

*Prof. Angelo Serafino Caruso, Docente di Meccanica, Macchine ed Energia
nell' Istituto Tecnico Industriale "E. Majorana" di Rossano*

*Le mie lezioni:
Le Macchine a Fluido (6/3[^])*

*Classificazione delle Macchine a Fluido
Turbine Idrauliche, Macchine Motrici
Analisi di un' applicazione pratica
Turbina Pelton, Francis e Kaplan
Le Pompe, Macchine Operatrici
Potenza e Rendimenti delle Pompe*

Classificazione delle Macchine a Fluido

La macchina è un sistema con lo scopo di eseguire operazioni specifiche compiendo al suo interno delle trasformazioni di energia.

La prima distinzione delle macchine è in motrici e operativi.

Le prime trasformano in energia meccanica utilizzabile le altre forme di energia già viste (*Energetica*).

Le seconde utilizzano l'energia meccanica, prodotte dalle motrici, per operazioni diverse, esse in tanti casi, strutturalmente, sono l'opposto delle motrici.

Altra distinzione è tra le macchine a fluido ed elettriche. Le macchine a fluido, che saranno oggetto del nostro studio,

funzionano con un fluido operativo intermedio tra l'esterno e l'interno per rilasciare lavoro all'esterno, esse sono catalogate in idrauliche e termiche.

Le macchine idrauliche (alternative o a stantuffo e rotative o turbine) usano come fluido interno l'acqua ma anche l'olio.

Le macchine termiche sono esotermiche o a combustione esterna che lavorano con due fluidi il primo, svolge la combustione, e trasferisce la propria energia al secondo fluido che, a sua volta, la trasmette agli organi mobili, le endotermiche sono a combustione interna con un fluido che aziona gli organi motrici.

Le macchine esotermiche sono a vapore, ormai in disuso, hanno ceduto il posto alle turbine che dominano il campo delle grandi potenze. Le macchine endotermiche sono i motori alternativi (a scintilla e per compressione), rotativi (turbine a gas e motori Wankel) e a reazione (aeroreattori e endoreattori o razzi spaziali).

Le macchine, o meglio, i motori costituiscono degli impianti di dimensioni molto contenute detti "motori primi" che si distinguono dagli impianti veri e propri formati da apparecchiature e macchine motrici e operatrici funzionanti, a fluido o a elettricità, in un tutt'uno.

Turbine Idrauliche, Macchine Motrici

Le macchine che trasformano l'energia idraulica del trinomio di Bernoulli in lavoro meccanico sono i motori idraulici.

Considerato che le ruote idrauliche e i motori a stantuffo sono, ormai, poco usati si riducono alle turbine idrauliche.

Esse funzionano sotto un salto geodetico di portata costante ottenuta sbarrando un corso d'acqua con una dighe e formando condotte

Forzate molto ripide in modo che l'acqua acquisti velocità da trasformare in energia cinetica.

Per piccole potenze si ricorre ad acque affluenti con stramazzo.

Le turbine idrauliche sono macchine motrici e, a secondo come trasformano l'energia potenziale in cinetica su un organo palettato rotante detto "rotore" che trasmette il moto all'alternatore.

Il tutto è avvolto nello "statore" che comprende le condutture al rotore, i supporti e quant'altro, esso è fisso e solidale con la struttura.

Il funzionamento comprende la fuoriuscita della portata dell'acqua dal distributore che si infrange sulle pale, fissate a raggiera su una corona circolare calettata all'albero motore e collegato al generatore di corrente elettrica.

Le pale a forma di "cucchiaio" intercettano il getto d'acqua assumendone tutta l'energia possibile e lo raddrizzano.

La forza motrice del getto è procurata dal teorema della variazione della quantità di moto (Dinamica, n. 6).

In base a come si converte l'energia idraulica in meccanica, la turbina è "ad azione" se l'energia potenziale si trasforma integralmente in cinetica all'interno del distributore che invia l'acqua alle pale, sarà, invece, a reazione quando la trasformazione dell'energia potenziale nel distributore è solo parziale e si completa lungo le pale.

Nel primo caso la pressione all'ingresso e all'uscita della pala rimane costante e uguale a quella atmosferica, nel secondo caso la pressione è maggiore all'imbocco che allo sbocco.

Nell'effetto azione il lavoro svolto riduce l'energia cinetica dell'acqua, in quello a reazione si ha una riduzione di pressione tra le pale, a cui segue un aumento di velocità relativa fra acqua e profilo delle stesse.

Analisi di un'applicazione pratica

Una diga, sorregge un bacino di alimentazione ad un'altezza H_A mentre la condotta di scarico della turbomacchina è ad altezza H_B , per cui la caduta disponibile, differenza tra i due carichi, è data da, $H_D = H_A - H_B$ che per Bernoulli (Idraulica, n. 14/15) applicato nei livelli A e B

$$\text{diventa } (h_A - h_B) + (p_A - p_B) / \rho + (V_A^2 - V_B^2) / 2g$$

Siccome i due bacini sono a pressione atmosferica e la velocità di efflusso sulle superfici libere sono trascurabili è lecito considerare

$$p_A - p_B = 0 \quad \text{e} \quad V_A^2 - V_B^2 = 0$$

per cui la caduta disponibile si semplifica nella $H_D = (h_A - h_B)$
 che non si trasforma interamente in energia disponibile ma,
 per le perdite di carico concentrate (brusche variazioni di diametro, curve e gomiti) e distribuite (attrito del liquido e lungo le pareti) " Σ ",
 solo una parte diventa Energia Utile, $H_u = H_D - \Sigma$,
 si hanno, inoltre, perdite di carico anche all'interno della turbina " H_T ".
 Dato che c'è equivalenza tra energia e lavoro, le altezze possono essere trasformate in lavori unitari moltiplicandole per " g " forza di gravità,
 per cui si parlerà di lavoro disponibile " $L_D = gH_D$ ",
 di lavoro utile " $L_u = gH_u$ " e di lavoro perso della macchina " $L_T = gH_T$ ".
 Infine, $L_i = g(H_u - H_T)$ [j/kg]
 che è il Lavoro Idraulico o Interno
 cioè la caduta utile depurata dalle perdite all'interno della turbina.
 Essa è la quota di energia potenziale unitaria trasferita, sotto forma di energia meccanica, dall'acqua alla ruota palettata.

Per meglio capire le perdite interne è opportuno riferirsi al concetto di

$$\text{Rendimento Idraulico: } \mu_i = \frac{H_u - H_f}{H_u} = \frac{L_i}{L_i + L_f}$$

e, a causa delle fughe per "trafilamento" $= \Delta f$ [kg/sec], indicando con "Zm" la portata massica totale [kg/sec], si il

$$\text{Rendimento Volumetrico: } \mu_v = \frac{Z_u}{Z_e},$$

è il rapporto tra la portata massica entrante e quella.

Alla luce di quanto esplicitato si ricava immediatamente la

Potenza Idraulica o Interna, (Idraulica, n. 3 e 5)

$$P_i = \mu_v Z_m L_i = \mu_v \mu_i (Z_m g) H_u \text{ oppure } \mu_v \mu_i (Z_u \gamma) H_u$$

Introducendo il Rendimento Organico: μ_o ,

perdite derivanti dagli organi ausiliari collegati alla turbina

Si addiviene a: $\mu_t = \mu_i \mu_v \mu_o$ ed infine

$$P_{eff} = \mu_t \gamma Z_u H_u, \text{ Potenza Effettiva}$$

Ripetendo, il lavoro interno rappresenta la trasformazione dell'energia dall'acqua al palettaggio.

Il rendimento interno rappresenta le perdite di energia dovute agli attriti tra fluido e organo mobile che è circa del 10% e si disperde nell'ambiente come energia degradata che non possiamo più utilizzare.

