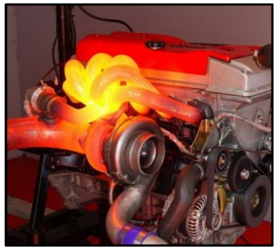
Capitolo 7

Entropia

Fisica Tecnica

Docente: Riccardo Zamolo (rzamolo@units.it)



A.A. 2025/2026

Introduzione - 1

Disuguaglianza di Clausius

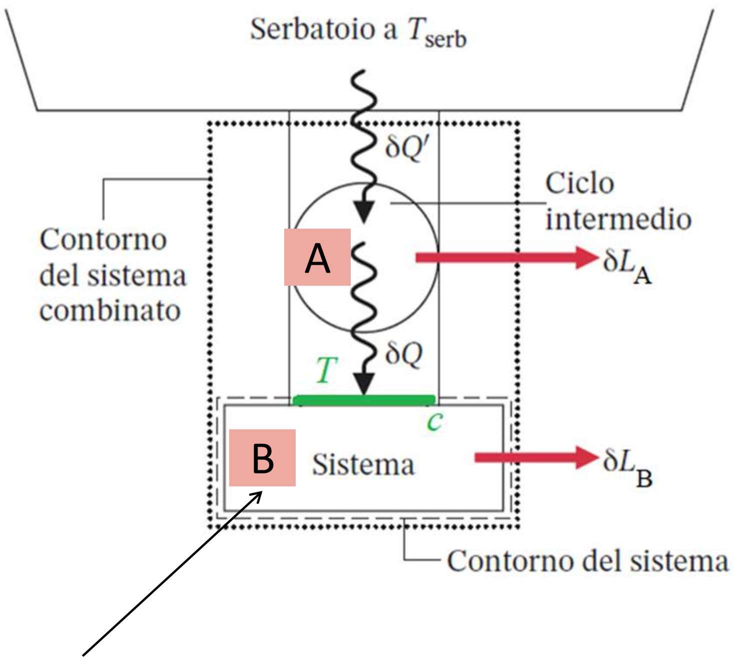
Si considera un sistema generico che esegue un **ciclo** scambiando calore attraverso il contorno.
δQ è la **quantità di calore** scambiata lungo un tratto infinitesimo del ciclo attraverso una parte del **contorno** del sistema che si trova alla **temperatura assoluta** T, variabile lungo la trasformazione ciclica:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

- T temperatura assoluta (in $[\mathrm{K}]$) della **parte di contorno** (non del sistema!) attraverso cui si scambia δQ
- il segno di **uguaglianza** vale solo per processi **internamente reversibili**, $\oint \frac{\delta Q}{T} = 0$
- in presenza di **irreversibilità (interne)** vale il segno di **minore**, $\oint \frac{\delta Q}{T} < 0$. In tal caso, a maggior ragione, la temperatura T assume il significato di temperatura del contorno, in quanto in un processo irreversibile perdiamo il controllo dell'evoluzione del valore delle variabili termodinamiche (come T) lungo la trasformazione

Introduzione - 2

Disuguaglianza di Clausius - dimostrazione



Sistema sul quale poniamo l'attenzione

A – sistema **ciclico reversibile** ausiliario che assorbe $\delta Q'$da un serbatoio termico a temp. T_{serb} (costante) e cede calore δQ a **B** attraverso il contorno c a temperatura T, producendo lavoro δL_A. Per definizione di scala Kelvin (rapporto calori = rapporto temperature assolute), per un **ciclo** infinitesimo:

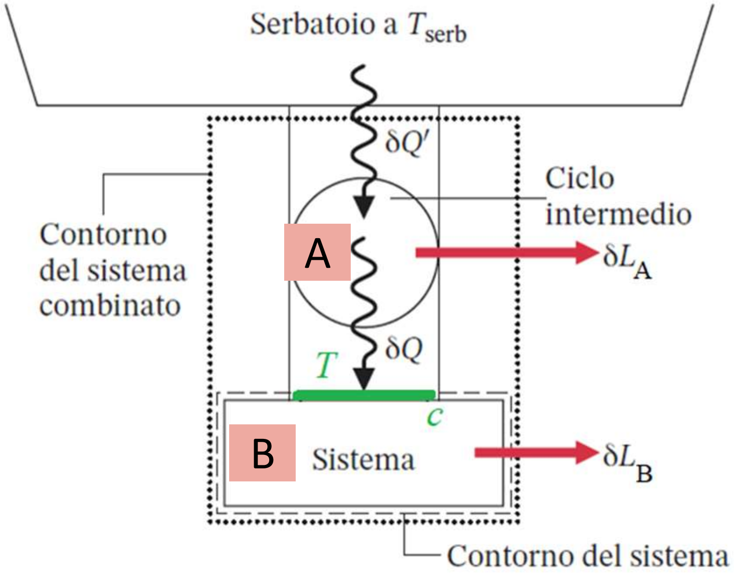
$$\frac{\delta Q'}{\delta Q} = \frac{T_{serb}}{T}$$

NB: possiamo scriverlo solo perché A è reversibile

B – sistema che assorbe calore δQ attraverso il contorno c a a temperatura$T$ producendo lavoro δL_B

Introduzione - 3

Disuguaglianza di Clausius - dimostrazione



Bilancio di I principio al sistema combinato **tot**=**A**+**B**:

$$\delta Q' - \delta L_{tot} = \mathrm{d}E_{tot}$$

dove $\delta L_{tot} = \delta L_A + \delta L_B$.
Dalla formula dei rapporti calori/temperature assolute:

$$\delta Q' = T_{\text{serb}} \frac{\delta Q}{T}$$

ottenendo:

$$\delta L_{tot} = T_{\text{serb}} \frac{\delta Q}{T} - \mathrm{d}E_{tot}$$

che integrato lungo un ciclo ($\oint \mathrm{d}E_{tot} = 0$) fornisce:

$$L_{tot} = \oint \delta L_{tot} = T_{\text{serb}} \oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0 \quad \Rightarrow \quad \oint_{\text{B}} \frac{\delta Q}{T} \leq 0$$

dove la disuguaglianza deriva da II principio K-P per sistema **tot** che scambia calore con un'unica sorgente ($L_{tot} \leq 0$).

