

Centrali idro-elettriche e turbine idrauliche

Sistemi Energetici

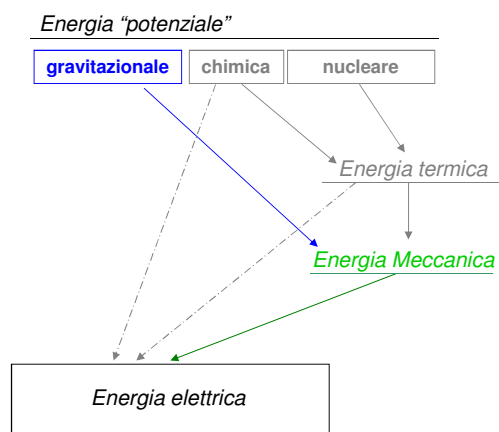
Alessandro Corsini

MoSEA Research Group - Fluid-Machinery Research Group
Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale

Università di Roma "La Sapienza"

e.mail: alessandro.corsini@uniroma1.it

Conversione dell'energia, origine e classificazione



conversione idro-meccanica

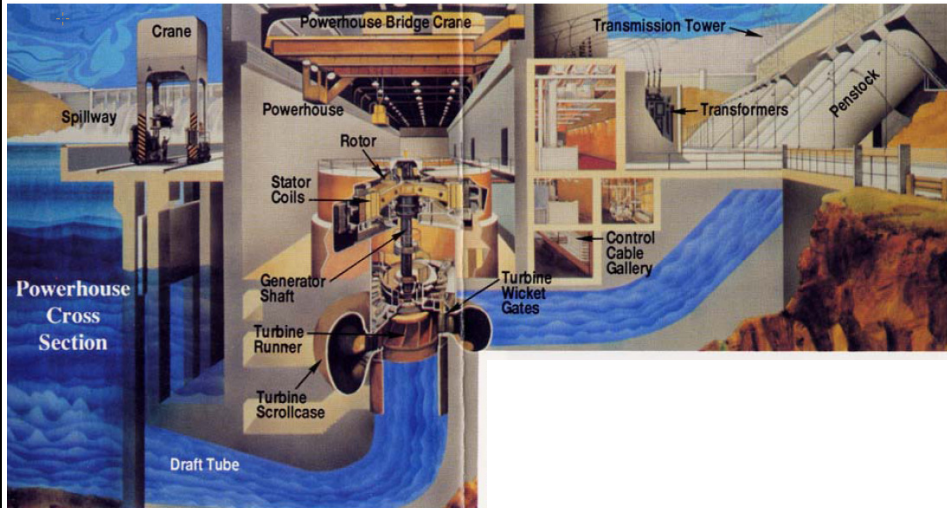
processo di conversione diretto,
elevate eff. di conversione è
determinata dalla tecnologia

equivalente ad un processo di conversione termo-meccanica a vapore

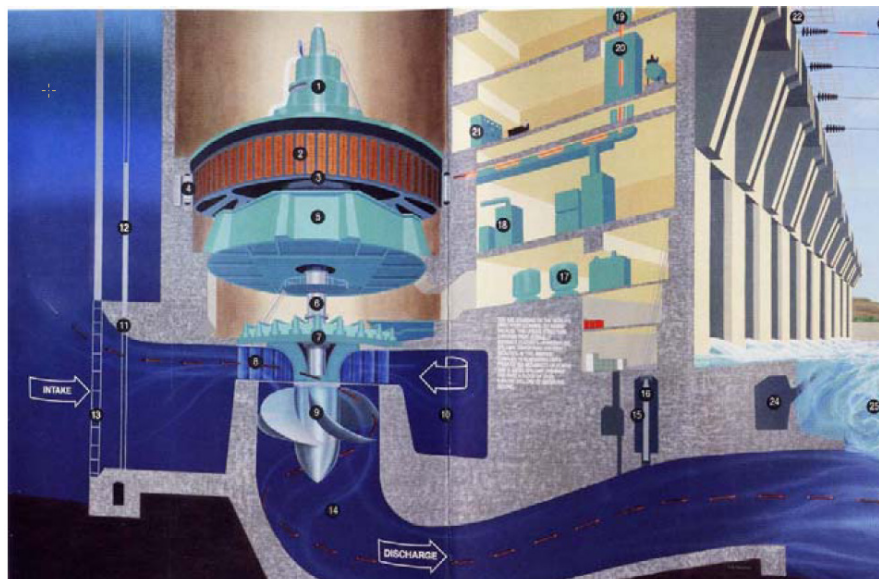
in cui la fase di evaporazione
avviene a spese della radiazione
solare

la rinnovabilità della risorsa è
assicurata dal ciclo
precipitazione-evaporazione delle
acque oceaniche

Schema introduttivo di una centrale idroelettrica



Schema introduttivo di una centrale idroelettrica



Definizioni, l'energia totale idraulica

Una delle fondamentali leggi dell'idraulica, il teorema di *Bernoulli*, afferma che in un liquido perfetto in regime permanente è costante la somma dell'energia di posizione, dell'energia di pressione e dell'energia cinetica in ogni punto di un medesimo filetto fluido.

$$z + \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g}$$

Il trinomio di somma costante rappresenta l'energia che l'unità di peso del liquido in moto possiede per il fatto che nel punto di *quota* z è dotata di *velocità* v ed è sottoposta alla *pressione* p .

Tutti i termini dell'equazione di Bernoulli sono espressi in m di colonna d'acqua [m]:

- la linea luogo dei punti di ordinata z è la **traiettoria della particella fluida**,
- la linea luogo dei punti di ordinata $(z+p/\rho g)$ è la **linea piezometrica**,
- la linea luogo dei punti di ordinata $(z+p/\rho g + v^2/2g)$, che per il teorema di Bernoulli è una retta parallela al piano di riferimento, è la **retta dei carichi idraulici o totali**.

La differenza di **carico idraulico** tra due sezioni di un sistema si esprime come:

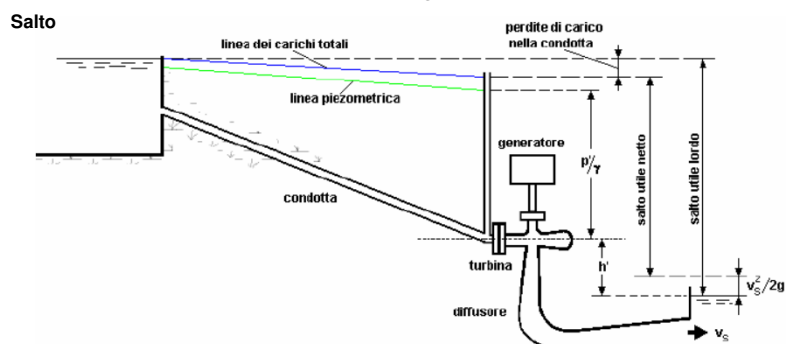
$$H = (z_2 - z_1) + \frac{1}{2g}(v_2^2 - v_1^2) + \frac{1}{\rho g}(p_2 - p_1)$$

da cui si ottiene l'espressione della **potenza idraulica** W

$$W = \rho g Q H = \rho g Q \left[(z_2 - z_1) + \frac{1}{2g}(v_2^2 - v_1^2) + \frac{1}{\rho g}(p_2 - p_1) \right]$$



Definizioni, schema energetico di una centrale



- **salto utile lordo** $H_{u,lordo}$: è il dislivello fra il pelo d'acqua nella vasca di carico (o nel pozzo piezometrico) e il pelo d'acqua nel canale di restituzione immediatamente a valle dei motori idraulici
- **salto utile netto** (o motore) $H_{u,netto}$: è quella parte del salto utile lordo che viene effettivamente utilizzata dai motori idraulici; è pertanto la differenza fra il carico totale della corrente all'entrata e il carico totale della corrente all'uscita della turbina.

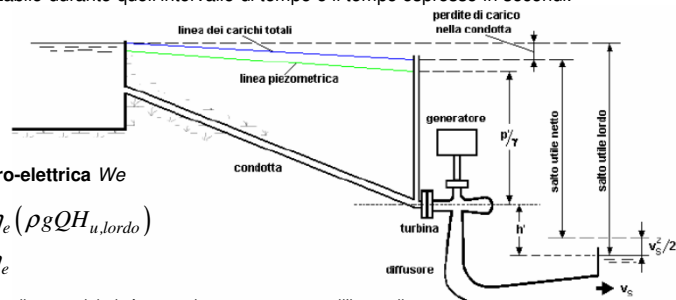
Il salto utile H è generalmente variabile, specialmente negli impianti fluviali e in quelli alimentati da serbatoi soggetti a forti escursioni di livello.



Definizioni, schema energetico di una centrale

Portata

- **portata massima derivabile** di un impianto idroelettrico (in m³/sec): è quella erogabile attraverso l'insieme dei motori idraulici della centrale in parallelo
- **deflusso utilizzabile** (o *derivabile*) in un dato intervallo di tempo T: è la quantità di acqua, espressa in m³, che può essere utilizzata (o derivata) durante l'intervallo di tempo considerato, in relazione con la massima portata derivabile.
- **portata media utilizzabile** (o *derivabile*) in un dato intervallo di tempo T (in m³/sec): è il rapporto fra il deflusso utilizzabile durante quell'intervallo di tempo e il tempo espresso in secondi.



