

FORMULARIO FISICA TECNICA

Primo principio

Relazione fondamentale:	$\Delta U = Q - L$	
Trasformazione adiabatica:	$Q = 0$	$\Delta U = -L$
Trasformazione isocora:	$L = 0$	$\Delta U = Q$
Trasformazione isoenergetica:	$\Delta U = \Delta H = 0$	$Q = L$
Trasformazione isobara:	$Q = \Delta H = 0$	

Gas ideali

	Formule generiche	Formule massiche
Relazione fondamentale:	$pV = MR^*T$	$pv = R^*T$
Costante specifica dei gas:	$R^* = \frac{R}{Mm} = \frac{8,314}{Mm}$	
Energia interna:	$\Delta U = Mc_v\Delta T$	$\Delta u = c_v\Delta T$
Entalpia:	$\Delta H = Mc_p\Delta T$	$\Delta h = c_p\Delta T$
Entropia:	$\Delta S = Mc_p \ln \frac{T_2}{T_1} - MR^* \ln \frac{P_2}{P_1}$	$\Delta s = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R^* \ln \frac{P_2}{P_1}$
	$\Delta S = Mc_p \ln \frac{V_2}{V_1} + Mc_p \ln \frac{P_2}{P_1}$	$\Delta s = c_p \ln \frac{V_2}{V_1} + c_p \ln \frac{P_2}{P_1}$
	$\Delta S = Mc_v \ln \frac{T_2}{T_1} + MR^* \ln \frac{V_2}{V_1}$	$\Delta s = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R^* \ln \frac{V_2}{V_1}$
Trasformazione a P costante: $(\frac{V}{T} = cost)$	$\Delta U = Mc_v\Delta T$	$\Delta u = c_v\Delta T$
	$Q = \Delta H = Mc_p\Delta T$	$q = \Delta h = c_p\Delta T$
	$L = MP\Delta v$	$l = P\Delta v$
	$\Delta S = Mc_p \ln \frac{T_2}{T_1}$	$\Delta s = c_p \ln \frac{T_2}{T_1}$
Trasformazione a V costante: $(\frac{P}{T} = cost)$	$L = 0$	$l = 0$
	$Q = \Delta U = Mc_v\Delta T$	$q = \Delta u = c_v\Delta T$
	$\Delta S = Mc_v \ln \frac{T_2}{T_1}$	$\Delta s = c_v \ln \frac{T_2}{T_1}$
Trasformazione a T costante: $(PV = cost)$	$\Delta U = \Delta H = 0$	$\Delta u = \Delta h = 0$
	$Q = L = -MR^*T \ln \frac{P_2}{P_1} = MR^*T \ln \frac{V_2}{V_1}$	$q = l = R^*T \ln \frac{P_2}{P_1} = R^*T \ln \frac{V_2}{V_1}$
	$\Delta S = -MR^* \ln \frac{P_2}{P_1} = MR^* \ln \frac{V_2}{V_1}$	$\Delta s = -R^* \ln \frac{P_2}{P_1} = R^* \ln \frac{V_2}{V_1}$
Trasformazione adiabatica: $(PV^\gamma = cost)$	$Q = 0$	$q = 0$
	$\Delta U = Mc_v\Delta T$	$\Delta u = c_v\Delta T$
	$\Delta H = Mc_p\Delta T$	$\Delta h = c_p\Delta T$
Relazione tra entalpia ed energia interna:	$\Delta H = \gamma\Delta U$	$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$
Relazione di Mayer:	$c_p = c_v + R^*$	$c_v = c_p - R^*$
		$R = c_p - c_v$

