



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**»*



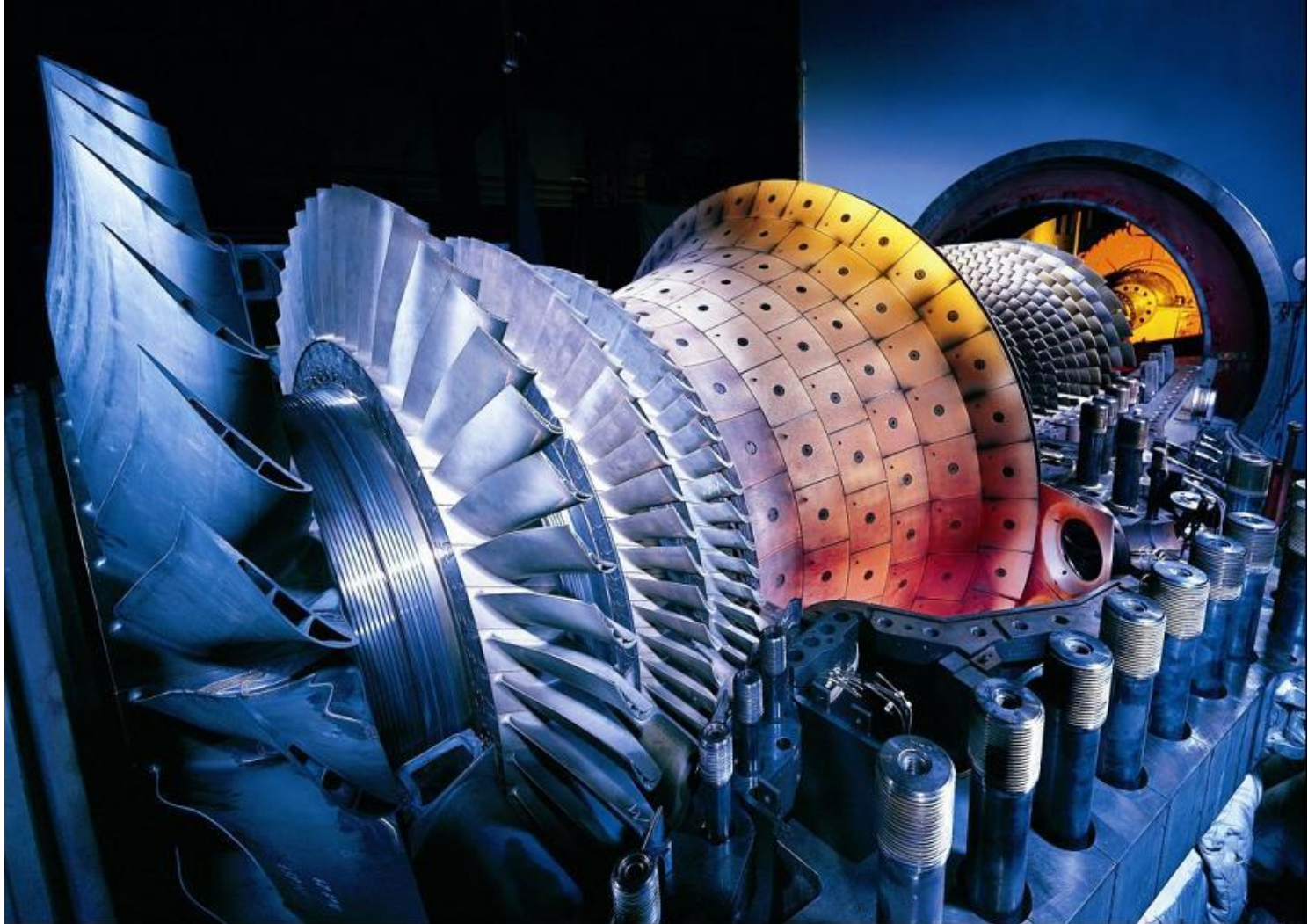
Macchine a fluido



Macchine a fluido

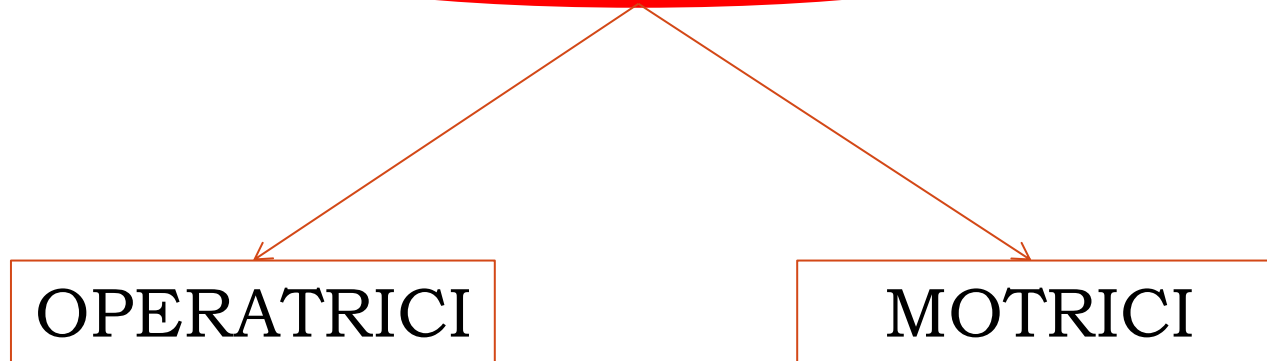


Macchine a fluido



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**»



Direzione di scambio

Energia fluida  Lavoro meccanico



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**»



IDRAULICHE

TERMICHE

Comportamento del fluido

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**»

VOLUMETRICHE

TURBOMACCHINE

Modalità di scambio

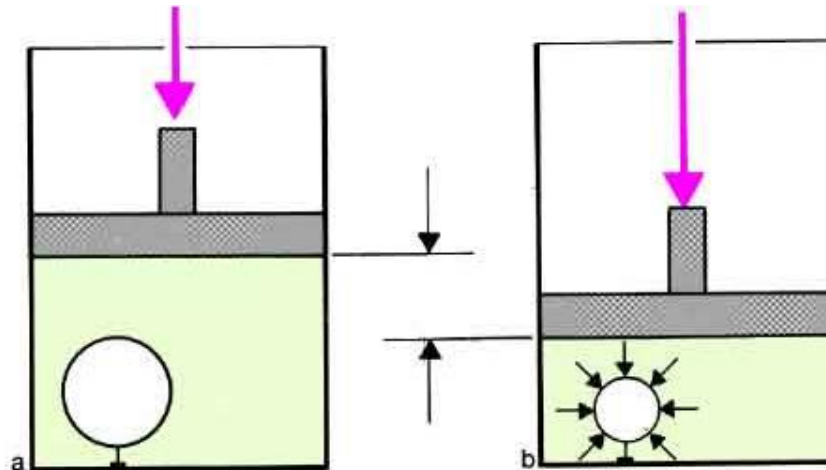
Energia fluida  Lavoro meccanico



Macchine volumetriche

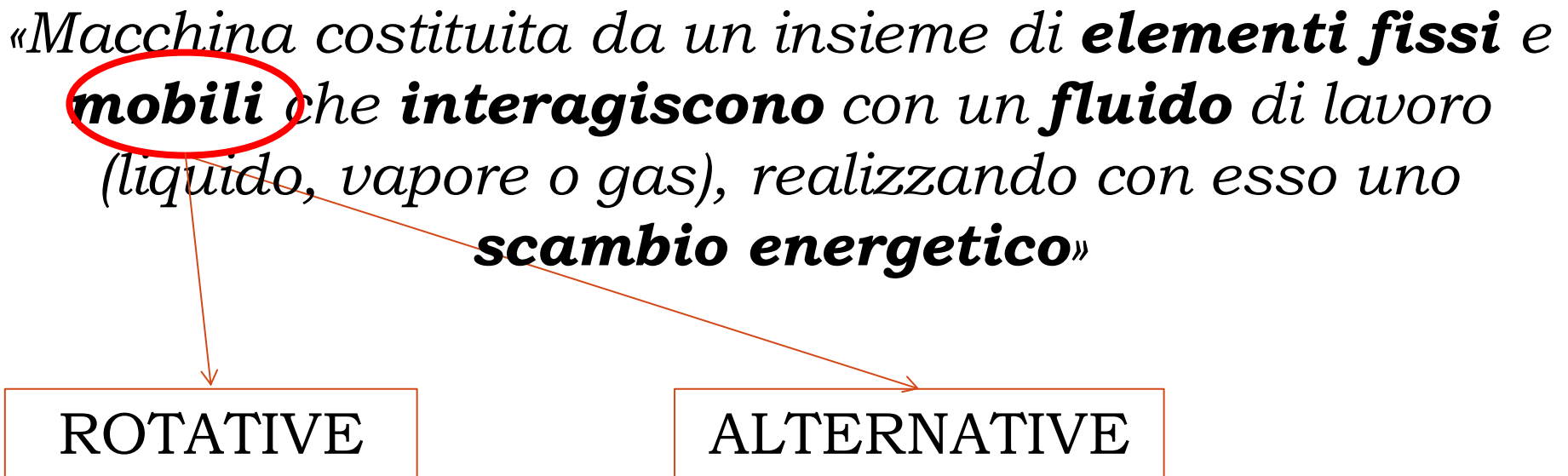
- Elaborano il fluido in «volumi di controllo» variabili nel tempo in modo periodico
- Determinano variazioni di energia specifica che **non dipendono dal moto** del fluido
- Operano in base alle leggi della statica – **Principio di Pascal**:

«Una pressione esercitata in un punto di una massa fluida si trasmette in ogni altro punto ed in tutte le direzioni con la stessa intensità»



Macchine a fluido: volumetriche

«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**»