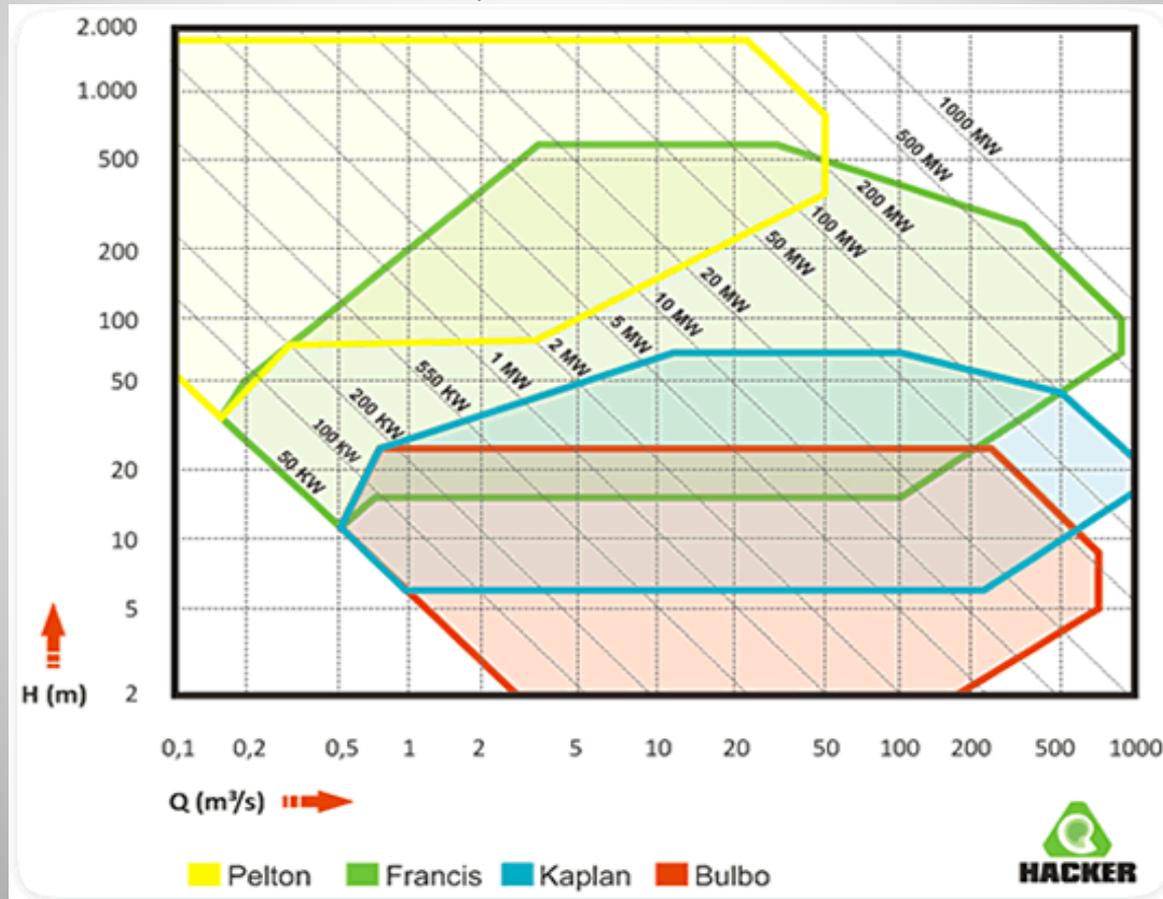
Le turbine idrauliche più utilizzate per sfruttare i salti possibili sono:

Turbina Pelton, Francis e Kaplan, dai nomi dei loro inventori.

La Pelton è adatta per grandi salti e piccole portate ed è ad azione.

La Francis funziona meglio tra salti e portate medie ed è a reazione.

La Kaplan è per bassi salti e grandi portate, anch'essa a reazione.



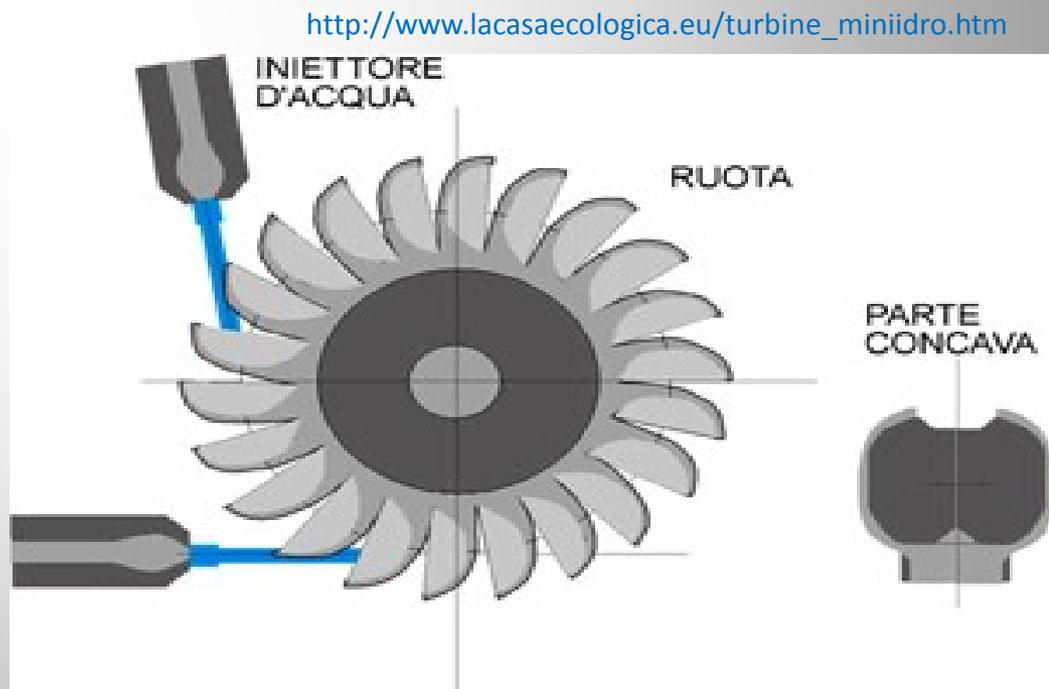
La Turbina Pelton trasforma il salto ($E. Potenziale$) d'acqua, distribuito dall'ugello tangenzialmente alle pale in Energia Cinetica.

L'ugello ha internamente un otturatore a spina retrattile che consente l'allargamento o il restringimento della luce di efflusso e, quindi, di regolare la portata sulla pala.

Essa è a forma di cucchiaino sdoppiato per separare il getto equamente e smistarlo velocemente verso l'esterno in entrambi i lati.

“I cucchiaini” hanno un taglio inferiormente alla parte concava per consentire al getto d'intercettare la pala, sempre nel centro, senza “sfilacciarsi” e di colpirla una per volta.

In figura abbiamo due getti per meglio equilibrare la turbina.



La velocità di efflusso dell'acqua dal distributore è data dalla relazione di Torricelli (Idraulica, n.17 e Cinematica, n.6) per un coefficiente "f" = 0,96 ≈ 0,98 che dipende dalle perdite per urto e attrito dell'acqua nel distributore : $V_d = f \times \sqrt{2gh}$

(è anche la velocità assoluta d'ingresso della girante)

La velocità relativa, di scorrimento dell'acqua sulle pale:

$$V_r = V_d - V_t$$

(V_t è la velocità delle pale detta di trascinamento è la periferica della girante)

Trascurando le piccole perdite per attrito sulla superficie delle pale si può calcolare la velocità assoluta " V_a " dell'acqua all'uscita della girante come $V_a = V_r + V_t = V_d - V_t + V_t = V_d$

La " V_a ", dipende anche dall'inclinazione del bordo della pala, e per avere il massimo rendimento, deve essere più piccola possibile.

