ m$

$d_I = 0,08\ m$

$d_E = 0,2\ m$

$T_A = 27\ °C$

$T_I = 600\ °C$

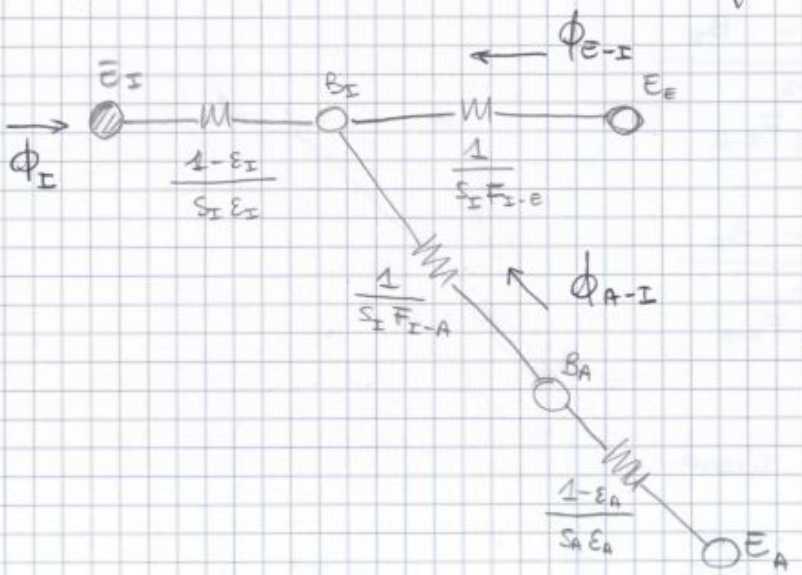
$T_E = 300\ °C$

$\varepsilon_E = 1$

$\varepsilon_I = 0,1$

? φ_I

Ricavo la rete elettrica equivalente:



Essendo l'ambiente A molto grande

$\frac{1-\varepsilon_A}{S_A \varepsilon_A} \cong 0$ quindi:

$B_A \equiv E_A$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 153 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 155 di 276

Per il cilindro:

$F_{E-E} = 0,502$

$F_{E-I} = 0,367$

Da relazione di reciprocità ricavo:

$$F_{E-I} S_E = F_{I-E} S_I \Rightarrow F_{I-E} = \frac{S_E}{S_I} F_{E-I}$$

Da cui:

$$F_{I-E} = \frac{d_E}{d_i} F_{E-I} \Rightarrow F_{I-E} = -0,3175$$

Inoltre:

$F_{E-E} + F_{E-I} + F_{E-A} = 1$

Allora:

$F_{E-A} = 0,131$

Analogamente:

$\cancel{F_{I-I}}^{=0} + F_{I-A} + F_{I-E} = 1$

Allora: $F_{I-A} = 0,0823$

Ora può ricavare B_I:

$B_I = 8382,2 \frac{W}{m^2}$

Da cui ricavo:

$$q_I = \frac{\Phi_I}{S} = \frac{\varepsilon_I \sigma T_I^4 - B_I}{\frac{1-\varepsilon_I}{\varepsilon_I}} = 2730,5 \frac{W}{m^2}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 155 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 157 di 276

$h_{2e} = h_1 = 191,83 \ kJ/kg$

$h_{2f} = 2584,8 \ kJ/kg$

$s_{2e} = s_1 = 0,6493 \ kJ/kg\,K \qquad s_{2f} = 8,1511 \ kJ/kg\,K$

Calcolo il titolo $x_4 id$:

$$x_4 id = \frac{s_4 id - s_1}{s_{2f} - s_{2e}} = \frac{6,62 - 0,6493}{8,1511 - 0,6493} = 0,796 \left(kg_V/kg_{TOT} \right)$$

Da cui ricavo $h_4 id$:

$$h_4 id = (1 - x_4 id)\, h_{2e} + x_4 id\, h_{2f} = 0,204 \cdot 191,83 +$$

$$+ 0,796 \cdot 2584,8 = 2096,63 \ kJ/kg$$

Da cui ricavo:

$$\eta_{is,E} = \frac{|l_{t,e}|}{|l_{t,e}{}^{id}|} = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_4 id}$$

Quindi:

$$|l_{t,e}| = \eta_{is,E} (h_3 - h_4 id) = 0,85 (3190 - 2096,63) =$$

$$= 929,36 \ kJ/kg$$

La portata in massa di vapore sarà:

$$G_V = \frac{W_{t,e}}{|l_{t,e}|} = \frac{50 \cdot 10^3 \ kW}{929,36 \ kJ/kg} = 53,8 \ kg$$

Posso calcolare h_4:

$$|l_{t,e}| = h_3 - h_4 \Rightarrow h_4 = h_3 - |l_{t,e}| = 3190 - 929,36 =$$

$$= 2260,64 \ kJ/kg$$

Da cui ricavo il titolo x_4:

$$x_4 = \frac{h_4 - h_{2e}}{h_{2f} - h_{2e}} = \frac{2260,64 - 191,83}{2584,8 - 191,83} = 0,864$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 157 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 159 di 276

