

Formulario Fisica Tecnica - Giulio De Pasquale

1 luglio 2015

Indice

1 Termodinamica	3	2 Cicli	6
1.1 Unità di Misura	3	2.0.1 Generale	6
1.2 Conversioni	3	2.1 Cicli simmetrici	6
1.2.1 Pressione	3	2.2 Cicli a Gas	6
1.2.2 Calore	3	2.2.1 Sistemi chiusi	6
1.3 Masse Molari	3	2.2.2 Sistemi aperti	7
1.4 Generale e Proprietà Gas	3	2.3 Cicli a Vapore	7
1.5 Calore, Energia Interna, Entalpia ed Entropia	3	2.3.1 Generale	7
1.5.1 Calore	3	2.3.2 Cicli diretti	7
1.5.2 Energia Interna	4	2.3.3 Cicli indiretti	8
1.5.3 Entalpia	4	3 Trasmissione del Calore	8
1.5.4 Entropia	4	3.1 Unità di Misura	8
1.5.5 Liquidi	4	3.2 Conduzione	8
1.6 Trasformazioni Politropiche	4	3.2.1 Unità di Misura	8
1.7 Rendimenti	4	3.2.2 Generale	8
1.8 Sistemi Bifase	4	3.3 Convezione	8
1.8.1 Generale	4	3.3.1 Raggio Critico di Isolamento	8
1.8.2 Liquidi sottoraffreddati	4	3.3.2 Convezione Forzata	8
1.9 Sistemi Aperti	4	3.3.3 Convezione Naturale	9
1.9.1 Generale	4	3.4 Irraggiamento	9
1.9.2 Macchina Aperta	4	3.4.1 Unità di Misura	9
1.9.3 Turbina	5	3.4.2 Costanti	9
1.9.4 Compressore / Pompa di Calore	5	3.4.3 Generale	9
1.9.5 Scambiatore di Calore	5	3.4.4 Il fattore di vista	9
1.9.6 Diffusore ($w \downarrow$) e Ugello ($w \uparrow$)	5	3.4.5 Coefficienti di assorbimento, riflessione e trasmissione	9
1.9.7 Valvola di Laminazione	5	3.4.6 Convenzioni per lo scambio termico tra superfici	9
1.10 Macchine Motrici a gas (\vec{L})	5	3.4.7 Scambio termico tra superfici	10
1.10.1 Generale	5		
1.11 Macchine Operatrici a gas (\overleftarrow{L})	5		
1.11.1 Macchine frigorifere	5		
1.11.2 Macchine calorifere (pompe di calore)	5		

Elenco delle tabelle

1	Gas e calore specifico	11
2	Trasformazioni politropiche	11
3	Conduzione - Coordinate cartesiane	11
4	Conduzione - Coordinate cilindriche	12
5	Conduzione - Coordinate sferiche	12
6	Convezione - Costanti adimensionali	12
7	Convezione - Condizioni di regime	13
8	Irraggiamento - Calore	13

1 Termodinamica

1.1 Unità di Misura

Energia Interna $U = [J]$, $\bar{u} = [\frac{J}{Kg}]$;

Calore $Q = [J]$, $\bar{q} = [\frac{J}{Kg}]$;

Potenza Termica $\dot{Q} = [\frac{J}{s}] = [W]$;

Lavoro $L = [J]$, $\bar{l} = [\frac{J}{Kg}]$;

Potenza Meccanica $\dot{L} = [\frac{J}{s}] = [W]$;

Entalpia $H = [J]$, $\bar{h} = [\frac{J}{Kg}]$;

Entropia $S = [\frac{J}{K}]$, $\bar{s} = [\frac{J}{Kg \cdot K}]$;

Temperatura $T = [^{\circ}K]$;

Pressione $P = [Pa]$;

Volume $V = [m^3]$, $\bar{v} = [\frac{m^3}{Kg}]$;

Massa $m = [Kg]$;

Densità $\rho = [\frac{Kg}{m^3}]$;

Velocità $w = [\frac{m}{s}]$;

Costante Universale dei Gas $R = [\frac{J}{^{\circ}K \cdot kmol}]$, $R^* = \frac{R}{M} = [\frac{J}{Kg \cdot ^{\circ}K}]$;

Calore Specifico $c = [\frac{J}{Kg \cdot ^{\circ}K}]$;

Massa Molare $M = [\frac{Kg}{kmol}]$;

Portata Massica $\dot{m} = [\frac{Kg}{s}]$;

Portata Volumetrica $\dot{V} = \dot{m}\bar{v} = [\frac{m^3}{s}]$;

1.2 Conversioni

1.2.1 Pressione

- $1 \text{ ata} = 98066,5 \text{ Pa}$;
- $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$;
- $1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$;

1.2.2 Calore

- $1 \text{ cal} = 4,184 \text{ J}$;

1.3 Masse Molari

- $H = 1$;
- $He = 4$;
- $C = 12$;
- $N = 14$, $N_2 = 28$;
- $O = 16$, $O_2 = 32$;

