Sistemi aperti:
Primo Principio della Termodinamica

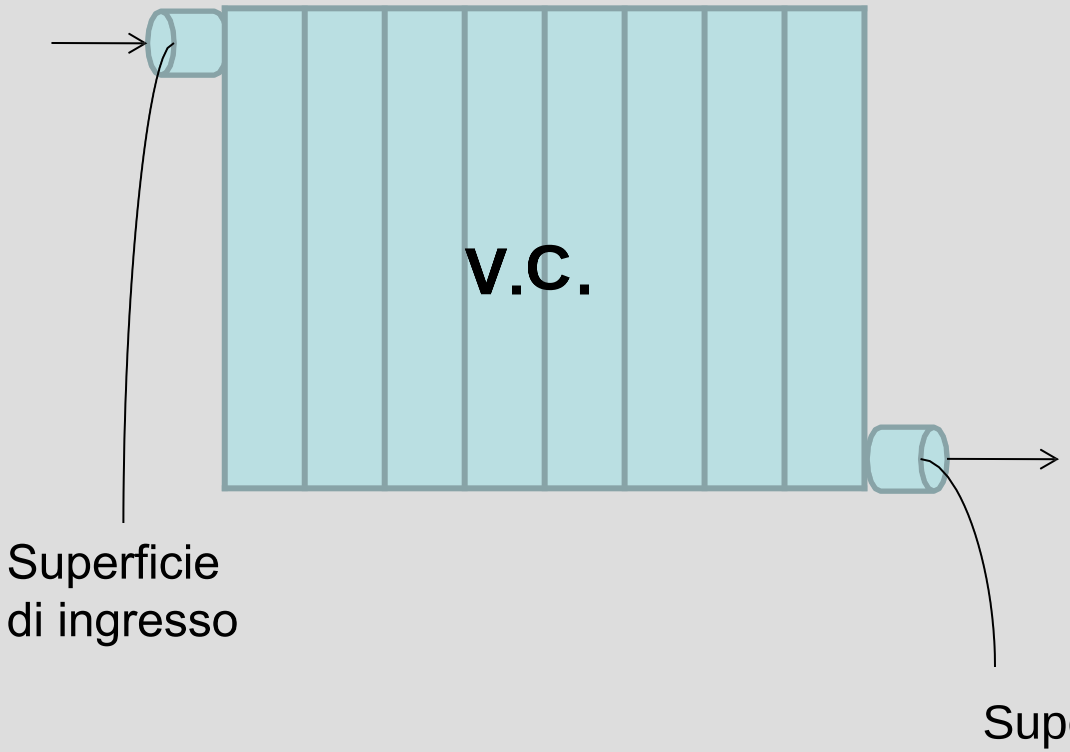
Lezione 13/03/2023

Sistema termodinamico aperto:
Sistema che attraverso il proprio contorno comportano flusso di massa

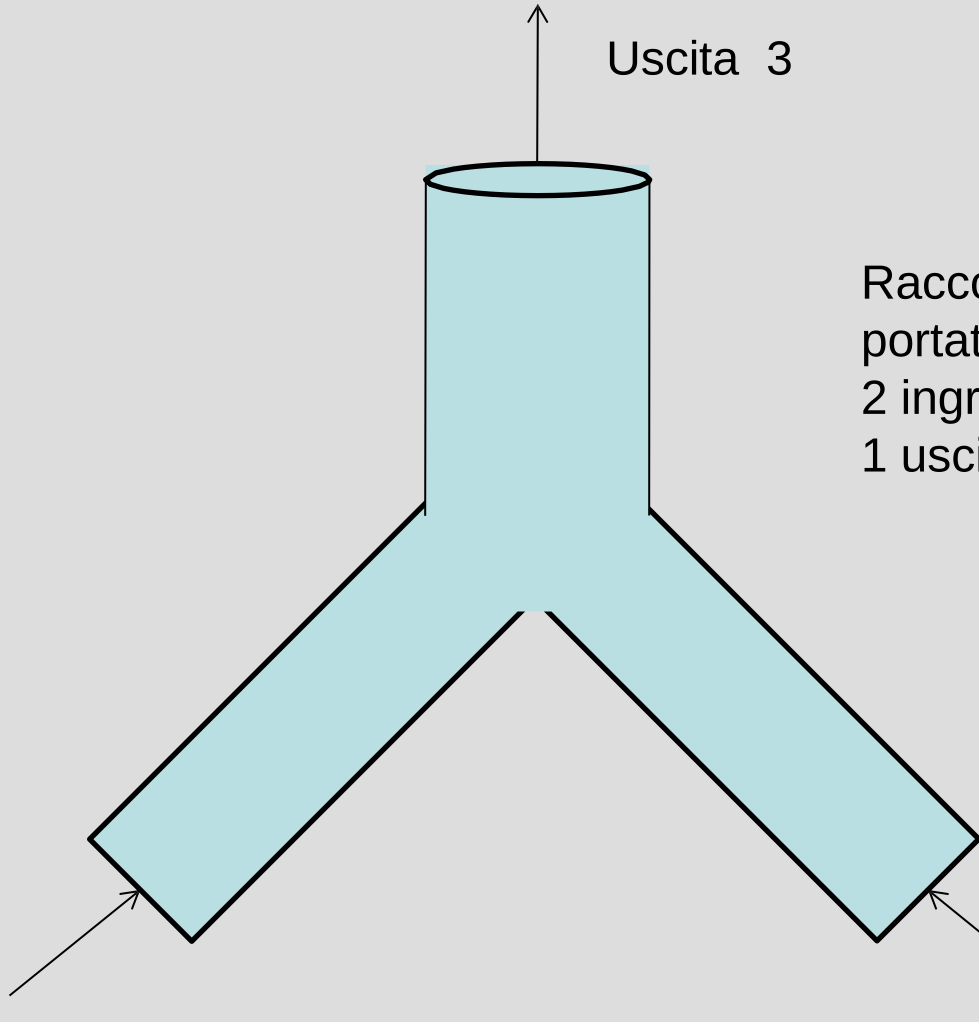
VOLUME DI CONTROLLO

Non ha senso parlare di MASSA DI CONTROLLO, perché dopo un certo periodo di osservazione, parte della sostanza che all'istante iniziale si trova dentro il sistema, nell'istante finale si trova in ambiente.

VOLUME DI CONTROLLO
Sistema delimitato da superfici che consentono l'ingresso e l'uscita della materia.