Esercizio 2)

Dati:

$V = 50\ l = 0{,}05\ m^3$

$O_2 = 32\ kg/kmol \qquad (\gamma = 1{,}4)$

$p_0 = 1500\ psi = 103{,}35\ bar$

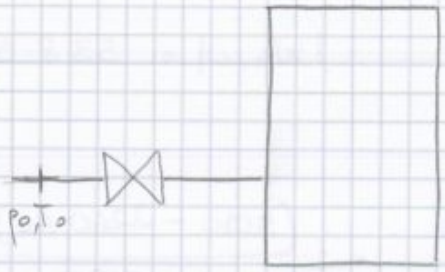
$T_0 = 25\ °C = 298\ K$

$p_f = p_0$

Sistema rigido, fluido pur ideale

$Q = 0$

? M_2, T_f, $Sirr = 0$



Scrivo il I principio per sistemi aperti:

$$\cancel{\Phi}^{=0}_{\text{adiabatico}} - \cancel{W_t}^{=0}_{\text{rigido}} = \frac{d}{dt}\left(U + \cancel{E_c}^{=0} + \cancel{E_p}^{=0} + \cancel{p_0 V}^{=0}\right)_{VC} + \sum_{j=1}^{N} \pm G_j \left(u + \cancel{e_c}^{=0} + \cancel{e_p}^{=0} + pv\right)_j$$

(E_c, E_p: trascurabili; $V = cost$)

Quindi:

$$0 = \frac{dU}{dt} - G_e h_e$$

Integrando e sfruttando la conservazione della massa:

$$0 = M_2 u_2 - \cancel{M_1}^{=0} u_1 - \left(M_2 - \cancel{M_1}^{=0}\right) h_e$$

perché la bombola è inizialmente vuota

$$0 = M_2 u_2 - M_2 h_e \quad \Rightarrow \quad u_2 = h_e$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 159 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 161 di 276

Da cui:

$$s_2 - s_e = c_p \ln\left(\frac{T_2}{T_e}\right) - R \ln\left(\frac{p_2}{p_e}\right)$$

$= 0 \rightarrow$ escludo $p_2 = p_e$

Quindi:

$$s_2 - s_e = \frac{\gamma R}{\gamma - 1} \ln\left(\frac{T_f}{T_0}\right) = \frac{1,4 \cdot 253,8}{1,4 - 1} \ln\left(\frac{417,2}{298}\right) =$$

$$= 305,35 \ J/kg\,K$$

Quindi:

$$M_2 (s_2 - s_e) = S_{irr} \Rightarrow S_{irr} = 305,35 \cdot 4,76 =$$

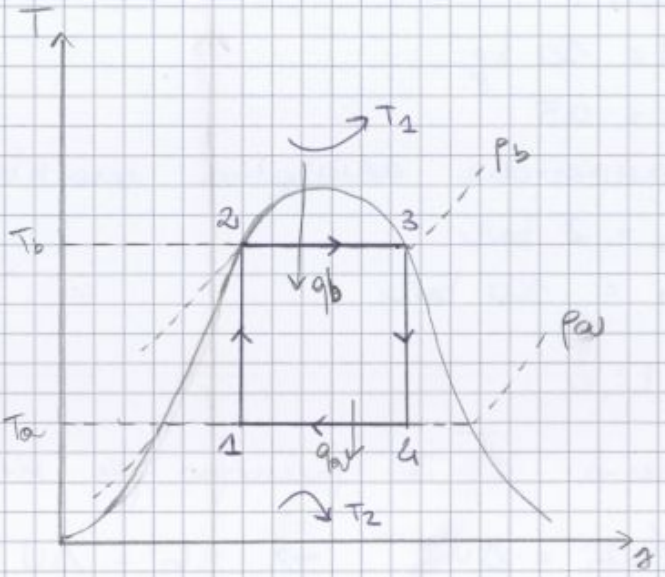
$$= 1456,3 \ J/K$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 161 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 163 di 276

1 LUGLIO 2008

Esercizio 1



Dati:

$T_a = 65{,}6\ °C$

$T_b = 388{,}2\ °C$

$W_{t,e} = 1\ kW$

? ϕ_b

$\alpha = 50\ W/m^2K$

$S = 1\ m^2$

? $\frac{dS}{dt}$

Calcolo il rendimento:

$$\eta = 1 - \frac{T_a}{T_b} = 0{,}519$$

Inoltre il rendimento sarà pari a:

$$\eta = \frac{L_n}{Q_+} = \frac{W_n}{\phi_+} = \frac{W_{t,e}}{\phi_b} \Rightarrow \phi_b = \frac{W_{t,e}}{\eta}$$

Quindi $\phi_b = 1{,}927\ kW$

Inoltre:

$$\eta = 1 - \frac{\phi_{av}}{\phi_b} \Rightarrow \phi_a = 926{,}8\ W$$

Quindi per convezione:

