

Formulario Fisica Tecnica - Giulio De Pasquale

Un ringraziamento speciale a Michele Albanese

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 decrescente) e Ugello (w crescente)	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	10
1.10	Macchine Motrici a gas (\overrightarrow{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.

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

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 decrescente) e Ugello (w crescente)

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 (\overrightarrow{L})

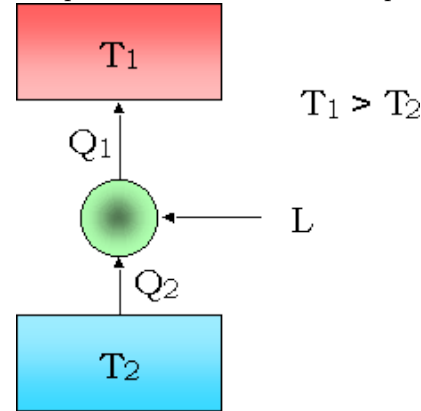
Converte energia termica in lavoro.

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

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

1.11.2 Macchine calorifere (pompe di calore)

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

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

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.

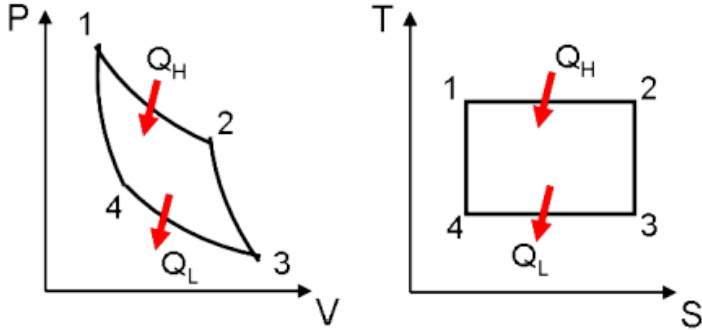
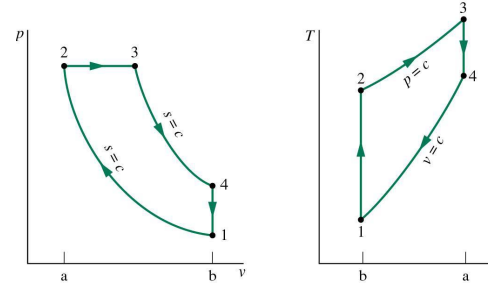


Fig.1. P-V and T-S diagrams of Carnot Cycle

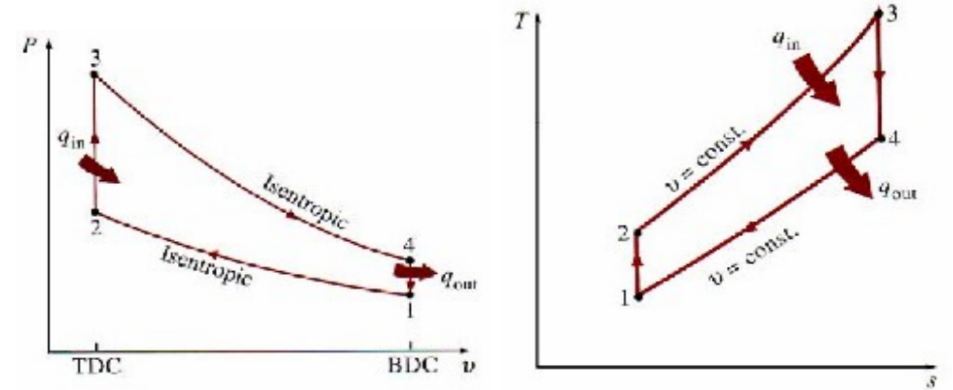
- $S_{irr} = -\frac{\overleftarrow{Q}}{T_C} + \frac{\overrightarrow{Q}}{T_F};$
- $\Delta S = \frac{\overleftarrow{Q}}{T_2} = \frac{\overrightarrow{Q}}{T_1};$
- $\eta_{rev} = 1 - \frac{T_1}{T_3};$

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.

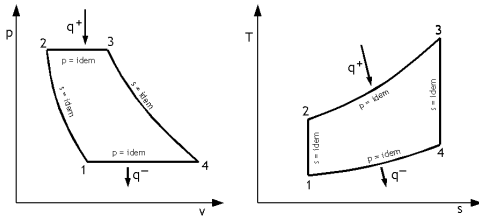


- $\overleftarrow{Q} = u_3 - u_2 = c_v(T_3 - T_2);$
- $\overrightarrow{Q} = u_4 - u_1 = c_v(T_4 - T_1);$
- $l = c_v(T_3 - T_4) - c_v(T_2 - T_1) = c_v T_3(1 - \frac{1}{r_{vol}^{n-1}}) - c_v T_1(r_{vol}^{n-1} - 1) = c_v T_3(1 - \frac{T_4}{T_3}) - c_v T_1(\frac{T_2}{T_1} - 1);$
- $\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2}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

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.

