



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



Dipartimento
di Ingegneria Industriale

Richiami

Corso di Macchine 1

Agenda

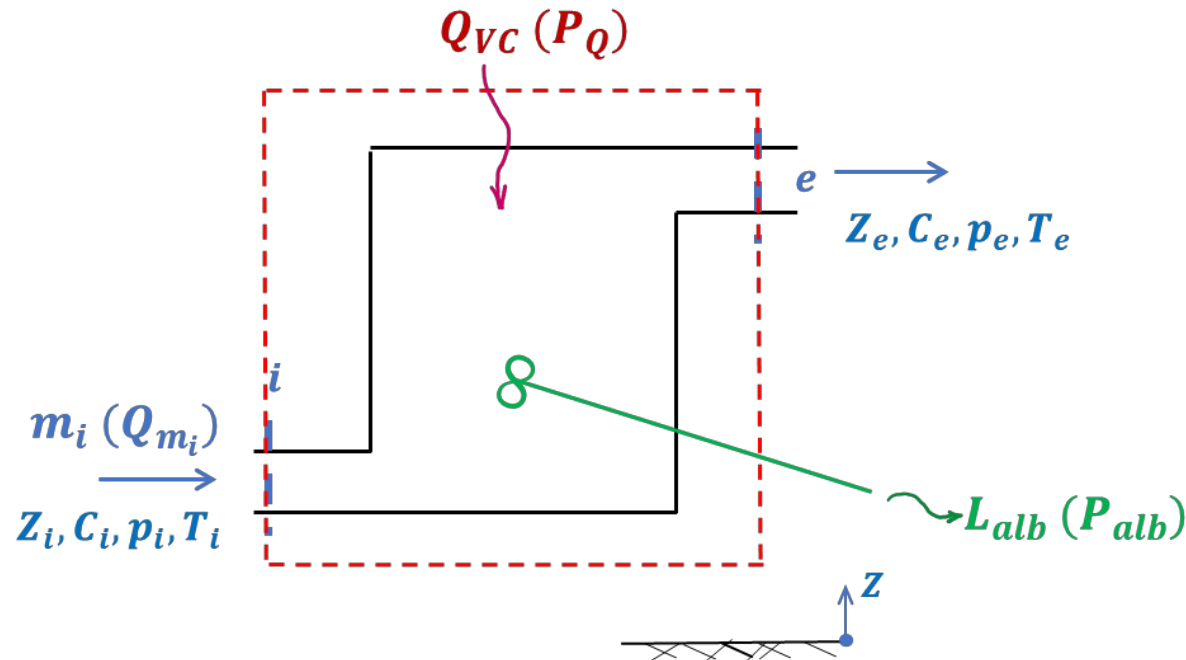
▶ Sistemi e Ambiente

- ▶ 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

Primo principio della termodinamica: sistemi aperti



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

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



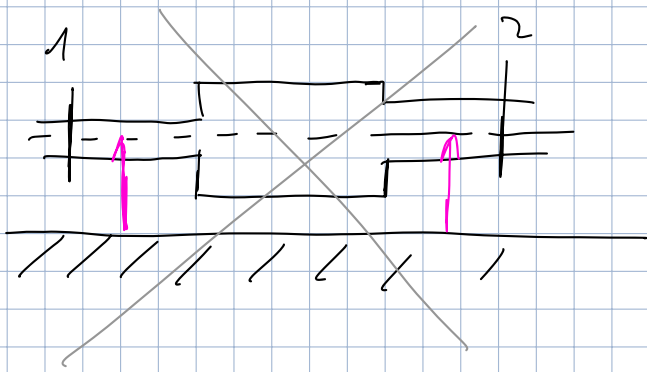
Esercizio 2

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 .

