



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



Dipartimento
di Ingegneria Industriale

Richiami

Corso di Macchine 1

Agenda

▶ Sistemi e Ambiente

- ▶ Energia
- ▶ Sistema isolato, chiuso aperto
- ▶ Equazione di conservazione della massa
- ▶ Primo principio della termodinamica per sistemi chiusi e aperti

▶ Esercizi

- ▶ Macchina motrice vs operatrice e sua potenza
- ▶ Macchina idraulica e sua potenza
- ▶ Pompa vs Compressore: potenza assorbita dalla macchina



Sistemi e Ambiente

Sistema ed ambiente

Energia

- E' un concetto primitivo
- L'energia è postulata come qualcosa che tutti i sistemi posseggono
- Esprime la capacità di un sistema di eseguire lavoro

Energia Totale di un sistema

- E' così definita:

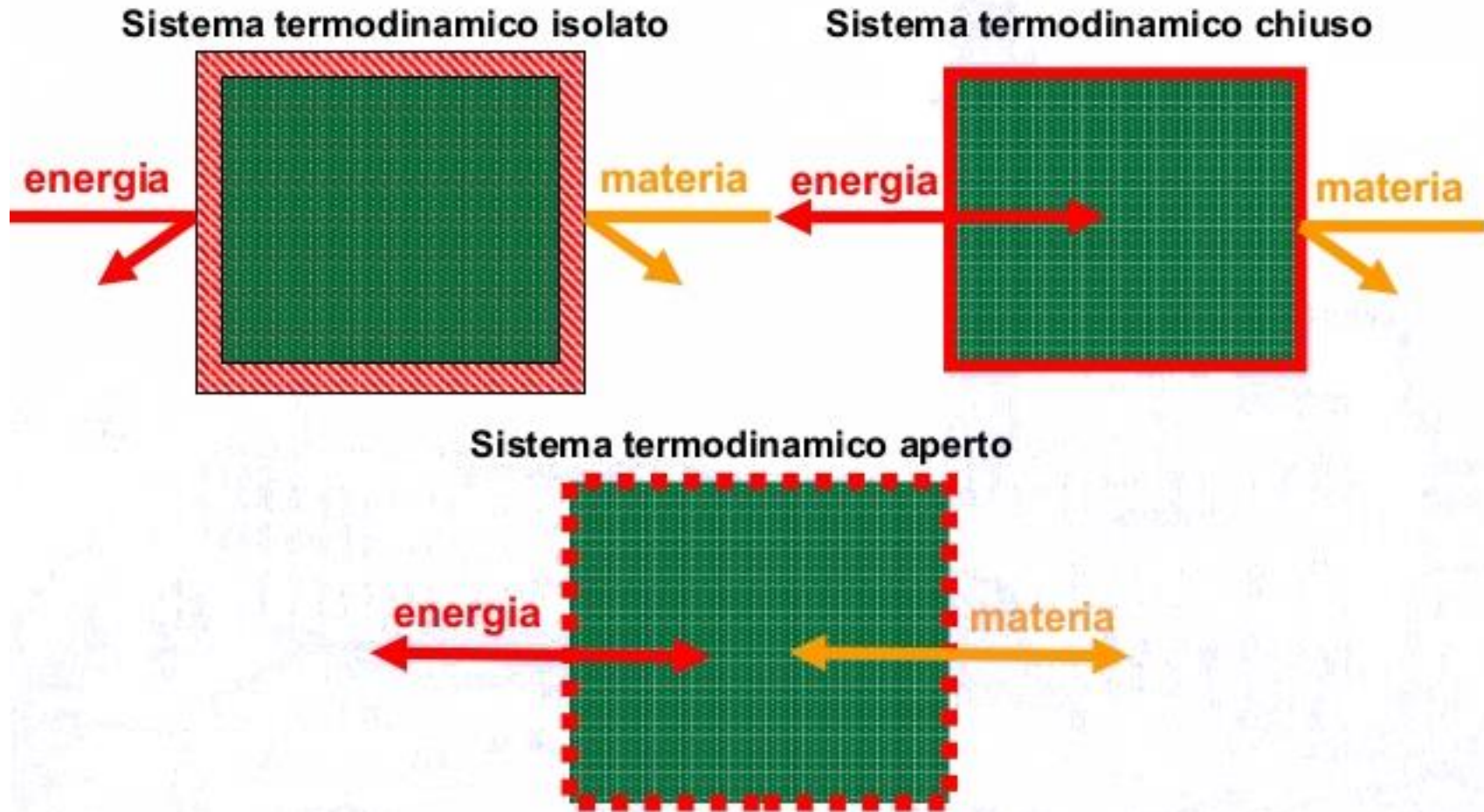
$$E_s = U + E_p + E_k \quad \left[\frac{J}{kg} \right]$$

dove:

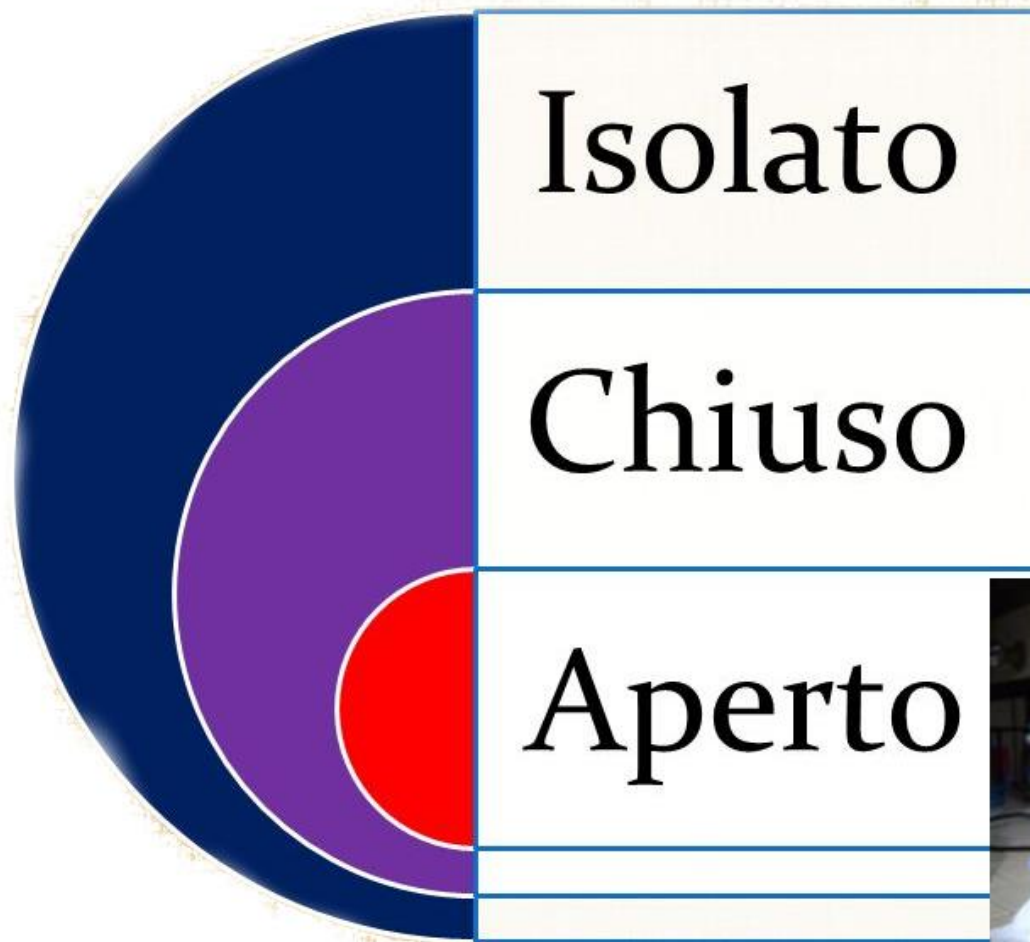
- U : energia interna, rappresentativa di tutte le energie a livello microscopico: traslazione, rotazione, vibrazione delle molecole, etc. → Dipende dalla sostanza (c_v) e dalla temperatura T (K)
- E_p : energia potenziale. In termodinamica si considera solo quella gravitazionale: gz
- E_k : energia cinetica $C^2/2$ riferita all'unità di massa



Sistema ed ambiente



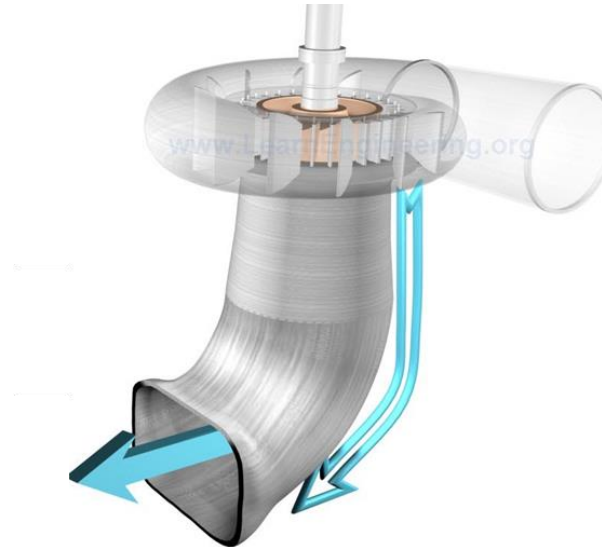
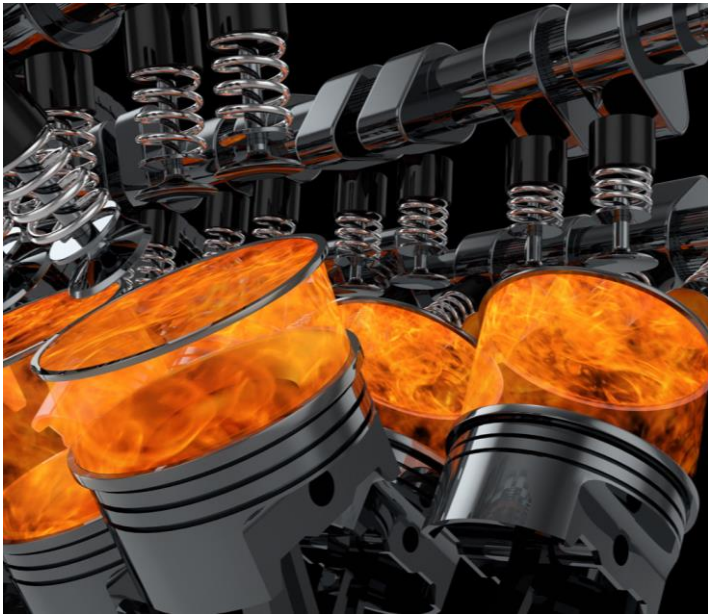
Sistema ed ambiente



Sistema ed ambiente

Sistema isolato, chiuso o aperto???