Potenza idro-elettrica W_e

$$W_e = \eta_c \eta_t \eta_e (\rho g Q H_{u, lordo})$$

$$\eta_g = \eta_c \eta_t \eta_e$$

si noti che il rendimento globale è generalmente compreso nell'intervallo 0.7 - 0.9



Classificazione degli impianti idro-elettrici (i)

Impianti ad acqua fluente sono impianti sprovvisti di serbatoio di regolazione delle portate dell'acqua utilizzata.

La potenza efficiente è commisurata ai valori della portata normale (*valutata su 3-6 mesi all'anno*). La produttività varia da una settimana all'altra, da un mese all'altro, in relazione ai deflussi disponibili.

Il diagramma della disponibilità di potenza non coincide mai con il diagramma di carico del consumo. L'energia producibile può essere ben sfruttata soltanto nel funzionamento in parallelo con altri impianti dotati di regolazione.

Agli impianti **ad acqua fluente** si affida un **servizio di base** con produzione continua secondo il salto e la portata istantaneamente disponibili: *la utilizzazione della potenza efficiente è molto elevata, dell'ordine di 5000-6000 ore all'anno*



Centrale di Rupplodingen, CH



Centrale di Flumenthal (21.7MW), CH

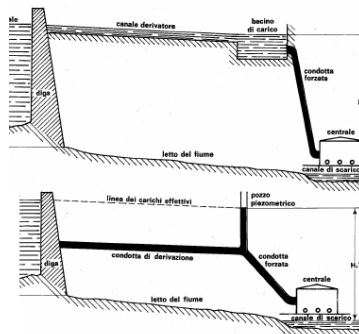
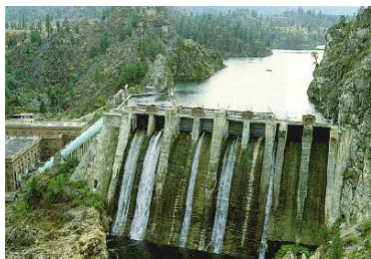
Tipologia di impianto che caratterizza le installazioni di piccola potenza, mini- e μ -idroelettriche



Classificazione degli impianti idro-elettrici (ii)

Impianti a serbatoio sono impianti muniti di un serbatoio che consente di regolare, in maggiore o minore misura, la *produzione della centrale in ragione del carico*.

Secondo la **capacità relativa del serbatoio (grado di regolazione)** si possono distinguere impianti a *regolazione parziale*, a *regolazione totale*, di *punta*.



FMRGroup @ DMA-URLS



Classificazione degli impianti idro-elettrici (iii)

impianti con serbatoio a regolazione parziale sono impianti provvisti di modesti serbatoi per regolare la produzione in relazione a variazioni di carico *giornaliere e settimanali*.

servizio prevalentemente di **base** nei periodi di piena e di punta giornaliera nei periodi di magra: l'utilizzazione della potenza efficiente è dell'ordine di *4000-5000 ore annue*.

impianti a regolazione totale sono dotati di serbatoio di notevole capacità, che permette una completa regolazione dei **deflussi annuali** per adattare il diagramma della domanda

Tale risultato non si ottiene di solito da un unico impianto ma da un insieme di impianti (compresi eventualmente gli impianti di pompaggio), che utilizzano razionalmente una o più vallate.

servizio di punta, salvo nei periodi di forte richiesta nei quali il carico erogato può avere piccole variazioni nelle 24 ore; la potenza efficiente ha una utilizzazione dell'ordine di *3500-4000 ore annue*.

impianti di sola integrazione o di punta sono impianti provvisti di serbatoi di volume sufficiente a **trattenere integralmente i deflussi** nei periodi di piena e destinati a funzionare soltanto nei periodi di magra.

servizio di punta e la potenza installata è prevista per utilizzazioni di *1000-2000 ore annue*.



FMRGroup @ DMA-URLS



Parco centrali idro-elettriche (Fonte: TERNA)

Potenza nominale degli impianti idroelettrici in Italia nel 2000 e 2001

	2000	2001	2000	2001	2000	2001
	Impianti		Potenza nominale		Potenza nominale	
	n	n	Motori primi MW		Generatori MVA	
Produttori	1655	1650	22.186,4	22.313,7	25.422,1	25.581,0
Autoproduttori(*)	310	283	457,5	395,4	565,7	490,8
totale	1965	1933	22.643,9	22.709,0	25.987,8	26.071,7

(*) *Autoproduttore* è la persona fisica o giuridica che produce energia elettrica e la utilizza in misura non inferiore al 70% annuo per uso proprio ovvero per uso delle società controllate.

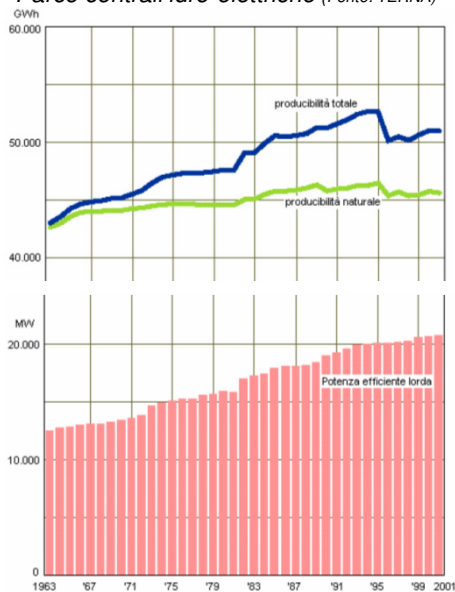
Potenza nominale degli impianti idroelettrici in Italia al 31 dicembre 2001 secondo categoria di impianti

	Impianti n	Potenza nominale	
		Motori primi MW	Generatori MVA
Impianti a serbatoio(*)	145	12.695,9	14.334,4
di cui di pompaggio puro e misto	20	7.450,5	8.464,8
Impianti a bacino(**)	188	5.864,3	6.723,3
Impianti ad acqua fluente(***)	1.600	4.148,7	5.014,0
totale	1.933	22.709,0	26.071,7

(*) *Impianti a serbatoio* sono quelli che hanno un serbatoio classificato come "serbatoio di regolazione" stagionale (durata di invaso maggiore o uguale a 400 ore);
 (**) *Impianti a bacino* sono quelli che hanno un serbatoio classificato "bacino di modulazione" (durata di invaso minore di 400 ore e maggiore di 2 ore);
 (***) *Impianti ad acqua fluente* sono quelli che non hanno serbatoio o hanno serbatoio con durata di invaso uguale o minore di due ore.
 La durata di invaso è il tempo necessario per fornire al serbatoio un volume d'acqua pari alla sua capacità utile con la portata media annua del o dei corsi d'acqua che in esso si riversano, escludendo gli eventuali apporti da pompaggio.




Parco centrali idro-elettriche (Fonte: TERNA)