Relazione di Mayer molare:	$c_p^* = c_v^* + R^*$	$c_v^* = c_p^* - R^*$	$R^* = c_p^* - c_v^*$
Gas ideali monoatomici:	$c_v = \frac{3}{2}R$	$c_p = \frac{5}{2}R$	$c_v^* = \frac{3}{2}R^*$ $c_p^* = \frac{5}{2}R^*$
Gas ideali biatomici/poliatomici allineati:	$c_v = \frac{5}{2}R$	$c_p = \frac{7}{2}R$	$c_v^* = \frac{5}{2}R^*$ $c_p^* = \frac{7}{2}R^*$
Gas ideali poliatomici:	$c_v = 3R$	$c_p = 4R$	$c_v^* = 3R$ $c_p^* = 4R$
Volume molare:	$v = \frac{V}{M}$		
Portata volumetrica:	$\dot{V} = Aw$	w: velocità media del fluido	A: area del condotto
Densità:	$\rho = \frac{1}{v} = \frac{P}{RT}$	\rightarrow	$T = \frac{P}{R\rho}$ $P = RT\rho$
Portata massica:	$\dot{m} = \rho\dot{V} = \rho Aw$		
Numero di moli:	$n = \frac{PV}{RT} = m * Mm$		Mm: massa molecolare
Pressione parziale:	$P_i = \frac{n_i}{n_{tot}} P_{tot}$		
Area del condotto:	$A = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2$		

Politropiche

$pv^k = cost$	$p^{1-k}T^k = cost$	$Tv^{k-1} = cost$	$k = \frac{c_x - c_p}{c_x - c_v}$
Trasformazione isoterma:	$T = cost$ $c_x = \pm\infty$	$k = 1$	
Trasformazione isocora:	$V = cost$ $c_x = c_v$	$k = \pm\infty$	
Trasformazione isobara:	$P = cost$ $c_x = c_p$	$k = 0$	
Trasformazione adiabatica:	$Q = 0$ $c_x = 0$	$k = \frac{c_p}{c_v}$	
Energia interna:	$\Delta U = nc_v\Delta T$		
Entalpia:	$\Delta H = nc_p\Delta T$		
Lavoro di una politropica (no isoterma):	$L = M \frac{P_1 V_1}{k-1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$		
Calore di una politropica (no isoterma):	$Q = M c_x \Delta T$		
Lavoro di una politropica (solo isoterma):	$L = P_1 V_1 \ln \frac{V_1}{V_2}$		
Calore di una politropica (solo isoterma):	$Q = MT(s_2 - s_1)$		

Liquidi ideali

Calore:	$Q = \Delta H = H_f - H_i = Mh_f^* - Mh_i^*$
Energia interna:	$du = cdT$ $\Delta u = \Delta h = c\Delta T$
Entalpia:	$dh = cdT + vdP \cong cdT$ perché $vdP \ll cdT$
Entropia:	$ds = c \frac{dT}{T}$ $\Delta s = c \ln \frac{T_{fin}}{T_{in}}$

Aria umida

è una miscela di aria secca e vapore

Umidità assoluta: $x = \frac{M_v}{M_a} = 0,622 \frac{P_v}{P - P_v} = 0,622 \frac{\varphi P_{sat}}{P - \varphi P_{sat}}$

Pressione parziale aria secca: $P_{as} = P - P_v$

Umidità relativa: $\varphi = \frac{P_v}{P_{sat}(T)}$ $P_{sat}(T) = 611,2 * 10^{\frac{7,5T}{237,7+T}}$

Massa totale miscela: $M = M_v + M_a$

Entalpia acqua: $h_a^* = c_{pa}t = 1,005t$

Entalpia vapore: $h_v^* = xc_{pv}t + xr = x(c_{pv}t + r) = x(2501,6 + 1,86t)$

Entalpia massica: $h^* = h_a^* + xh_v^* = 1,005t + x(2501,6 + 1,86t)$

Entalpia: $H = H_a + H_v = M_a h_a^* + M_v h_v^* = M_a h_a^* + x M_a h_v^*$

Miscelazione adiabatica: $m_A + m_B = m_m$ $m_A x_A + m_B x_B = m_m x_m$ $m_A h_A + m_B h_B = m_m h_m$