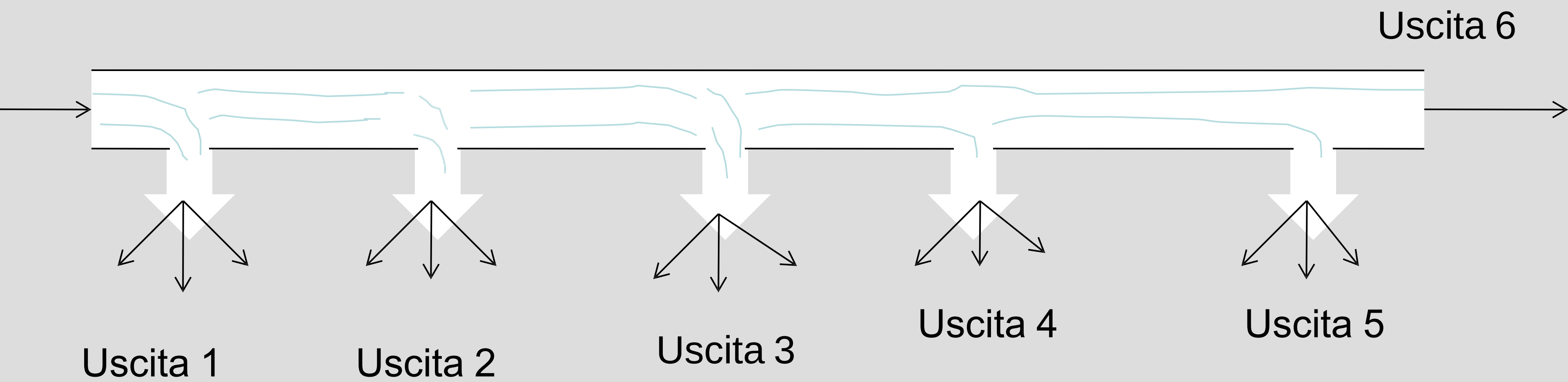
I componenti degli impianti di riscaldamento e condizionamento sono sistemi aperti



Raccordo di miscelazione di due portate d'acqua

2 ingressi (m_1, m_2)

1 uscita $m_3 = m_1+m_2$



Canale di distribuzione dell’aria negli ambienti di un impianto di climatizzazione
1 ingresso (m)
6 uscite (m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6)

Bilancio di massa

L'equazione di bilancio di una data grandezza, che può essere scambiata tra sistema e ambiente per dato intervallo di tempo, è:

Entrata + Produzione – Uscita - Consumo = Variazione

Se la grandezza è conservativa i termini **Produzione** e **Consumo** sono nulli

Quindi:

Entrata – Uscita = Variazione

La massa è una grandezza conservativa

Principio di conservazione della massa

Entrata – Uscita = Variazione

$m_e - m_u = \Delta m_{VolumeControllo}$

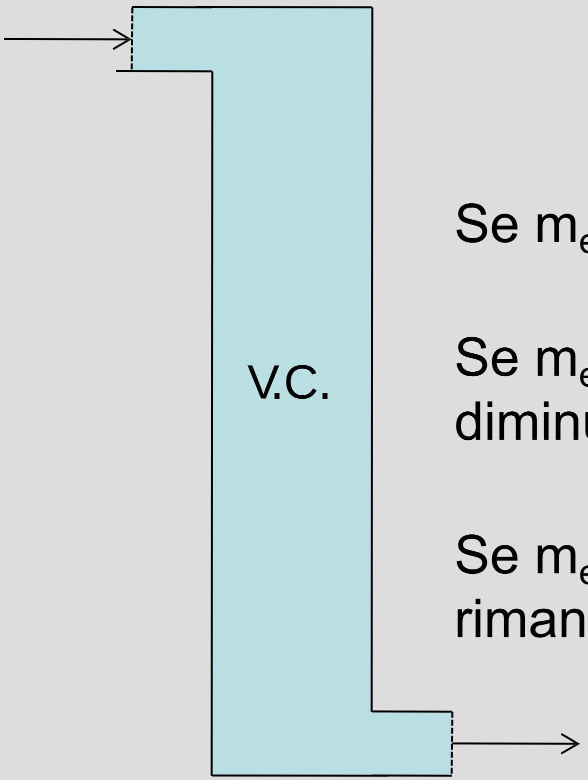
Principio di conservazione della massa nei volumi di controllo

Nei sistemi aperti il principio di conservazione della massa si esprime con la relazione:

Entrata – Uscita = Variazione

$$m_e - m_u = \Delta m_{VC}$$

Principio di conservazione della massa nei volumi di controllo



$$m_e - m_u = \Delta m_{VC}$$

Se $m_e > m_u$ allora $\Delta m_{VC} > 0$ la massa del sistema aumenta

Se $m_e < m_u$ allora $\Delta m_{VC} < 0$ la massa del sistema diminuisce

Se $m_e = m_u$ allora $\Delta m_{VC} = 0$ la massa all'interno del V.C. rimane costante

NOTA
Nel caso in cui $\Delta m_{VC} = 0$, non significa che non sia stata scambiata materia tra sistema e ambiente.

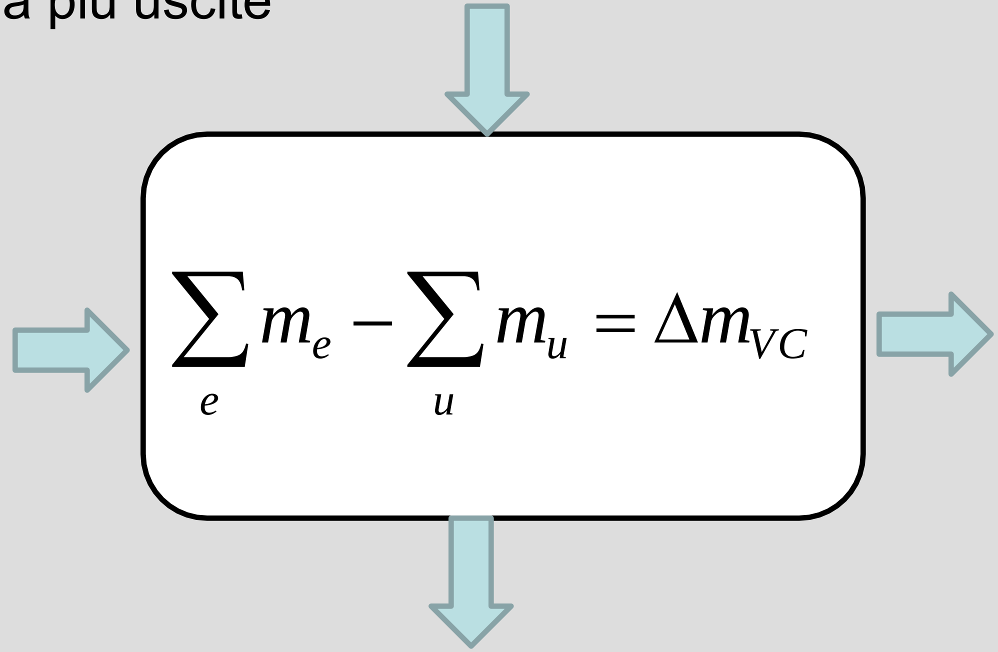
Principio di conservazione della massa

Il trasferimento netto di massa in un intervallo Δt da o verso un V.C. è uguale alla variazione (aumento o riduzione) della massa totale all'interno del V.C. durante Δt.