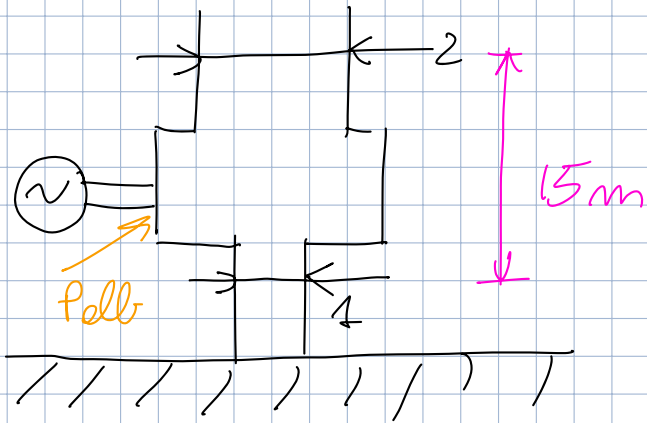
La sezione di uscita è di 1 m^2 e la pressione allo scarico è di 10 bar . La sezione di uscita è posta ad una quota di 15 m sopra la sezione di ingresso.

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



1 = INGRESSO

2 = USCITA



$$A_1 = 0,5 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 1 \text{ m}^2$$

$$C_1 = 6 \text{ m/s}$$

$$P_1 = 1 \text{ bar}$$

$$P_2 = 10 \text{ bar}$$

$$z_2 - z_1 = 15 \text{ m}$$

P_{01} ?

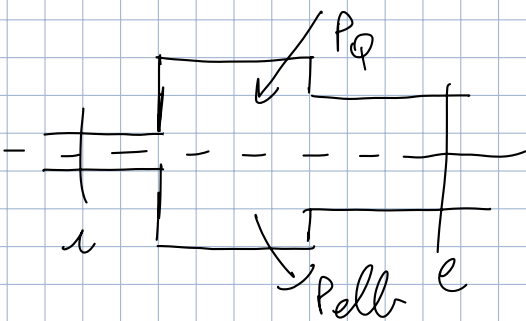
IL REGIME È STAZIONARIO!

PER TROVARE P_{01}

• EQ. DI CONTINUITÀ' E EQ. DI CONS. DELLA MASSA

$$Q_{m1} = Q_{m2} = Q_m$$

• I. P. D. T. D.



$$\sum Q_{mi} H_i^0 - \sum Q_{me} H_e^0 + P_0 - P_{01} = 0$$

CASO SPEC. DELL'ES.

• P_{01} è contraria alla formula gen.

• P_0 non c'è

• non ha più uscite e ingressi

$$Q_{m1} \cdot \left(u + \frac{P}{\rho} + \frac{C^2}{2} + g z \right)_1 - Q_{m2} \left(u + \frac{P}{\rho} + \frac{C^2}{2} + g z \right)_2 - (-P_{01}) = 0$$

SAPPIAMO CHE

$$u + \frac{P}{\rho} + \frac{C^2}{2} + g z = H^0 \text{ me FLUIDO INCOMP. QUINDI}$$

$$u = f(\text{SOSTANZA}, T) \rightarrow \Delta T = 0 \Rightarrow \Delta u = 0$$

$$Q_{m1} \cdot \left(\frac{P}{\rho} + \frac{C^2}{2} + g z \right)_1 - Q_{m2} \left(\frac{P}{\rho} + \frac{C^2}{2} + g z \right) + P_{\text{dell}} = 0$$

STATO 1

$$P_1 = 1 \text{ bar}$$

$$\rho_1 = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$C_1 = 6 \text{ m/s}$$

$$z_1 = 0 \quad z_2 - z_1 = 15 \text{ m} \rightarrow \text{STESSA COSA}$$

$$C_2 = \frac{Q_m}{\rho_2 A_2} \quad \text{ma } Q_m \text{ non ce l'ho!}$$

STATO 2

$$P_2 = 10 \text{ bar}$$

$$\rho_2 = \rho_1$$

$$C_2 = \text{però calcolerò}$$

$$Q_m = Q_{m1} = \rho_1 C_1 A_1 = 1000 \cdot 6 \cdot 0,5 = 3000 \text{ kg/s}$$

$$\text{ALLORA} \quad C_2 = \frac{3000}{1000 \cdot 1} = 3 \text{ m/s}$$

DAL I° PRINCIPIO

$$P_{\text{dell}} = Q_m \cdot \left[\frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{C_2^2 - C_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right]$$

$$= 3000 \cdot \left[\frac{(10 - 1) \cdot 10^5}{1000} + \frac{3^2 - 6^2}{2} + 9,81 \cdot 15 \right]$$

