



# **RIASSUNTO**

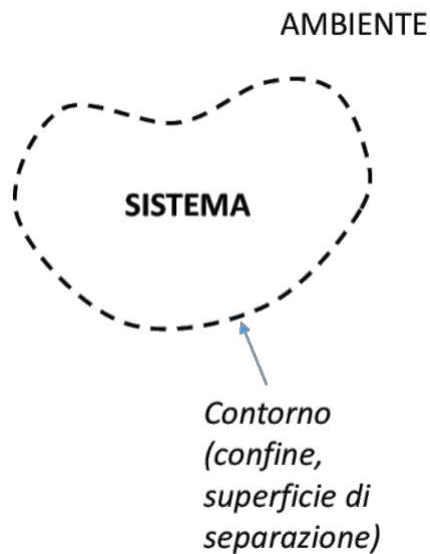
Francesca Liviero

La termodinamica si occupa delle reciproche trasformazioni tra le varie forme di energia in sistemi interagenti tra loro. È nata durante la II rivoluzione industriale per soddisfare la necessità di trasformare l'energia termica in meccanica.

**Sistema:** parte finita di un universo fisico, con contorno reale o ideale

**Ambiente:** complemento del sistema rispetto all'universo considerato

AMBIENTE + SISTEMA = UNIVERSO



- **Sistema aperto:** sistema che può scambiare materia con l'ambiente
- **Sistema chiuso:** sistema che non può scambiare materia con l'ambiente, ma può scambiare energia
- **Sistema isolato:** sistema che non può scambiare né materia né energia con l'ambiente

Le proprietà sono le caratteristiche di un sistema termodinamico e possono essere intensive ed estensive.

- **Proprietà intensiva:** non dipende dalle dimensioni del sistema
- **Proprietà estensiva:** dipende linearmente dalla massa del sistema stesso

## SISTEMA INTERNAZIONALE DI MISURA

Grandezza fisica	Simbolo	Nome dell'unità SI	Simbolo
Intensità di corrente elettrica	$I, i$	ampere	$A$
Intensità luminosa	$I_v$	candela	$cd$
Intervallo di tempo	$t$	secondo	$s$
Lunghezza	$l$	metro	$m$
Massa	$m$	chilogrammo	$kg$
Quantità di sostanza	$n$	mole	$mol$
Temperatura termodinamica	$T$	kelvin	$K$

## ALCUNE GRANDEZZE FISICHE DERIVATE

Grandezza fisica	Simbolo	Nome dell'unità SI	Simbolo
Accelerazione	$a$		$\frac{m}{s^2}$
Accelerazione angolare	$\alpha, \varpi$		$rad \cdot s^{-2}$
Area	$A$	metro quadro	$m^2$
Capacità elettrica	$C$	farad	$F$
Carica elettrica	$q$	coulomb	$C$

Densità	$\rho, d$	chilogrammo al metro cubo	$\frac{kg}{m^3}$
Densità flusso magnetico	$B$	tesla	$T$
Energia, lavoro, calore, entalpia	$E; W, L; Q, H$	joule	$J = N \cdot m$
Forza	$F$	newton	$N$
Frequenza	$f, \nu$	hertz	$Hz = s^{-1}$
Potenza	$P$	watt	$W = J \cdot s^{-1}$
Potenziale elettrico, forza elettromotrice, tensione elettrica	$V; fem$	volt	$V$
Pressione	$p$	pascal	$Pa = N \cdot m^{-2}$
Resistenza elettrica	$R$	ohm	$\Omega$
Temperatura	$T$	grado Celsius	$^{\circ}C = K - 273$
Velocità	$v$	metro al secondo	$\frac{m}{s}$
Velocità angolare	$\omega$		$rad \cdot s^{-1}$
Volume	$V$	metro cubo	$m^3$
Volume molare	$V_m$		$m^3 \cdot mol^{-1}$

### Densità

$$\rho = \frac{m}{V}$$

### Pressione

$$p = \frac{F_{\perp}}{S}$$

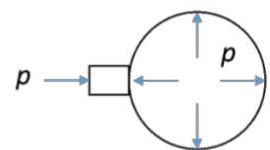
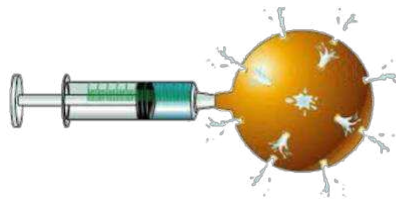
$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 0,1 \text{ MPa} = 100 \text{ kPa}$$

$$1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ mmHg} = 133,322 \text{ Pa}$$

### Principio di Pascal

La pressione applicata ad un fluido racchiuso in un recipiente si trasmette invariata da ogni parte del fluido e alle pareti del recipiente.



## TEMPERATURA

La temperatura è una proprietà fisica intensiva, che nasce storicamente come tentativo di quantificare le nozioni comuni di “caldo” e “freddo”.

Oggi, la temperatura viene definita come l'indice dello stato di agitazione molecolare del sistema. Quando due sistemi si trovano in equilibrio termico non avviene nessun trasferimento di energia e si dice sono alla stessa temperatura.

### Principio zero della termodinamica

Se due sistemi (A e B) sono in equilibrio termico tra di loro e un terzo sistema (C) È in equilibrio termico con A, allora anche i sistemi B e C sono in equilibrio termico.

### Scale di temperatura

$$T_{(F)} = T_{(^{\circ}C)} \times 1,8 + 32$$

$$T_{(K)} = T_{(^{\circ}C)} + 273,15$$

## ENERGIA

Energia meccanica: somma di energia cinetica ed energia potenziale attinenti allo stesso sistema

Energia cinetica

$$K = \frac{1}{2}mv^2$$

Energia potenziale

$$U = mgh$$

## LAVORO

$$W = \int_a^b F \cdot ds$$

- Lavoro elettrico: lavoro associato di elettroni che si muovono per effetto di una differenza di potenziale elettrico
- Lavoro magnetico: lavoro effettuato da una forza generata da un campo magnetico
- Lavoro di polarizzazione elettrica: lavoro effettuato da forze elettrostatiche dovute a fenomeni di polarizzazione

## CALORE

Per gli studiosi del XIX secolo, il calore era un fluido invisibile (calorico) che passava da corpi più caldi a quelli più freddi. Questo pensiero fu sostituito dalla teoria cinetica, secondo cui le molecole sono piccole sfere in movimento che possiedono energia cinetica.

Il calore è la forma di energia trasferita tra due sistemi (o tra sistema e ambiente) in virtù di una differenza di temperatura.

$$Q = \dot{Q}\Delta T$$

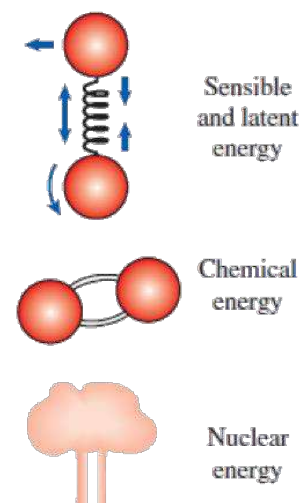
$\dot{Q}$ : flusso di calore

## ENERGIA INTERNA

$$\Delta U = mc_v\Delta T$$

L'energia interna può essere definita come la somma di tutte le forme microscopiche di energia di un sistema.

- Energia sensibile: associato alle energie cinetiche delle molecole
- Energia latente: associata ai cambiamenti di fase di una sostanza
- Energia chimica: associata ai legami atomici di una molecola
- Energia nucleare: associata ai legami forti all'interno di un atomo



Per questo corso

ENERGIA INTERNA = ENERGIA TERMICA  
(= SENSIBILE + LATENTE)

## STATO ED EQUILIBRIO

Stato: insieme dei valori assunti dei parametri macroscopici che caratterizzano il sistema



Uno stato termodinamico è in equilibrio se i parametri che lo definiscono sono stazionari.

- Equilibrio termico: nessun cambiamento di temperatura nell'intero sistema
- Equilibrio meccanico: nessun cambiamento di pressione di alcun punto del sistema
- Equilibrio di fase: nessun cambiamento di massa di ognuna fase in alcun punto del sistema
- Equilibrio chimico: nessuna reazione chimica

### Postulato di stato

Lo stato di un sistema semplice comprimibile è completamente definito da due proprietà intensive indipendenti.