$\phi_b = S\alpha(T_1 - T_b) \Rightarrow T_1 = 699{,}46\ K$

$\phi_{av} = S\alpha(T_a - T_2) \Rightarrow T_2 = 239{,}3\ K$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 163 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 165 di 276

Ricavo con il titolo che:

$v_1 = (1-x)\, v_{1L} + x\, v_{1g} = 0,6632 \ m^3/kg$

$h_1 = (1-x)\, h_{1L} + x\, h_{1g} = 1605,5 \ kJ/kg$

Quindi:

$u_1 = h_1 - p_1 v_1 = 1516,86 \ kJ/kg$

Estendo una compressione adiabatica:

$s_1 = s_2$

Dove:

$s_1 = (1-x)\, s_{1L} + x\, s_{1g} = 6,33 \ kJ/kgK$

Quindi:

$$x_2 = \frac{s_2 - s_{2L}}{s_{2g} - s_{2L}} = 0,63$$

Quindi:

$h_2 = (1-x_2)\, h_{2L} + x_2\, h_{2g} = 1975,4 \ kJ/kg$

$v_2 = (1-x_2)\, v_{2L} + x_2\, v_{2g} = 0,0085 \ m^3/kg$

$u_2 = h_2 - p_2 v_2 = 1890,6 \ kJ/kg$

Quindi:

$-L_i = \Delta V = M(u_2 - u_1) = 3735,6 \ kJ$

Quindi: $L_i = -3735,6 \ kJ$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 165 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 167 di 276

Da tabelle di saturazione dell'R134a ricavo a $p_c = 10$ bar:

$$\frac{p - p_0}{p_1 - p_0} = \frac{T - T_0}{T_1 - T_0} \Rightarrow \text{INTERPOLAZIONE!!}$$

$$\frac{10 - 8{,}88}{10{,}18 - 8{,}88} = \frac{T - 35}{40 - 35} \Rightarrow \frac{1{,}12}{1{,}3} = \frac{T - 35}{5}$$

$T = 39{,}3\ °C$

Allo stesso modo ricavo in corrispondenza della fase liquida i valori h_3 ed s_3

Inoltre essendo la turbina ideale:

$s_3 = s_4$

Quindi in corrispondenza di T_E ricavo da tabella:

$s_{4l} = 0{,}8750\ kJ/kg\,K$ $\qquad$ $s_{4v} = 1{,}7470\ kJ/kg\,K$

Da cui:

$$x_4 = \frac{s_4 - s_{4l}}{s_{4v} - s_{4v}}$$

Da cui ricavo infine:

$$h_4 = (1 - x_4)\,h_{4l} + x_4\,h_{4v}$$

dove $h_{4l} = 167{,}3\ kJ/kg$ e $h_{4v} = 383{,}7\ kJ/kg$

Quindi:

$q_E = h_1 - h_4$

$q_c = h_3 - h_2$ $\Rightarrow |l_n| = |q_c| - q_E$ quindi:

$$\varepsilon_f = \frac{q_E}{|l_n|}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 167 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 169 di 276

$$-L_i = \frac{p_0 V_f}{T_f} \frac{(T_f - T_0)}{\gamma - 1}$$

Dove $V_f = S_p \Delta x$ essendo il recipiente inizialmente vuoto.

$$-L_i(\gamma - 1) = p_f V_f - p_f V_f \left(\frac{T_0}{T_f}\right)$$

$$-L_i(\gamma - 1) - p_f V_f = - p_f V_f \left(\frac{T_0}{T_f}\right)$$

$$\frac{L_i(\gamma - 1) + p_f V_f}{p_f V_f} = \frac{T_0}{T_f}$$

$$\frac{p_f V_f}{L_i(\gamma - 1) + p_f V_f} = \frac{T_f}{T_0} \Rightarrow T_f = \frac{T_0 p_f V_f}{L_i(\gamma - 1) + p_f V_f}$$

Dove $\gamma = 1,4$ essendo biatomico.

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 169 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 171 di 276

4 FEBBRAIO 2009

Esercizio 1

Dati:

$M = 1\ kg$

trasf 1-2 → compressione adiabatica

trasf 2-3 → fornitura calore lungo isobara

trasf 3-4 → espansione adiabatica

trasf 4-1 → cessione calore lungo isocora

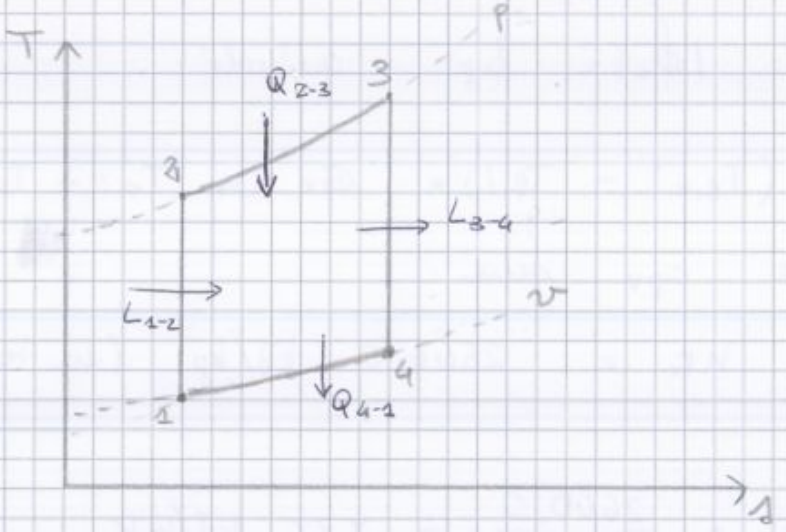
$T_1 = 20\ °C$

$T_2 = 200\ °C$

$T_3 = 300\ °C$

$T_4 = 120\ °C$

? L, Q lungo le trasformazioni:



- Trasformazione 1-2

Scrivo I principio per questi dati:

$Q - L_i = \Delta U \quad \Rightarrow \quad -L_i = \Delta U$

($Q = 0$ adiabatica)

$L_i = -M c_v (T_2 - T_1)$ dove $c_v = \frac{R}{\gamma - 1}$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 171 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 173 di 276

Esercizio 2

Dati:

$p_i = 80$ bar

$m_{i,e} = 0{,}5$ kg

$V_i = 1\ dm^3 = 0{,}001\ m^3$

$p_f = 1$ bar

processo isentalpico

? $m_{f,e}$, L, $S_{irr} = 0$

la miscela liquido-vapore alle condizioni iniziali sarà caratterizzata dai valori nelle tabelle di saturazione alla pressione $p_i = 80$ bar:

$T_i = 296{,}97$ °C

$v_{i,e} = 0{,}0013862\ m^3/kg$

$v_{i,g} = 0{,}02353\ m^3/kg$

$h_{i,e} = 1317{,}1\ kJ/kg$

$h_{i,g} = 2759{,}9\ kJ/kg$

$s_{i,e} = 3{,}2076\ kJ/kg\,K$

$s_{i,g} = 5{,}7671\ kJ/kg\,K$

Calcolo il volume di liquido iniziale:

$V_{i,e} = v_{i,e} \cdot m_{i,e} = 0{,}0007\ m^3$

Calcolo il volume iniziale del vapore:

$V_{i,g} = V_i - V_{i,e} = 0{,}0003\ m^3$

Con cui calcolo $m_{i,v}$:

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 173 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 175 di 276

Per il calcolo del lavoro scelto il I principio per sistemi chiusi:

$$\cancel{Q}^{=0} - L_i = \Delta U \quad \Rightarrow \quad -L_i = \Delta U$$

$$-L_i = U_f - U_i = m_{TOT}(u_f - u_i)$$

dove:

$$u_f = h_f - p_f v_f$$

con $v_f = (1 - x_f) v_{f,l} + x_f v_{f,g}$

e

$$u_i = h_i - p_i v_i$$

con $v_i = (1 - x_i) v_{i,l} + x_i v_{i,g}$

e ricordando che $h_f = h_i$

Calcolo l'entropia:

$$\frac{dS}{dt} = \cancel{\frac{\dot{Q}}{T}}^{=0} + \dot{S}_{irr}$$

Quindi: $\Delta S = S_{irr} \Rightarrow m_{TOT}(s_2 - s_1) = S_{irr}$

Facendo i conti verifico il valore di S_{irr}

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 175 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 177 di 276

avrò:

$$-W_t = G(h_2 - h_1) \qquad (I)$$

Stato 2)

$x_2 = 0,7$

Scrivo il I principio per sistemi aperti per il riscaldamento isobaro:

$$\Phi - \underbrace{W_t}_{=0 \text{ (isobaro)}} = \underbrace{\frac{d}{dt}}_{=0 \text{ (stazionario)}} (U + E_c + E_p + p_0 V)_{VC} + \sum_{j=1}^{N} \pm G_j (u + \cancel{\phi_c} + \cancel{\phi_p} + pv)_j$$

$=0 \Rightarrow$

Quindi:

$$\Phi = G(h_3 - h_2) \qquad (II)$$

la trasformazione è isoentalpica. Quindi da (I):

$h_2 = h_1 = 2107,4$ kJ/kg

quindi da (II) ricavo:

$$\Phi = G(h_3 - h_1) \Rightarrow \frac{\Phi}{G} + h_1 = h_3$$

$$h_3 = \frac{1271,8}{2} + 2107,4 = 2743,3 \text{ kJ/kg}$$

Stato 3

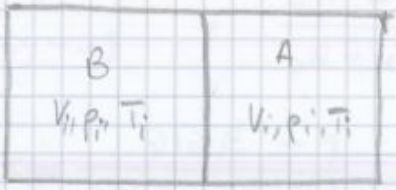
Siamo in condizioni di vapore saturo secco a h_3. Cerco il valore su tabella di saturazione.