$$= 3 \cdot 100 \cdot 950 \text{ W} = 3 \cdot 10^5 \text{ W}$$



Esercizio 3

Esercizio 3 – parte 1

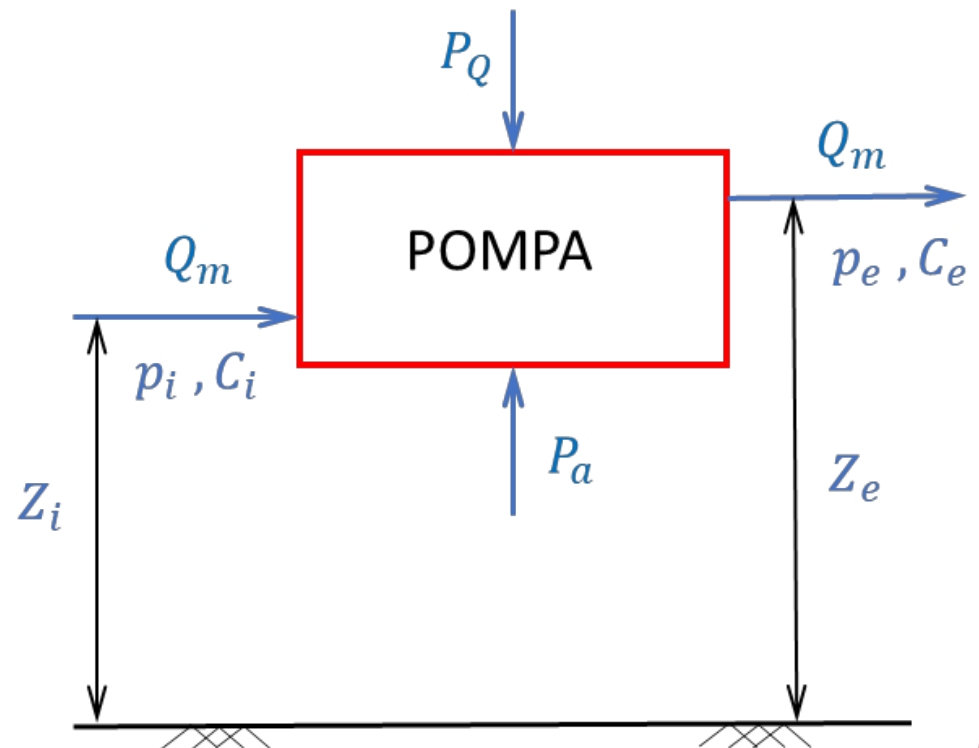
Determinare, in condizioni di regime stazionario, le prestazioni di una pompa nota la portata di massa Q_m e lo stato termodinamico del fluido nelle sezioni di ingresso "i" e di uscita "e" del volume di controllo

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

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

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

$$\eta = 0.8$$



Esercizio 3 – parte 1

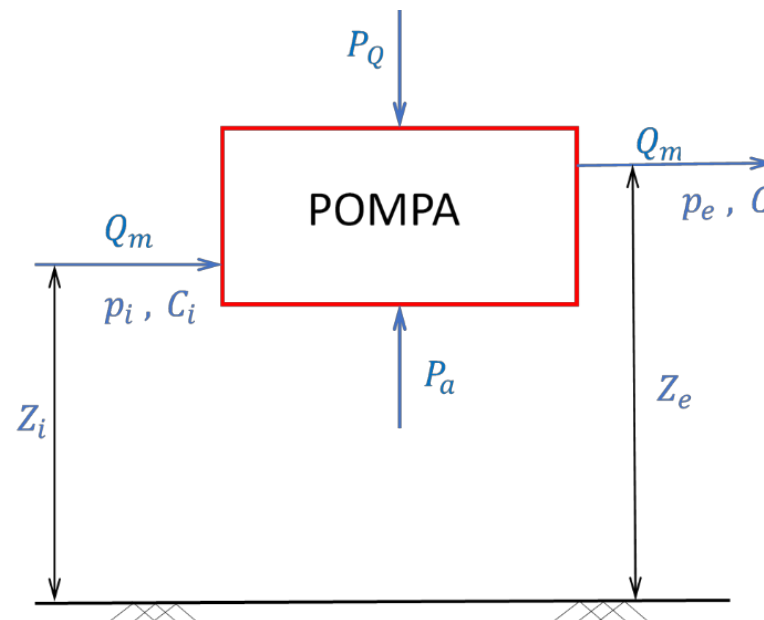
Si supponga inoltre:

- $C_i = C_e$, $Z_i = Z_e$
- 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



$$P_{\text{elettrica}} \xrightarrow{\geq} P_{\text{mec}} + P_{\text{dbr}} \xrightarrow{\geq} P_{\text{idr}}$$

$$P_n = 1 \text{ bar}$$

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

PRESTAZIONI

$$Q_{m,n} = 20 \text{ kg/s}$$

$$Q_{m,e} = 20 \text{ kg/s}$$

$P_{\text{dbr}} ?$

$$T_n = 20^\circ\text{C}$$

$$\eta = 0,8$$

PRIMO PRINCIPIO

eq. gen $\sum Q_{m,i} H_n^o - \sum Q_{m,e} H_e^o + P_Q - P_{\text{dbr}} = 0$
nel caso in esame

$$P_Q + P_{\text{dbr}} + Q_{m,n} H_n^o - Q_{m,e} H_e^o = 0$$

$$P_Q + P_{\text{dbr}} + Q_m \left[\left(u_n + \frac{P_n}{\rho} + \frac{c_n^2}{2} + g z_n \right) - \left(u_e + \frac{P_e}{\rho} + \frac{c_e^2}{2} + g z_e \right) \right] = 0$$

$$\Delta C = \Delta z \approx 0$$

$P_Q = \text{TRASCURABILE}$

FLUIDO È INCOMP $\Delta u \approx 0$

$$P_{\text{dbr}} = Q_m \left(\frac{P_e}{\rho} - \frac{P_n}{\rho} \right) = 20 \cdot \left(\frac{4 \cdot 10^5 - 1 \cdot 10^5}{1000} \right)$$

$$= 6000 \text{ W} = 6 \text{ kW} \quad \leftarrow \text{QUESTA È LA POT IDRAUL.}$$

$$P_{\text{dbr}} = \frac{Q_m \cdot \left(\frac{P_e - P_n}{\rho} \right)}{\eta} = \frac{6000}{0,8} = 7500 \text{ W} = 7,5 \text{ kW}$$

$$\text{COSTO} = 7000 \text{ ore/anno} \cdot P_{\text{idr}} \cdot 0,5 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$$