Passaggi di stato

Evaporazione e condensazione al di sotto della curva limite	Titolo di vapore saturo:	$x = \frac{m_{vap}}{m_{vap} + m_{liq}}$
	Volume massico della miscela:	$v_{misc} = (1 - x)v_{ls} + xv_{vs}$
	Entalpia miscela:	$h_{misc} = (1 - x)h_{ls} + xh_{vs}$
	Energia interna miscela:	$u_{misc} = (1 - x)u_{ls} + xu_{vs}$
	Entropia miscela:	$s_{misc} = (1 - x)s_{ls} + xs_{vs}$
Liquido a sinistra della curva limite	Entalpia liquido sottoraffreddato	$h = h_{ls} + v_{ls}(P - P_{ls})$
	Entropia liquido sottoraffreddato	$s = c_{pm}^* \ln \frac{T}{T_{ls}}$
Vapori surriscaldati a destra della curva limite	Calore specifico medio entalpico:	$c_{pm} = \frac{1}{T - T_s} \int_{T_s}^T c_p dT$
	Calore specifico medio entropico:	$c_{pm}^* = \int_{T_s}^T c_p \frac{dT}{T}$
	Entalpia vapore surriscaldato:	$h = h_{vs} + c_{pm}(t - t_s)$
	Energia interna vapore surriscaldato:	$u = h_{vs} + c_{pm}(t - t_s) - pv$
	Entropia vapore surriscaldato:	$\Delta s = c_{pm}^* \ln \frac{T}{T_s}$

Interpolazione lineare: $\frac{X - X_1}{X_2 - X_1} = \frac{Y - Y_1}{Y_2 - Y_1}$ $Y = Y_1 + (Y_2 - Y_1) \frac{X - X_1}{X_2 - X_1}$

N.B.: se $T_{rugiada} > T_{parete}$ si avrà condensa

N.B.: $Q_{H_2O} = Q_v \dot{m}_v$

N.B.: sotto la curva limite si parla di trasformazioni isotermobariche, trasformazioni cioè che hanno temperatura e

pressione costante quindi si può genericamente scrivere che: $\Delta S = \frac{q}{T} = \frac{\Delta H}{T}$

Sistemi aperti

Bilancio energetico (stazionario): $\dot{m} \left[(h^*_1 - h^*_2) + g(z_1 - z_2) + \frac{\bar{w}_1^2}{2} - \frac{\bar{w}_2^2}{2} \right] + \dot{Q} - \dot{L} = 0$

Bilancio energetico generale: $\dot{m} \left[(h^*_1 - h^*_2) + g(z_1 - z_2) + \frac{\bar{w}_1^2}{2} - \frac{\bar{w}_2^2}{2} \right] + \dot{Q} - \dot{L} = \int_1^2 T dS_{irr}$

Bilancio entropico (stazionario): $\dot{m}(s^*_1 - s^*_2) + \dot{S}_Q + \dot{S}_{irr} = 0$

Scambiatore di calore:
$$\begin{cases} \dot{Q}_f = \dot{m}_f(h_{out,f} - h_{in,f}) \\ \dot{Q}_c = \dot{m}_c(h_{out,c} - h_{in,c}) \end{cases} \quad \dot{Q}_f + \dot{Q}_c = 0$$

Macchine termodinamiche

Macchine motrici	bilancio energetico:	$Q_c - Q_f - L = 0$
	bilancio entropico:	$-\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} = S_{irr}$
	rendimento:	$\eta = \frac{L_{tot}}{Q_{ass}} = 1 - \frac{T_f}{T_c} - \frac{T_f S_{irr}}{Q_c}$
	rendimento II:	$\eta_{II} = \frac{L_{reale}}{L_{ideale}} = \frac{\eta}{\eta_{rev}}$
Macchine operatrici	bilancio energetico:	$-Q_c + Q_f + L = 0$
	bilancio entropico:	$\frac{Q_c}{T_c} - \frac{Q_f}{T_f} = S_{irr}$
	efficienza frigorifero:	$\varepsilon_f = \frac{Q_f}{W} = \frac{T_f}{T_c - T_f + \frac{T_c T_f S_{irr}}{Q_f}}$
	efficienza pdc:	$\varepsilon_{pdc} = \frac{Q_c}{W} = \frac{T_c}{T_c - T_f + \frac{T_c T_f S_{irr}}{Q_c}}$
	rendimento II:	$\eta_{II} = \frac{L_{ideale}}{L_{reale}}$
	Entropia generata irreversibilità:	$S_{irr}^* = c_p \ln \frac{T_2}{T_{2is}}$

Rendimento isoentropico compressore: $\eta_{is} = \frac{L_{ideale}}{L_{reale}}$ si lavora con le temperature