Se la velocità relativa V_r (che è quella di scorrimento dell'acqua sulle pale) fosse uguale e contraria alla V_t di trascinamento (velocità delle pale), sarebbe

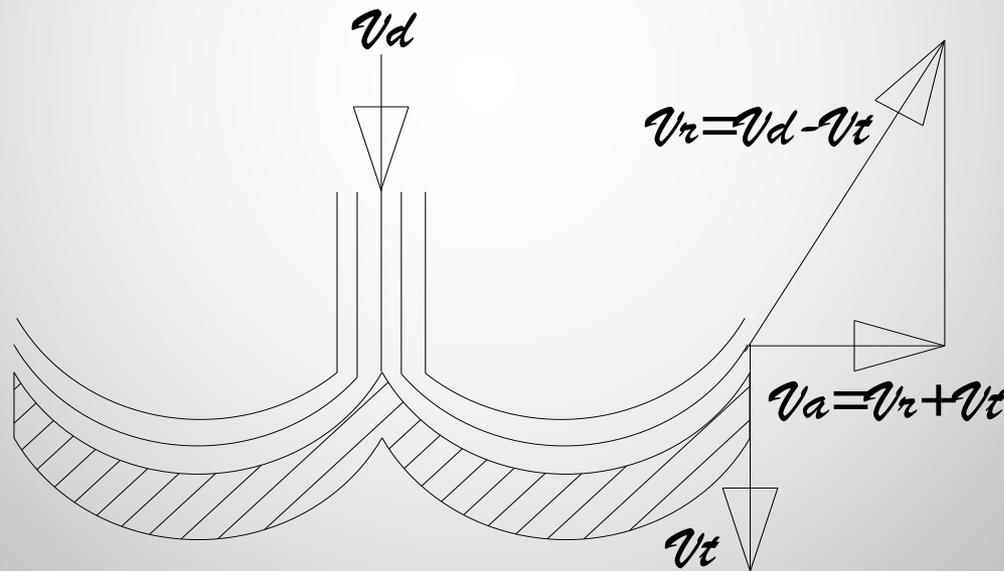
nulla la velocità di uscita V_a , allora, sostituendo V_r con V_t avremmo

$$V_t = V_d - V_t \gg V_d = V_t + V_t = 2V_t \gg V_t = V_d/2$$

Si deduce che al massimo rendimento la Velocità di trascinamento o periferica

V_t è uguale a metà della velocità di efflusso dal distributore V_d .

Ma in realtà la V_d non può essere nulla perché le perdite non possono essere nulle, dobbiamo accettare che la $V_r = 0,42 \approx 0,48 V_d$.



Regolazione di una Turbina Pelton

La velocità di fuga (velocità massima che la turbina può raggiungere a vuoto) è quasi il doppio della velocità di regime, quindi, la regolazione della turbina diventa fondamentale per il buon funzionamento e, il buon funzionamento, è quando la sua potenza effettiva è uguale alla potenza del generatore al quale è accoppiato). Non essendo possibile variare il salto si agisce, molto moderatamente, sull'otturatore, a spina assiale, del distributore.

Una improvvisa decelerazione della grande massa d'acqua a monte, per effetto della forza d'inerzia, procura un forte e rapido aumento di pressione, detto Colpo d'Ariete (si controlla con tubo piezometrico che sversa l'acqua all'esterno) pericolosissimo per la resistenza della condotta.

Si ovvia a questo inconveniente con il deviatore del getto una sorta di piastra d'acciaio (regolo deviatore) che messa davanti all'ugello riduce o interrompe l'azione della palettatura della girante senza influire sulla portata della condotta.

In alcune centrali è prevista, addirittura, la deviazione del flusso in una condotta costruita ad hoc.

Dimensionamento

Nelle Turbine Pelton conta il numero caratteristico di giri:

$$nc = n/b \times (\sqrt{1.36 Pu / a} \sqrt{b})$$

con $a=4$, h =Salto netto, Pu =Potenza richiesta

Per $nc \leq 25$ basta un solo getto

Per $25 \leq nc \leq 70$ occorrono più getti

Per $nc \geq 70$ si impiegano altri tipi di Turbine.

Diametro medio della girante, $dm = 60 Vt / \pi n$

La portata, $2u = Pu / \rho g h$ ($\rho = 1000$)

Diametro del getto $d = \sqrt{(4 \times 2u / \pi V_d)}$

Per $12 \leq dm/d \leq 18$ - Con $dm/d < 8$, le pale sono grandi rispetto al diametro della girante e bisogna suddividere la portata in più getti.

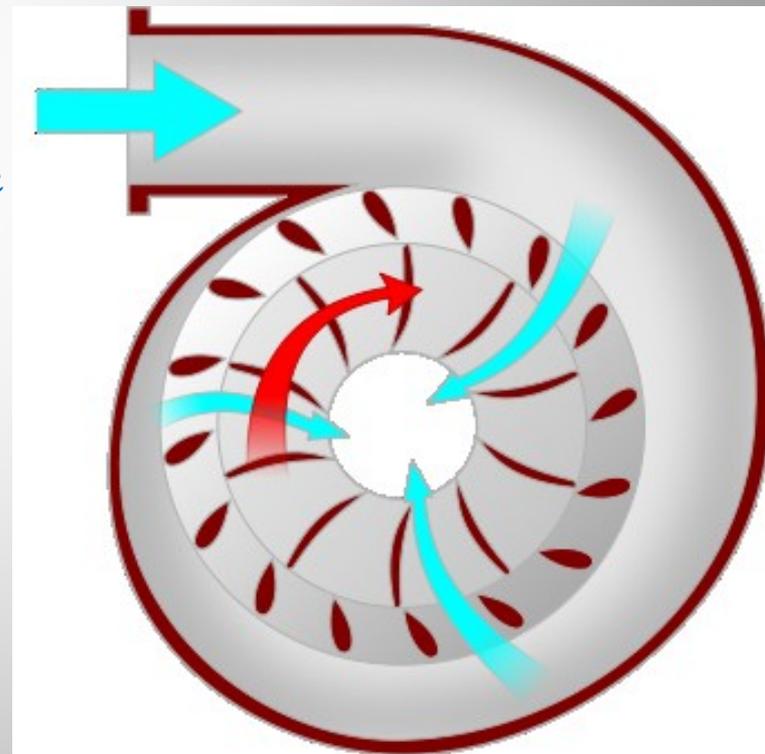
Turbina Francis

La turbina Francis è a reazione, per cui la trasformazione dell'energia potenziale del liquido in energia cinetica avviene in parte nel distributore e in parte nella girante,

Il distributore, come la girante, è costituito da una corona circolare con palette fisse o orientabili a sezione decrescente dalla periferia al centro. Nel distributore l'acqua accelera per la riduzione delle sezioni ma diminuisce proporzionalmente la pressione, una parte di "salto" si trasforma in E. Cinetica.

