



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



Dipartimento
di Ingegneria Industriale

Classificazione generale delle macchine

Corso di Macchine 1

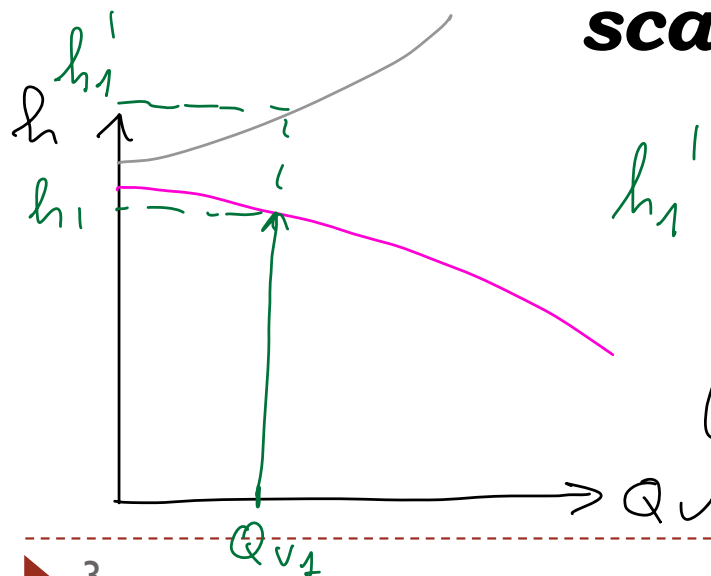
Agenda

- ▶ Macchina a fluido: definizione
- ▶ Classificazione delle macchine a fluido
 - ▶ Operatrice e Motrice
 - ▶ Idrauliche e Termiche
 - ▶ Volumetriche e Turbomacchine
- ▶ Curve caratteristiche delle macchine a fluido
- ▶ I parametri operativi nelle curve caratteristiche
 - ▶ Fluido comprimibile
 - ▶ Fluido Incomprimibile
- ▶ Curva resistente dell'impianto



Macchine a fluido

«Macchina costituita da un insieme di **elementi fissi e mobili** che **interagiscono** con un **fluido** di lavoro (liquido, vapore o gas), realizzando con esso uno **scambio energetico**»



$h_1' > h_1$ la macchina non funziona

(FIG. A)

— CURVA CAR. MACCHINA

— CURVA RES CIRC.