Entropia

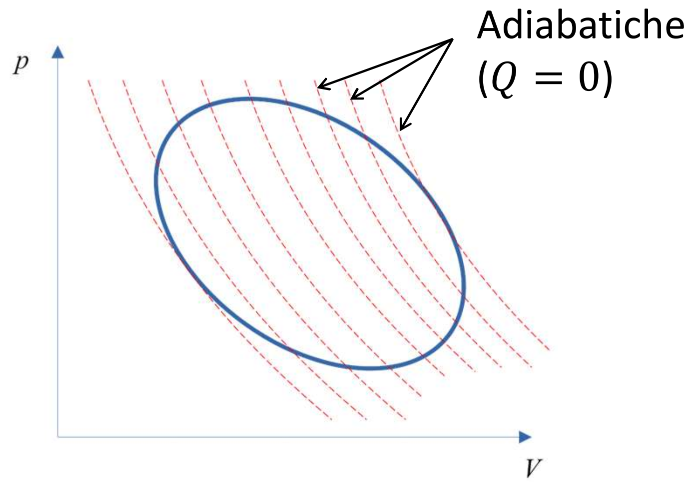
- **Ciclo reversibile** arbitrario suddiviso/approssimato in *n* cicli di Carnot (= 2 adiabatiche + 2 isoterme)
- Lungo le isoterme scambio lo **stesso calore** del **ciclo di partenza**
- I contributi dei tratti **adiabatici** si **annullano** (ogni tratto percorso 2 volte, in sensi opposti)
- Ciclo Carnot: rapporto calori = rapporto temperature:

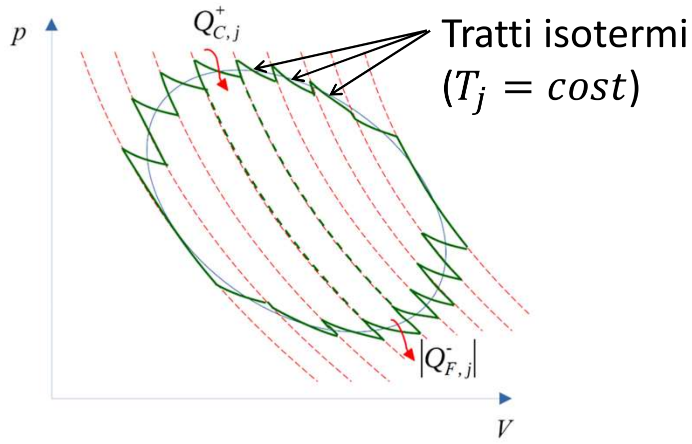
$$\frac{Q^+_{C,j}}{\left|Q^-_{F,j}\right|} = \frac{T_{C,j}}{T_{F,j}}$$

Temp. assolute [K]

$$\Rightarrow \quad \frac{Q^+_{C,j}}{T_{C,j}} - \frac{\left|Q^-_{F,j}\right|}{T_{F,j}} = \frac{Q^+_{C,j}}{T_{C,j}} + \frac{Q^-_{F,j}}{T_{F,j}} = 0$$

$$\Delta S_n = \sum_{j}^{2n} \frac{Q_j}{T_j} = 0 \quad \Rightarrow \quad \lim_{n\to\infty} \Delta S_n = \oint \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{rev} = 0$$

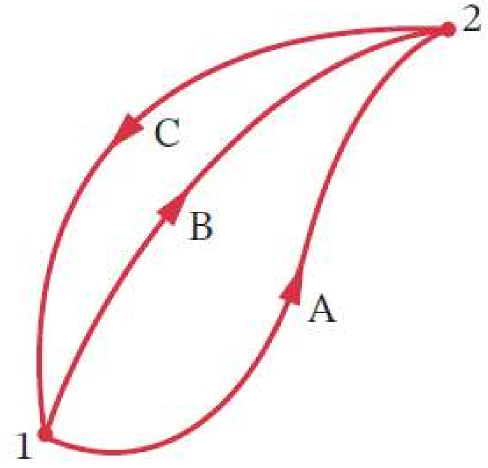




Entropia

- Se l'integrale circolare di una funzione è sempre nullo ($\oint \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{rev} = 0$) allora la funzione (il cui differenziale è l'argomento dell'integrale) è **funzione di stato**: la variazione della funzione lungo un percorso dipende **solo dai punti iniziale** (1) **e finale** (2) ma **non dal percorso scelto:**

$$\oint \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{rev} = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{rev} + \int_2^1 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{rev} = 0 \quad \Rightarrow \quad \int_{A,rev} \frac{\delta Q}{T} = \int_{B,rev} \frac{\delta Q}{T}$$



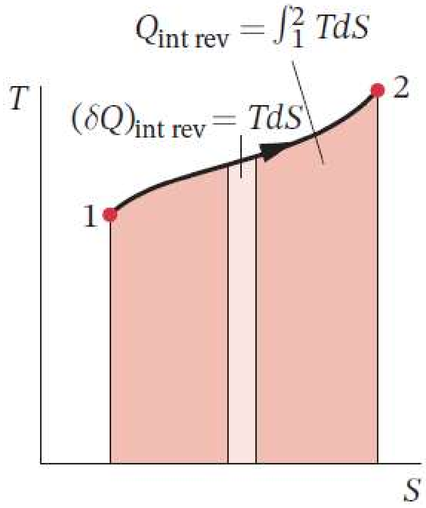
- Tale funzione è detta **entropia** S: $\mathrm{d}S = \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{rev}$ (NB reversibile)
- Variazione di entropia:

$$\Delta S_{1\to2} = S_2 - S_1 = \int_1^2 \mathrm{d}S = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{rev} \qquad \left[\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{K}}\right]$$

- Entropia S è proprietà estensiva

Processi internamente reversibili

Per processi intern. rev. $dS = \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{rev}$ $\Rightarrow$ $(\delta Q)_{rev} = TdS$

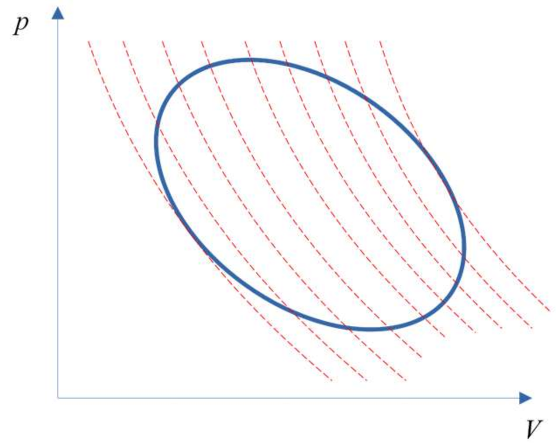


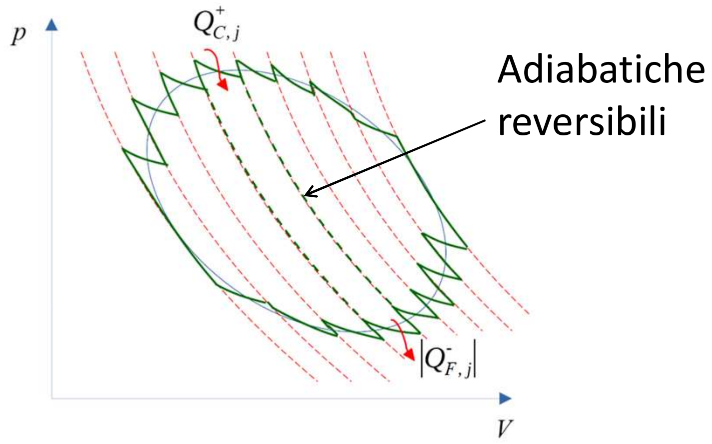
Il **calore** scambiato lungo un processo **reversibile** è proporzionale all'**area sottesa** dal tracciato del processo su un **diagramma (T,S)**

