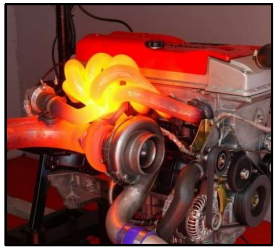
Capitolo 5

Analisi energetica ai volumi di controllo

Fisica Tecnica

Docente: Riccardo Zamolo (rzamolo@units.it)



A.A. 2025/2026

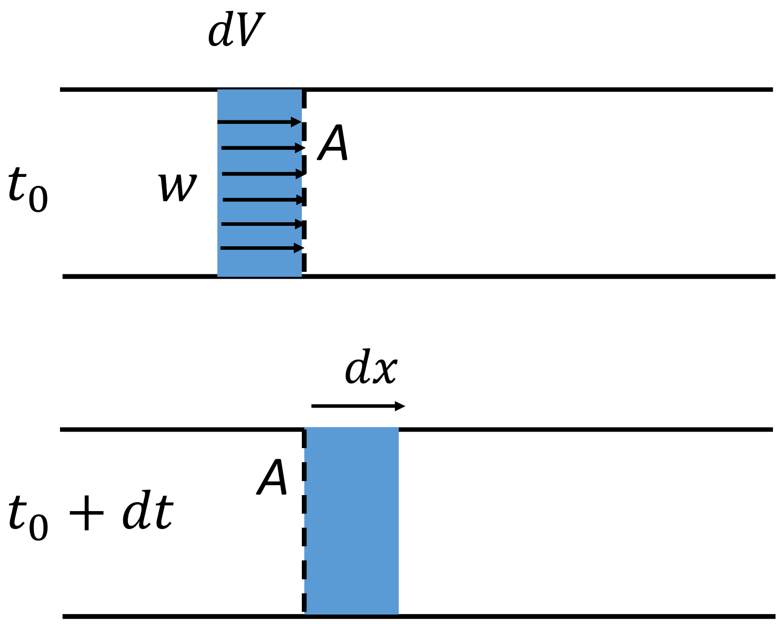
Obiettivo del capitolo e sommario

L'obiettivo di questo capitolo è di sviluppare e illustrare l'analisi termodinamica dei volumi di controllo (sistemi aperti) applicando i principi di conservazione:

- conservazione della massa
- conservazione dell'energia

Si vedranno infine tipiche applicazioni ingegneristiche in regime stazionario.

Portata volumetrica

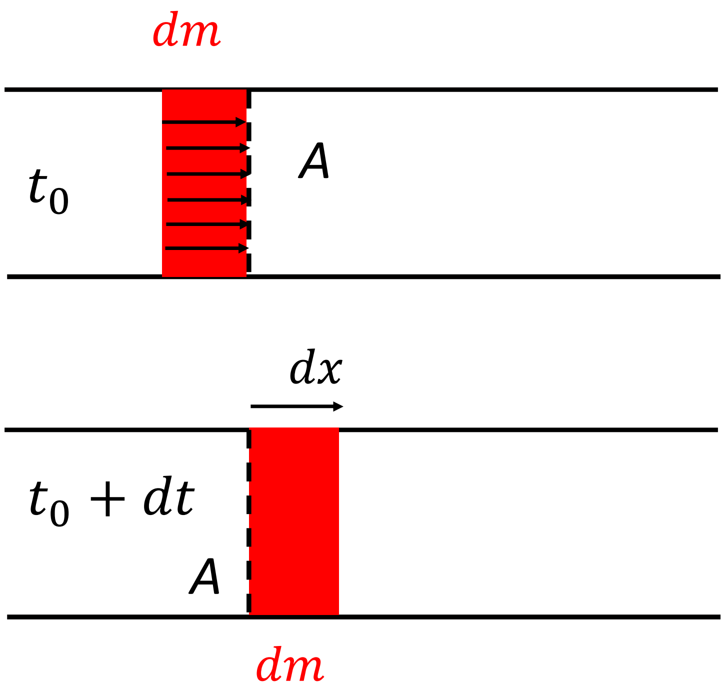


- Volume infinitesimo di fluido che transita da una sezione, velocità uniforme
- Transito nel tempo *dt* infinitesimo

$$dV = dx \cdot A$$

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} = \frac{dx}{dt} \cdot A = w \cdot A \qquad \left[\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}}\right]$$

Portata di massa



- Posso considerare la massa *dm*
- Transito nel tempo *dt* infinitesimo

$$dm = \rho \cdot dV$$

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} = \rho \cdot \frac{dV}{dt} = \rho \cdot \dot{V} =$$

$$= \rho \cdot w \cdot A \quad \left(= \frac{w \cdot A}{v} \right) \qquad \left[\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}} \right]$$