Attenzione per interpolazione:

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 177 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 179 di 276

Esercizio 2



Dati:

$V = 200\ l$

$\gamma_B = 1,4$

$\gamma_A = 1,4$

$\overline{M}_B = \frac{1}{2} \overline{M}_A$

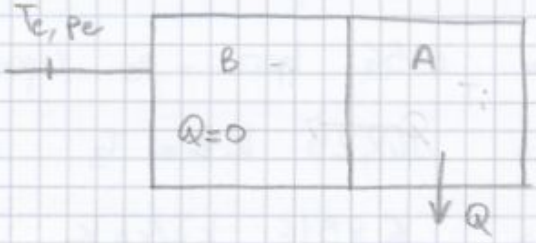
$T_i = 300\ K$

$p_i = 1\ bar$

$T_e = 274\ K$

$M_{fB} = 4\, M_{iB}$

$Q = 10\ kJ$



? p_{fB}, T_{fB}, $S_{in} \neq 0$ (se $p_e = p_{fB}$)

Ricavo inizialmente:

$R_A = 287\ J/kg\,K \rightarrow \overline{M}_A = \frac{\overline{R}}{R_A} = 28,97\ kg/kmol$

Quindi:

$\overline{M}_B = 14,68\ kg/kmol$

Quindi $R_B = \frac{\overline{R}}{M_B} = 574,2\ J/kg\,K$

Inizialmente i 2 gas occupano il medesimo volume quindi:

$V_{iA} = V_{iB} = 100\ l = 0,1\ m^3$

Quindi applicando l'equazione di stato:

$p_i V_i = M_i R T_i$ avrò:

Per A: $M_{A,i} = \frac{p_{iA} V_{iA}}{R_A T_{iA}} = \frac{10'000}{86'100} = 0,116\ kg$

Per B: $M_{B,i} = \frac{p_{iB} V_{iB}}{R_B T_{iB}} = \frac{10'000}{172'260} = 0,058\ kg$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 179 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 181 di 276

Quindi:

$$T_{fB} = \frac{p_{fB} V_{fB}}{M_{Bf} R_B} = \frac{2{,}72 \cdot 10^5 \cdot 0{,}164}{0{,}232 \cdot 574{,}2} = \frac{44608}{133{,}21} =$$

$$= 334{,}87 \ K$$

Per la canna B:

$$\frac{dS}{dt} = \cancel{\frac{\Phi}{T}}^{=0 \text{ (adiabatico)}} + \sum_{j=1}^{N} G_j s_j + \dot{S}_{irr}$$

Integrando e con la conservazione della massa:

$$M_{fB} s_{fB} - M_{iB} s_{iB} - (M_{fB} - M_{iB}) s_e = S_{irr}$$

$$M_{fB} s_{fB} - M_{iB} s_{iB} - M_{fB} s_e + M_{iB} s_e = S_{irr}$$

$$M_{fB}(s_{fB} - s_e) + M_{iB}(s_e - s_{iB}) = S_{irr}$$

dove:

$$s_{fB} - s_e = c_p \ln\left(\frac{T_{fB}}{T_e}\right) - R \ln\cancel{\left(\frac{p_{fB}}{p_e}\right)}^{=0}$$

$$s_e - s_{iB} = c_p \ln\left(\frac{T_e}{T_{iB}}\right) - R \ln\left(\frac{p_e}{p_{iB}}\right)$$

Da cui risulta che $S_{irr} \neq 0$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 181 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 183 di 276

Ricavo quindi che:

$$\vartheta(2t_0) = \vartheta_\infty\left(1 - e^{-t/t_0}\right) + \vartheta_0 e^{-t/t_0} = 0$$

espresso alla fine del riscaldamento la lastra alla stessa temperatura dell'aria

Inoltre avrò esplicitato ϑ_∞

$$\frac{\Phi_G}{\alpha_e S}\left(1 - e^{-2}\right) + \vartheta_0 e^{-2} = 0$$

$$\frac{\Phi_G}{\alpha_e S}\left(1 - e^{-2}\right) = -\vartheta_0 e^{-2}$$

$$\frac{\Phi_G}{\alpha_e S} = \frac{-\vartheta_0 e^{-2}}{1 - e^{-2}} \Rightarrow \frac{1}{\alpha_e} = \frac{(-\vartheta_0 e^{-2})\cdot S}{(1 - e^{-2})\Phi_G}$$

$$\alpha_e = \frac{(1 - e^{-2})\Phi_G}{(-\vartheta_0 e^{-2})\cdot S} = \frac{(1 - 0{,}135)\cdot 10}{170 \cdot 0{,}135 \cdot 0{,}02} = \frac{8{,}65}{0{,}459} =$$

$$= 18{,}84 \quad W/m^2K$$

Quindi avrò:

$$Bi = \frac{\alpha_e L}{\lambda}$$

Dove: $L = \frac{V}{S}$

Il parallelepipedo

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{0{,}01}{8000} = 1{,}25 \cdot 10^{-6} \ m^3$$