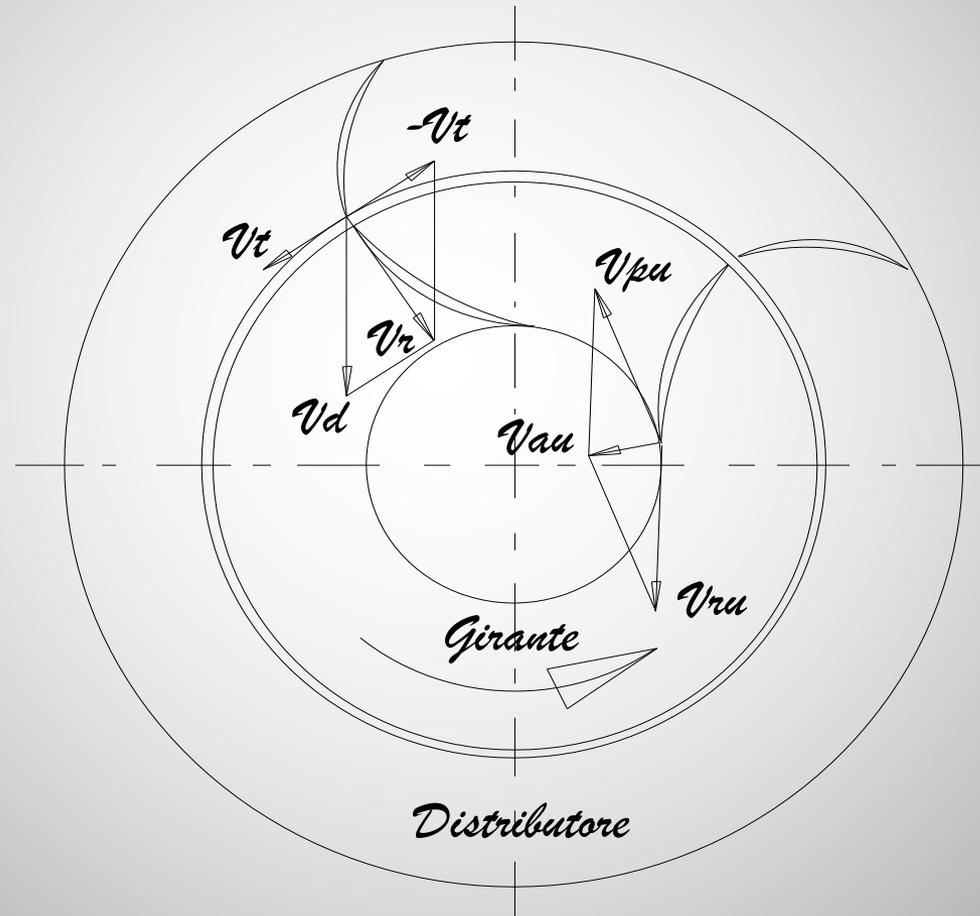
(Idraulica, n. 11-13). L'acqua reagendo contro le pareti dei condotti per effetto della forza d'inerzia determina la rotazione della girante.

https://it.wikipedia.org/wiki/Turbina_Francis



Ragionando come per la Pelton, il massimo rendimento si ha:

- a) Limitando gli urti all'ingresso;
- b) Riducendo il più possibile la velocità del liquido in uscita.



Per la a) le pale della girante devono essere tangenti a V_r (velocità relativa dell'acqua in uscita dal distributore ed in ingresso alla girante e, per la b), il numero di giri della turbina deve essere tale che il vettore della velocità assoluta V_{au} di uscita della girante deve avere direzione radiale.

Inoltre, si ha: V_t , velocità periferica della girante in equilibrio con $-V_t$:

V_d , Velocità di efflusso dal distributore:

V_{pu} , velocità delle palette nel punto di uscita dell'acqua:

V_{ru} , velocità relativa di uscita dell'acqua.

Per numero caratteristico, $60 \leq n_c < 100$, si hanno turbine lente;

per numero caratteristico, $100 \leq n_c < 150$, si hanno turbine normali;

per numero caratteristico, $150 \leq n_c < 250$, si hanno turbine veloci

e per $n_c > 250$ ultra veloci.

Se il numero caratteristico " n_c " è compreso tra 60 e 450, la massima caduta

utilizzabile è limitata all'insorgere dell'erosione superficiale delle pale e non supera i 500~700 m.

Il valore minimo di caduta non deve scendere al di sotto dei 20 m.

L'acqua, dalla condotta forzata, entra in una camera a chiocciola (anulare con forma di spirale) e si distribuisce, passando nel distributore, lungo la circonferenza del rotore con moto radiale centripeto.

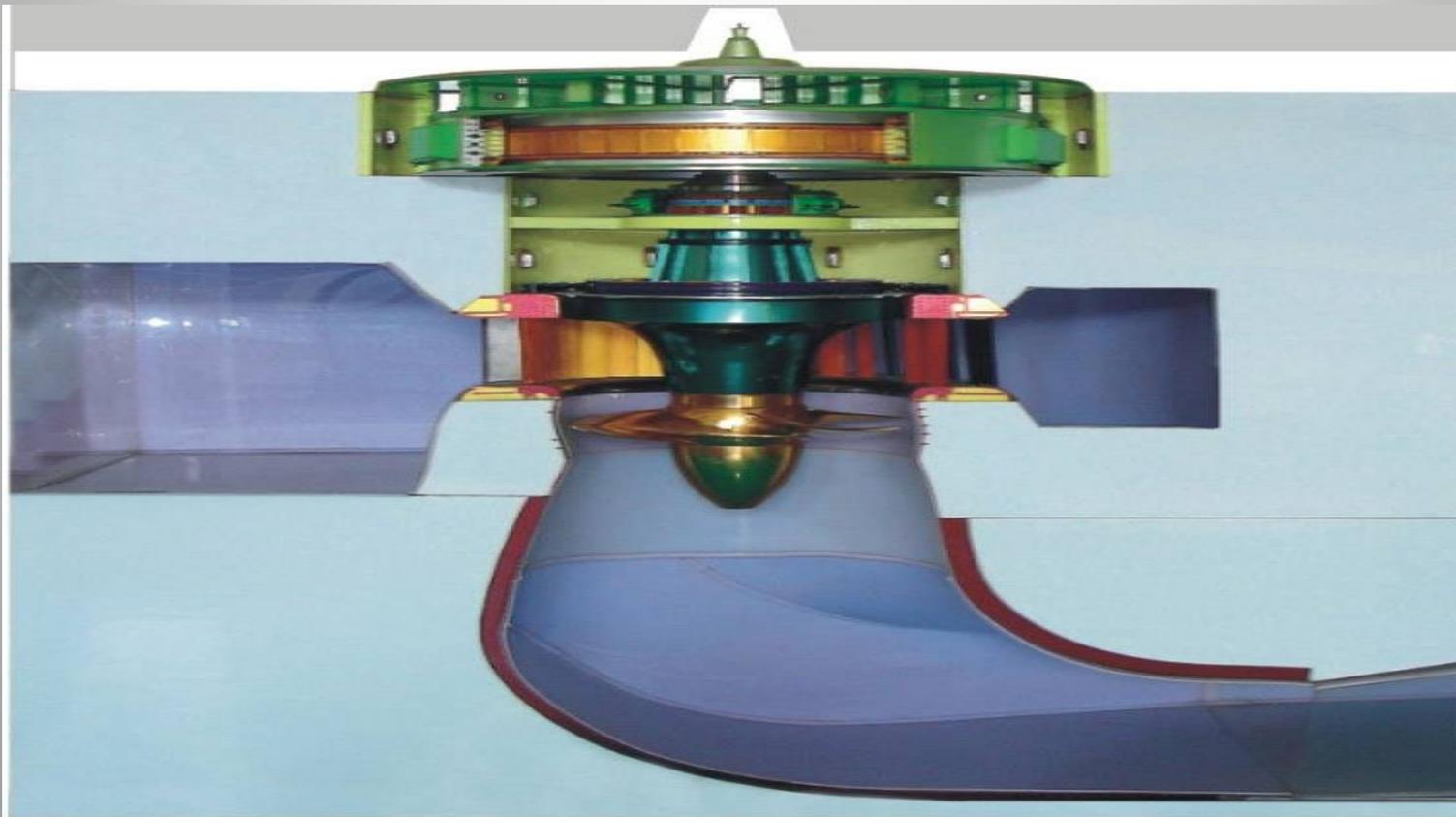
Nel distributore, i cui passaggi si restringono, l'acqua prende velocità per trasformare solo in parte il salto utile netto. Esso, convoglia l'acqua in direzione tangenziale alle pale e ripartisce le trasformazioni di velocità e pressione tra lo statore e il rotore affinché, l'acqua si infrange sulle pale con la giusta direzione.