Funzione di stato: grandezza fisica il cui valore dipende solamente dallo stato iniziale e finale del sistema

### I principio della termodinamica

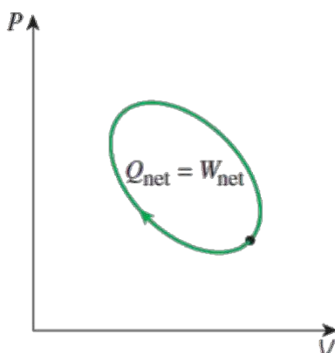
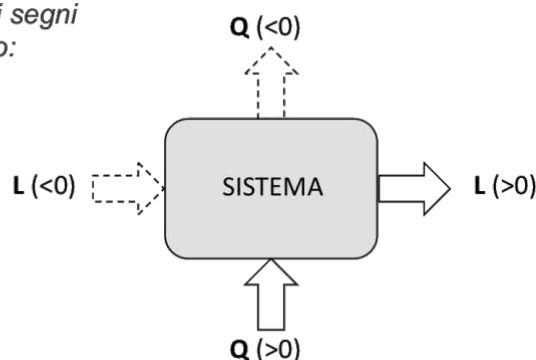
L'energia di un sistema termodinamico isolato non si crea né si distrugge, ma si trasforma, passando da una forma all'altra.

$$\Delta E_{\text{sistema}} = E_{\text{in}} + E_{\text{out}}$$

### I principio di un sistema termodinamico chiuso

$$\Delta U = Q - W$$

*Convenzione sui segni  
di calore e lavoro:*



Ciclo termodinamico: successione finita di trasformazioni termodinamiche al termine delle quali il sistema torna al suo stato iniziale

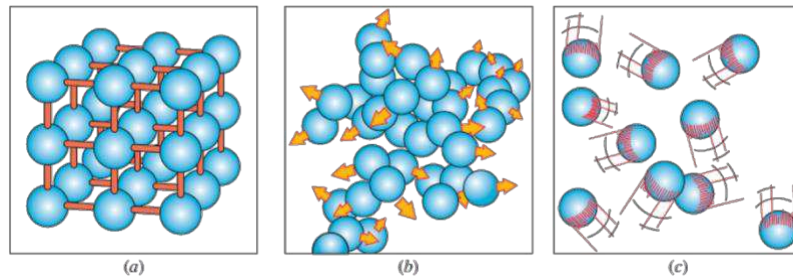
$$\Delta U = 0$$

## PROPRIETÀ DELLE SOSTANZE PURE

Sostanza pura: sostanza che ha una composizione chimica fissa in tutta la massa presa in considerazione

Fasi:

- a) Solida
- b) Liquida
- c) Aeriforme

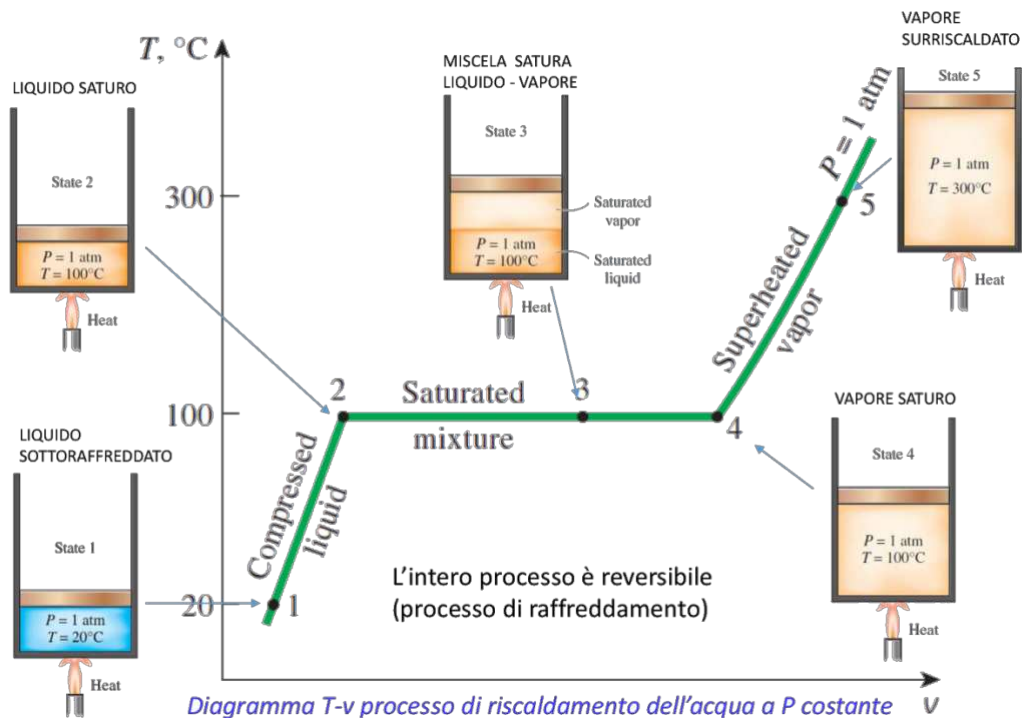


Un sistema termodinamico costituito da una massa finita di una sostanza pura può essere descritto da tre variabili misurabili: la pressione  $P$ , il volume  $V$ , e la temperatura  $T$ .

Equazione di stato:  $f(P, V, T) = 0$

Transizioni di fase:

- Liquido sotto raffreddato: liquido al di sotto della temperatura di ebollizione
- Liquido saturo: liquido alla pressione e temperatura di ebollizione
- Miscela saturo liquido-vapore: in equilibrio tra fase liquida e gassosa
- Vapore saturo: vapore alla pressione e temperatura di saturazione
- Vapore surriscaldato: vapore al di sopra della temperatura di saturazione

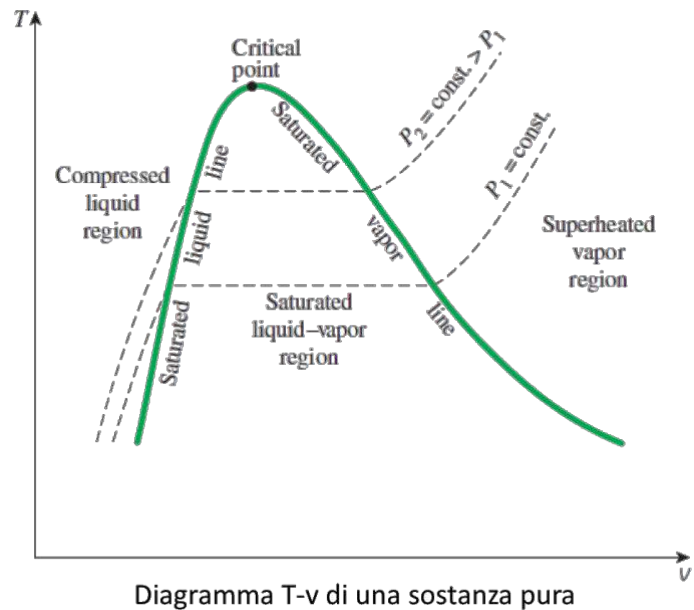


- Calore latente: quantità di energia (calore) assorbita o rilasciata durante un processo di cambiamento di fase
- Calore latente di fusione: quantità di calore assorbita durante la fusione
- Calore latente di vaporizzazione: quantità di calore assorbita durante la vaporizzazione

Punto critico: punto nel quale gli stati liquido saturo e vapor saturo sono identici

Titolo

$$x = \frac{m_{vap}}{m_{tot}} = \frac{v_x - v_{liq}}{v_{vap} - v_{liq}}$$



## GAS IDEALI

Gas ideale

- Le molecole sono puntiformi, identiche tra loro e indistinguibili
- Il moto delle molecole è casuale
- Le molecole interagiscono tra loro e con le pareti del recipiente mediante urti perfettamente elastici
- Le molecole sono non interagenti

Equazione di stato di un gas ideale

$$PV = nR_u T$$

$$PV = mRT$$

$$R_u = 8,31447 \text{ J/mol K}$$

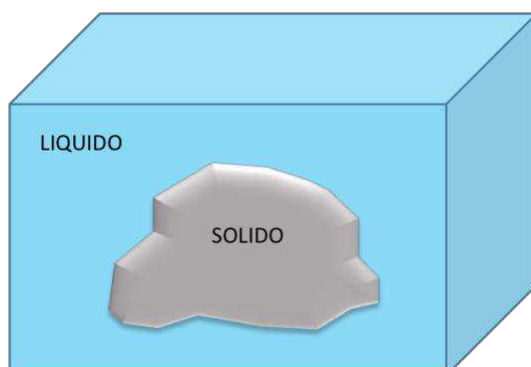
$$R = \frac{R_u}{MM}$$



I gas reali si comportano come gas ideali a bassa pressione, alta temperatura (in generale lontano dal punto critico).