$$(Q)_{rev} = \int_1^2 TdS$$

Entropia - irreversibilità

- **Ciclo** arbitrario **(anche non reversibile)** suddiviso/approssimato in *n* cicli di Carnot
- Lungo le isoterme (**temperatura contorno**) scambio lo **stesso calore** del **ciclo di partenza**
- Per il I corollario Carnot, il rendimento η_j è sempre $\leq$ di quello del ciclo di Carnot tra le medesime isoterme





$$\eta_j = 1 - \frac{|Q^-_{F,j}|}{Q^+_{C,j}} \leq 1 - \frac{T_{F,j}}{T_{C,j}} \quad \Rightarrow \quad \frac{Q^+_{C,j}}{T_{C,j}} \leq \frac{|Q^-_{F,j}|}{T_{F,j}}$$

$$\frac{Q^+_{C,j}}{T_{C,j}} - \frac{|Q^-_{F,j}|}{T_{F,j}} \leq 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{Q^+_{C,j}}{T_{C,j}} + \frac{Q^-_{F,j}}{T_{F,j}} \leq 0$$

$$\Delta S_n = \sum_j^{2n} \frac{Q_j}{T_j} \leq 0 \quad \Rightarrow \quad \lim_{n\to\infty} \Delta S_n = \oint \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_c \leq 0$$

Temperatura al contorno *c*

(Dis)uguaglianza di Clausius

$$\oint \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_c \leq 0 \qquad \Rightarrow \qquad \oint \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_c = -\sigma_{ciclo}$$

Temperatura al contorno c

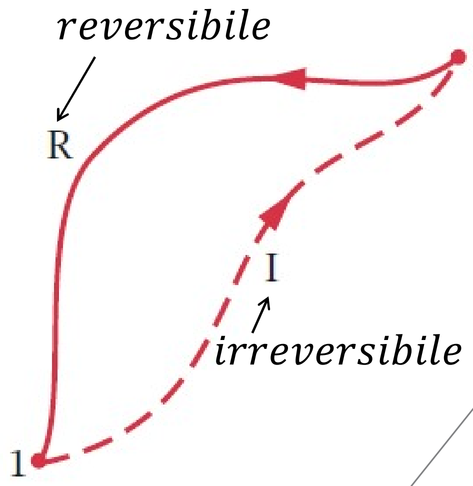
Entropia generata a causa di irreversibilità

$\sigma_{\text{ciclo}} = 0$ Trasformazione reversibile (NB: $\mathrm{d}S = \frac{\delta Q}{T}$ induce funzione di stato S)

$\sigma_{\text{ciclo}} > 0$ Trasformazione irreversibile (NB: $\frac{\delta Q}{T}$ non induce più una funzione di stato)

$\sigma_{\text{ciclo}} < 0$ Trasformazione impossibile (non è possibile «distruggere» entropia)

Bilancio entropico sistemi chiusi - 1



$$\oint\left(\frac{\delta Q}{T}\right)_c = \int_1^2\left(\frac{\delta Q}{T}\right)_I + \int_2^1\left(\frac{\delta Q}{T}\right)_R =$$

$$= \int_1^2\left(\frac{\delta Q}{T}\right)_c + (S_1 - S_2) = -\sigma_I$$

$$\Downarrow$$

$$S_2 - S_1 = \int_1^2\left(\frac{\delta Q}{T}\right)_c + \sigma_I \qquad \left[\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{K}}\right]$$

Variazione di entropia

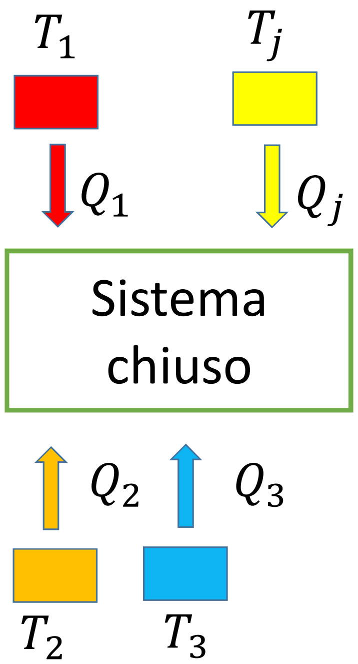
Scambio di entropia

Produzione di entropia, $\sigma_I \geq 0$

Ciclo (chiuso) 1→2→1 composto da:
- processo 1→2 irreversibile (I)
- processo 2→1 reversibile (R)

Bilancio entropico sistemi chiusi - 2

Altre forme del bilancio entropico



Bilancio entropico **istantaneo** per sistema con *N* parti di contorno che scambiano calore a **diversa temperatura** (es. ciclo Carnot diretto, analisi di sistema complessiva come sistema chiuso, ma singole componenti sono sistemi aperti, scambi termici a temperatura costante):

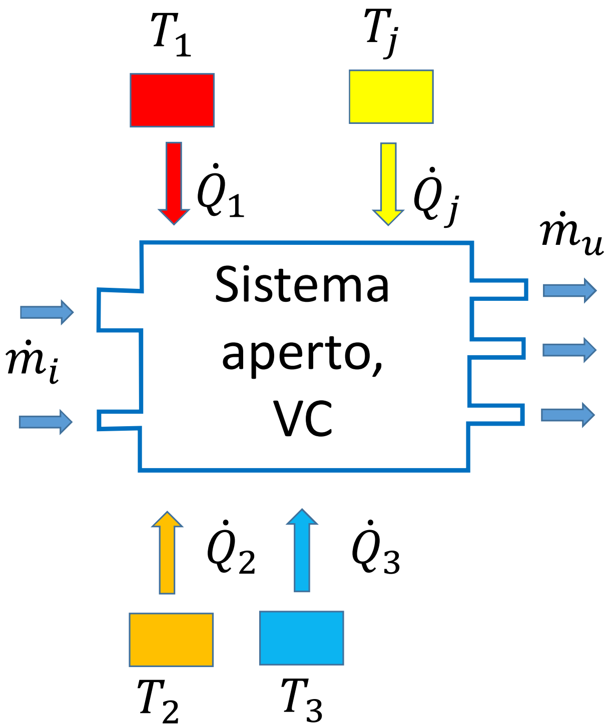
$$\frac{dS}{dt} = \sum_{j=1}^{N} \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \dot{\sigma} \qquad \left[\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{K}}\right]$$