Motore a combustione interna



Turbina idraulica

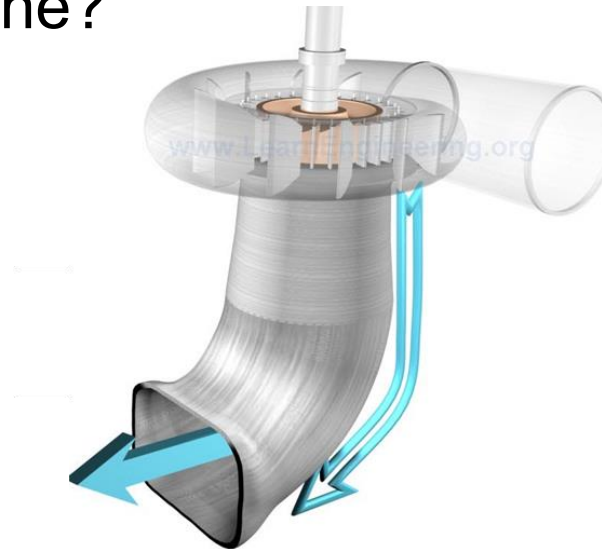
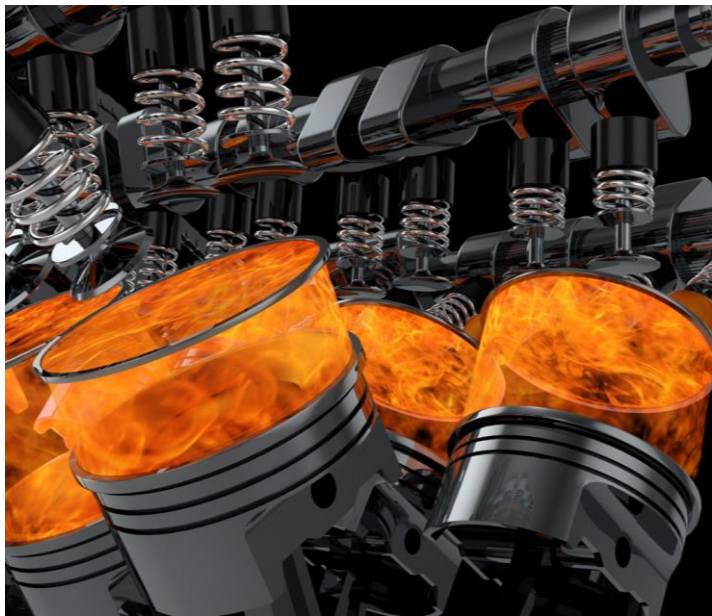
Turbina eolica



Sistema ed ambiente

Come valuto gli scambi di **massa** e di **energia** di queste macchine?

Motore a combustione interna



Turbina idraulica

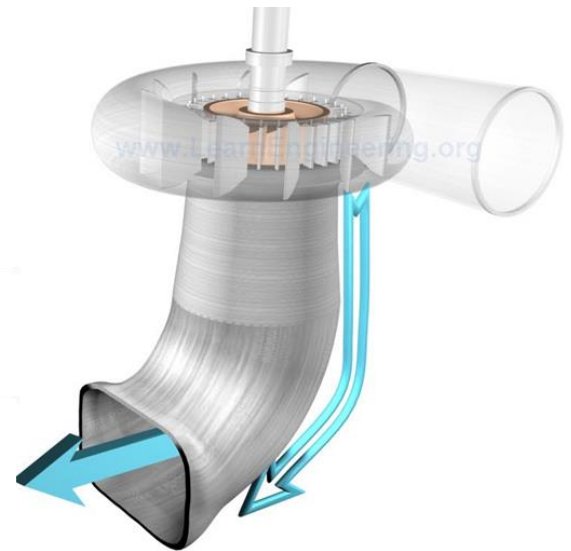
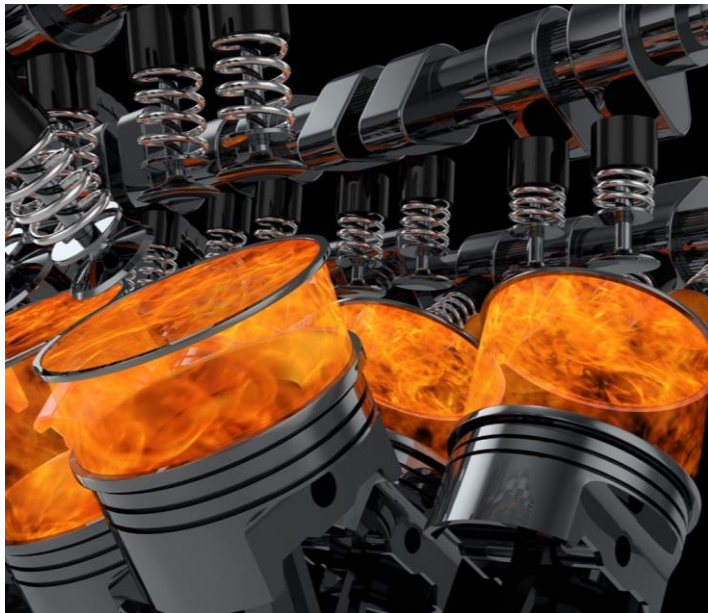
Turbina eolica



Sistema ed ambiente

Gli scambi di massa ed energia si valutano tramite:

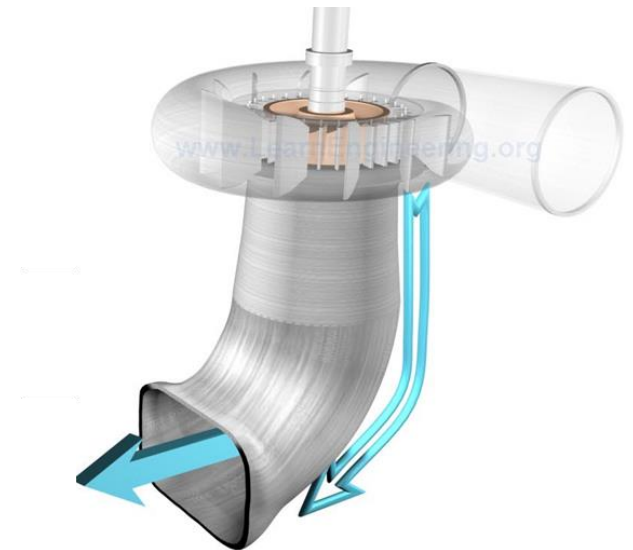
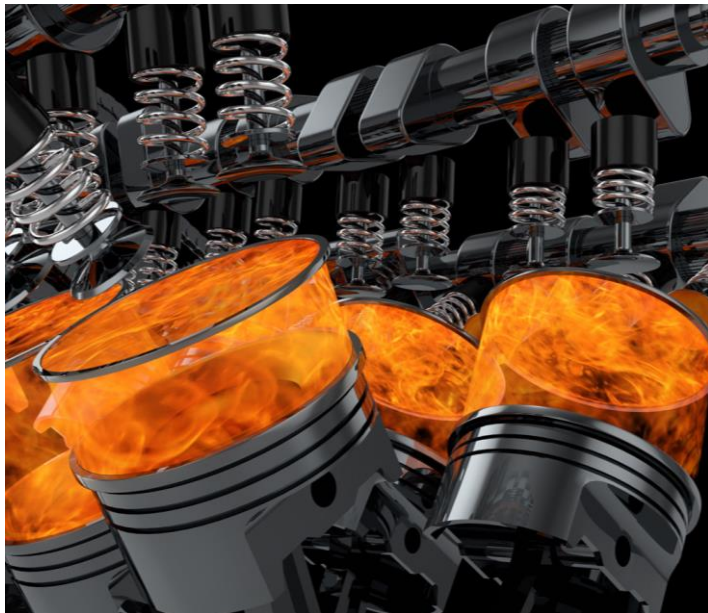
- Equazione di **conservazione della massa**
- **Primo principio** della termodinamica
- **Secondo principio** della termodinamica



Sistema ed ambiente

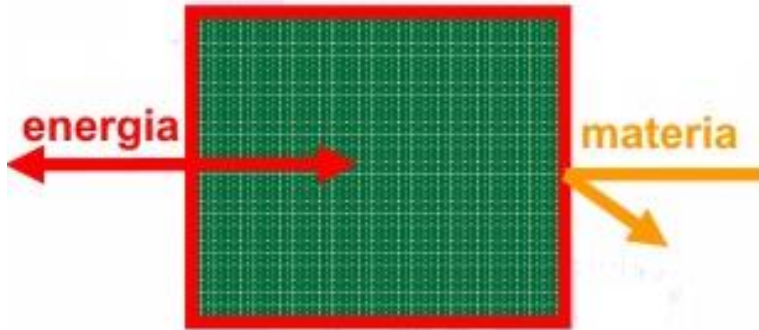
Gli scambi di massa ed energia si valutano tramite:

- Equazione di **conservazione della massa**
- Primo principio della termodinamica
- Secondo principio della termodinamica