Rendimento isoentropico turbina: $\eta_{is} = \frac{L_{reale}}{L_{ideale}}$ si lavora con le entalpie

Se ciclo o trasformazione ideale: $\Delta S = 0$

Nella turbina ideale: $s_1 = s_2$

Cicli termodinamici

Ciclo Otto

È simmetrico: $T_1 T_3 = T_2 T_4$ $P_1 P_3 = P_2 P_4$ $V_1 V_3 = V_2 V_4$

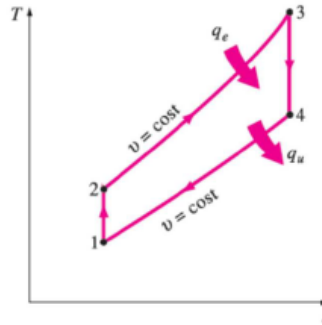
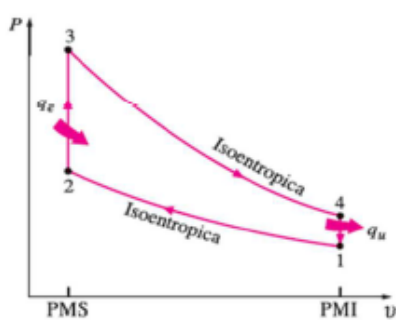
Rapporto di compressione: $\rho = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{v_1}{v_2}$

1-2) Compressione adiabatica reversibile: $q_{12} = 0$ $w_{12} = -\Delta u_{12} = c_v(T_1 - T_2)$ $\Delta S_{12} = 0$
 2-3) Riscaldamento isocoro: $w_{23} = 0$ $q_{23} = \Delta u_{23} = c_v(T_3 - T_2)$ $\Delta S_{23} = c_v \ln \frac{T_3}{T_2}$
 3-4) Espansione adiabatica reversibile: $q_{34} = 0$ $w_{34} = -\Delta u_{34} = c_v(T_3 - T_4)$ $\Delta S_{34} = 0$
 4-1) Raffreddamento isobaro: $w_{41} = 0$ $q_{41} = \Delta u_{41} = c_v(T_1 - T_4)$ $\Delta S_{41} = c_v \ln \frac{T_1}{T_4}$

Calore entrante: $q_e = q_{23} = u_3 - u_2 = c_v(T_3 - T_2)$

Calore uscente: $q_u = -q_{41} = -(u_1 - u_4) = c_v(T_4 - T_1)$

Rendimento: $\eta_{otto} = \frac{W_{netto}}{q_e} = \frac{q_e - q_u}{q_e} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{T_4}{T_3} = 1 - \frac{1}{\rho^{k-1}} = 1 - \rho^{1-k}$



Ciclo Diesel

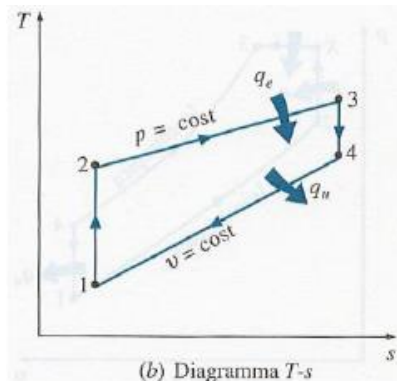
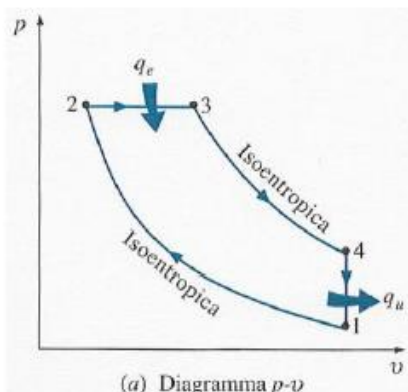
Rapporto volumetrico: $\tau = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3}$