## LIQUIDI E SOLIDI INCOMPRESSIBILI

Fattore di comprimibilità Z: parametro adimensionale che quantifica la deviazione dal comportamento di gas ideale



$$Pv = ZRT$$

$$Z = \frac{v}{v_{ideale}}$$

- $Z = 1$  per un gas ideale
- $Z <, =, > 1$  per un gas reale

I solidi e i liquidi vengono considerati incompressibili, ovvero  $v = \text{costante}$ .

## ANALISI ENERGETICA DEI SISTEMI CHIUSI

I principio di un sistema termodinamico chiuso

$$\Delta U = Q - W$$

### LAVORO

$$W = \int_a^b F \cdot ds = P\Delta V = m(c_p - c_v)\Delta T$$

⚠ Lavoro dipende non solo dagli stati iniziali e finali del processo, ma anche dal percorso.

### ENTALPIA

$$H = U + PV$$

⚠ L'entalpia non ha alcun particolare significato fisico.

Variazione di entalpia:

$$\Delta H = mc_p\Delta T$$

Capacità termica (specifica):  $C = \frac{\delta Q}{dT}$

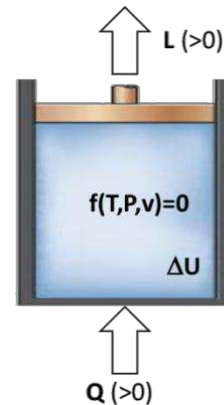
In generale la capacità termica (specifica) non rimane costante durante una trasformazione termodinamica. Dunque è conveniente definire il calore specifico, ovvero la quantità di energia necessaria per aumentare di 1° la temperatura della massa unitaria di una sostanza.

Calore specifico a volume costante:  $c_v = \left(\frac{\delta u}{\delta T}\right)_v$

Calore specifico a pressione costante:  $c_p = \left(\frac{\delta h}{\delta T}\right)_p$

Nel modello teorico del gas perfetto,  $c_v$  e  $c_p$  sono costanti e valgono:

Gas	$c_v$	$c_p$	$k = \frac{c_p}{c_v}$
monoatomico	$\frac{3}{2}R$	$\frac{5}{2}R$	$\frac{5}{3}$
biatomico	$\frac{5}{2}R$	$\frac{7}{2}R$	$\frac{7}{5}$
poliatomico	$\frac{7}{2}R$	$\frac{9}{2}R$	$\frac{9}{7}$





## TRASFORMAZIONI TERMODINAMICHE DI UN SISTEMA ISOLATO (gas ideale)

Trasformazioni ideali: successioni continue di stati d'equilibrio



Nella termodinamica di equilibrio si considerano solo trasformazioni quasi statiche.

- Stazionario: costante nel tempo
- Uniforme: costante nello spazio

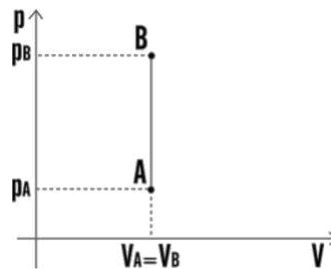
### TRASFORMAZIONE ISOCORA

$V = \text{costante}$

$$L = \int_a^b P dV = 0$$

$$Q = \Delta U$$

$$Q = \Delta U = c_v V \frac{\Delta P}{R}$$



### TRASFORMAZIONE ISOBARA

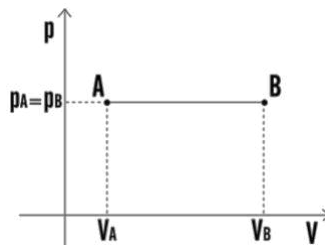
$P = \text{costante}$

$$L = P \Delta V$$

$$Q = \Delta H$$

$$\Delta U = \Delta H - P \Delta V$$

$$L = P \Delta V = n R_u \Delta T$$



### TRASFORMAZIONE ISOTERMA

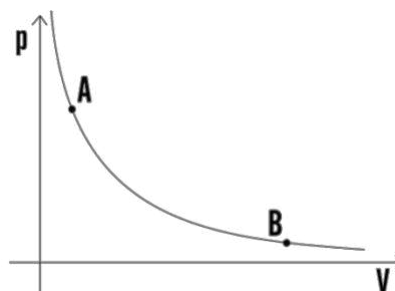
$T = \text{costante}$

$$\Delta H = 0$$

$$\Delta U = 0 \Rightarrow Q = L$$

$$L = n R_u T \cdot \ln \frac{P_a}{P_b}$$

$$Q = P_b V_b \cdot \ln \frac{P_a}{P_b}$$



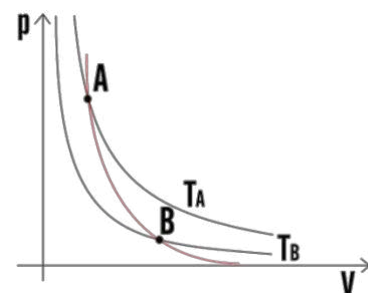
### TRASFORMAZIONE ADIABATICA

Una trasformazione può risultare adiabatica quando il sistema è isolato termicamente, oppure quando sistema ambiente sono la stessa temperatura.

$Q = \text{costante}$

$$L = -\Delta U$$

$$PV^k = \text{costante}$$



### TRASFORMAZIONE POLIPROTICA

$$PV^n = \text{costante}$$

$$n = \frac{c - c_p}{c - c_v}$$

- $n = 0$  isobara
- $n = 1$  isoterma
- $n = \pm \infty$  isocora
- $n = k$  adiabatica

$$L = \frac{P_b V_b - P_a V_a}{1 - n}$$



Non è riferita necessariamente ad un gas ideale.