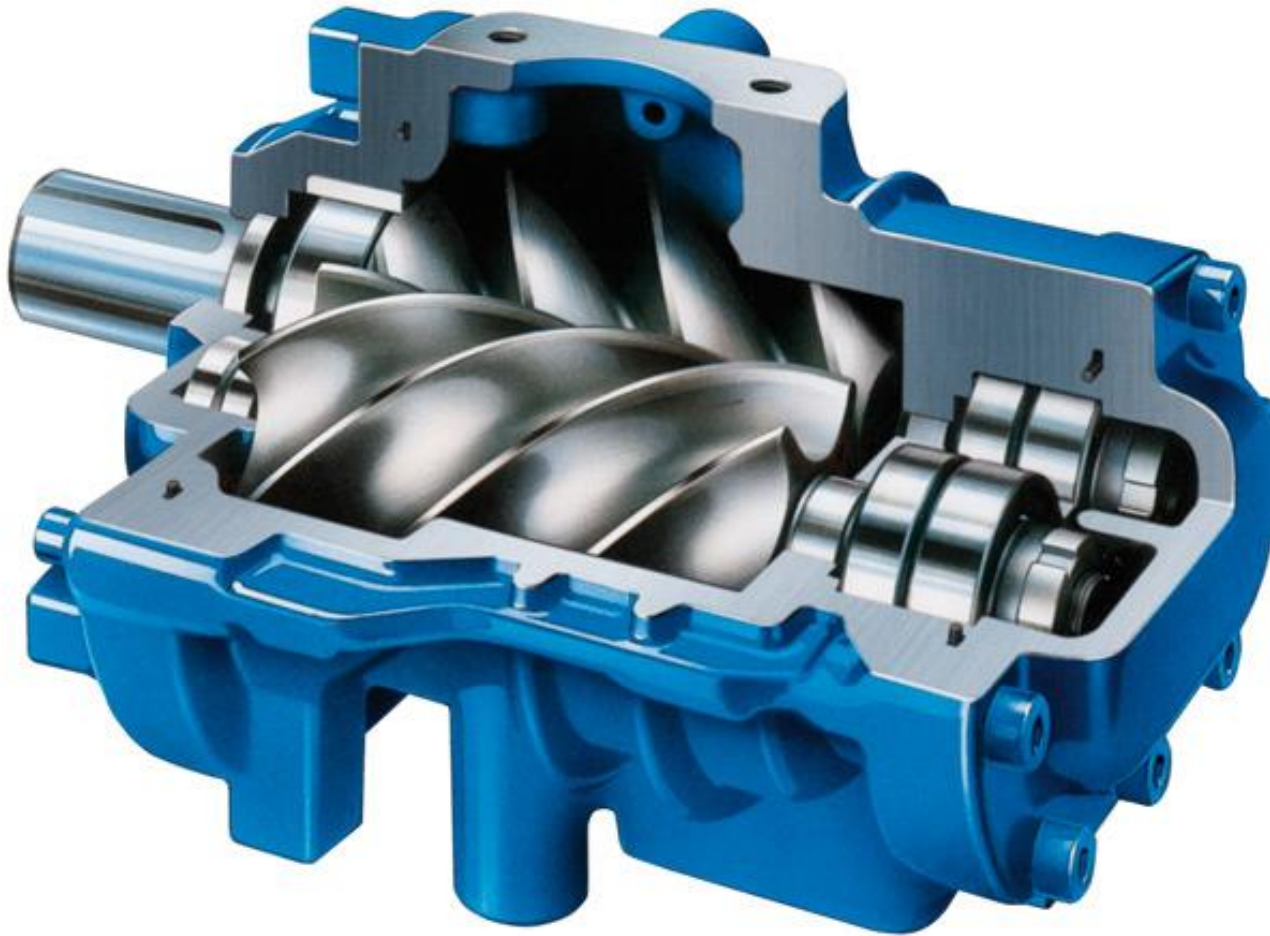
ROTATIVE

ALTERNATIVE

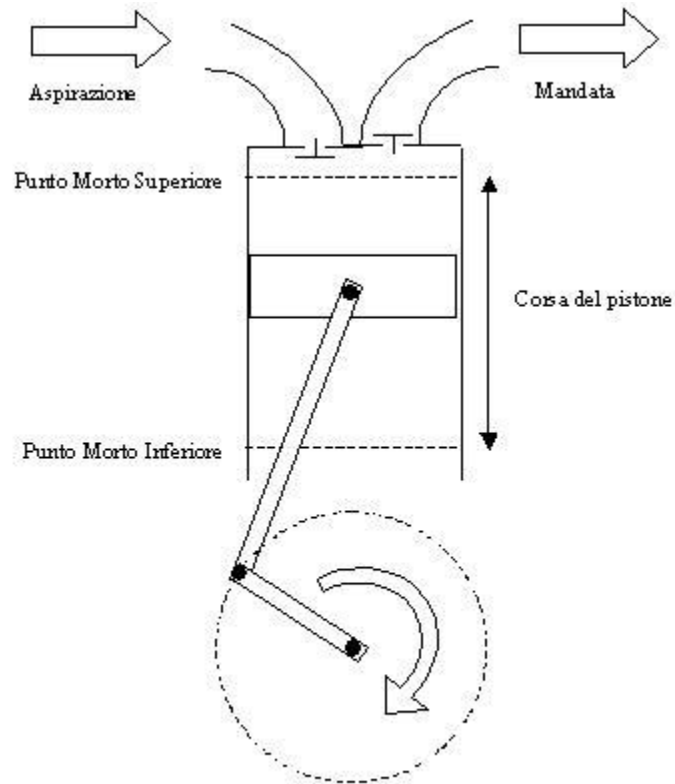
Macchine volumetriche **rotative**



Macchine volumetriche **rotative**



Macchine volumetriche **alternative**



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**»

VOLUMETRICHE

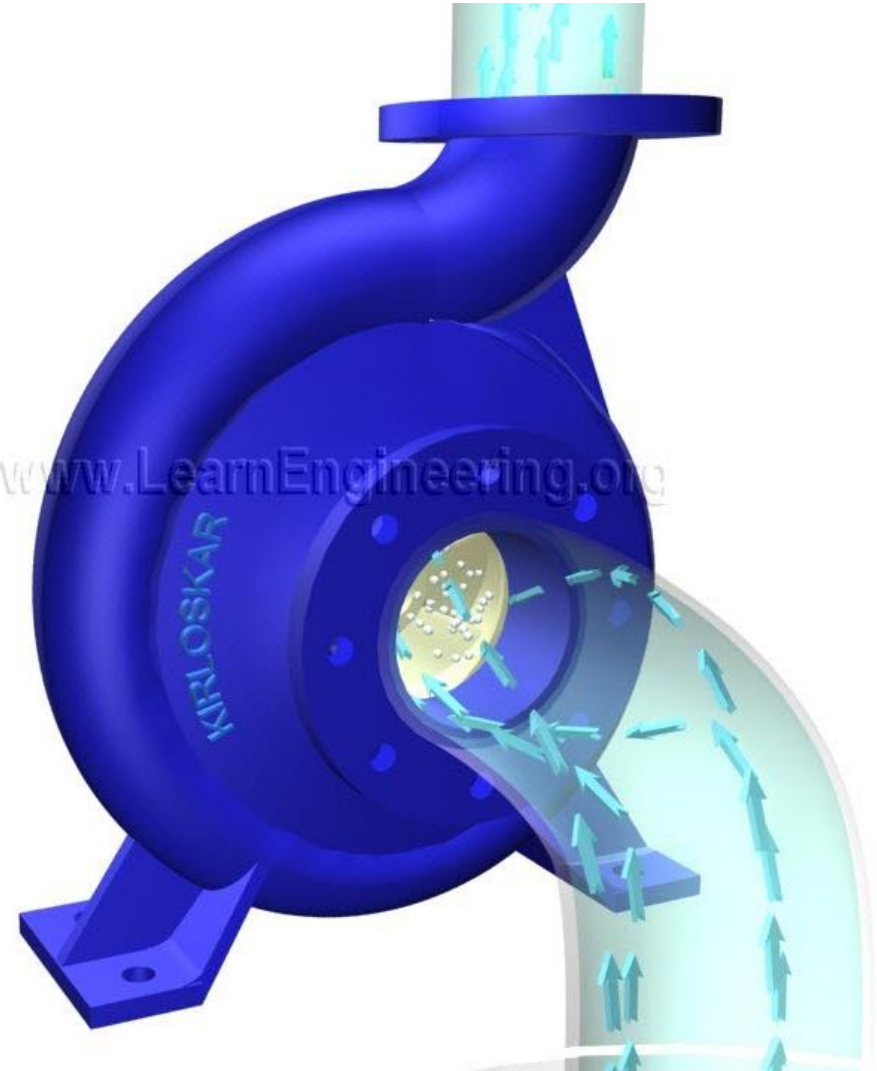
TURBOMACCHINE

Modalità di scambio

Energia fluida  Lavoro meccanico

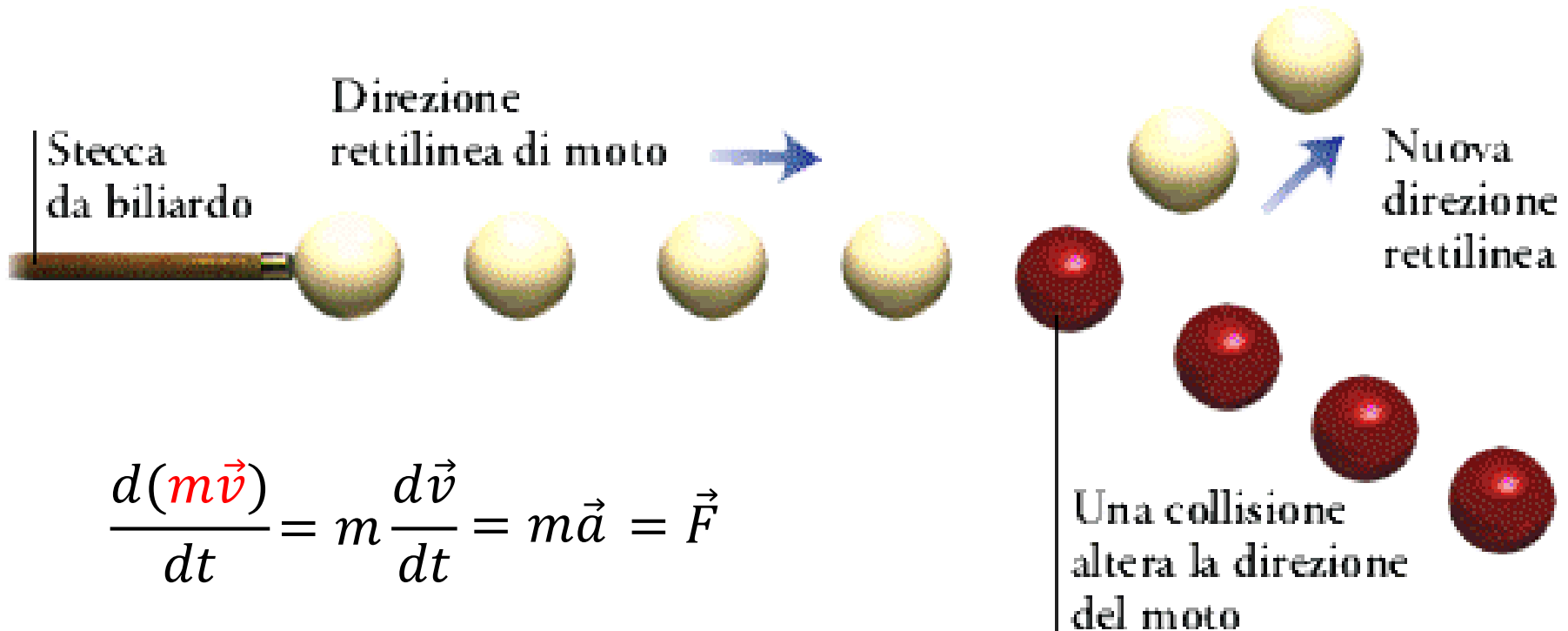
Lo scambio energetico nelle turbomacchine

