

# Formulario Fisica Tecnica - Giulio De Pasquale

1 luglio 2015

## Indice

<b>1</b>	<b>Termodinamica</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>Cicli</b>	<b>6</b>
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	<b>3</b>	<b>Trasmissione del Calore</b>	<b>8</b>
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 ( $\overrightarrow{L}$ ) . . . . .	5	3.4.7	Scambio termico tra superfici . . . . .	9
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.

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

### 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 ( $\vec{L}$ )

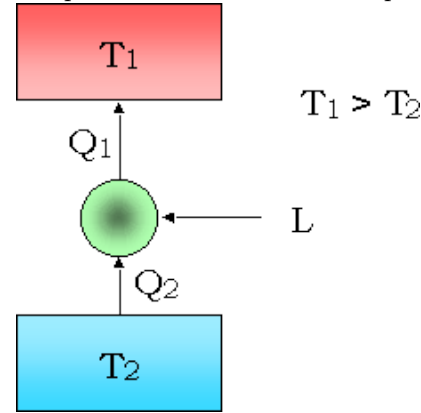
Converte energia termica in lavoro.

### 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

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

### 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.

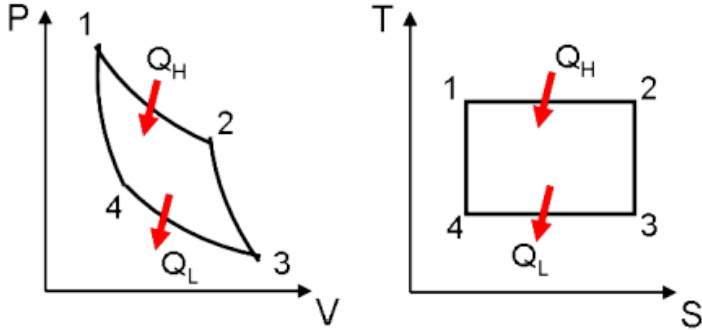
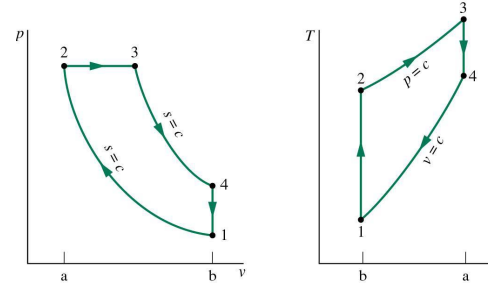


Fig.1. P-V and T-S diagrams of Carnot Cycle

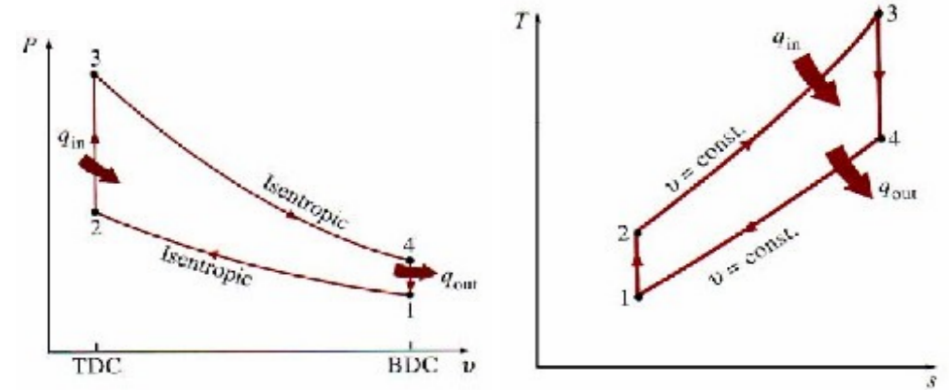
- $S_{irr} = -\frac{\overleftarrow{Q}}{T_C} + \frac{\overrightarrow{Q}}{T_F}$ ;
- $\Delta S = \frac{\overleftarrow{Q}}{T_2} = \frac{\overrightarrow{Q}}{T_1}$ ;
- $\eta_{rev} = 1 - \frac{T_1}{T_3}$ ;

**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.

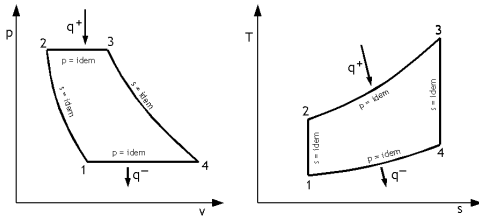


- $\overleftarrow{Q} = u_3 - u_2 = c_v(T_3 - T_2)$ ;
- $\overrightarrow{Q} = u_4 - u_1 = c_v(T_4 - T_1)$ ;
- $l = c_v(T_3 - T_4) - c_v(T_2 - T_1) = c_v T_3(1 - \frac{1}{r_{vol}^{n-1}}) - c_v T_1(r_{vol}^{n-1} - 1) = c_v T_3(1 - \frac{T_4}{T_3}) - c_v T_1(\frac{T_2}{T_1} - 1)$ ;
- $\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2}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