$$m_e - m_u = \Delta m_{VC} \qquad (kg)$$

$$\dot{m}_e - \dot{m}_u = \frac{dm_{VC}}{dt} \qquad (kg/s)$$

In generale, per un sistema a più entrate e a più uscite



$$\sum_e m_e - \sum_u m_u = \Delta m_{VC}$$

Fenomeni a regime stazionario o permanente

$$\dot{m}_e - \dot{m}_u = \frac{dm_{VC}}{dt} \quad (kg/s)$$

Fenomeno stazionario:
Fenomeno in cui le grandezze non variano nel tempo.

$$\frac{dm_{VC}}{dt} = 0$$

La portata massica è costante nel tempo

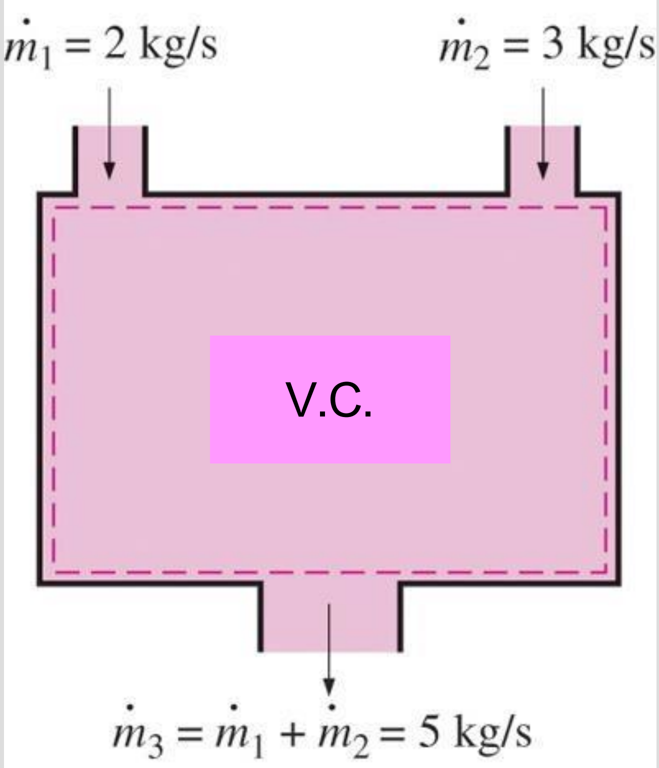
$$\dot{m}_e - \dot{m}_u = 0$$

$$\dot{m}_e = \dot{m}_u$$

Fenomeni a regime stazionario o permanente

Processi stazionari (m_{VC} = costante).

Principio di conservazione della massa di un V.C. in regime stazionario: durante un intervallo di tempo Δt la massa totale entrante è uguale a quella uscente.



$$\dot{m}_e = \dot{m}_1 + \dot{m}_2$$

$$\dot{m}_u = \dot{m}_3$$

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3$$

Bilancio di energia

Energia entrante + Energia prodotta – Energia in uscita - Energia consumata = Variazione dell'energia totale

L'energia è considerata come grandezza conservativa. Allora:

Energia entrante – Energia in uscita = Variazione dell'energia totale

In un sistema aperto l'energia può essere scambiata attraverso diverse modalità:

1. **calore,** in funzione di differenze di temperatura tra sistema e ambiente
2. **lavoro**, in funzione di differenze di pressione tra sistema e ambiente
3. **a seguito dei flussi di massa in ingresso che possono uscire ed entrare nel sistema**

Primo Principio della Termodinamica per i sistemi chiusi

$$\mathbf{Q - L = \Delta E}$$

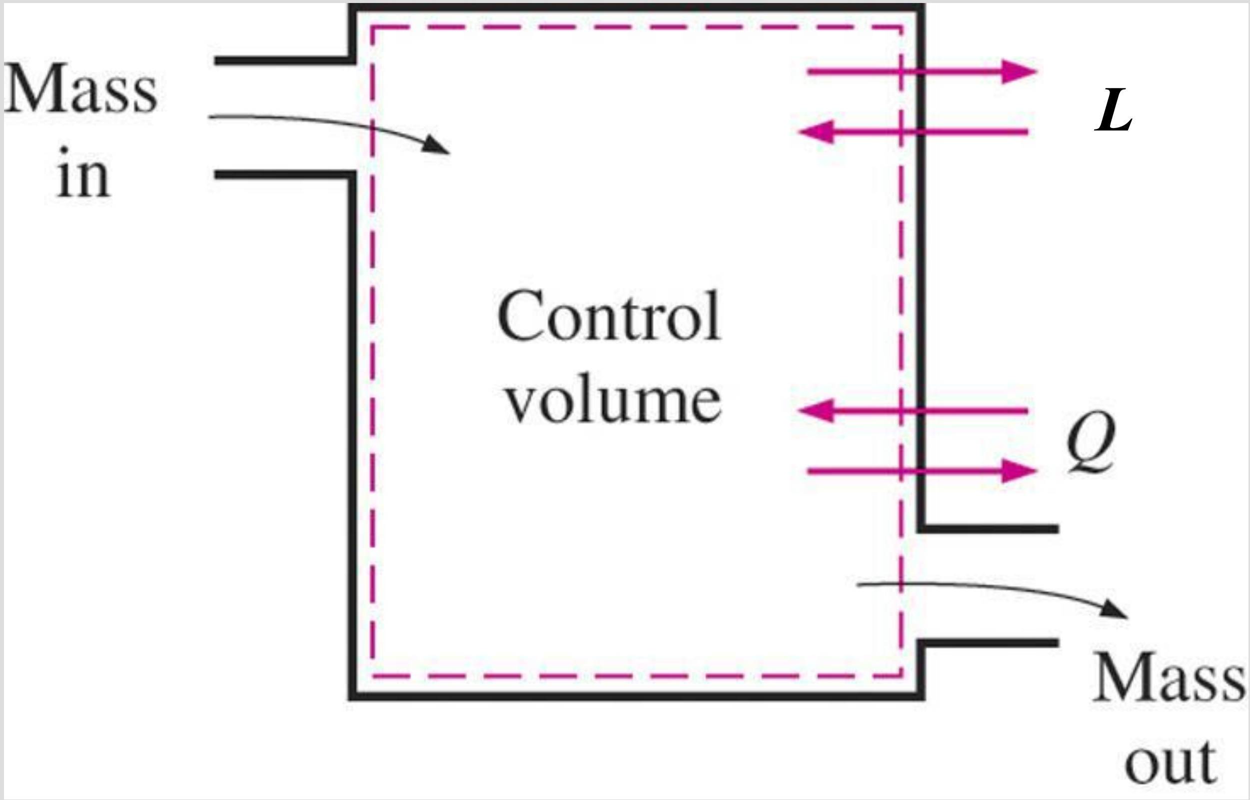
dove:

$$\mathbf{\Delta E = \Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p}$$

$$\mathbf{\Delta E = \Delta U}$$

Per sistemi chiusi e stazionari

Primo Principio della Termodinamica per i sistemi aperti



Primo Principio della Termodinamica per i sistemi aperti

In un sistema aperto l’energia può essere scambiata attraverso diverse modalità:

1. **calore,** in funzione di differenze di temperatura tra sistema e ambiente
2. **lavoro**, in funzione di differenze di pressione tra sistema e ambiente
3. **a seguito dei flussi di massa in ingresso che possono uscire ed entrare nel sistema**

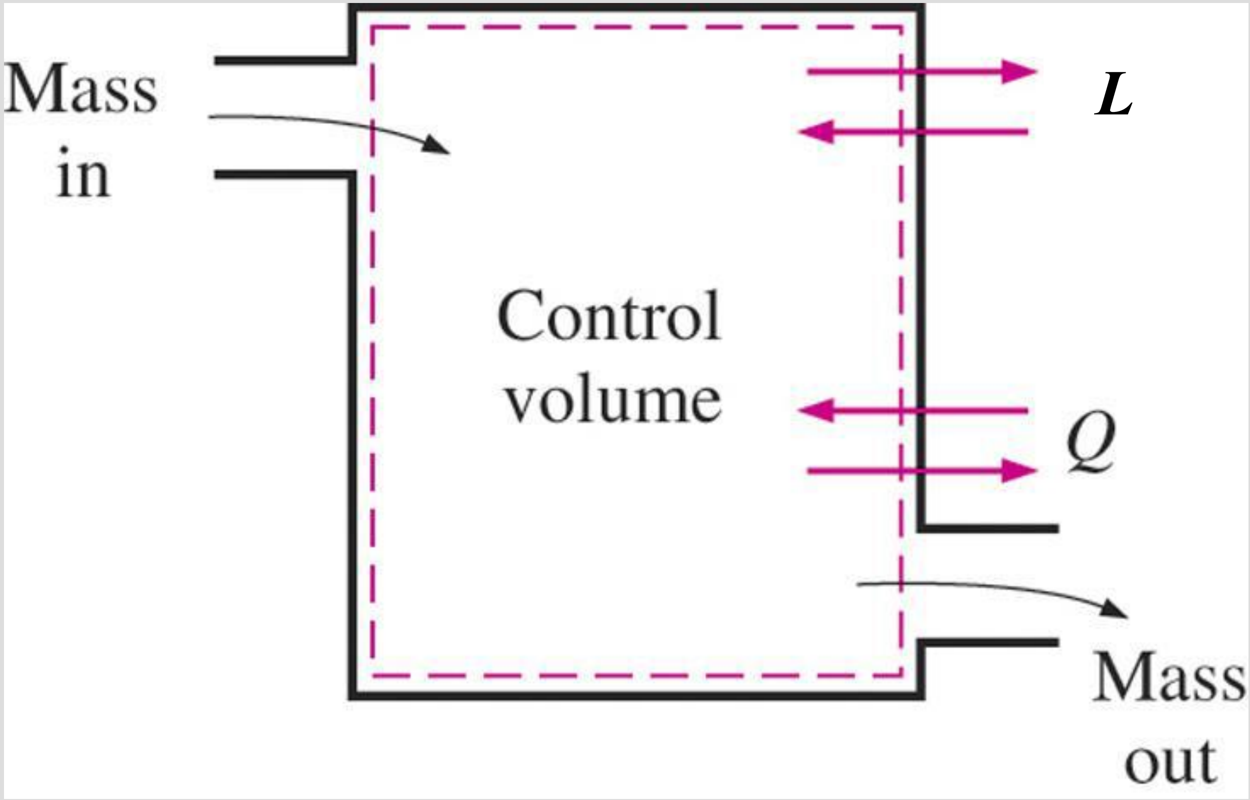
$$Q - L = \Delta E + E_{e,m} + E_{u,m}$$

dove:

$$\Delta E = \Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p$$

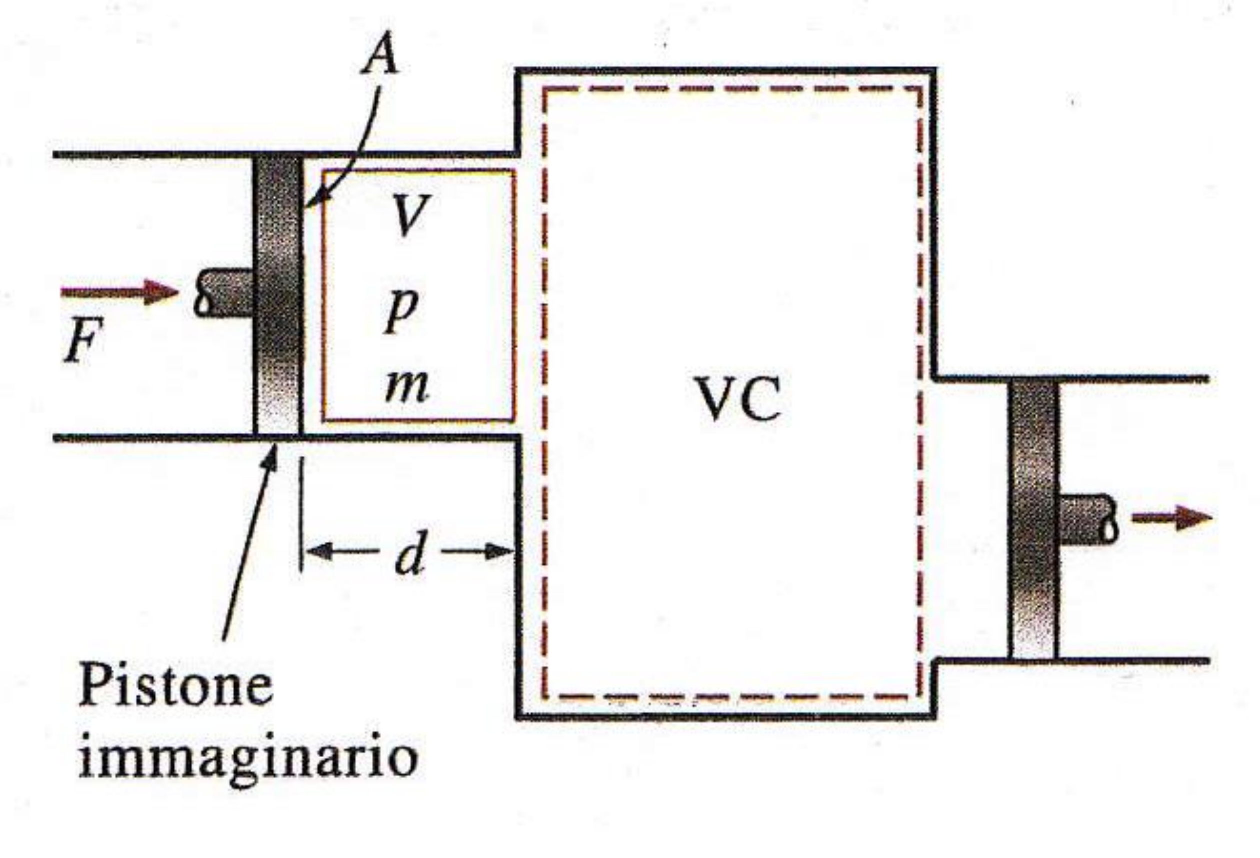
$$q - l = \Delta e + e_{e,m} + e_{u,m}$$