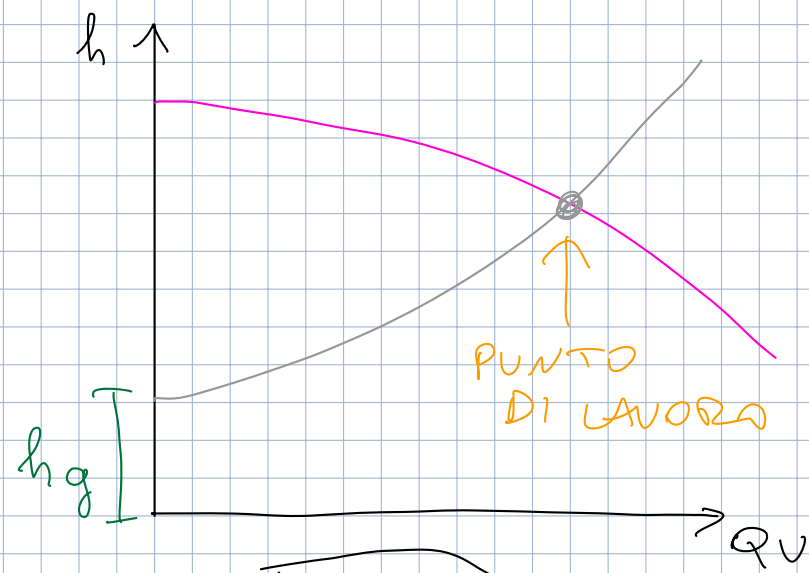


FIG B

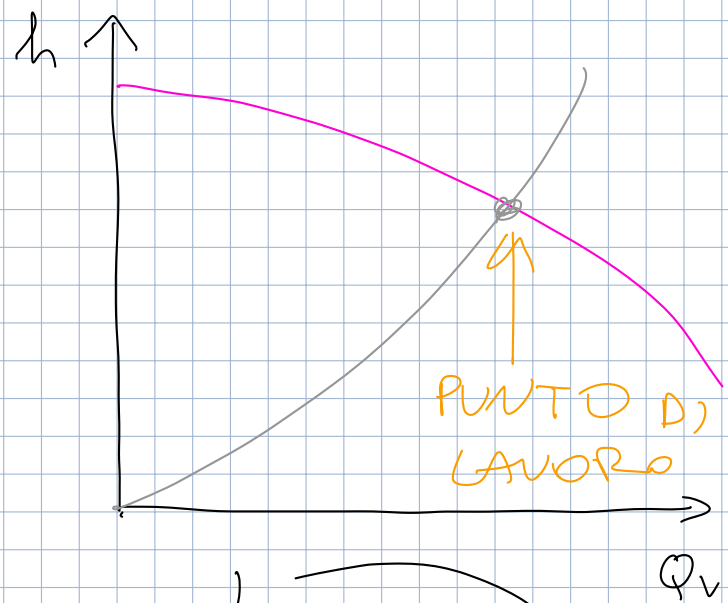


FIG. C

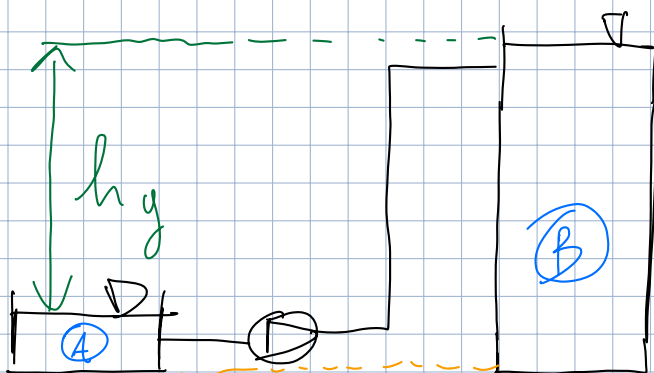
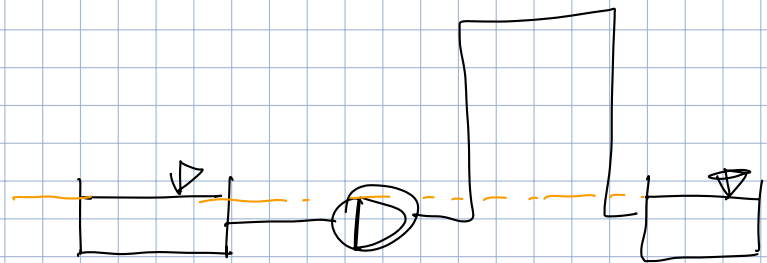
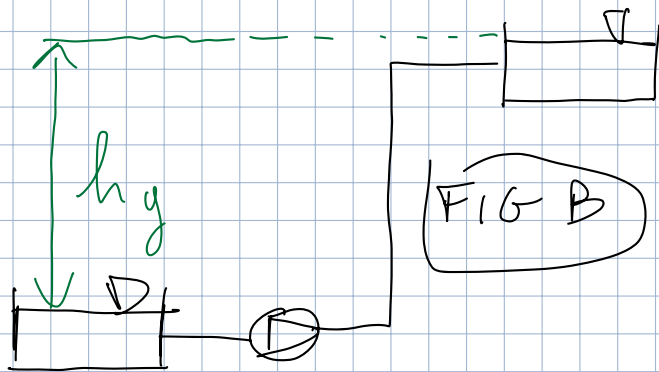


FIG B'

Classificazione delle Macchine

	Idrauliche		Termiche	
	<i>Operatrici</i>	<i>Motrici</i>	<i>Operatrici</i>	<i>Motrici</i>
Volumetriche	Pompe Volumetriche	Attuatori Volumetrici	Compressori Volumetrici	Motori a combustione interna
A flusso continuo o turbomacchine	Turbopompe e Ventilatori	Turbine Idrauliche	Turbo-compressori	Turbine a gas e a vapore

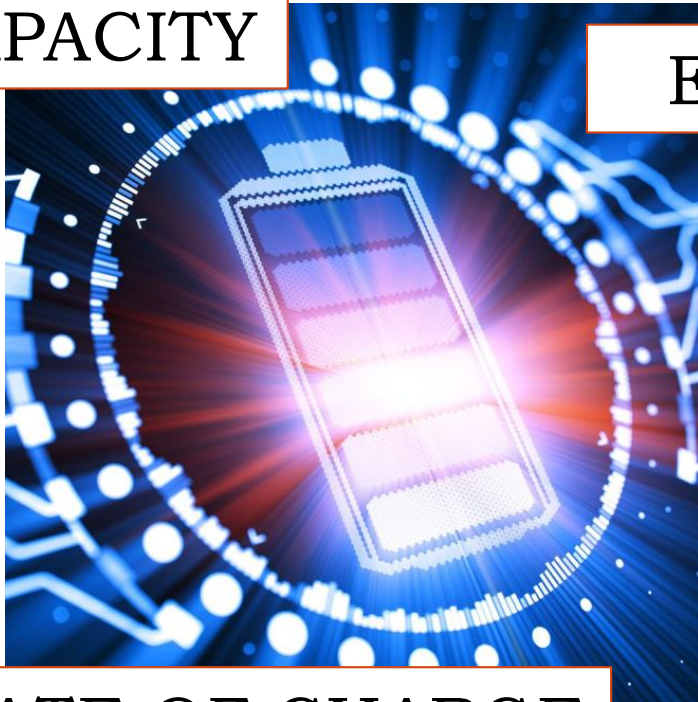


Curve caratteristiche

Parametri operativi nelle macchine a fluido

- Per tutti i “sistemi” è possibile identificare dei **parametri** operativi e prestazionali **misurabili/determinabili** che caratterizzano il comportamento del sistema stesso
- Alcuni parametri sono di **utilizzo generale** mentre altri sono **specifici** del sistema considerato

