

Le trasformazioni tecniche nei fluidi

Ho inserito la data in modo che possiate tracciare i cambiamenti che faccio di volta in volta. Per favore segnalate eventuali errori, grazie.



Trasformazioni tecniche nei fluidi



giovanni.delibra@uniroma1.it

Trasformazioni che mantengono costante una variabile di stato:

- Isocora o isometrica: $p = \text{cost}$
- Isobara: $p = \text{cost}$
- Isotherma: $T = \text{cost}$

Trasformazioni caratterizzanti gli scambi di calore/lavoro:

- Adiabatica: $\delta q = 0$

Ci riferiremo a trasformazioni:

- in sistemi a due gradi di varianza -nel caso di sistemi monovarianti si fa usualmente riferimento a diagrammi di stato disponibili in letteratura (ad es. diagrammi del vapore d'acqua) e
- non ai liquidi in quanto praticamente incomprimibili e con calore specifico indipendente dal tipo di trasformazione



In pratica quanto segue è valido per i gas tecnici, che in condizioni lontane da quelle critiche, si comportano praticamente come gas perfetti – hanno quindi energia interna ed entalpia che sono funzioni della temperatura e quindi seguono l'equazione di stato:

$$p = R\rho T$$

e quindi i calori specifici sono ricavabili come:

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p = \frac{dh}{dT} \quad c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_\rho = \frac{du}{dT}$$

$$dh - du = (c_p - c_v)dT = d\left(\frac{p}{\rho}\right) = RdT \rightarrow c_p - c_v = R$$

ponendo $k = \frac{c_p}{c_v}$ otteniamo:

$$R = c_v(k - 1) \quad R = c_p(k - 1)/k$$



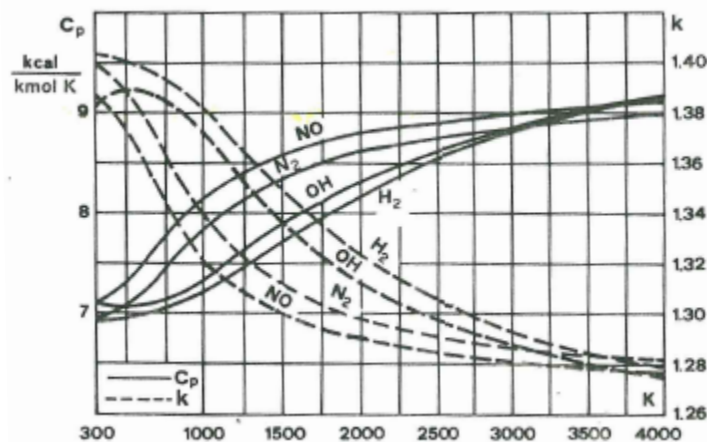
Per definire il comportamento termodinamico dei gas è pertanto sufficiente esprimere l'andamento di c_p o k in funzione della temperatura (vedi grafici sotto)

Espressioni polinomiali sono disponibili per una serie di gas tecnici. Per i gas biatomici esse sono troncate al I ordine (polinomi di Langen)

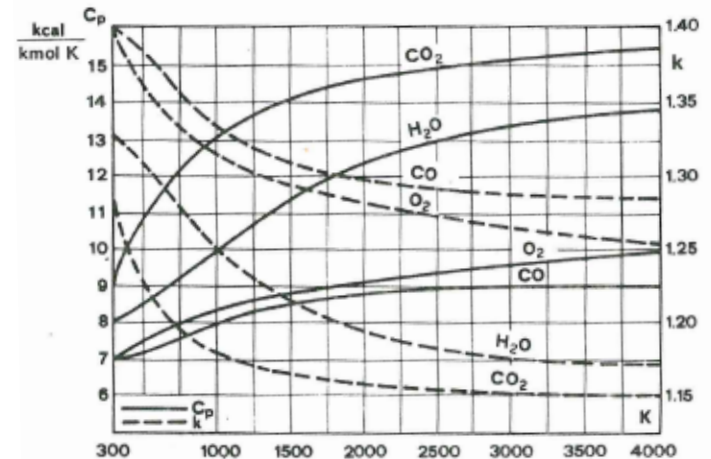
$$c_p = a + bT + cT^2 + dT^3 \dots$$

... mentre per quelli triatomici è necessario integrare la precedente e aggiungere una costante di integrazione z (formule di Lutz)

$$H = aT + bT/2 + z$$



da Caputo, 1997



da Caputo, 1997



In una trasformazione generica il calore specifico $c = \delta q/dT$ varia durante la trasformazione.

Per poter valutare gli effetti di tale variazione ai fini del calcolo delle grandezze caratteristiche, possiamo pensare alla trasformazione come ad una successione di trasformazioni a calore specifico costante – maggiore è il numero delle trasformazioni in cui suddividiamo la trasformazione, maggiore è l'accuratezza dell'approssimazione.

Gas ideale: consideriamo lungo la trasformazione il calore specifico costante (anche se non lo è), prendendo il valor medio fra gli estremi di T della trasformazione.



Per un fluido perfetto, in assenza di attriti, dal I principio si scrive:

$$\left\{ \begin{array}{l} dh = \delta q + \frac{dp}{\rho} \\ du = \delta q + p \frac{d\rho}{\rho^2} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} c_p dT = c dT + \frac{dp}{\rho} \\ c_v dT = c dT + p \frac{d\rho}{\rho^2} \end{array} \right.$$

dividendo membro a membro:

$$\frac{c_p - c}{c_v - c} = \frac{\frac{dp}{\rho}}{\frac{d\rho}{\rho}} = m$$

Se i calori specifici c_p , c_v e c sono costanti, il coefficiente m è costante. Dalla precedente ricaviamo l'espressione della trasformazione politropica:

$$\frac{dp}{p} = m \frac{d\rho}{\rho} \longrightarrow \ln p = m \ln \rho + \text{cost} \longrightarrow p = A \rho^m$$

NB: due stati del fluido sono collegati da una e una sola politropica e quindi A è univocamente determinato



$$p = A\rho^m$$

Politropica (i)

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^m$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{m-1}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{m-1}{m}}$$



$$p = A\rho^m$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^m$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{m-1}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{m-1}{m}}$$

$$\frac{RT}{v} = A\rho^m$$

$$RT\rho = A\rho^m$$

$$T = \frac{A}{R}\rho^{m-1}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{m-1}$$



$$p = A\rho^m$$

Politropica (i)

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^m \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{m-1} \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{m-1}{m}}$$

$$\bar{l} = \int_1^2 p \frac{dp}{\rho^2} = \frac{1}{m-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{m-1} - 1 \right] = \frac{1}{m-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right]$$

Lavoro di
compressione o
espansione

$$l = \int_1^2 \frac{dp}{\rho} = \frac{m}{m-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{m-1} - 1 \right] = \frac{m}{m-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right]$$

Lavoro tecnico/totale



$$p = A\rho^m$$

Politropica (i)

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^m \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{m-1} \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{m-1}{m}}$$

$$\bar{l} = \int_1^2 p \frac{dp}{\rho^2} = \frac{1}{m-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{m-1} - 1 \right] = \frac{1}{m-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right]$$

Lavoro di compressione o espansione

$$l = \int_1^2 \frac{dp}{\rho} = \frac{m}{m-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{m-1} - 1 \right] = \frac{m}{m-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right]$$

Lavoro tecnico/totale

$$\begin{aligned} q_{12} &= c(T_2 - T_1) = \frac{mc_v - c_p}{m-1} (T_2 - T_1) = \\ &= \left(\frac{k}{k-1} - \frac{m}{m-1} \right) RT_1 \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right) \\ &= \left(\frac{k}{k-1} - \frac{m}{m-1} \right) \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{m-1} - 1 \right] = \\ &= \left(\frac{k}{k-1} - \frac{m}{m-1} \right) \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right] \end{aligned}$$



$$p = A\rho^m$$

Politropica (ii)

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^m \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{m-1} \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{m-1}{m}}$$

$$\Delta u_{12} = \frac{1}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{m-1} - 1 \right] = \frac{1}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right]$$



$$p = A\rho^m$$

Politropica (ii)

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^m \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{m-1} \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{m-1}{m}}$$

$$\Delta u_{12} = \frac{1}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{m-1} - 1 \right] = \frac{1}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right]$$

$$\Delta h_{12} = \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{m-1} - 1 \right] = \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right]$$



$$p = A\rho^m$$

Politropica (ii)

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^m \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{m-1} \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{m-1}{m}}$$

$$\Delta u_{12} = \frac{1}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{m-1} - 1 \right] = \frac{1}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right]$$

$$\Delta h_{12} = \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{m-1} - 1 \right] = \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right]$$

$$\Delta s_{12} = R \ln \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{\frac{m-k}{k-1}} + R \ln \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{m-k}{m(k-1)}}$$



$$p = A\rho^k$$

$$c = 0 \quad m = k$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^k$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{k-1}$$