Primo Principio della Termodinamica per i sistemi aperti

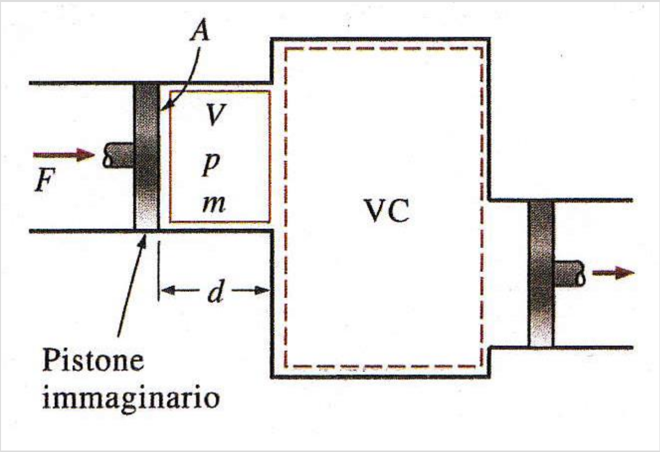


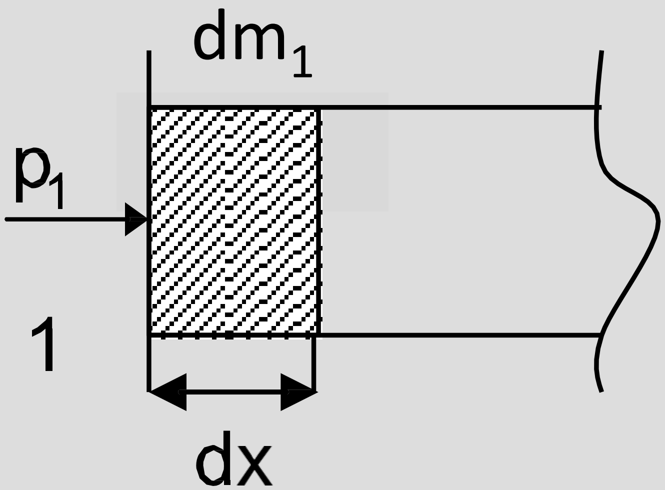
Lavoro di pulsione

Si definisce lavoro di pulsione il lavoro necessario a mantenere il flusso di massa attraverso il volume di controllo



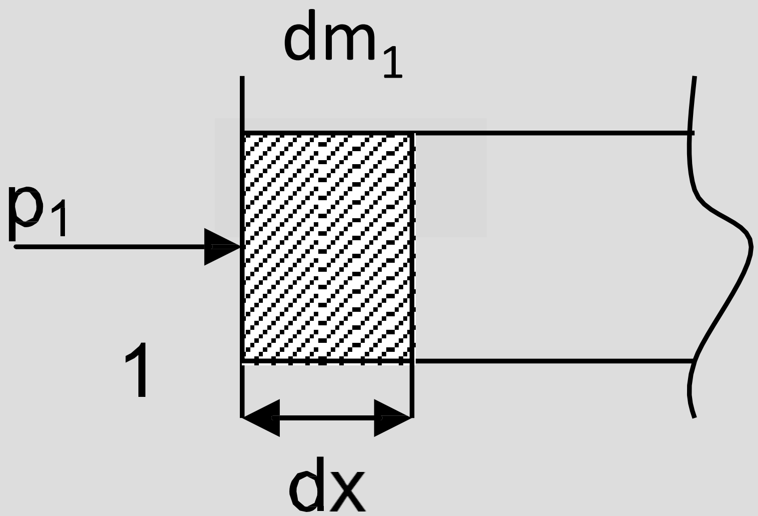
Facendo riferimento alla sezione 1 di ingresso, consideriamo allora la massa dM che la attraversa, come illustrato in figura





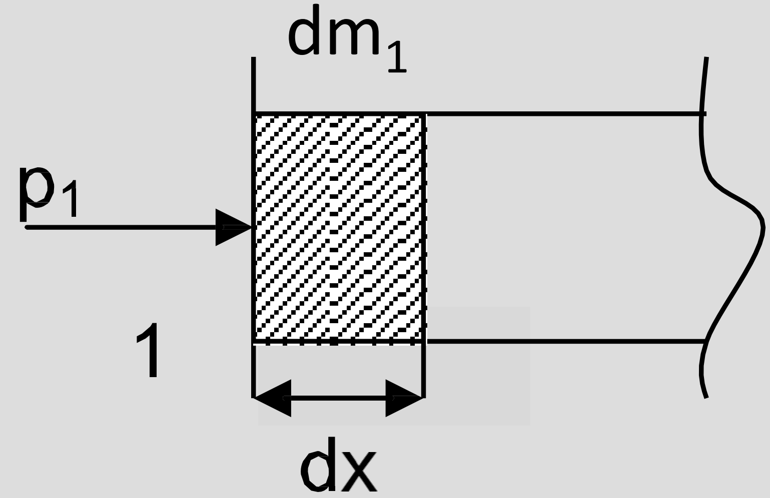
Siano:

- $\mathbf{p_1}$ (F/A) la pressione del fluido che spinge la massa $\mathbf{dm_1}$ in ingresso,
- **A** l'area della sezione 1 e **dx** lo spazio percorso dal fluido nel tempo dt.