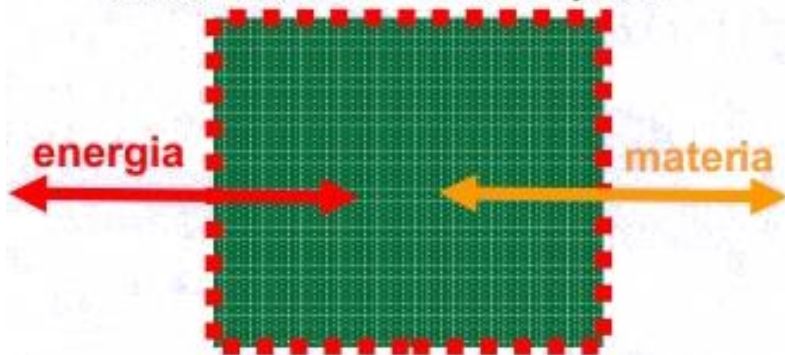
Equazione di conservazione della massa

Sistema termodinamico chiuso



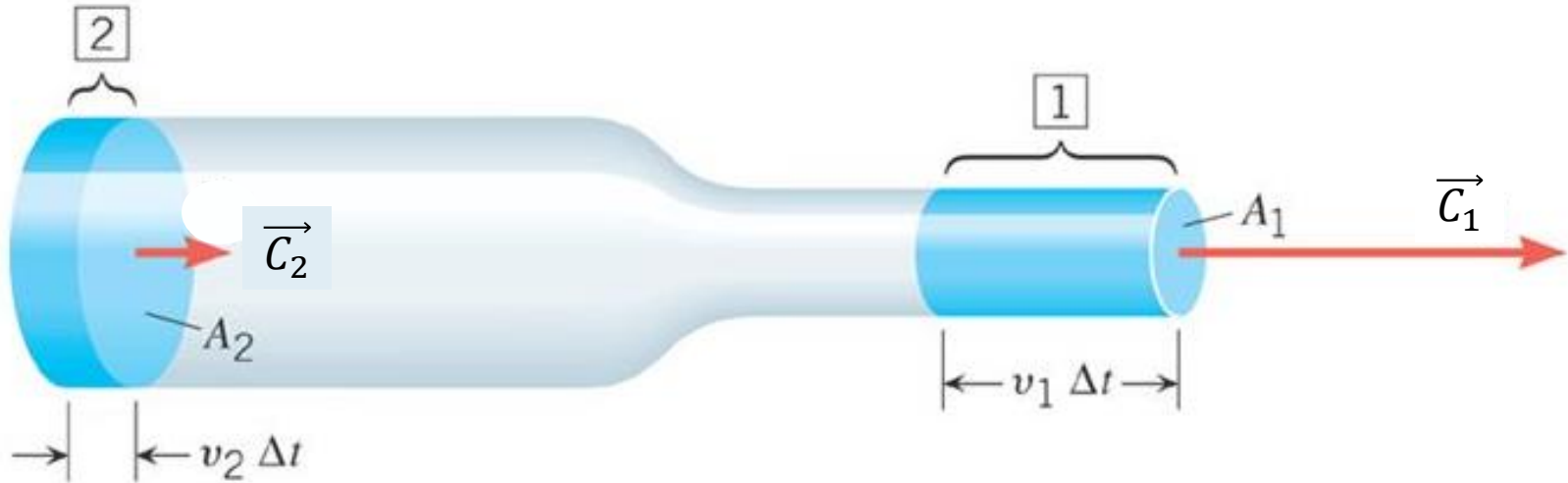
- In un sistema chiuso le pareti del sistema vengono considerate impermeabili al flusso di massa e pertanto **non vi sono contributi di massa in ingresso o in uscita** attraverso la superficie
- La massa contenuta all'interno del sistema **si conserva nel tempo**, anche in presenza di reazioni chimiche

Sistema termodinamico aperto



- In un sistema aperto, la superficie del volume di controllo è permeabile al flusso di massa e si possono avere contributi in ingresso ed in uscita

Portata volumetrica e di massa



$$Q_v = \vec{c} \cdot A \quad [m^3/s]$$

$$Q_m = \rho \cdot \vec{c} \cdot A \quad [kg/s]$$

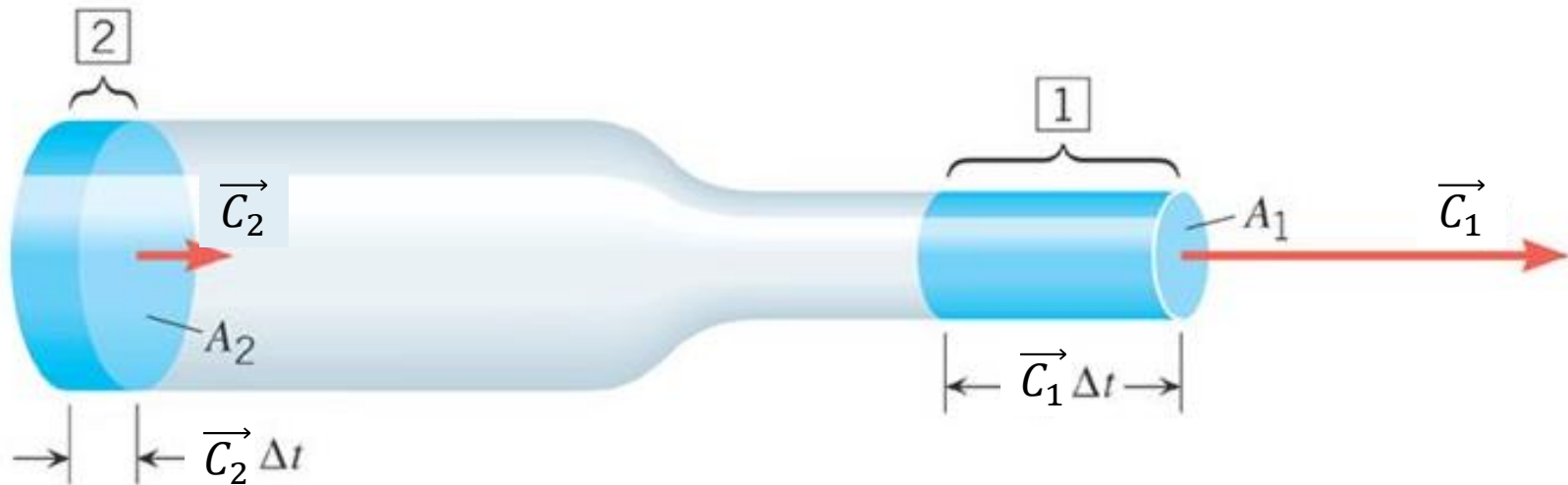
Equazione di conservazione della massa

- Se il regime è stazionario:

$$Q_{m,2} = \rho \vec{C}_2 A_2 = \rho \vec{C}_2 A_1 = Q_{m,1}$$

- Se il regime non è stazionario:

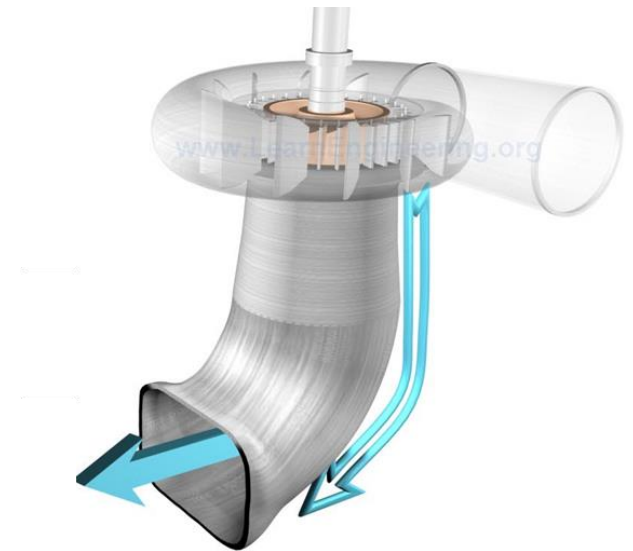
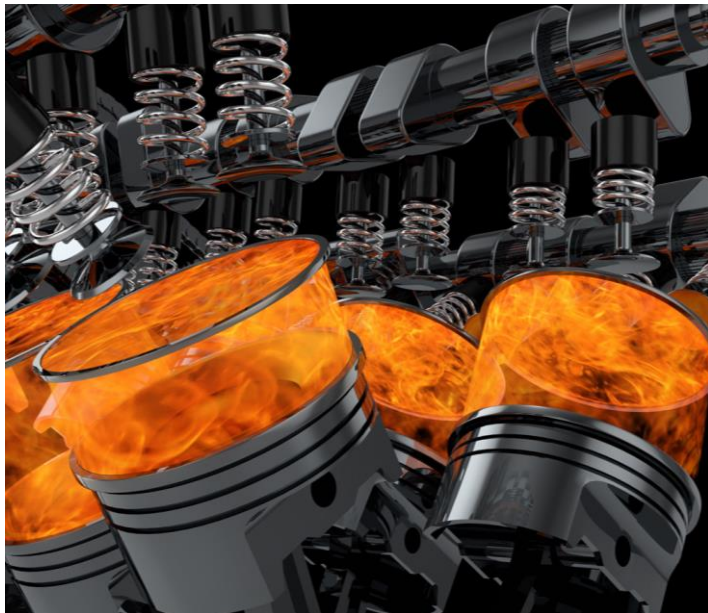
$$Q_{m,1} - Q_{m,2} = \frac{\partial m}{\partial t}$$



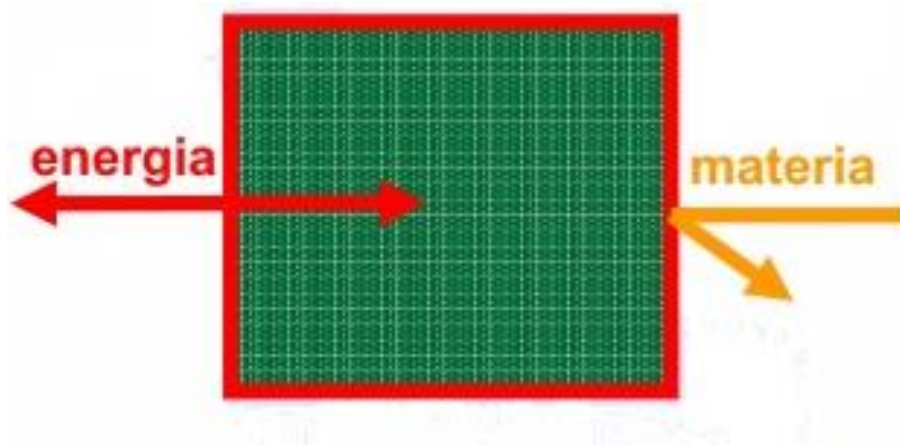
Sistema ed ambiente

Gli scambi di massa ed energia si valutano tramite:

- Equazione di conservazione della massa
- **Primo principio** della termodinamica
- Secondo principio della termodinamica



Primo principio della termodinamica: sistemi chiusi



$$E_{sistema} = U + E_k + E_p$$

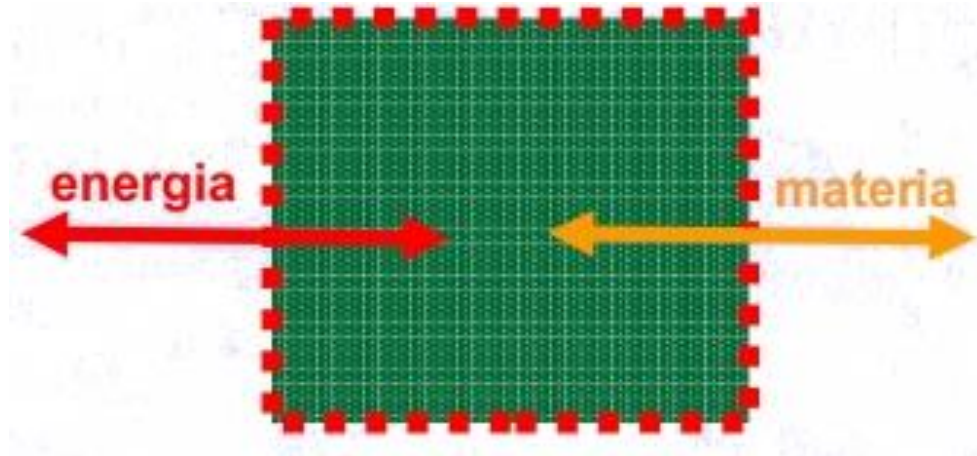
Primo principio della termodinamica per sistemi chiusi

$$E_{entrante} - E_{uscente} = \Delta E_{sistema} = \Delta(U + E_p + E_k)_{sistema}$$