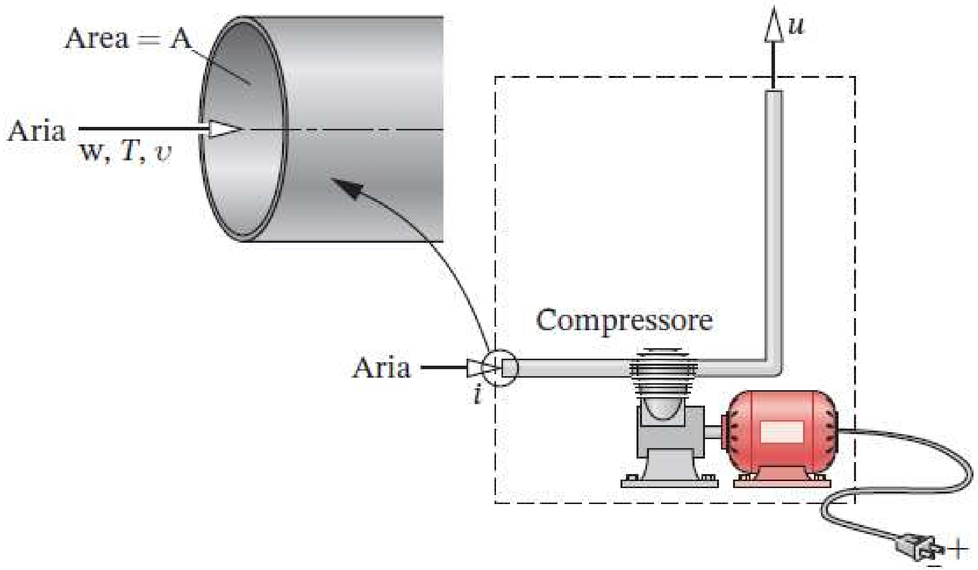
Conservazione della massa - 2

Flusso monodimensionale

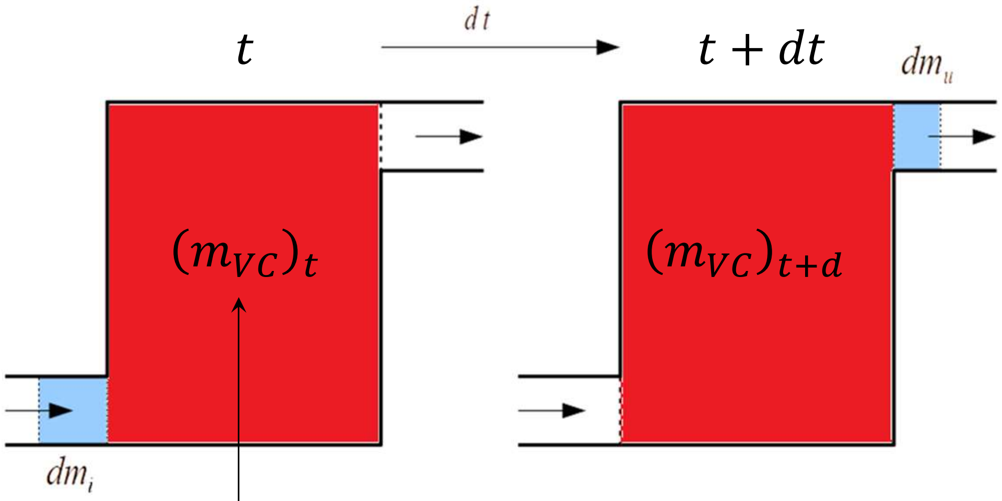
Flusso monodimensionale se:

- La velocità del fluido è normale al contorno del volume di controllo in corrispondenza;
- Tutte le proprietà intensive, incluse la velocità e il volume specifico, sono uniformi.

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot w$$



Bilancio di massa



$$(m_{VC}) = \int_{VC} \rho(\boldsymbol{x}, t)\, dV$$

- Masse infinitesime dm_i in entrata e dm_u in uscita nel tempo *dt*
- Sistema chiuso, la massa si conserva:

$$\overbrace{dm_i + (m_{VC})_t}^{t} = \overbrace{dm_u + (m_{VC})_{t+dt}}^{t+dt} \qquad [\mathrm{kg}]$$

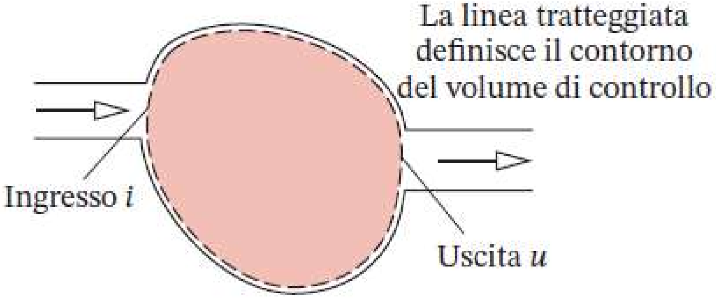
$$(m_{VC})_{t+dt} - (m_{VC})_t = dm_{VC}$$

$$\frac{dm_{VC}}{dt} = \frac{dm_i}{dt} - \frac{dm_u}{dt} = \dot{m}_i - \dot{m}_u \qquad \left[\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{s}}\right]$$