CAPACITY



STATE OF CHARGE

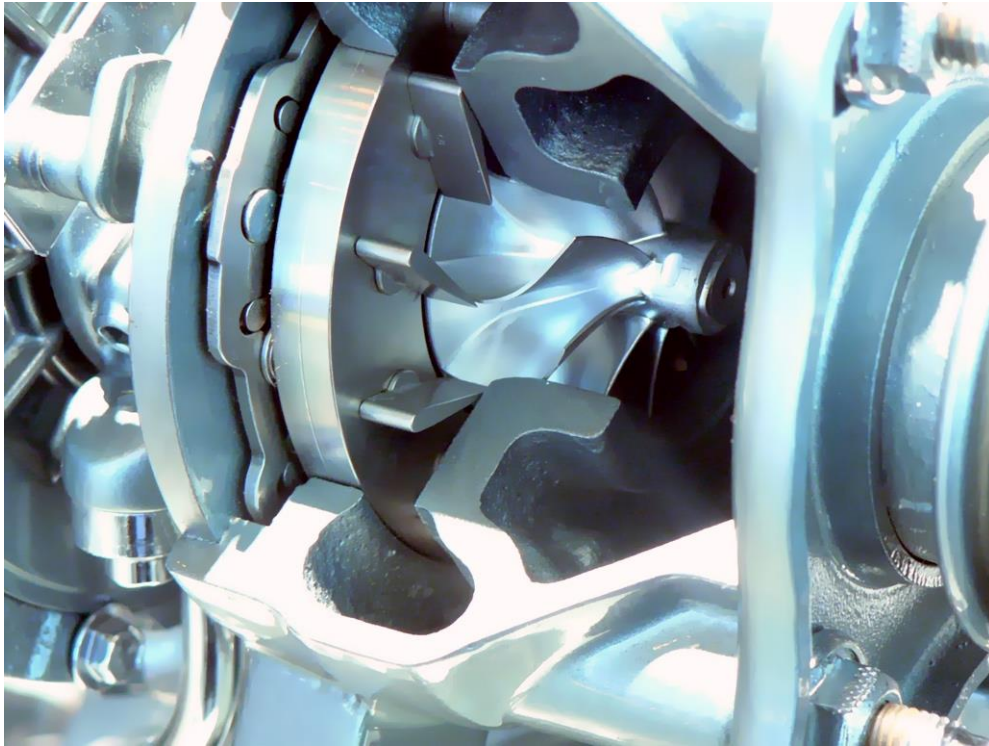
EFFICIENCY

POWER



HEART RATE

Parametri operativi nelle macchine a fluido



Quali sono i parametri operativi di una **macchina a fluido**?

Il **primo principio** della termodinamica applicato alle macchine ha fornito già alcune indicazioni

In regime di stazionarietà e per processi adiabatici, assume per una macchina operatrice (**pompa, ventilatori, soffianti, compressori**) la forma:

$$P_a = Q_m(H_e^0 - H_i^0)$$

P_a è la potenza meccanica disponibile all'albero

Q_m è la portata di massa di fluido che attraversa la macchina

$H^0 = H + \frac{c^2}{2} + gz$ l'entalpia totale dell'unità di massa del fluido in corrispondenza della sezione i oppure e

Curve caratteristiche e parametri di esercizio

$$P_a = Q_m(H_e^0 - H_i^0)$$

Sono parametri misurabili/determinabili??

- La **portata** di massa viene comunemente determinata con opportuni **strumenti di misura** collocati in una posizione opportuna dell'impianto, dove le **condizioni di moto** si possano considerare **indisturbate** → sufficientemente distanti da organi di regolazione della portata, da tratti curvi del circuito sperimentale di prova, etc.



Flussimetro digitale

- La definizione di entalpia totale H^0 consente di **individuare le grandezze** che devono essere determinate in corrispondenza delle sezioni i ed e :
 - le pressioni p_i e p_e
 - le temperature T_i e T_e
 - le velocità C_i e C_e
 - le quote geodetiche z_i e z_e

$$H^0 = U + \frac{p}{\rho} + \frac{C^2}{2} + gz$$

Curve caratteristiche e parametri di esercizio

- Le **misure** delle singole grandezze devono avvenire **in condizioni di stazionarietà**, ovvero quando il valore medio delle singole grandezze non varia nel tempo oltre prefissate soglie di tolleranza
- Le velocità medie C_i e C_e derivano dall'equazione di continuità:

$$C_i = \frac{Q_m}{\rho_i A_i}$$

$$C_e = \frac{Q_m}{\rho_e A_e}$$

- Le misure sperimentali dei parametri **operativi di maggiore** interesse vengono riportate in diagrammi detti «**curve caratteristiche**» e sono di elevato interesse applicativo

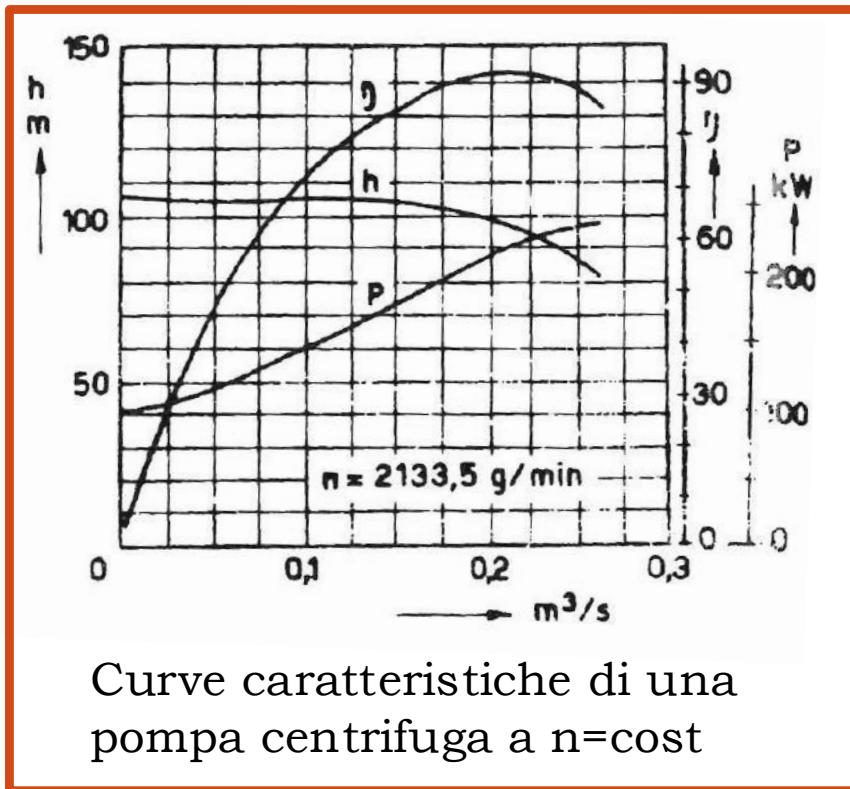
➡ Quali sono le grandezze di maggiore interesse???