...o più in generale:

$$\sum E_{entrante} - \sum E_{uscente} = \Delta E_{sistema} = \Delta(U + E_p + E_k)_{sistema}$$

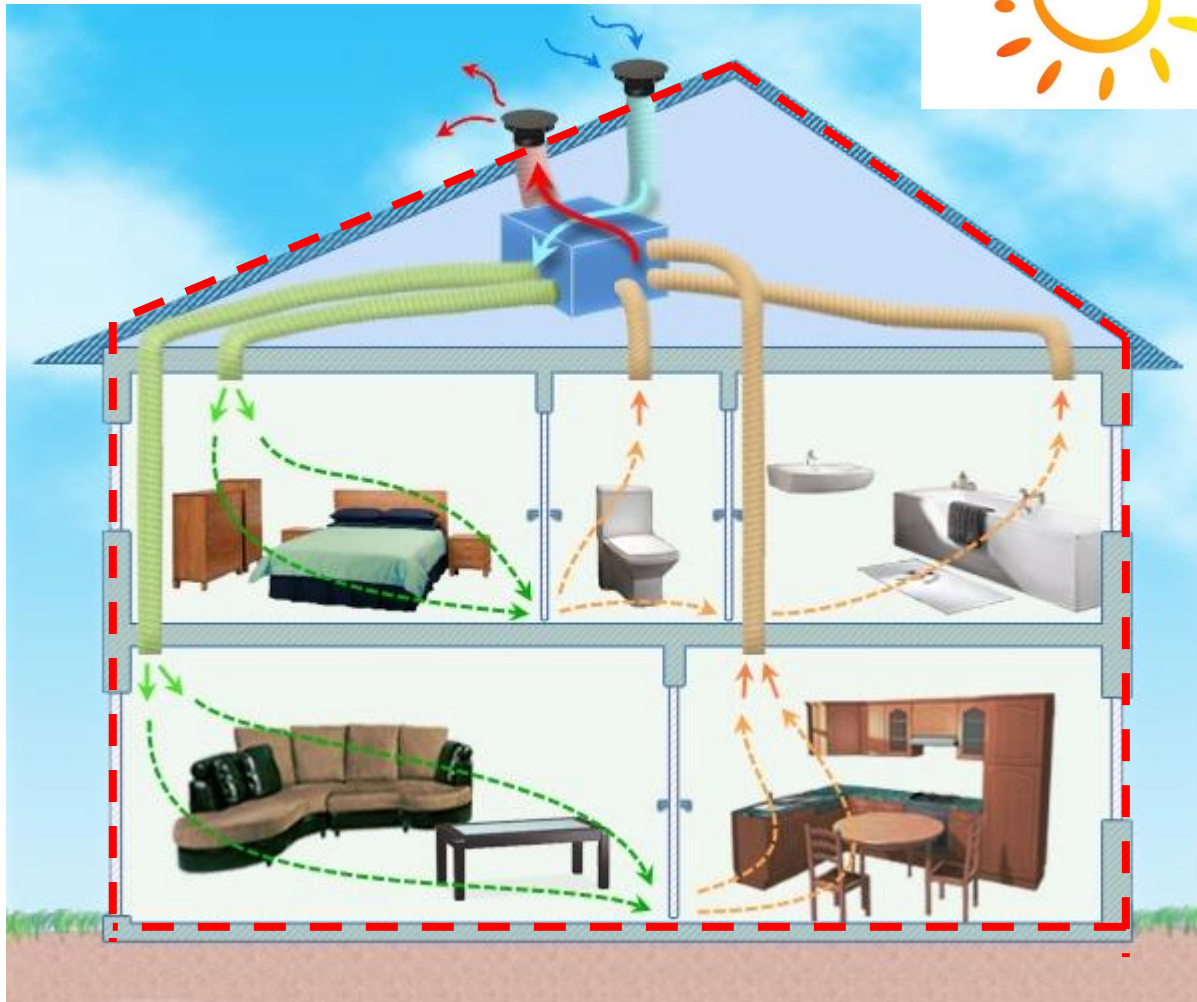
Primo principio della termodinamica: sistemi aperti



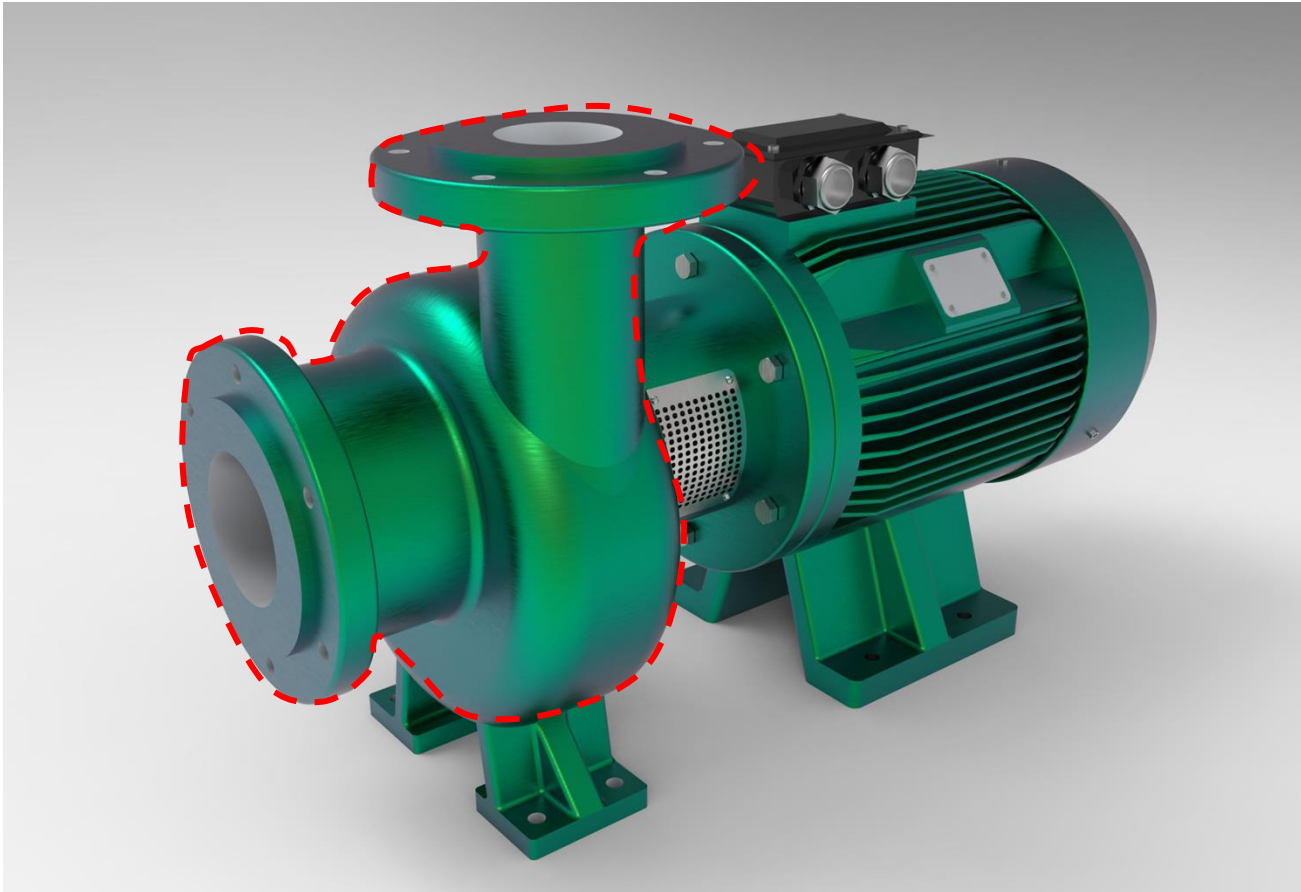
- La stessa formulazione può, infine, essere estesa con facilità [anche ai sistemi aperti](#)

Cosa si deve conteggiare??

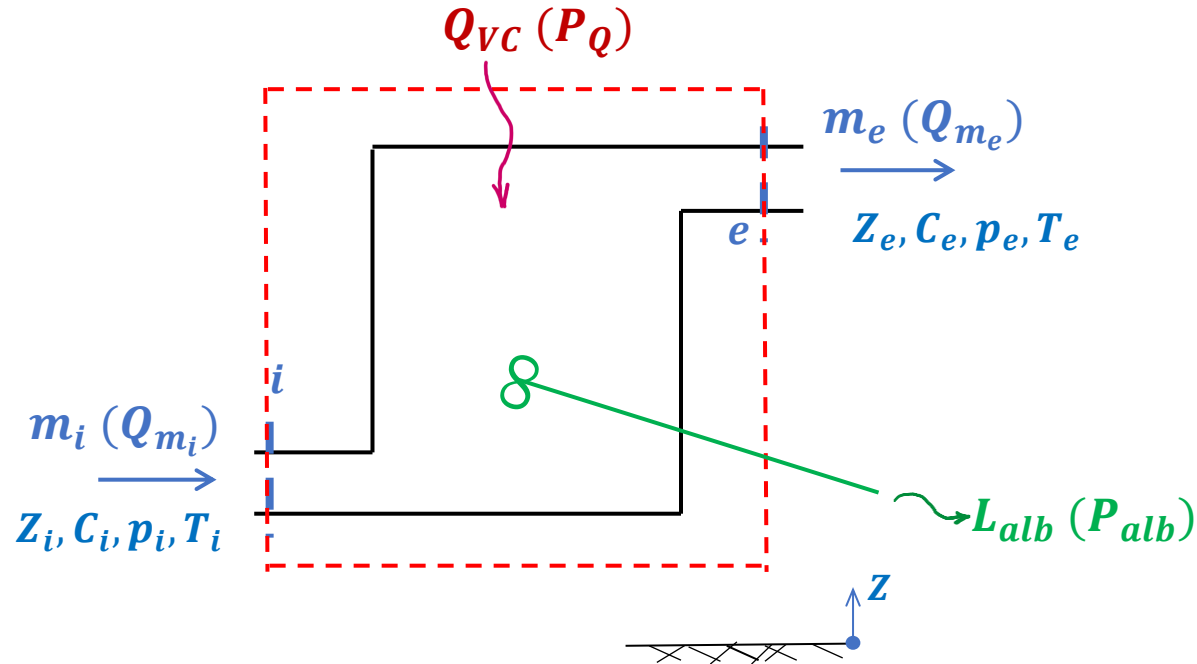
Esempio (1)