- Nelle turbomacchine il sistema è rappresentato da una **massa fluente**
- Lo scambio di energia avviene con continuità attraverso un **sistema sempre aperto**
- Si valuta l'**interazione** tra la massa fluente e le pareti del condotto attraverso cui passa il fluido
- Lo scambio di energia è basato sulla **variazione del momento della quantità di moto** imposta al fluido dalla macchina



Quantità di moto

Quantità di moto $m\vec{v}$

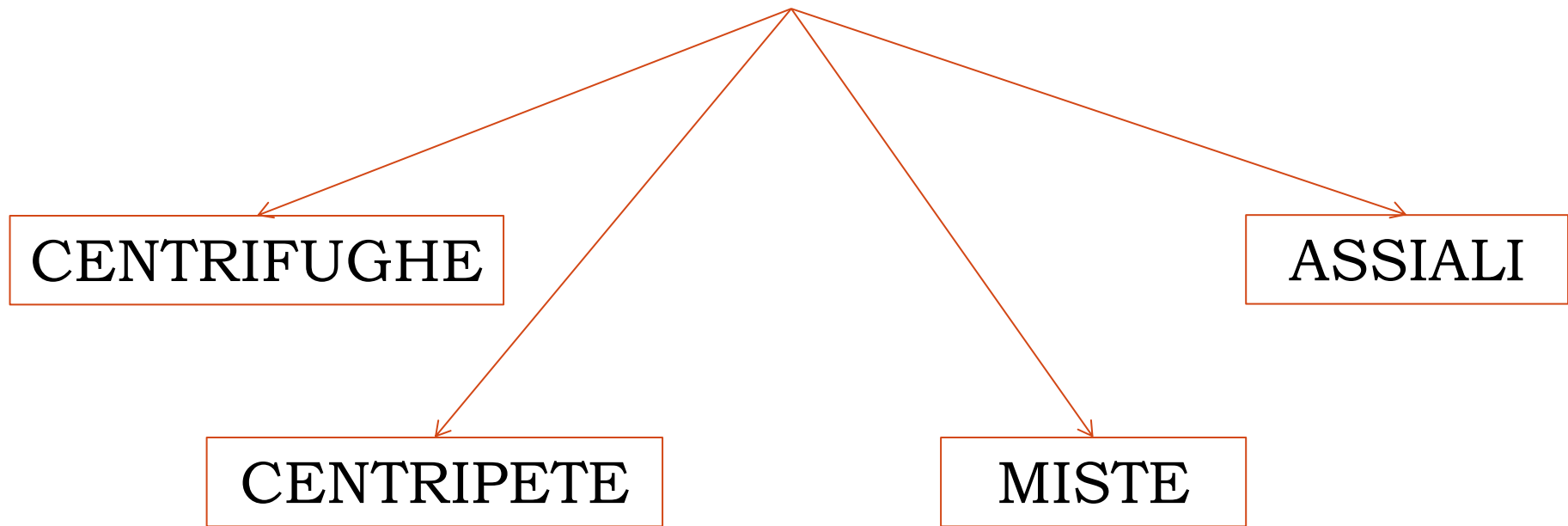


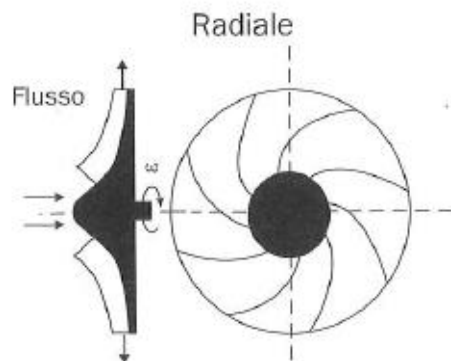
$$\frac{d(m\vec{v})}{dt} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{a} = \vec{F}$$

Quantifica la **forza necessaria** per fermare e/o interagire con un oggetto nell'unità di tempo