Velocità di variazione di entropia del sistema

Tasso/rateo di scambio entropia

Tasso/rateo di produzione di entropia

Bilancio entropico sistemi aperti (volumi di controllo)



Entropie specifiche nelle sezioni ingresso/uscita $\left[\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg\ K}}\right]$

$$\boxed{\frac{dS_{VC}}{dt}} = \boxed{\sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \sum_i \dot{m}_i s_i - \sum_u \dot{m}_u s_u} + \boxed{\dot{\sigma}_{VC}}$$

Velocità di variazione di entropia del sistema

Tasso/rateo di scambio di entropia (flussi termici + flussi di massa)

Tasso/rateo di produzione di entropia nel sistema

Bilancio entropico volumi di controllo - 2

Analisi in **regime stazionario**

Bilancio di massa $$\sum_i \dot{m}_i = \sum_u \dot{m}_u$$

Bilancio di energia $$0 = \dot{Q}_{VC} - \dot{L}_{VC} + \sum_i \dot{m}_i \left(h_i + \frac{w_i^2}{2} + g z_i \right) - \sum_u \dot{m}_u \left(h_u + \frac{w_u^2}{2} + g z_u \right)$$

Bilancio di entropia $$0 = \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \sum_i \dot{m}_i s_i - \sum_u \dot{m}_u s_u + \dot{\sigma}_{VC} \qquad \left(\frac{dS_{VC}}{dt} = 0 \right)$$

Bilancio entropico volumi di controllo - 3

Analisi in regime stazionario

Per volumi di controllo con un solo ingresso (1) e una sola uscita (2):

Bilancio di entropia

$$s_2 - s_1 = \frac{1}{\dot{m}}\left(\sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j}\right) + \frac{\dot{\sigma}_{VC}}{\dot{m}}$$

Entropie specifiche nelle in ingresso/uscita $\left[\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg\ K}}\right]$

Nel caso particolare in cui non vi sia scambio di calore ($\dot{Q}_j = 0$), c'è comunque generazione di entropia nei processi reali ($\dot{\sigma}_{VC} > 0,\ \dot{\sigma}_{VC} = 0$ solo per processi reversibili):

$$s_2 - s_1 = \frac{\dot{\sigma}_{VC}}{\dot{m}}$$

Valutazione dell'entropia - 1

Acqua e fluidi frigoriferi

Entropia specifica

$$s = \frac{S}{m} \qquad \left[\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}\cdot\mathrm{K}}\right]$$

Valori di entropia sono tabulati (Tabelle T-4 e T-8) assieme ai dati di volume specifico, energia interna, entalpia relativi a liquido saturo e a vapore saturo (secco) per acqua e refrigerante R134a

Entropia specifica di vapore saturo a titolo *x*

$$s = (1 - x)\cdot s_l + x \cdot s_v = s_l + x\cdot(s_v - s_l)$$

s_l → liquido saturo

s_v → vapore saturo (secco)

Valutazione dell'entropia - 2

Acqua e fluidi frigoriferi

Entropia specifica di un liquido compresso

La tabella T-5 riporta i dati di volume specifico, energia interna, entalpia ed entropia specifiche relativi ad acqua liquida in funzione di pressione e temperatura:

$$s = s(T, p)$$

Si può approssimare il valore per un liquido compresso con il **valore di saturazione alla stessa temperatura**, esattamente come per l'energia interna ($u(T,p) \approx u_l(T)$):

$$s(T, p) \approx s_l(T)$$

Valutazione dell’entropia - 3

Acqua e fluidi frigoriferi

Entropia specifica di un vapore surriscaldato

Le tabelle T-4 e T-8 riportano per acqua e R134a i dati di volume specifico, energia interna, entalpia ed entropia specifiche relativi a vapore surriscaldato in funzione di pressione e temperatura:

$$s = s(T, p)$$

Valutazione dell’entropia - Diagrammi termodinamici

Approssimazione gas ideale *h=h(T)*

Diagramma T-s

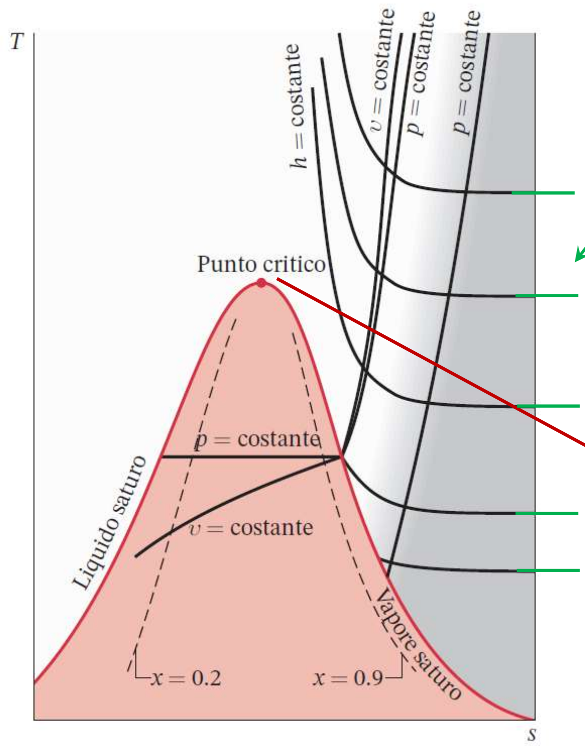
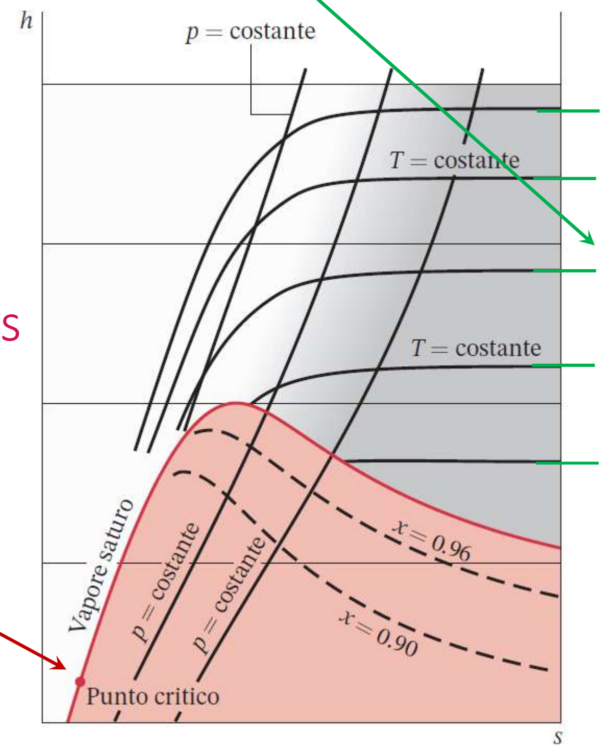