➡ Dipende dalla tipologia di macchina!!



Curve caratteristiche: esempi

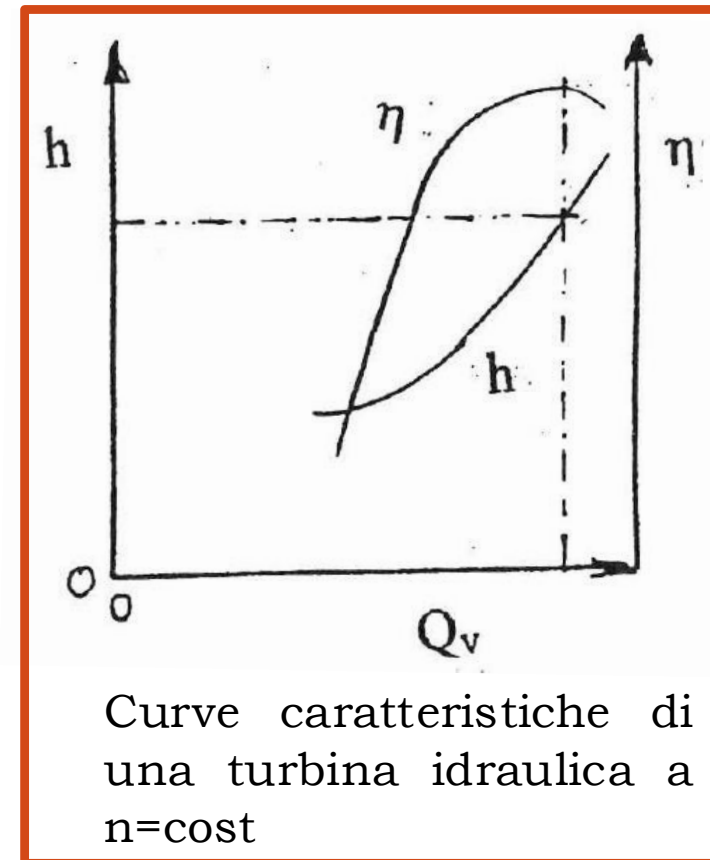
- Le curve caratteristiche sono grafici determinati **sperimentalmente** e riportano i parametri funzionali di interesse (ΔH_{is}^0 , gh , ecc.) in funzione della portata Q_m (o Q_v) generalmente a regime di rotazione costante