1.4 Generale e Proprietà Gas

Da tenere sempre presente che

$$P\bar{v} = R^*T$$

riscrivibile come

$$PV = nRT$$

Inoltre, il I principio della termodinamica impone che

$$\Delta U = \overleftarrow{Q} - \overrightarrow{L}$$

- $R = 8314,4 \frac{J}{^{\circ}K \cdot kmol}$;
- $n = \frac{m}{M}$ dove n = numero di moli;
- $c_p - c_v = R^*$, la relazione di Mayer;
- $\dot{V} = \dot{m}\bar{v}$ con \dot{V} = portata volumetrica;

1.5 Calore, Energia Interna, Entalpia ed Entropia

1.5.1 Calore

- $Q = mc_x \Delta T$ con $c_x = \text{cost}$;
- $Q = mc_v \Delta T$ con $V = \text{cost}$;
- $Q = mc_p \Delta T$ con $P = \text{cost}$;
- $Q = T \Delta S$ con $T = \text{cost}$;
- $\dot{Q} = \dot{m} c_{materiale} \Delta T$;

1.5.2 Energia Interna

- $d\bar{u} = c_v dT$, se gas perfetto;
- $d\bar{u} = Tds - P d\bar{v}$;

1.5.3 Entalpia

- $H = U + PV$;
- $d\bar{h} = c_p dT$, se gas perfetto;
- $d\bar{h} = Tds + \bar{v} dP$;
- $d\bar{h} = \delta q + \bar{v} dP$;

1.5.4 Entropia

- $ds = \frac{\delta q}{T}$, nel caso di un processo reversibile;
- $\Delta S = \Delta S_{\overleftarrow{Q}} + \Delta S_{irr}$;
- $ds = c_v \frac{dT}{T} + R^* \frac{d\bar{v}}{\bar{v}} \Rightarrow \Delta S = c_v \ln(\frac{T_2}{T_1}) + R^* \ln(\frac{V_2}{V_1})$;
- $ds = c_p \frac{dT}{T} - R^* \frac{dP}{P} \Rightarrow \Delta S = c_p \ln(\frac{T_2}{T_1}) - R^* \ln(\frac{P_2}{P_1})$;
- $ds = c_p \frac{d\bar{v}}{\bar{v}} + c_v \frac{dP}{P} \Rightarrow \Delta S = c_p \ln(\frac{V_2}{V_1}) + c_v \ln(\frac{P_2}{P_1})$;
- $\Delta S \geq 0$ se il sistema è isolato;

1.5.5 Liquidi

- $c_{H_2O} = 4186 \frac{J}{kg \cdot ^\circ K}$;
- $c = c_v = c_p$;
- $du = \delta q = cdT \Rightarrow \Delta u = c\Delta T$;
- $ds = c \frac{dT}{T} \Rightarrow \Delta s = c \ln(\frac{T_2}{T_1})$;
- $v = cost$;
- $\Delta h = c\Delta T + v\Delta P$;

1.6 Trasformazioni Politropiche

- $P\bar{v}^n = cost$;
- $T\bar{v}^{n-1} = cost$;
- $PT^{\frac{n}{1-n}} = cost$;

1.7 Rendimenti

- $\eta_{confronto} = \frac{\eta_{serb-reale}}{\eta_{serb-ideale}}$;
- $\eta_{IIP} = \frac{\eta_{reale}}{\eta_{ideale}} = \frac{L_{reale}}{L_{ideale}}$;

1.8 Sistemi Bifase

1.8.1 Generale

- Le transizioni di fase avvengono con $P = costante$ e $T = costante$;

- $$\begin{cases} x = \frac{v-v_l}{v_v-v_l}; & \text{con } x = \text{titolo, } v = \text{proprietà estensiva} \\ v_{lv} = v_v - v_l \\ v = v_l + xv_{lv}; \\ h = h_l + xh_{lv}; \\ s = s_l + xs_{lv}; \\ u = u_l + xu_{lv}; \end{cases}$$
- $dh = d\overleftarrow{q}$;

1.8.2 Liquidi sottoraffreddati

- $h \cong h_{l@T}$;
- $s \cong s_{l@T}$;

1.9 Sistemi Aperti

1.9.1 Generale

- $\dot{m} = \rho w \Omega$ con $\Omega = \text{sezione}$;
- $\frac{dE}{dt} = \overleftarrow{m}[(\overleftarrow{h} - \overrightarrow{h}) + g(\overleftarrow{z} - \overrightarrow{z}) + \frac{\overleftarrow{w}^2 - \overrightarrow{w}^2}{2}] + \overleftarrow{\dot{Q}} - \overrightarrow{\dot{L}}$ con $z = \text{altezza}$ e $g = \text{accelerazione gravitazionale}$;
- $\frac{dS}{dt} = \overleftarrow{m}(\overleftarrow{s} - \overrightarrow{s}) + \overrightarrow{\dot{S}_{\overleftarrow{Q}}} + \overrightarrow{\dot{S}_{irr}}$;
- $\frac{dm}{dt} = \overleftarrow{m} - \overrightarrow{m}$;

1.9.2 Macchina Aperta

Dispositivo adiabatico atto a scambiare lavoro per il quale si ipotizzano trascurabili le variazioni di energia potenziale e cinetica tra le sezioni di ingresso e di uscita.

