

Formulario Fisica Tecnica - Giulio De Pasquale

30 giugno 2015

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

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 Pesi Molari

- $H = 1$;
- $He = 4$;
- $C = 12$;
- $N = 14$;
- $O = 16$;

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

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

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	$\frac{6}{2}R^*$	$\frac{8}{2}R^*$

- $R = 8314,4 \frac{J}{K \cdot kmol}$;
- $n = \frac{m}{M}$ 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 $c_x = cost$;
- $Q = mc_v \Delta T$ con $V = cost$;
- $Q = mc_p \Delta T$ con $P = cost$;
- $Q = T \Delta S$ con $T = cost$;
- $\dot{Q} = \dot{m} c_{materiale} \Delta T$;

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;
- $d\bar{h} = Tds + \bar{v} dP$;
- $d\bar{h} = \delta q + \bar{v} dP$;
- $\Delta h = l = v \Delta P$; ¹;

¹Vale per i liquidi.

1.5.4 Entropia

- $ds = \frac{\delta q}{T}$, nel caso di un processo reversibile;
- $\Delta S = \Delta S_{\bar{Q}} + \Delta S_{irr}$;
- $ds = \frac{dU}{T}$, valido nei liquidi;
- $ds = c_v \frac{dT}{T} + R^* \frac{d\bar{v}}{\bar{v}}$;
- $ds = c_p \frac{dT}{T} - R^* \frac{dP}{P}$;
- $ds = c_p \frac{d\bar{v}}{\bar{v}} + c_v \frac{dP}{P}$;

1.6 Trasformazioni Politropiche

Trasformazione	n
Isocora ($V = cost$)	$n \pm \infty$
Isotherma ($T = cost$)	$n = 1$
Isobara ($P = cost$)	$n = 0$
Isoentropica / Adiabatica ($ds = 0$) oppure ($Q = 0$)	$n = \frac{c_p}{c_v}$

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

1.7 Rendimenti

- $\eta_{isoentropico} = \frac{L}{\bar{Q}} = \frac{|\overleftarrow{\bar{Q}} - \overrightarrow{\bar{Q}}|}{|\overleftarrow{\bar{Q}}|} = 1 - \frac{|\overrightarrow{\bar{Q}}|}{|\overleftarrow{\bar{Q}}|}$;
- $\eta_{II_P} = \frac{\eta_{reale}}{\eta_{ideale}} = \frac{L_{reale}}{L_{ideale}}$;

1.8 Sistemi Aperti

1.8.1 Generale

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

1.8.2 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.

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

1.8.3 Turbina

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

1.8.4 Compressore

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

1.8.5 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.

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

1.8.6 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.

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

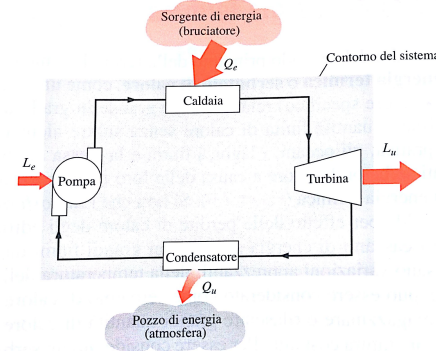
1.8.7 Valvola di Laminazione

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.

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

1.9 Macchine Motrici (\overrightarrow{L})

Converte energia termica in lavoro.

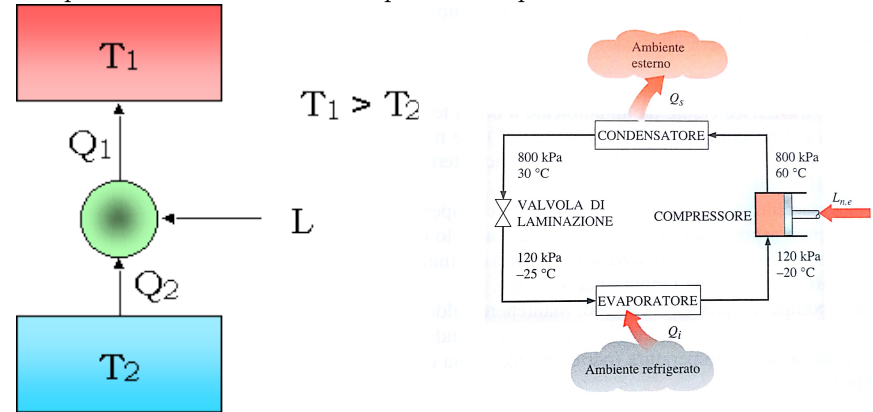


1.9.1 Generale

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

1.10 Macchine Operatrici (\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;

1.10.1 Macchine frigorifere

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

1.10.2 Macchine calorifere (pompe di calore)

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

1.11 Annotazioni

1. Le transizioni di fase avvengono con $P = costante$;
2. L'interpolazione per acquisire il titolo x è data, ad esempio a partire da un volume v , da

$$x = \frac{v - v_l}{v_v - v_l}$$

dove v_l è il volume di liquido saturo e v_v è il volume di vapore saturo.