## SOLIDI E LIQUIDI INCOMPRESSIBILI

$v = \text{costante}$

$c_v = c_p = c$

$\Delta S = 0 \Rightarrow T_a \approx T_b$

$\Delta U = \Delta H$  per i solidi

$\Delta U = \Delta H + V\Delta P$  per i liquidi

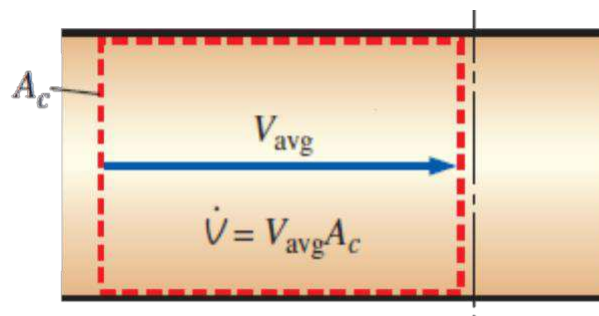
## BILANCI SUI SISTEMI APERTI

### Principio di conservazione della massa

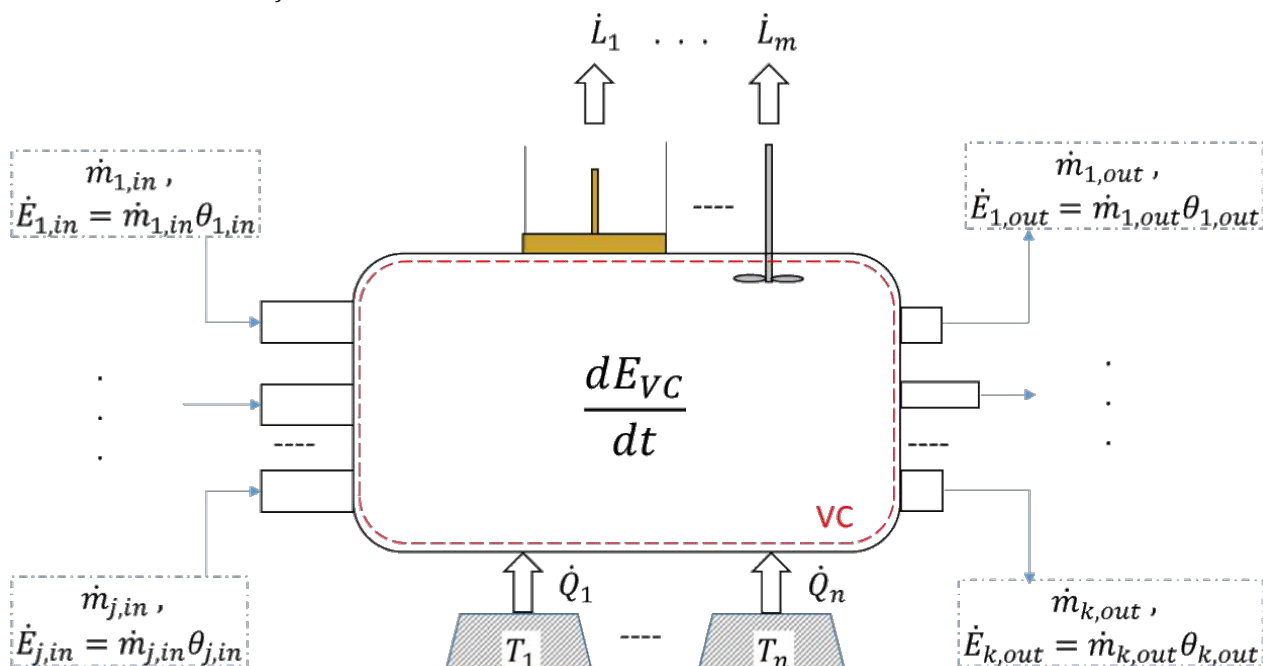
La variazione della massa contenuta all'interno di un volume di controllo sarà pari alla sola componente che attraverso la sua frontiera poiché non v'è generazione né distruzione di materia al suo interno.

$$m_{in} - m_{out} = \Delta m_{cv}$$

Portata massica:  $\dot{m} = \rho V_{avg} A_c = \rho \dot{V}$



$$\sum_j \dot{m}_{j,in} \theta_{j,in} - \sum_k \dot{m}_{k,out} \theta_{k,out} + \sum_n \dot{Q}_n - \sum_m \dot{L}_m = \frac{dE_{cv}}{dt}$$



Lavoro di pulsione: lavoro necessario per spingere una massa all'interno all'esterno di un volume di controllo

$$w_p = P v$$

Energia totale associata ad un flusso di materia:  $\theta = k + u_{pot} + u + w_p = \frac{v^2}{2} + gz + h$

Processo a flusso stazionario: processo durante il quale un fluido scorre in condizioni stazionarie attraverso un volume di controllo

- Le proprietà termodinamiche del fluido in entrata o in uscita rimangono costanti
- Le proprietà estensive/intensive all'interno del volume di controllo non variano nel tempo

## ENTROPIA

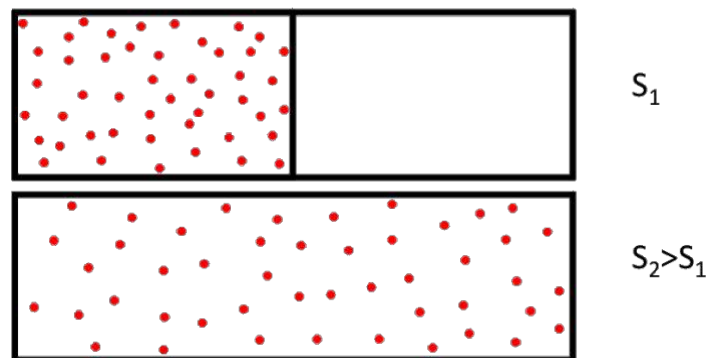
Secondo la meccanica statistica, l'entropia viene interpretata come una misura del disordine presente in un sistema.

Le molecole tenderanno a raggiungere lo stato più probabile.

### Il principio della termodinamica (versione statistica)

Un sistema isolato evolverà verso lo stato più probabile, cioè di massima entropia.

$$\Delta S_{tot} \geq 0$$



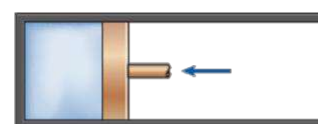
Una trasformazione si definisce reversibile se, partendo da uno stato di equilibrio, procede in modo tale che il sistema e l'ambiente possono sempre essere riportati nei rispettivi stati iniziali. Poiché la trasformazione deve passare attraverso una successione di stati di equilibrio, si tratta di una trasformazione quasi statica.

### Possibili cause di irreversibilità:

- La non-quasi staticità
- La presenza di attriti

⚠ Se sono nulli solo gli effetti dissipativi interni, allora si può parlare di trasformazione internamente reversibile. Mentre, se sono nulli solo gli effetti dissipativi esterni, allora si parla di trasformazione esternamente reversibile.

⚠ In natura le trasformazioni sono tutte irreversibili.



(a) Fast compression

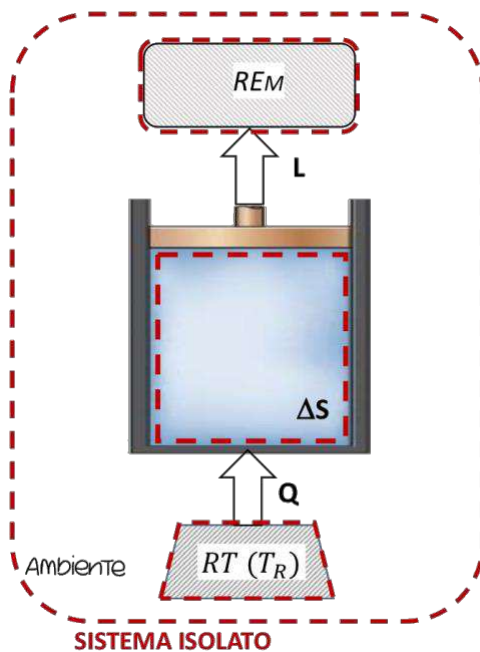


(b) Fast expansion



(c) Unrestrained expansion

## BILANCI DI ENTROPIA PER SISTEMI CHIUSI



- REM: riserva di energia meccanica (sistema capace di scambiare solamente energia meccanica)
- RT: riserva termica (capace di scambiare solamente energia termica)

$$\Delta S_{iso} = \Delta S_{sistema} + \Delta S_{RT} + \Delta S_{REM} \geq 0$$

Durante una trasformazione

- $\Delta S_{REM} = 0$
- $\Delta S_{RT} = \frac{Q}{T_{RT}}$

## ENTROPIA DI UNA SOSTANZA PURA

$$\Delta S = m\Delta s = m(s_2 - s_1)$$

### III principio della termodinamica

L'entropia di una sostanza cristallina pura, allo zero assoluto, è pari a zero.

### Variazione di entropia di un gas ideale:

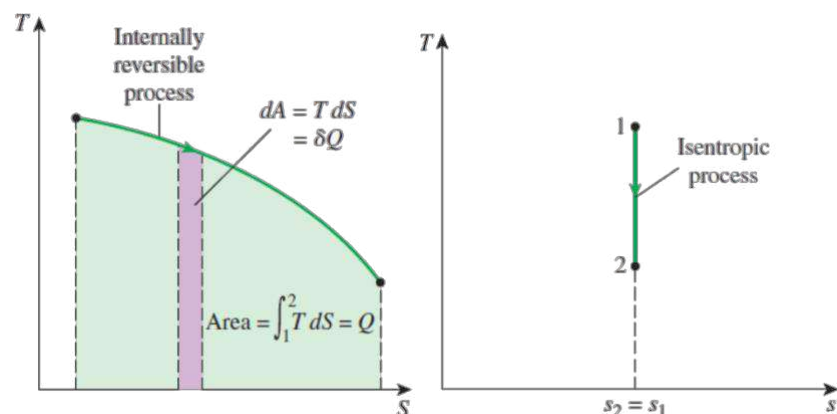
$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