- $\overleftarrow{m}(\overleftarrow{h} - \overrightarrow{h}) - \overrightarrow{\dot{L}} = 0$;
- $\overleftarrow{m}(\overleftarrow{s} - \overrightarrow{s}) + \overrightarrow{\dot{S}_{irr}} = 0$;

1.9.3 Turbina

$$- \eta_{isT} = \frac{\vec{L}_{reale}}{\vec{L}_{ideale}} = \frac{(h_1 - h_{2'})}{(h_1 - h_2)} \text{ con } \eta_{is} = \text{rendimento isoentropico};$$

1.9.4 Compressore / Pompa di Calore

$$- \eta_{isC} = \frac{\vec{L}_{ideale}}{\vec{L}_{reale}} = \frac{(h_1 - h_2)}{(h_1 - h_{2'})};$$

1.9.5 Scambiatore di Calore

Gli scambiatori sono sistemi aperti stazionari che operano senza scambio di lavoro per i quali si ipotizzano trascurabili le variazioni di energia potenziale e cinetica tra le sezioni di ingresso e di uscita.

- $\dot{m}(\overleftarrow{h} - \overrightarrow{h}) + \dot{Q} = 0;$
- $\dot{m}(\overleftarrow{s} - \overrightarrow{s}) + \dot{S}_{\dot{Q}} + \dot{S}_{irr} = 0;$
- $\overleftarrow{Q} = \overrightarrow{Q}$

1.9.6 Diffusore ($w \downarrow$) e Ugello ($w \uparrow$)

I diffusori e gli ugelli sono sistemi aperti stazionari che operano senza scambio di lavoro né calore per i quali si ipotizzano trascurabili le variazioni di energia potenziale tra le sezioni di ingresso e di uscita.

- $[(\overleftarrow{h} - \overrightarrow{h}) + \frac{\overleftarrow{w}^2 - \overrightarrow{w}^2}{2}] = 0;$
- $\dot{m}(\overleftarrow{s} - \overrightarrow{s}) + \dot{S}_{irr} = 0;$

1.9.7 Valvola di Laminazione

Le valvole di laminazione sono sistemi aperti stazionari che operano senza scambio di lavoro né calore per i quali si ipotizzano trascurabili le variazioni di energia potenziale e cinetica tra le sezioni di ingresso e di uscita.

- $(\overleftarrow{h} - \overrightarrow{h}) = 0;$
- $\dot{m}(\overleftarrow{s} - \overrightarrow{s}) + \dot{S}_{irr} = 0;$

1.10 Macchine Motrici a gas (\vec{L})

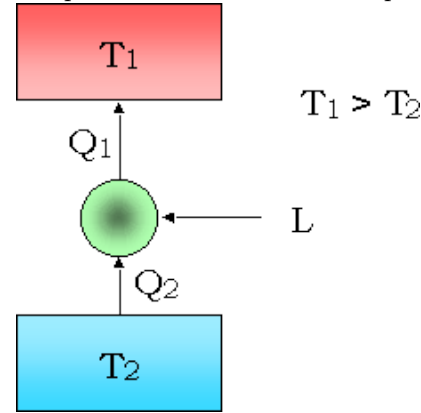
Converte energia termica in lavoro.

1.10.1 Generale

- $\eta_{reale} = 1 - \frac{T_F}{T_C} - \frac{T_F \cdot S_{irr}}{Q_C}$
- $\eta_{rev} = 1 - \frac{T_F}{T_C};$
- $\Delta S_{irr} = -\frac{\overleftarrow{Q}}{T_{C/F}} + \frac{\overrightarrow{Q}}{T_{C/F}}$ dove Q è riferito alla macchina e $T_{C/F}$ è la temperatura associata al Q corrispondente;

1.11 Macchine Operatrici a gas (\overleftarrow{L})

Trasferisce energia termica da uno o più serbatoi di calore a temperatura inferiore a uno o più serbatoi di calore a temperatura superiore.



- $\Delta S_{irr} = -\frac{\overleftarrow{Q}}{T_{C/F}} + \frac{\overrightarrow{Q}}{T_{C/F}}$ dove Q è riferito alla macchina e $T_{C/F}$ è la temperatura associata al Q corrispondente;

1.11.1 Macchine frigorifere

- $L_{rev} = Q_F(\frac{T_C}{T_F} - 1) = \frac{Q_F}{\varepsilon};$
- $L_{reale} = L_{rev} + T_C S_{irr};$
- $\varepsilon_f = \frac{Q_F}{L} = \frac{T_F}{T_C - T_F + \frac{T_F T_F S_{irr}}{\overleftarrow{Q}}};$
- $\varepsilon_{frev} = \frac{T_F}{T_C - T_F};$