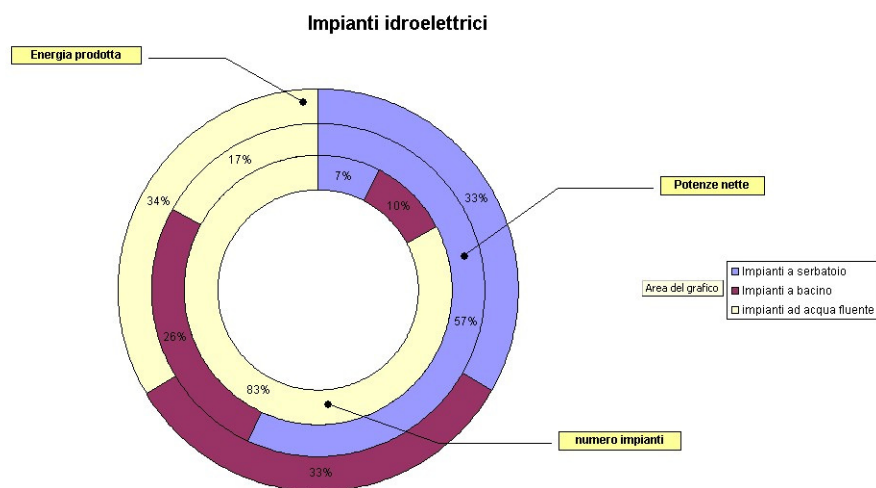


Parco centrali idro-elettriche, dati di produzione

	Impianti n.	Potenza nominale		Potenza efficiente		Producibilità lorda media annua			Totale GWh
		Motori primi MW	Generatori MVA	Lorda MW	Netta MW	da apporti naturali GWh	da apporti di pompaggio		
							di gronda GWh	volontario GWh	
impianti a serbatoio	106	8.708,3	9.794,6	8.146,6	8.028,5	9.349,8	104,2	3.096,6	12.550,6
di cui di pompaggio puro e misto	14	5.233,2	5.916,8	4.989,1	4.914,5	1.802,2	34,2	3.096,6	4.933,0
impianti a bacino	126	4.201,1	4.736,0	3.792,6	3.734,8	12.909,7	26,9	-	12.936,6
impianti ad acqua fluente	1.294	3.178,2	3.826,1	2.883,9	2.836,3	14.648,8	10,9	-	14.659,7
Italia settentrionale	1.526	16.087,6	18.356,7	14.823,2	14.599,6	36.908,3	142,0	3.096,6	40.146,9
impianti a serbatoio	9	302,6	372,7	272,6	268,5	464,2	3,1	-	467,3
di cui di pompaggio puro e misto	-	-	-	-	-	-	-	-	-
impianti a bacino	39	1.004,0	1.222,8	822,3	809,8	2.364,9	5,6	-	2.370,5
impianti ad acqua fluente	224	361,3	433,6	322,3	317,0	1.315,6	0,0	-	1.315,6
Italia centrale	272	1.667,9	2.029,1	1.417,1	1.395,3	4.144,7	8,7	-	4.153,4
impianti a serbatoio	32	3.704,2	4.181,4	3.365,7	3.315,3	1.802,5	14,0	2.098,8	3.915,3
di cui di pompaggio puro e misto	6	2.217,3	2.548,0	2.074,0	2.042,9	145,9	1,0	2.063,7	2.210,6
impianti a bacino	25	839,2	993,9	747,1	735,9	1.567,3	0,2	-	1.567,5
impianti ad acqua fluente	110	345,0	426,8	305,2	300,1	1.217,2	-	-	1.217,2
Italia meridionale e insulare	167	4.888,4	5.602,1	4.418,0	4.351,2	4.586,9	14,2	2.098,8	6.699,9
impianti a serbatoio	147	12.715,1	14.348,7	11.784,9	11.612,2	11.616,5	121,3	5.195,4	16.933,2
di cui di pompaggio puro e misto	20	7.450,5	8.464,8	7.063,1	6.957,4	1.948,1	35,2	5.160,3	7.143,6
impianti a bacino	190	6.044,3	6.952,7	5.362,0	5.280,5	16.841,9	32,7	-	16.874,6
impianti ad acqua fluente	1.628	3.884,5	4.686,4	3.511,4	3.453,4	17.181,5	10,9	-	17.192,4
ITALIA	1.965	22.643,9	25.987,9	20.658,3	20.346,1	45.640,0	164,9	5.195,4	51.001,3

TMRGroup @ DMA-URLS 

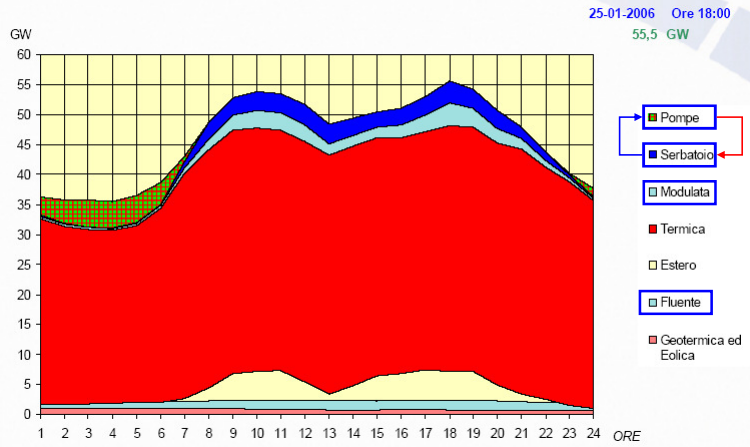
Parco centrali idro-elettriche, composizione



TMRGroup @ DMA-URLS 

Il parco elettrico di potenza italiano Esercizio, curva di domanda giornaliera

Fonte TERNA



TMRGroup @ DMA-URLS

Elementi costitutivi di una centrale

Gli elementi costitutivi di un impianto idroelettrico possono essere raggruppati come segue.

- Opere di captazione

- Opere di presa

- Opere di derivazione

- Condotte forzate

- Centrali elettriche, che sono il complesso di edifici contenenti il macchinario e le apparecchiature necessarie alla trasformazione dell'energia idraulica in energia elettrica.

- Opere di restituzione (o di scarico)



FMRGroup @ DMA-URLS

Elementi costitutivi di una centrale

- **Opere di captazione**, che permettono di raccogliere le acque necessarie all'alimentazione dell'impianto: tali sono le dighe di sbarramento, i canali di gronda, &c.

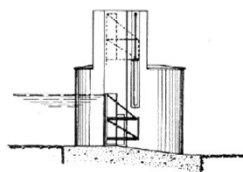
TRAVERSE FLUVIALI	fisse	in muratura, calcestruzzo, terra	
	mobili	piane, a settore, cilindriche, a ventola	
DIGHE	in materiali sciolti	in terra	
		a scogliera	
		in muratura a secco	
	in muratura	a gravità	massiccia
			alleggerita
		a volta	ad arco
		ad arco-gravità	
		a cupola	



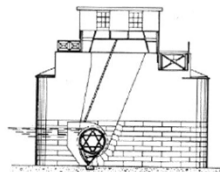
Elementi costitutivi di una centrale

- **Traverse fluviali**, sono tipicamente impiegate negli impianti ad acqua fluente.

Creano un rigurgito a monte, nell'alveo del corso d'acqua, che permette il convogliamento nelle opere di presa dell'acqua. sono superate dalle eccedenze senza opporre ostacoli alle piene.



Traversa fluviale con paratois piane (sopra) e a settore (sotto)



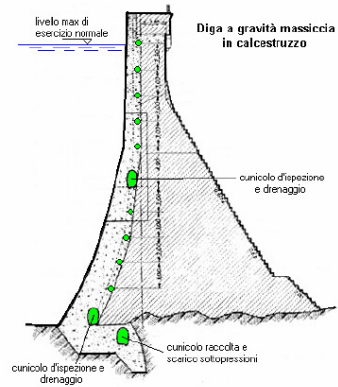
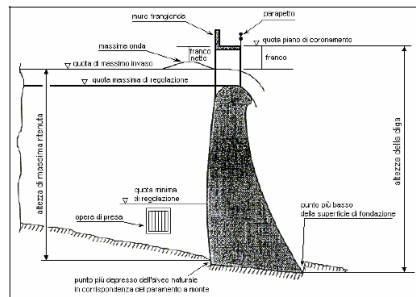
Traversa fluviale con paratois cilindriche (sopra) e a ventola (sotto)



Elementi costitutivi di una centrale

- **Dighe.** oltre ad intercettare il corso d'acqua, creano una notevole sopraelevazione del pelo libero a monte e realizzano un invaso utile (serbatoio giornaliero, settimanale, stagionale).

L'altezza dello sbarramento è il dislivello fra la quota del piano di coronamento e quella del punto più basso della superficie di fondazione. Il **livello di massimo invaso** è la quota massima a cui può giungere l'acqua nel serbatoio per l'evento previsto di



FMRGroup @ DMA-URLS

Elementi costitutivi di una centrale

- **Opere di presa.** Immettono le acque nel condotto derivatore e ne regolano la portata.

Sono dotate di *organi di chiusura e di regolazione* e sono costruite in modo da non venire inghiaiate o intasate da materiali portati dalle acque, non permettere l'ingresso di materiali solidi nei canali, non provocare elevate perdite di carico.

Si distinguono in opere di presa a *superficie libera* e opere di presa *in pressione*.

FMRGroup @ DMA-URLS

Elementi costitutivi di una centrale

Le *opere di presa superficiali* sono adottate negli **impianti ad acqua fluente** e sono seguite da canali a pelo libero. Serie di soglie fisse disposte lateralmente allo sbarramento, con il ciglio parallelo al senso della corrente del corso d'acqua.

Le bocche di presa devono essere di ampiezza tale da consentire l'entrata dell'acqua nel canale a valle con modesta velocità, dell'ordine di 0,5÷1 m/sec.

devono essere **protette da griglie**, allo scopo di impedire il passaggio dei materiali trasportati per galleggiamento. Se il corso d'acqua trasporta frequentemente foglie od altri materiali che possono intasare le griglie, si prevedono rastrelli automatici per la loro pulizia (sgrigliatori).

Le **bocche di presa** sono inoltre dotate di paratoie generalmente piane, per la loro **parzializzazione** (regolare l'afflusso d'acqua ai canali) e la chiusura totale.

Le *opere di presa in pressione* sono quelle normalmente adottate per **spillare direttamente l'acqua dai serbatoi**.

Esse costituiscono la parte iniziale della galleria in pressione, che esce dal serbatoio in generale dalle sponde e talvolta attraverso la diga; sono disposte ad una quota inferiore al livello di massimo svaso.

L'imbocco ha una sezione 4 o 5 volte maggiore della sezione normale della galleria ed è naturalmente protetto con griglie in piatto di ferro.

In tal caso l'acqua è priva di trasporti solidi in quanto il materiale in sospensione si deposita sul fondo del serbatoio, dove l'acqua è in stato di quiete, e il materiale galleggiante viene eliminato dagli sfioratori di superficie.

Gli **organi di chiusura** delle prese in pressione non sono previsti per la **parzializzazione** perché questa è ottenuta agendo sulle macchine; devono però essere muniti di valvole di bypass per consentire il riempimento della galleria in pressione quando il serbatoio è pieno.



Elementi costitutivi di una centrale

- **Opere di derivazione**, convogliano le acque lungo una debole pendenza dalla presa al punto di inizio della tubazione in pressione (condotta forzata).

Possono essere costituite da un canale a pelo libero o da una galleria in pressione, secondo il tipo di impianto: nel primo caso al termine si troverà una vasca di carico, nel secondo caso un pozzo piezometrico, ambedue con la funzione di serbatoio per le brusche variazioni di portata.