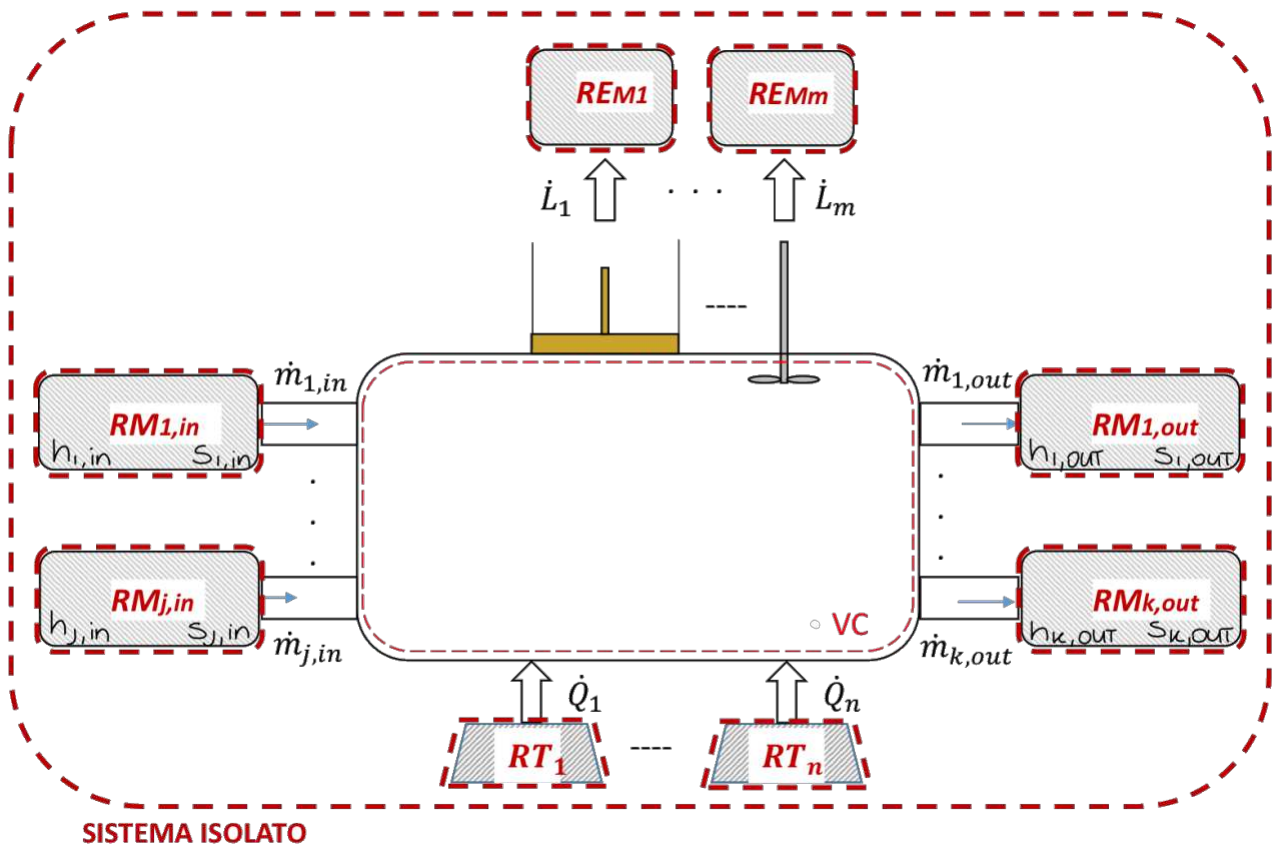
$$\Delta S_{tot} = \Delta S_{sistema} + \Delta S_{ambiente}$$

$$\Delta S_{irr} = \Delta S_{rev}$$

L'area sottesa dalla curva della trasformazione è pari al calore scambiato per un processo internamente reversibile.



## BILANCI DI ENTROPIA PER SISTEMI APERTI



Riserva di materia RMI: sistema capace di scambiare materia con il sistema aperto considerato

$$\sum_j \dot{m}_j s_j - \sum_k \dot{m}_k s_k + \sum_n \frac{\dot{Q}_n}{T_n} + \dot{S}_g = \frac{dS_{cv}}{dt}$$

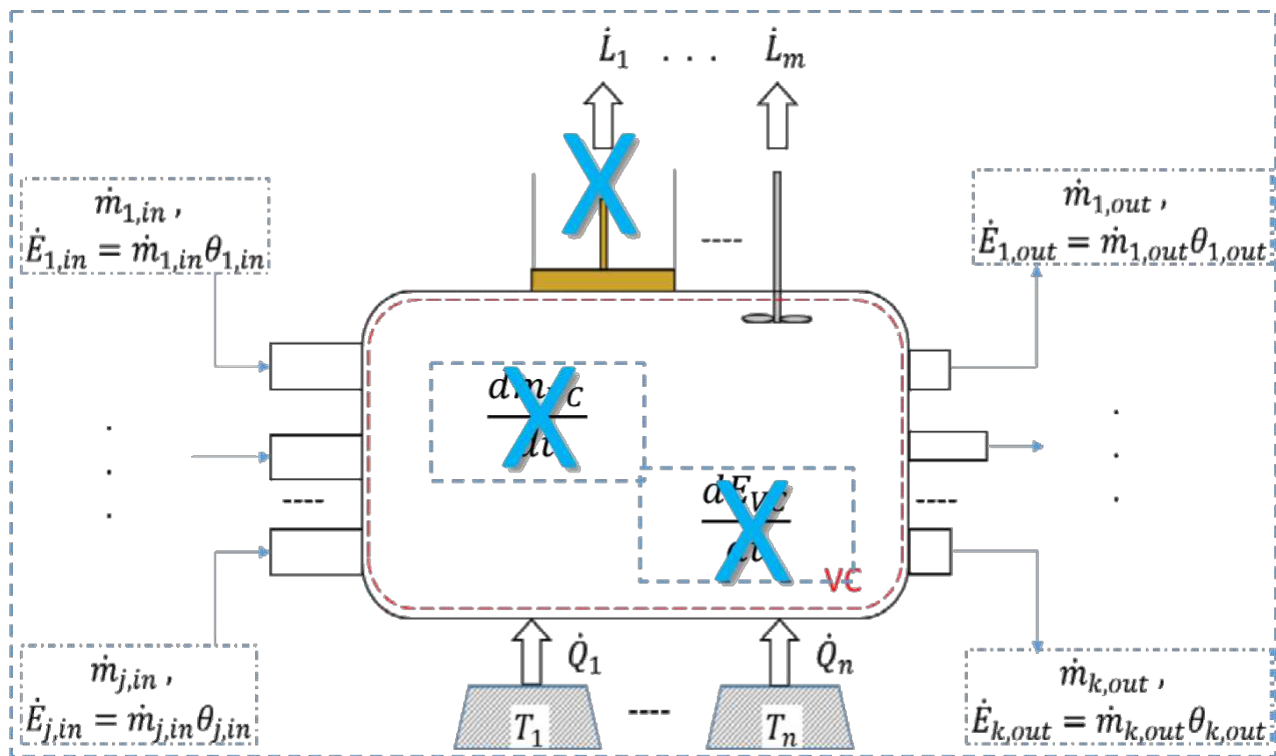
Bilancio entropia sistemi aperti stazionari

$$-\sum_j \dot{m}_j s_j + \sum_k \dot{m}_k s_k - \sum_n \frac{\dot{Q}_n}{T_n} = \dot{S}_g$$

$$w_{rev} \geq w_{act}$$

## BILANCI TERMODINAMICI SU DISPOSITIVI A FLUSSO STAZIONARIO

$$\begin{cases} \frac{dM}{dt} = \dot{m}_1 - \dot{m}_2 = 0 \\ \frac{dE}{dt} = \dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_2 h_2 + \dot{Q} - \dot{L} = 0 \\ \frac{dS}{dt} = \dot{m}_1 s_1 - \dot{m}_2 s_2 + \dot{S}_q + \dot{S}_{gen} = 0 \end{cases}$$



## MISCELATORE

Dispositivo dove avviene il mescolamento di due o più correnti fluide.