1.11.2 Macchine calorifere (pompe di calore)

- $L_{rev} = Q_C(1 - \frac{T_F}{T_C}) = \frac{Q_C}{\varepsilon};$
- $L_{reale} = L_{rev} + T_F S_{irr};$
- $\varepsilon_{pdc} = \frac{Q_C}{L} = \frac{\overrightarrow{Q} + L}{L} = \varepsilon_f + 1 = \frac{T_C}{T_C - T_F + \frac{T_C T_F S_{irr}}{\overleftarrow{Q}}};$

- $\varepsilon_{pdcrev} = \frac{T_C}{T_C - T_F};$

2 Cicli

2.0.1 Generale

- $\eta = \frac{L_{netto}}{\bar{Q}};$
- $n = \frac{c_p}{c_v};$

2.1 Cicli simmetrici

Per i cicli simmetrici valgono le seguenti proprietà:

$$\bar{v}_1 \bar{v}_3 = \bar{v}_2 \bar{v}_4$$

$$P_1 P_3 = P_2 P_4$$

$$T_1 T_3 = T_2 T_4$$

2.2 Cicli a Gas

2.2.1 Sistemi chiusi

- $\Delta u = \overleftarrow{q} - \overrightarrow{l};$

Carnot a Gas Il ciclo di Carnot è costituito da due isoentropiche e due isoterme.

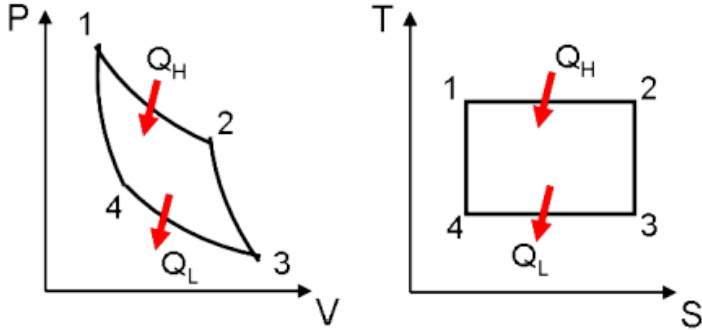
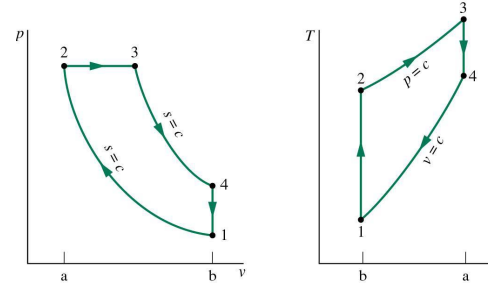


Fig.1. P-V and T-S diagrams of Carnot Cycle

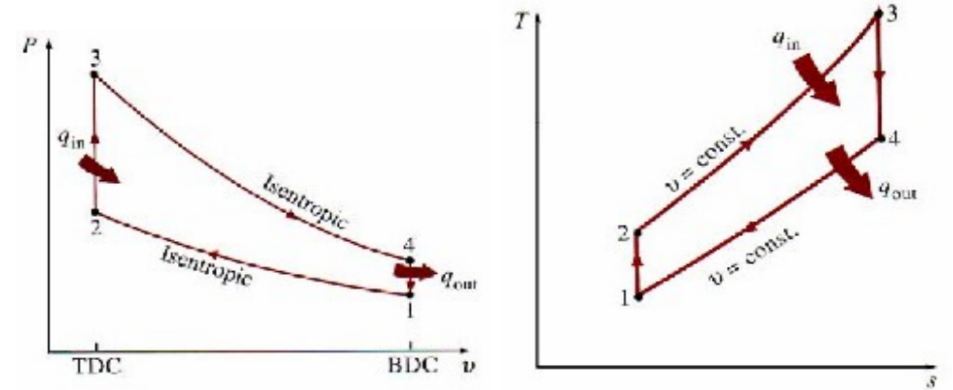
- $S_{irr} = -\frac{\overleftarrow{Q}}{T_C} + \frac{\overrightarrow{Q}}{T_F};$
- $\Delta S = \frac{\overleftarrow{Q}}{T_2} = \frac{\overrightarrow{Q}}{T_1};$
- $\eta_{rev} = 1 - \frac{T_1}{T_3};$

Diesel Il ciclo Diesel è costituito da due isoentropiche, una isocora ed una isobara.



- $\eta_D = 1 - \frac{c_v T_1 (\frac{T_4}{T_1} - 1)}{c_p T_2 (\frac{T_3}{T_2} - 1)};$
- $\eta = 1 - \frac{T_4 - T_1}{n(T_3 - T_2)};$
- $\eta = 1 - \frac{1}{r^{n-1}} \cdot [\frac{z^n - 1}{n(z-1)}];$
- $r = \frac{V_1}{V_2}$, rapporto di compressione volumetrico;
- $z = \frac{V_3}{V_2}$, rapporto di combustione;

Otto Ciclo simmetrico costituito da due isoentropiche e due isocore.