$$= \left(7000 \cdot P_{\text{dbr}} \right) \cdot 0,5$$

$\text{kWh} = \text{ESPESA}$

Esercizio 3 – parte 2

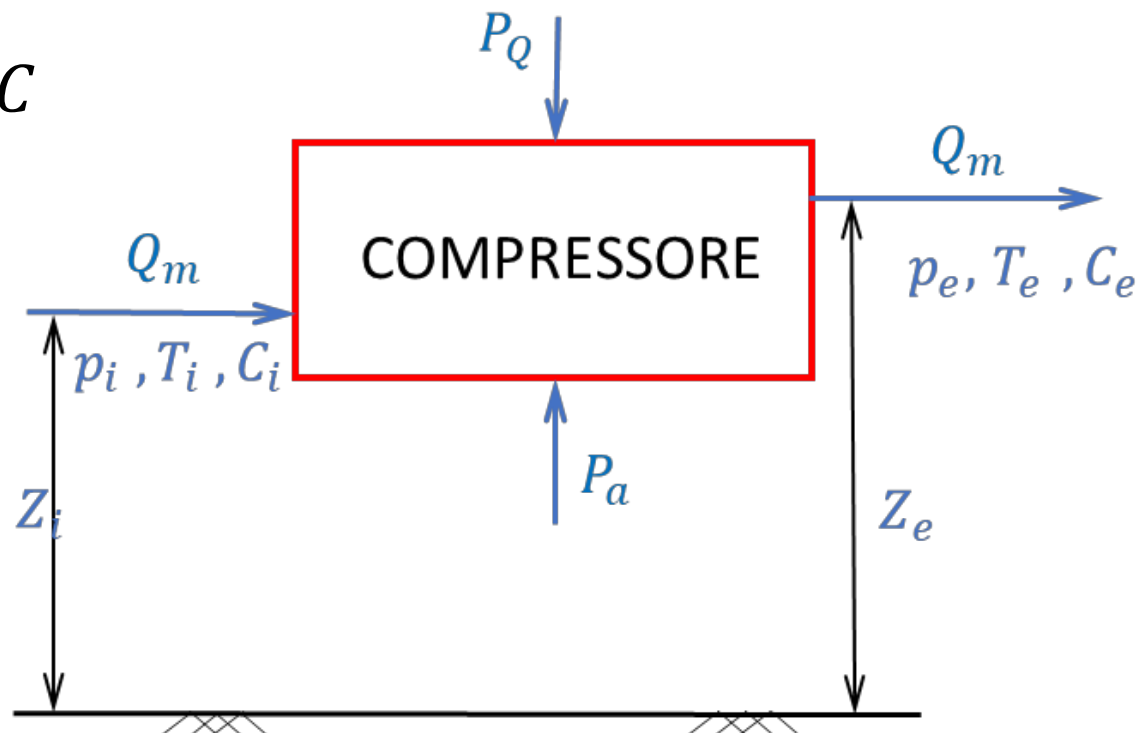
Si ipotizzi ora di dover effettuare lo stesso incremento di pressione su di un fluido comprimibile come l'aria. In questo caso, la macchina che opera questo lavoro si chiamerà “compressore” e la densità ρ non potrà più essere considerata costante.

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

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

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

$$\eta_{is} = 0.8$$



FLUIDO ARIA

$$r_c = \frac{p_e}{p_n} = \frac{4}{1} = 4$$

APPLICO IL 1° PRINCIPIO

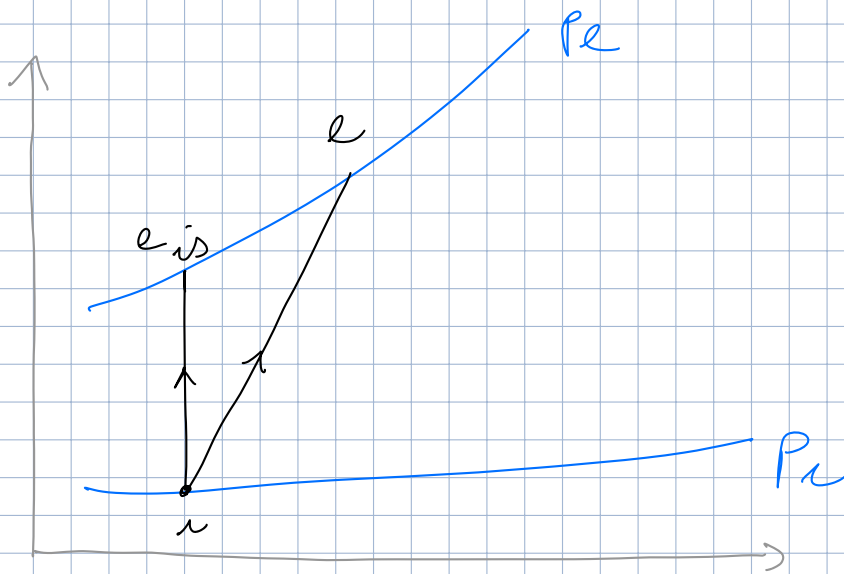
$$P_{\text{elb}} = \dot{Q}_m \cdot (u_e - u_n) + \dot{Q}_m \left(\frac{p_e}{s_e} - \frac{p_n}{s_n} \right)$$

QUESTA VOLTA

$\Delta u = u_e - u_n \neq 0$ NON È TRASCURABILE

$u = f(s, T) \rightarrow$ NEL COMP lo T cambia
tra n ed e !