Conservazione della massa - 1

Bilancio della portata massica

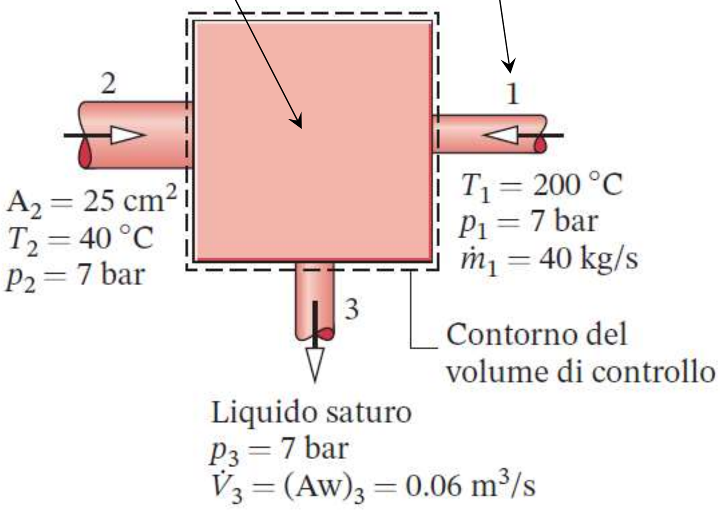
Variazione nell'unità di tempo della massa contenuta nel volume di controllo all'istante *t*	=	Portata massica entrante attraverso l'ingresso *i* all'istante *t*	−	Portata massica uscente attraverso l'uscita *u* all'istante *t*



$$\frac{dm_{VC}}{dt} = \sum \dot{m}_i - \sum \dot{m}_u$$

Conservazione della massa - Regime stazionario

Un sistema aperto opera in **stato (o regime) stazionario** se **tutte** le proprietà (all'interno e al contorno) non variano nel tempo.



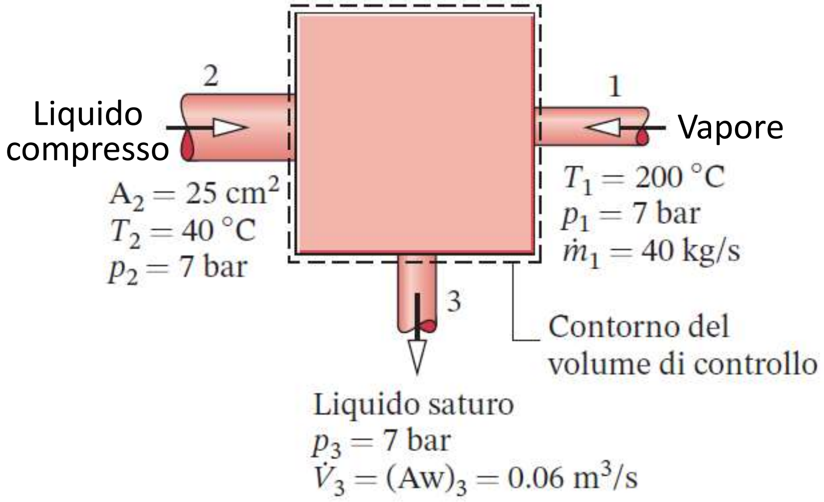
$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_u$$

$$\left(\frac{dm_{VC}}{dt} = 0\right)$$

è condizione necessaria ma non sufficiente: *T* e *p* potrebbero variare nel tempo.

Es. 5.1 (conservazione massa, acqua)

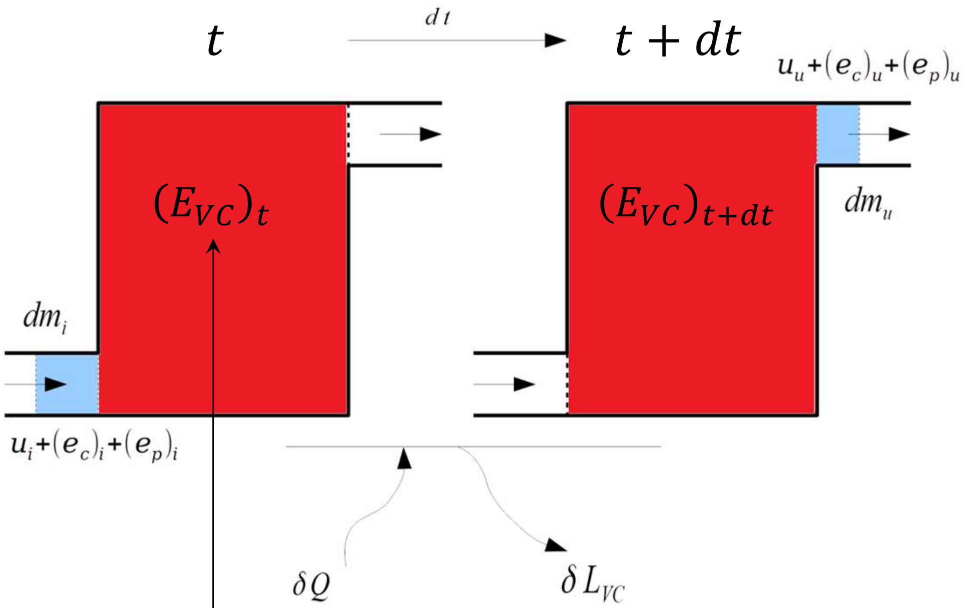
Regime stazionario, tabelle valori consultabili https://www.docenti.unina.it/webdocenti-be/allegati/materiale-didattico/640565