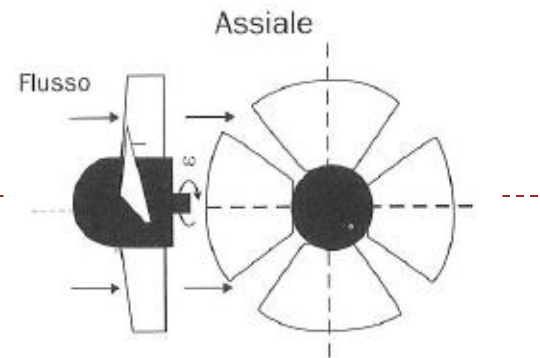
Turbomacchine

Si **distinguono** per il **senso del moto del fluido** che le attraversa





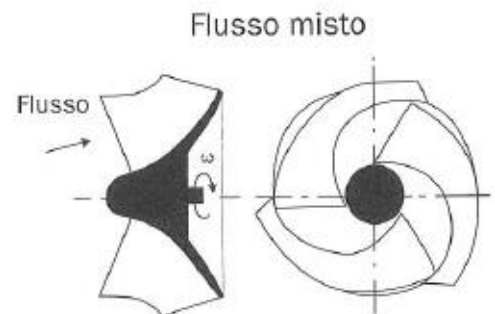
CENTRIFUGHE



ASSIALI

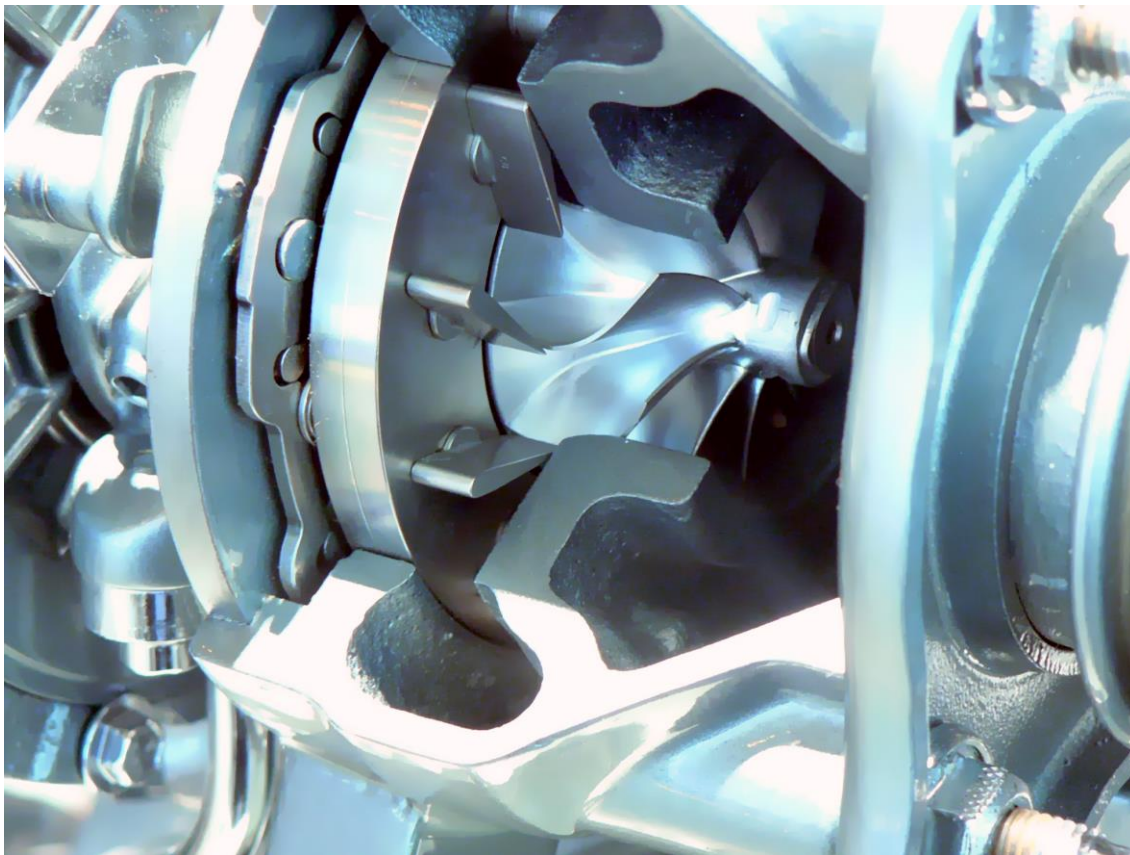


CENTRIPETE

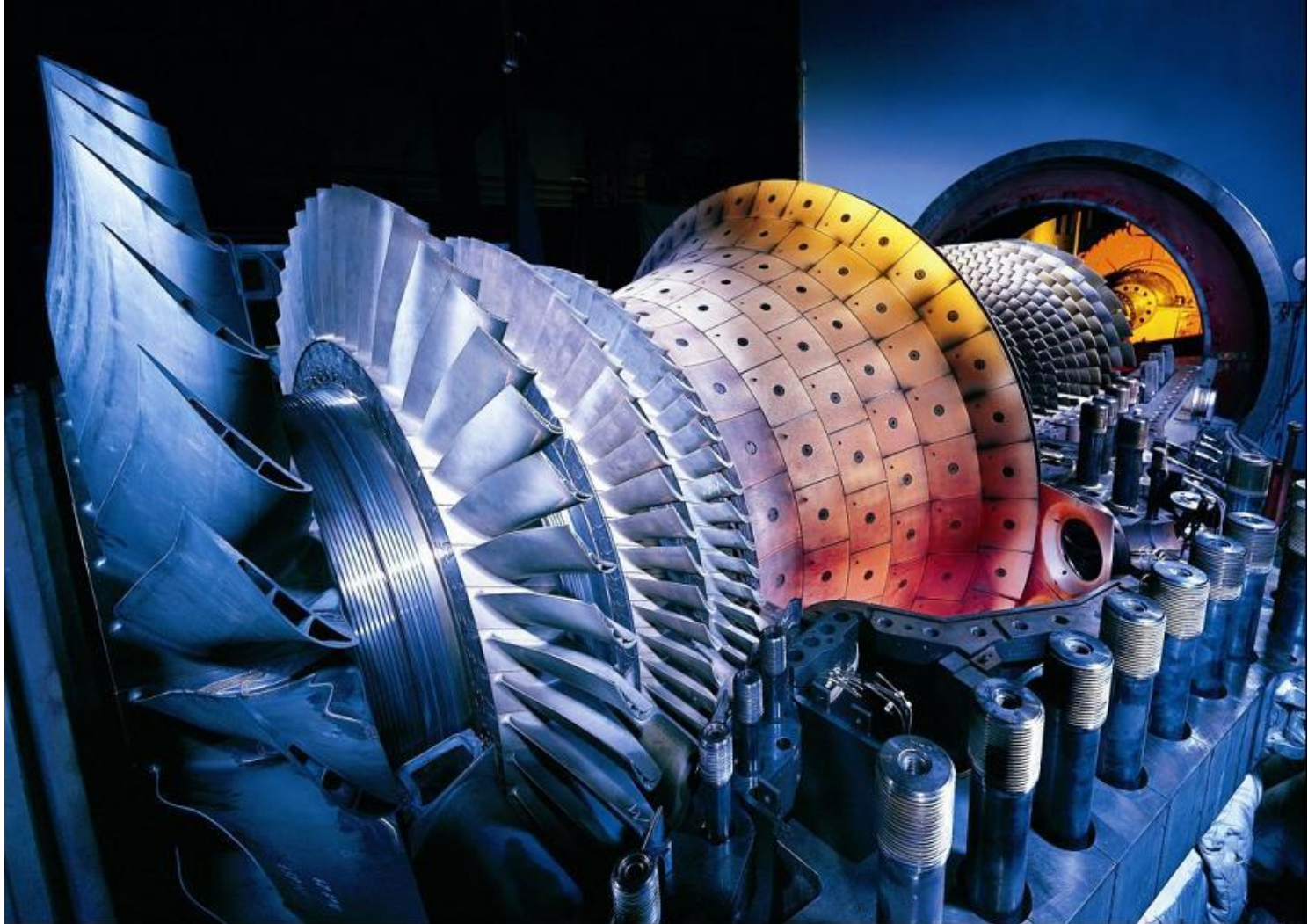


MISTE

Turbomacchine centrifughe



Turbomacchine assiali



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



EFFICIENCY



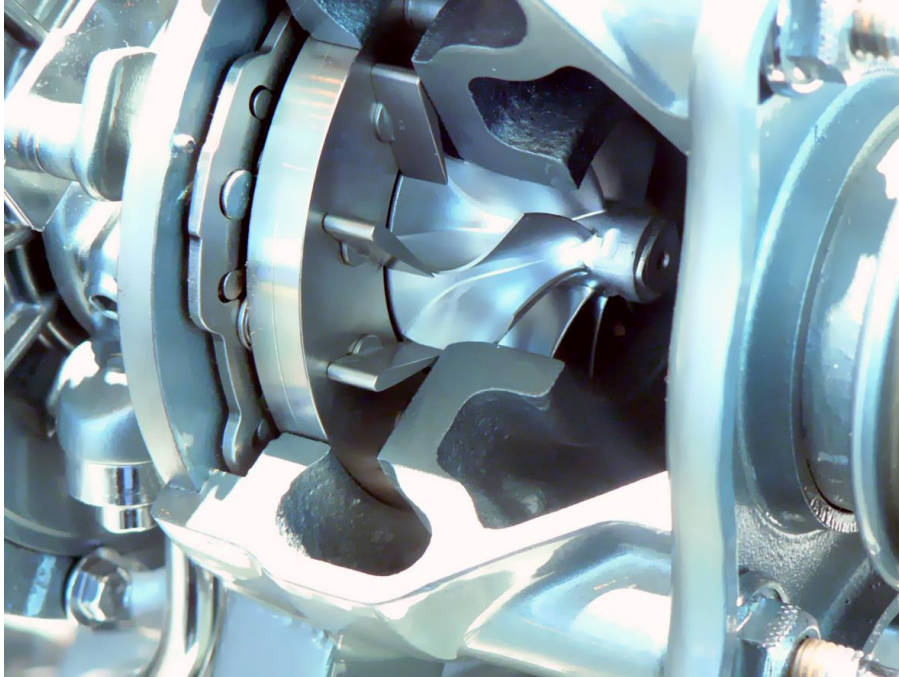
HEART RATE

STATE OF CHARGE

POWER



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:

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

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

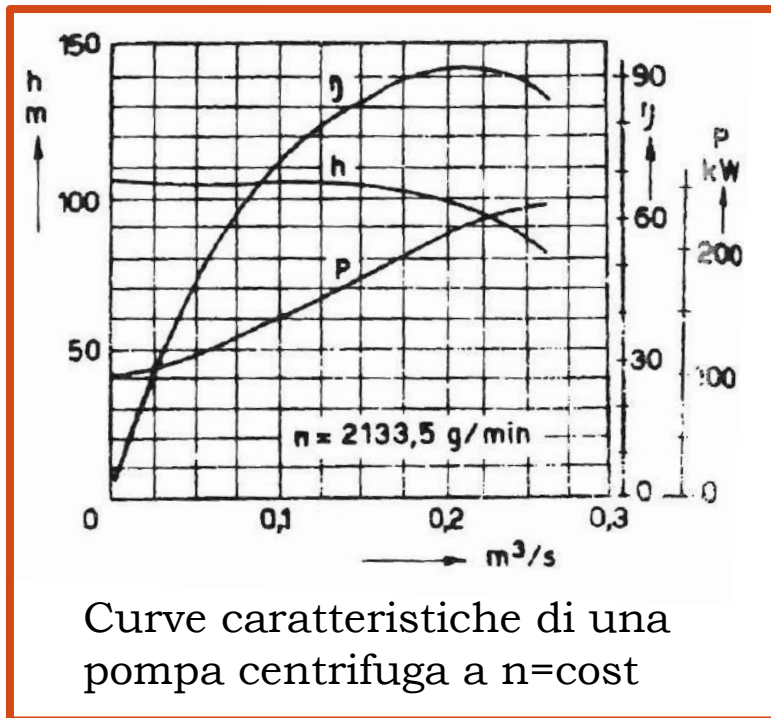
- Le misure sperimentali dei parametri **operativi di maggiore** interesse vengono riportate in diagrammi detti «**curve caratteristiche**» e sono di elevato interesse applicativo

➡ Quali sono le grandezze di maggiore interesse???

➡ Dipende dalla tipologia di macchina!!