Il lavoro compiuto sul sistema può essere scritto nel modo seguente:

$$dL = p_1 \; A \; dx$$



$$dL_1 = p_1\, A\, dx \qquad\qquad \text{dove } \mathrm{d}V_1 = A dx$$

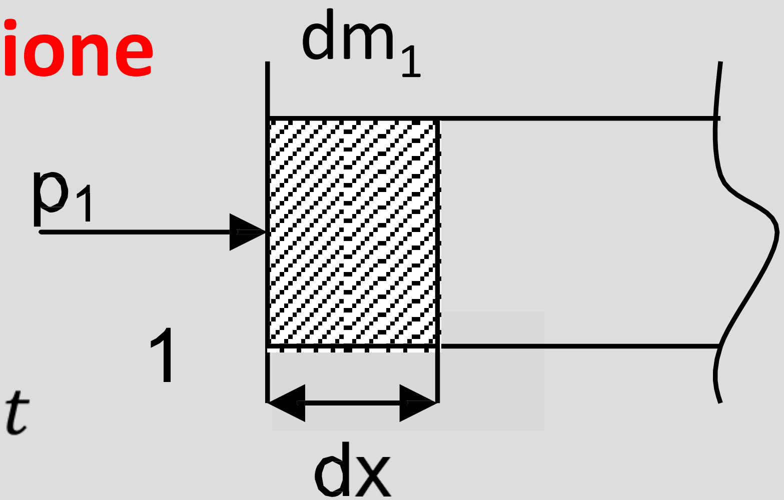
Divido il volume per l'intervallo di tempo *dt* e ottengo la portata volumetrica (volume che nell'unità di tempo attraversa l'area A):

$$\dot{V}_1 = \frac{dV_1}{dt} = \frac{Adx}{dt}$$

Pertanto: $$Adx = \dot{V}_1 dt$$

$$dL_1 = p_1 A dx = p_1 \dot{V}_1 dt$$

Lavoro di pulsione



$$dL_1 = p_1 \dot{V}_1 dt$$

Indichiamo con $\boldsymbol{v}_1$ il volume specifico del fluido in 1 e con $\dot{m}_1$ la sua portata in massa. Essendo:

$$\dot{V} = \dot{m} \cdot v$$

si ha: $$dL_1 = p_1 \cdot \dot{V}_1 \cdot dt = p_1 \cdot \dot{m}_1 \cdot v_1 \cdot dt = p_1 \cdot v_1 \cdot dm$$

dove: $$\dot{m}_1 \cdot dt = dm_1 \quad essendo\ \dot{m}_1 = \frac{dm_1}{dt}$$ **Portata massica o di massa**

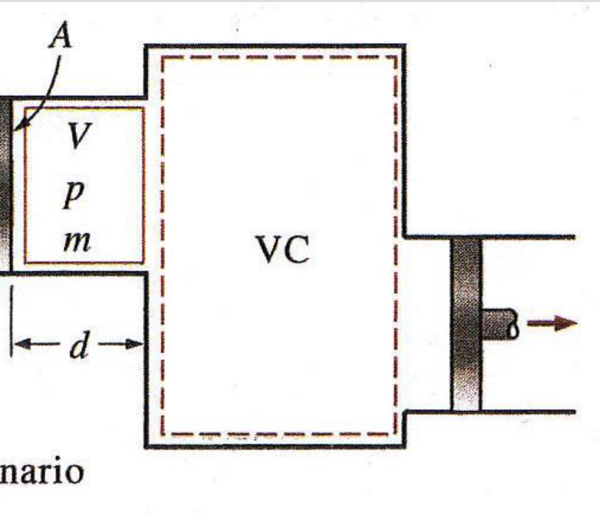
Se divido dL_1 per dm: $$l_1 = \frac{dL}{dm} = p_1 \cdot v_1$$

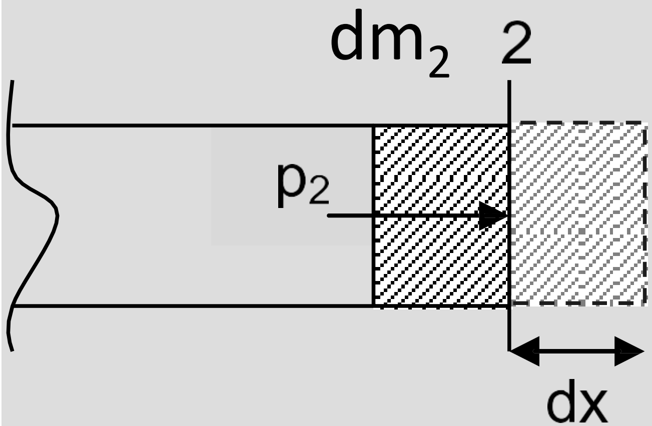
Lavoro di pulsione

$$l_1 = \frac{dL}{dm} = p_1 \cdot v_1$$

lavoro associato all'ingresso dell'unità di massa del fluido, ossia il lavoro che l’unità di massa del fluido deve compiere per entrare in un volume di controllo (sistema aperto)

Facciamo riferimento alla sezione 2 di uscita e consideriamo allora l'azione esercitata dalla massa infinitesima dM per uscire dal sistema



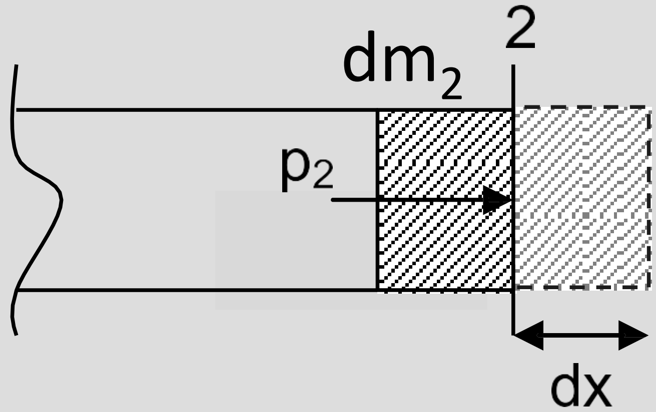


Sia:

- $\mathbf{p_2}$ la pressione del fluido esercitata dalla massa $\mathbf{dm_2}$ in uscita,
- **A** l'area della sezione 2
- **dx** lo spazio infinitesimo percorso dal fluido nel tempo dt.