La *vasca di oscillazione* o *pozzo piezometrico* è inserita tra la galleria in pressione e le condotte forzate: ha la doppia funzione di ridurre a limiti inavvertibili le **sovrapressioni per colpo d'ariete** in galleria e di consentire rapide variazioni di portata nelle condotte, in occasione di rapide variazioni di carico, sfruttando la massa d'acqua accumulata.

Colpo d'ariete, ogni rapida variazione della portata di una condotta è accompagnata da una successione di brusche sovrapressioni e depressioni che si propagano con grande velocità (800÷1200 m/sec) lungo la condotta stessa.

Tale fenomeno favorisce la surregolazione e le oscillazioni di velocità a danno della stabilità della regolazione e sottopone la condotta a sollecitazioni maggiori di quelle statiche.



Elementi costitutivi di una centrale

Le **condotte forzate** sono metalliche o in cemento armato. Le tubazioni possono essere installate all'aperto, in galleria o possono essere incorporate nella roccia.

La **velocità dell'acqua nella tubazione in corrispondenza della portata massima è in genere compresa fra 4 e 6 m/sec**, circa doppia di quella ammessa per le gallerie di derivazione

Organi di chiusura delle condotte forzate

- **valvole a farfalla**, chiusura semplice di condotte di presa o di scarico da serbatoi e per la chiusura di sicurezza, a funzionamento automatico, all'inizio di tubazioni forzate.
Questo tipo di valvola ostruisce parzialmente, in posizione di aperto, la luce di passaggio, provocando così perdite di carico; difficoltà di realizzare una buona tenuta inducono a limitarne l'impiego per pressioni inferiori a 400 m di colonna d'acqua
- **saracinesche**, chiusura di condotte in pressione, con carichi sino a 1000 m e oltre.
Esse non sono adatte ad essere manovrate con squilibrio di pressione tra monte e valle e sono perciò dotate di bypass, sono costose e di notevole ingombro e pertanto sono adatte per condotte di piccolo diametro
- **valvole cilindro-sferiche (rotative)**, semplice chiusura, a tenuta, di condotte in pressione con carichi inferiori a 1000 m e non sono applicabili per la regolazione perché sono manovrabili solo con acqua ferma o con minima velocità.
Sono costituite da un tronco di tubo montato su due perni, che in posizione di apertura elimina ogni ostacolo e in chiusura è ruotato di 90° e presenta alla sede, contro cui viene spinto, un piatto di tenuta. Il loro impiego è assai diffuso al piede delle condotte prima delle turbine, in sostituzione delle saracinesche impiegate nel passato;
- **valvole a fuso**, tipo Larner-Johnson e derivate, corpo valvola a bulbo immerso nel fluido e dotato di un otturatore a stantuffo, comandato idraulicamente in pressione, che in chiusura viene spinto contro la sede.
Sono ottime sia per la chiusura che per la regolazione di condotte di presa o di scarico da serbatoi e di condotte in pressione sotto alti carichi, sino a 1200 m.



Elementi costitutivi di una centrale

- **Opere di restituzione o scarico**, hanno la funzione di restituire nell'alveo naturale la portata derivata dall'impianto ed utilizzata per la produzione di energia.

Costituite da un canale a pelo libero, dimensionato in modo da permettere lo scarico delle acque nel corso d'acqua anche quando quest'ultimo è in piena. La sezione deve essere abbondantemente dimensionata in modo da non superare la velocità di 1÷1,5 m/sec.

Il **manufatto di sbocco** nel corso d'acqua dovrà essere costituito in modo da raccordarsi gradualmente all'alveo naturale al fine di evitare erosioni.

Nel caso di impianti con portata rapidamente variabile, per evitare perturbazioni e danni nel corso d'acqua naturale, viene inserito allo scarico un piccolo lago artificiale detto **bacino di compenso**, che con la sua capacità è in grado di regolare la portata a valle.



Lay-out di impianti idro-elettrici

Impianti in pressione con condotte forzate

impianto prevalentemente utilizzato in siti di montagna con serbatoio e salti idraulici rilevanti

La *galleria di derivazione in pressione* corre con debole pendenza fino ad un punto sovrastante il sito della centrale



in quel punto si colloca il *pozzo piezometrico e la vasca di oscillazione* ed inizio la *condotta forzata*, la quale deve avere la minor lunghezza possibile (per le elevate perdite di carico idraulico)

Nel suo percorso la galleria capta le acque degli *affluenti* di quella sponda, che vengono sbarrati con una traversa fissa, altri affluenti possono essere convogliati nel pozzo piezometrico

Talora le acque non sono restituite allo stesso corso d'acqua dal quale sono derivate, ma immesse attraverso gallerie di valico in un'altra vallata, allo scopo di utilizzarle in un'altra centrale esistente o di ottenere un maggior salto

La *centrale*, può essere convenientemente situata in corrispondenza della confluenza di un importante affluente, in modo da riprendere, in una successiva derivazione, le acque di scarico della centrale e quelle dell'affluente

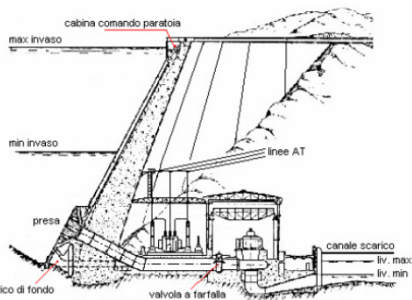


Lay-out di impianti idro-elettrici

Impianti a pelo libero con condotte forzate

Impianto realizzato qualora la sezione del corso d'acqua si presti assai bene per costruire una diga di ritenuta, e non sia possibile costruire le opere di derivazione (galleria e condotta forzata)

Schema di impianto semplificato con la centrale al *piede della diga*



Il *salto motore* è creato dalla diga ed è variabile con il livello dell'invaso; il *livello di massimo vaso* è in questo caso fissato dalle caratteristiche delle turbine, il cui salto può variare entro limiti normalmente ristretti. Il *salto minimo* utilizzabile non dovrebbe scendere al di sotto del 50% del massimo ed il rimanente volume d'acqua ha il solo scopo di contribuire a determinare il salto

L'assenza delle opere di derivazione in questo tipo di impianto permette di installare economicamente rilevanti potenze di macchinario, se l'invaso utile ed il salto lo permettono



Lay-out di impianti idro-elettrici

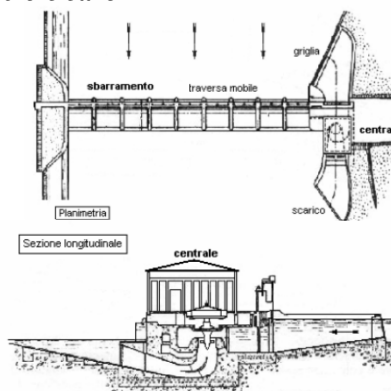
Impianti fluviali senza canale derivatore

Sono tipici impianti ad *acqua fluente*. L'invaso non costituisce mai una riserva rilevante a causa delle elevate portate utilizzate (superiori a 100 m³/sec) e del salto modesto (da 5 a 20 m); la portata derivabile coincide in ogni istante con quella disponibile.

Le *opere indispensabili* sono lo sbarramento, del tipo a traversa mobile, e la centrale, che è ubicata ad una delle estremità della traversa, in prossimità della sponda.

Il *salto motore* è dato dal dislivello fra il livello dell'acqua a monte, che è sensibilmente costante, ed il livello a valle che cresce al crescere della portata del fiume. In corrispondenza delle massime piene la riduzione del salto e quindi della potenza è tale da indurre all'arresto delle turbine e all'apertura completa delle paratoie anche per ridurre il rigurgito a monte.

Sono previste anche le *scale dei pesci*, che permettono alla fauna ittica di risalire la corrente, mantenendo così intatto il loro ciclo vitale ambientale.

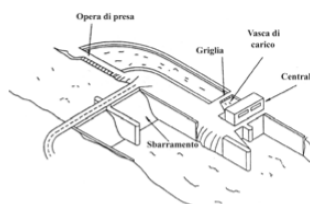


Lay-out di impianti idro-elettrici a bassa caduta (mini- e μ -idro)

Due Schemi

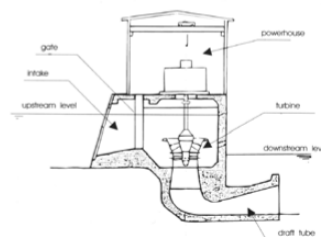
⇨ Con Canale di Derivazione

- uno sbarramento deriva la portata necessaria
- ha una struttura molto simile a quella degli schemi ad "alta caduta", sebbene il canale sia in genere di lunghezza molto limitata e la condotta forzata breve o del tutto inesistente



⇨ Senza Canale di Derivazione

- realizzazione di una diga che comprende sia le opere di presa, sia la centrale, sia le opere per lo scarico dell'acqua



Esiste una ulteriore configurazione: "a sifone"

- opere civili ridotte al minimo (tralasciando quelle per lo sbarramento), soluzione estremamente economica
- Salti da 1 a 10 m (esempi anche di 30 m)
- Possibile se la diga non è molto alta



Lay-out di impianti, la centrale

Ubicazione della centrale

La posizione resta fissata nel caso di impianti direttamente connessi a dighe di ritenuta e di impianti fluviali senza canale derivatore.