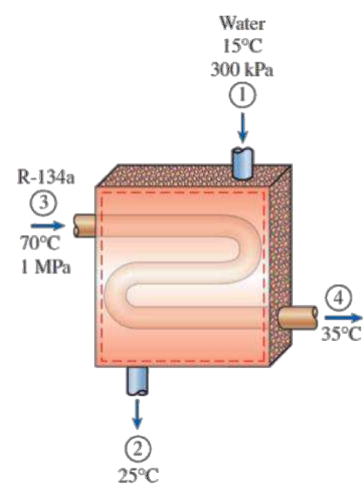
$$\begin{cases} \frac{dM}{dt} = \dot{m}_1 + \dot{m}_2 - \dot{m}_3 = 0 \\ \frac{dE}{dt} = \dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_3 h_3 = 0 \end{cases}$$

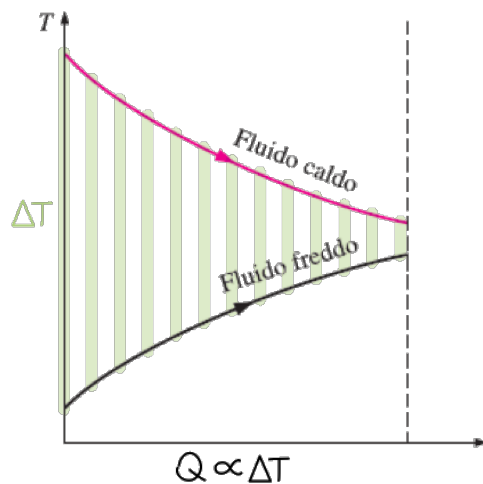
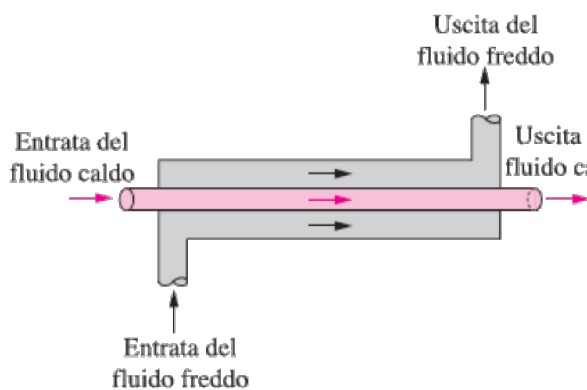
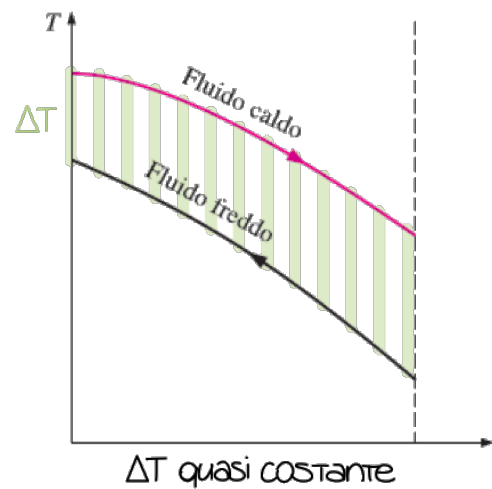


## SCAMBIATORE DI CALORE

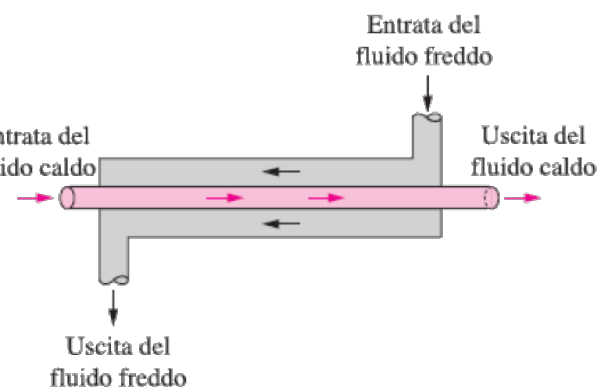
Dispositivo in cui due fluidi in movimento si scambiano calore senza mescolarsi.

$$\begin{cases} \frac{dM}{dt} = \dot{m}_1 + \dot{m}_3 - \dot{m}_2 - \dot{m}_4 = 0 \\ \frac{dE}{dt} = \dot{m}_c(h_1 - h_2) - \dot{m}_h(h_4 - h_3) = 0 \\ \frac{dS}{dt} = \dot{m}_c(s_2 - s_1) + \dot{m}_h(s_4 - s_3) - \dot{S}_{gen} = 0 \end{cases}$$



**Equicorrente:****Controcorrente:**

(a) Flussi paralleli



(b) Flussi contrari

**CONDENSATORE ED EVAPORATORE**

Scambiatori di calore in cui uno dei due fluidi subisce un cambiamento di fase.

**TURBINA**

Dispositivo capace di raccogliere l'energia cinetica e l'entalpia di un fluido e a trasformarla in energia meccanica.

Rendimento isoentropico di una turbina

$$\eta_T = \frac{w_{act}}{w_{rev}} = \frac{h_1 - h_{2act}}{h_1 - h_{2rev}}$$

**COMPRESSORE**

Dispositivo capace di comprimere un gas portandolo ad elevate pressioni.

Rendimento isoentropico di un compressore

$$\eta_T = \frac{w_{rev}}{w_{act}} = \frac{h_{2rev} - h_1}{h_{2act} - h_1}$$

**POMPA**

Dispositivo analogo al compressore, ma che opera su liquidi.

## VENTILATORE

Dispositivo usato per aumentare la velocità di un gas e che ne aumenta leggermente anche la pressione.

## VALVOLA DI LAMINAZIONE

Dispositivo che provoca una sensibile riduzione della pressione di un fluido attraverso il brusco restringimento della sezione di passaggio (la caduta di pressione è spesso accompagnata da un consistente abbassamento della temperatura).



$$\begin{aligned} Q &= 0 \\ L &= 0 \\ h_2 &\cong h_1 \Rightarrow T_2 \cong T_1 \\ u_1 + Pv_1 &= u_2 + Pv_2 \end{aligned}$$

## RENDIMENTO

### RENDIMENTO TERMICO

$$\eta = \frac{L_{utile}}{Q_H} = 1 - \frac{|Q_L|}{|Q_H|}$$



Un motore termico non può non trasferire calore ad una riserva termica a bassa temperatura

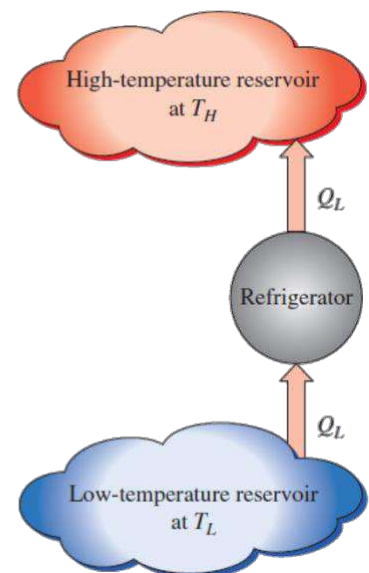
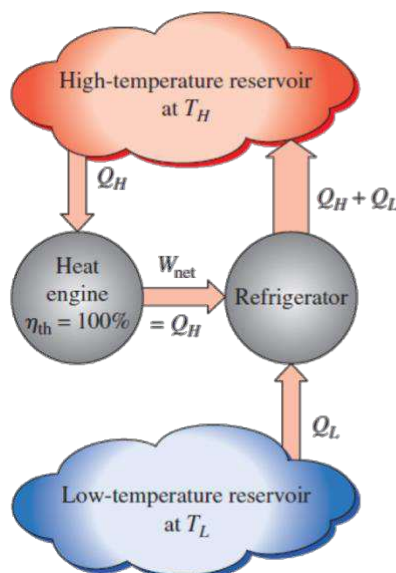
$$\begin{aligned} L_{utile} &= L_T - |L_P| \\ Q_H &= m(h_3 - h_{2R}) \end{aligned}$$

### Enunciato di Kelvin-Planck:

è impossibile realizzare una trasformazione ciclica il cui unico risultato sia la trasformazione in lavoro di tutto il calore assorbito da una sorgente termica

### Enunciato di Clausius:

è impossibile realizzare una macchina con funzionamento ciclico, capace di trasferire calore da una sorgente a bassa temperatura ad una ad alta temperatura senza l'apporto di un lavoro esterno



La violazione di uno dei due enunciati implica la violazione dell'altro.



Nessun motore termico può raggiungere un rendimento del 100%.



## MACCHINA FRIGORIFERA

Il trasferimento di calore da un ambiente a bassa temperatura ad uno ad alta temperatura richiede una macchina frigorifera.