Il lavoro subito dal sistema può essere scritto nel modo seguente:

$$dL_2 = p_2 \, A \, dx$$



$$dL = p_2\, A\, dx \qquad\qquad \text{dove } dV_2 = Adx$$

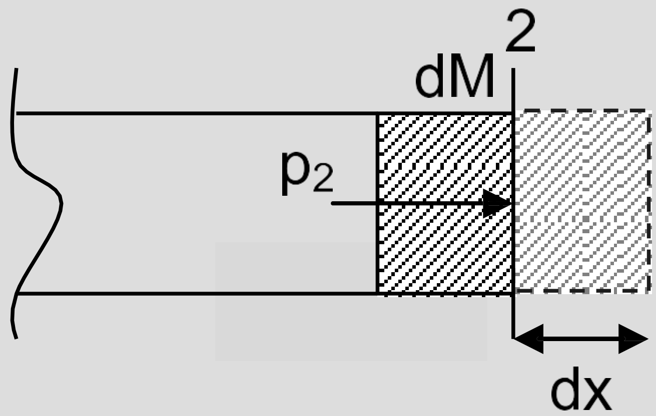
Divido il volume per l'intervallo di tempo *dt* e ottengo la portata volumetrica (volume che nell'unità di tempo attraversa l'area A):

$$\dot{V}_2 = \frac{dV_2}{dt} = \frac{Adx}{dt}$$

Pertanto:

$$Adx = \dot{V}_2 dt$$

$$dL_2 = p_2 Adx = p_2 \dot{V}_2 dt$$



Se adesso indichiamo con v_2 il volume specifico del fluido in 2 e con $\dot{m}_2$ la sua portata in massa, si ha:

$$dL_2 = p_2 \cdot \dot{V}_2 \cdot dt = p_2 \cdot \dot{m}_2 \cdot v_2 \cdot dt = p_2 \cdot v_2 \cdot dm$$

dove: $\dot{m}_2 \cdot dt = dm_2 \quad essendo\ \dot{m}_2 = \dfrac{dm_2}{dt}$ **Portata massica o di massa**

Se divido dL_2 per dm:

$$l_2 = \frac{dL}{dm} = p_2 \cdot v_2$$

Lavoro di pulsione

$$l_2 = \frac{dL}{dM} = p_2 \cdot v_2$$

lavoro associato all’uscita dell'unità di massa del fluido, ossia il lavoro che l’unità di massa del fluido deve compiere per uscire da un volume di controllo (sistema aperto)

Lavoro di pulsione

$$l = \frac{dL}{dM} = p \cdot v$$

Si definisce **lavoro di pulsione** il lavoro compiuto per spingere un flusso di massa unitario attraverso il contorno di un dato volume di controllo, per spingere l'unità di massa stessa dall'esterno all'interno del volume di controllo e viceversa.

Quindi, esso è necessario per mantenere un flusso di massa continuo attraverso il volume di controllo.

Primo principio della Termodinamica per i sistemi aperti

$$Q - L = \Delta E$$

$$Q - L = \Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p + m_2 p_2 v_2 - m_1 p_1 v_1$$

Tra la sezione di ingresso 1 e la sezione di uscita 2:

$$Q - L = \left(U_2 + \frac{1}{2} m_2 w_2^{\ 2} + m_2 g z_2 + m_2 p_2 v_2 \right) - \left(U_1 + \frac{1}{2} m_1 w_1^{\ 2} + m_1 g z_1 + m_1 p_1 v_1 \right)$$

Con riferimento ad un intervallo di tempo Δt

$$\dot{Q} - \dot{L} = \left(\dot{U}_2 + \frac{1}{2}\dot{m}_2 w_2{}^2 + \dot{m}_2 g z_2 + \dot{m}_2 p_2 v_2 \right) - \left(\dot{U}_1 + \frac{1}{2}\dot{m}_1 w_1{}^2 + \dot{m}_1 g z_1 + \dot{m}_1 p_1 v_1 \right)$$

$$\dot{Q} - \dot{L} = \dot{m}_2 \cdot \left(u_2 + \frac{1}{2} w_2{}^2 + g z_2 + p_2 v_2 \right) - \dot{m}_1 \cdot \left(u_1 + \frac{1}{2} w_1{}^2 + g z_1 + p_1 v_1 \right)$$

Se il regime è stazionario

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

Inoltre, si ricorda che l'entalpia è:

$$h = u + pv$$

Regime stazionario

$$\dot{Q} - \dot{L} = \dot{m}_2 \cdot \left(u_2 + \frac{1}{2} {w_2}^2 + g z_2 + p_2 v_2 \right) - \dot{m}_1 \cdot \left(u_1 + \frac{1}{2} {w_1}^2 + g z_1 + p_1 v_1 \right)$$

$$\Downarrow$$

$$\dot{Q} - \dot{L} = \dot{m} \cdot \left(h_2 + \frac{1}{2} {w_2}^2 + g z_2 \right) - \dot{m} \cdot \left(h_1 + \frac{1}{2} {w_1}^2 + g z_1 \right)$$

$$\dot{Q} - \dot{L} = \dot{m} \cdot \left[(h_2 - h_1) + g (z_2 - z_1) + \frac{1}{2} \left({w_2}^2 - {w_1}^2 \right) \right]$$

Regime stazionario

$$\dot{Q} - \dot{L} = \dot{m} \cdot \left[(h_2 - h_1) + g(z_2 - z_1) + \frac{1}{2}\left(w_2^{\ 2} - w_1^{\ 2} \right) \right]$$

$$per\ unità\ di\ \ portata:$$

$$q - l = (h_2 - h_1) + g(z_2 - z_1) + \frac{1}{2}\left(w_2^{\ 2} - w_1^{\ 2} \right)$$

Se Q - L = 0

$$\dot{Q} - \dot{L} = \dot{m} \cdot \left[(h_2 - h_1) + g(z_2 - z_1) + \frac{1}{2}\left(w_2{}^2 - w_1{}^2 \right) \right]$$

$$diventa:$$

$$(h_2 - h_1) + g(z_2 - z_1) + \frac{1}{2}\left(w_2{}^2 - w_1{}^2 \right) = 0$$

$$h_2 + gz_2 + \frac{1}{2} w_2{}^2 = h_1 + gz_1 + \frac{1}{2} w_1{}^2$$

Primo principio della Termodinamica per i sistemi aperti, stazionari, senza variazioni di quota

$$\dot{Q} - \dot{L} = \dot{m} \cdot \left[(h_2 - h_1) + g(z_2 - z_1) + \frac{1}{2}\left(w_2{}^2 - w_1{}^2 \right) \right]$$

Se le sezioni di ingresso e di uscita si trovano alla stessa quota rispetto al piano di riferimento:

$$\dot{Q} - \dot{L} = \dot{m} \cdot \left[(h_2 - h_1) + \frac{1}{2}\left(w_2{}^2 - w_1{}^2 \right) \right]$$

Se le velocità di ingresso e di uscita sono uguali e sono uguali anche le quote, non ci sono variazioni né di energia cinetica, né di energia potenziale. Quindi:

$$\dot{Q} - \dot{L} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1)$$

$$q - l = h_2 - h_1$$

Primo principio della Termodinamica per i sistemi isoentalpici

Se il sistema è adiabatico ed è nullo il lavoro di variazione di volume, si ha:

$$\dot{Q} = 0$$

$$\dot{L} = 0$$

$$\dot{m} \cdot \left[\left(h_2 - h_1 \right) + g(z_2 - z_1) + \frac{1}{2} \left(w_2{}^2 - w_1{}^2 \right) \right] = 0$$

$$\left(h_2 - h_1 \right) + g(z_2 - z_1) + \frac{1}{2} \left(w_2{}^2 - w_1{}^2 \right) = 0$$