1-2) Compressione adiabatica reversibile: $q_{12} = 0$ $w_{12} = -\Delta u_{12} = c_v(T_1 - T_2)$ $\Delta S_{12} = 0$
 2-3) Riscaldamento isobaro: $w_{23} = R^*(T_3 - T_2)$ $q_{23} = c_p(T_3 - T_2)$ $\Delta S_{23} = c_p \ln \frac{T_3}{T_2}$
 3-4) Espansione adiabatica reversibile: $q_{34} = 0$ $w_{34} = -\Delta u_{34} = c_v(T_3 - T_4)$ $\Delta S_{34} = 0$
 4-1) Raffreddamento isobaro: $w_{41} = 0$ $q_{41} = \Delta u_{41} = c_v(T_1 - T_4)$ $\Delta S_{41} = c_v \ln \frac{T_1}{T_4}$

Calore entrante: $q_e = q_{23} = h_3 - h_2 = c_p(T_3 - T_2)$

Calore uscente: $q_u = -q_{41} = -(u_1 - u_4) = c_v(T_4 - T_1)$

Rendimento: $\eta_{diesel} = \frac{W_{netto}}{q_e} = \frac{q_e - q_u}{q_e} = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{1}{\rho^{k-1}} \left[\frac{\tau^k - 1}{k(\tau - 1)} \right]$



Ciclo Joule-Brayton

È simmetrico: $T_1 T_3 = T_2 T_4$ $P_1 P_3 = P_2 P_4$ $V_1 V_3 = V_2 V_4$

Rapporto manometrico di compressione: $\beta = \frac{P_{max}}{P_{min}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4}$

1-2) Compressione adiabatica reversibile: $q_{12} = 0$ $w_{12} = c_p(T_1 - T_2)$ $\Delta s_{12} = 0$

2-3) Riscaldamento isocoro: $w_{23} = 0$ $q_{23} = c_p(T_3 - T_2)$ $\Delta s_{23} = c_p \ln \frac{T_3}{T_2}$

3-4) Espansione adiabatica reversibile: $q_{34} = 0$ $w_{34} = c_p(T_3 - T_4)$ $\Delta s_{34} = 0$

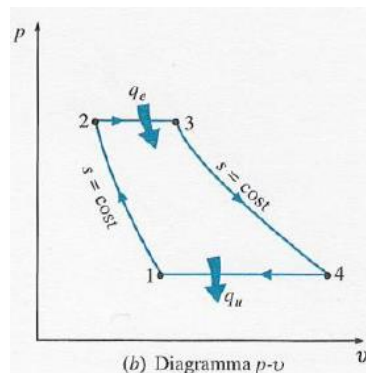
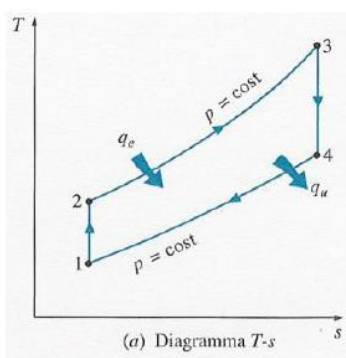
4-1) Raffreddamento isobaro: $w_{41} = 0$ $q_{41} = c_p(T_1 - T_4)$ $\Delta s_{41} = c_p \ln \frac{T_1}{T_4}$

Calore entrante: $q_e = q_{23} = h_3 - h_2 = c_p(T_3 - T_2)$

Calore uscente: $q_u = -q_{41} = -(h_1 - h_4) = c_p(T_4 - T_1)$

Rendimento: $\eta_{\text{Joule-Brayton}} = \frac{W_{netto}}{q_e} = \frac{q_e - q_u}{q_e} = 1 - \frac{T_4}{T_3} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \beta^{\frac{1-k}{k}} = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}}$

Rigenerazione: per aumentare il rendimento del ciclo è possibile ricorrere alla rigenerazione, attuabile se $T_4 > T_2$. Il gas uscente dal compressore a temperatura T_2 viene preriscaldato, prima di essere immesso nel combustore, fino alla temperatura $T_{2'} > T_2$, utilizzando il calore che esce dalla turbina $T_4 > T_2$. Nella rigenerazione ideale $T_4 = T_{2'}$ e $T_{4'} = T_2$. Il rendimento diventa: $\eta_{\text{Joule-Brayton}} = 1 - \frac{T_2}{T_3}$



Ciclo Rankine diretto

È un ciclo a fluido bifase (liquido + vapore)

1-2) Compressione adiabatica reversibile (pompa): $w_{p,e} = h_2 - h_1 \cong v_1(P_2 - P_1)$