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



$$p = A\rho^k \quad c = 0 \quad m = k$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^k \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{k-1} \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$\bar{l} = \int_1^2 p \frac{dp}{\rho^2} = \frac{1}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{k-1} - 1 \right] = \frac{1}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad \text{Lavoro di compressione o espansione}$$

$$l = \int_1^2 \frac{dp}{\rho} = \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{k-1} - 1 \right] = \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad \text{Lavoro tecnico/totale}$$

$$q_{12} = 0$$



$$p = A\rho^k \quad c = 0 \quad m = k$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^k \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{k-1} \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$\bar{l} = \int_1^2 p \frac{dp}{\rho^2} = \frac{1}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{k-1} - 1 \right] = \frac{1}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad \text{Lavoro di compressione o espansione}$$

$$l = \int_1^2 \frac{dp}{\rho} = \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{k-1} - 1 \right] = \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \quad \text{Lavoro tecnico/totale}$$

$$q_{12} = 0$$

$$\Delta u_{12} = \frac{1}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{k-1} - 1 \right] = \frac{1}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

$$\Delta h_{12} = \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{k-1} - 1 \right] = \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]$$

$$\Delta s_{12} = 0$$



$$q = \text{cost} \quad \frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad c = c_v$$



$$q = \text{cost} \quad \frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad c = c_v$$

$$\overline{l}_{12} = \int_1^2 p \frac{dp}{\rho^2} = 0$$

$$l_{12} = \int_1^2 \frac{dp}{\rho} = \frac{p_2 - p_1}{\rho}$$



$$q = \text{cost} \quad \frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad c = c_v$$

$$\overline{l}_{12} = \int_1^2 p \frac{dp}{\rho^2} = 0$$

$$l_{12} = \int_1^2 \frac{dp}{\rho} = \frac{p_2 - p_1}{\rho}$$

$$q_{12} = c_v(T_2 - T_1) = \Delta u_{12} = \frac{1}{k-1} \frac{p_1}{\rho} \left(\frac{p_2}{p_1} - 1 \right)$$



$$q = \text{cost} \quad \frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad c = c_v$$

$$\overline{l}_{12} = \int_1^2 p \frac{dp}{\rho^2} = 0$$

$$l_{12} = \int_1^2 \frac{dp}{\rho} = \frac{p_2 - p_1}{\rho}$$

$$q_{12} = c_v(T_2 - T_1) = \Delta u_{12} = \frac{1}{k-1} \frac{p_1}{\rho} \left(\frac{p_2}{p_1} - 1 \right)$$

$$\Delta h_{12} = \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\rho} \left(\frac{p_2}{p_1} - 1 \right)$$

$$\Delta s_{12} = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} = \frac{1}{k-1} R \ln \frac{p_2}{p_1}$$



$$p = \text{cost} \quad \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_1}{T_2} \quad c = c_p$$



$$p = \text{cost} \quad \frac{\varrho_2}{\varrho_1} = \frac{T_1}{T_2} \quad c = c_p$$

$$\overline{l}_{12} = \int_1^2 p \frac{dp}{\rho^2} = p \left(\frac{1}{\varrho_1} - \frac{1}{\varrho_2} \right) = \frac{p}{\varrho_1} \left(1 - \frac{\varrho_1}{\varrho_2} \right) = \frac{p}{\varrho_1} \left(1 - \frac{T_1}{T_2} \right)$$

$$l_{12} = \int_1^2 \frac{dp}{\rho} = 0$$



$$p = \text{cost} \quad \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{T_1}{T_2} \quad c = c_p$$

$$\bar{l}_{12} = \int_1^2 p \frac{dp}{\rho^2} = p \left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} \right) = \frac{p}{\rho_1} \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) = \frac{p}{\rho_1} \left(1 - \frac{T_1}{T_2} \right)$$

$$l_{12} = \int_1^2 \frac{dp}{\rho} = 0$$

$$q_{12} = c_p(T_2 - T_1) = \Delta h_{12} = \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\rho} \left(\frac{p_2}{p_1} - 1 \right)$$

$$\Delta s_{12} = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} = \frac{k}{k-1} R \ln \frac{\rho_2}{\rho_1}$$



$$T = \text{cost} \quad c = \infty \quad \frac{q_2}{q_1} = \frac{p_2}{p_1} \quad p = Aq$$



$$T = \text{cost} \quad c = \infty \quad \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{p_2}{p_1} \quad p = A\rho$$

$$\overline{l}_{12} = \int_1^2 p \frac{dp}{\rho^2} = l_{12} = \int_1^2 \frac{dp}{\rho} = \frac{p_1}{\rho_1} \ln \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{p_1}{\rho_1} \ln \frac{p_2}{p_1} = -q_{12}$$



$$T = \text{cost} \quad c = \infty \quad \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{p_2}{p_1} \quad p = A\rho$$

$$\overline{l}_{12} = \int_1^2 p \frac{dp}{\rho^2} = l_{12} = \int_1^2 \frac{dp}{\rho} = \frac{p_1}{\rho_1} \ln \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{p_1}{\rho_1} \ln \frac{p_2}{p_1} = -q_{12}$$

$$\Delta u_{12} = 0$$

$$\Delta h_{12} = 0$$



$$T = \text{cost} \quad c = \infty \quad \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{p_2}{p_1} \quad p = A\rho$$

$$\overline{l}_{12} = \int_1^2 p \frac{dp}{\rho^2} = l_{12} = \int_1^2 \frac{dp}{\rho} = \frac{p_1}{\rho_1} \ln \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{p_1}{\rho_1} \ln \frac{p_2}{p_1} = -q_{12}$$

$$\Delta u_{12} = 0$$

$$\Delta h_{12} = 0$$

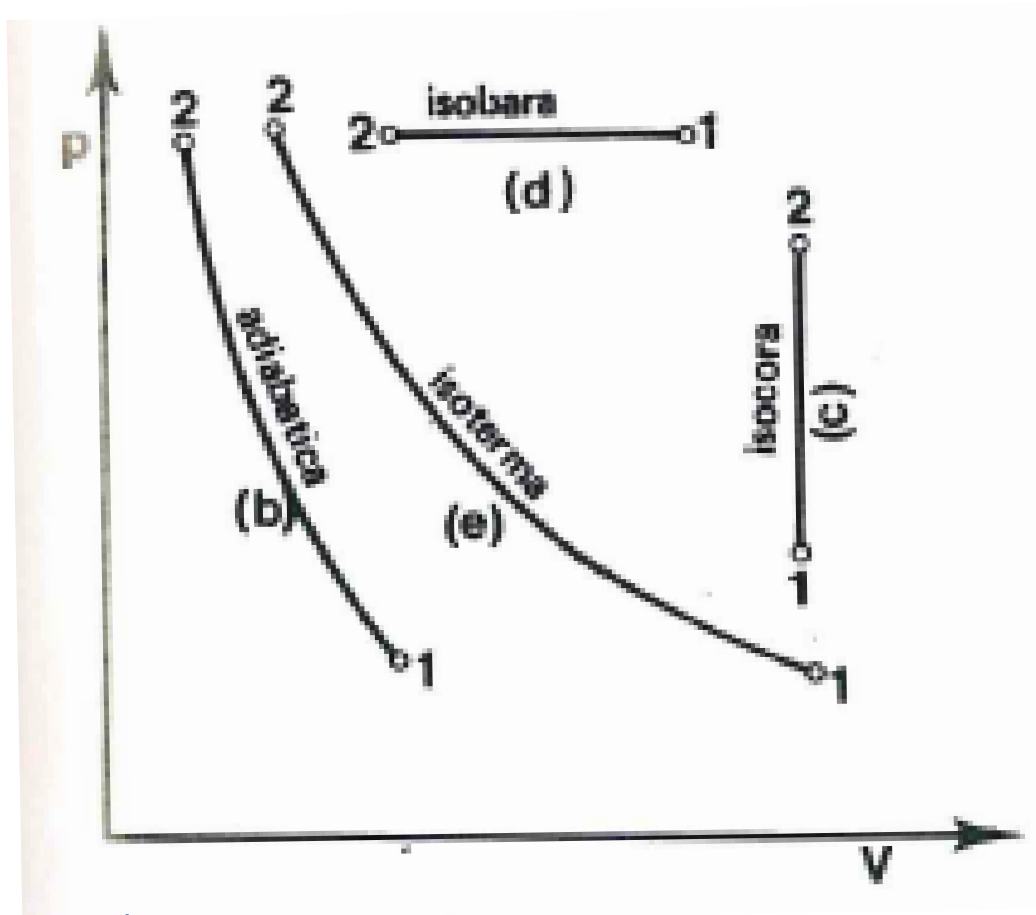
$$q_{12} = c_p(T_2 - T_1) = \Delta h_{12} = \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\rho} \left(\frac{p_2}{p_1} - 1 \right)$$

$$\Delta s_{12} = \frac{q_{12}}{T} = R \ln \frac{p_1}{p_2} = R \ln \frac{\rho_1}{\rho_2}$$