Lo scambio energetico è espresso tramite una grandezza h espressa in $[m]$

$h [m]$

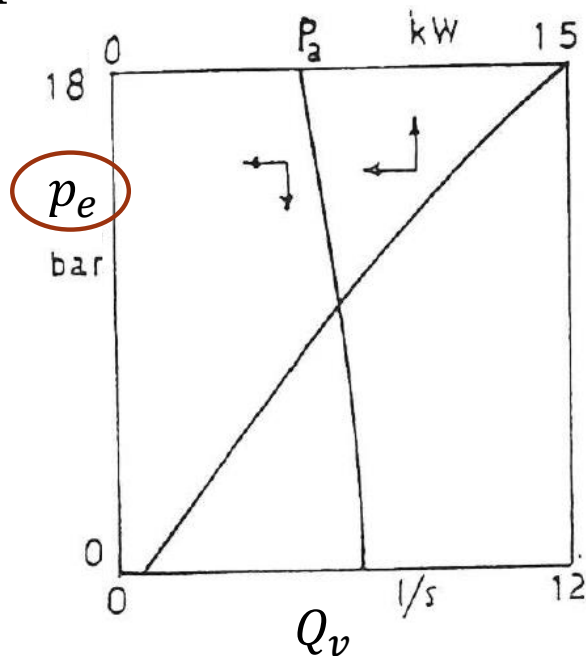
prevalenza



caduta

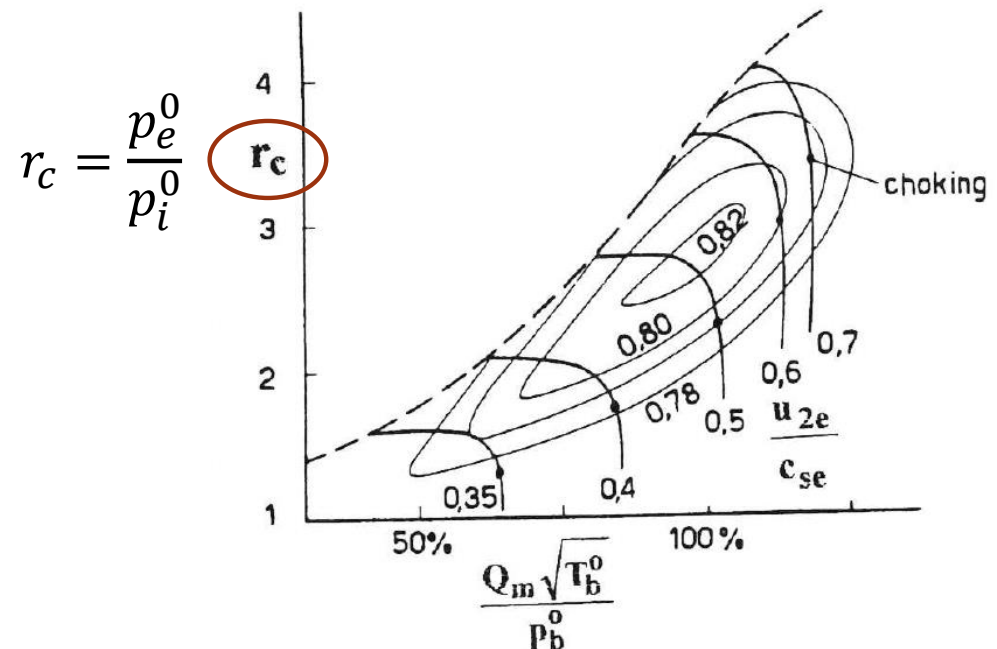
Curve caratteristiche: esempi

Nelle **pompe volumetriche** si riporta invece la pressione alla mandata $p_e \rightarrow$ il termine predominante nello scambio di energia e di maggior interesse applicativo

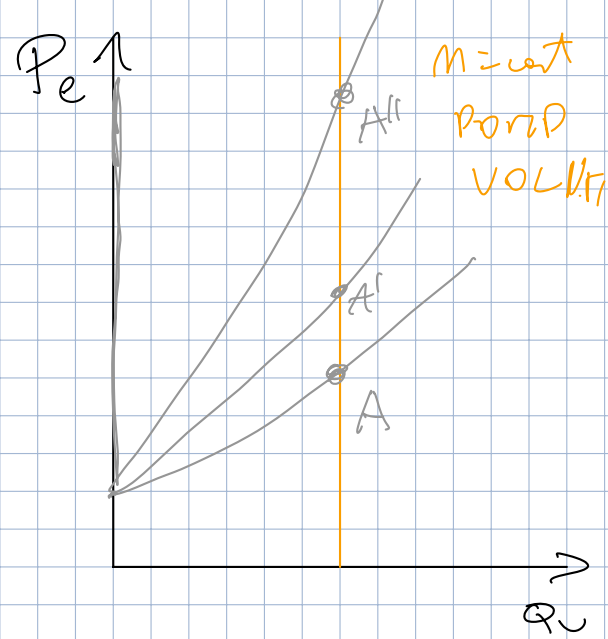
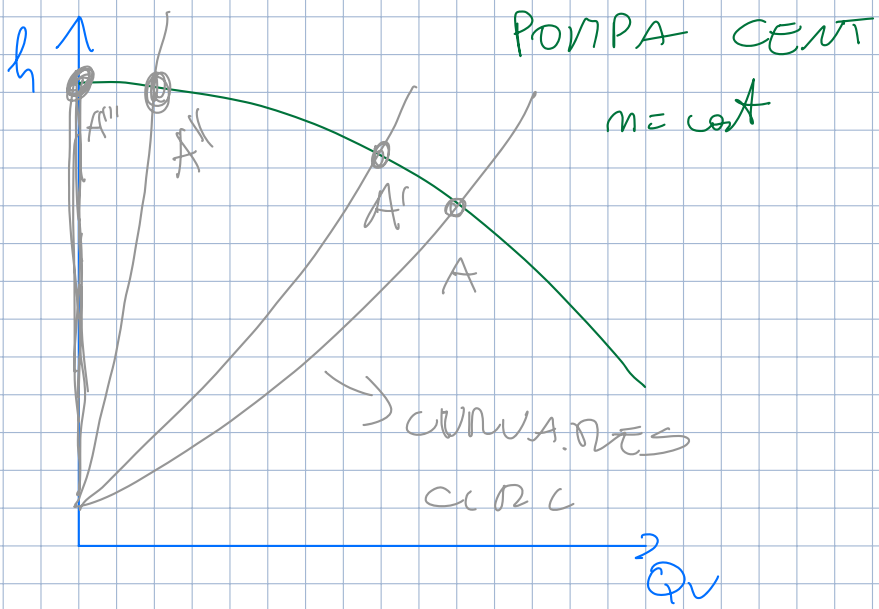


Curve caratteristiche di una pompa volumetrica rotativa a $n = \text{cost}$

Nei **compressori** si riporta il rapporto di compressione $r_c = p_e^0 / p_i^0$, direttamente correlato al lavoro minimo di compressione ΔH_{is}^0



Curve caratteristiche di un compressore centrifugo per alcuni valori del numero di Mach del rotore (numero di giri)