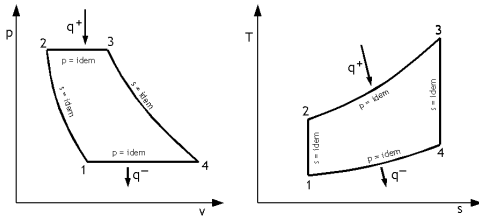


- $\overleftarrow{Q} = u_3 - u_2 = c_v(T_3 - T_2);$
- $\overrightarrow{Q} = u_4 - u_1 = c_v(T_4 - T_1);$
- $l = c_v(T_3 - T_4) - c_v(T_2 - T_1) = c_v T_3(1 - \frac{1}{r_{vol}^{n-1}}) - c_v T_1(r_{vol}^{n-1} - 1) = c_v T_3(1 - \frac{T_4}{T_3}) - c_v T_1(\frac{T_2}{T_1} - 1);$
- $\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - r_{vol}^{1-n};$
- $r_{vol} = \frac{V_1}{V_2};$

2.2.2 Sistemi aperti

- $\Delta h = \overleftarrow{q} - \overrightarrow{l}$;

Joule-Brayton Il ciclo Joule-Brayton è un ciclo simmetrico ed un sistema aperto costituito da due isentropiche e due isobare.



- $\overleftarrow{Q} = \dot{m}(h_3 - h_2) = \dot{m}c_p(T_3 - T_2)$;
- $\overrightarrow{Q} = \dot{m}(h_4 - h_1) = \dot{m}c_p(T_4 - T_1)$;
- $l = c_p(T_3 - T_4) - c_p(T_2 - T_1) = c_p T_3(1 - \frac{T_4}{T_3}) - c_p T_1(\frac{T_2}{T_1} - 1)$;
- $\eta_{JB} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{r^{\frac{n-1}{n}}}$;
- $r = \frac{P_2}{P_1}$ con r = rapporto di compressione;
- $r_{pmin} = 1$;
- $r_{pmax} = (\frac{T_3}{T_1})^{\frac{n}{n-1}}$;

Affinché si possa operare una rigenerazione bisogna che la temperatura di fine espansione sia maggiore della temperatura di fine compressione.

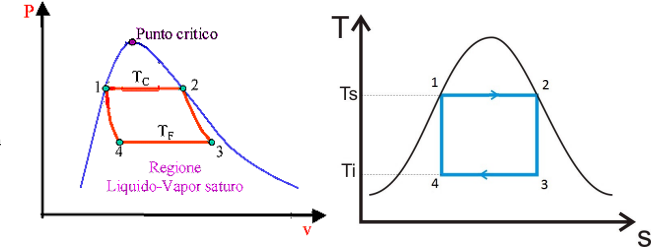
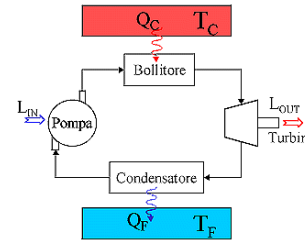
2.3 Cicli a Vapore

2.3.1 Generale

- $\Delta h = \overleftarrow{q} - \overrightarrow{l}$;

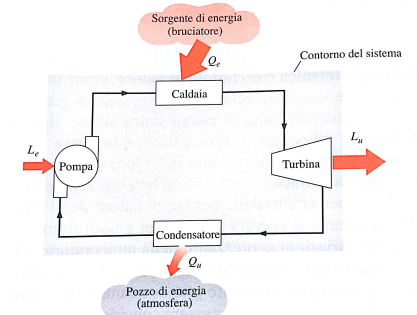
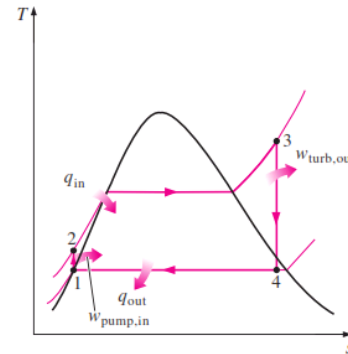
2.3.2 Cicli diretti

Carnot



Rankine Semplice L'acqua entra nella pompa (1) come liquido saturo. Entra in caldaia, a $P = cost$, (2) come liquido sottoraffreddato ed esce come vapore surriscaldato in (3). Il vapore surriscaldato entra in turbina (3) e si espande isentropicamente; la pressione e la temperatura scendono sino ad arrivare in (4) dove si trova una miscela saturo di liquido e vapore ad elevato titolo. Il vapore entra nel condensatore (4) e viene condensato a $P = cost$ uscendo come liquido saturo.