Rappresentazione delle trasformazioni sui piani termodinamici



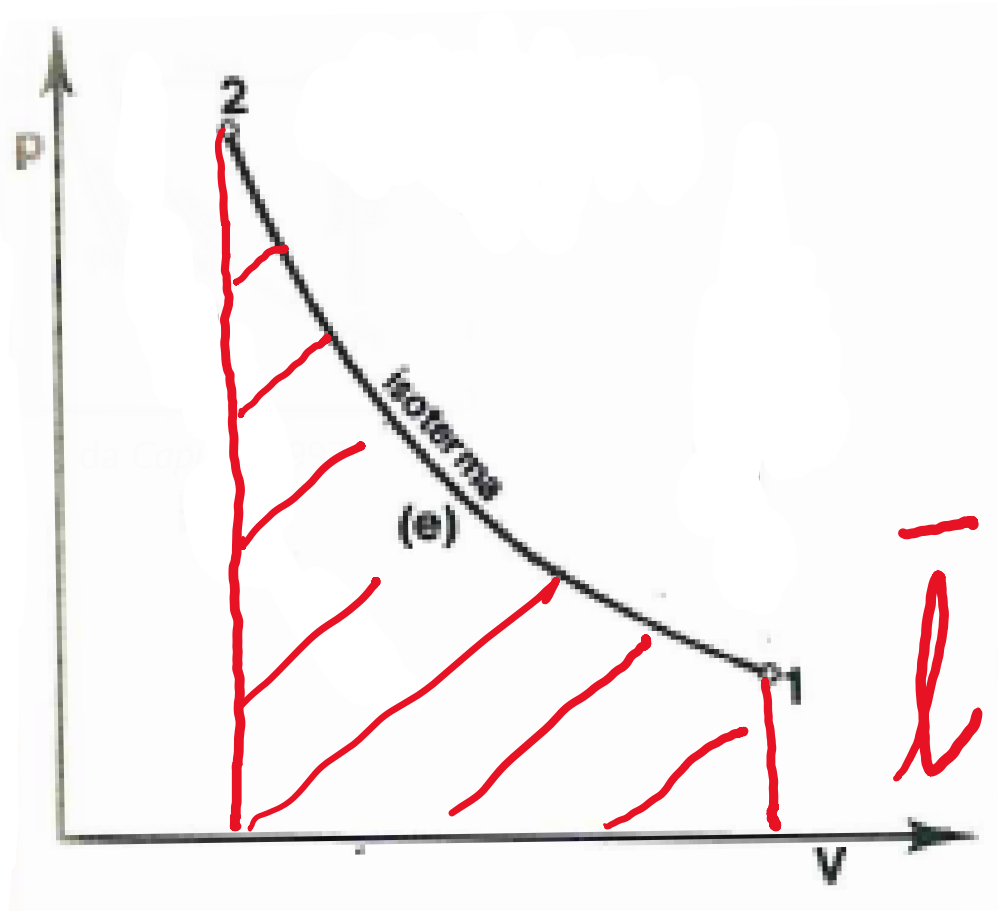


da Caputo, 1997

Uno dei piani caratteristici per la rappresentazione delle trasformazioni termodinamiche è il Piano di Clapeyron (p,v), in cui le trasformazioni isocore (c) e isobare (d) sono rappresentate da rette parallele rispettivamente all'asse delle ordinate e delle ascisse.

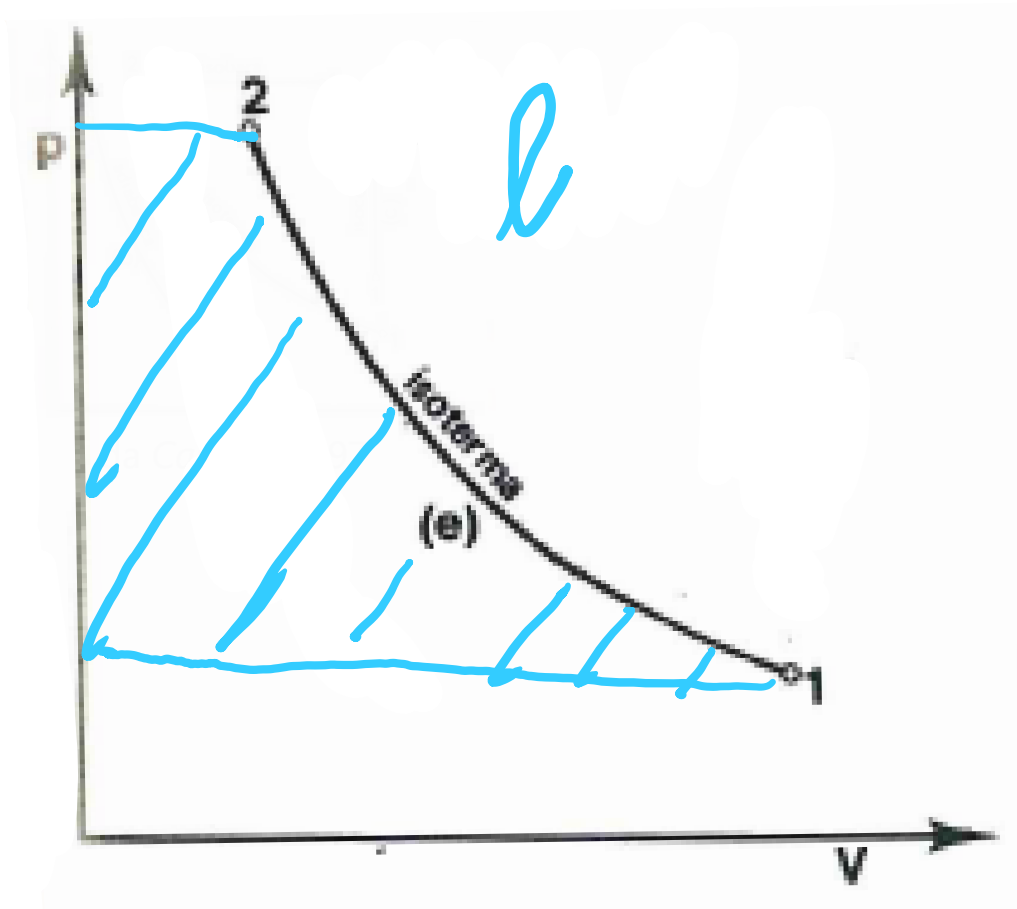
Le trasformazioni isoterme (e) sono delle iperboli equilatera ($pv=cost$) mentre le adiabatiche (b) da curve esponenziali corrispondenti all'equazione $pv^k=cost$. Essendo $k>1$ la pendenza delle adiabatiche è maggiore di quella delle isoterme.





da Caputo, 1997

Nel piano (p,v) l'area sottesa sotto la curva della trasformazione rappresenta il lavoro \bar{l} di compressione (o di espansione), mentre, in caso di trasformazioni reversibili, l'area sottesa fra la curva e l'asse delle ordinate il lavoro tecnico (o totale) l .



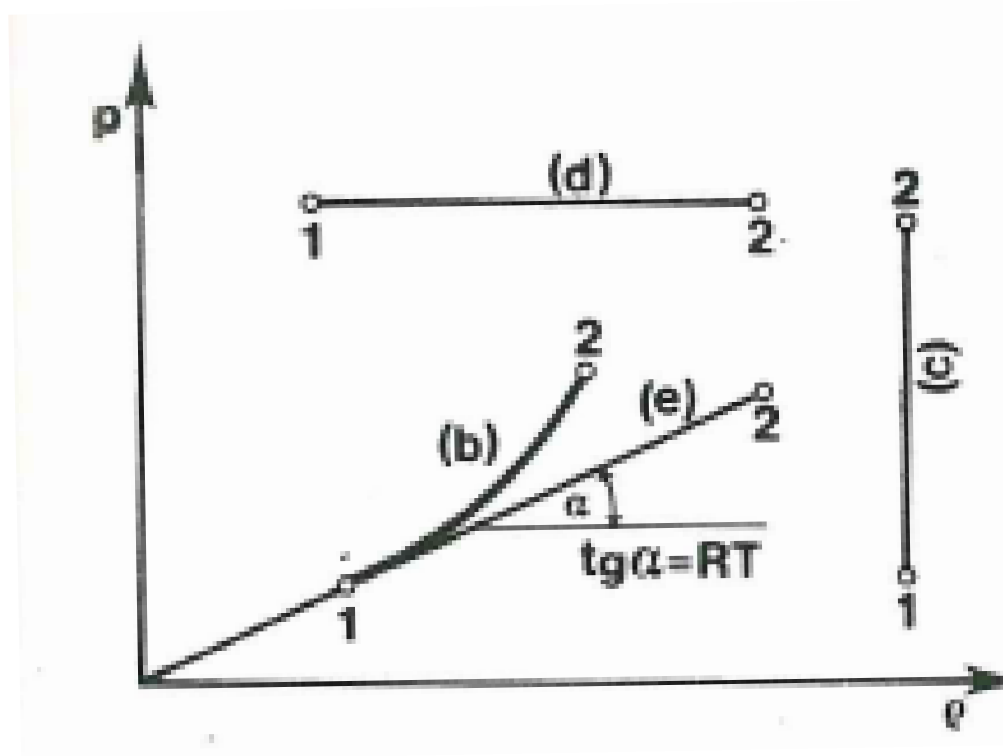
Nel piano (p,v) l'area sottesa sotto la curva della trasformazione rappresenta il lavoro \bar{l} di compressione (o di espansione), mentre, in caso di trasformazioni reversibili, l'area sottesa fra la curva e l'asse delle ordinate il lavoro tecnico (o totale) l .