Diagramma h-s (Mollier)



Valutazione dell'entropia - 4

Equazioni del Tds

Permettono di valutare le variazioni di entropia a partire da proprietà termodinamiche più facilmente determinabili (vedi eq. I principio sist. chiusi, Capitolo 1).

NB

Forma 1 in funzione di energia interna u (e lavoro di volume): $(\delta q)_{rev} = Tds = du + pdv$

Forma 2 in funzione di entalpia h (e lavoro di pressione): $(\delta q)_{rev} = Tds = dh - vdp$

NB

Tutte grandezze specifiche

Valutazione dell'entropia – 5.1

Entropia **gas ideali** in funzione di T e v (forma 1 in funzione di u e dv)

$$T ds = du + p\, dv = c_v dT + p\, dv$$

$$\Downarrow$$

$$ds = c_v \frac{dT}{T} + \frac{p}{T} dv = c_v \frac{dT}{T} + R \frac{dv}{v}$$

Integrando da 1 a 2:

$$s(T_2, v_2) - s(T_1, v_1) = \int_{T_1}^{T_2} c_v(T) \frac{dT}{T} + R \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$$

Valutazione dell'entropia – 5.2

Entropia **gas ideali** in funzione di T e p (forma 2 in funzione di h e dp)

$$T ds = dh - v\, dp = c_p dT - v\, dp$$

$$\Downarrow$$

$$ds = c_p \frac{dT}{T} - \frac{v}{T} dp = c_p \frac{dT}{T} - R \frac{dp}{p}$$

Integrando da 1 a 2:

$$s(T_2, p_2) - s(T_1, p_1) = \int_{T_1}^{T_2} c_p(T) \frac{dT}{T} - R \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

Valutazione dell'entropia - 6

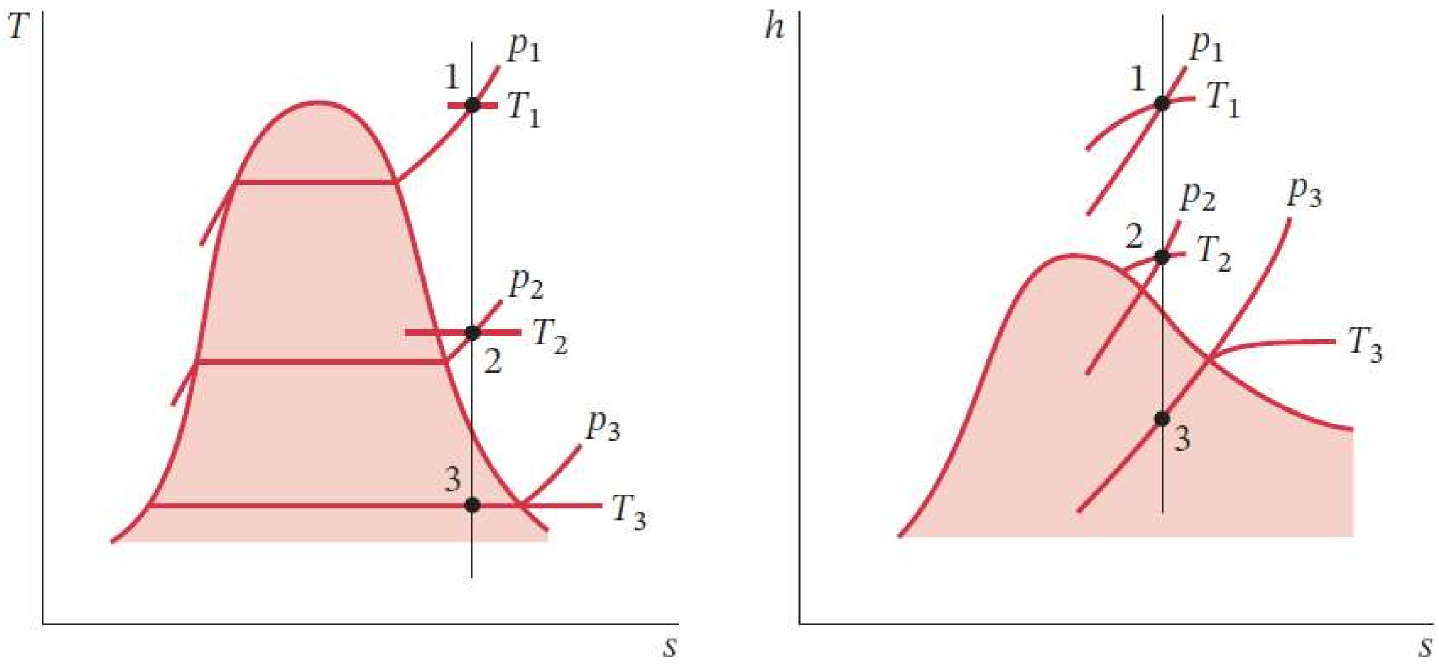
Approssimazione per gas ideali e c_p e c_v costanti

$$s(T_2, v_2) - s(T_1, v_1) = c_v \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + R \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right)$$

$$s(T_2, p_2) - s(T_1, p_1) = c_p \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

Trasformazioni isoentropiche - 1

Diagrammi Ts, h-s



Trasformazioni **isoentropiche** - 2

Approssimazione per gas ideali e c_p e c_v costanti

$$\boxed{s_2 - s_1 = 0}$$

$$\boxed{0} = c_v \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + R\ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right), \qquad \boxed{0} = c_p \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - R\ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{k-1/k} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1}$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k}$$