Nel caso di impianti con condotte forzate, una volta stabilite le quote di presa e di restituzione, l'ubicazione dell'edificio contenente il macchinario idraulico ed elettrico deve essere tale da rendere minima la lunghezza complessiva delle opere di adduzione e di restituzione

occorre in questo caso tenere presente che aumentare la lunghezza delle opere di scarico a pelo libero riducendo galleria e condotta forzata, se da un lato riduce il costo globale dell'impianto, dall'altro sottrae costantemente al salto le perdite di carico del canale di scarico anche a carichi ridotti, poiché la pendenza motrice del canale deve essere dimensionata per la portata massima.

Centrali all'esterno, scelta obbligata per impianti fluviali

Il macchinario meccanico ed elettrico è posto in un apposito fabbricato posto all'esterno

Negli impianti di tipo fluviale il costo della centrale vera e propria rappresenta il 40-60% del costo totale; di conseguenza ogni provvedimento inteso a ridurre tale costo ha una notevole influenza sul costo totale dell'impianto.

es. centrale all'aperto costituita dalle sole opere di fondazione e fabbricato con tetto amovibile per la movimentazione del macchinario a mezzo carro ponte

es. la scelta di gruppi con architettura a bulbo, con l'alternatore direttamente accoppiato con la turbina e posto all'interno di un involucro stagno idrodinamicamente collegato con la turbina
riduzione dei costi fino al 20% del costo di centrale



FMRGroup @ DMA-URLS



Lay-out di impianti, la centrale

Ubicazione della centrale

Centrali in caverna, soluzione possibile per centrali con condotta forzata realizzata grazie alla costruzione del fabbricato di centrale tramite scavo in roccia

dato il rilevante costo delle opere di scavo diventa obbligata ogni scelta in favore della riduzione di ingombro della centrale, oltre che del macchinario, i.e. si pensi allo scavo delle gallerie di servizio

problemi importanti nella realizzazione sono: il drenaggio delle acque, il condizionamento dell'ambiente per permettere lo smaltimento delle ingenti quantità di calore prodotto dal macchinario

centrale in caverna vs centrale esterna

- pro**
- a) riduzione della lunghezza della condotta forzata e del costo di installazione e delle perdite di carico con miglioramento della stabilità del sistema idraulico;
 - b) maggiore durata della tubazione protetta contro gli agenti atmosferici;
 - c) minor costo delle fondazioni del macchinario, che si appoggiano alla roccia nella quale la caverna è scavata;
 - d) minime alterazioni dell'ambiente dal punto di vista paesaggistico.
- CONS**
- a) maggior lunghezza del canale di scarico con alte perdite di carico;
 - b) maggior costo della centrale dovuto allo scavo ;
 - c) necessità di prevedere la galleria di accesso ed i cunicoli per i cavi di trasporto dell'energia;
 - d) maggior costo dell'impianto di aerazione e di illuminazione;
 - e) maggior consumo di energia per la ventilazione e l'illuminazione diurna.



FMRGroup @ DMA-URLS

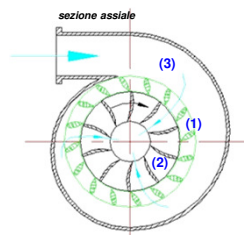
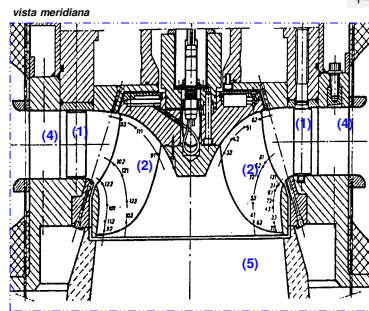
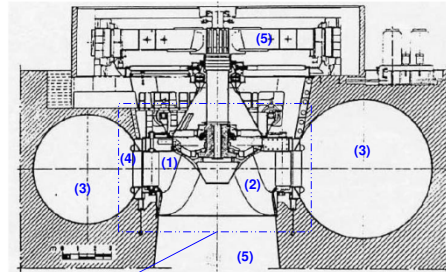


Macchinario idraulico, le turbine

Tipi di turbine idrauliche e componenti

Sono costituite da un organo fisso, il **distributore (1)**, ed un organo mobile, la **girante (2)**. Inoltre, la turbina è preceduta dalla **voluta a spirale (3)**, dal predistributore (4) ed è seguito dal **tubo diffusore (4)**

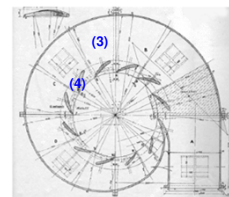
la turbina è poi, direttamente, collegata con il **generatore elettrico (5)**



Macchinario idraulico, le turbine

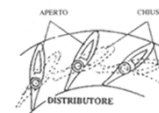
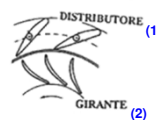
Componenti e loro ruolo

la **voluta (3)** ed il **predistributore (4)** distribuiscono la portata di acqua lungo la periferia e indirizzano la corrente



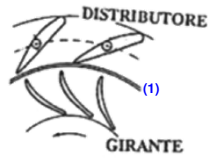
il **distributore (1)** svolge tre funzioni fondamentali

- i. completa l'indirizzamento della corrente entrante stabilendo un'interfaccia "cinematica" tra la cassa a spirale e la girante
- ii. permette la variazione delle luci di passaggio e quindi la regolazione di portata/potenza della turbina
- iii. contribuisce all'evoluzione energetica del fluido attraverso la turbina realizzando la conversione totale/parziale dell'energia di pressione (*quota geodetica*) in energia cinetica (*quota cinetica*)



Macchinario idraulico, le turbine

Distributore e grado di reazione della turbina



Non essendo il **distributore** un organo in moto, la corrente liquida lo percorre senza scambi di lavoro con l'esterno e di conseguenza ne esce con la stessa energia totale con cui era entrata, a parte le modeste perdite per attrito.

$$H_{u,distributore} = \frac{v_I^2}{2g} + \frac{p_I}{\rho g}$$

La conversione dell'energia idraulica nel **distributore** può essere integrale ovvero parziale

macchine ad azione

$$H_{u,distributore} = \frac{v_I^2}{2g}, \quad v_I = \sqrt{2gH_u}, \quad \text{essendo } p_I = p_{atm}$$

macchine a reazione, la pressione di uscita dal distributore è maggiore di quella atmosferica, ovvero la conversione del carico idraulico non è integrale

$$R = \frac{H_u - \frac{v_I^2}{2g}}{H_u} \quad \text{grado di reazione} \quad v_I = \sqrt{2g(1-R)H_u}$$



Macchinario idraulico, le turbine

Il numero di giri specifico per le turbine idrauliche

Un parametro fondamentale nello studio delle turbine idrauliche è il **numero di giri specifico** :

$$n_s = n \cdot \frac{P^{1/2}}{H^{5/4}} \quad \text{Numero di giri specifico}$$

Dove P è la potenza e H è il salto geodetico disponibile.

- Tale parametro è una variabile dimensionale (in origine non lo è).
- Significato fisico: il numero di giri specifico è la velocità di rotazione necessaria per ottenere, con una turbina simile a quella in esame, la potenza unitaria con un dislivello (salto geodetico) pari a 1m.
- Risulta identico per macchine simili.
- Caratterizza la tipologia di turbina.



Macchinario idraulico, le turbine

Tipologia di turbine idrauliche

Turbine per elevati salti geodetici ($H > 500$ m) e basse portate
Elevato lavoro specifico e potenza medio-bassa

es. Turbina Pelton ($R=0$) ***Ns* basso**

Turbine per salti geodetici medi ($500 \text{ m} > H > 20$ m) e portate medio-alte
Lavoro specifico medio-alto e ampia gamma di potenze

es. Turbina Francis ($0.4 < R < 0.8$) ***Ns* medio**

Turbine per bassi salti geodetici ($H < 20$ m) e portate elevate
Basso lavoro specifico e potenze medie

es. Turbina Kaplan ($R > 0.8$) ***Ns* alto**

***Ns*, numero di giri specifico**

Tipo di Turbina	Potenza in HP	Potenza in kW	Grado di reazione
Pelton ad 1 getto	5-25	4-20	-
Pelton a più getti (da 2 a 6)	25-80	20-70	-
Francis lente	60-120	50-100	0.30
Francis normali	120-250	100-200	0.40
Francis veloci	250-350	200-300	0.50
Francis ultraveloci	350-500	300-400	0.60
Kaplan e modello ad elica	500-1000	400-900	0.70

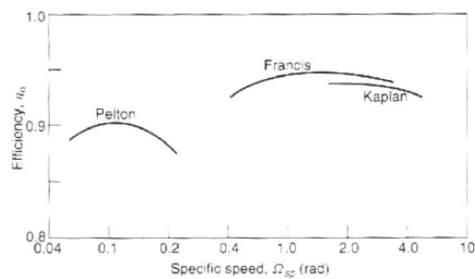


Macchinario idraulico, le turbine

Tipologia di turbine idrauliche e regimi di funzionamento

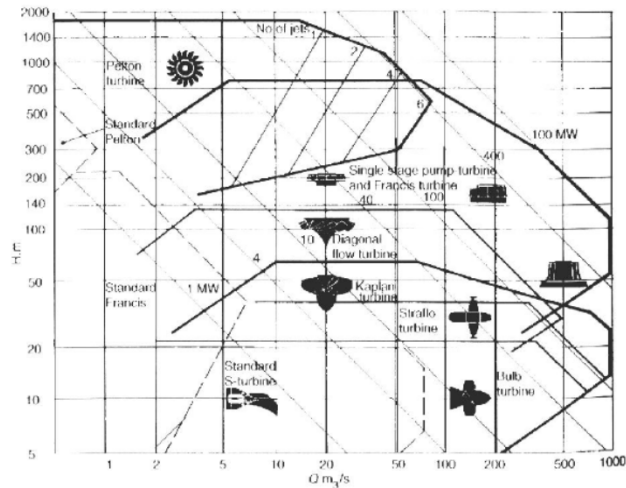
TABLE 9.3. Operating ranges of hydraulic turbines.