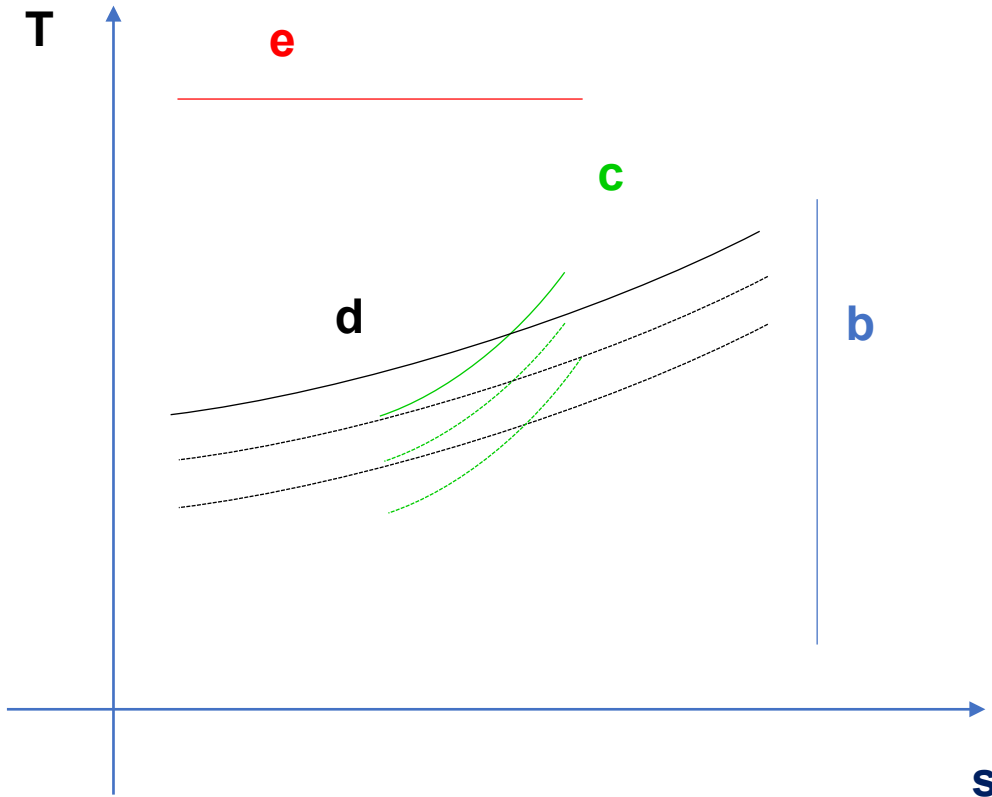
da Caputo, 1997



Nel piano (p,ρ) , in cui le trasformazioni isocore (c) e isobare (d) sono rappresentate da rette parallele rispettivamente all'asse delle ordinate e delle ascisse.

Le trasformazioni isoterme (e) sono delle rette passanti per l'origine di coefficiente angolare RT mentre le adiabatiche (b) da curve esponenziali corrispondenti all'equazione $p=A\rho^k$ e quindi ancora passanti per l'origine

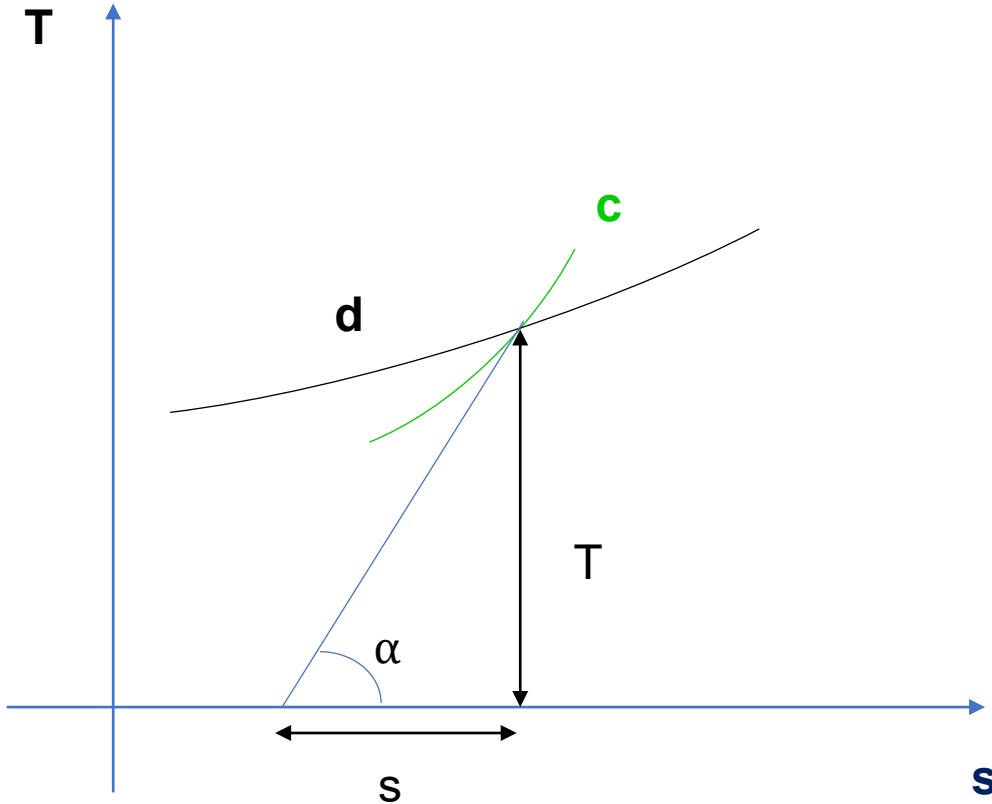




Nel piano (T,s) , detto Piano Entropico, ovviamente **isoterme** (e) e **adiabatiche reversibili** (isoentropiche) (b) risultano rispettivamente parallele all'asse delle ordinate e delle ascisse. **Isocore** (c) e **isobare** (d) risultano invece avere un andamento logaritmico.

Per un gas perfetto isocore e isobare sono fra loro congruenti, sovrapponibili per traslazione parallela all'asse delle ascisse.



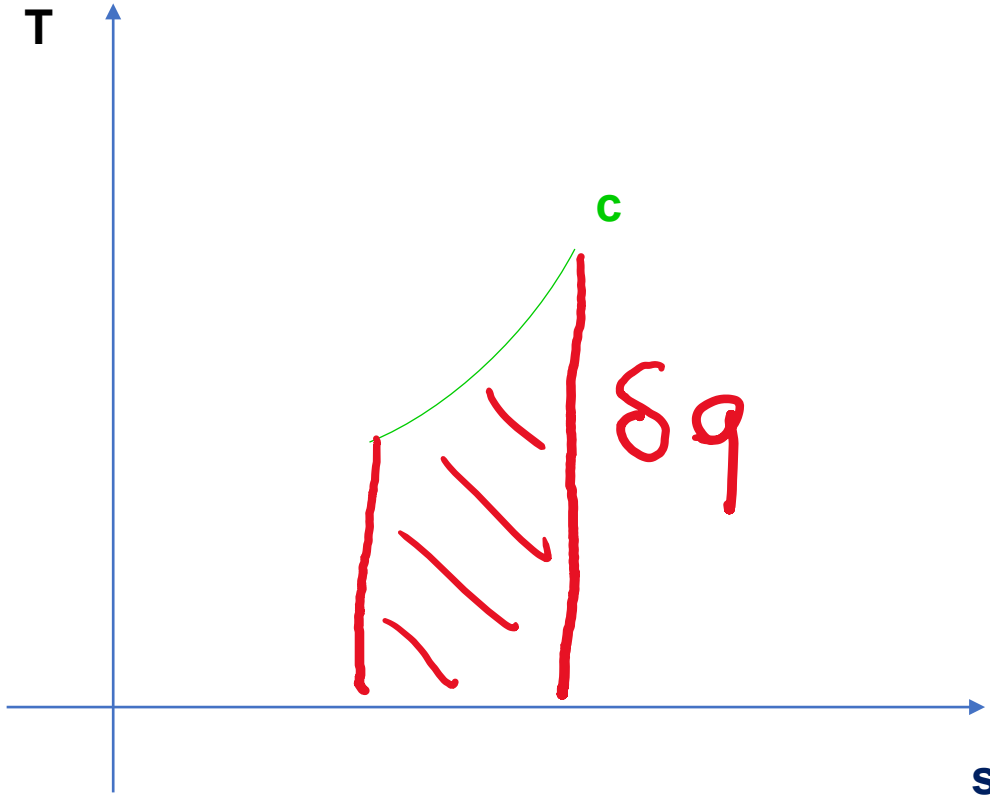


Per una politropica generica la sottotangente alla trasformazione rappresenta il calore specifico:

$$s = \frac{T}{\tan \alpha} = \frac{T}{\frac{dT}{ds}} = \frac{Tds}{dT} = \frac{\delta q}{dT} = c$$

Quindi a parità di temperatura le isocore sono più inclinate sull'asse delle ascisse delle isobare essendo $c_p > c_v$