### Coefficiente di prestazione di un ciclo frigorifero

$$COP_F = \frac{1}{\frac{\dot{Q}_H}{\dot{Q}_L} - 1} = \frac{|\dot{Q}_L|}{\dot{L}_C}$$

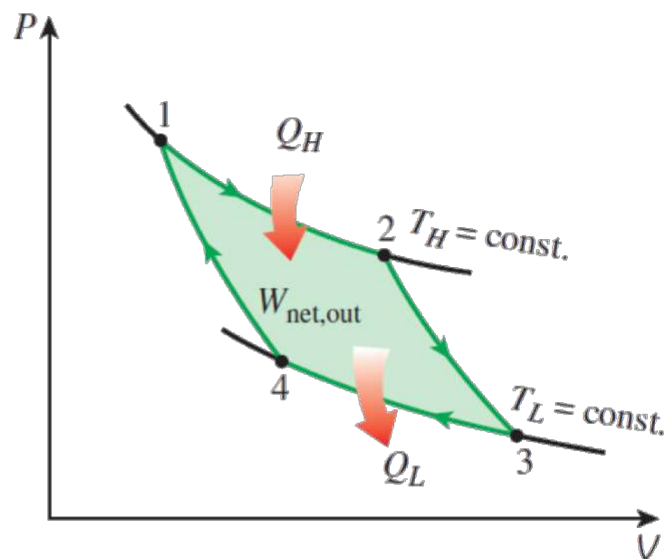
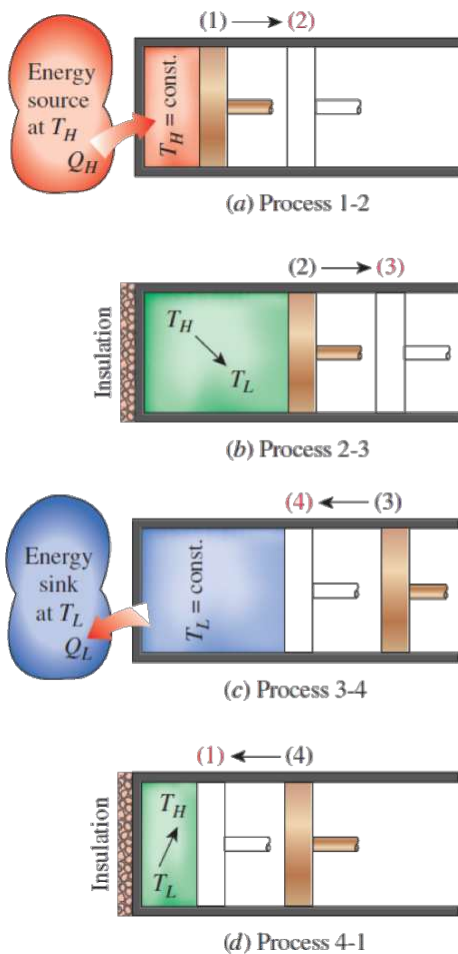
## POMPA DI CALORE

Una pompa di calore opera come un ciclo frigorifero ma serve a riscaldare un ambiente fornendo del calore assorbito da una sorgente a bassa temperatura (ambiente esterno).

### Coefficiente di prestazione di una pompa di calore

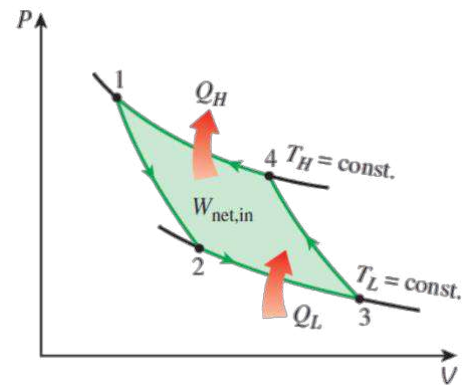
$$COP_{PC} = \frac{1}{1 - \frac{\dot{Q}_L}{\dot{Q}_H}} = 1 + COP_F$$

## CICLO DI CARNOT



- Processo 1-2: espansione isoterma reversibile
- Processo 2-3: espansione adiabatica reversibile
- Processo 3-4: compressione isoterma reversibile
- Processo 4-1: compressione adiabatica reversibile

Percorrendo il ciclo di Carnot in senso inverso si ottiene un ciclo frigorifero reversibile.



### Teorema di Carnot

- Il rendimento di una macchina termica irreversibile (reale) è sempre minore del rendimento di una macchina termica reversibile (ideale)
- Tutti i motori termici reversibili che operano tra le stesse riserve termiche, hanno rendimento uguale

### Rendimento di Carnot

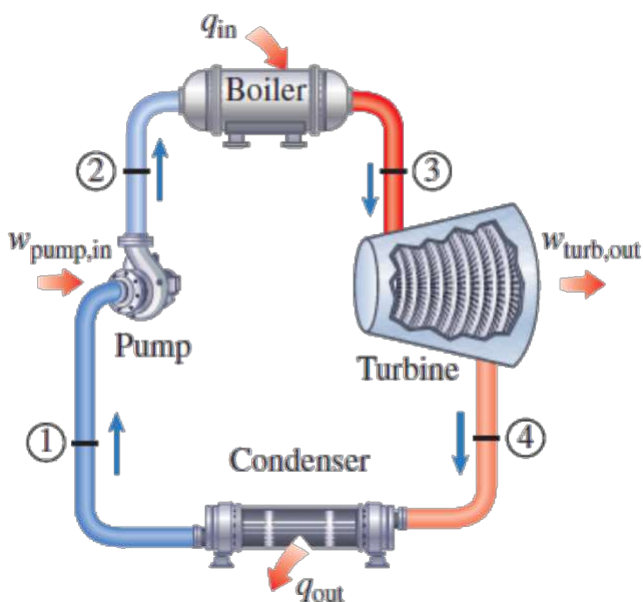
$$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

$$\eta \begin{cases} \leq \eta_c & \text{se il ciclo è irreversibile} \\ = \eta_c & \text{se il ciclo è reversibile} \\ \geq \eta_c & \text{se il ciclo è impossibile} \end{cases}$$

### RENDIMENTO DI II PRINCIPIO

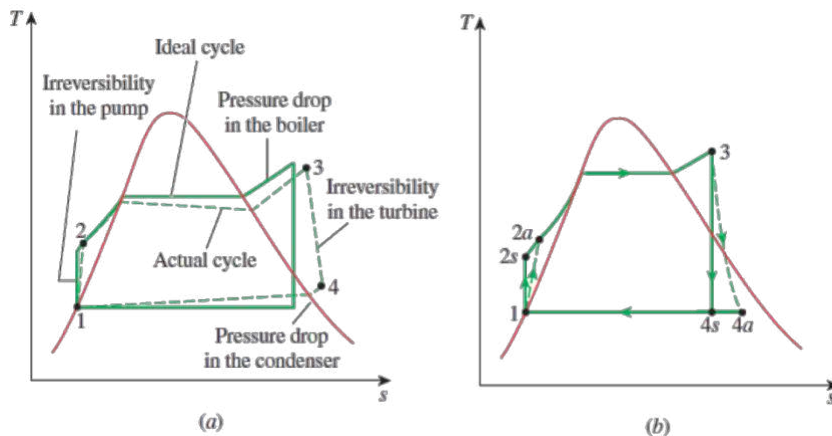
$$\eta_{II} = \frac{\eta}{\eta_c} = \frac{W_{out}}{W_{rev,out}}$$

### CICLO RANKINE



- 1-2: compressione, pompa adiabatica e isoentropica
- 2-3: caldaia isobara
- 3-4: espansione, turbina adiabatica e isoentropica
- 4-1: condensatore isobaro

$$T_3 = T_A + \Delta T \frac{s_3 - s_A}{s_B - s_A}$$



### Irreversibilità nel ciclo Rankine

- a) Deviazione di un ciclo vapore reale da un ciclo Rankine ideale
- b) Effetto delle irreversibilità della turbina e della pompa sul ciclo ideale

### Come aumentare il rendimento di un ciclo Rankine

- Abbassamento della pressione del condensatore (svantaggio: aumento della fase liquida che si condensa in turbina)
- Surriscaldamento del vapore ad alta temperatura (limite: stabilità del metallo con cui è costruita la caldaia)
- Aumento della pressione in caldaia

## CONDUZIONE

Conduzione: scambio tra particelle più energetiche di una sostanza a particelle meno energetiche come conseguenza della loro interazione



### Postulato di Fourier

La trasmissione del calore avviene dalla zona più calda quella più fredda.