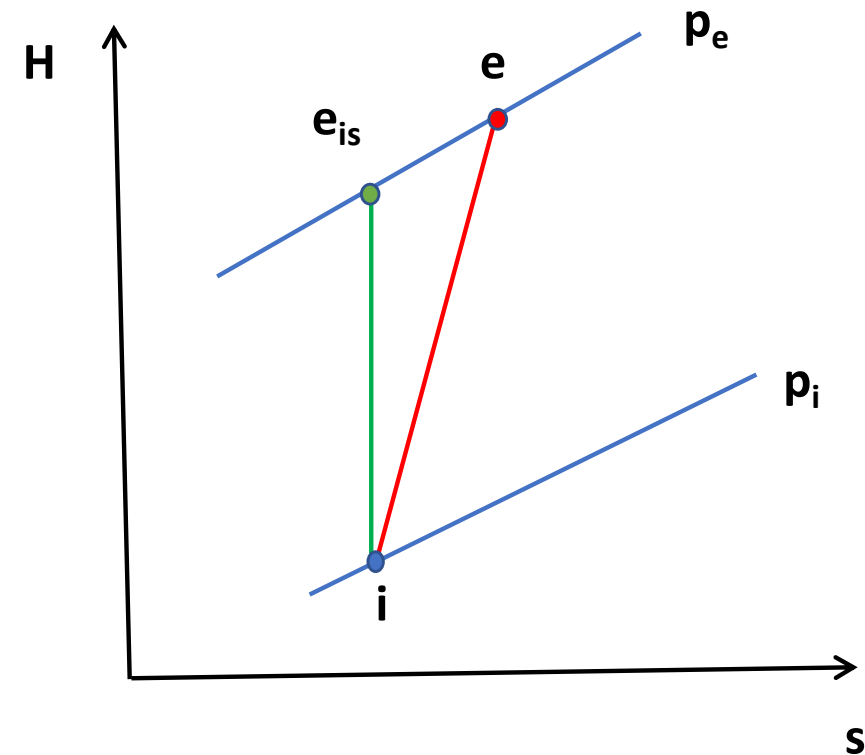
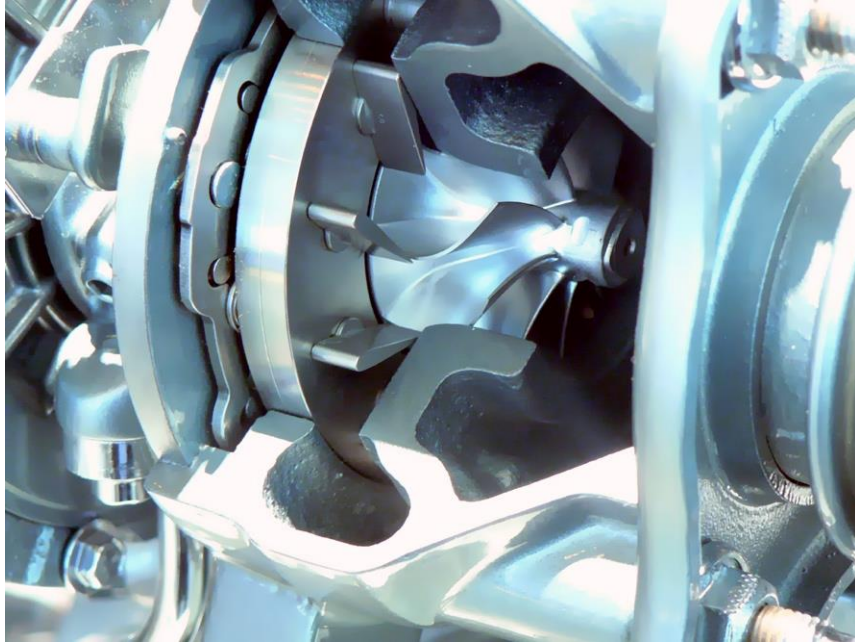
I parametri operativi nelle curve caratteristiche

Fluidi comprimibili vs Fluidi Incomprimibili

I parametri operativi nelle curve caratteristiche

Fluidi comprimibili

Curve caratteristiche e parametri di esercizio



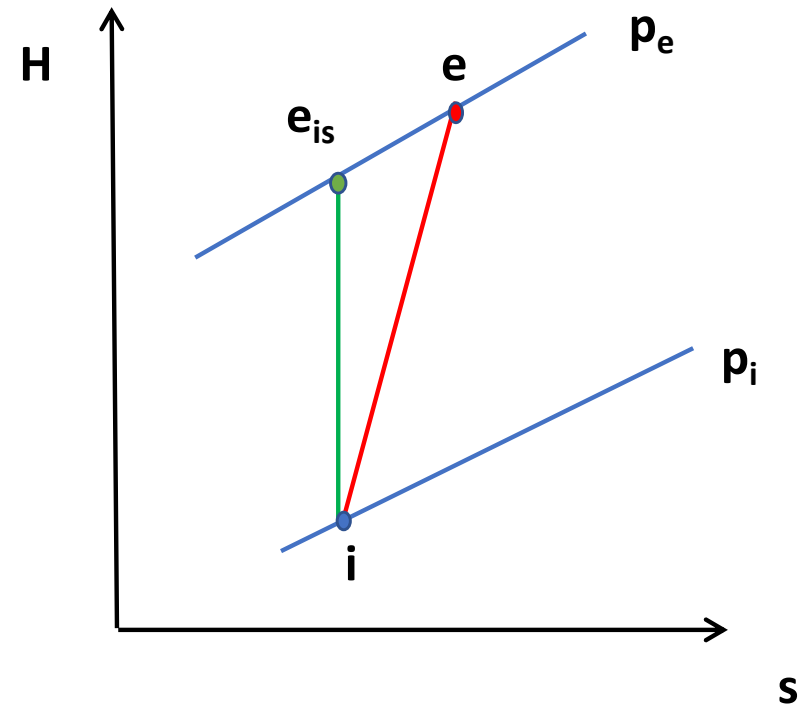
Fluido comprimibile: compressore

- La trasformazione di compressione viene rappresentata in un **diagramma H-s** e confrontata con la trasformazione **isoentropica** di riferimento