PROCESSO DI COMPRESSIONE



ΔH_{is} e ΔH

$$\eta_{is} = \frac{\dot{Q}_m (H_{e, is} - H_n)}{\dot{Q}_m (H_e - H_n)}$$

$$P_{\text{elb}} = \frac{\dot{Q}_m (H_e - H_n)}{\eta_{is}}$$

DEVO USARE e quindi CALCOLORE H o H^0 ?

$$\Delta H^0_{is} \simeq \Delta H_{is} = c_p \cdot T_n \left[r_c^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right]$$

ALCORA, per ARIA a 20°C

$$C_p = 1005$$

$$\kappa = 1,4$$

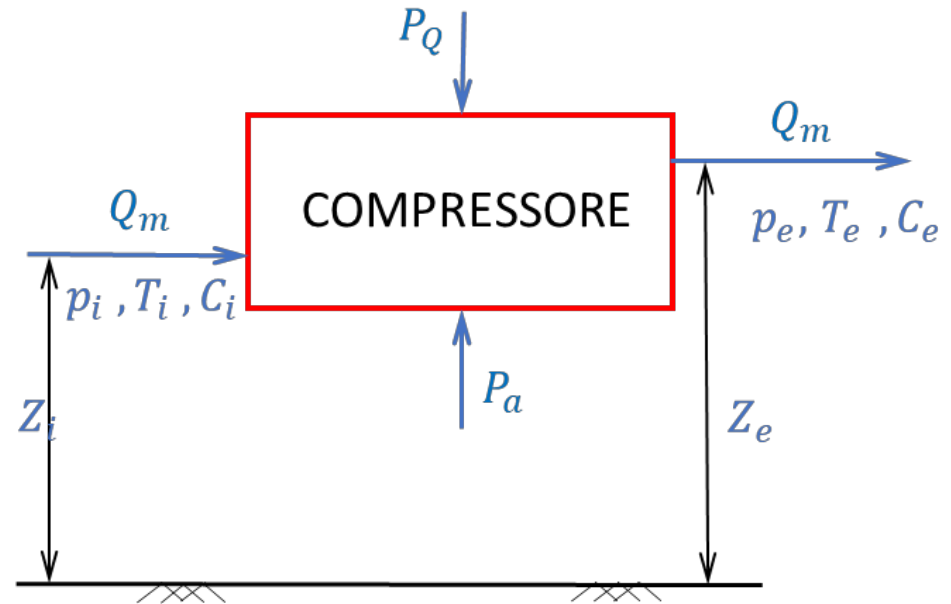
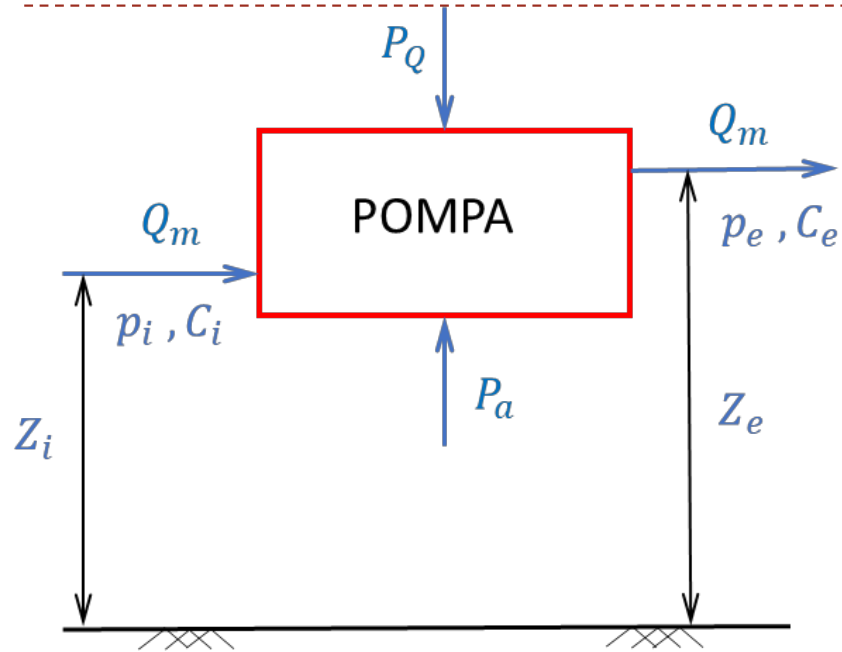
$$\Delta H^{\circ}_{15} \cong \Delta H = 1005 \cdot (20 + 273,15) \left[4^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1 \right]$$
$$= 143\,181 \text{ J/kg} = 143,18 \text{ kJ/kg}$$

$$P_{\text{eltr}} = \frac{143\,181 \cdot 20}{0,8} = 3580 \text{ kW} = 3,58 \text{ MW}$$

$$\frac{(P_{\text{eltr}})_{\text{comp}}}{(P_{\text{eltr}})_{\text{pompa}}} = \frac{3,6 \cdot 10^6}{7,5 \cdot 10^3} \cong 480$$