### Legge di Fourier

$$\dot{Q}_{cond} = -\frac{\lambda A}{L} \Delta T = \frac{\Delta T}{R}$$

$\lambda$ : coefficiente di conduzione termica/conduittività termica del materiale

Diffusività termica:  $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}$

### Conduzione termica in cilindri

$$R_{cil} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L \lambda}$$

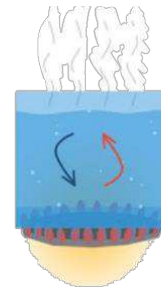
### Conduzione termica in sfere

$$R_{cil} = \frac{r_2 - r_1}{4\pi \lambda r_1 r_2}$$

## CONVEZIONE

Convezione: la trasmissione di calore si ha tra una superficie e un fluido in movimenti, i quali si trovano a temperature differenti

- Forzata
- Naturale

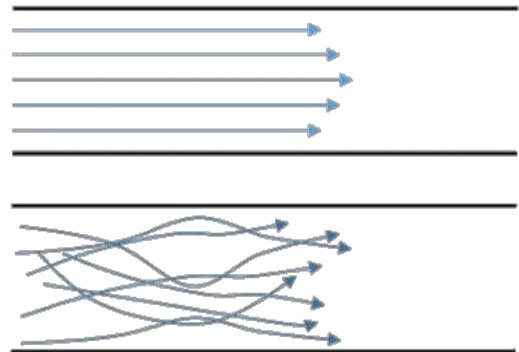


⚠ La distinzione tra i due tipi di convezione non è netta e spesso nelle situazioni reali essi coesistono.

$$\dot{Q} = hA\Delta T = \frac{\Delta T}{R}$$

Moto dei fluidi

- Laminare: Scorrimento di strati infinitesimi e gli uni sugli altri senza alcun tipo di rimescolamento di fluido
- Turbolento: senza seguire traiettorie ordinate



Viscosità cinematica: una misura della resistenza a scorrere di una corrente fluida sotto l'influenza della gravità

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

$\mu$ : viscosità dinamica

## NUMERO DI REYNOLDS

Il numero di Reynolds fu introdotto nel 1883 per caratterizzare la transizione tra flusso laminare e flusso turbolento. Esso viene usato per determinare il tipo di flusso che avviene in un sistema.

$$Re = \frac{\rho v \delta}{\mu} = \frac{\rho d \dot{V}}{\mu A}$$

$v$ : velocità del fluido

$\delta$ : lunghezza caratteristica della superficie attraverso la quale avviene il flusso

$\mu$ : viscosità del fluido

### Numero di Reynolds per il cilindro

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi\mu d}$$

$Re < 2000$  moto laminare

$Re > 4000$  moto turbolento

$2000 < Re < 4000$  regime di transizione

## DIAMETRO IDRAULICO

$$D_H = \frac{4A}{P}$$

### Sezione anulare di due tubi concentrici

$$D_H = d_e - d_i$$

## NUMERO DI PRANDTL

Il numero di Prandtl dà una misura di “quanto lontano” dalla parete arriva la perturbazione fluidodinamica o quella termica.

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda}$$

$Pr < 1$  gli effetti termici si estendono maggior distanza di quelli fluidodinamici

$Pr > 1$  Prevalgono gli effetti fluidodinamici

## NUMERO DI NUSSELT

$$Nu = L \cdot \frac{h}{\lambda}$$

Maggiore è il valore del numero di Nusselt, maggiore è l'influenza del trasporto di massa nello scambio termico.

### Teorema di Buckingham

Se un'equazione che descrive un fenomeno fisico è dimensionalmente omogenea, essa può essere ridotta ad una relazione tra una serie completa di gruppi adimensionali.

$$Nu = C \cdot Re^m \cdot Pr^n$$

Convezione naturale: il moto del fluido è dovuto alla presenza di forze di galleggiamento

Numero di Grashof: similmente al ruolo svolto dal numero di Reynolds nella convezione forzata, il numero di Grashof fornisce il criterio per stabilire se il flusso è laminare o turbolento

$$Gr = \frac{\text{forze di galleggiamento}}{\text{forze viscosive}}$$

$$Gr_{critico} \cong 10^9$$

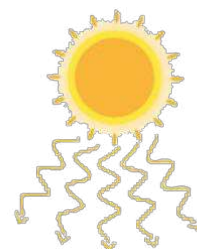
Trasmittanza  $u$ : coefficiente di scambio termico globale

$$\dot{Q} = uA\Delta T$$

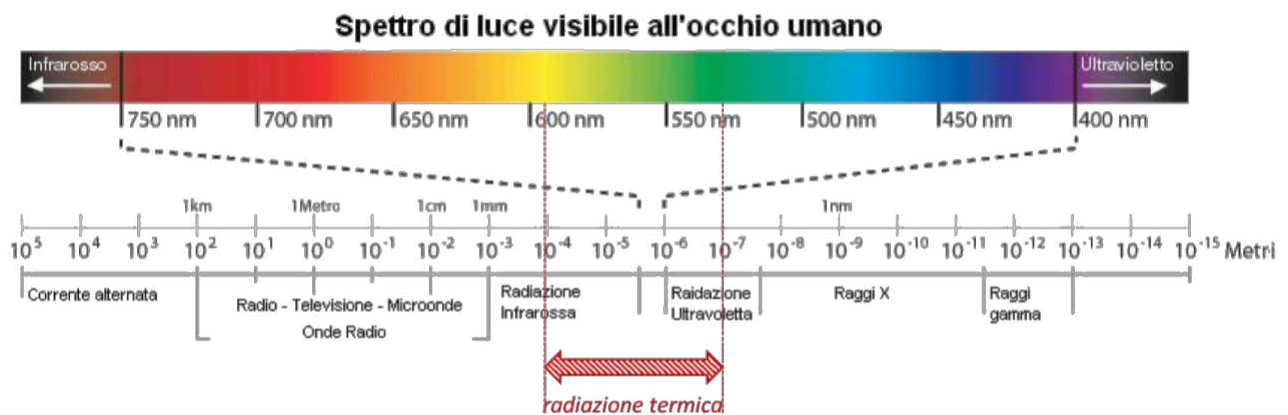
$$R_{tot} = \frac{1}{uA}$$

## IRRAGGIAMENTO

Irraggiamento: processo mediante il quale il calore viene trasmesso da un corpo a temperatura maggiore verso un corpo a temperatura minore, anche se tra essi c'è il vuoto

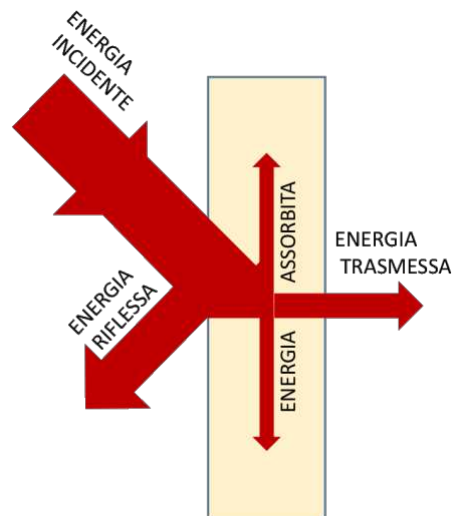


Radiazione termica: radiazione elettromagnetica che si identifica nella trasmissione di calore



Principio di conservazione dell'energia:

$$E_{inc} = E_{rif} + E_{ass} + E_{tra}$$



Corpo nero: oggetto ideale che assorbe tutta la radiazione elettromagnetica incidente senza rifletterla

Un radiatore perfetto (corpo nero) emette dalla sua superficie una potenza termica data dalla legge di Stefan-Boltzmann.

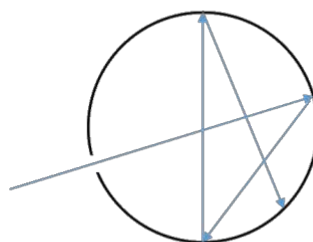
$$\dot{Q} = \sigma A_1 T_1^4$$

$A_1$ : area della superficie

$T_1$ : temperatura della superficie

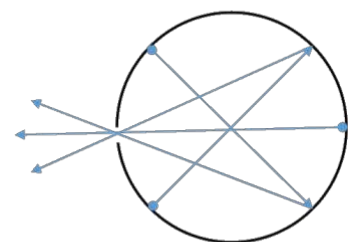
$\alpha$ : costante di Stefan-Boltzmann ( $\alpha = 5,67 \cdot 10^{-8}$ )

**Corpo nero come perfetto assorbitore**



$$\alpha = 1$$

**Corpo nero come perfetto emettitore**



$$\varepsilon = 1$$

Emissività  $\varepsilon$ : rapporto tra la radiazione emessa e quella emanata da un corpo nero alla stessa temperatura

$\varepsilon = 1$  nel caso di un corpo nero