2-3) Riscaldamento isobaro (caldaia): $q_e = h_3 - h_2$

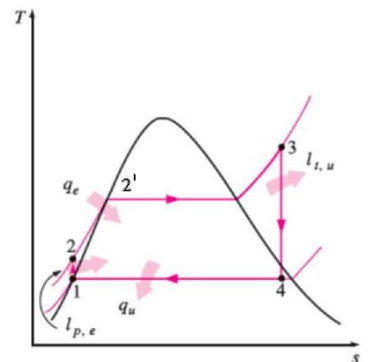
3-4) Espansione adiabatica reversibile (turbina): $w_{t,u} = h_3 - h_4$

4-1) Raffreddamento isobaro (condensatore): $q_u = h_4 - h_1$

Lavoro netto del ciclo: $w_{netto} = w_{t,u} - w_{p,e} = q_e - q_u$

Rendimento: $\eta_R = \frac{w_{netto}}{q_e} = \frac{q_e - q_u}{q_e} = 1 - \frac{q_u}{q_e}$

Surriscaldamento: il vapore può essere surriscaldato al fine di concludere l'espansione in turbina con un titolo $x > 0,9$ poiché la presenza di fase liquida in percentuale maggiore causerebbe danni tali da rendere la turbina inservibile in breve tempo



Ciclo Rankine inverso

È un ciclo a fluido bifase (liquido + vapore)

1-2) Compressione isoentropica $w_{p,e} = h_2 - h_1 \cong v_1(P_2 - P_1)$

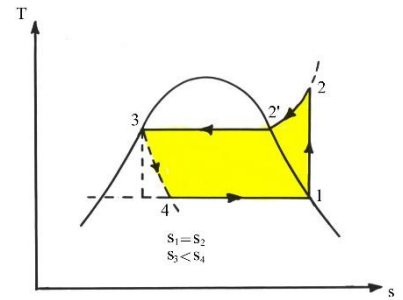
2-3) Raffreddamento isobaro: $q_u = h_2 - h_3$

3-4) Laminazione isoentalpica: $w_{t,u} = h_3 - h_4$

4-1) evaporazione isothermobarica: $q_e = h_1 - h_4$

Rendimento pdc: $\varepsilon_{pdc} = \frac{q_u}{w_{p,e}} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$

Rendimento f: $\varepsilon_f = \frac{q_e}{w_{p,e}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$



Conduzione

Legge di Fourier:

$$\alpha \nabla^2 T = \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx}$$

Equazione di Laplace:

$$\nabla^2 T = \emptyset$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \emptyset$$

Resistenza conduttiva parete piana indefinita: $R_{cd} = \frac{L}{kA} = \frac{T_{s1} - T_{s2}}{q_x}$

Resistenza conduttiva cilindro indefinito: $R_{cd} = \frac{1}{2k\pi L} \ln \frac{R_2}{R_1}$

Potenza termica:

$$\dot{Q} = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{tot}}$$

Conduzione parete piana:

$$T(x) = \frac{T_{s2} - T_{s1}}{s} x + T_{s1}$$

$$\dot{q}_x = \frac{kA}{s} (T_{s1} - T_{s2})$$

Conduzione cilindri:

$$T(r) = \frac{T_{s1} - T_{s2}}{\ln \frac{r_1}{r_2}} \ln \frac{r}{r_1} + T_{s1}$$

$$q_x = \frac{k}{r_e - r_i} \bar{A} \Delta T$$

Area media aritmetica

$$\bar{A} \cong \frac{A_e + A_i}{2}$$

Lunghezza caratteristica:

$$L_c = \frac{V_c}{A_c}$$

nei tubi si sceglie il diametro equivalente

Diametro idraulico equivalente:

$$D_e = 4 \frac{A}{p} = \pi \frac{D_i^4}{4}$$

A = area p = perimetro

Numero di Biot:

$$Bi = \frac{hL_c}{k} = \frac{hV}{kA_c} < 0.1$$

A_c = area a contatto con il fluido

Numero di Fourier:

$$Fo = \frac{\alpha t}{L_c^2}$$

Diffusività termica:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p^*}$$

Metodo dei parametri concentrati:

$$\frac{T - T_f}{T_0 - T_f} = e^{-\frac{t}{\tau}} = e^{-Bi * Fo}$$

$$\tau = RC = \frac{1}{hA} * \rho cV$$

Convezione

Potenza termica scambiata:

$$\dot{Q} = Ah(T_{superficie} - T_{fluido})$$

Potenza termica areica:

$$q = h(T_{superficie} - T_{fluido})$$

Resistenza convettiva parete piana indefinita: $R_{cv} = \frac{1}{hA} = \frac{T_s - T_{\infty}}{q_x}$