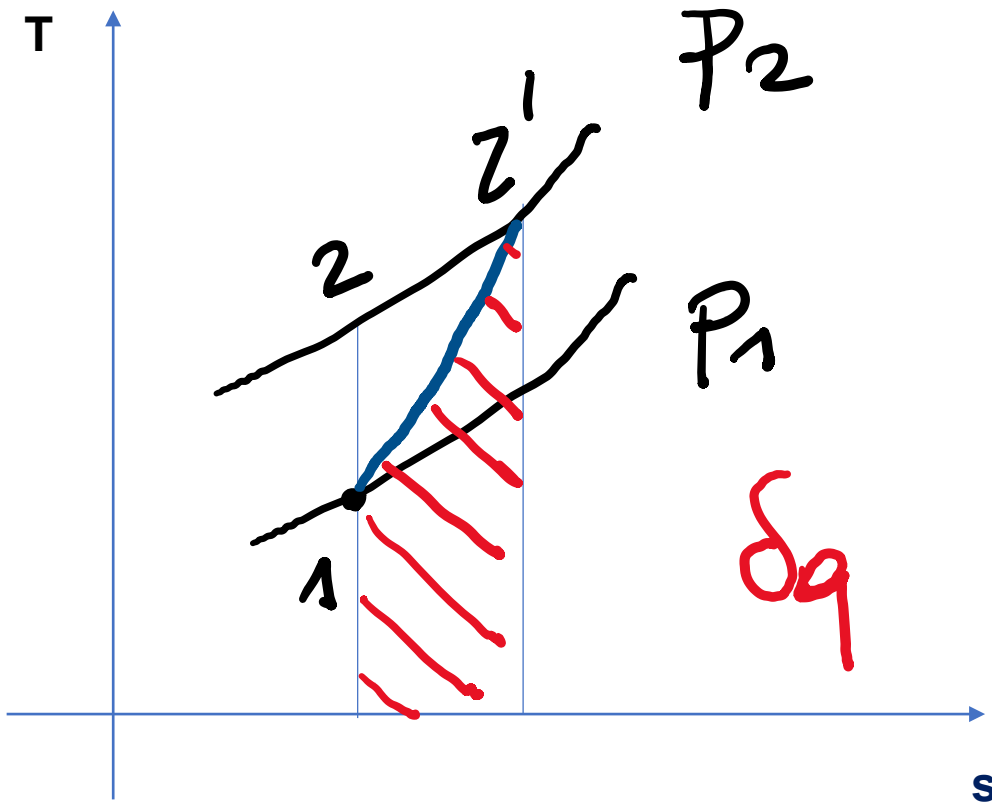


Sul piano entropico le aree sottese dalle trasformazioni rappresentano il calore scambiato per le trasformazioni reversibili, per cui vale la relazione:

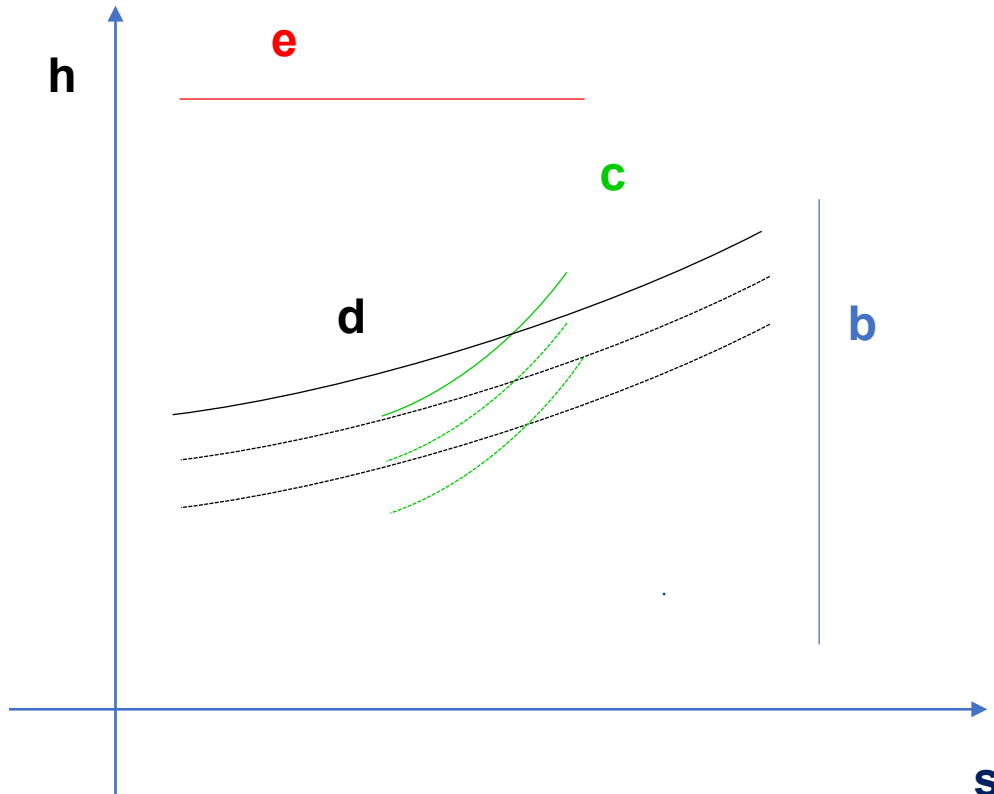
$$\delta q = Tds$$

mentre laddove si abbia una trasformazione irreversibile il termine Tds comprende anche il lavoro perduto δL_p dovuto ad attriti e altre irreversibilità.





Per un'adiabatica 1-2 $\Delta s=0$, mentre in presenza di irreversibilità la trasformazione equivalente 1-2' risulta una politropica e l'area sottesa dalla curva corrisponde al calore degradato dal fluido in energia meccanica.



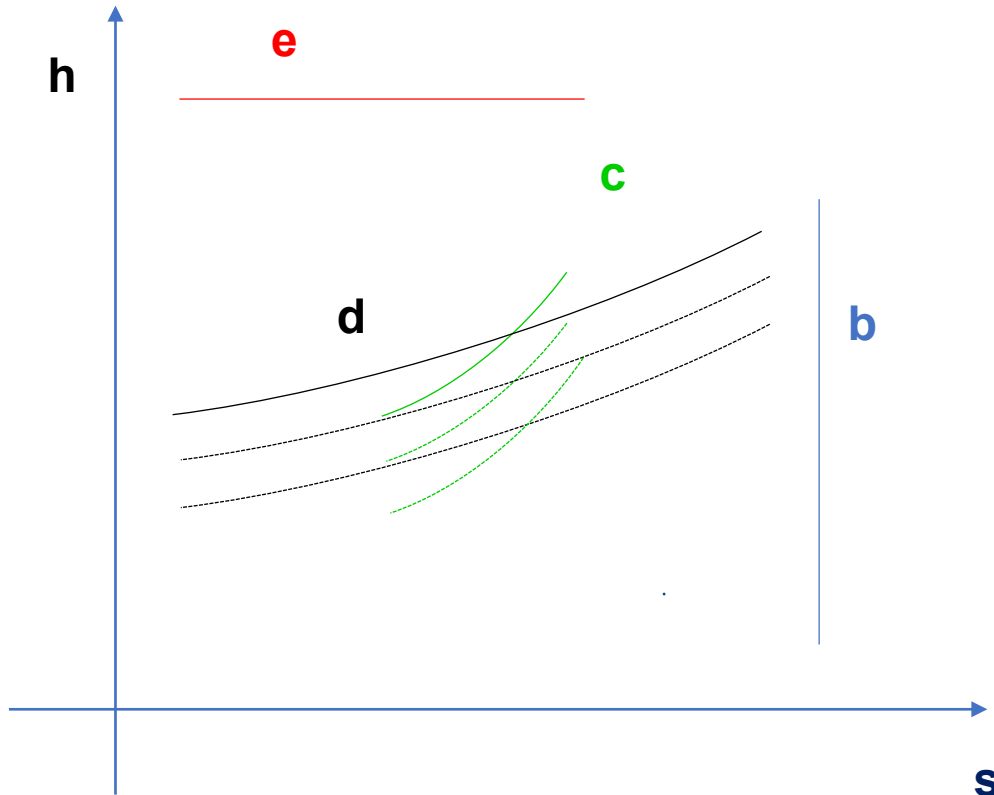
Sul piano entalpico (h,s) le trasformazioni del gas perfetto hanno lo stesso andamento del piano entropico, essendo valida la relazione:

$$dh = c_p dT$$

Inoltre, se c_p è costante, c'è una proporzionalità diretta fra h e T e quindi le due rappresentazioni differiscono solo per un fattore di scala.