Esempio (2)



Primo principio della termodinamica: sistemi aperti



- Gli scambi di energia e i trasferimenti di materia sono riferiti a un **volume di controllo VC**, ossia a una regione dello spazio che include interamente il sistema
- C'è **trasferimento di massa** attraverso la superficie

Primo principio della termodinamica: sistemi aperti

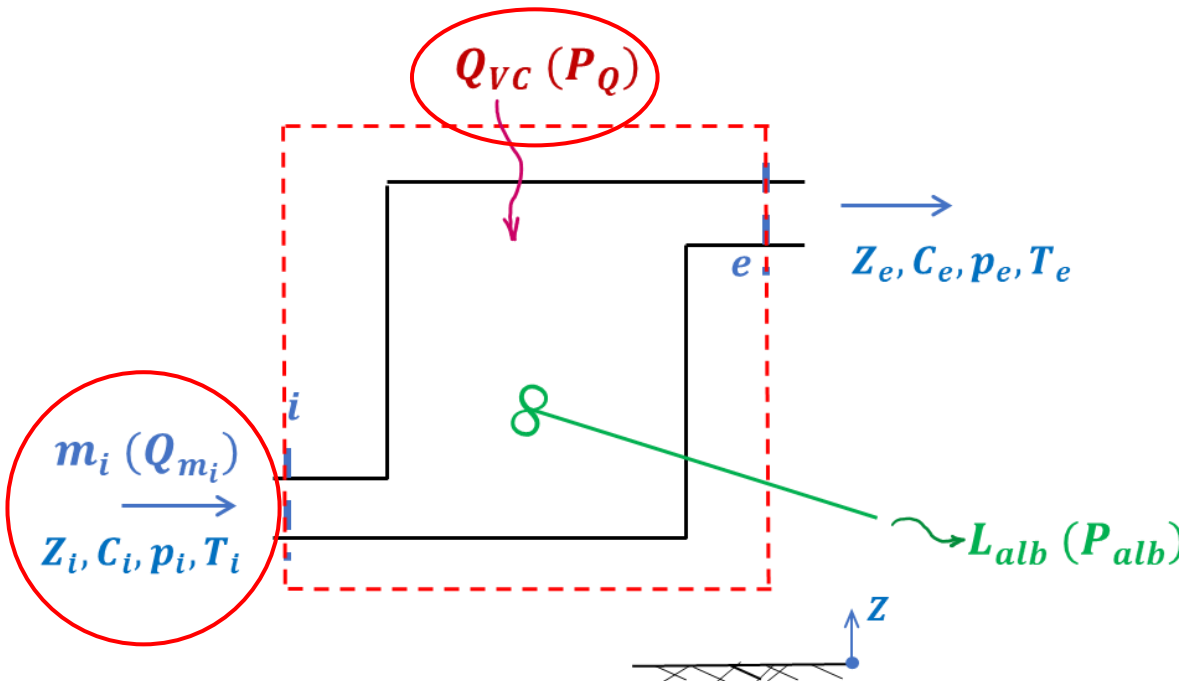
Il primo principio nella sua formulazione generale richiede:

$$\sum E_{entrante} - \sum E_{uscente} = (E_{s2} - E_{s1})_{VC}$$

variazione di energia totale
all'interno del volume di
controllo

$E_{entrante}$

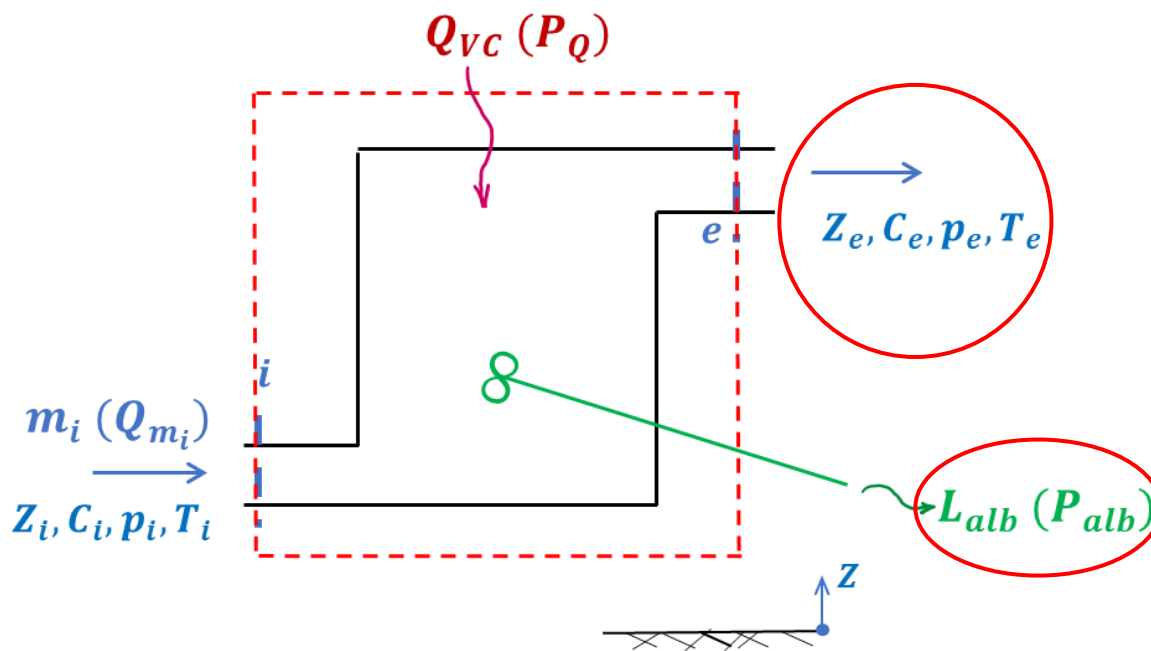
- E_i è l'energia entrante nel volume di controllo dovuta alla massa entrante m_i
- Q_{VC} è il calore trasferito attraverso la superficie del volume di controllo



Primo principio della termodinamica: sistemi aperti

Il primo principio nella sua formulazione generale richiede:

$$\sum E_{entrante} - \sum E_{uscente} = (E_{s2} - E_{s1})_{VC}$$



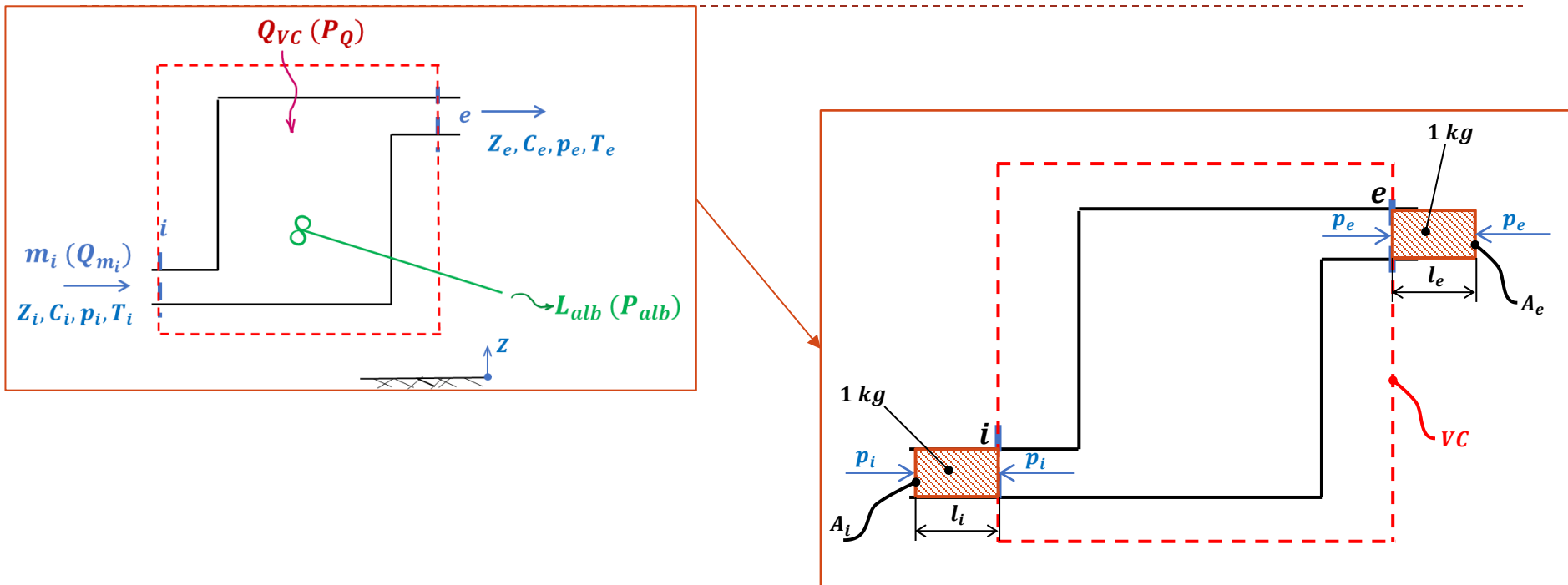
$E_{uscente}$

- E_e è l'energia entrante nel volume di controllo dovuta alla massa uscente m_e
- L_{alb} è il lavoro meccanico ottenuto all'albero della macchina

E' TUTTO??