	Pelton turbine		Francis turbine		Kaplan turbine	
Specific speed (rad)	0.05	0.4	0.4	2.2	1.8	5.0
Head (m)	100	1770	20	900	6	70
Maximum power (MW)	500		800		300	
Optimum efficiency, per cent	90		95		94	
Regulation method	Needle valve and deflector plate		Stagger angle of guide vanes		Stagger angle of rotor blades	



Macchinario idraulico, le turbine

Tipologia di turbine idrauliche e campi di impiego



FMRGroup @ DMA-URLS

Macchinario idraulico, le turbine

Turbine ad azione

Nelle turbine ad azione si converte l'energia della vena fluida dopo la trasformazione dell'intero salto geodetico in forma cinetica

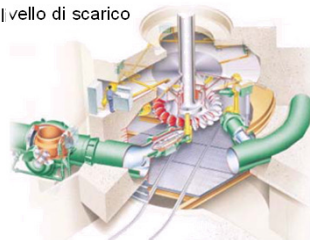
La girante, o ruota, si muove in un ambiente a pressione atmosferica solo parzialmente riempita d'acqua e per questo motivo la turbina deve essere posta al di sopra del livello di scarico

Tra le turbine ad azione si annoverano:

la turbina Pelton, brevettata L. A. Pelton, 1880, USA



la turbina Turgo



la turbina Ossberger, detta anche Banki o Mitchell o cross-flow

FMRGroup @ DMA-URLS

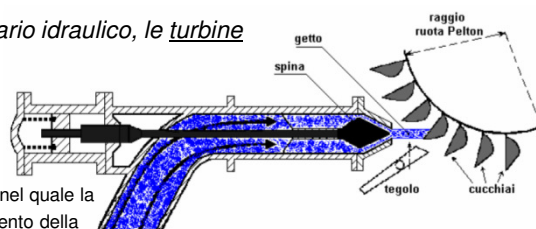
Macchinario idraulico, le turbine

Turbine ad azione **Pelton** (i)

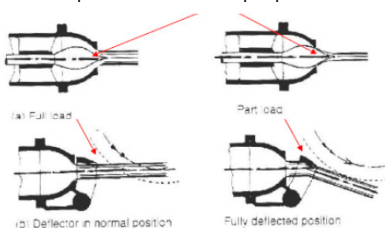
Il tubo distributore reca all'estremità l'ugello nel quale la corrente viene accelerata fino al raggiungimento della velocità torricelliana

$$v_{1,ideale} = \sqrt{2gH_{utile}}$$

$$v_{1, reale} = 0.98 \cdot \sqrt{2gH_{utile}}$$



Nel tubo introduttore si trova la *spina* o *ago Doble*, elemento di regolazione della portata in virtù della possibilità di spostamento assiale per parzializzare la sezione di passaggio



la regolazione di portata avviene attraverso la sola riduzione della sezione di passaggio essendo la v_1 costante in ragione del salto geodetico

L'estremità dell'ago è poi dotata di un tegolo deviatore per la regolazione brusca di portata e per i transitori di avviamento ed arresto



Macchinario idraulico, le turbine

Turbine ad azione **Pelton** (ii)

Il getto della spina investe le pale della ruota (generalmente in numero di 20 – 24) con forma a doppio cucchiaino munite di uno spigolo centrale affilato per la deviazione della corrente di uscita

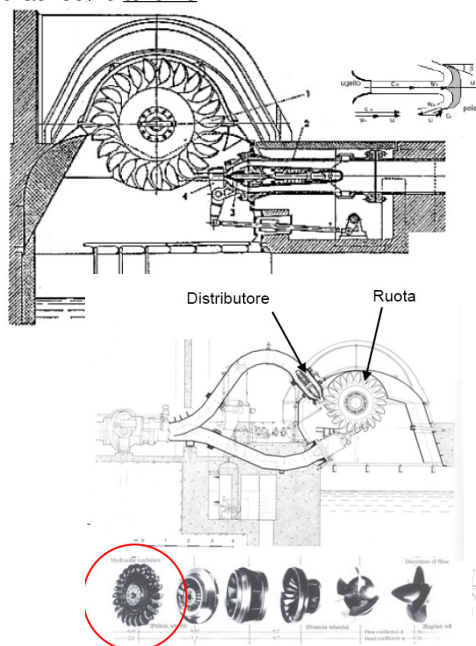
La ruota può essere ad asse verticale o orizzontale

Il numero di distributori può variare a 1 a 8

La ruota è racchiusa da una cassa esterna

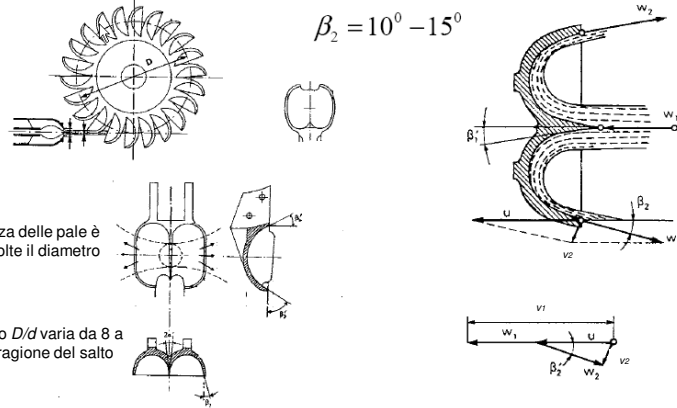
La velocità di fuga della ruota è circa pari a due volte la velocità nominale

Sono macchine adatte ad elevati salti e piccole portate



Macchinario idraulico, le turbine

Turbine ad azione **Pelton** (iii), la ruota



La larghezza delle pale è circa 3-4 volte il diametro del getto d

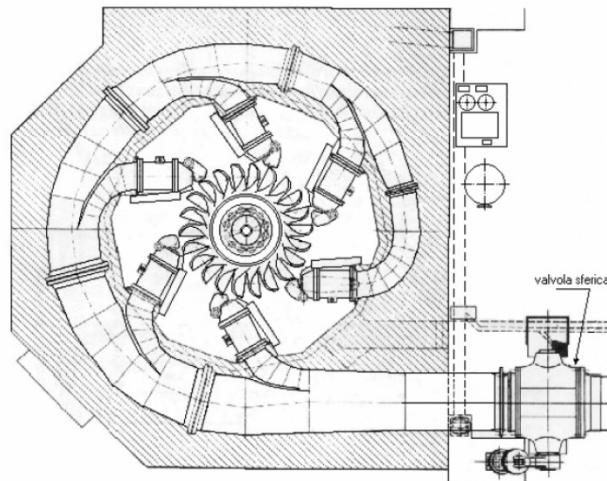
Il rapporto D/d varia da 8 a 15-20 in ragione del salto utile

$$\eta = (v_1^2 - v_2^2) / v_1^2$$

Il rendimento è massimo per $v_2 = 0$

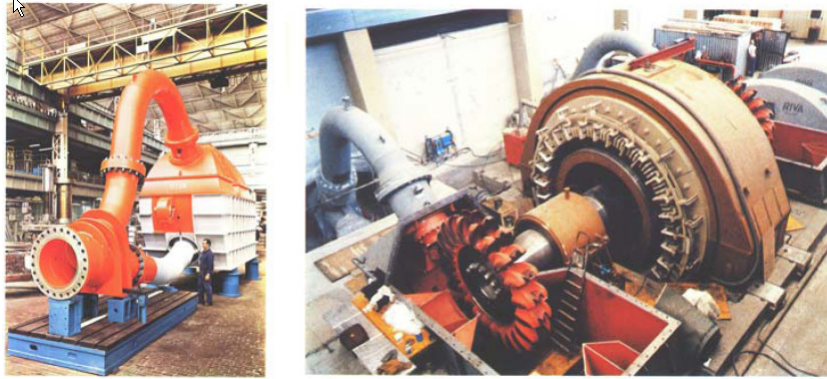
Il rendimento si annulla per $u = 0$ (ruota bloccata) e $v_1 = u$ (ruota alla velocità di fuga)

Macchinario idraulico, le turbine Pelton



Turbina Pelton ad asse verticale a sei getti con valvola rotativa di intercettazione