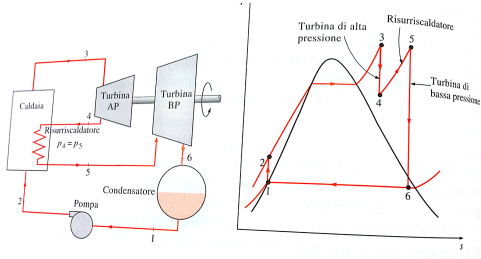
- (1) \rightarrow (2) $\Delta S = 0$;
- (2) \rightarrow (3) $P = cost$;
- (3) \rightarrow (4) $\Delta S = 0$;
- (4) \rightarrow (1) $P = cost, T = cost$;



Rankine con surriscaldamento In aggiunta alle fasi di un ciclo Rankine semplice si ha un'espansione isentropica in una turbina ad alta pressione (3 \rightarrow 4), un surriscaldamento (4 \rightarrow 5) ed un'espansione isentropica in una turbina a bassa pressione (5 \rightarrow 6):

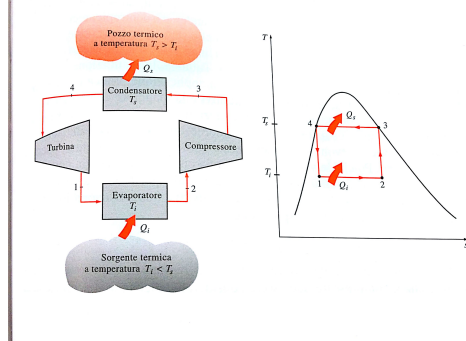
- (1) \rightarrow (2) $\Delta S = 0$;

- (2) → (3) $P = cost$;
- (3) → (4) $\Delta S = 0$;
- (4) → (5) $P = cost$;
- (5) → (6) $\Delta S = 0$;
- (6) → (1) $P = cost, T = cost$;

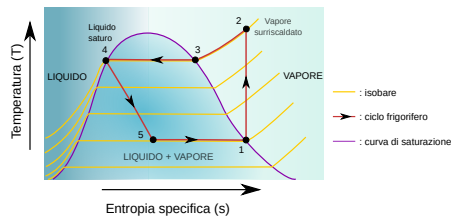


2.3.3 Cicli indiretti

Carnot inverso



Ciclo inverso a compressione di vapore ideale



- 1 - 2: Compressione del vapore
- 2 - 3: Raffreddamento del vapore surriscaldato nel condensatore
- 3 - 4: Condensazione del vapore
- 4 - 5: Raffreddamento del liquido
- 5 - 1: La miscela liquido+gas è completamente vaporizzata nell'evaporatore

3 Trasmissione del Calore

3.1 Unità di Misura

Flusso Termico Areico $\Phi = \dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A}$;

Conducibilità Termica $k = [\frac{W}{m \cdot ^\circ K}]$, indipendente dalla pressione;

Coefficiente Scambio Termico Convettivo $h = [\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K}]$;

Vettore Flusso di Calore $\vec{q} = [\frac{W}{m^2}]$;

Viscosità $\mu = [Pl]$, indipendente dalla pressione;

Diametro o Lunghezza Caratteristica $D = [m]$;

Resistenza $R = \frac{^\circ K \cdot m^2}{W}$ oppure $R = \frac{^\circ K}{W}$;

3.2 Conduzione

3.2.1 Unità di Misura

Potenza Generata su Unità di Volume $\sigma = [\frac{W}{m^3}]$;

3.2.2 Generale

- $\dot{Q} = -\frac{1}{R_{forma}} \Delta T$;
- $\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dr}$;
- $\dot{Q} = cost$;

3.3 Convezione

- $\dot{Q}_{CONV} = hA(T_s - T_f)$ con T_s = temperatura del solido e T_f = temperatura del fluido;

3.3.1 Raggio Critico di Isolamento

- $\dot{Q}_{MAX}(\frac{d\dot{Q}}{dr^2}) = 0 \Rightarrow r_{cr} = \frac{k_{isolante}}{h}$;

3.3.2 Convezione Forzata

- $Nu = \frac{hD}{k}$, numero di Nusselt;
- $Re = \frac{\rho w D}{\mu}$, numero di Reynolds;
- $Pr = \frac{c_p \mu}{k}$, numero di Prandtl, indipendente dalla pressione;
- $Pe = Re \cdot Pr = \frac{w D}{\alpha}$, numero di Peclet;

3.3.3 Convezione Naturale

- $Gr = \frac{\rho^2 g \beta \Delta T D^3}{\mu^2}$, numero di Grashoff;
- $Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g \beta \Delta T D^3}{\alpha \nu}$, numero di Rayleigh;

3.4 Irraggiamento

3.4.1 Unità di Misura

Potenza Radiante $E = [\frac{W}{m^2}]$;

Lunghezza d'Onda $\lambda = [\mu m]$;

Emissività $\varepsilon \in [0, 1] \subseteq \mathbb{R}$;

Radiosità $J = [\frac{W}{m^2}]$;

Radiazione Incidente $I = [\frac{W}{m^2}]$;

3.4.2 Costanti

Costante di Stefan-Boltzmann $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} [\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K^4}]$;

Costante Solare $I_S = 1353 \frac{W}{m^2}$;

3.4.3 Generale

- $\dot{Q}_{IRR} = \varepsilon \sigma A (T_s)^4$ con ε = emissività ($0 \leq \varepsilon \leq 1$);
- $E_n = \varepsilon \sigma T^4$, potere emissivo di un corpo alla temperatura T ;
- $(\lambda \cdot T)_{max\ potenza} = 2897,8 [\mu m \cdot ^\circ K]$;
- $\varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_n(T)} = \frac{E(T)}{\sigma T^4}$;
- $h_{IRR} = \varepsilon \sigma (T_{supp}^2 + T_{amb}^2)(T_{supp} + T_{amb})$;
- $R_{IRR} = \frac{1}{h_{irr} \cdot A}$;