$$\dot{m}_2 = ? \quad \dot{m}_3 = ?$$
$$w_2 = ?$$

Conservazione dell'energia

Operiamo considerando il sistema come chiuso, seguendo l'evoluzione di una massa fissata di fluido:



$$\delta Q - \delta L =$$

$$dm_u \cdot (e_{tot})_u + (E_{VC})_{t+dt} \qquad \text{[Joule]}$$
$$-[dm_i \cdot (e_{tot})_i + (E_{VC})_t]$$

$$(E_{VC})_{t+} \quad - (E_{VC})_t = dE_{VC}$$

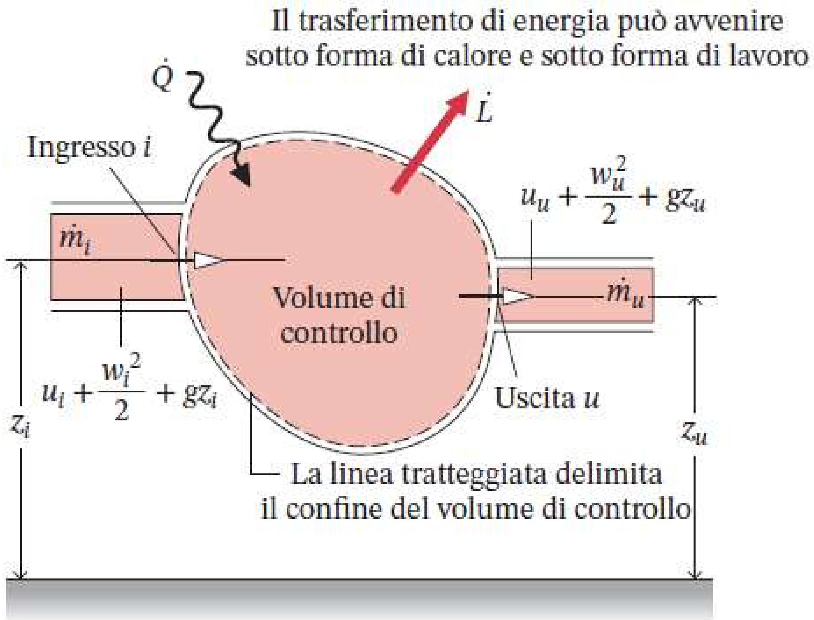
$$\frac{\delta Q}{dt} - \frac{\delta L}{dt} = \qquad \left[\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{s}} = \mathrm{W}\right]$$
$$\frac{dm_u}{dt} \cdot (e_{tot}) \quad - \frac{dm_i}{dt} \cdot (e_{tot})_i + \frac{dE_{VC}}{dt}$$

$$(E_{VC}) \;= \int_{VC} \rho(\boldsymbol{x}, t) e_{tot} dV \qquad \text{[Joule]}$$

$$\Rightarrow \quad \dot{Q} - \dot{L} + \dot{m}_i \cdot (e_{tot})_i - \dot{m}_u \cdot (e_{tot})_u = \frac{dE_{VC}}{dt}$$

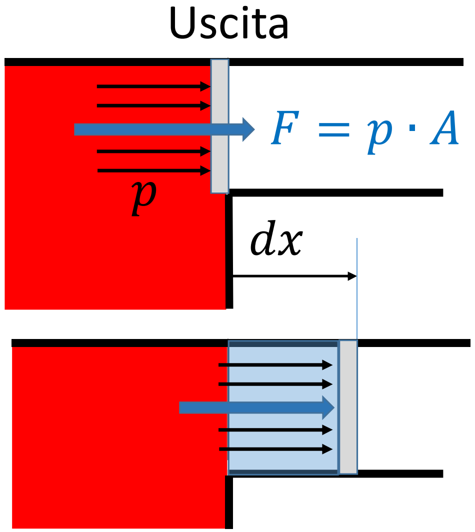
Conservazione dell'energia - 1

Bilancio energetico per volume di controllo



$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q} - \dot{L} + \dot{m}_i\left(u_i + \frac{w_i^2}{2} + gz_i\right) - \dot{m}_u\left(u_u + \frac{w_u^2}{2} + gz_u\right)$$

Lavoro di pulsione L'



$$\delta L' = F \cdot dx = p \cdot A \cdot dx = p \cdot dV = p \cdot \dot{V} \cdot dt \qquad [\text{Joule}]$$

$$\dot{L}' = \frac{\delta L'}{dt} = p \cdot \dot{V} = p \cdot \frac{\dot{m}}{\rho} = \dot{m} \cdot p \cdot v \qquad \left[\frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{W}\right]$$

Prodotto $p \cdot v$ detto lavoro (o energia) specifico di pulsione $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = \frac{\text{J}}{\text{kg}}\right]$

Segni per il lavoro di pulsione:
+ all'uscita (lavoro svolto dal fluido verso l'ambiente: velocità **concorde** alle forze di pressione del fluido)
- all'entrata (lavoro svolto dall'ambiente verso il fluido: velocità **opposta** alle forze di pressione del fluido)