2 Cicli

L'indice n nei seguenti cicli è l'indice per una trasformazione isoentropica. Quindi $n = \frac{c_p}{c_v}$.

2.1 Cicli simmetrici

Per i cicli simmetrici valgono le seguenti proprietà:

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

$$P_1 P_3 = P_2 P_4$$

$$T_1 T_3 = T_2 T_4$$

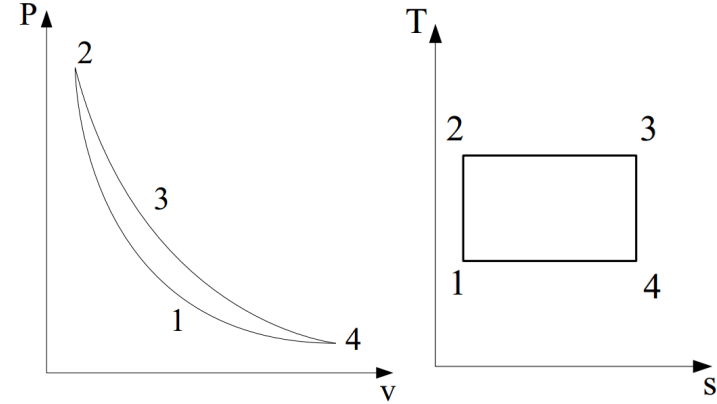
2.2 Carnot

2.2.1 Generale

- $\eta_{rev} = 1 - \frac{T_1}{T_3};$

2.2.2 Carnot a Gas

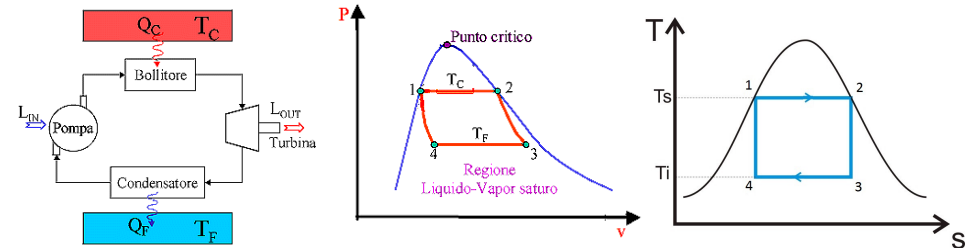
Il ciclo di Carnot è costituito da due isoentropiche e due isoterme.



- $S_{irr} = -\frac{\vec{Q}}{T_C} + \frac{\vec{Q}}{T_F};$

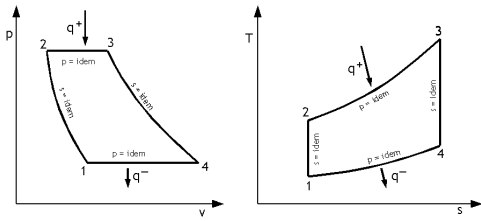
- $\Delta S = \frac{\vec{Q}}{T_2} = \frac{\vec{Q}}{T_1};$

2.2.3 Carnot a Vapore



2.3 Joule-Brayton

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

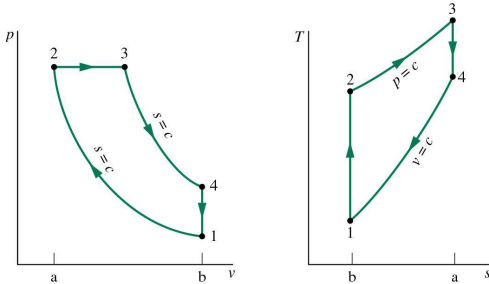


- $\overleftarrow{Q} = \dot{m}(h_3 - h_2) = \dot{m}c_p(T_3 - T_2);$
- $\overrightarrow{Q} = \dot{m}(h_4 - h_1) = \dot{m}c_p(T_4 - T_1);$
- $l = c_p(T_3 - T_4) - c_p(T_2 - T_1) = c_p T_3(1 - \frac{T_4}{T_3}) - c_p T_1(\frac{T_2}{T_1} - 1);$
- $\eta_{JB} = 1 - \frac{T_1}{T_2};$
- $r = \frac{P_2}{P_1}$ 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.

2.4 Diesel

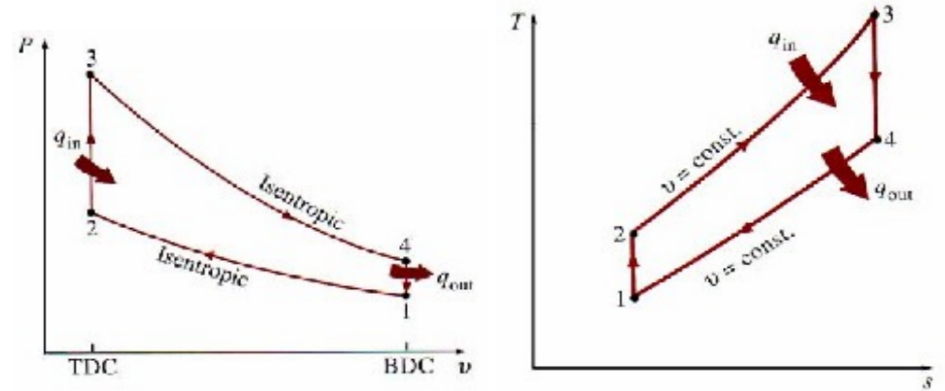
Il ciclo Diesel è costituito da due isoentropiche, una isocora ed una isobara.