3.4.4 Il fattore di vista

Il fattore di vista tra una superficie i e una superficie j si indica $F_{i \rightarrow j}$ e si definisce «Frazione della radiazione emessa dalla superficie i che incide direttamente sulla superficie j ». ($F \in \mathbb{R}$; $0 \leq F \leq 1$)

E.g:

- $F_{i \rightarrow j} = 0$, le superfici i e j non sono in vista tra loro;
- $F_{i \rightarrow j} = 1$, la superficie j circonda completamente la i , per cui tutta la radiazione emessa da i è intercettata da j ;

Valgono le seguenti regole:

- $F_{i \rightarrow j} = F_{j \rightarrow i}$, se e solo se $A_i = A_j$;
- $F_{i \rightarrow j} \neq F_{j \rightarrow i}$, se e solo se $A_i \neq A_j$;
- $A_i F_{i \rightarrow j} = A_j F_{j \rightarrow i}$;
- $\sum_{j=1}^n F_{i \rightarrow j} = 1$;
- $F_{A_{12} \rightarrow 3} \cdot (A_1 + A_2) = F_{A_1 \rightarrow A_3} \cdot A_1 + F_{A_2 \rightarrow A_3} \cdot A_2$;

3.4.5 Coefficienti di assorbimento, riflessione e trasmissione

Assorbimento $\alpha = \frac{I_{ass}}{I}$;

Riflessione $\rho = \frac{I_{rifl}}{I}$;

Trasmissione $\tau = \frac{I_{tr}}{I}$;

Sussistono inoltre le seguenti relazioni:

- $\alpha + \rho + \tau = 1$, per superfici trasparenti;
- $\alpha + \rho = 1$, per superfici opache;
- $\alpha = \varepsilon$ quando la differenza di temperatura tra due corpi $\Delta T < 100^\circ K$;

3.4.6 Convenzioni per lo scambio termico tra superfici

$q_{1 \rightarrow 2}$ Potenza termica per unità di superficie emessa dalla superficie 1 che incide sulla superficie 2;

q_{1-2} Potenza termica per unità di superficie emessa dalla superficie 1 che viene assorbita dalla superficie 2;

$q_{1,2}$ Potenza termica netta per unità di superficie scambiata tra la superficie 1 e la superficie 2;

Inoltre valgono anche:

- $q_{1-2} = \alpha \cdot q_{1 \rightarrow 2}$;
- $q_{1,2} = q_{1-2} - q_{2-1} = -q_{2,1}$;

3.4.7 Scambio termico tra superfici

Genericamente vale:

- $\dot{Q}_{1,2} = A_1 F_{12} \sigma_0 (T_1^4 - T_2^4);$

In caso di superfici piane parallele indefinite si ha:

Per una superficie grigia opaca:

- $$\begin{cases} J_i = E_i + \rho I_i = \epsilon_i E_{in} + (1 - \epsilon_i) I_i; & \epsilon = \alpha, \quad \alpha + \rho = 1; \\ \dot{Q}_i = A_i (J_i - I_i); \end{cases}$$

Per superfici grigie formanti una cavità:

- $$\dot{Q}_{1,2} = \frac{\sigma_0 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1-\epsilon_1}{\epsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1-\epsilon_2}{\epsilon_2 A_2}};$$

Tabella 1: Gas e calore specifico

Tipologia Gas	c_v	c_p
Monoatomico	$\frac{3}{2}R^*$	$\frac{5}{2}R^*$
Biatomico / Politatomico Lineare	$\frac{5}{2}R^*$	$\frac{7}{2}R^*$
Poliatomico Non Lineare	$\frac{6}{2}R^*$	$\frac{8}{2}R^*$

Tabella 2: Trasformazioni politropiche

Trasformazione	$n = \frac{c_x - c_p}{c_x - c_v}$	l	q	Δu	Δs	Δh
Isocora ($V = cost$)	$n \pm \infty$	0	$c_v \Delta T$	$c_v \Delta T$	$c_v \ln(\frac{T_2}{T_1})$	$c_p \Delta T$
Isotherma ($T = cost$)	$n = 1$	$\begin{cases} R^* T \ln(\frac{V_2}{V_1}) \\ -R^* T \ln(\frac{P_2}{P_1}) \end{cases}$	$\begin{cases} R^* T \ln(\frac{V_2}{V_1}) \\ -R^* T \ln(\frac{P_2}{P_1}) \end{cases}$	-	-	$\begin{cases} R^* \ln(\frac{V_2}{V_1}) \\ -R^* \ln(\frac{P_2}{P_1}) \end{cases}$
Isobara ($P = cost$)	$n = 0$	$P \Delta V$	$c_p \Delta T$	$c_v \Delta T$	$c_p \ln(\frac{T_2}{T_1})$	$c_p \Delta T$
Isoentropica / Adiabatica ($ds = 0$) oppure ($Q = 0$)	$n = \frac{c_p}{c_v}$	$-c_v \Delta T$	0	$c_v \Delta T$	-	$c_p \Delta T$
Politropica generica	$\frac{c_x - c_p}{c_x - c_v}$	$(c_x - c_p) \Delta T$	$c_x \Delta T$	$c_v \Delta T$	$\begin{cases} c_v \ln(\frac{T_2}{T_1}) + R^* \ln(\frac{V_2}{V_1}) \\ c_p \ln(\frac{T_2}{T_1}) - R^* \ln(\frac{P_2}{P_1}) \end{cases}$	$c_p \Delta T$