Conservazione dell'energia - 3

Il lavoro totale $\dot{L}$ si compone del **lavoro tecnico** $\dot{L}_{VC}$ scambiato attraverso il contorno del VC e di quelli di **pulsione** agli ingressi $\dot{L}'_i$ e alle uscite $\dot{L}'_u$ (NB stessa convenzione dei segni: lavoro + se fatto dal sistema verso l'ambiente):

$$\dot{L} = \dot{L}_{VC} + \dot{L}'_u - \dot{L}'_i$$

$$\dot{Q} - \dot{L} + \dot{m}_i \cdot (e_{tot})_i - \dot{m}_u \cdot (e_{tot})_u = \frac{dE_{VC}}{dt} \qquad \left[\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{s}} = \mathrm{W}\right]$$

$$\dot{Q} - \dot{L}_{VC} + \dot{m}_i \cdot (e_{tot} + pv)_i - \dot{m}_u \cdot (e_{tot} + pv)_u = \frac{dE_{VC}}{dt}$$

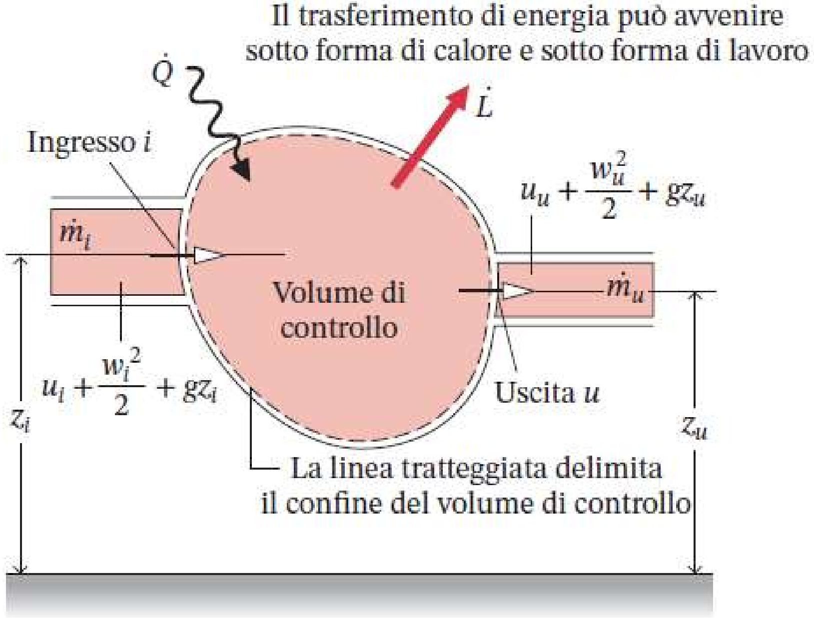
$$e_{tot} + pv = e_C + e_P + u + pv = e_C + e_P + h$$

$$\Rightarrow \quad \dot{Q} - \dot{L}_{VC} + \sum \dot{m}_k \cdot (e_C + e_P + h)_k = \frac{dE_{VC}}{dt} \qquad 1° \; principio \; per \; sistemi \; aperti$$

Segni portate $\dot{m}_k$:
+ per portate **entranti** ($k = i$)
- per portate **uscenti** ($k = u$)

Conservazione dell’energia - 4

Altra forma del bilancio energetico per volume di controllo



Attenzione alle fasi di transitorio.

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} - \dot{L}_{vc} + \sum_i \dot{m}_i \left(h_i + \frac{w_i^2}{2} + gz_i \right) - \sum_u \dot{m}_u \left(h_u + \frac{w_u^2}{2} + gz_u \right)$$

Analisi dei volumi di controllo in **regime stazionario** - 1

Bilancio di massa

$$\sum_i \dot{m}_i = \sum_u \dot{m}_u \qquad \left(\frac{dm_{VC}}{dt} = 0\right)$$

Bilancio di energia

$$\dot{Q} - \dot{L}_{VC} + \sum \dot{m}_k \cdot (e_C + e_P + h\,)_k = 0 \qquad \left(\frac{dE_{VC}}{dt} = 0\right)$$

Oppure con segni espliciti:

$$\underbrace{\dot{Q} + \sum \dot{m}_i \cdot (e_C + e_P + h\,)_i}_{\text{Quantità entranti}} = \underbrace{\dot{L}_{VC} + \sum \dot{m}_u \cdot (e_C + e_P + h\,)_u}_{\text{Quantità uscenti}}$$