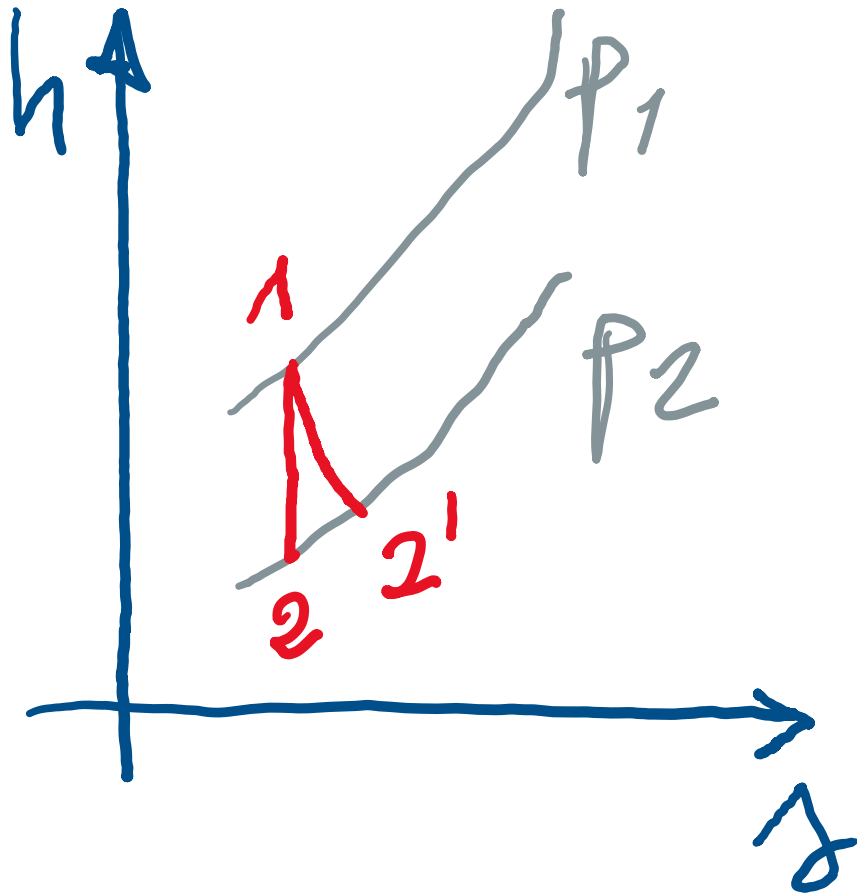
In questo piano, tuttavia, è possibile disegnare le isoentalpiche (e)





Per questo motivo il piano entalpico è particolarmente interessante per i vapori surriscaldati e saturi. Nel primo caso infatti c_p varia in funzione di temperatura e pressione. Per i vapori saturi invece la temperatura rimane costante lungo un'isobara (isotermobarica), mentre l'entalpia varia lungo la stessa isobara in funzione del calore ceduto lungo la trasformazione.





Il piano entalpico permette di valutare facilmente gli scambi di calore e lavoro fra fluido ed esterno come differenza di entalpia lungo la trasformazione, nonché l'efficienza della trasformazione

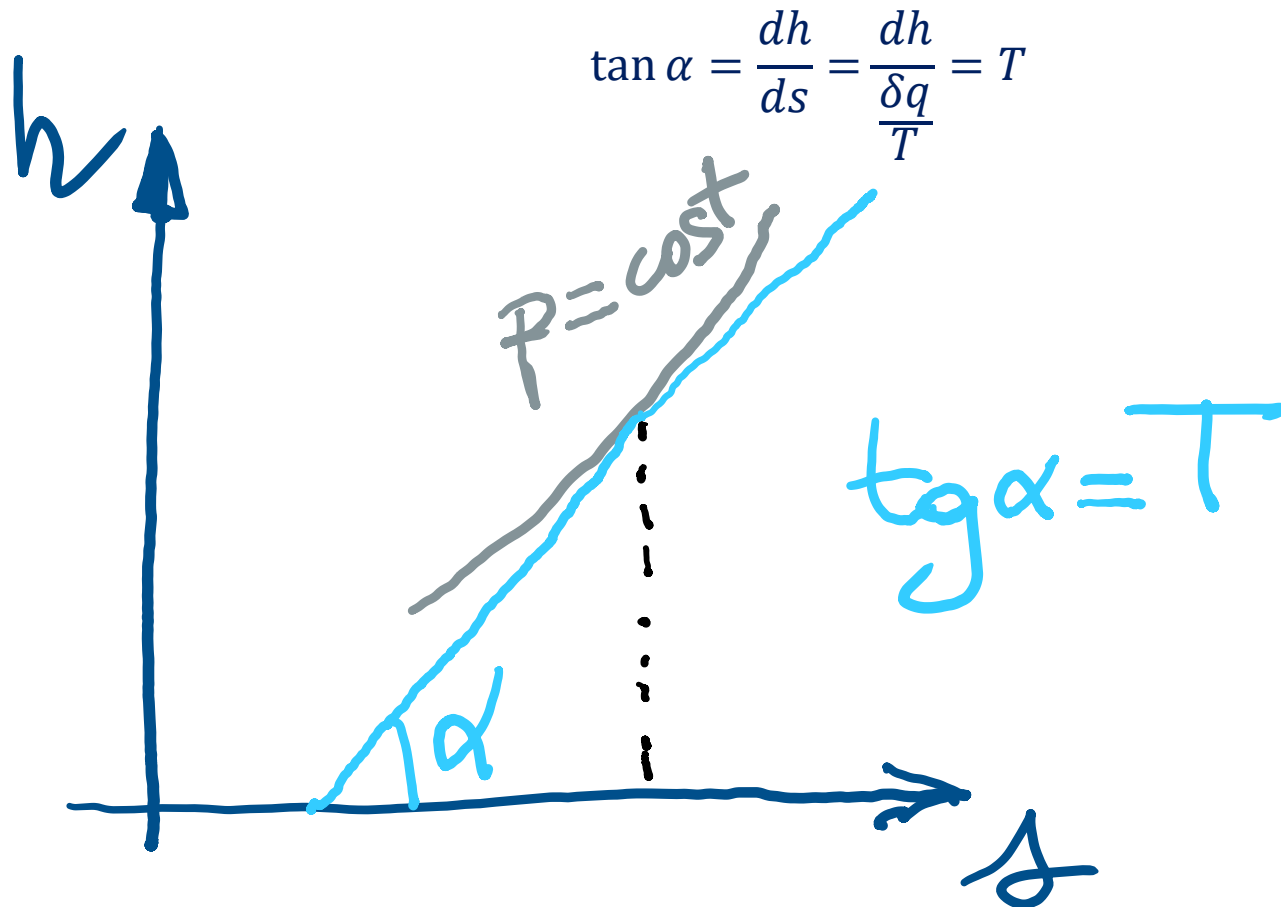
Infatti per un'espansione da p_1 a p_2 senza attriti la trasformazione risulta isoentropica 1-2, mentre in presenza di attriti dovremo seguire la trasformazione ad entropia crescente 1-2'

Il rendimento adiabatico dell'espansione è valutabile come:

$$\eta_{ad} = \frac{h_1 - h_{2'}}{h_1 - h_2}$$

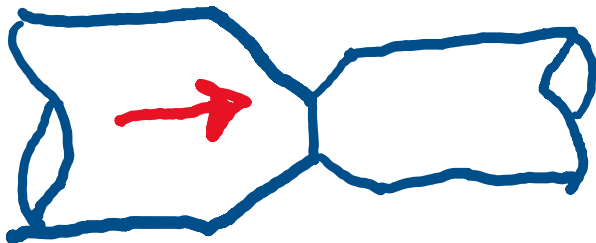


Sul piano entalpico la tangente alle isobare risulta pari alla temperatura assoluta del fluido:

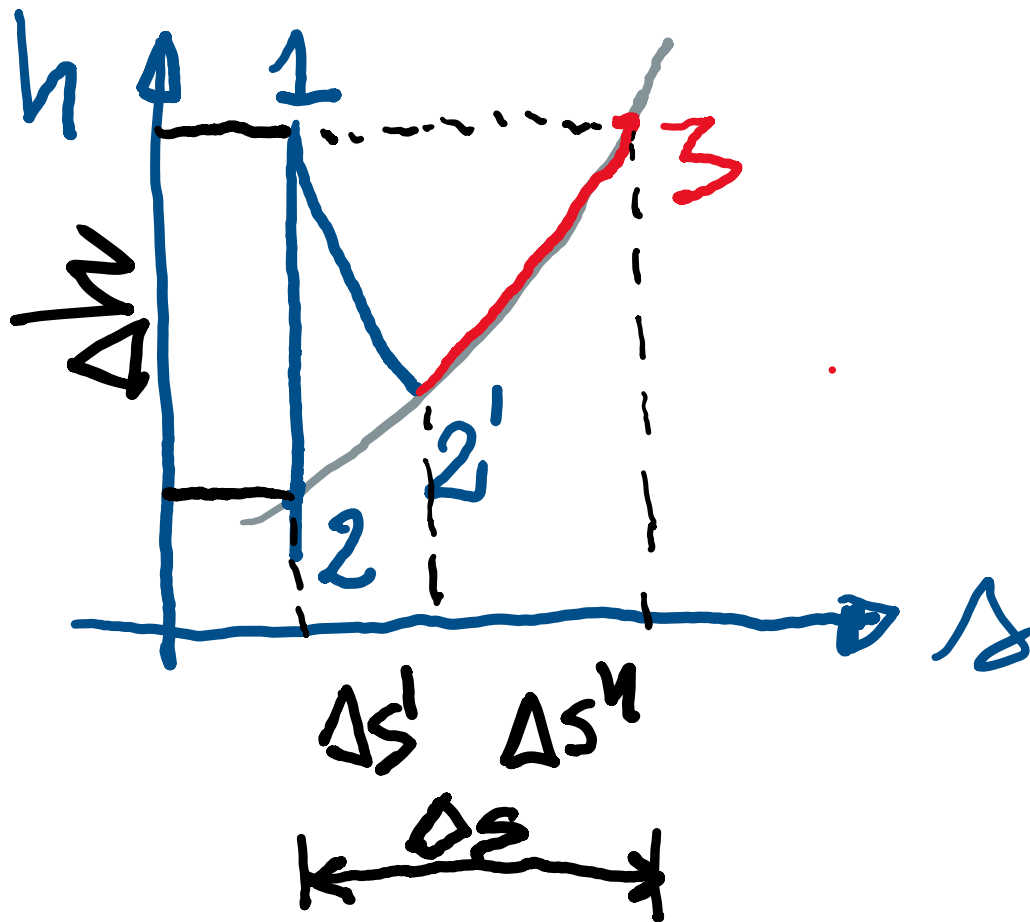


Una trasformazione isoentalpica può essere prodotta attraverso una valvola di laminazione.