Ricordando le relazioni già viste:

$$k = \frac{c_p}{c_v}, \qquad R = c_p - c_v$$

$$c_p = \frac{kR}{k-1}, \qquad c_v = \frac{R}{k-1}$$

Valutazione dell'entropia - 7

Entropia di gas ideali, c_p e c_v non costanti

Approccio tabellare per «semplificare» l'integrale nel caso di c_p non costante

Questo metodo si basa sulla scelta arbitraria di uno stato di riferimento e di un valore di riferimento per l'entropia specifica: $s = 0$ per $T = 0\ \mathrm{K}$ e $p = 1\ \mathrm{atm}$. Definiamo $s^0(T)$ l'entropia a temperatura $T\ [\mathrm{K}]$ e $p = 1\ \mathrm{atm}$:

$$s^0(T) - 0 = \int_{0\,K}^{T} \frac{c_p(T)}{T} dT$$

che viene tabellato in funzione di T per ciascun tipo di gas. Di conseguenza l'integrale $\int_{T_1}^{T_2} c_p(T) \frac{dT}{T}$ si riduce ad una differenza tra i valori tabellati di s^0 a T_2 e T_1:

$$s(T_2, p_2) - s(T_1, p_1) = s^0(T_2) - s^0(T_1) - R \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

Valutazione dell'entropia - 8

Sostanze incomprimibili

$v = \text{costante}$

$c_v = c_p = c(T)$

Dalla prima equazione del *Tds*

$$ds = \frac{c_v(T)dT}{T} + \underbrace{\cancel{\frac{pdv}{T}}}_{}^{dv=0} = \frac{c(T)dT}{T}$$

Variazione di entropia specifica tra 1 e 2:

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 c(T)\frac{dT}{T}$$ (incomprimibile)

$$s_2 - s_1 = c \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$$ (incomprimibile, *c* costante)

Trasformazioni isoentropiche - 3

Gas ideali, c_p e c_v non costanti

$$\boxed{s(T_2, p_2) - s(T_1, p_1) = 0} \rightarrow \boxed{0} = s^0(T_2) - s^0(T_1) - R \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$$

$$\frac{p_2}{p_1} = exp\left[\frac{s^0(T_2) - s^0(T_1)}{R}\right] = \frac{exp\left[\frac{s^0(T_2)}{R}\right]}{exp\left[\frac{s^0(T_1)}{R}\right]} = \frac{\boxed{p_r(T_2)}}{\boxed{p_r(T_1)}}$$

Si ha anche:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{\boxed{v_r(T_2)}}{\boxed{v_r(T_1)}}$$

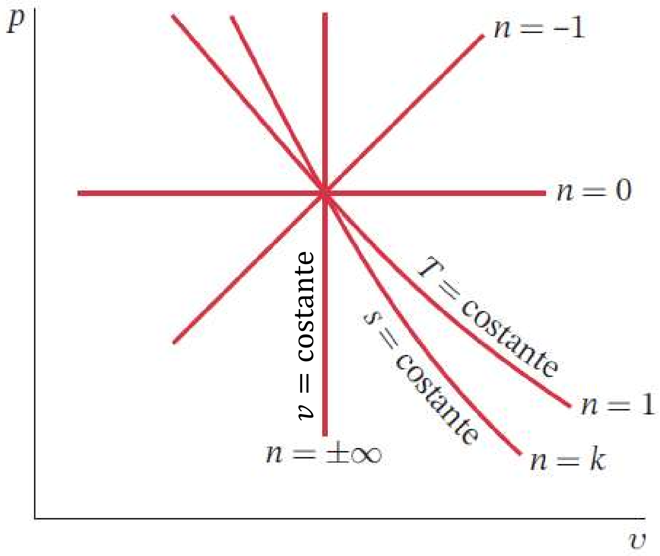
Valori tabulati Tabella T-9 (aria)

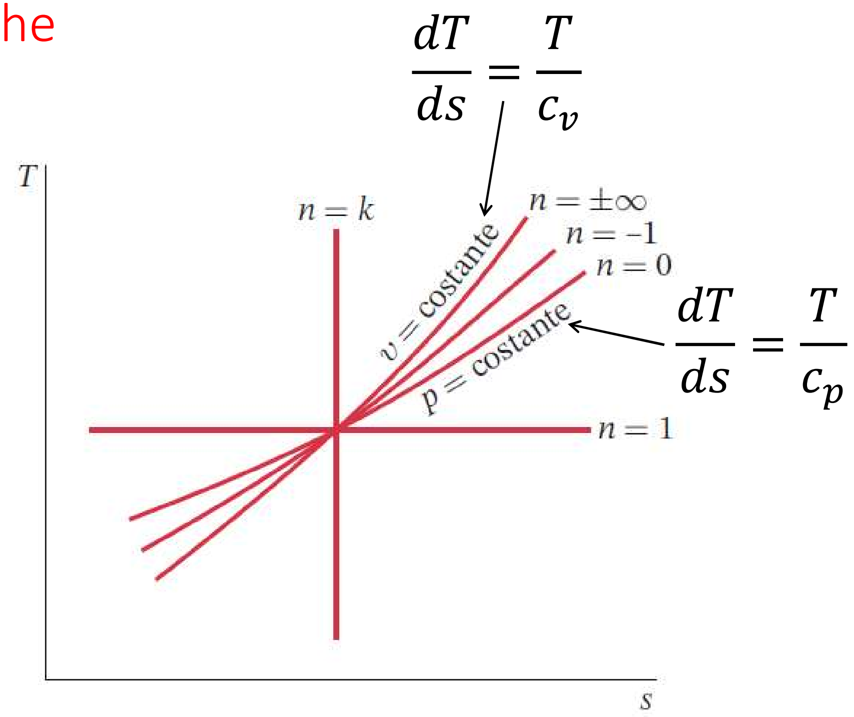
Trasformazioni gas perfetto

Gas perfetti –politropiche

$$pv^n = cost$$

$n = 0$ isobara
$n = 1$ isoterma
$n = \infty$ isocora
$n = k$ isoentropica





Calore e lavoro in trasformazioni **int. reversibili**

Lavoro scambiato

Assunzioni:
- V.C. (sistema aperto)
- 1 ingresso, 1 uscita
- Regime stazionario
- Flusso internamente **reversibile**

Calore scambiato per unità di massa $\left[\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}}\right]$

1° principio, sistema aperto:

$$\frac{\dot{Q} - \dot{L}_{VC}}{\dot{m}} = q - l_{VC} = \Delta e = \Delta h + \Delta e_C + \Delta e_P, \qquad \boxed{\frac{\dot{Q}}{\dot{m}} = q}$$