Analisi dei volumi di controllo in **regime stazionario** - 2

Volumi di controllo con un solo ingresso e una sola uscita

Bilancio di massa

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

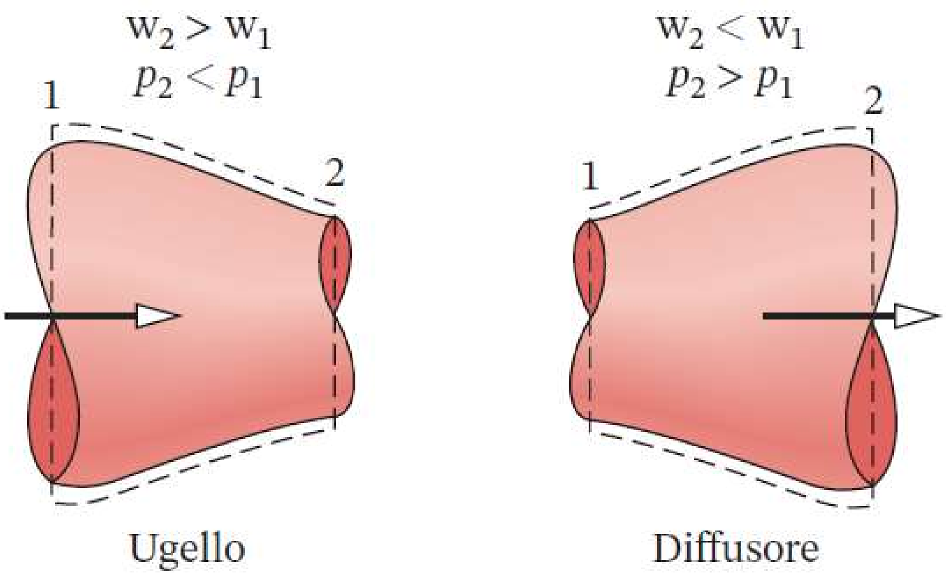
Bilancio di energia

$$0 = \frac{\dot{Q}_{vc}}{\dot{m}} - \frac{\dot{L}_{vc}}{\dot{m}} + (h_1 - h_2) + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2} + g(z_1 - z_2)$$

Calore e **lavoro tecnico** specifici (per unità di massa di fluido): $\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{kg}/\mathrm{s}} = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}}$

Analisi dei volumi di controllo in regime stazionario - 3

Ugelli e diffusori

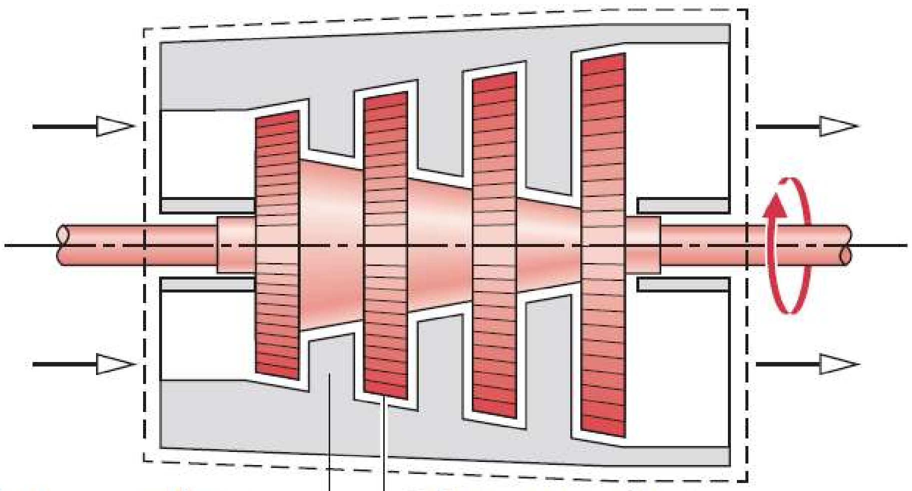


Assunzioni:
- stazionario
- lavoro tecnico nullo
- calore scambiato nullo
- variazioni di quota trascurabili

$$0 = h_1 - h_2 + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2}$$

Analisi dei volumi di controllo in regime stazionario - 4

Turbine

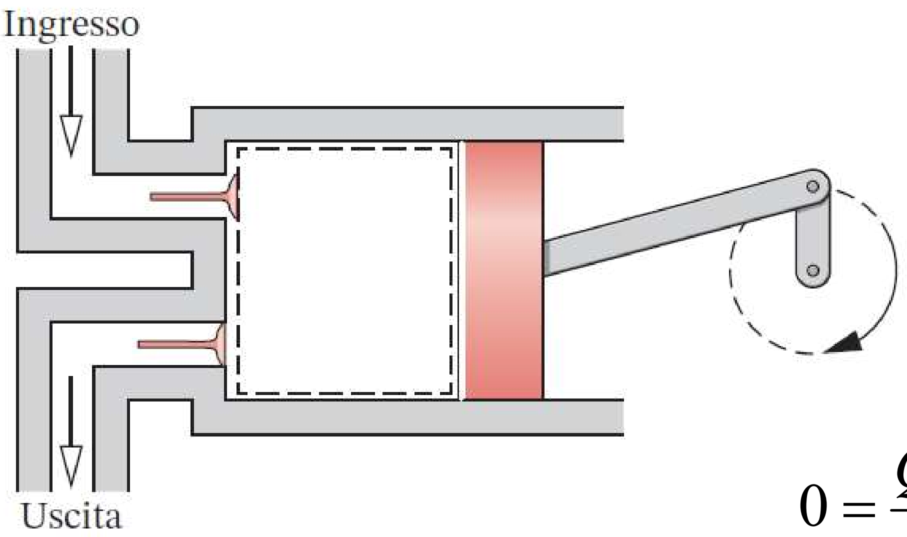


Assunzioni:
Stazionario
Variazioni di quota trascurabili

$$0 = \frac{\dot{Q}_{vc}}{\dot{m}} - \frac{\dot{L}_{vc}}{\dot{m}} + (h_1 - h_2) + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2}$$