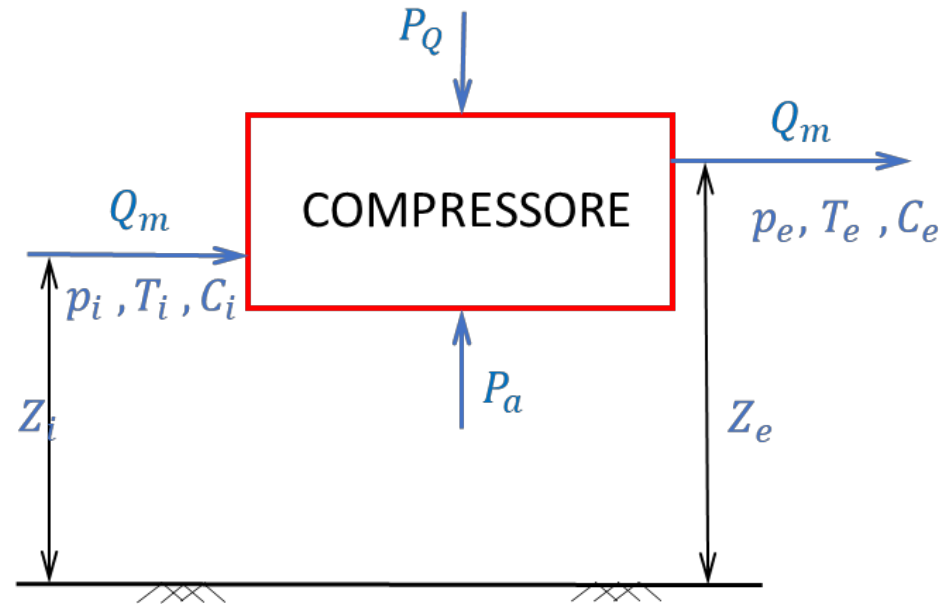
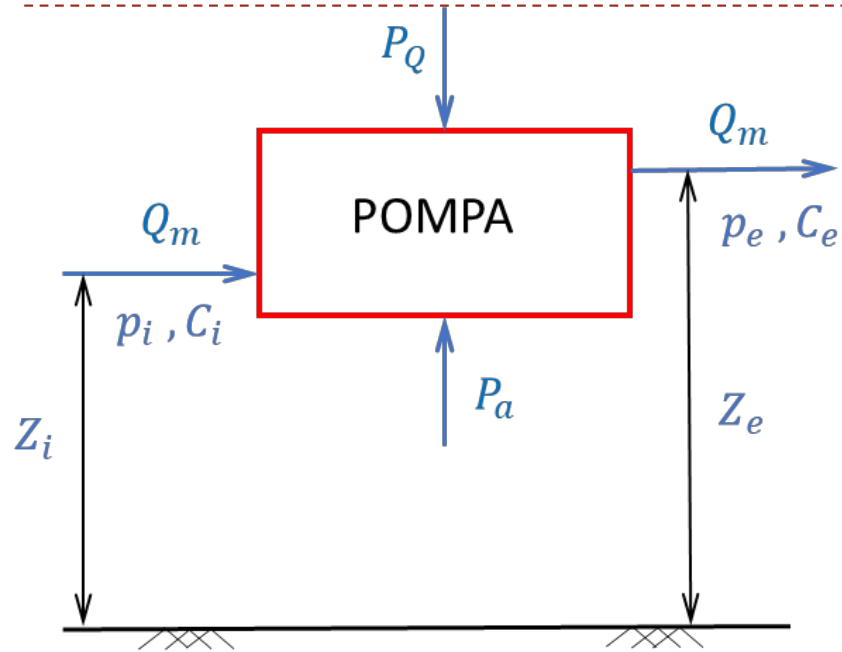
Considerazioni sull'Esercizio 3 pompa vs. compressore