Infatti in questo caso non ci sono scambi di lavoro né di calore e quindi l'entalpia totale non può che rimanere costante. Se i condotti a monte/valle della valvola sono dimensionati in maniera tale da mantenere la stessa velocità del fluido anche l'entalpia termodinamica rimane inalterata.

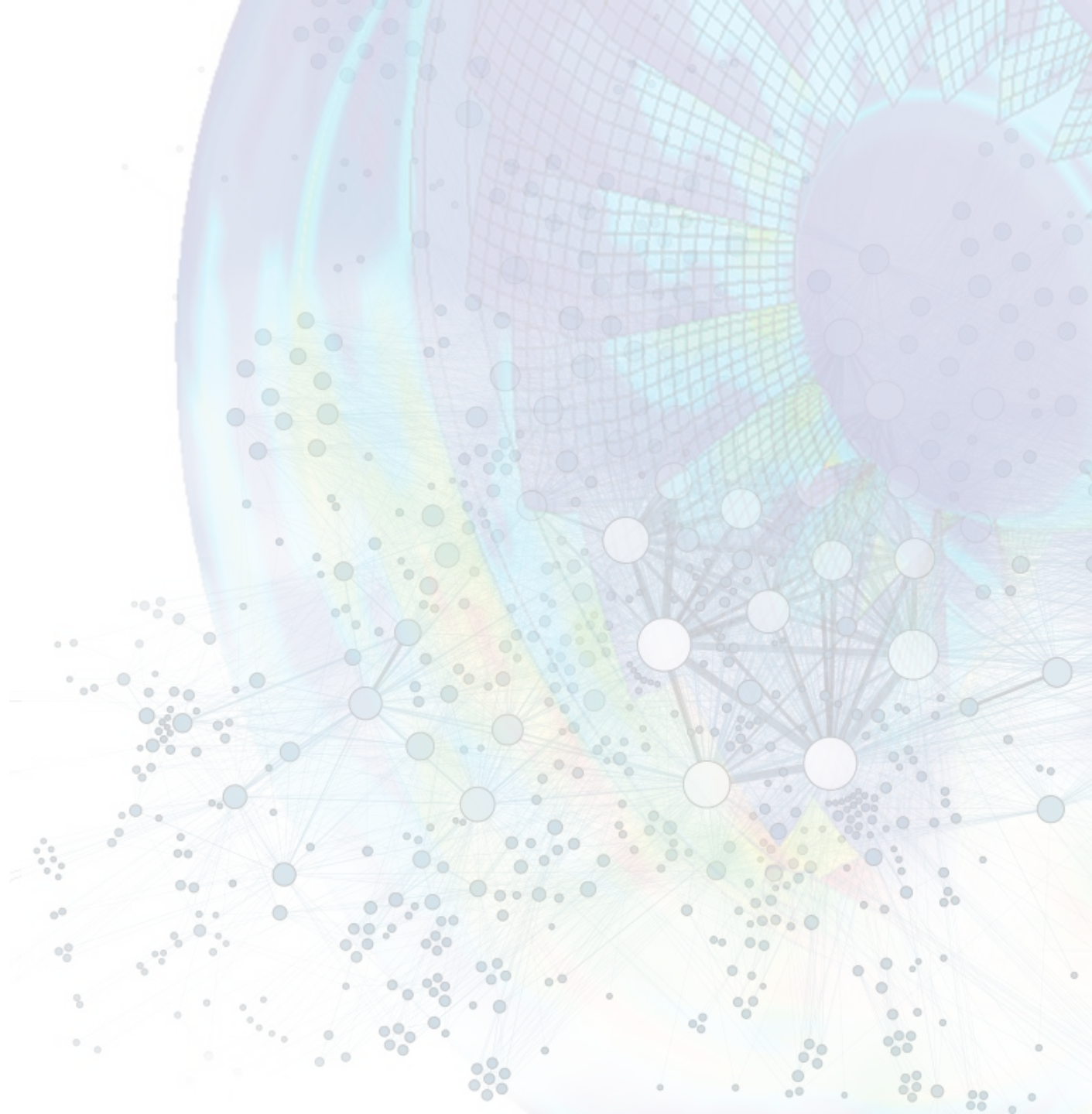


VALVOLA



In realtà il fluido nel condotto A, passando attraverso la valvola, subisce un'espansione adiabatica. Nel caso ideale tale adiabatica è rappresentata dalla 1-2 isoentropica, mentre nel caso reale dalla 1-2' ad entropia crescente. A causa dell'espansione il fluido viene accelerato, avendo guadagnato un'energia cinetica pari a Δh . Tuttavia non è in grado di mantenere tale velocità nel condotto B, che è dimensionato per mantenere la stessa velocità. Pertanto il fluido subisce si riporta alle condizioni di entalpia iniziali con una trasformazione isobara 2'-3, caratterizzata da un ulteriore aumento di entropia. Il processo è globalmente isoentalpico MA dissipativo

Esercizi



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

2l di gas monoatomico ($k=1.66$) in condizioni normali di temperatura e pressione, vengono espansi adiabaticamente fino ad assumere un volume di 2.8l. Calcolare il valore finale di T e p , il lavoro di espansione, assumendo una capacità termica di 12.45 J/molK e un totale di 3 mol

$$p_0 V_0^k = p_F V_F^k \Rightarrow p_F = p_0 \left(\frac{V_0}{V_F} \right)^k$$

$$p_F = 1 \cdot \left(\frac{2}{2.8} \right)^{1.66} = 0.57 \text{ atm}$$

$$T_0 V_0^{k-1} = T_F V_F^{k-1} \Rightarrow T_F = T_0 \left(\frac{V_0}{V_F} \right)^{k-1}$$

$$T_F = 273.16 \left(\frac{2}{2.8} \right)^{1.66-1} = 218.77 \text{ K}$$

$$L = -3 * 12.45 * (218.77 - 273.16) = 2031.47 \text{ J} > 0$$



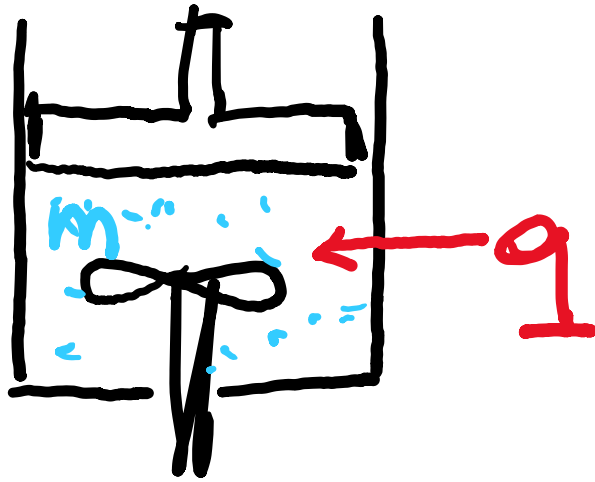
Un gas biatomico ($k=1.4$) inizialmente a pressione atmosferica e con un volume $V_0=5\text{l}$ viene compresso adiabaticamente fino ad una pressione $p_F = 1.13 \text{ atm}$. Calcolare il volume finale.

$$p_0 V_0^k = p_F V_F^k \Rightarrow p_F = p_0 \left(\frac{V_0}{V_F} \right)^k$$

$$V_F = V_0 / \sqrt[1/k]{p_F/p_1} = 4.58 \text{ l}$$



Gas in un cilindro: calcolare il lavoro del pistone



$m=5\text{kg}$ di vapore

$q=80\text{kJ}$

$l^*=18.5\text{kJ}$

$u_1=2709.9\text{ kJ/kg}$

$u_2=2659.6\text{ kJ/kg}$

l^*

$$\cancel{dEp} + \cancel{dEcin} + du = \delta q + \delta l + \delta l^*$$

$$-\delta l = du - \delta q - \delta l^*$$

$$l_{\text{pistone}} = - \int_1^2 p dV = (2659.6 - 2709.9) * 5 - 18.5 - 80 = -350\text{kJ}$$

(il pistone si solleva perché il gas si espande)