Analisi dei volumi di controllo in regime stazionario - 5

Compressori e pompe

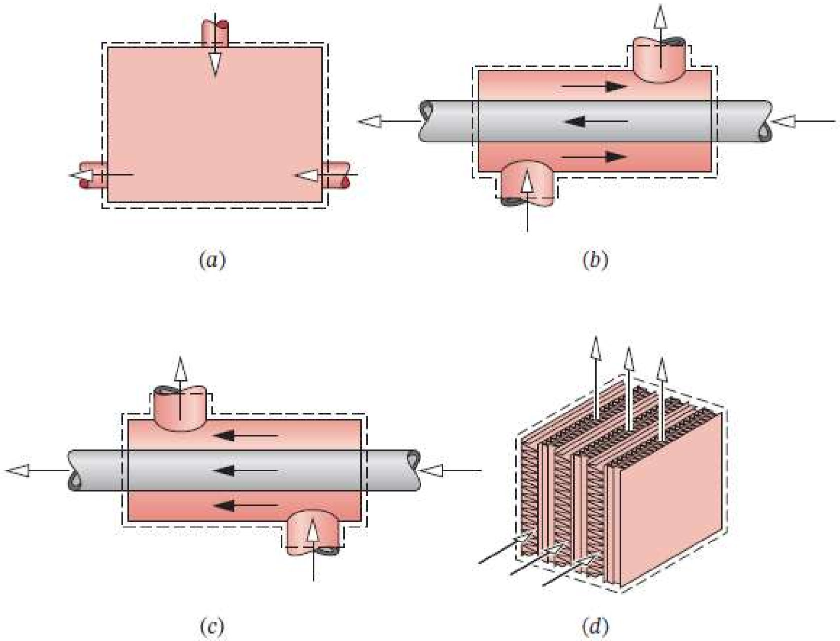


Assunzioni:
Stazionario

$$0 = \frac{\dot{Q}_{vc}}{\dot{m}} - \frac{\dot{L}_{vc}}{\dot{m}} + (h_1 - h_2) + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2} + g(z_1 - z_2)$$

Analisi dei volumi di controllo in regime stazionario - 6

Scambiatori di calore



Assunzioni:
Stazionario
Adiabatico
Lavoro nullo
Variazioni E_c ed E_p trascurabili

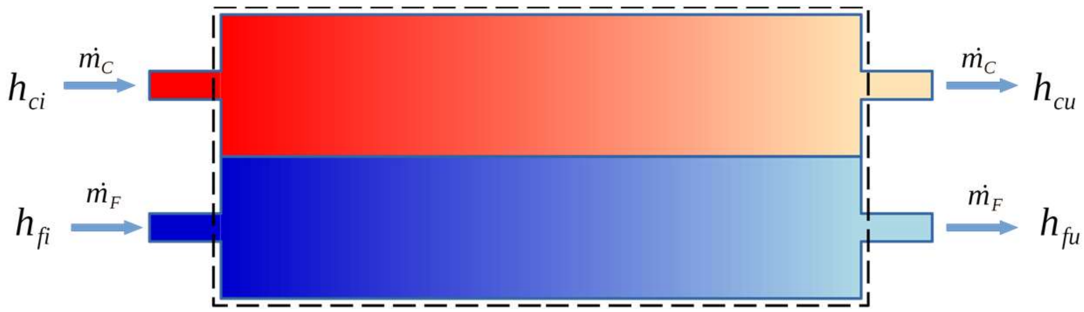
$$\dot{m}_A (h_u - h_i)_A = -\dot{m}_B (h_u - h_i)_B$$

Fluido A   Fluido B

Scambiatori di calore I

- Sistema con due ingressi e due uscite

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



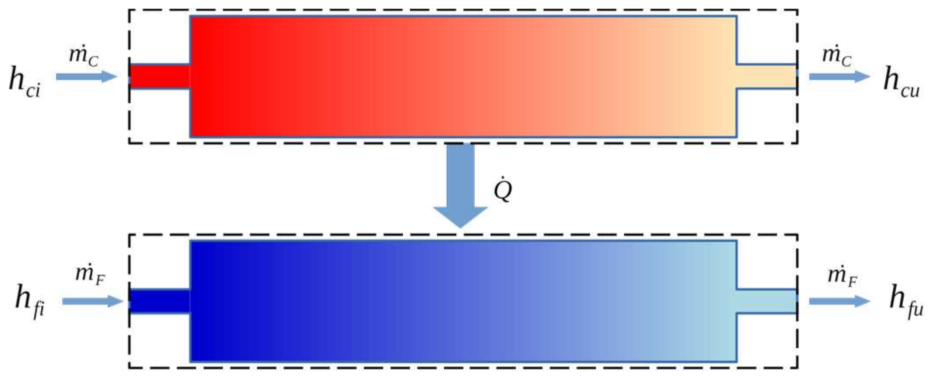
$$0 = \dot{m}_c h_{ci} + \dot{m}_F \cdot h_{fi} - \dot{m}_c \cdot h_{cu} - \dot{m}_f \cdot h_{fu}$$