- Si deve considerare anche il lavoro eseguito dall'ambiente esterno per immettere la massa m_i all'interno del volume di controllo e il lavoro fatto dal sistema per espellere la massa m_e dal volume di controllo

Primo principio della termodinamica: sistemi aperti



- Per immettere 1 kg di massa attraverso la sezione di ingresso A_i è necessario che l'ambiente esterno esegua il lavoro L_i dato dal prodotto della forza $F_i = p_i A_i$ per lo spostamento l_i che definisce con A_i il volume $V_i = A_i l_i$ occupato dall'unità di massa

$$L_i = F_i \cdot l_i = p_i A_i l_i = p_i V_i$$

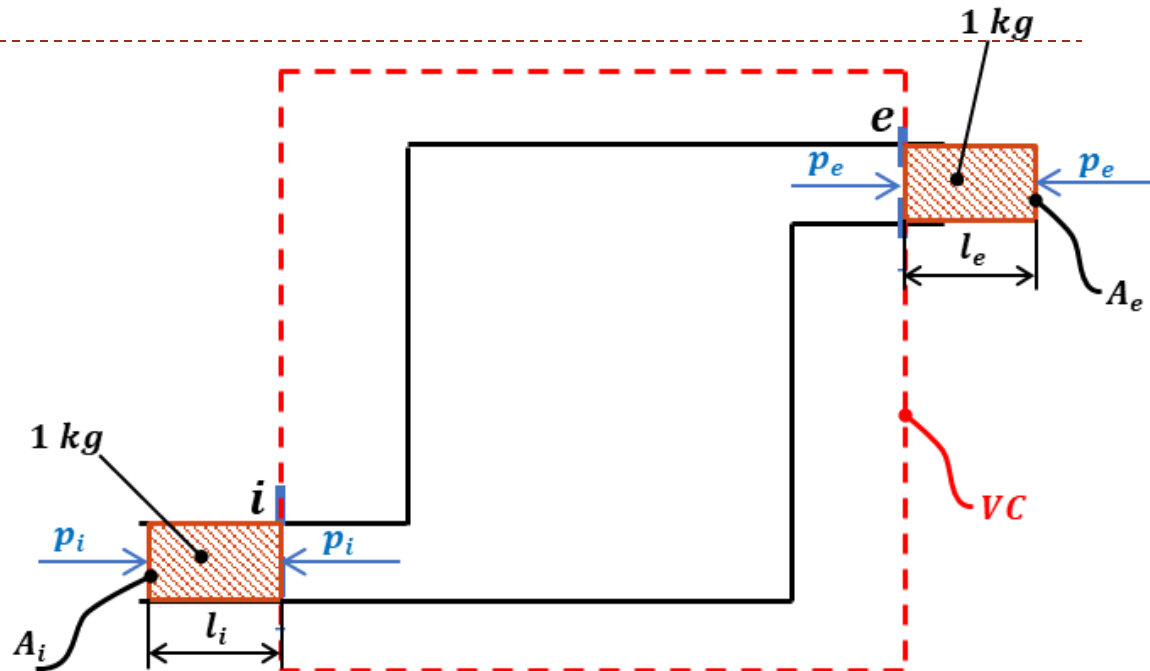
Primo principio della termodinamica: sistemi aperti

$$L_i = p_i V_i$$

... ma V_i è il volume occupato
da 1 kg di massa $\Rightarrow$ Quindi

$$V_i = v_i$$

Volume specifico del fluido
nelle condizioni di pressione
 p_i e temperatura T_i
presenti nella sezione di
ingresso i

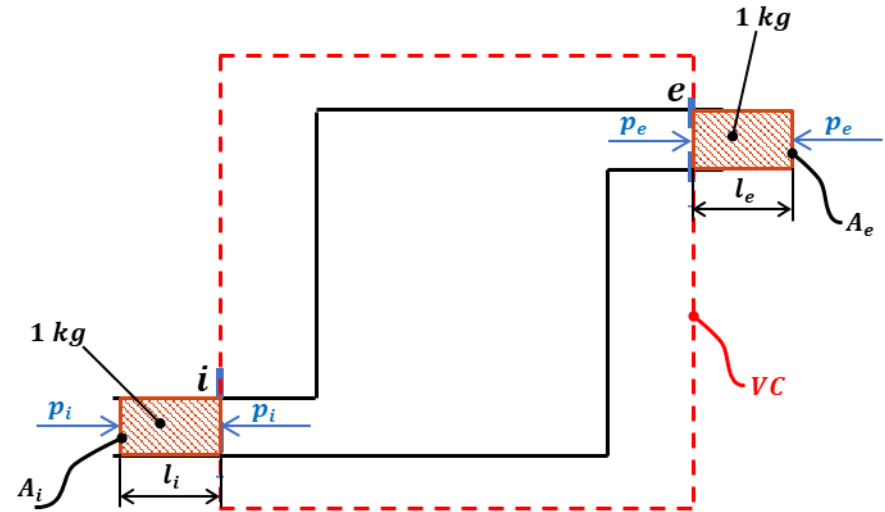


$$L_i = p_i V_i = p_i v_i = \frac{p_i}{\rho_i} \left[\frac{J}{kg} \right]$$

Primo principio della termodinamica: sistemi aperti

- In maniera analoga, si ricava il lavoro

$$L_e = \left(\frac{p}{\rho} \right)_e$$



fatto dal sistema verso l'esterno per espellere l'unità di massa dall'esterno contro la pressione p_e agente sulla corrispondente sezione di scarico A_e

$$E_i + Q_{VC} = (E_{s2} - E_{s1})_{VC} + L_{VC} + E_e$$

$$L_i = p_i v_i = \left(\frac{p}{\rho} \right)_i$$

$$L_e = p_e v_e = \left(\frac{p}{\rho} \right)_e$$

$$L_{alb}$$



Primo principio della termodinamica: sistemi aperti

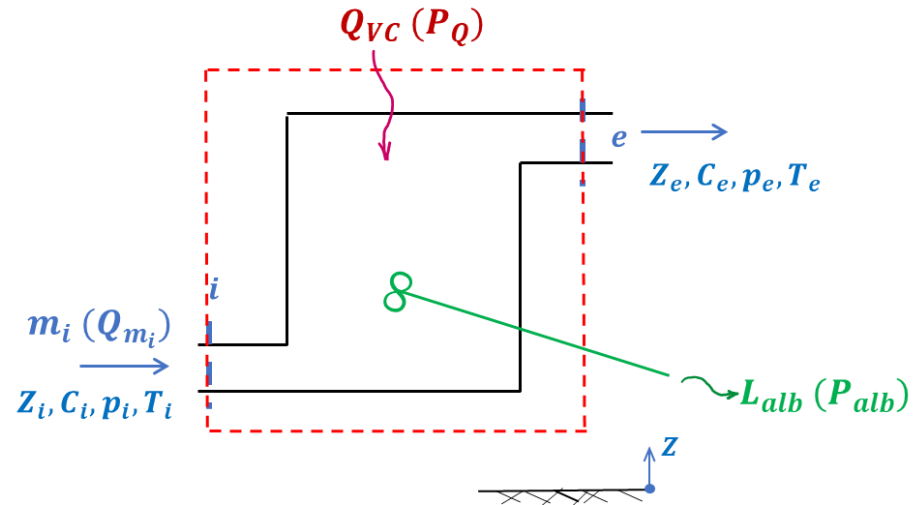
Nell'ipotesi di più **masse entranti** ed **uscanti** dal sistema, si ottiene:

$$\boxed{\sum_i E_i} + Q_{VC} + \sum_i m_i \left(\frac{p}{\rho} \right)_i - \boxed{\sum_e E_e} - \sum_e m_e \left(\frac{p}{\rho} \right)_e - L_{alb} = (E_{s2} - E_{s1})_{VC}$$

dove le energie totali E_i e E_e trasportate dalle masse m_i e m_e entranti ed uscenti sono date, in coerenza con quanto formulato per l'energia propria di un sistema, dalle relazioni seguenti:

$$E_i = m_i \left(u + \frac{c^2}{2} + gz \right)_i$$

$$E_e = m_e \left(u + \frac{c^2}{2} + gz \right)_e$$



dove u è l'energia interna riferita all'unità di massa

Primo principio della termodinamica: sistemi aperti

$$\sum_i E_i + \sum_i m_i \left(\frac{p}{\rho} \right)_i + Q_{VC} - \sum_e E_e + \sum_e m_e \left(\frac{p}{\rho} \right)_e - L_{alb} = (E_{s2} - E_{s1})_{VC}$$

$$E_i = m_i \left(u + \frac{c^2}{2} + gz \right)_i$$

$$E_e = m_e \left(u + \frac{c^2}{2} + gz \right)_e$$



$$\sum_i m_i \left(u + \frac{c^2}{2} + gz \right)_i + \sum_i m_i \left(\frac{p}{\rho} \right)_i + Q_{VC} - \sum_e m_e \left(u + \frac{c^2}{2} + gz \right)_e + \sum_e m_e \left(\frac{p}{\rho} \right)_e - L_{alb} = (E_{s2} - E_{s1})_{VC}$$

$$H = u + \frac{p}{\rho}$$

$$H^0 = u + \frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} + gz = H + \frac{c^2}{2} + gz$$

$$\sum_i m_i H_i^0 - \sum_e m_e H_e^0 + Q_{VC} - L_{alb} = (E_{s2} - E_{s1})_{VC}$$

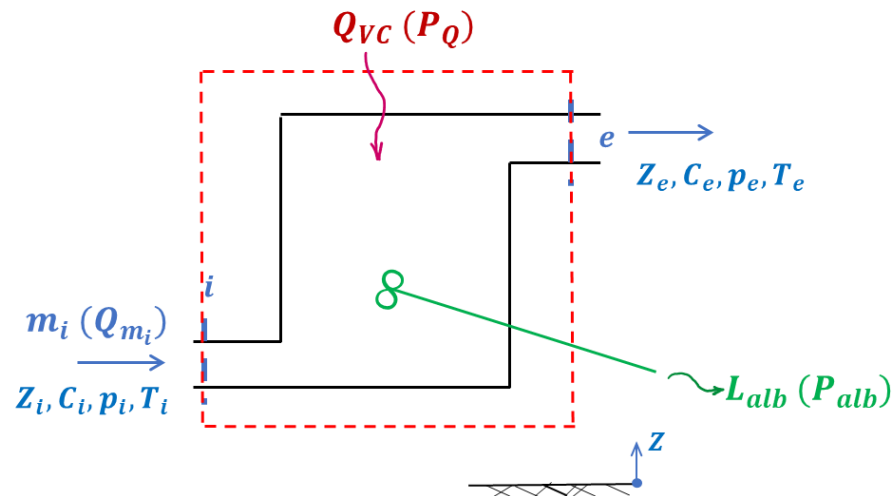


Primo principio della termodinamica: sistemi aperti

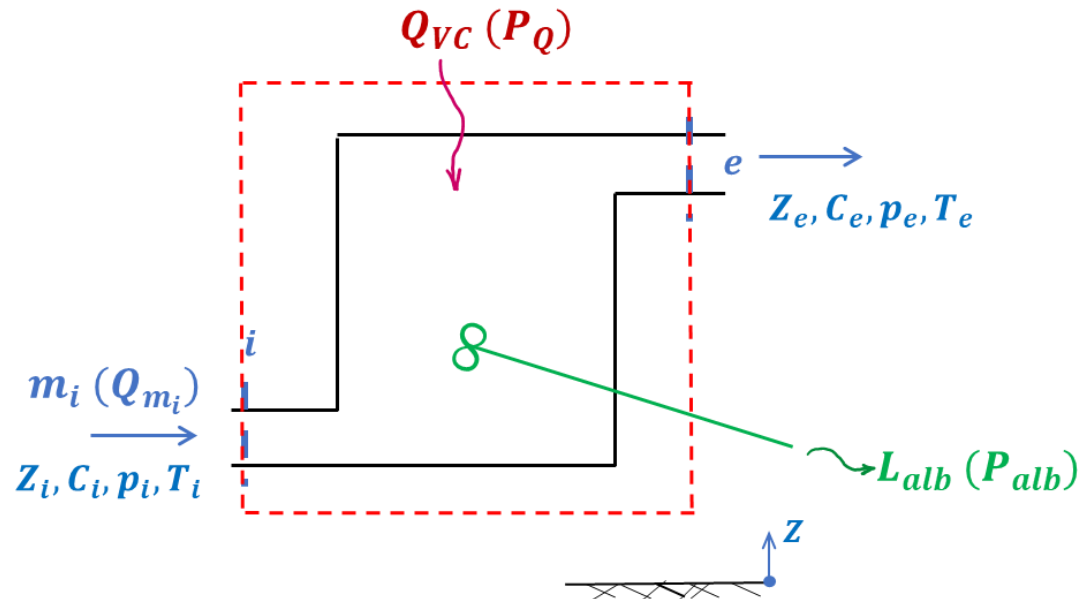
$$\sum_i m_i H_i^0 - \sum_e m_e H_e^0 + Q_{VC} - L_{alb} = (E_{s2} - E_{s1})_{VC}$$