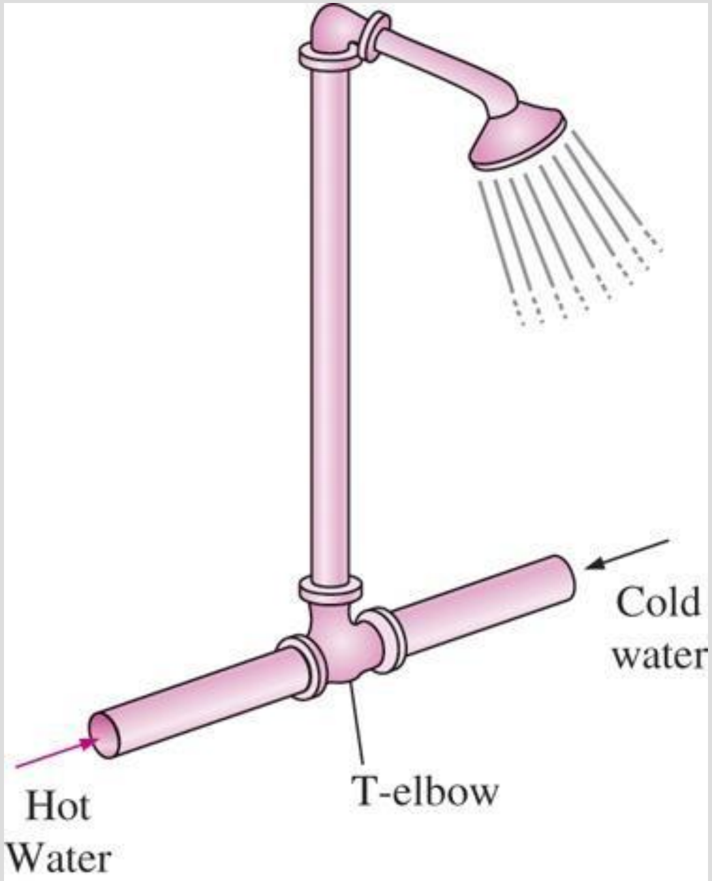
Se, inoltre, le velocità di ingresso e di uscita sono uguali e sono uguali anche le quote, non ci sono variazioni né di energia cinetica, né di energia potenziale. Quindi:

$$\dot{m} \cdot (\dot{h}_2 - \dot{h}_1) = 0$$

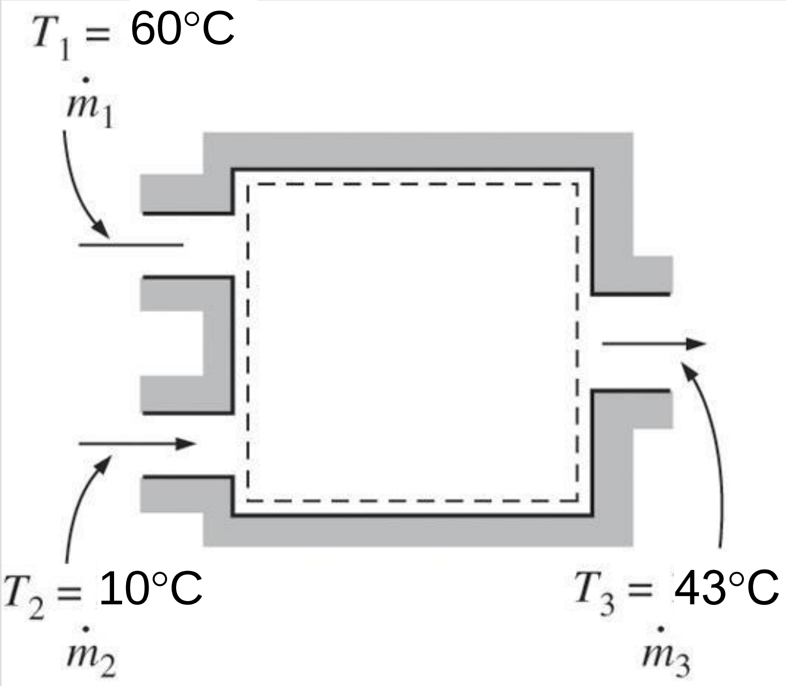
$$\dot{h}_2 - \dot{h}_1 = 0$$

Il sistema è isoentalpico

Camere di miscelazione



Giunto a T di una doccia.
Miscelazione di acqua calda e acqua fredda.



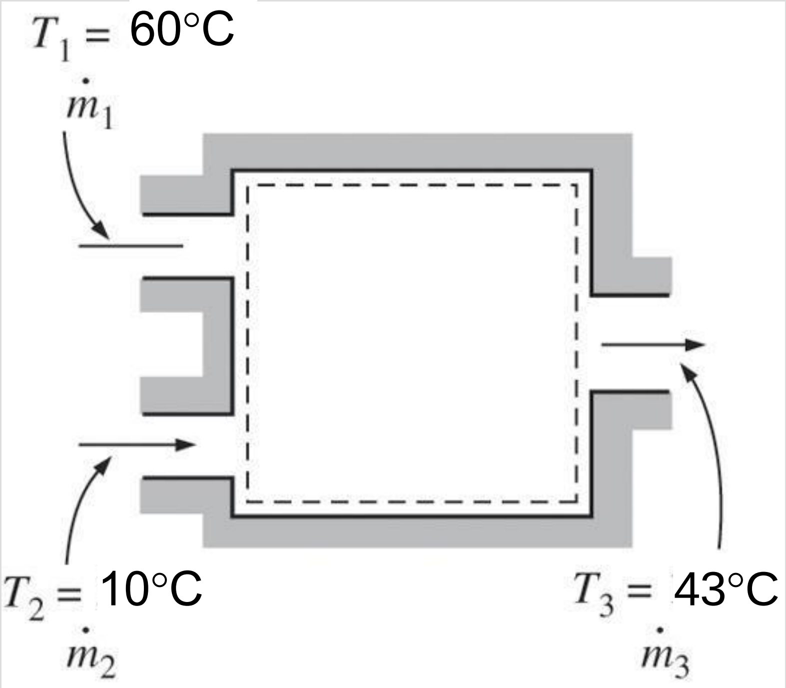
camera di miscelazione adiabatica (Q=0)

$$\dot{m}_e = \dot{m}_1 + \dot{m}_2$$

$$\dot{m}_u = \dot{m}_3$$

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3$$

Camere di miscelazione



Bilancio di massa

$$\dot{m}_e = \dot{m}_1 + \dot{m}_2$$

$$\dot{m}_u = \dot{m}_3$$

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3$$

Bilancio di energia

$$Q = 0 \quad L = 0 \quad \Delta E_c = 0 \quad \Delta E_p = 0$$

$$h_i - h_e = 0$$

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_3 h_3$$