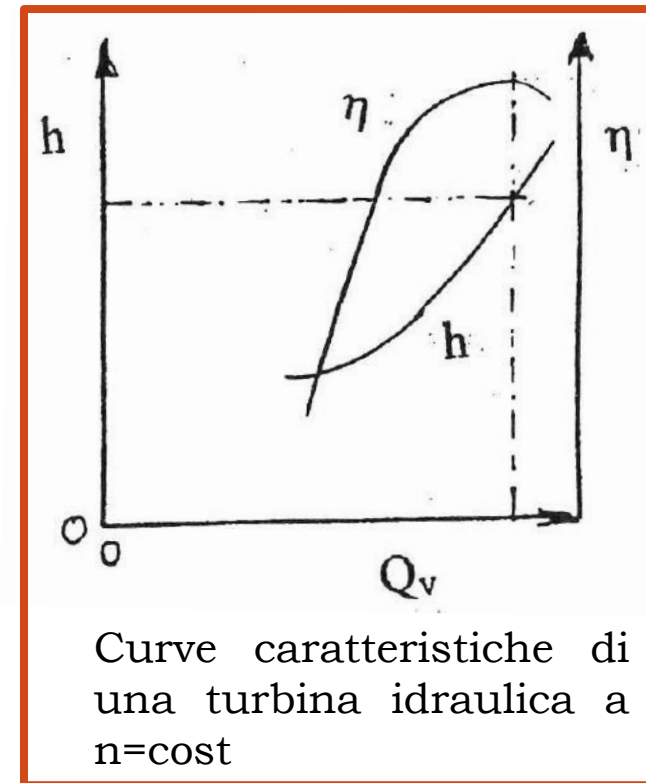
Curve caratteristiche: esempi

- 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 $[m]$

$h [m]$

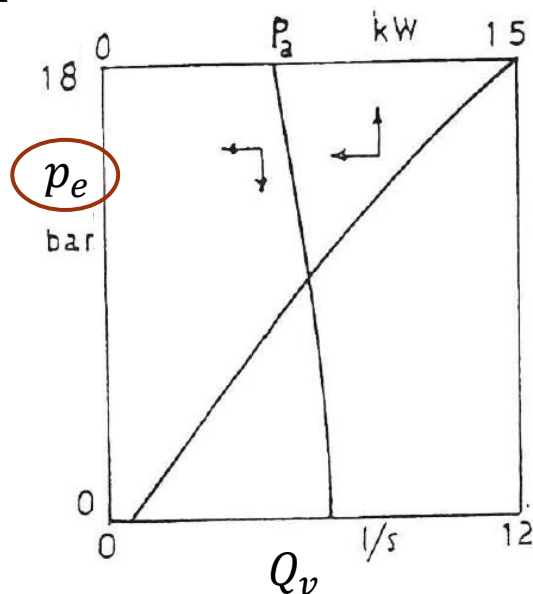


prevalenza

caduta

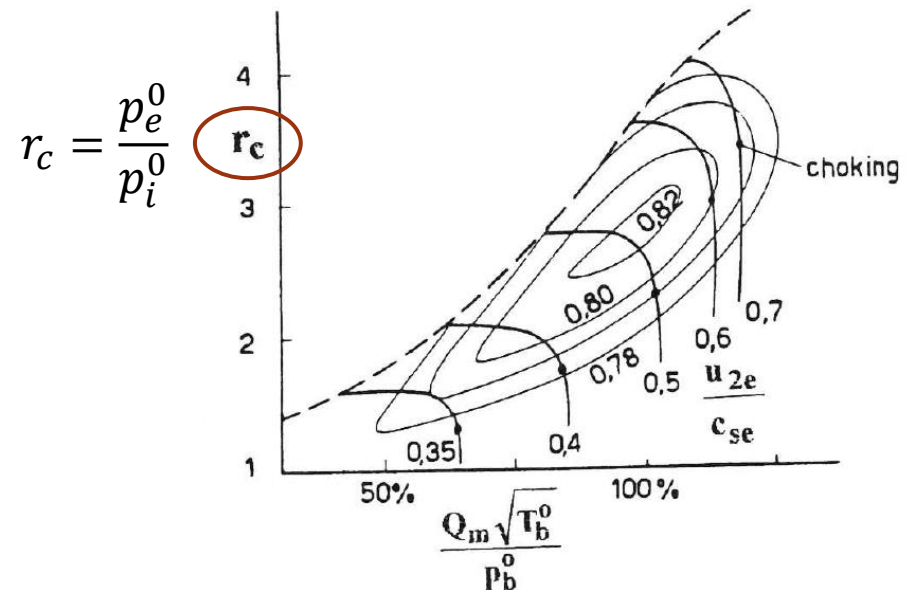
Curve caratteristiche: esempi

Nelle **pompe volumetriche** si riporta invece la pressione alla mandata $p_e \rightarrow$ il termine predomina 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)



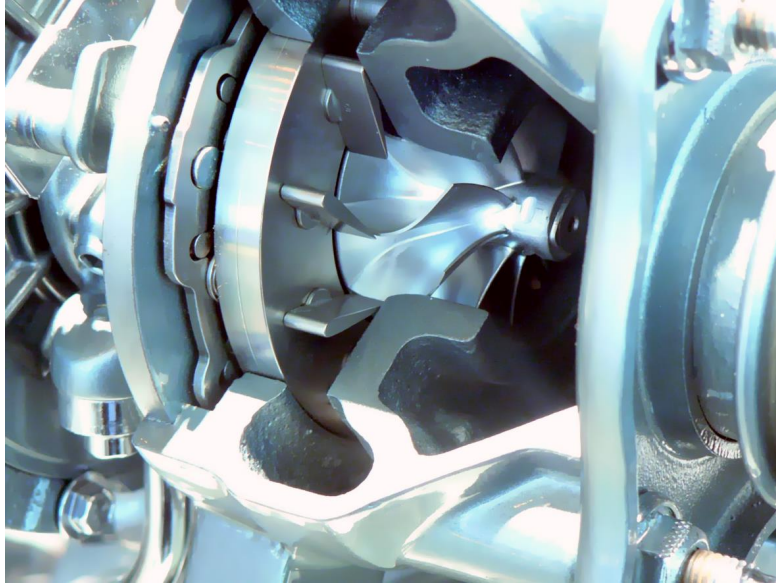
I parametri operativi nelle curve caratteristiche

Fluidi comprimibili vs Fluidi Incomprimibili

I parametri operativi nelle curve caratteristiche

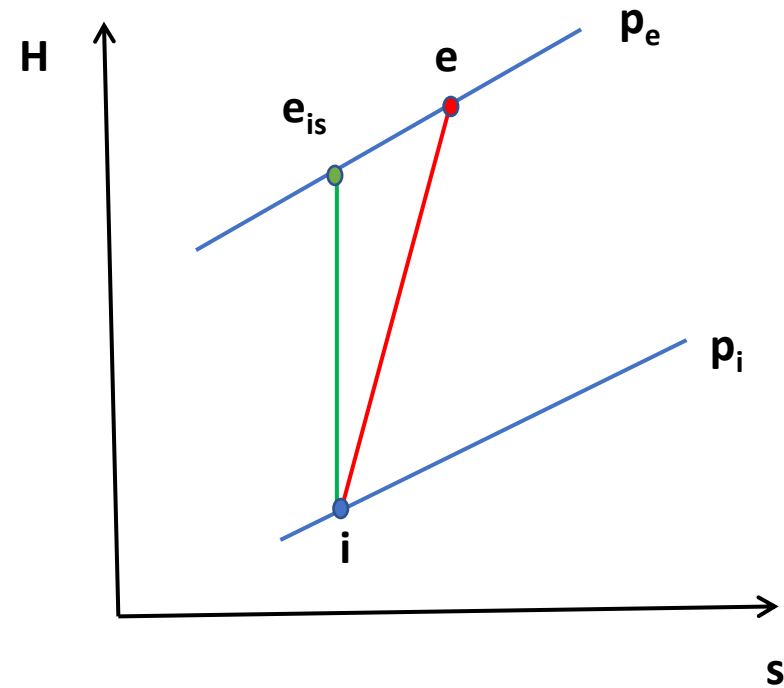
Fluidi comprimibili

Curve caratteristiche e parametri di esercizio



Fluido comprimibile: compressore

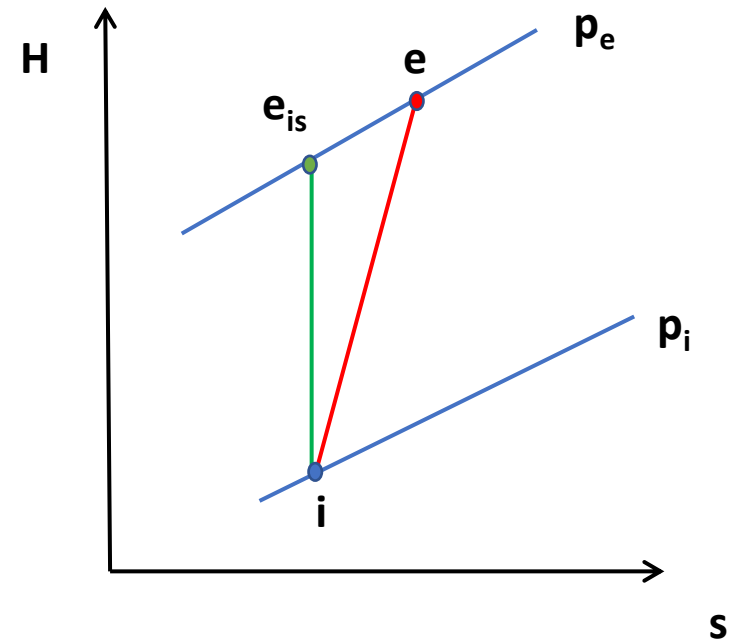
- La trasformazione di compressione viene rappresentata in un **diagramma H-s** e confrontata con la trasformazione **isoentropica** di riferimento



Curve caratteristiche e parametri di esercizio

Fluido comprimibile: compressore

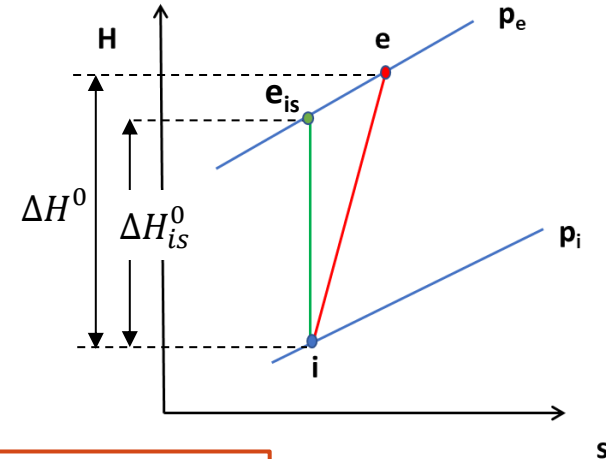
- Si ignorino per semplicità le potenze dissipate per attriti meccanici P_m e per trafileamenti di portata P_{Q_f} attraverso gli organi di tenuta $\Rightarrow$ Ipotesi di macchina perfetta ($P_{Q_f} = 0$, $P_m = 0$) e fluido reale
- La trasformazione isoentropica di riferimento sia caratterizzata da:
 - 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 $\sqrt{kRT}$

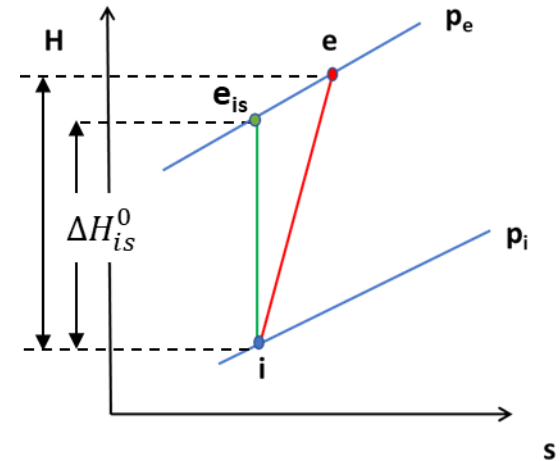
- Analogamente:

$$p_i^0 \cong p_i$$

$$p_e^0 \cong p_e$$



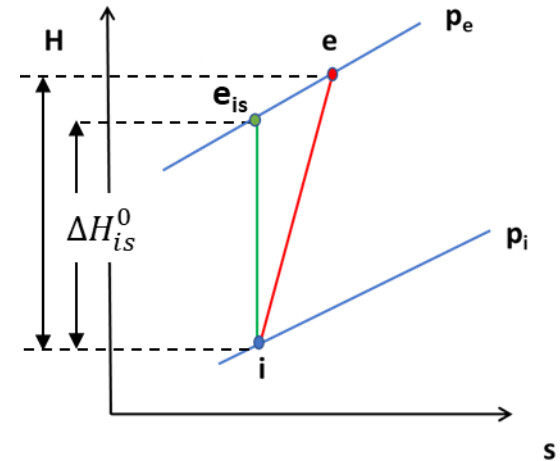
$$\Delta H_{is}^0 \cong \Delta H_{is}$$



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 incomprimibile: **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:

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

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 $p_e - p_i$
- ⇒ 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**
- ⇒ Per **fluido perfetto** sono nulle le perdite fluidodinamiche → $u_e - u_i = 0$

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 ($r_c = p_e^0/p_i^0$)

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

Curve caratteristiche e parametri di esercizio

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

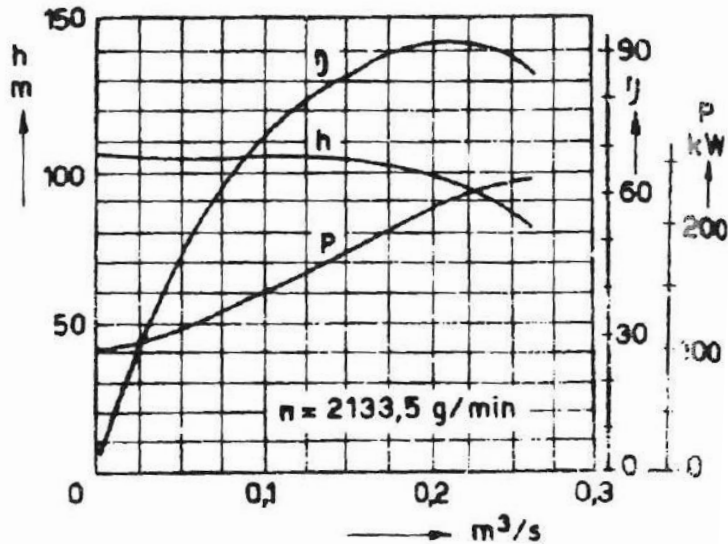
- Ne deriva che, per un fluido incompressibile, i **parametri funzionali** di una macchina a fluido sono:
 - ✓ la **portata di massa** Q_m
 - ✓ lo **scambio di energia** gh
 - ✓ la **potenza** P_{alb} (oppure il rendimento η_{id})
- Ad **analoghe conclusioni** si pervenirebbe se, considerando ancora 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

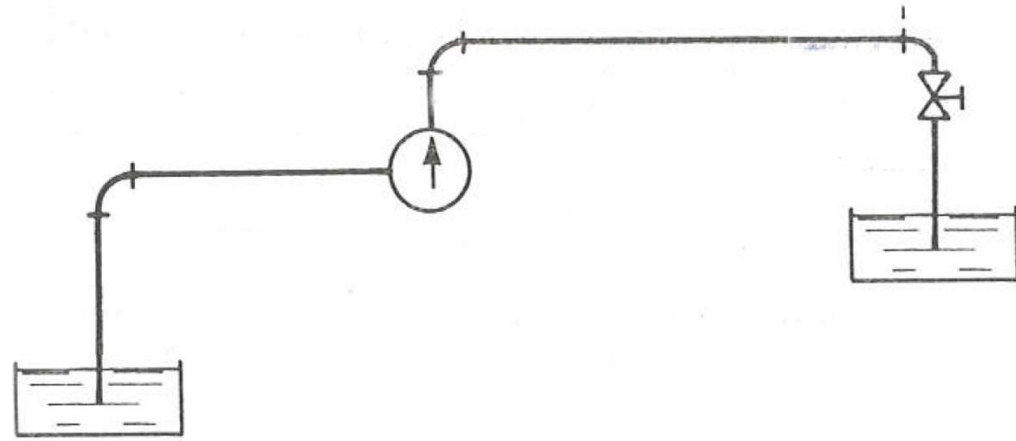


Caratteristica resistente
dell'impianto

Caratteristica resistente dell'impianto



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

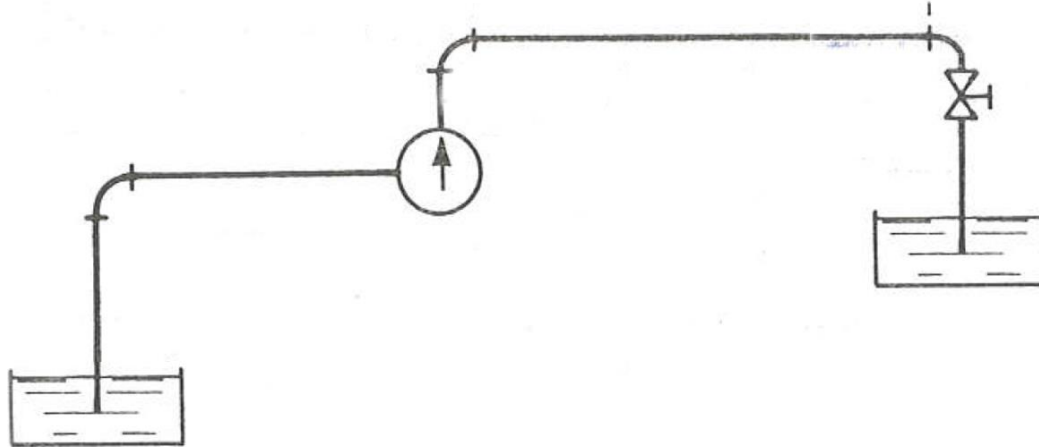


Es. impianto di pompaggio

La curva caratteristica di una macchina rappresenta la **molteplicità di punti operativi** in cui la macchina si può trovare ad operare

Quali sono le effettive condizioni di esercizio di una macchina se inserita in un impianto????

Caratteristica resistente dell'impianto

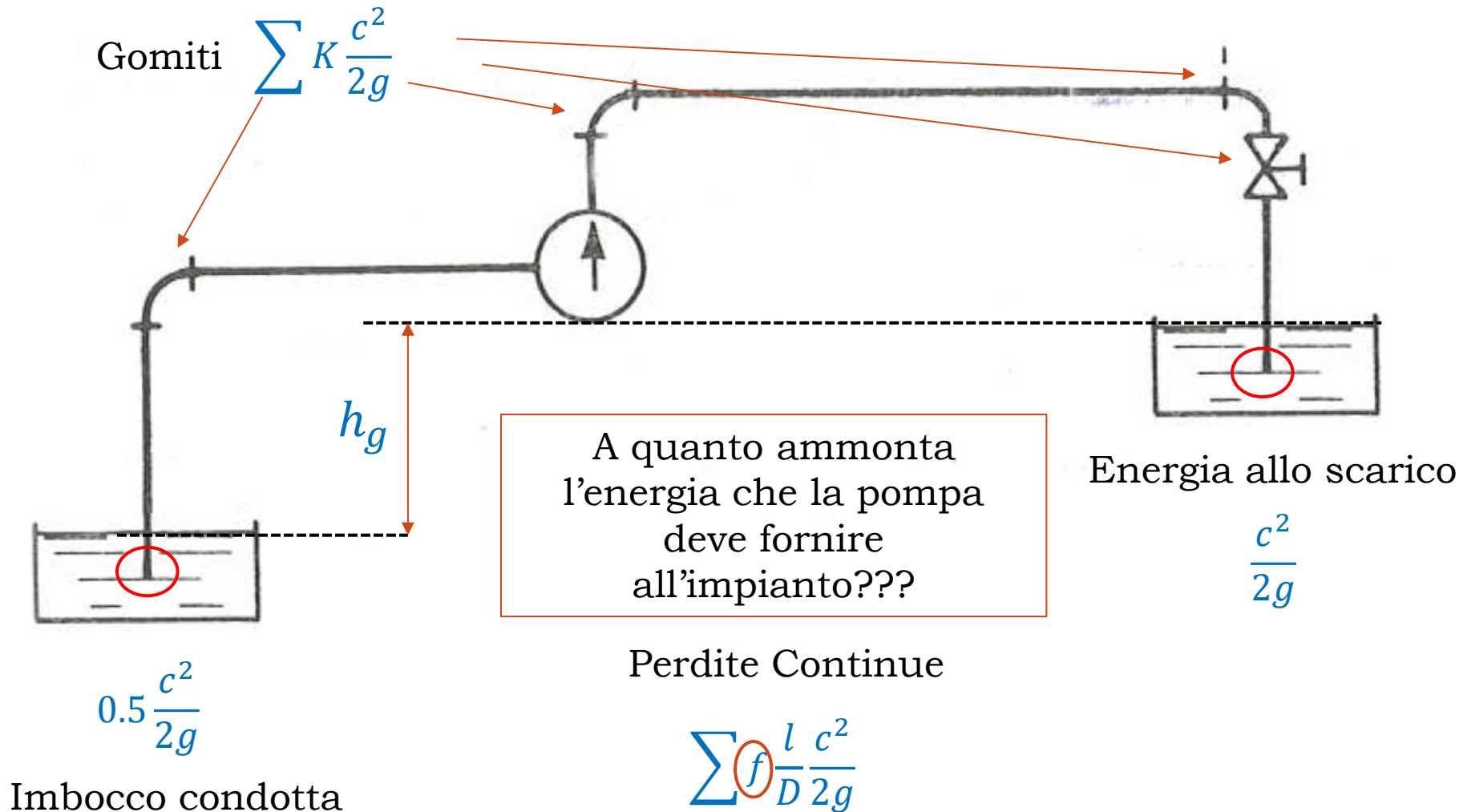


- Le **condizioni di esercizio effettive** di una macchina a fluido dipendono dalla «**caratteristica funzionale o resistente del sistema**» nel quale la macchina è installata

➡ esprime la richiesta di energia dell'impianto («resistenza»)