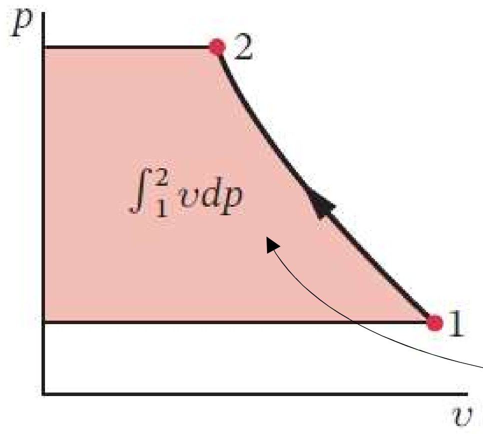
1° principio, sistema chiuso e trasf. **reversibile** (si può seguire l'evoluzione di h, v, p lungo la trasformazione per successivi **stati di equilibrio**):

$$\delta q_{rev} = dh - v\,dp \qquad \Rightarrow \qquad q_{rev} = \int_1^2 \delta q_{rev} = \Delta h - \int_1^2 v\,dp$$

(Anche dimostrabile direttamente tramite F=ma)

$$\boxed{\frac{\dot{L}_{VC}}{\dot{m}}} = l_{VC} = -\left(\int_1^2 v\,dp + \Delta e_C + \Delta e_P\right)$$

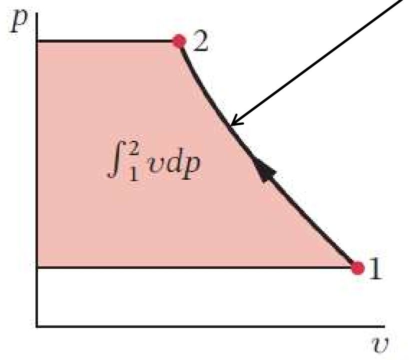
Lavoro tecnico specifico (= per unità di massa) $\left[\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}}\right]$



Calore e lavoro in trasformazioni **int. reversibili**

Lavoro scambiato, trasformazioni politropiche

Assunzioni:
- V.C. (sistema aperto)
- 1 ingresso, 1 uscita
- Regime stazionario
- Flusso internamente **reversibile**
- Variazioni trascurabili en. potenziale e cinetica ($\Delta e_C = \Delta e_P = 0$)
- Trasformazione politropica: $pv^n = cost$



$$l_{VC} = \boxed{-\int_1^2 v\, dp}$$ → Lavoro specifico di pressione $\left[\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}}\right]$

$$pv^n = cost \;\Rightarrow\; -v\,dp = n \cdot p\,dv$$
$$\Rightarrow\; l_{VC} = n \cdot l_{sist.\,chiuso}$$

Per $n \neq 1$:

$$l_{VC} = \frac{n}{1-n}(p_2 v_2 - p_1 v_1) = \frac{nR}{1-n}(T_2 - T_1)$$

Se gas ideale:

Per $n = 1$ ($l_{VC} = l_{sist.\,chiuso}$) :

$$l_{VC} = p_1 v_1 \ln\frac{v_2}{v_1} = -p_1 v_1 \ln\frac{p_2}{p_1} = RT \ln\frac{v_2}{v_1} = -RT \ln\frac{p_2}{p_1}$$

Gas ideale, $n = 1 \;\Rightarrow\;$ isoterma

Bilancio di energia meccanica - 1

Lavoro scambiato

Assunzioni:
- V.C. (sistema aperto)
- 1 ingresso, 1 uscita
- Regime stazionario
- Flusso internamente **reversibile**
- Fluido incomprimibile ($v = cost$)

$$l_{VC} = -\int_1^2 v\,dp - \Delta e_C - \Delta e_P$$

$$= v(p_1 - p_2) + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2} + g(z_1 - z_2)$$

Lavoro tecnico specifico (=per unità di massa) $\left[\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}}\right]$

Dividendo per g si ottiene il bilancio in quote o altezze $[\mathrm{m}]$:

$$\underbrace{\boxed{\frac{l_{VC}}{g}}}_{\text{Prevalenza}} = \underbrace{\boxed{\frac{p_1 - p_2}{\rho g = \gamma}}}_{\text{Quota piezometrica}} + \underbrace{\boxed{\frac{w_1^2 - w_2^2}{2g}}}_{\text{Quota cinetica}} + \underbrace{\boxed{z_1 - z_2}}_{\text{Quota geodetica}}$$

Se $l_{VC} = 0$ (nessuna parte in movimento)

Equazione di Bernoulli:

$$\frac{p}{\gamma} + \frac{w^2}{2g} + z = cost$$

Bilancio di energia meccanica - 2

Lavoro scambiato

Assunzioni:
- V.C. (sistema aperto)
- 1 ingresso, 1 uscita
- Regime stazionario
- Flusso con **irreversibilità**

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta q}{T}\right)_c + \sigma_I' = \frac{q}{\bar{T}_c} + \sigma_I' \qquad \left[\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg\ K}}\right]$$

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta q}{T}\right)_{rev} = \frac{q_{rev}}{\bar{T}_c}$$

Trasformazione reversibile (se esiste) che condivide con quella reale gli stati estremi (1 e 2), e la temperatura $T = T_c$ al contorno

$$\Rightarrow \quad q = q_{rev} - \boxed{\bar{T}_c \sigma_I'}$$

$= l_L \geq 0$, perdite
($l_L = 0$ solo se reversibile)

$$\Rightarrow \quad l_{VC} = -\left(\int_1^2 (v)_{rev}\, dp + \Delta e_C + \Delta e_P + l_L\right)$$

- <u>riduce</u> il lavoro «prodotto» (es. turbine)
- <u>aumenta</u> il lavoro «consumato» (es. pompe)

Se fluido incomprimibile ($v = (v)_{rev} = cost$):

$$l_{VC} = v(p_1 - p_2) + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2} + g(z_1 - z_2) - l_L$$

Rendimenti isoentropici - 1

Turbina - Rendimento Isoentropico di Espansione

Regime stazionario

Sistema adiabatico ($\dot{Q}_j = 0$)