Riferendo le masse e le energie a una variazione di **tempo infinitesimo dt** , l'equazione del PRIMO principio diventa:

$$\sum_i Q_{m_i} H_i^0 - \sum_e Q_{m_e} H_e^0 + P_Q - P_{alb} = \frac{dE_{sVC}}{d\tau}$$



Primo principio della termodinamica: sistemi aperti



In **condizioni di regime permanente**, ovvero quando tutti i contributi sono costanti nel tempo $\Rightarrow \frac{dE_{sVC}}{d\tau} = 0$

$$\sum_i Q_{m_i} H_i^0 - \sum_e Q_{m_e} H_e^0 + P_Q - P_{alb} = \frac{dE_{sVC}}{d\tau} = 0$$

Esercizio 1

Esercizio 1

Una macchina disposta su un asse orizzontale elabora una portata di 10 kg/s di aria ($R=287 \text{ J/kg}$ e $c_p=1004 \text{ J/kgK}$) alla pressione $p_1=10 \text{ bar}$ e alla temperatura $T_1=100^\circ\text{C}$, mediante un condotto circolare di diametro $D_1=100\text{mm}$.

All'uscita della macchina la stessa portata di aria è nelle condizioni $p_2=2 \text{ bar}$ e $T_2=20^\circ\text{C}$ ed è scaricata da un condotto di diametro $D_2=300\text{mm}$.

Attraverso le parti non adiabatiche della macchina si rileva una fuga termica verso l'esterno pari a 500 kW.

Si verifichi se la macchina è motrice o operatrice e a quanto ammonta la potenza meccanica scambiata con l'esterno.

Esercizio 1

Nota:

- Macchina motrice $\Rightarrow$ Produce Potenza
- Macchina operatrice $\Rightarrow$ Assorbe Potenza

Convenzione:

- $Q > 0 \Rightarrow$ se entrante
- $L > 0 \Rightarrow$ se uscente



Esercizio 2

Esercizio 2

Una macchina idraulica (fluido incompressibile) è caratterizzata da una sezione di ingresso di 0.5 m^2 nella quale la velocità dell'acqua è di 6 m/s e la pressione è pari a 1 bar .

La sezione di uscita è di 1 m^2 e la pressione allo scarico è di 10 bar . La sezione di uscita è posta ad una quota di 15 m sopra la sezione di ingresso.

Si calcoli la potenza meccanica effettivamente comunicata dalla macchina al fluido.

Esercizio 3

Esercizio 3 – parte 1

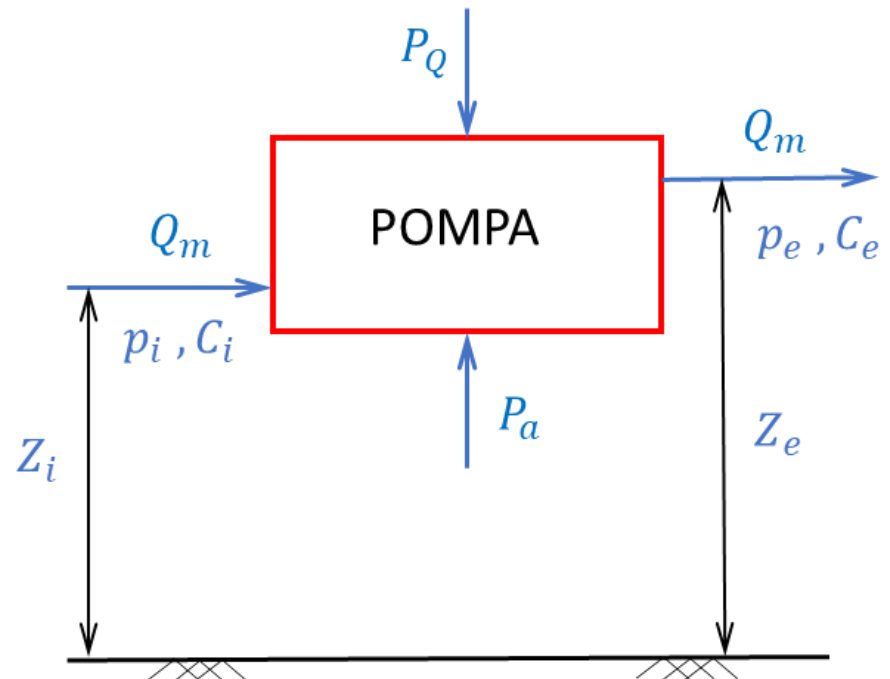
Determinare, in condizioni di regime stazionario, le prestazioni di una pompa nota la portata di massa Q_m e lo stato termodinamico del fluido nelle sezioni di ingresso "i" e di uscita "e" del volume di controllo

$$p_i = 1 \text{ bar} \quad T_i = 20^\circ\text{C}$$

$$p_e = 4 \text{ bar}$$

$$Q_m = 20 \text{ kg/s}$$

$$\eta = 0.8$$



Esercizio 3 – parte 1

Si supponga inoltre:

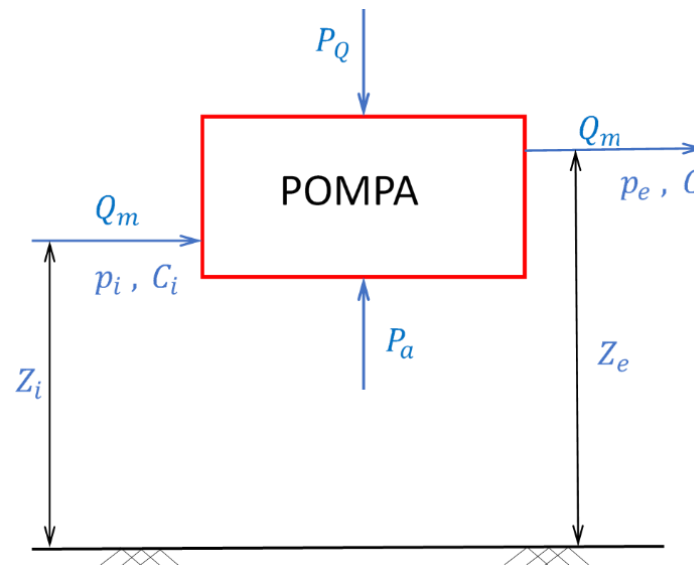
- $C_i = C_e$, $Z_i = Z_e$
- Densità del fluido (acqua) $\rho = \rho_i = \rho_e = 1000 \text{ kg/m}^3$: fluido incomprimibile (le pompe elaborano, per definizione, fluidi incomprimibili)
- Si ritenga inoltre per ipotesi la macchina ideale, e quindi nulle le perdite meccaniche P_m nei supporti e la potenza P_{Q_f} dissipata dalle portate che trafilano attraverso i giochi tra le parti fisse e mobili della macchina.
- Si considera però reale il fluido operativo e, di conseguenza, la potenza assorbita per sopperire perdite fluidodinamiche (idrauliche) all'interno della pompa



Esercizio 3 – parte 1

Nota:

L'applicazione del I principio della termodinamica non richiede la conoscenza della geometria della pompa, né tantomeno il suo principio di funzionamento, ma solo gli stati termodinamici nelle sezioni di ingresso e di uscita del volume di controllo



Esercizio 3 – parte 2

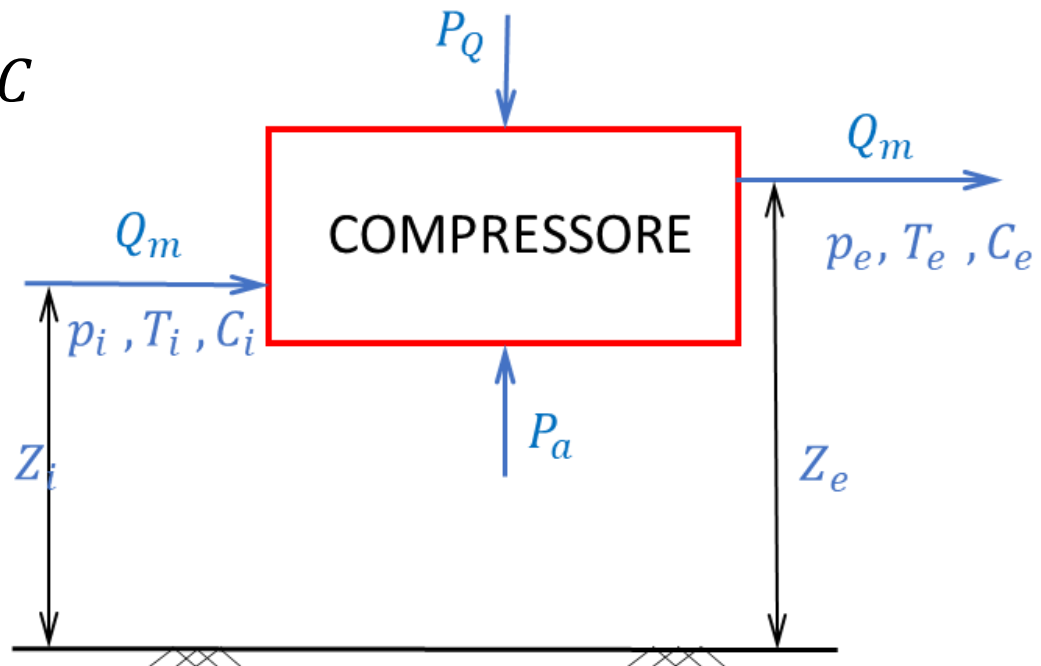
Si ipotizzi ora di dover effettuare lo stesso incremento di pressione su di un fluido comprimibile come l'aria. In questo caso, la macchina che opera questo lavoro si chiamerà “compressore” e la densità ρ non potrà più essere considerata costante.