Quindi $S = 2\ell^2 = 0{,}02 \ m^2$

Quindi $L = \frac{1{,}25 \cdot 10^{-6}}{0{,}02} = 0{,}625 \cdot 10^{-4} \ m$

Inoltre:

$$\lambda = a \rho c_p = 10 \cdot 10^{-6} \cdot 8 \cdot 10^3 \cdot 0{,}5 \cdot 10^3 =$$

$$= 40 \cdot \ W/mK$$

Quindi $Bi = \frac{18{,}84 \cdot 0{,}625 \cdot 10^{-4}}{40} = 2{,}96 \cdot 10^{-5} << 0{,}1$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 183 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 185 di 276

$h_3 = 256,5 \quad kJ/kg$

$s_3 = 1,1312 \quad kJ/kgK$

Inoltre avro' che $h_3 = h_4$

Avendo la pressione e l'entropia ricavo ora l'entalpia del punto 2^{id}:

$h_{2id} = 431 \quad kJ/kg$

Studio:

$$\varepsilon_f = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \Rightarrow h_2 - h_1 = |l_{t,c}| = \frac{h_1 - h_4}{\varepsilon_f}$$

Quindi:

$$|l_{t,c}| = \frac{386,8 - 256,5}{2,5} = 52,12 \quad kJ/kg$$

Inoltre:

$$|l_{t,c\,id}| = h_{2id} - h_1 = 431 - 386,8 = 44,2 \quad kJ/kg$$

Quindi:

$$\eta_{is,c} = \frac{|l_{t,c\,id}|}{|l_{t,c}|} = \frac{44,2}{52,12} = 0,848$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 185 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 187 di 276

Ricavo le masse:

$$p_i V = M_1 R T \Rightarrow M_1 = \frac{p_i V}{RT}$$

Dove $R = \frac{\bar{R}}{\bar{M}} = \frac{8314,3}{32} = 259,8 \ J/kg\,K$

Quindi:

$$M_1 = \frac{50 \cdot 10^5 \cdot 0,1}{259,8 \cdot 298} = 6,45 \ kg$$

Ugualmente:

$$M_2 = \frac{p_f V}{RT} = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 0,1}{259,8 \cdot 298} = 0,26 \ kg$$

Quindi la massa espulsa M sarà:

$$M = M_1 - M_2 = 6,2 \ kg$$

Quindi ricavo Q:

$$Q = M_2 u_2 - M_1 u_1 + M c_p T$$

Siccome la temperatura non varia:

$$u_2 = u_1 = c_v T = \frac{R}{\gamma - 1} T$$

Quindi:

$$Q = M c_p T - (M_1 - M_2) u \Rightarrow Q = M (c_p T - u) = 479,15 \ kJ$$

Calcolo l'entropia tramite il II principio:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\Phi}{T} - G_u s_u + \dot{S}_{irr}$$

Integrando a tempo:

$$M_2 s_2 - M_1 s_1 = \frac{Q}{T} - (M_1 - M_2) s_u + S_{irr}$$

$$M_1 (s_u - s_1) + M_2 \underbrace{(s_2 - s_u)}_{=0} - \frac{Q}{T} = S_{irr}$$

Siccome $s_2 = s_u$ allora:

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 187 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 189 di 276

Esercizio 3

Dati:

$T_i = 77\ K$

$V_e = 2\ m^3$

$\lambda_i = 0{,}026\ W/mK$

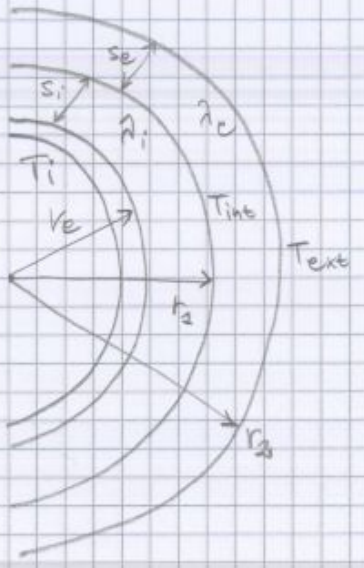
$S_i = 40\ mm$

$\lambda_e = 0{,}1\ W/mK$

$S_e = 25\ mm$

$T_{int} = 215\ K$

? T_{ext}



Ricavo il raggio:

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 \Rightarrow r = \sqrt[3]{\frac{3}{4\pi}V} = 0{,}78\ m$$

$$r_1 = r + S_i = 0{,}78 + 0{,}04 = 0{,}82\ m$$

$$r_2 = r_1 + S_e = 0{,}82 + 0{,}025 = 0{,}845\ m$$

Calcolo il flusso come se non ci fosse il secondo solante:

$$\phi = \frac{4\pi\,(T_{int} - T_i)}{\frac{1}{\lambda_i}\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r}\right)} = \frac{4\pi\,(215 - 77)}{\frac{1}{0{,}026}\left(\frac{1}{0{,}82} - \frac{1}{0{,}78}\right)} =$$

$$= \frac{12{,}56\,(138)}{38{,}46\,(1{,}22 - 1{,}28)} = -751{,}3\ J$$

Siccome il flusso non cambia allora:

$$\phi = \frac{4\pi\,(T_{ext} - T_{int})}{\frac{1}{\lambda_e}\left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1}\right)} \Rightarrow \frac{\phi\left[\frac{1}{\lambda_e}\left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1}\right)\right]}{4\pi} + T_{int} = T_{ex}$$