Una turbina che elabora una portata di vapore di 2kg/s cede all'esterno nell'unità di tempo una potenza termica di 11kW. Determinare la potenza meccanica sviluppata dalla turbina tenendo conto delle condizioni di ingresso e uscita riassunte in tabella:

	p [Mpa]	T [K]	x [-]	v [m/s]	z [m]
In (1)	3.0	400	0	60	5
Out (2)	.125	105.99	1	180	2

$$\dot{L} = \dot{m} * l$$

$$q + h_1 + 0.5 * v_1^2 + g z_1 = h_2 + 0.5 v_2^2 + g z_2 + l$$

$$l = h_1 - h_2 + 0.5 * (v_1^2 - v_2^2) + g(z_1 - z_2) + q$$

$$h_1 - h_2 = 3230.9 - 2685.4 = 545.5 \text{ kJ/kg}$$

(valori da tabella del vapore surriscaldato e del vapor saturo)

$$q = -11/2 = -5.5 \text{ kJ/kg}$$

$$l = 525.6 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{L} = 2 * 525.6 = 1051.2 \text{ kW}$$



Una portata di 10 kg/s di vapore evolve in turbina passando da $h_1 = 3161.7 \text{ kJ/kg}$ ad $h_2 = 2310.1 \text{ kJ/kg}$. Determinare il lavoro per unità di portata l e la potenza meccanica \dot{L}

$$l = h_1 - h_2 = 851.6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

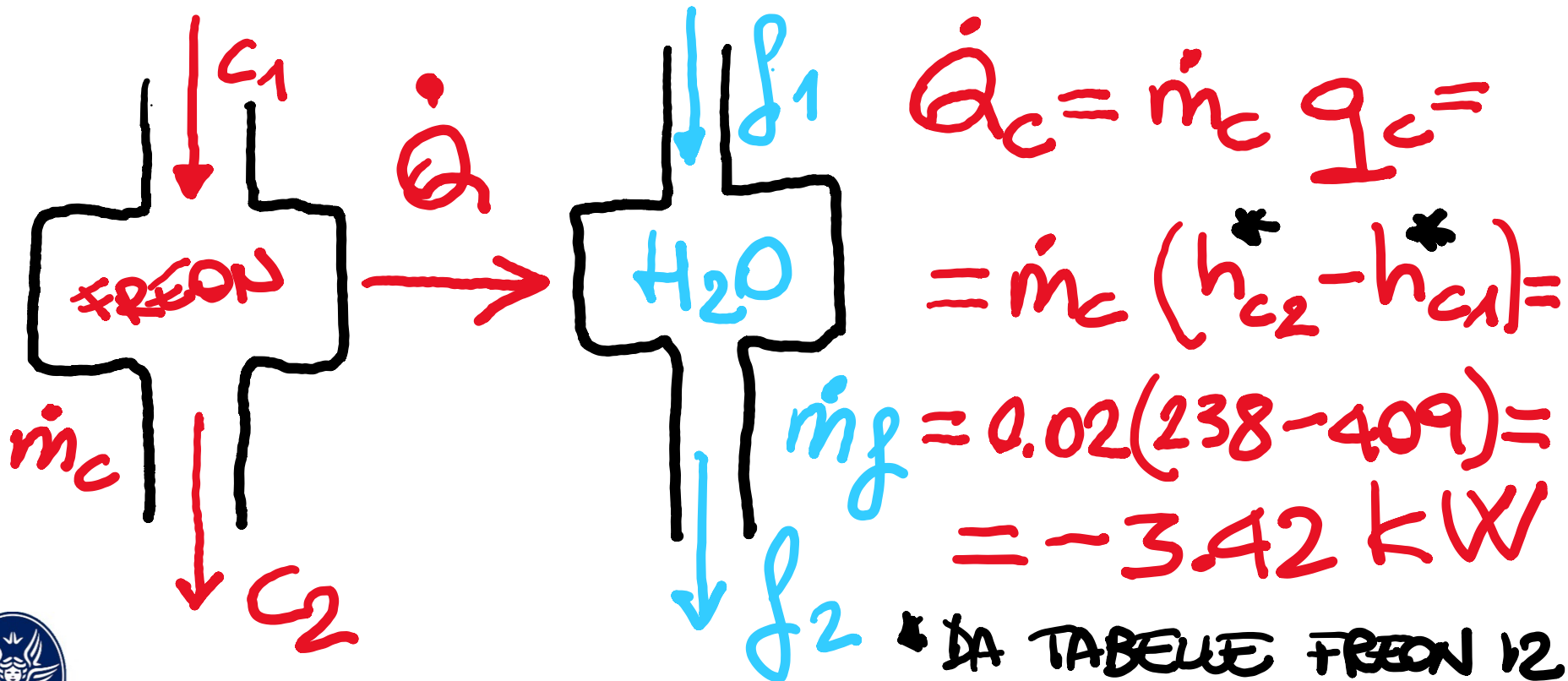
$$\dot{L} = \dot{m} * l = 8.5 \text{ MW}$$



Condensatore di un impianto frigorifero

In un condensatore di un impianto frigorifero il fluido di lavoro è freon-12 con una portata di 0.02 kg/s entra con una pressione di 1.2MPa e temperatura di 100°C ed esce in fase liquida con pressione di 1.15MPa e temperatura di 40°C.

L'acqua di raffreddamento entra con una temperatura di 5°C ed esce con una temperatura di 15°C. Determinare la portata dell'acqua di raffreddamento.



$$\begin{aligned}\dot{Q}_c &= \dot{m}_c q_c = \\ &= \dot{m}_c (h_{c2}^* - h_{c1}^*) = \\ &= 0.02(238 - 409) = \\ &= -3.42 \text{ kW}\end{aligned}$$

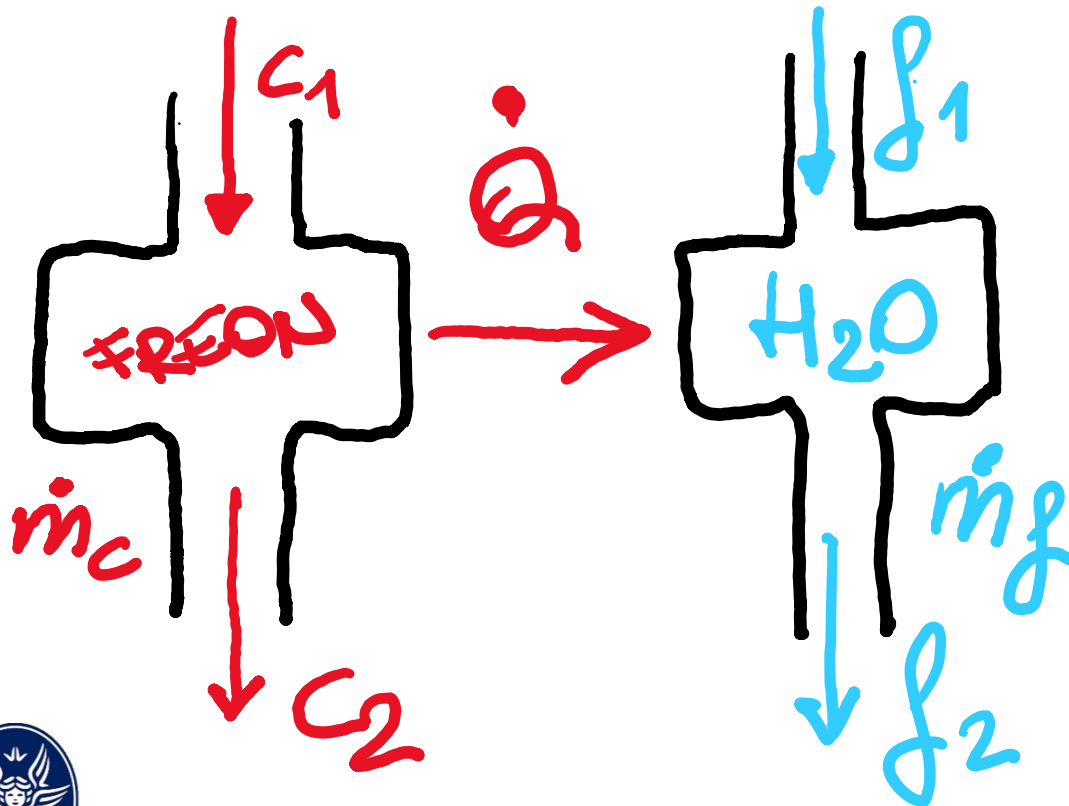
* DA TABELLE FREON 12



Condensatore di un impianto frigorifero

In un condensatore di un impianto frigorifero il fluido di lavoro è freon-12 con una portata di 0.02 kg/s entra con una pressione di 1.2MPa e temperatura di 100°C ed esce in fase liquida con pressione di 1.15MPa e temperatura di 40°C.

L'acqua di raffreddamento entra con una temperatura di 5°C ed esce con una temperatura di 15°C. Determinare la portata dell'acqua di raffreddamento.



$$q_f = (h_{f2}^* - h_{f1}^*) =$$
$$= 62.9 - 20.98 =$$
$$= 41.9 \text{ kJ/kg}$$

* DA TABELLE
H₂O



Condensatore di un impianto frigorifero

In un condensatore di un impianto frigorifero il fluido di lavoro è freon-12 con una portata di 0.02 kg/s entra con una pressione di 1.2MPa e temperatura di 100°C ed esce in fase liquida con pressione di 1.15MPa e temperatura di 40°C.

L'acqua di raffreddamento entra con una temperatura di 5°C ed esce con una temperatura di 15°C. Determinare la portata dell'acqua di raffreddamento.