$$p_i = 1 \text{ bar} \quad T_i = 20^\circ\text{C}$$

$$p_e = 4 \text{ bar}$$

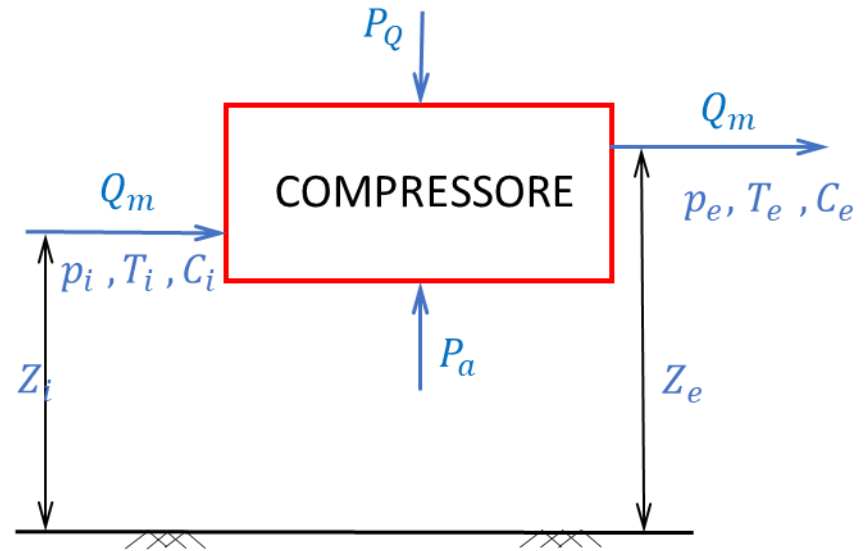
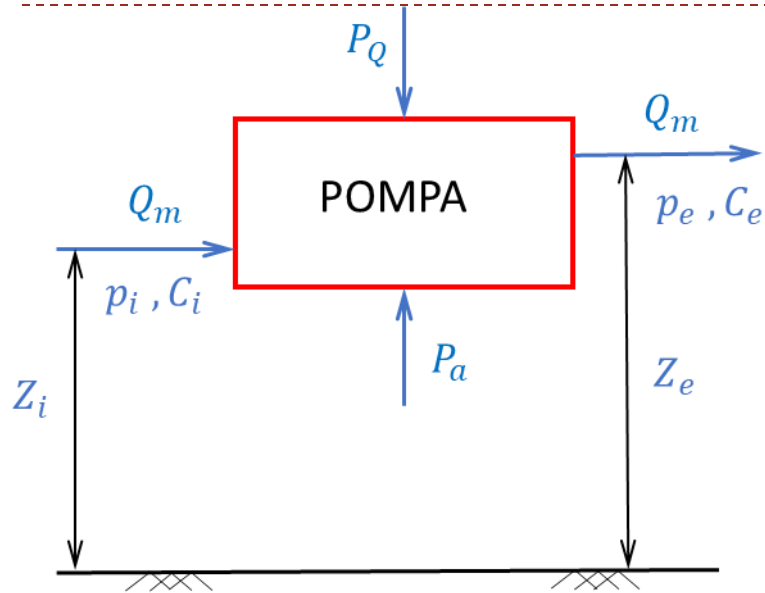
$$\dot{Q}_m = 20 \text{ kg/s}$$

$$\eta_{is} = 0.8$$



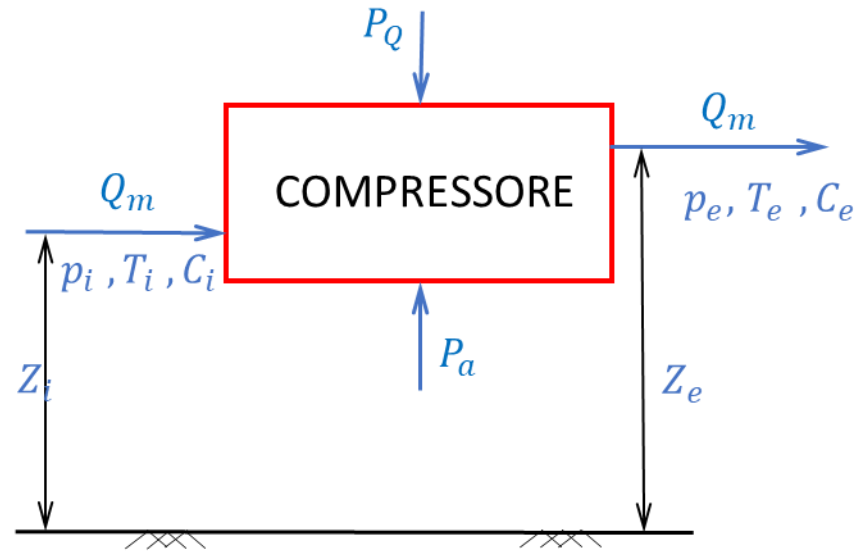
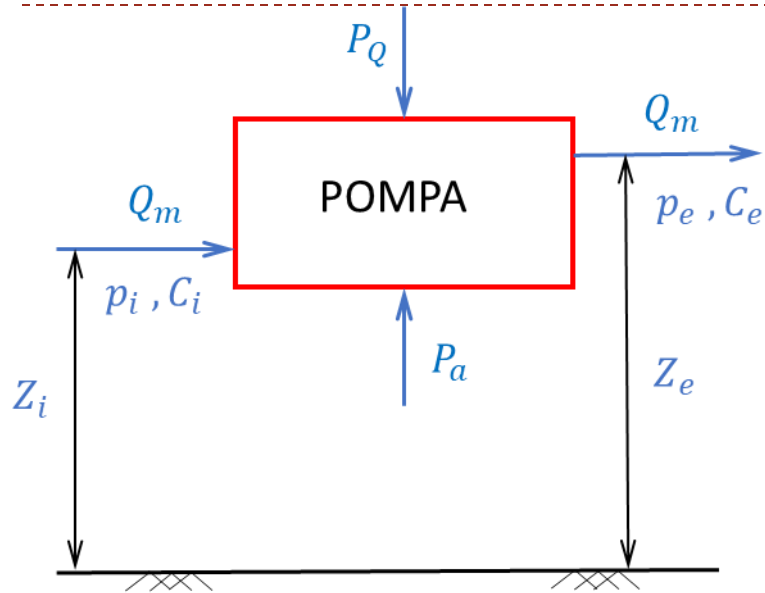
Considerazioni sull'Esercizio 3 pompa vs. compressore

Primo principio della termodinamica: esempio pompa vs. compressore



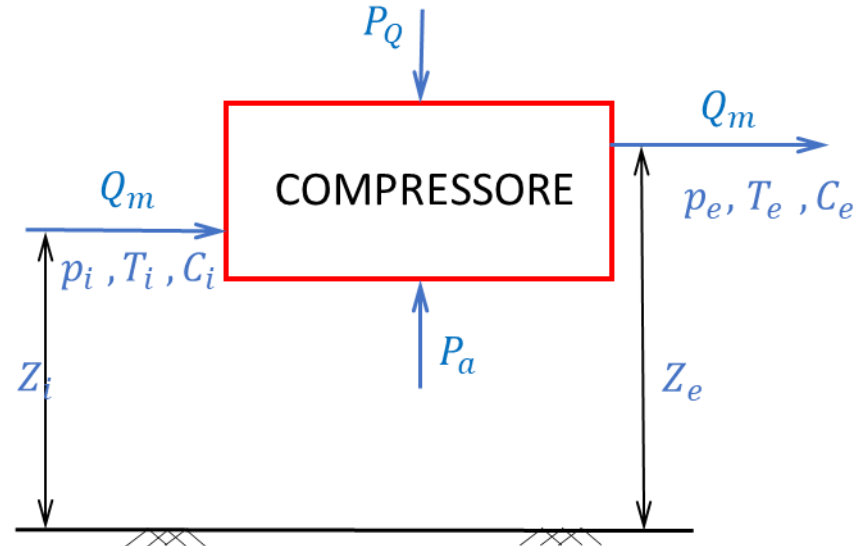
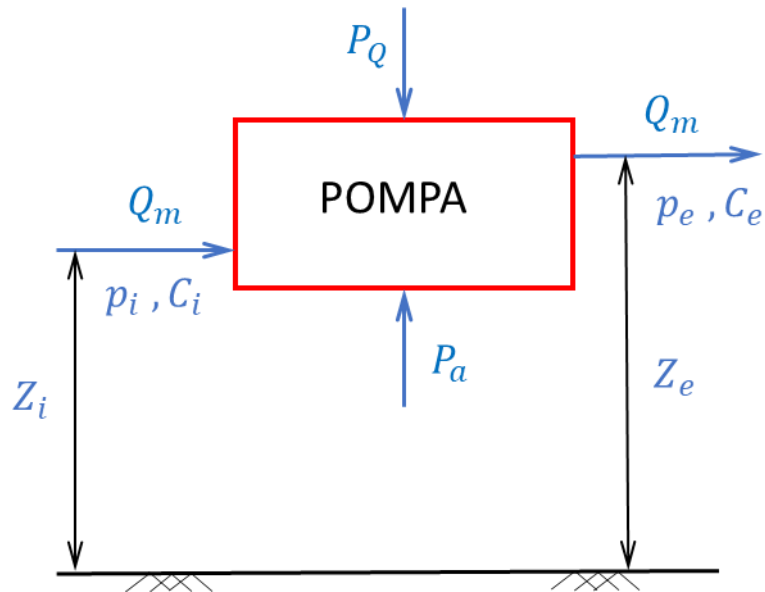
- Su quali parametri funzionali della macchina si dovrà intervenire per ottenere, a parità di Q_m , p_i e p_e , valori così diversi dello scambio di energia?

Primo principio della termodinamica: esempio pompa vs. compressore



- L'analisi termodinamica non ci offre altri ragguagli $\Rightarrow$ Occorre aprire la scatola nera, che rappresenta la macchina secondo l'approccio termodinamico, per capire com'è fatta e qual è il principio di funzionamento!

Primo principio della termodinamica: esempio pompa vs. compressore



- Ma tali conoscenze, benché essenziali, non sono sufficienti!

⇒ Occorre anche una strategia, quale? Cosa voglio privilegiare o ottenere?

Massimizzare il rendimento η

Massimizzare la potenza specifica P_a/Q_m

Domande, Curiosità, Dubbi, Perplessità?

PROF. ING. ALBERTO BENATO, PH.D.

ASSOCIATE PROFESSOR

TURBOMACHINERY & ENERGY SYSTEMS GROUP

DEPARTMENT OF INDUSTRIAL ENGINEERING - UNIVERSITY OF PADOVA
VIA VENEZIA 1 - 35131 - PADOVA
BLDG. EX DIM - 5TH FLOOR - ROOM 19

TEL. 049 827 6752

MAIL: ALBERTO.BENATO@UNIPD.IT

WEBSITE: RESEARCH.DII.UNIPD.IT/TES/