## 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.

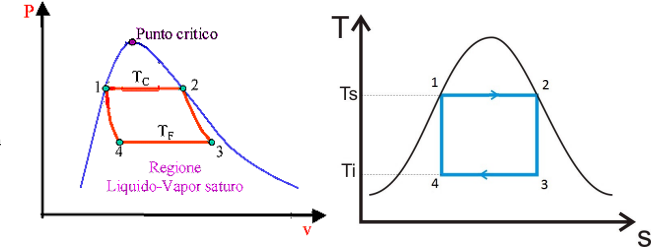
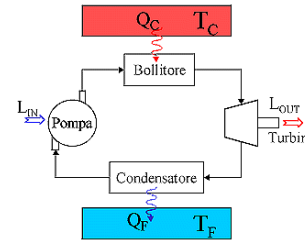
## 2.3 Cicli a Vapore

### 2.3.1 Generale

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

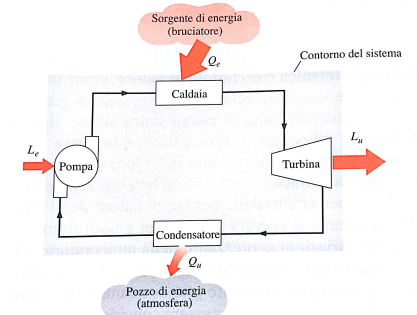
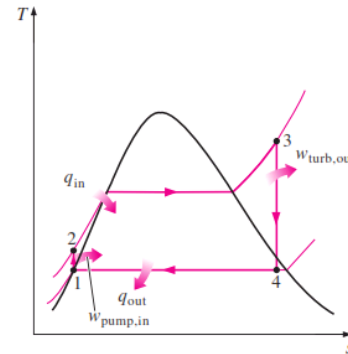
### 2.3.2 Cicli diretti

#### Carnot



**Rankine 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.

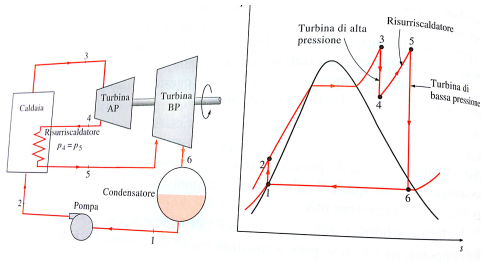
- (1)  $\rightarrow$  (2)  $\Delta S = 0$ ;
- (2)  $\rightarrow$  (3)  $P = cost$ ;
- (3)  $\rightarrow$  (4)  $\Delta S = 0$ ;
- (4)  $\rightarrow$  (1)  $P = cost, T = cost$ ;



**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):

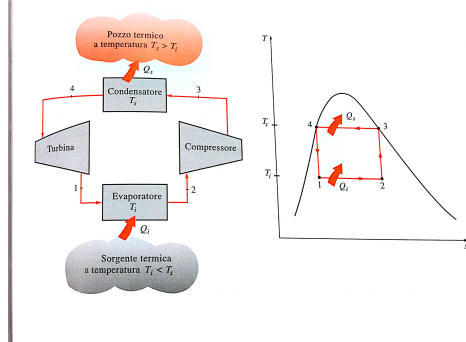
- (1)  $\rightarrow$  (2)  $\Delta S = 0$ ;

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

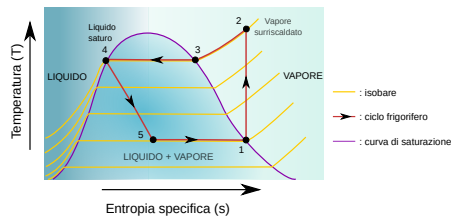


### 2.3.3 Cicli indiretti

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

### 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**  $\rho = \frac{I_{rfl}}{I}$ ;

**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	$n = \frac{c_x - c_p}{c_x - c_v}$	$l$	$q$	$\Delta u$	$\Delta s$	$\Delta h$
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	$\Phi$	$T$	$\dot{Q}$	$R_{tot}$
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	$\Phi$	$\dot{q}_{per\ unit\grave{a}\ di\ lung}$	$\dot{Q}$	$T$
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	$T$	$R$	<i>Superficie</i>
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	$\frac{\sigma_0(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$