Tabella 3: Conduzione - Coordinate cartesiane

Forma	Φ	T	\dot{Q}	R_{tot}
Parete piana infinita	$\sigma x - Ak$	$-\frac{\sigma}{2k} + Ax + B$	/	/
Lastra piana monostrato senza generazione di potenza	$\frac{\Delta T}{R_{TOT} \cdot A}$	$\frac{T_2 - T_1}{s} x + T_1$	$\frac{\Delta T}{R_{tot}}$	$(\sum \frac{s_n}{k_n} + \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e}) \cdot \frac{1}{A}$

Tabella 4: Conduzione - Coordinate cilindriche

Tipologia Cilindro	Φ	$\dot{q}_{per\ unit\ di\ lung}$	\dot{Q}	T
Pieno o cavo di altezza infinita	/	/	/	$-\frac{\sigma}{4k}r^2 + A\ln(r) + C$
Indefinito con generazione di potenza	$\frac{\sigma}{2}r - \frac{k}{r}C$	/	/	$-\frac{\sigma}{4k}r^2 + C\ln(r) + D$
Pieno con generazione di potenza	$\frac{\sigma}{2}r$	$\pi r^2 \sigma$	$V\sigma$	$\frac{\sigma}{4k}(R^2 - r^2) + T_2$
Cavo senza generazione di potenza	$k \frac{(T_i - T_e)}{\ln(\frac{R_e}{R_i})} \cdot \frac{1}{r}$	$\frac{2\pi k}{\ln(\frac{R_e}{R_i})} \cdot (T_i - T_e)$	$k \frac{T_i - T_e}{\ln(\frac{R_e}{R_i})} \cdot 2\pi L$	$T_i + \frac{T_e - R_i}{\ln(\frac{R_e}{R_i})} \cdot \ln(\frac{r}{R_i})$

Tabella 5: Conduzione - Coordinate sferiche

Forma Sfera	T	R	$Superficie$
Piena o cava	$-\frac{\sigma}{6k}r^2 + \frac{A}{r} + B$	$\frac{r_2 - r_1}{4\pi r_1 r_2 k}$	$4\pi r^2$

Tabella 6: Convezione - Costanti adimensionali

Ove presenti, se $Re > Re_{CRIT}$, $Pr_{MIN} < Pr < Pr_{MAX}$, $Ra > Ra_{CRIT}$ il moto è turbolento.

Forma	Nu con moto laminare	Nu con moto turbolento	Re_{CRIT}	Pr_{CRIT}		Ra_{CRIT}
Attorno ad un cilindro	$\begin{cases} 3.66 & se\ T_{parete} = cost \\ 4.36 & se\ h(T_{parete} - T_{\infty}) = cost \end{cases}$	/	$2 \cdot 10^5$	/		/
	$C \cdot Re^m \cdot Pr^{\frac{1}{3}}$		/	/		/
In un condotto circolare	/	$0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{n1}$	10^4	0,7	160	/
	/	$0.027 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.333} \cdot (\frac{\mu}{\mu_P})^{0.14}$	10^4	0,7	16700	/
Parete piana verticale	$0.59 \cdot Ra^{0.25}$	$0.10 \cdot Ra^{0.33}$	/	/	/	10^9
Lungo una lastra piana	$0,664 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}$ sse $Pr \geq 0,6$	$0,037 \cdot Re^{\frac{4}{5}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}$ sse $0,6 \leq Pr \leq 60$ e $5 \cdot 10^5 \leq Re \leq 10^7$	$5 \cdot 10^5$	/	/	/

Tabella 7: Convezione - Condizioni di regime

Tipo di moto	Condizione di regime laminare	Condizione di regime turbolento
In un condotto	$Re < 2000$	$Re > 2500$
Lungo una lastra piana	$Re < 5 \cdot 10^5$	$Re > 5 \cdot 10^5$
Attorno ad un cilindro	$Re < 2 \cdot 10^5$	$Re > 2 \cdot 10^5$

Tabella 8: Irraggiamento - Calore

Tipologia	Superficie 1	Superficie 2	$q_{1,2}$
Nera - Nera	Nera	Nera	$\sigma_0(T_1^4 - T_2^4)$
Nera - Grigia	Nera	Grigia	$\epsilon_2 \sigma_0(T_1^4 - T_2^4)$
Grigia - Grigia	Grigia	Grigia	$\frac{\sigma_0(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$