$$\dot{m}_c \cdot (h_{ci} - h_{cu}) = \dot{m}_f \cdot (h_{fu} - h_{fi})$$

Scambiatori di calore II

- Due sistemi ad una entrata e uscita

$$0 = \dot{Q}_{vc} - \cancel{\dot{L}_{vc}} + \dot{m}_i \left(h_i + \cancel{\frac{w_i^2}{2}} + \cancel{g z_i} \right) - \dot{m}_u \left(h_u + \cancel{\frac{w_u^2}{2}} + \cancel{g z_u} \right)$$



$$0 = \dot{Q}_c^- + m_c h_{ci} - \dot{m}_c \cdot h_{cu}$$

$$\dot{m}_c \cdot (h_{ci} - h_{cu}) = -\dot{Q}_c^- = |\dot{Q}_c^-|$$

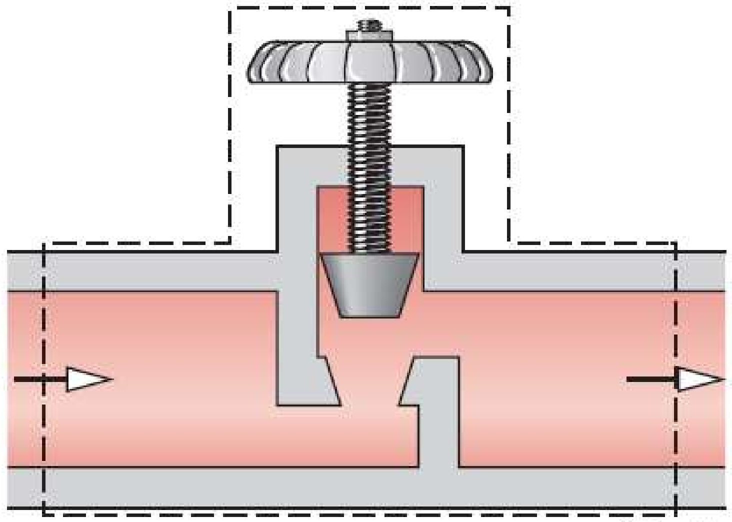
$$0 = \dot{Q}_f^+ + m_f h_{fi} - \dot{m}_f \cdot h_{fu}$$

$$\dot{m}_f \cdot (h_{fi} - h_{fu}) = -\dot{Q}_f^+$$

$$\dot{m}_f \cdot (h_{fu} - h_{fe}) = \dot{Q}_f^+ \qquad Q_f^+ = |Q_c^-| \qquad \Rightarrow \qquad \boxed{\dot{m}_c \cdot (h_{ci} - h_{cu}) = \dot{m}_f \cdot (h_{fu} - h_{fi})}$$

Analisi dei volumi di controllo in regime stazionario - 7

Organi di laminazione



Valvola parzialmente aperta

Assunzioni:
- Stazionario
- Adiabatico
- Lavoro nullo
- Variazioni E_c ed E_p trascurabili

$$h_u = h_i$$

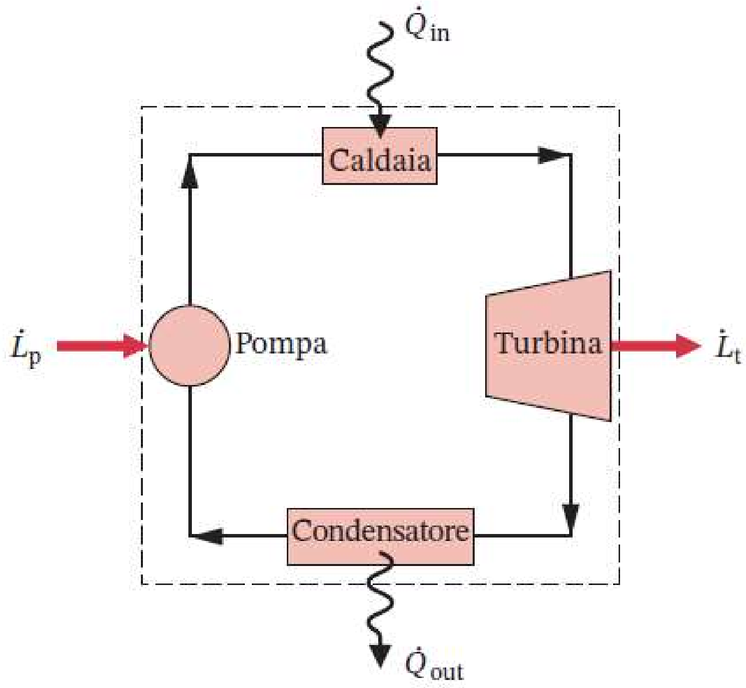
Caso di **fluido incomprimibile** con calore spec. $c = cost$:
- $v = cost$
- $du = c \cdot dT$

$$c \cdot (T_u - T_i) = v \cdot (p_i - p_u)$$

(acqua liquida: $c \approx 4190 \ \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg\,K}}$, $v \approx 0.001 \ \frac{\mathrm{m^3}}{\mathrm{kg}}$)

Analisi dei volumi di controllo in regime stazionario - 8

Integrazioni di sistemi



- Analisi di sistema come sistema chiuso
- Analisi singolo componente come volume di controllo