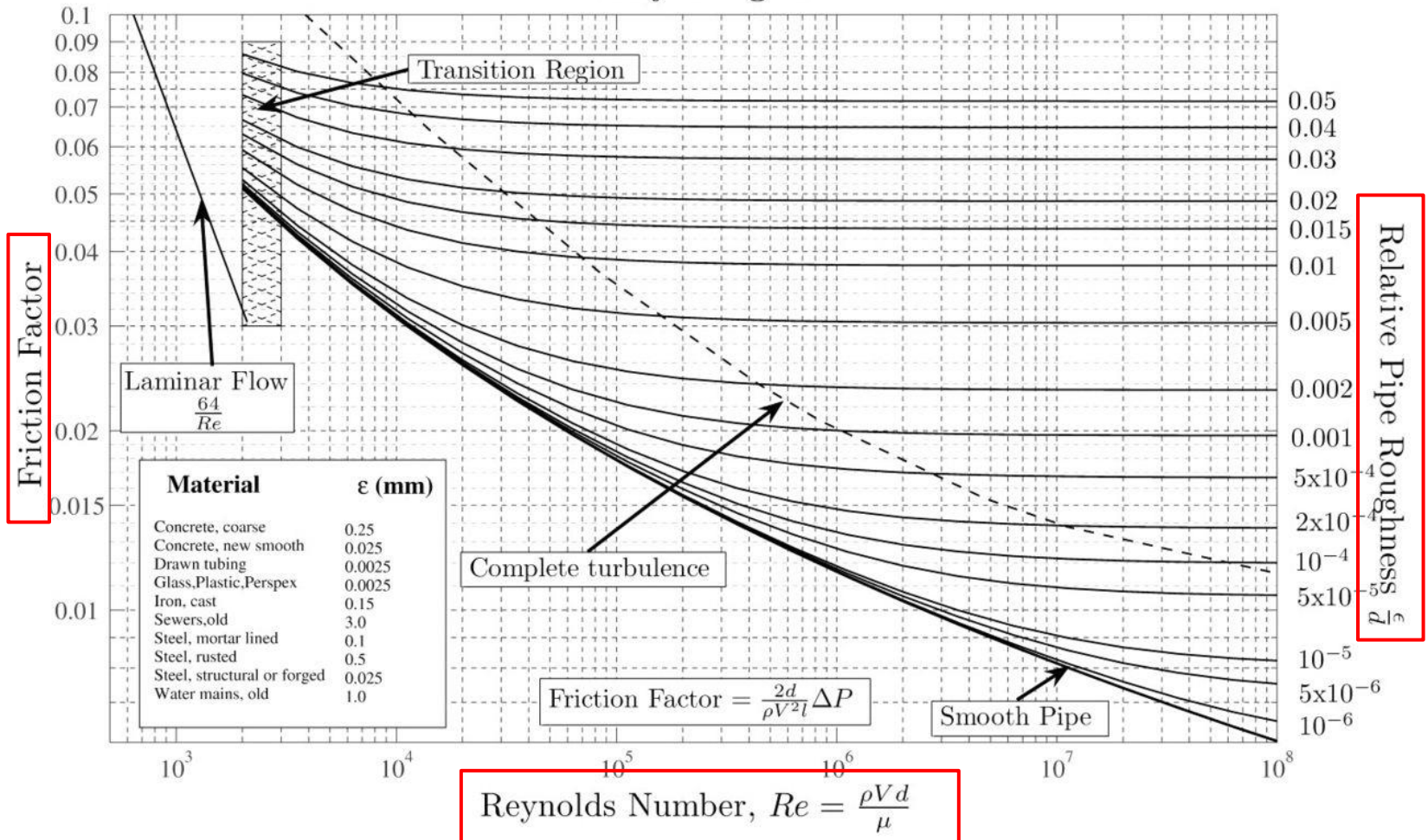
- Ad esempio, per un **impianto di pompaggio**, la caratteristica resistente dell'impianto fornisce, **al variare della portata**, l'**energia** che dovrà essere fornita dalla pompa all'unità di massa di fluido per consentirne il convogliamento da un serbatoio ad un altro ad energia più elevata

Caratteristica resistente dell'impianto

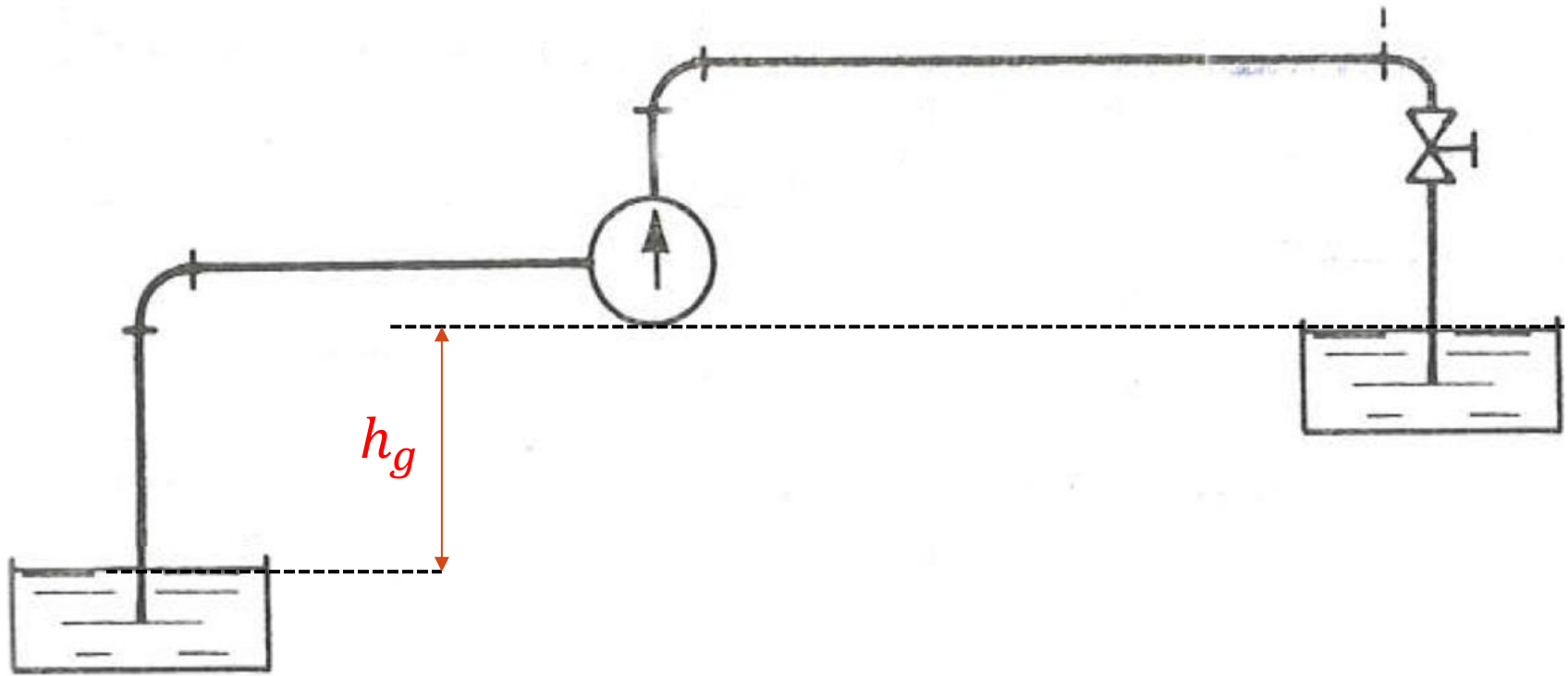


Caratteristica resistente dell'impianto

Moody Diagram



Caratteristica resistente dell'impianto

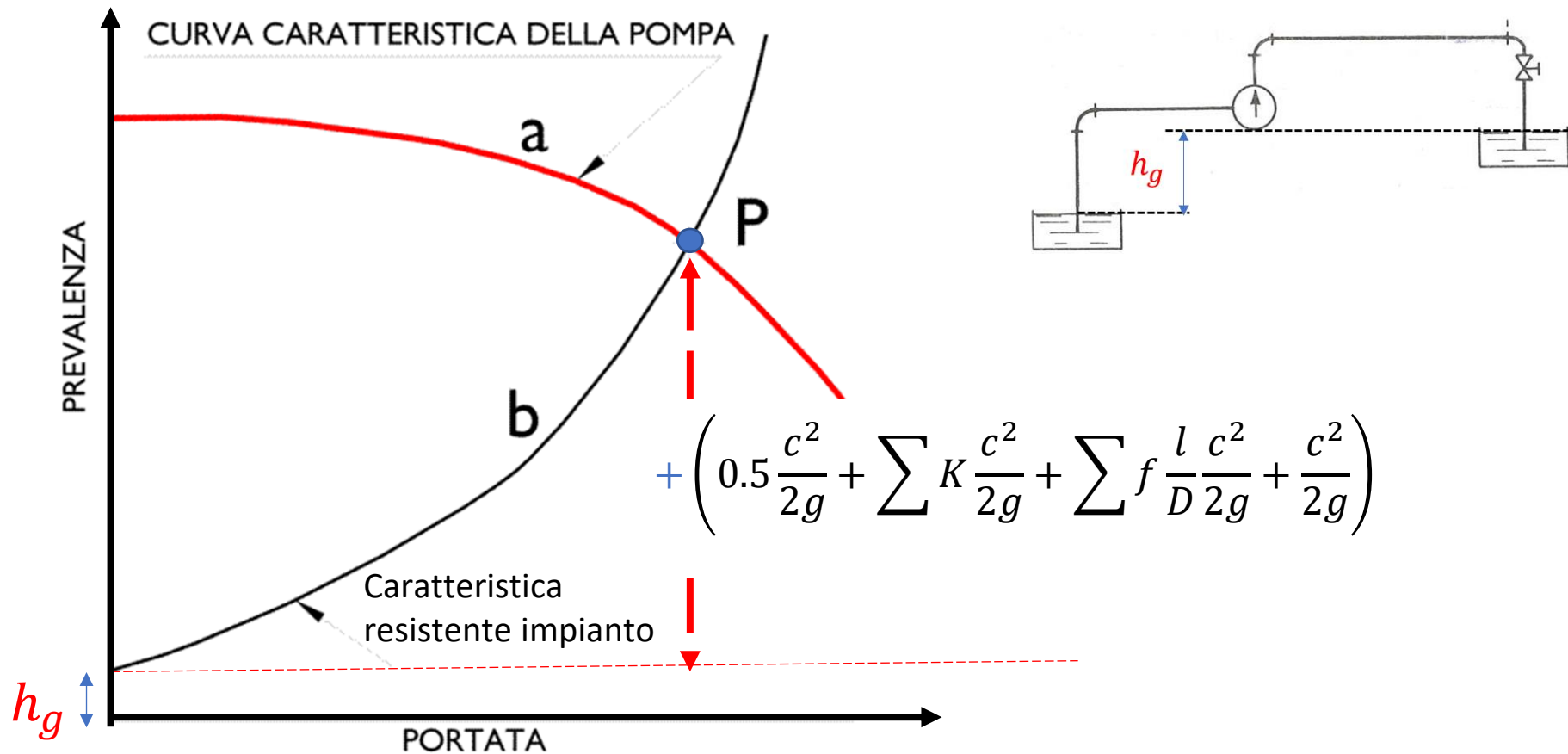


$$h_r = h_g + \left(0.5 \frac{c^2}{2g} + \sum K \frac{c^2}{2g} + \sum f \frac{l}{D} \frac{c^2}{2g} + \frac{c^2}{2g} \right)$$