Primo principio della termodinamica: esempio pompa vs. compressore



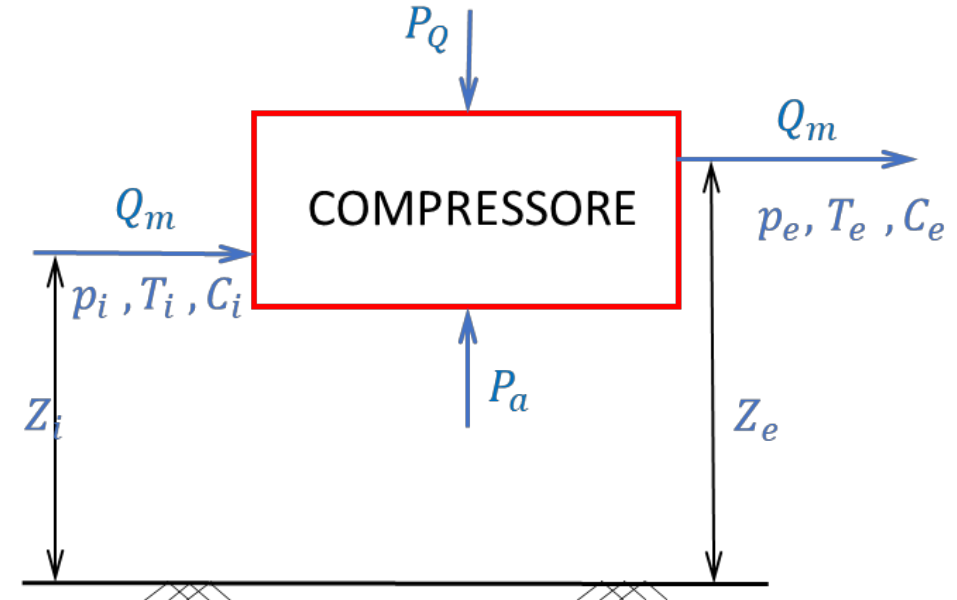
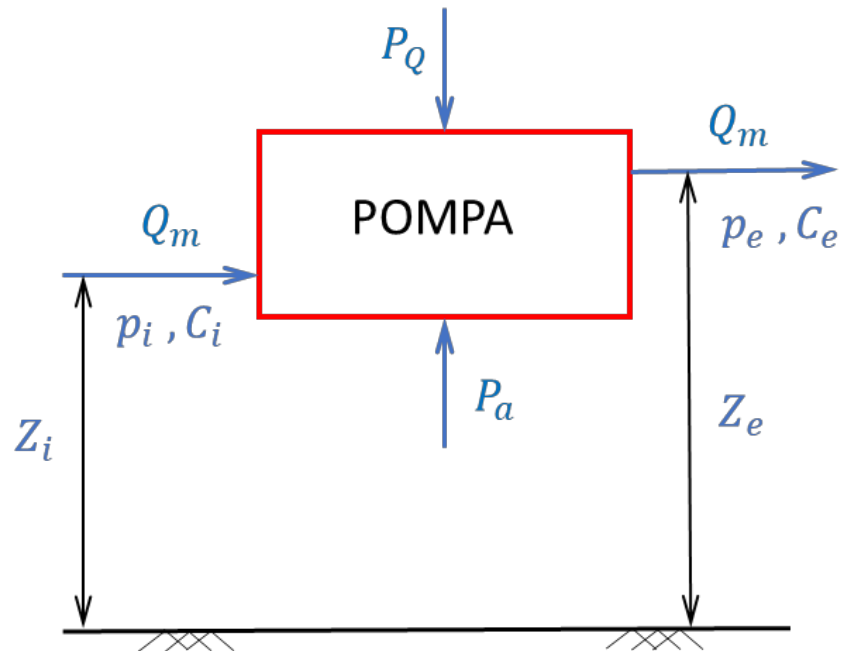
- Su quali parametri funzionali della macchina si dovrà intervenire per ottenere, a parità di Q_m , p_i e p_e , valori così diversi dello scambio di energia?

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/