Macchinario idraulico, le turbine Pelton



FMRGroup @ DMA-URLS 

Macchinario idraulico, le turbine Pelton

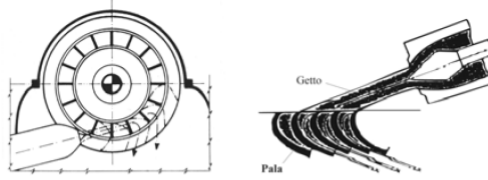


FMRGroup @ DMA-URLS 

Macchinario idraulico, le turbine

Turbine ad azione Turgo

Per salti fra 50 e 250 metri
Simile alle Pelton, ma la pala
è molto diversa



- ⇒ il getto d'acqua colpisce la girante formando un angolo di circa 20° con il piano della girante stessa; il flusso d'acqua entra nella girante da una parte e ne riesce dalla parte opposta fortemente deviato
- ⇒ diametri molto piccoli, se confrontati con gli altri modelli, e di conseguenza da velocità di rotazione molto alte
 - rendono possibile l'accoppiamento diretto del generatore elettrico con l'asse della turbina

Difetti

- ⇒ rendimenti minori rispetto alla Pelton
- ⇒ necessario l'utilizzo di cuscinetti reggispinta assiali

Scarsamente impiegata



Macchinario idraulico, le turbine

Turbine ad azione Banki-Mitchell

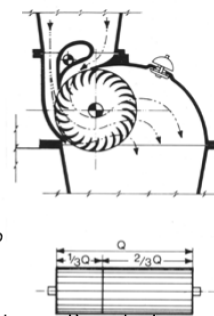
Progettata nel 1903 dall'Ing. MITCHELL

Chiamata anche BANKI od

A FLUSSO INCROCIATO

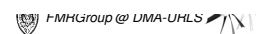
Il campo di impiego si sovrappone a quello della Pelton, Francis e Kaplan: salti tra 1 e 500 m

l'acqua immessa dal distributore sulla periferia esterna della ruota agisce una prima volta sulle pale e prosegue poi attraversando la parte centrale, aperta, della ruota per esercitare una seconda azione di spinta sul lato opposto; dopo questa seconda fase l'acqua finisce nel canale di scarico



ruota caratterizzata da un notevole sviluppo longitudinale e divisa in due o più sezioni mediante particolari accorgimenti, il distributore a palmola a seconda della sua apertura interessa al funzionamento le sole sezioni della ruota che permettono di ottenere il massimo rendimento, che quindi risulta piuttosto alto a tutti i carichi in alcuni casi "tubo diffusore conico" per creare $p < p_{atm}$ nella camera dove si trova la turbina → Δz tra asse ruota e livello dell'acqua non risulta inutilizzabile come nelle classiche turbine ad azione

→ Si sfruttano salti molto bassi (qualche m)



Macchinario idraulico, le turbine

Turbine a reazione

L'energia idraulica disponibile nella sezione immediatamente a monte della turbina viene convertita nel distributore solo in parte in energia cinetica

- ⇒ nel momento in cui il flusso entra nella girante, è ancora in pressione
- ⇒ l'energia viene ceduta dall'acqua alle pale della girante sia sotto forma di velocità che di pressione
 - l'acqua defluisce dal distributore verso la girante con una $V < V_{\text{Torricelliana}}$ e penetra nei canali formati dalle palette adiacenti con una residua energia di pressione
 - durante la corsa sulle pale della ruota l'acqua cede energia alla turbina diminuendo progressivamente sia la velocità che la pressione

Elemento caratteristico

- ⇒ Tubo di aspirazione o diffusore
 - posto sotto la girante
 - tubo divergente che, pescando nel canale di scarico e mantenendosi costantemente pieno d'acqua, provoca una depressione barometrica e quindi un'aspirazione sotto la girante, corrispondente all'altezza di questa sullo specchio libero del canale di scarico
 - sfruttata in turbina anche questa altezza residua che, per basse cadute, costituisce una frazione importante del salto disponibile
- ⇒ In alcuni casi la ruota è posta al disotto del livello dell'acqua allo scarico per evitare i cosiddetti fenomeni di cavitazione



Macchinario idraulico, le turbine

Tipologie di turbine

Turbine Francis,

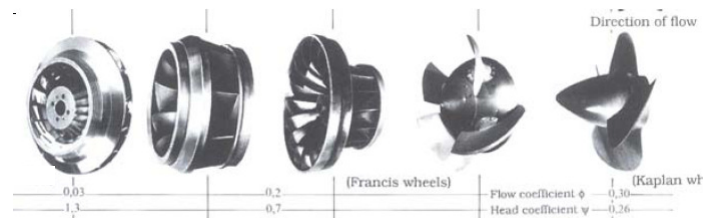
Turbine ad elica,

Turbine Kaplan

i. turbine assiali tubolari (TAT)

ii. turbine a bulbo (Pit Turbine)

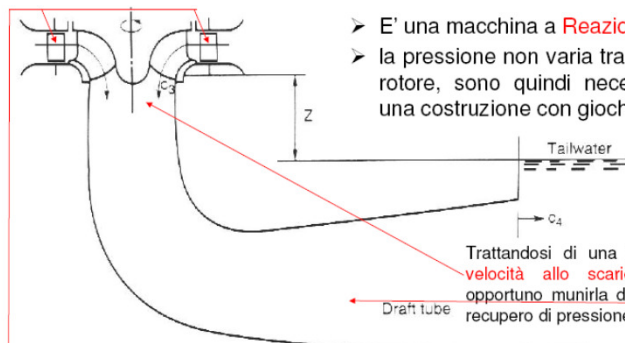
iii. turbine a S



Macchinario idraulico, le turbine

Turbine a reazione, **turbina Francis (i)**

La turbina a reazione universalmente diffusa è la turbina Francis, inventata, nella configurazione centripeta radiale-assiale dall'ingegnere americano James Bickens Francis (1815-1892).



- E' una macchina a **Reazione $R = 0,4-0,6$**
- la pressione non varia tra monte e valle del rotore, sono quindi necessarie tenute ed una costruzione con giochi molto ridotti

Trattandosi di una macchina centripeta la **velocità allo scarico** è elevata, ed è opportuno munirla di un **diffusore** ai fini del recupero di pressione

- E' una macchina centripeta (ingresso radiale – uscita assiale)
- Spesso lo statore ("distributore") è a geometria variabile ("**Anello Fink**") in modo da mantenere rendimento elevato per portate diverse da quella di progetto

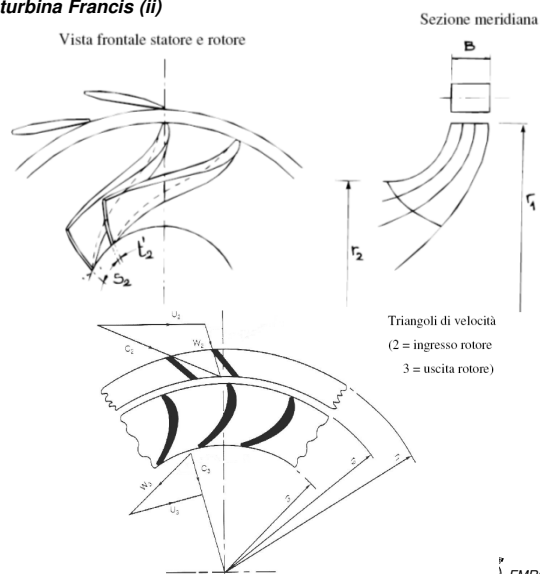


FMRGroup @ DMA-URLS



Macchinario idraulico, le turbine

Turbine a reazione, **turbina Francis (ii)**



Triangoli di velocità
(2 = ingresso rotore
3 = uscita rotore)

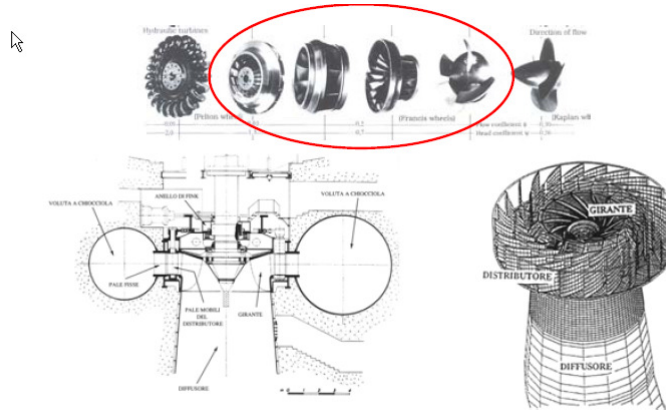


FMRGroup @ DMA-URLS



Macchinario idraulico, le turbine

Turbine a reazione, **turbina Francis (iii)**



Sono turbine molto diffuse per dislivelli fino a circa 500 m.

Il grado di reazione e quindi il loro sviluppo asso-radiale varia con η_s .

Macchinario idraulico, le turbine

Turbine a reazione, **turbina Francis (iv)**

per la regolazione si usa l'ANELLO DI FINK
in sostanza si varia la sezione di "gola"



Fig. 11.1.5 - Anello di Fink

chiudendo il distributore
 w_1 tende verso le
incidenze maggiori \Rightarrow
cresce il carico sulla
macchina!



Macchinario idraulico, le turbine

Turbine a reazione, **turbina Francis (v)**

E' una girante centripeta.

Il numero di pale varia da 8 a 20.