Resistenza convettiva cilindro indefinito: $R_{cv} = \frac{1}{2k\pi L} \ln \frac{D_e}{D_i}$

Numero di Nusselt: $Nu = \frac{hL}{k}$ $h =$ coefficiente di convezione $k =$ conducibilità

Numero di Reynolds: $Re = \frac{w\rho L}{\mu}$ $w =$ velocità media $\mu =$ viscosità

Numero di Prandtl: $Pr = \frac{c_p\mu}{k}$ $c_p =$ calore specifico

Numero di Grashoff: $Gr = \frac{\rho^2 g \beta \Delta T L^3}{\mu^2}$

Numero Nusselt per convezione forzata: $Nu = cost * Re^\alpha * Pr^\beta$

Numero Nusselt per convezione naturale: $Nu = cost(Gr * Pr)^\alpha *$

N.B.: nel numero di Reynolds e nel numero di Nusselt la lunghezza caratteristica non è il rapporto tra il volume area. Generalmente per i condotti di sceglie come lunghezza caratteristica il diametro, mentre per le lastre la lunghezza stessa

Scambiatore di calore

Potenza complessiva scambiata: $\dot{Q}_f + \dot{Q}_c = 0$

Singole potenze scambiata:
$$\begin{cases} \dot{Q}_f = \dot{m}_f(h_{out,f} - h_{in,f}) = \dot{m}_f c_{pf}(T_{out,f} - T_{in,f}) = C_f(T_{out,f} - T_{in,f}) \\ \dot{Q}_c = \dot{m}_c(h_{out,c} - h_{in,c}) = \dot{m}_c c_{pc}(T_{out,c} - T_{in,c}) = C_c(T_{out,c} - T_{in,c}) \end{cases}$$

Capacità termica di portata: $C_f = \dot{m}_f c_{pf}$ $C_c = \dot{m}_c c_{pc}$

Metodo della differenza media logaritmica: dato che la potenza termica complessiva scambiata risulta essere nulla analizzando la potenza uscente dal fluido caldo e quella entrante nel fluido freddo, per calcolarla si ricorre alla variazione di tempo medio logaritmico che tiene conto del fatto che la differenza di temperatura tra fluido caldo e fluido freddo varia lungo lo scambiatore

Differenza media logaritmica: $\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_u - \Delta T_i}{\ln \frac{\Delta T_u}{\Delta T_i}}$ $\Delta T_u = T_{hot,u} - T_{cold,u}$

$$\Delta T_i = T_{hot,i} - T_{cold,i}$$

Potenza complessiva scambiata: $\dot{Q} = UA_{tot}\Delta T_{ml}$ A_{tot} : area totale

Area totale di scambio: $A_{tot} = n_{tubi}^\circ * A_{laterale,tubo}$

Area laterale tubo: $A_{laterale,tubo} = 2\pi rL$

Fattore di correzione: $\Delta T_{ml} = F\Delta T_{ml,controcorrente}$

Irraggiamento

Legge di Wien: $T\lambda_{max} = 2898 \mu mK$

Potere emissivo corpo nero /Legge Stefan-Boltzmann: $E_{CN} = \sigma T^4$

Radiazione atmosferica: $G_{cielo} = \sigma T_{cielo}^4$

Scambio termico tra sup. nere: $\dot{Q}_{12} = AF\sigma(T_1^4 - T_2^4)$

Scambio termico sup. grigie lastre piane: $\dot{Q}_{12} = \frac{A\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} - 1 + \frac{1}{\epsilon_2}}$

Scambio termico complessivo: $\dot{Q} = A\sigma(T_1^4 - T_2^4)$