Quindi:

$$T_{ext} = \frac{-751{,}3\left[\frac{1}{0{,}1}\left(\frac{1}{0{,}845} - \frac{1}{0{,}82}\right)\right]}{4\pi} + 215 = 237{,}13\ K$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 189 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 191 di 276

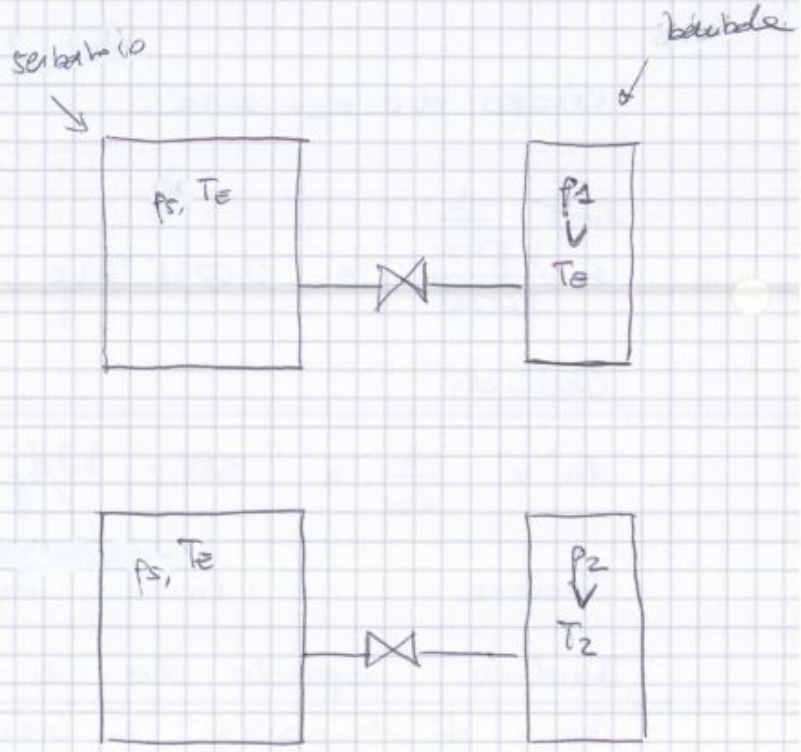
Ricavo h_4:

$$h_4 = (1-x_4)\,h_{4L} + x_4\,h_{4V}$$

da cui ricavo:

$$-l_{t,e} = h_4 - h_3$$

Esercizio 2



Dati:

$\gamma = 1,67$

T costante, p costante

$T_i = T_e$

$Q = 0$

? $\frac{M_2}{M_1}$ e $\frac{p_2}{p_1} = ?$

Essendo il processo adiabatico, scrivo il I principio per sistemi aperti per la bombola:

$$\cancel{\Phi}^{=0} - \cancel{W/t}^{=0} = \frac{d}{dt}\left(U + \cancel{E_c}^{=0} + \cancel{E_p}^{=0} + \cancel{p_0 V}^{=0}\right)_{VC} + \sum_{j=1}^{N} G_j \left(u + \cancel{e_c}^{=0} + \cancel{e_p}^{=0} + pv\right)$$

$$0 = \frac{dU}{dt} - G\,h_e$$

Integrando e con teorema di conservazione della massa:

$$0 = M_2 u_2 - M_1 u_1 - (M_2 - M_1)\,h_e$$

$$0 = M_2 u_2 - M_1 u_1 - M_2 h_e + M_1 h_e$$

$$0 = M_2 (u_2 - h_e) + M_1 (h_e - u_1)$$

$$M_2 (-u_2 + h_e) = M_1 (h_e - u_1) \Rightarrow \frac{M_2}{M_1} = \frac{h_e - u_1}{h_e - u_2}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 191 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 193 di 276

Esercizio 3

Dati:

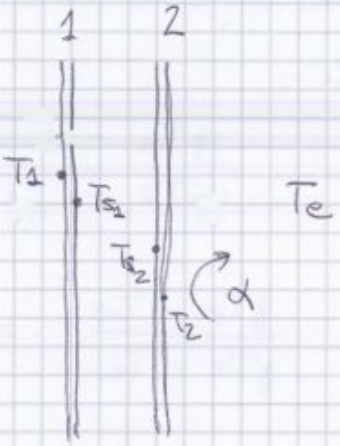
$C = 10\ W/m^2K$; $T_1 = 400\ °C$

I tipo su 1 $\quad T_e = 20\ °C$

III tipo su 2 $\quad \alpha = 10\ W/m^2K$

? riflettività r

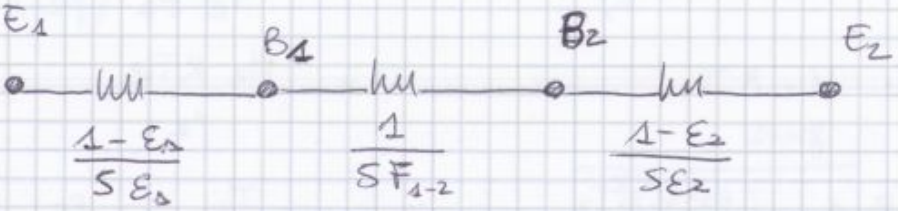
$q = 200\ W/m^2$



Avrò che:

$r = 1 - \varepsilon$

Sono 2 corpi grigi:



$$\phi_{1-2} = \frac{\sigma\left(T_{s_1}^4 - T_{s_2}^4\right)}{\frac{1-\varepsilon}{S\ \varepsilon} + \frac{1}{S\,F_{1-2}} + \frac{1-\varepsilon}{S\varepsilon}}$$

Quindi:

$$q = \frac{\phi_{1-2}}{S} = \frac{\sigma\left(T_{s_1}^4 - T_{s_2}^4\right)}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \underbrace{\cancel{\frac{1}{F_{1-2}}}}_{=1} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2}}$$

$$F_{1-2} + \underbrace{\cancel{F_{1-1}}}_{=0} = 1 \quad \leftarrow$$ (perché intercapedine sottile!)

Per calcolare le riflessività, tratto 1 parete come corpo grigio, l'altra come corpo nero

Quindi essendo S_2 corpo nero

$$\frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2} = 0 \quad \rightarrow \quad \varepsilon_2 = 1$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 193 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 195 di 276

4 LUGLIO 2010

Esercizio 1

Dati:

$p_0 = 1$ bar

$T_0 = 25$ °C

$m_p = 500$ kg

$S_p = 0{,}1$ m²

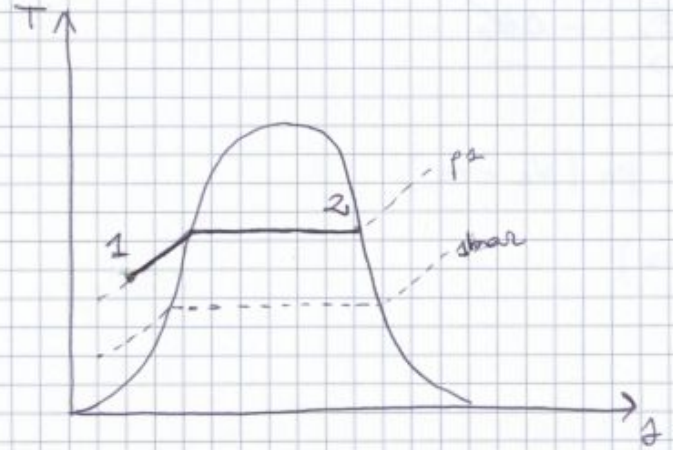
Stato 1 → $T_{H_2O} = T_0$

$z_1 = 4$ mm

Stato 2 → H_2O → Vapore saturo secco

$z_2 = 724$ mm

? Q, $\Sigma_{in} = 0$



Stato 1:

$$p_1 = p_0 + \frac{m_p g}{S_p}$$

Passo attraverso l'ipotesi della liquido incomprimibile e con le tabelle di saturazione a 25°C ricavo h_1:

$$h_1 = h_{1L} + v_{1L}(p_1 - p_{1L})$$

$s_1 \cong s_{1L}$ $\quad u_1 \cong u_{1L}$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 195 di 276

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 197 di 276

Esercizio 21 (ciclo otto)

Dati:

$M = 1\ kg$

$q_b = 380\ kJ/kg$

$q_a = -147\ kJ/kg$

$T_1 = 15\ °C$

$p_2 = 1\ bar$

? $T_3, p_3, l_{i,e}, l_{e,c}$

$$\eta = 1 - \frac{|q_a|}{q_b}$$

Inoltre:

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} \Rightarrow \eta - 1 = -\frac{T_1}{T_2} \Rightarrow 1 - \eta = \frac{T_1}{T_2}$$

$$T_2 = \frac{T_1}{1-\eta}$$

Ricavo T_4:

$$q_a = c_v (T_1 - T_4) = \frac{R}{\gamma - 1} (T_2 - T_4)$$

$$\frac{q_a(\gamma-1)}{R} = T_1 - T_4 \Rightarrow T_4 = T_1 - \frac{q_a(\gamma-1)}{R}$$

Quindi: $T_3 = \frac{T_2 T_4}{T_1}$

Inoltre:

$- l_{i,c} = c_v (T_2 - T_1)$

$- l_{i,e} = c_v (T_4 - T_3)$

Per ricavare p_3:

$$\frac{T_2}{T_2} = r_v^{1-\gamma} \Rightarrow r_v = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{1}{1-\gamma}}$$

© Proprietà riservata dell'autore - Digitalizzazione e distribuzione a cura del CENTRO APPUNTI - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino / Pagina 197 di 276