A valle della Francis c'è il tubo di scarico (detto Tubo Aspirante) di forma tronco-conica per favorire l'efflusso dell'acqua che acquista velocità provocando una depressione barometrica allo sbocco della girante, ciò si realizza con un tubo lungo 6~7 m. Esso recupera un po' di salto,

Turbina a Kaplan

*È l'evoluzione della Francis e successivamente di quella a elica.
È a reazione con numero caratteristico $nc=1000$, con pale orientabili e
svergolate e ridotto a numero $3\sim 5$ e diametro di 8m.*

https://it.wikipedia.org/wiki/Turbina_kaplan



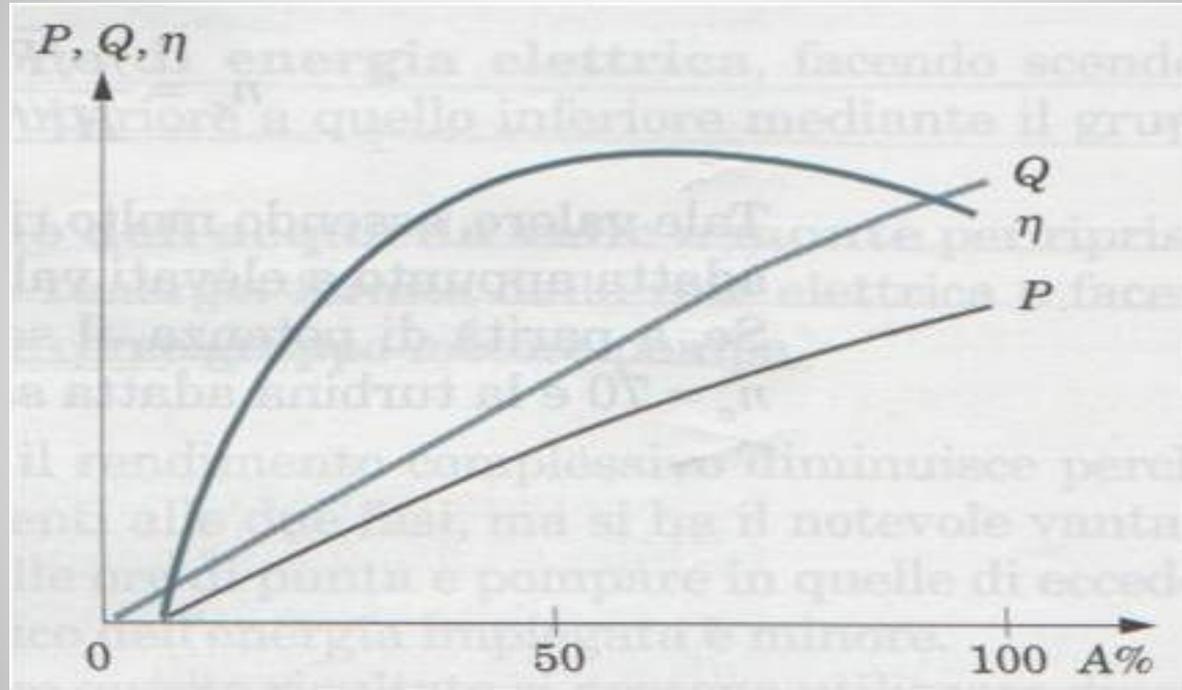
È una turbina veloce ma soprattutto si adatta molto bene al continuo oscillare della portata dei fiumi e alle variazioni di richieste di energia elettrica della rete, essa può operare a bassi dislivelli anche lungo le coste per sfruttare le maree.

In questa turbina assume importanza fondamentale il tubo aspirante che non deve creare vortici e/o distacchi di vena.

Curve Caratteristiche delle Turbine. Raffronto

Esse sono molto simili nelle curve (quasi rette) relative alla Potenze e alla Portata al progredire dell'apertura del distributore.

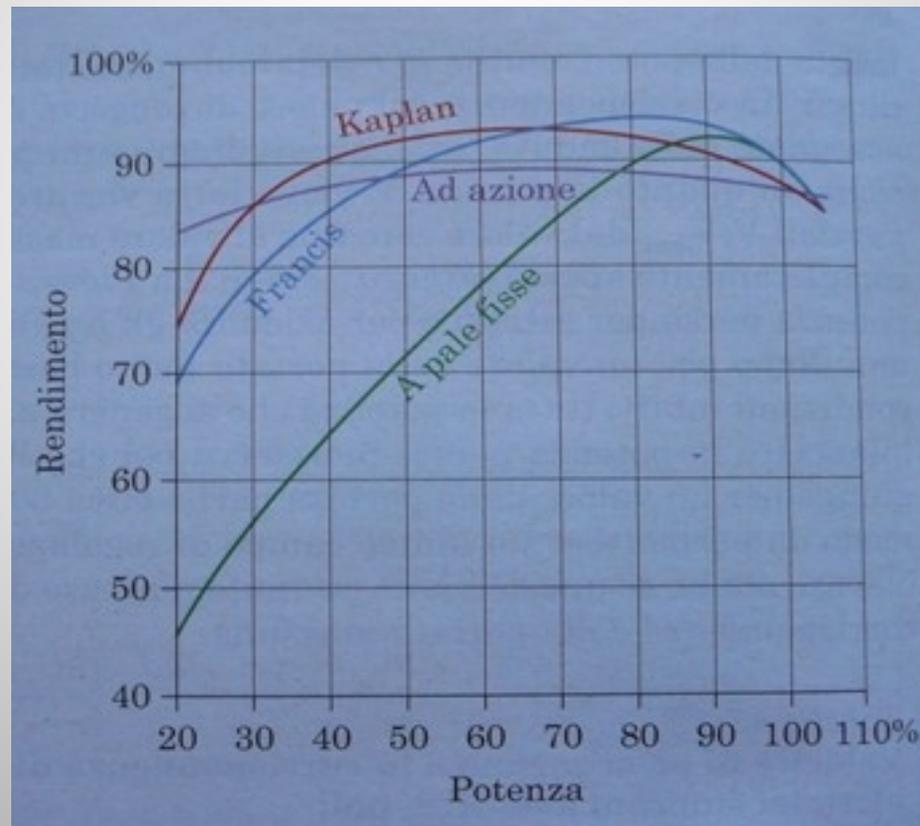
https://it.wikipedia.org/wiki/Turbina_idraulica



La curva del Rendimento, invece varia nella parte superiore che si presenta più o meno schiacciata, la figura seguente è molto eloquente.