Curve caratteristiche e parametri di esercizio

Fluido comprimibile: compressore

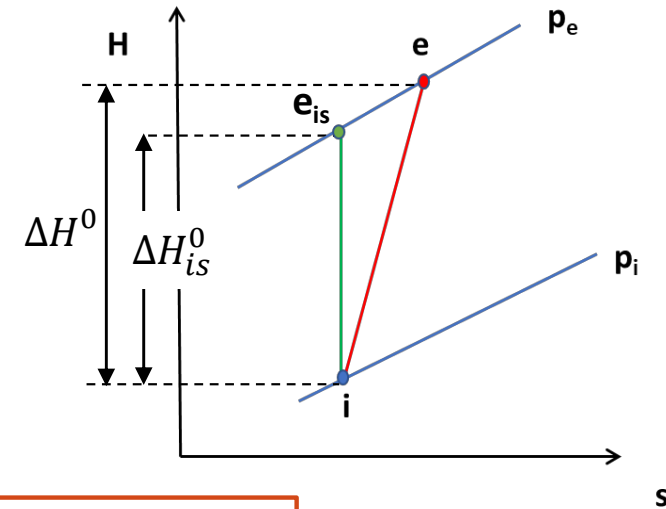
- Si ignorino per semplicità le potenze dissipate per attriti meccanici P_m e per trafileamenti di portata P_{Q_f} attraverso gli organi di tenuta $\Rightarrow$ Ipotesi di macchina perfetta ($P_{Q_f} = 0$, $P_m = 0$) e fluido reale
- La trasformazione isoentropica di riferimento sia caratterizzata da:
 - stesso stato termodinamico iniziale di quella reale
 - stesso intervallo di pressioni statiche p_i e p_e
 - stesse velocità C_i e C_e
 - stesse quote z_i e z_e all'ingresso e all'uscita della trasformazione reale



Curve caratteristiche e parametri di esercizio

Fluido comprimibile: compressore

- Il confronto tra trasformazione isoentropica e trasformazione ideale si può effettuare a partire dall'espressione del primo principio della termodinamica



$$P_{alb} = Q_m(H_e^0 - H_i^0)$$

$$= Q_m(H_{e_{is}}^0 - H_i^0) + Q_m(H_e^0 - H_{e_{is}}^0) = Q_m\Delta H_{is}^0 + Q_m(H_e^0 - H_{e_{is}}^0)$$

minima potenza richiesta dal processo di compressione da p_i^0 a p_e^0

potenza dissipata a causa delle irreversibilità nel processo reale di compressione

$$\Rightarrow \eta_{is} = \frac{Q_m \Delta H_{is}^0}{P_{alb}}$$

E' misurabile? Da cosa dipende?



Curve caratteristiche e parametri di esercizio

Fluido comprimibile: compressore

- Per determinare il ΔH_{is}^0 :

$$\Delta H_{is}^0 = c_p T_i^0 \left[\left(\frac{p_e^0}{p_i^0} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = c_p T_i^0 \left(r_c^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)$$

dove:

$$T_i^0 = T_i \left(1 + \frac{k-1}{k} \frac{c_i^2}{kRT_i} \right) \cong T_i$$

(velocità del suono)²

Approssimazione accettabile per macchine con velocità di flusso C piccole rispetto alla velocità del suono $\sqrt{kRT}$

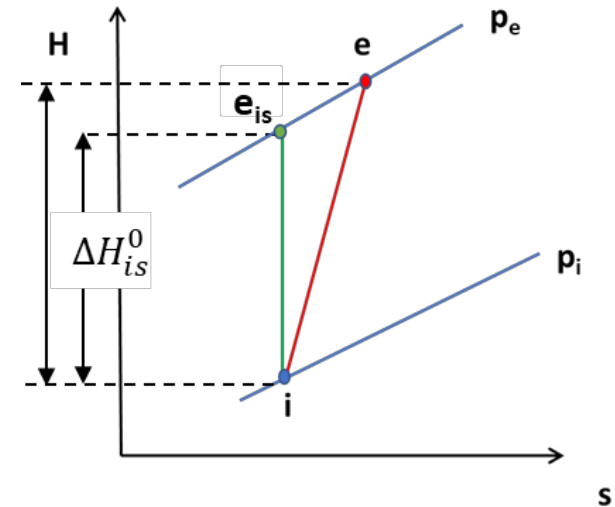
- Analogamente:

$$p_i^0 \cong p_i$$

$$p_e^0 \cong p_e$$



$$\Delta H_{is}^0 \cong \Delta H_{is}$$



Curve caratteristiche e parametri di esercizio

$$\eta_{is} = \frac{Q_m \Delta H_{is}^0}{P_{alb}}$$

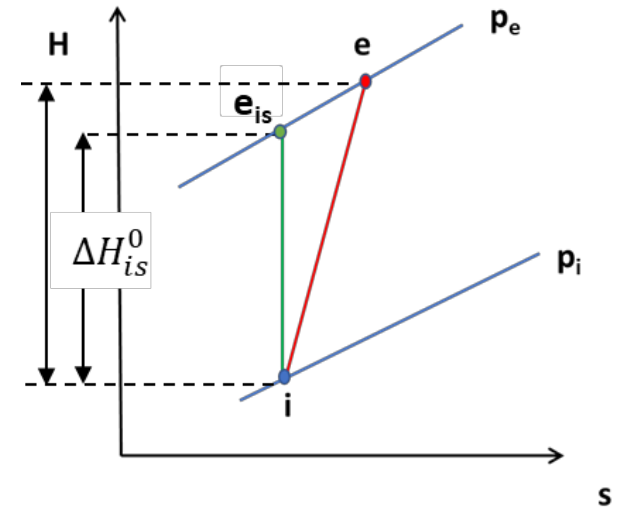
$$\Delta H_{is}^0 = c_p T_i^0 \left(r_c^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)$$