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

2.5 Otto

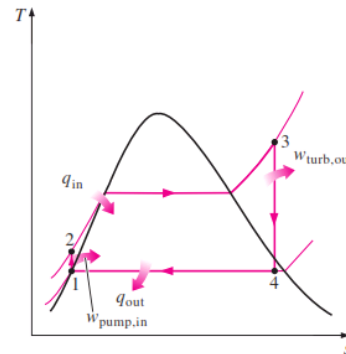
Ciclo simmetrico costituito da due isoentropiche e due isocore.



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

2.6 Rankine

2.6.1 Rankine Semplice

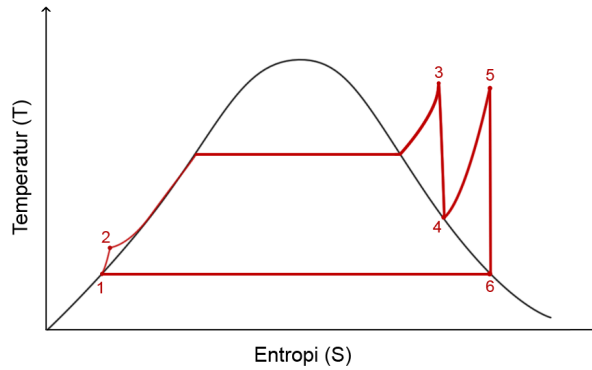


L'acqua entra nella pompa (1) come liquido saturo. Entra in caldaia, a $P = cost$, (2) come liquido sottoraffreddato ed esce come vapore surriscaldato in (3). Il vapore

surriscaldato entra in turbina (3) e si espande isoentropicamente; la pressione e la temperatura scendono sino ad arrivare in (4) dove si trova una miscela satura di liquido e vapore ad elevato titolo. Il vapore entra nel condensatore (4) e viene condensato a $P = cost$ uscendo come liquido saturo.

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

2.6.2 Rankine con surriscaldamento



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

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

3 Trasmissione del Calore

3.1 Unità di Misura

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

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

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

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

Viscosità $\mu = [Pl]$;

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

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

3.2.3 Coordinate Cartesianhe

Forma	Φ	T	\dot{Q}
Parete piana infinita	$\sigma x - Ak$	$-\frac{\sigma}{2k} + Ax + B$	/
Lastra piana monostrato senza generazione di potenza	$\frac{\Delta T}{R_{TOT} \cdot A}$	$\frac{T_2 - T_1}{s} x + T_1$	$\frac{\Delta}{R_i}$

3.2.4 Coordinate Cilindriche

Tipologia Cilindro	Φ	$\dot{q}_{per\ unit\ di\ lung}$	\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	$k \frac{(T_i - T_e)}{\ln(\frac{R_e}{R_i})} \cdot \frac{1}{r}$	$\frac{2\pi k}{\ln(\frac{R_e}{R_i})} \cdot (T_i - T_e)$	$k \frac{T_i - T_e}{\ln(\frac{R_e}{R_i})} \cdot 2\pi L$

3.2.5 Coordinate Sferiche

Forma Sfera	T
Piena o cava	$-\frac{\sigma}{6k}r^2 + \frac{A}{r} + B$

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;
- $Pe = Re \cdot Pr = \frac{wD}{a}$, 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;

3.3.4 Proprietà dei numeri 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
Attorno ad un cilindro	$\begin{cases} 3.66 & se T_{parete} = cost \\ 4.36 & se h(T_{parete} - T_{\infty}) = cost \end{cases}$	
	$C \cdot Re^m \cdot Pr^{\frac{1}{3}}$	
In un condotto circolare	/	0
	/	$0.027 \cdot$
Parete piana verticale	$0.59 \cdot Ra^{0.25}$	
Lungo una lastra piana	$0,664 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}$ sse $Pr \geq 0,6$	$0,037 \cdot Re^{\frac{4}{5}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}$ ss

Tipo di moto	Condizione di regime laminare	Condizione di regime tur
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	$Re < 2 \cdot 10^5$	$Re > 2 \cdot 10^5$

In un condotto circolare in condizioni di moto turbolento si ha:

$$n = \begin{cases} 0.3 & se \text{ il fluido si sta raffreddando} \\ 0.4 & se \text{ il fluido si sta riscaldando} \end{cases}$$

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

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 ;
- $(\lambda \cdot T)_{max\ potenza} = 2897,8 [\mu m \cdot ^\circ K]$;
- $\varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_n(T)} = \frac{E(T)}{\sigma T^4}$;

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:

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	$\frac{\sigma_0 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$

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:

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