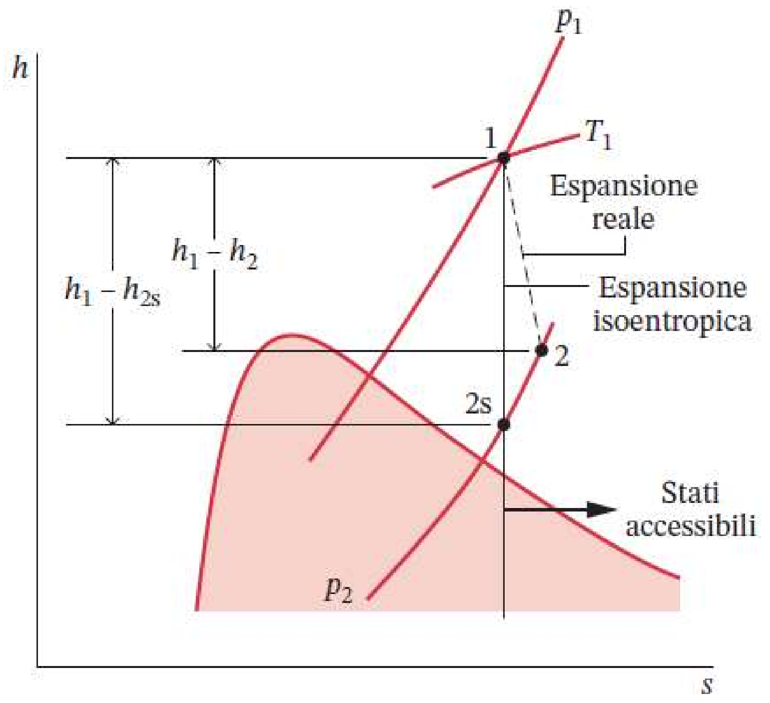
Variazioni di E_c ed E_p trascurabili

$$l_{VC} = h_1 - h_2$$

$$\frac{\dot{\sigma}_{VC}}{\dot{m}} = s_2 - s_1 \geq 0$$

$$(l_{VC})_s = h_1 - h_{2s}$$

$$\boxed{\eta_{ie} = \frac{l_{VC}}{(l_{VC})_s} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}}}$$



Rendimenti isoentropici - 2

Compressore – rendimento Isoentropico di Compressione

Regime stazionario

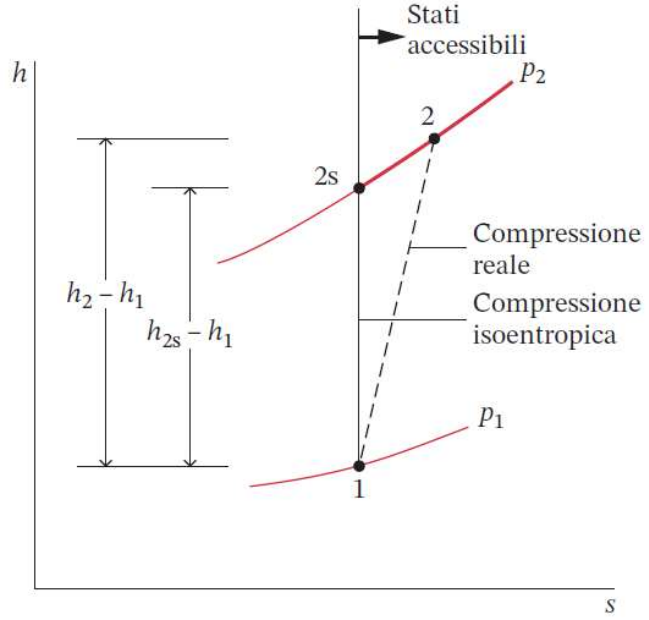
Sistema adiabatico ($\dot{Q}_j = 0$)

Variazioni di E_c ed E_p trascurabili

$$(-l_{VC}) = h_2 - h_1 > 0$$

$$(-l_{VC}) = h_{2s} - h_1 > 0$$

$$\boxed{\eta_{ic} = \frac{(-l_{VC})_s}{-l_{VC}} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}}$$



Rendimenti isoentropici - 3

Ugello

Assunzioni:

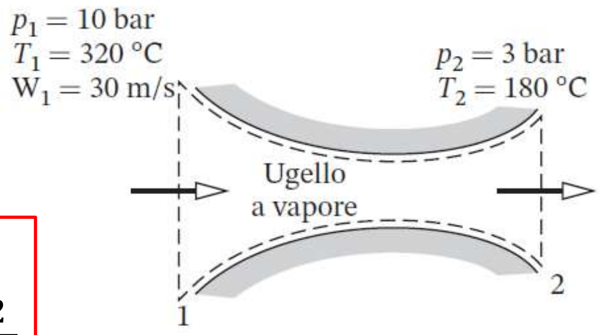
Regime stazionario

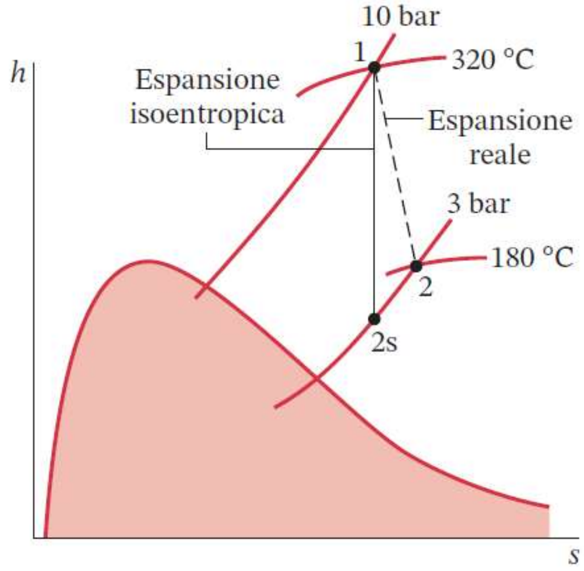
Sistema adiabatico

Variazioni di E_p trascurabili

$$\eta_{ugello} = \frac{\frac{w_2^2}{2}}{\left(\frac{w_2^2}{2}\right)_s} \approx \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}}$$

Se $w_2^2 \gg w_1^2$





Bilancio di energia interna

$$q_{rev} = q + l_L \qquad (l_L \geq 0: \textit{perdite per irreversibilità})$$

Assunzioni:

- Flusso con **irreversibilità**
- Fluido incomprimibile ($v = cost$)

$$\delta q_{rev} = du + p\,\underbrace{\cancel{dv}}_{0} = du$$

$$\Rightarrow \quad q_{rev} = \boxed{q + l_L = \Delta u} \qquad \Rightarrow \qquad \dot{Q}_C + \dot{Q}_L = \frac{dU_{VC}}{dt}$$

Calore scambiato per unità di massa di fluido

Generazione di energia interna specifica per irreversibilità

Variazione di energia interna specifica

Potenza termica scambiata al contorno

Potenza generata internamente per irreversibilità

Tasso/rateo di variazione dell'energia interna

Bilancio istantaneo per sistema chiuso