• Ne deriva che:

- ✓ la portata di massa Q_m
- ✓ lo scambio di energia ΔH_{is}^0 (oppure $r_c = p_e^0/p_i^0$ o, quando è lecito, le analoghe grandezze statiche $r_c = p_e/p_i$)
- ✓ la potenza P_{alb} (oppure il rendimento $\eta = Q_m \Delta H_{is}^0 / P_a$)

sono di sicuro parametri funzionali di una macchina a fluido quando il fluido sia comprimibile

- Ad analoghe conclusioni si perverrebbe se, considerando ancora il fluido comprimibile, si considerasse una turbina
- Dalla formulazione del primo principio non emerge in modo evidente un altro parametro di funzionamento essenziale per ogni macchina a fluido:
il regime di rotazione n dell'albero motore



I parametri operativi nelle curve caratteristiche

Fluidi incompressibili

Curve caratteristiche e parametri di esercizio

Fluido incompressibile: **pompa**

• Per una macchina operatrice (pompa), il primo principio assume la forma:

$$\begin{aligned} P_{alb} &= Q_m(H_e^0 - H_i^0) = Q_m \left[\left(H_e + \frac{C_e^2}{2} + gz_e \right) - \left(H_i + \frac{C_i^2}{2} + gz_i \right) \right] = \\ &= \rho Q_v \left[\left(\frac{p_e}{\rho} + u_e + \frac{C_e^2}{2} + gz_e \right) - \left(\frac{p_i}{\rho} + u_i + \frac{C_i^2}{2} + gz_i \right) \right] = \\ &= \rho Q_v \left(\frac{p_e - p_i}{\rho} + \frac{C_e^2 - C_i^2}{2} + gz_e - gz_i \right) + \rho Q_v (u_e - u_i) \\ &= \rho Q_v gh + \rho Q_v (u_e - u_i) \end{aligned}$$

dove:

$$gh = \Delta E_{is}^0 = \left(\frac{p_e}{\rho} + \frac{C_e^2}{2} + gz_e \right) - \left(\frac{p_i}{\rho} + \frac{C_i^2}{2} + gz_i \right) = \frac{p_e^0}{\rho} - \frac{p_i^0}{\rho}$$

è la differenza delle pressioni totali del fluido tra l'uscita e l'ingresso della pompa

Curve caratteristiche e parametri di esercizio

- Nell'espressione del primo principio:

$$P_{alb} = \rho Q_v g h + \rho Q_v (u_e - u_i)$$

compare anche il termine $\rho Q_v (u_e - u_i)$, ovvero la potenza legata all'incremento dell'energia interna

- L'energia interna u **dipende** dalla sostanza (il **fluido operativo**) e, fondamentalmente, dalla temperatura T
- L'ipotesi di **fluido incompressibile** esclude un aumento di temperatura dovuto all'incremento di pressione $p_e - p_i$
 - $\Rightarrow$ L'incremento di energia interna $u_e - u_i$ deriva unicamente **dall'aumento di temperatura** generato dalla degradazione di energia meccanica in calore a causa delle **perdite fluidodinamiche**
 - $\Rightarrow$ Per **fluido perfetto** sono nulle le perdite fluidodinamiche $\rightarrow u_e - u_i = 0$

Curve caratteristiche e parametri di esercizio

$$P_{alb} = \rho Q_v gh + \rho Q_v (u_e - u_i)$$

minima potenza richiesta dal processo di compressione da p_i^0 a p_e^0

degradazione di energia meccanica in calore a causa delle perdite fluidodinamiche

$$\Rightarrow \eta_{id} = \frac{Q_m gh}{P_{alb}}$$

- gh è l'energia minima richiesta per comprimere l'unità di massa del fluido dalla pressione totale p_i^0 alla pressione totale p_e^0 ($r_c = p_e^0/p_i^0$)

$$gh \left[\frac{J}{kg} \right] \Rightarrow h = \frac{gh}{g} \text{ [m]}$$

Curve caratteristiche e parametri di esercizio

$$\eta_{id} = \frac{Q_m gh}{P_{alb}} \rightarrow gh = \frac{p_e^0}{\rho} - \frac{p_i^0}{\rho} = \left(\frac{p_e}{\rho} + \frac{c_e^2}{2} + gz_e \right) - \left(\frac{p_i}{\rho} + \frac{c_i^2}{2} + gz_i \right)$$

- Ne deriva che, per un fluido incompressibile, i **parametri funzionali** di una macchina a fluido sono:
 - ✓ la **portata di massa** Q_m
 - ✓ lo **scambio di energia** gh
 - ✓ la **potenza** P_{alb} (oppure il rendimento η_{id})
- Ad **analoghe conclusioni** si pervenirebbe se, considerando ancora il fluido incompressibile, si considerasse una **turbina**
- Anche per i fluidi incompressibili, dalla formulazione del primo principio **non emerge in modo evidente** un altro parametro di funzionamento essenziale per **ogni** macchina a fluido:

il **regime di rotazione n** dell'albero motore



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/