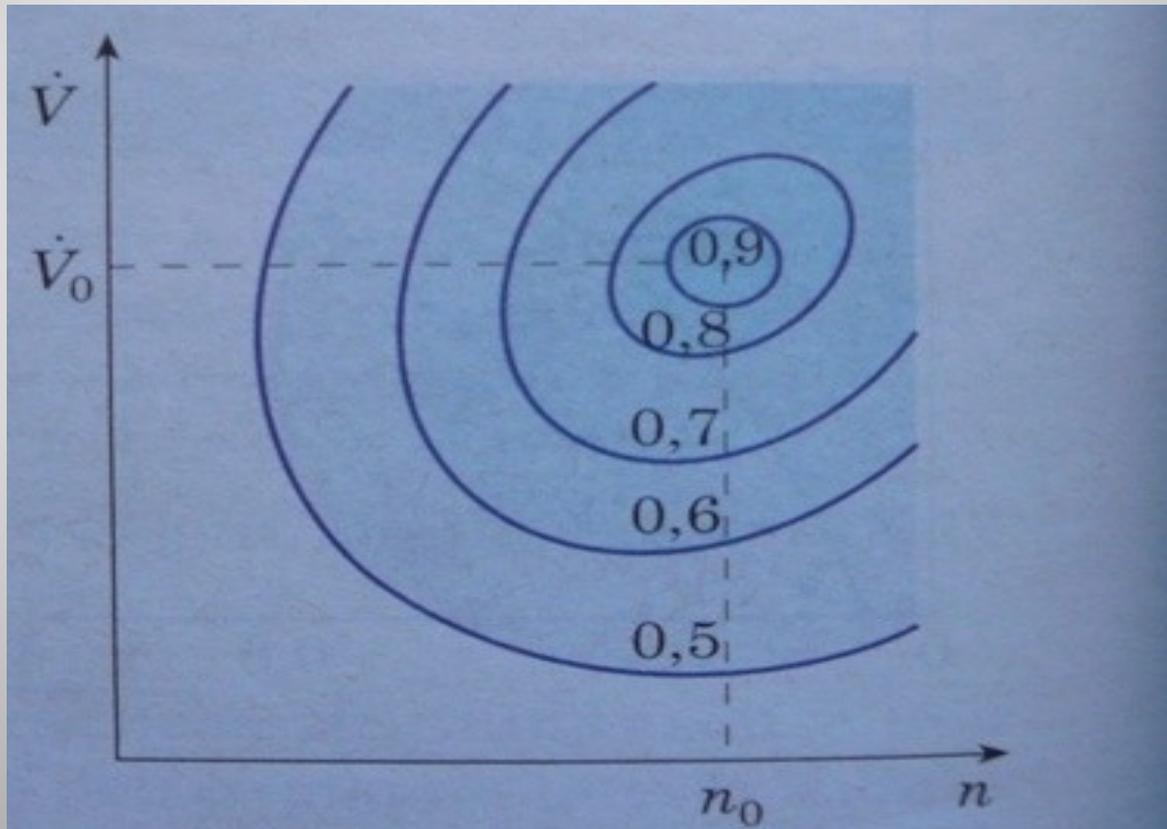
All'aumentare della potenza, infatti, la curva del Rendimento, è quasi piatta, nella Pelton ad azione, mentre è più bombata (convessa) nelle turbine con minore elasticità d'esercizio come la Francis e la Kaplan. Nelle turbine a Elica, con pale fisse, il massimo Rendimento è spostato tutto verso la massima potenza, quindi, queste sono "poco" regolabile.

Figura tratta Gruppo Editoriale "il capitulo"



La problematica è più chiara nel Diagramma Collinare o a Conchiglia (Portata e Numero di giri) che si riferisce alle linee d' "isorendimento" (di ugual rendimento). Più scendiamo dalla "collina" più il Rendimento diminuisce perché aumentano le perdite idrauliche per il mutamento direzionale dei vettori velocità che si allontanano dalla direzione ideale di progettazione

Figura tratta Gruppo Editoriale "il capitello"



Com'eravamo

https://it.wikipedia.org/wiki/Turbina_idraulica



Le Pompe, Macchine Operatrici

Sollemano o spostano un liquido, per aspirazione o compressione, imprimendogli una certa velocità.

L'Energia Meccanica, fornita da un motore alla pompa, si trasforma in Energia Cinetica e di Pressione attraverso il liquido. Prevalenza e Portata sono le due grandezze che caratterizzano le pompe.

La Prevalenza Geodetica " H_g " è l'energia teorica per sollevare il liquido del dislivello tra i peli liberi dei due serbatoi.

$H_g = h_a + h_m$ (altezza geodetica di aspirazione e di mandata).

La Prevalenza Manometrica " H_{pm} " misurabile con due manometri, è la differenza tra l'Energia Cinetica e Potenziale del liquido subito prima e subito dopo la pompa. Essa è detta anche Prevalenza della Pompa ed è l'energia erogata dalla stessa, è l'apporto energetico.

Si misura in metri di altezza ed è l'energia che la pompa fornisce alla massa unitaria del liquido.

Le pompe, ebbene dirlo subito, sono turbine che lavorano all'incontrario, e questo, si intuisce non solo dall'analisi progettuale ma anche dall'architettura dei condotti che operano sul fluido.

Supponiamo di riportare l'acqua scaricata da una turbina nuovamente nel bacino di alimentazione originario,

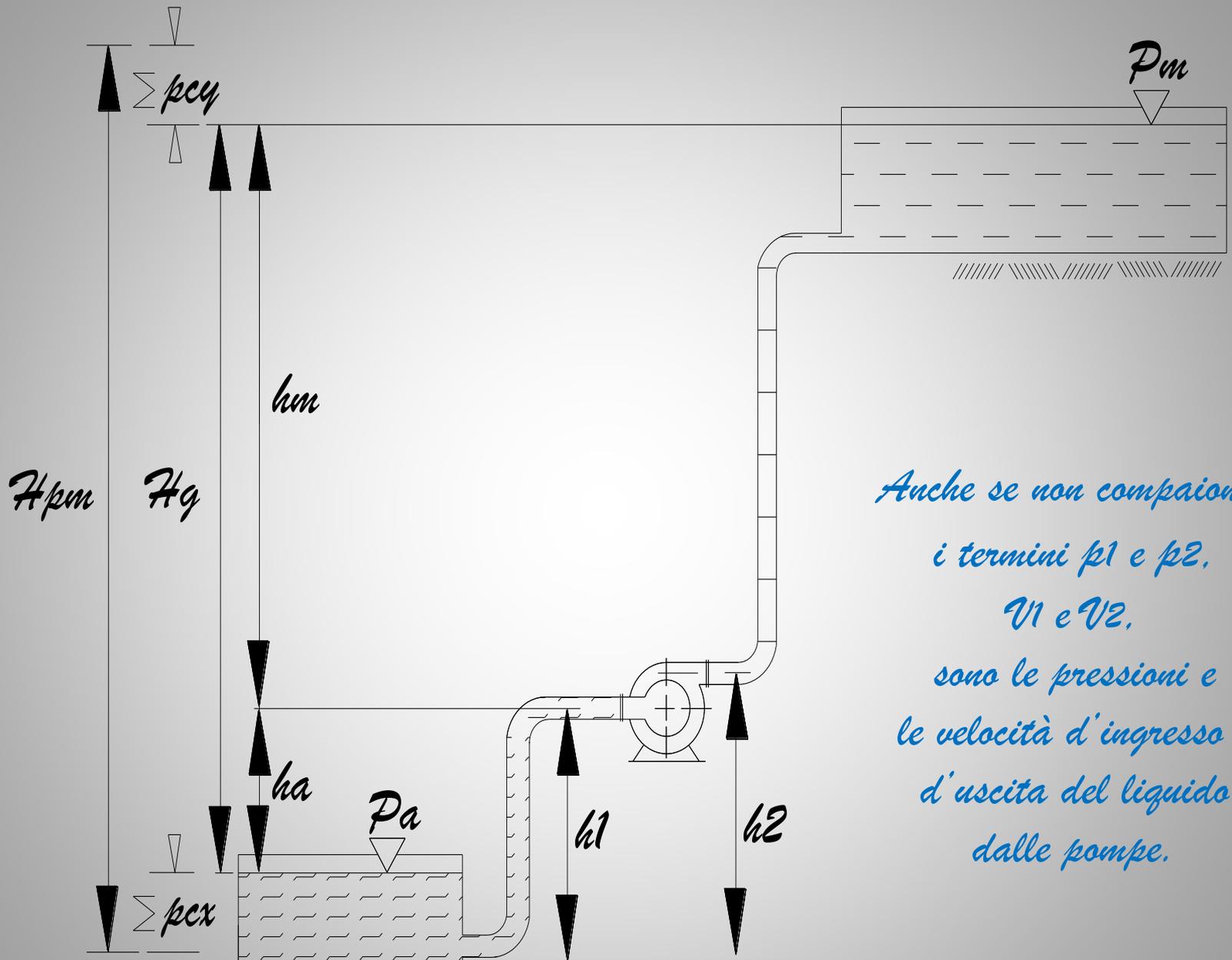
in effetti è quello che avviene realmente in certi impianti idroelettrici.