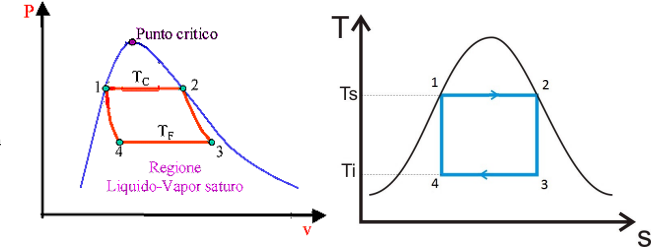
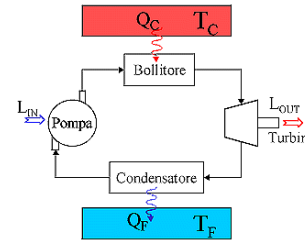
2.3 Cicli a Vapore

2.3.1 Generale

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

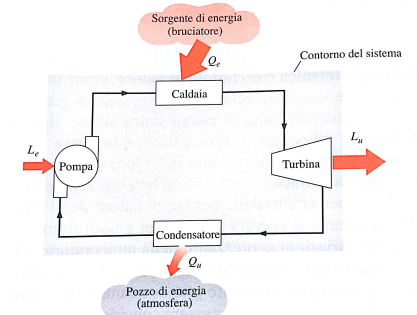
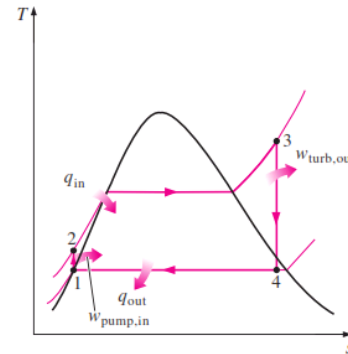
2.3.2 Cicli diretti

Carnot



Rankine con surriscaldamento 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.

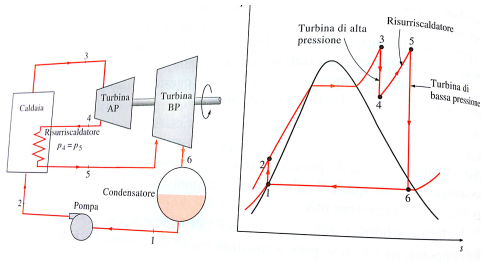
- $(1) \rightarrow (2) \Delta S = 0;$
- $(2) \rightarrow (3) P = cost;$
- $(3) \rightarrow (4) \Delta S = 0;$
- $(4) \rightarrow (1) P = cost, T = cost;$



Rankine con risurriscaldamento 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 ($5 \rightarrow 6$):

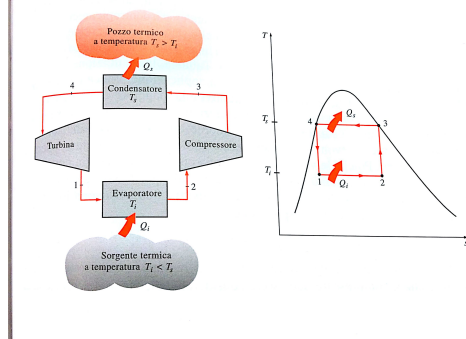
- $(1) \rightarrow (2) \Delta S = 0;$

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

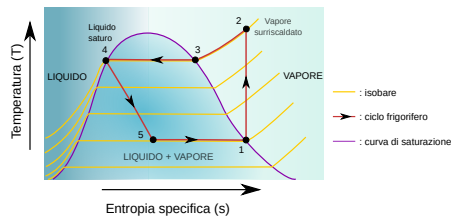


2.3.3 Cicli indiretti

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

- $D = \frac{4 \cdot \text{areaSezioneNormale}}{\text{perimetroBagnato}}$
 - $D_{tubiCircolari} = D$
 - $D_{anelliCircolari} = D_2 - D_1$ (con D_1 diametro interno e l'altro quello esterno)
- $Nu = \frac{hD}{k}$, numero di Nusselt;

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

Pompaggio

- $P_{pompaggio} = \dot{m} \frac{1}{\rho} \Delta P$
- $\Delta P = \frac{f L \rho \omega^2}{2d}$, perdita di carico;
- $\begin{cases} f = 0.184 Re^{-0.2} & \text{moto turbolento} \\ f = \frac{64}{Re} & \text{moto laminare} \end{cases}$
- $\dot{L} = \dot{V} \Delta P = \frac{\dot{m}}{\rho} \Delta P$;

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

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 ;
- $(\lambda \cdot T)_{max\ potenza} = 2897,8 [\mu m \cdot ^\circ K]$;
- $\varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_n(T)} = \frac{E(T)}{\sigma T^4}$;
- $h_{IRR} = \varepsilon \sigma (T_{sup}^2 + T_{amb}^2)(T_{sup} + T_{amb})$, coefficiente di scambio termico per irraggiamento;
- $R_{IRR} = \frac{1}{h_{irr} \cdot A}$;

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 / Poliatomico 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	$\dot{q}_{per\ unit\grave{a}\ di\ lung}$	\dot{Q}
Pieno o cavo di altezza infinita	/	/	/
Indefinito con generazione di potenza	$\frac{\sigma}{2}r - \frac{k}{r}C$	/	/
Pieno con generazione di potenza	$\frac{\sigma}{2}r$	$\pi r^2 \sigma$	$V \sigma$
Cavo senza generazione di potenza	$k \frac{(T_i - T_e)}{\ln(\frac{R_e}{R_i})} \cdot \frac{1}{r}$	$\frac{2\pi k}{\ln(\frac{R_e}{R_i})} \cdot (T_i - T_e)$	$k \frac{T_i - T_e}{\ln(\frac{R_e}{R_i})} \cdot 2\pi L$

Tabella 5: Conduzione - Coordinate sferiche

Forma Sfera	R	<i>Superficie</i>
Piena o cava	$\frac{r_2 - r_1}{4\pi r_1 r_2 k}$	$4\pi r^2$

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	3.66	$0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{n1}$	10^4	0,7	160	/
	3.66	$0.027 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.333} \cdot (\frac{\mu}{\mu_P})^{0.14}$	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	$\frac{\sigma_0(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$