Dovrà fornire all'impianto l'energia necessaria per convogliare l'acqua da un serbatoio all'altro

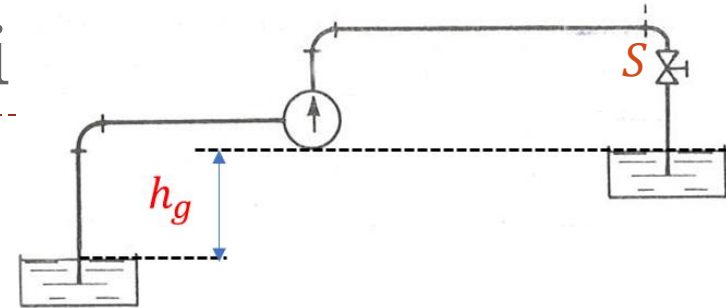
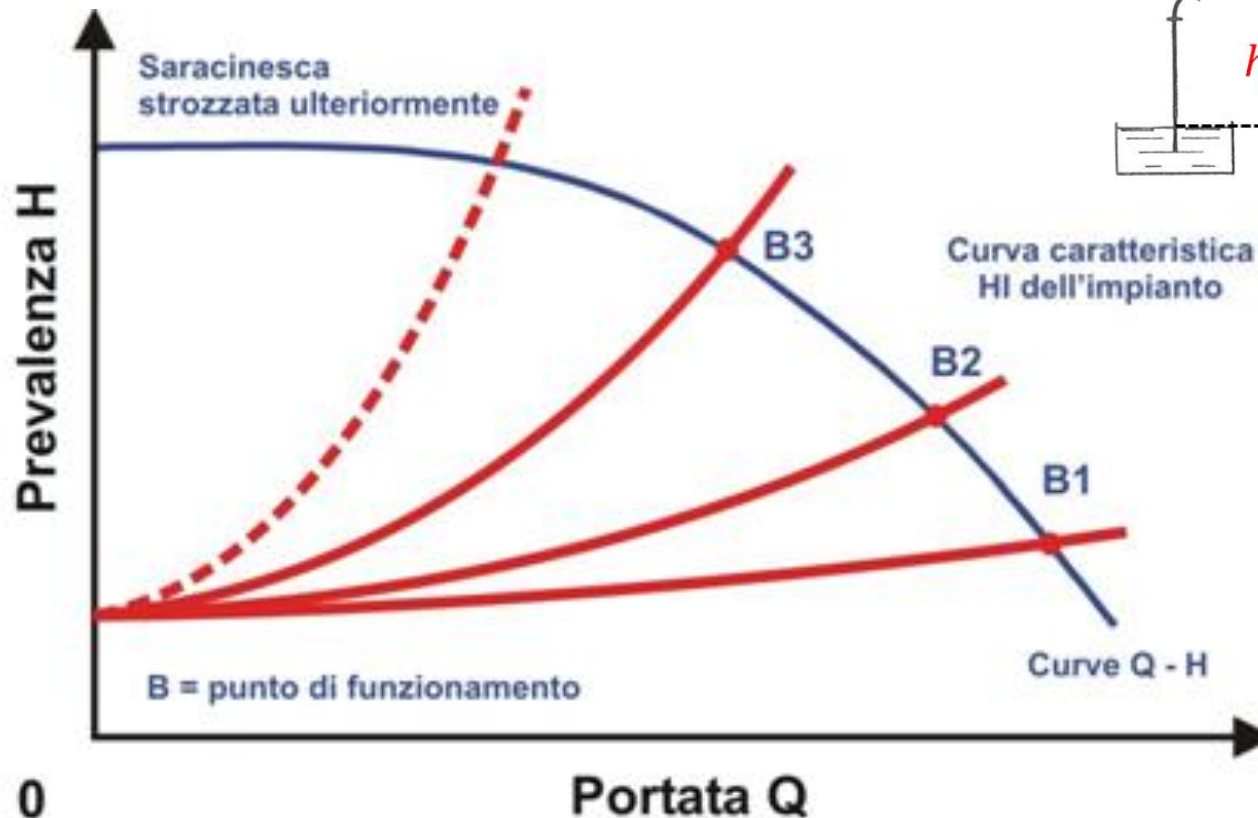
CARATTERISTICA RESISTENTE DELL'IMPIANTO

Caratteristiche funzionali



- Le **condizioni di esercizio** della pompa inserita nell'impianto sono rappresentate dal punto **P**, intersezione della **curva caratteristica** della pompa (curva **a**) con la **caratteristica resistente** dell'impianto (curva **b**)

Caratteristiche funzionali



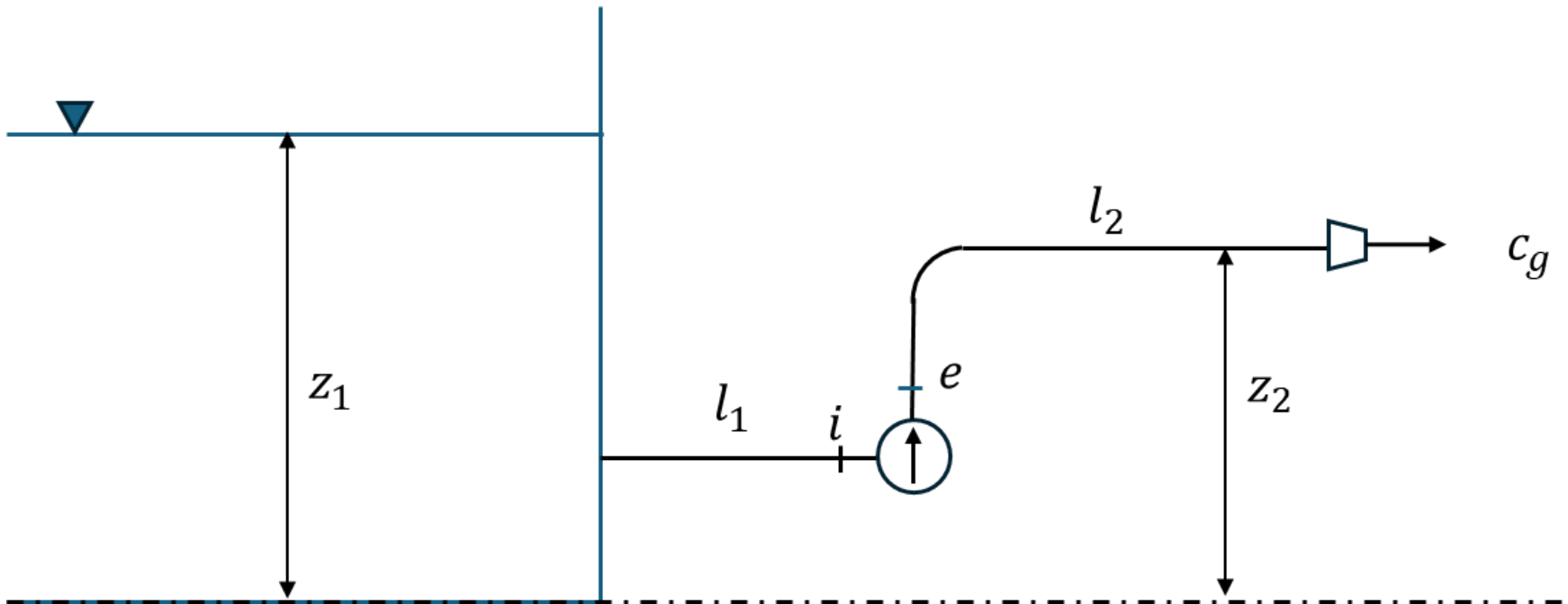
- Al variare del grado di apertura della saracinesca S cambia la caratteristica resistente dell'impianto, e con essa le condizioni di esercizio $B1$, $B2$, $B3$, ... della pompa



Esercizi

Esercizio: Curva caratteristica e caratteristica resistente

Si consideri il circuito riportato in figura in cui una pompa aspira portata da un serbatoio e la invia ad ugello



Esercizio: Curva caratteristica e caratteristica resistente

Siano:

- $z_1 = 5 \text{ m}$ la quota del pelo libero del serbatoio
- $z_2 = 2,5 \text{ m}$ la quota dell'asse dell'ugello
- $z_i = 1,5 \text{ m}$ la quota della sezione i all'aspirazione della pompa
- $z_e = 2 \text{ m}$ la quota della sezione e alla mandata della pompa
- $l_1 = 10 \text{ m}$ e $l_2 = 15 \text{ m}$ le lunghezze delle tubazioni all'aspirazione e alla mandata, entrambe di diametro $d_1 = d_2 = 0,12 \text{ m}$.
- $d_g = 0,05 \text{ m}$ il diametro della sezione di uscita dell'ugello

Si consideri per le perdite continue un coefficiente di perdita f pari a 0,02 e per le perdite localizzate i seguenti coefficienti di perdita:

- 0,5 (perdita di imbocco)
- 2 (perdite al gomito)
- 0.13 (perdita all'ugello)

Esercizio: Curva caratteristica e caratteristica resistente

Determinare:

- 1) la caratteristica resistente del circuito
- 2) la prevalenza della pompa (energia totale specifica espressa in metri) e la potenza richiesta per la portata $Q_v = 0,034 \text{ m}^3/\text{s}$, assunto per il rendimento $\eta_{id} = 0,76$
- 3) calcolare l'altezza statica e l'altezza totale all'aspirazione e alla mandata (sezioni i ed e)

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/