Teoricamente si potrebbe invertire il moto della girante della turbina e farne una pompa centrifuga, ma in realtà, per ovvi motivi, si usa un'altra condotta in salita e una pompa operatrice collegata al generatore di energia elettrica azionato dalla stessa turbina.

Con riferimento alla figura seguente e applicando Bernoulli ai capi della pompa (Idraulica, n. 14-15):

$$h_1 + p_1/\gamma + V_1^2/2g + H_{pm} = h_2 + p_2/\gamma + V_2^2/2g$$

siccome il dislivello tra l'uscita e l'entrata della pompa si può considerare trascurabile ($h_1 - h_2 = 0$), segue:



*Anche se non compaiono,
i termini p_1 e p_2 ,
 v_1 e v_2 ,
sono le pressioni e
le velocità d'ingresso e
d'uscita del liquido
dalle pompe.*

$$H_{pm} = (p_2/\gamma + V_2^2/2g) - (p_1/\gamma + V_1^2/2g).$$

Il 1° termine al secondo membro è l'altezza di mandata, e il secondo è l'altezza di aspirazione, tali termini sono rilevabili facilmente, a monte e a valle della pompa e comprendono anche le perdite interne alle macchine e si misurano in colonna di liquido.

Inoltre, i tubi di aspirazione e di mandata hanno lo stesso diametro e ciò implica $V_1 = V_2$, anche se la velocità del liquido entrante e uscente dalla pompa non deve essere necessariamente uguale, quindi:

$$H_{pm} = p_2/\gamma - p_1/\gamma = (p_2 - p_1)/\gamma$$

Si indichi con "Pa" e "Pm" le pressioni agenti sui peli liberi dei bacini e con Σp_{cy} e Σp_{cx} le perdite di carico lungo le tubazioni di aspirazione e di mandata durante il funzionamento, per l'equilibrio statico:

$$P_a = p_1 + h_a \gamma \quad \text{e, dividendo per } \gamma, \quad P_a/\gamma = p_1/\gamma + h_a$$

$$P_m = p_2 + h_m \gamma \quad \text{e, dividendo per } \gamma, \quad P_m/\gamma = p_2/\gamma + h_m$$

e inserendo le perdite di carico si ha:

$$P_a/\gamma = p_1/\gamma + h_a + \sum p_{cx} \quad \text{e} \quad P_m/\gamma = p_2/\gamma + h_m + \sum p_{cy}$$

ritornando alla figura si legge

$$H_{pm} = H_g + (P_m - P_a/\gamma) + \sum p_{c \text{ Totale}},$$

$$(H_g = h_m + h_a \quad \text{e} \quad \sum p_{cy} + \sum p_{cx} = \sum p_{c \text{ Totale}})$$

oltre a porre P_a e $P_m = P_{\text{pressione Atmosferica}}$

$$H_{pm} = H_g + \sum p_{c \text{ Totale}},$$

La pompa a valle, nel tratto di condotta immersa, è aspirante e, come ci ha insegnato Stevino, è in depressione, perché inferiore a quella atmosferica.

Potenza e Rendimenti delle Pompe

La potenza interna o idraulica di una pompa "Pi" è caratterizzata dalla prevalenza manometrica "H_m" e dalla portata in volume "Q_v"

$$P_i = \gamma Q_v H_m / 1000 \quad \gamma (\text{gamma})$$

$$[\text{N/m}^3] [\text{m}^3/\text{sec}] [\text{m}] = [\text{Nm/sec}] = [\text{J/sec}] = [\text{W}] (\text{Watt})$$

Rendimento Idraulico, dipende dalla geometria interna dei condotti attraversati dal liquido e vale $0,7 \approx 0,9$

$$\mu_i = H_m / (H_m + \Delta p)$$

Al denominatore c'è la Prevalenza Totale: $H_m + \Delta p$, perdite di pressione.

Rendimento Volumetrico, dipende dai giochi degli accoppiamenti che aumentano con il funzionamento della pompa, causa usura:

$$\mu_v = Q_v / (Q_v + \Delta Q)$$

Al denominatore c'è la Portata Totale: $Q_v + \Delta Q$, perdite per trafileamento.

Rendimento Meccanico, dipende dagli attriti, quindi lubrificazione,

$$e \text{ vale } 0,90 \approx 0,95 > \mu_m = P_i / P_{i+\Delta P}$$

Al denominatore c'è la Potenza lorda.

Rendimento Totale o della Pompa che vale $0,45 \approx 0,85$

$$\mu_{tot} = \mu_i \mu_u \mu_m$$

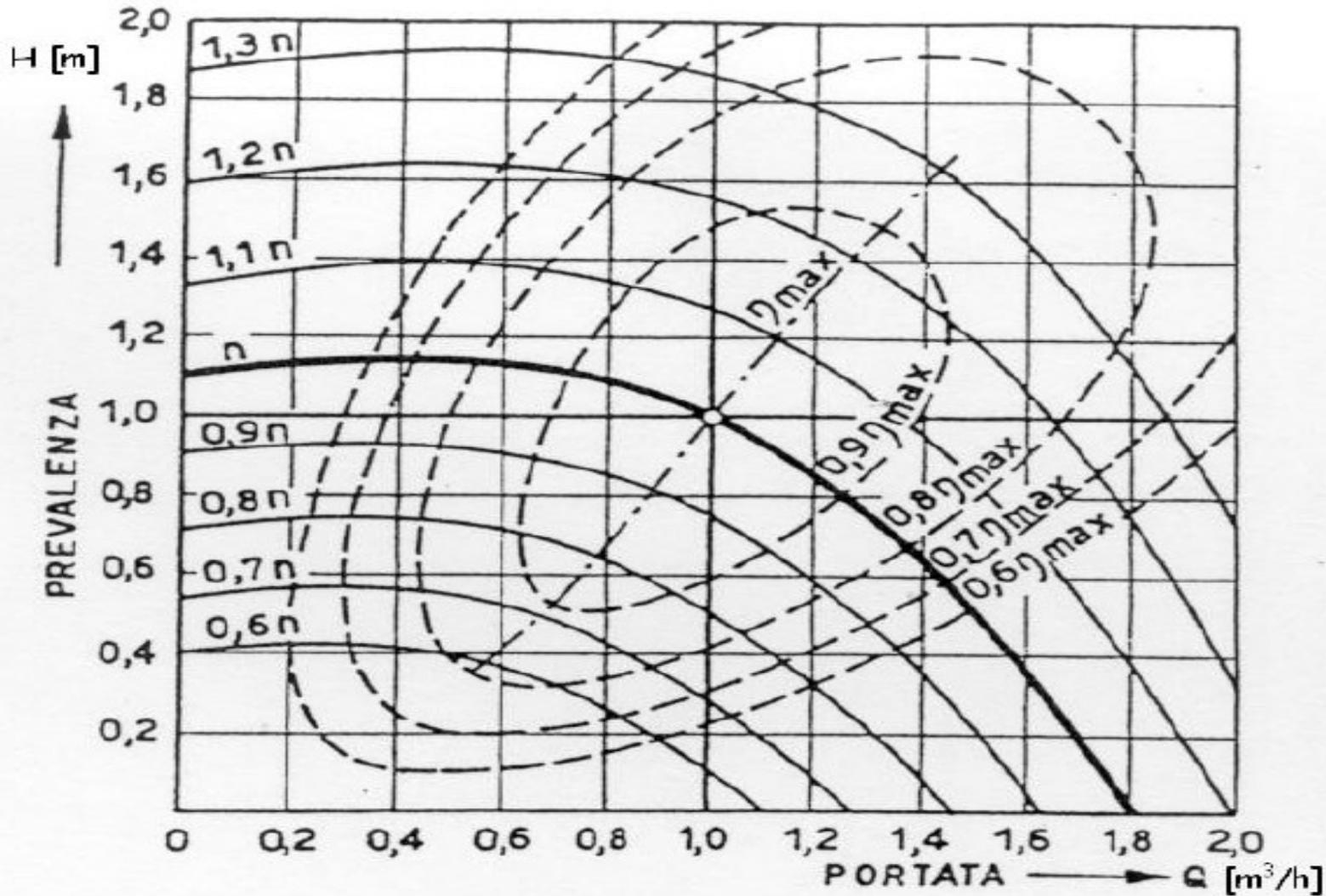
*da qui alla Potenza Effettiva, per vincere portata e prevalenza
e tutte le perdite passive:*

$$P_{eff} = P_i / \mu_{tot}$$

fino alla Potenza Assorbita che tiene conto del motore elettrico calettato

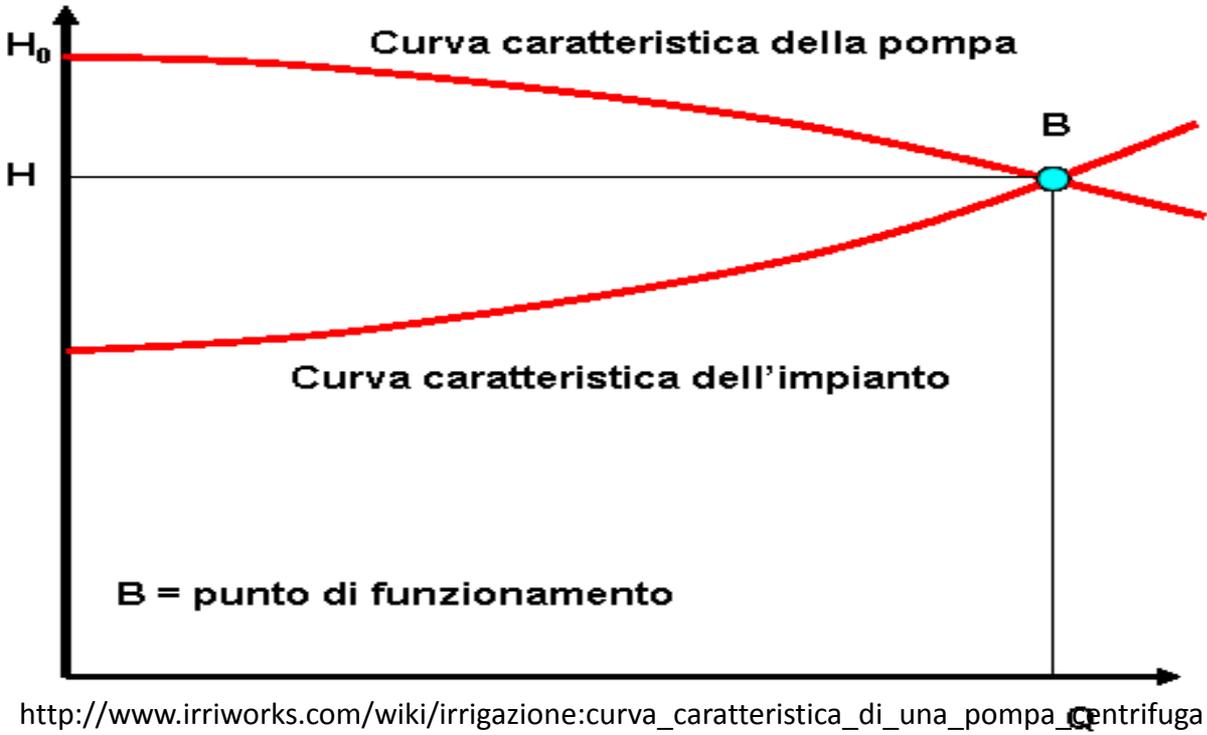
$$P_{ass} = P_{eff} / \mu_{motore}$$

Come già accennato alla "stretta parentela" che intercorre tra Pompe e Turbine, si espone il Diagramma Collinare o a Conchiglia di una pompa, senza ulteriori commenti.



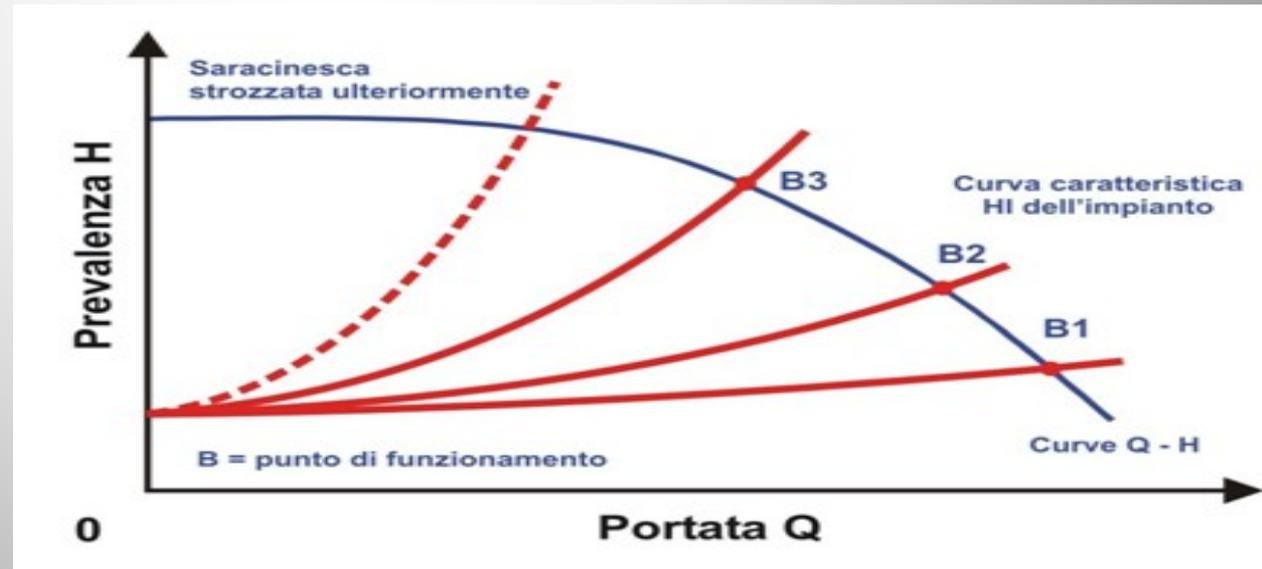
<http://www.bing.com/imagenes/search?q=pompe+diagramma+collinare&view=detailv2&&id=C1EEB530084E8AF8E755862F688A1253C>

6EA6662



Il diagramma mette in relazione la curva caratteristica della pompa con quella dell'impianto.

In quest'altro diagramma si evidenzia il punto di funzionamento che varia con la scabrezza della condotta o con l'apertura o chiusura della saracinesca.



*Le pompe più simili alle turbine sono le pompe centrifughe,
ma ci sono anche pompe a stantuffo o alternative,
a semplice e doppio effetto, che ricordano il sistema biella/manovella o
manovellismo di spinta che sarà approfondito al quinto anno.
Sulle pompe e sulle macchine operatrici, ma anche sulle macchine motrici
si rimanda a corsi più specifici sull'argomento.*