All'aumentare del numero di giri specifico si nota;

- diminuzione numero di pale
- riduzione sviluppo radiale
- aumento distanza tra statore e rotore



Macchinario idraulico, le turbine

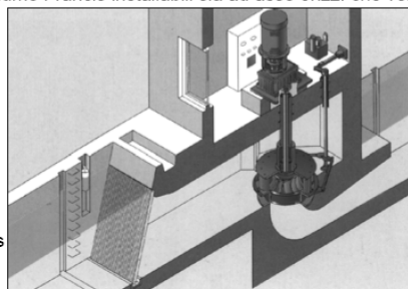
Turbine a reazione, **turbina Francis (vi)**

Con voluta a spirale (*Spiral Francis*)

- rendimenti ottimali per potenze comprese tra il 40 ed il 100 % della potenza massima; le curve di rendimento sono diverse a seconda della velocità specifica della turbina

Senza voluta a spirale (*Open Flume*)

- l'adattamento ai diversi valori di salto e portata è ottenuto variando il diametro della girante, la velocità di rotazione ed alcuni parametri dimensionali
- struttura assolutamente compatta dato che non hanno la voluta a spirale
- turbine Open-flume Francis installabili sia ad asse orizz. che vert.



→ Open-Flume Francis

Macchinario idraulico, le turbine

Turbine a reazione, **turbina ad elica**

Turbine a reazione a flusso assiale, per basse cadute

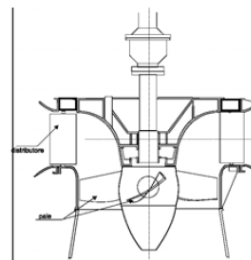
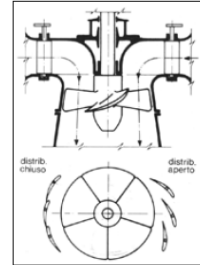
- ⇒ Alto grado di reazione (0.65 – 0.70)
- ⇒ Limitato numero di pale: 3-4-5 (max 7-8), calettate su mozzo centrale
- ⇒ Distributore lontano dalla girante. Flusso deviato con grande anticipo da radiale a completamente assiale prima di investire la girante stessa

Lo schema è simile alle Francis

- ⇒ voluta a spirale, predistributore, distributore, girante
- ⇒ Le pale della girante non sono regolabili (necessario H e Q costanti)

Relativamente all'uso di turbine ad elica in impianti di piccola taglia

- ⇒ Salti tra 2-3 e ~ 25 m
- ⇒ Portate fra pochi m³/s fino a ~ 130-150 m³/s



FMRGroup @ DMA-URLS

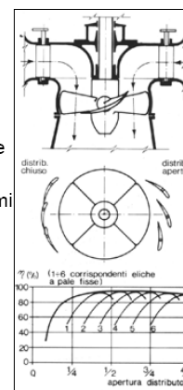
Macchinario idraulico, le turbine

Turbine a reazione, **turbina Kaplan**

Ideata nel 1912 da Victor Kaplan sulla base di studi che miravano a migliorare le ruote ad elica

Turbina Kaplan: macchina a **doppia regolazione** (nel distributore e nella girante) con la girante ad elica a pale orientabili con continuità tra due posizioni estreme a mezzo di opportuni dispositivi idraulici

- ⇒ Per ciascuna posizione di apertura del distributore, alle pale della girante viene fatta assumere l'inclinazione più idonea per ottenere dall'acqua il massimo rendimento
- ⇒ La curva del rendimento risulta quindi l'inviluppo dei valori massimi di tante corrispondenti ruote a elica a pale fisse
 - η si mantiene prossimo a quello massimo per un ampio campo di variazione della portata (fino a ~ 30 % della Q_{nom})
- ⇒ Per applicazioni tipiche SHP → voluta a spirale assente, flusso in turbina completamente assiale
 - **turbine a flusso assiale**, adatte per impianti a bassa e bassissima caduta (non superiore a 25-30 metri) → turbine standard per salti medio bassi: TAT, PIT, S
- ⇒ Esistono anche Kaplan a **singola regolazione** (solo nella girante, distributore fisso)



FMRGroup @ DMA-URLS

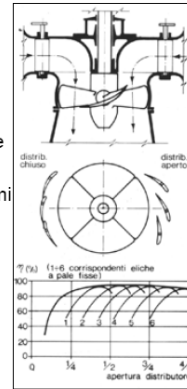
Macchinario idraulico, le turbine

Turbine a reazione, **turbina Kaplan**

Ideata nel 1912 da Victor Kaplan sulla base di studi che miravano a migliorare le ruote ad elica

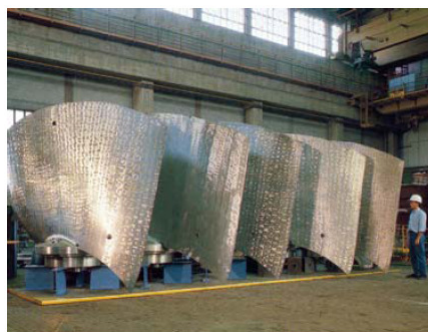
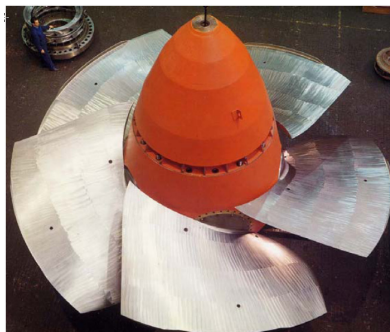
Turbina Kaplan: macchina a **doppia regolazione** (nel distributore e nella girante) con la girante ad elica a pale orientabili con continuità tra due posizioni estreme a mezzo di opportuni dispositivi idraulici

- ⇒ Per ciascuna posizione di apertura del distributore, alle pale della girante viene fatta assumere l'inclinazione più idonea per ottenere dall'acqua il massimo rendimento
- ⇒ La curva del rendimento risulta quindi l'involuppo dei valori massimi di tante corrispondenti ruote a elica a pale fisse
 - η si mantiene prossimo a quello massimo per un ampio campo di variazione della portata (fino a ~ 30 % della Q_{nom})
- ⇒ Per applicazioni tipiche SHP → voluta a spirale assente, flusso in turbina completamente assiale
 - **turbine a flusso assiale**, adatte per impianti a bassa e bassissima caduta (non superiore a 25-30 metri) → turbine standard per salti medio bassi: TAT, PIT, S
- ⇒ Esistono anche Kaplan a **singola regolazione** (solo nella girante, distributore fisso)



Macchinario idraulico, le turbine

Turbine a reazione, **turbina Kaplan**



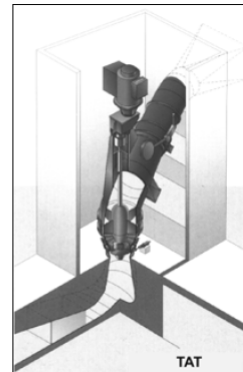
Macchinario idraulico, le turbine

Turbine a reazione, **turbina TAT**

Riva Hydroart - TAT

TAT = Turbina Assiale Tubolare (*Tubular Axial Turbine*)

- ⇒ Il generatore elettrico è situato all'esterno del flusso d'acqua
- ⇒ Le soluzioni per l'installazione del gruppo sono molteplici: ad asse verticale o inclinato, schema a sifone, generatore elettrico direttamente accoppiato oppure tramite moltiplicatore di velocità, tubo d'aspirazione conico oppure a gomito
- ⇒ Semplice o doppia regolazione



Macchinario idraulico, le turbine

Turbine a reazione, **turbina a bulbo**

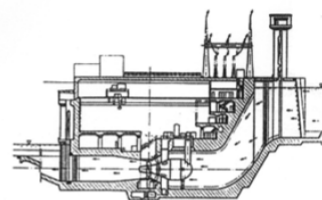
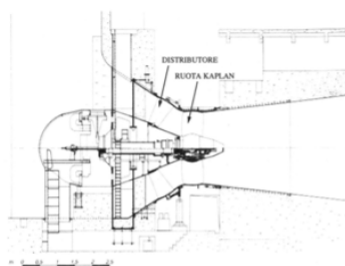


Fig. 12.3.2 - Rappresentazione schematica dell'installazione

Sono macchine molto diffuse per **dislivelli inferiori ad i 10 m.**

L'alternatore è contenuto in un "**bulbo**" completamente immerso in acqua.

In questo tipo di macchina il tubo diffusore ha un ruolo di fondamentale importanza.

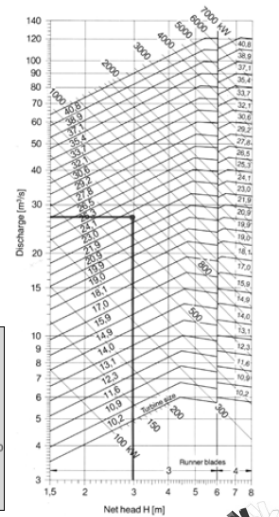
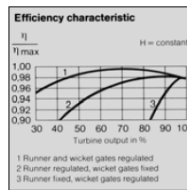
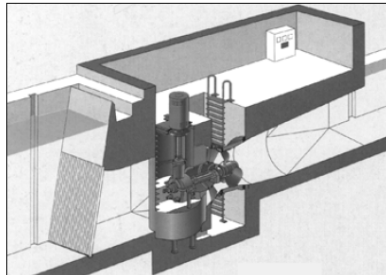


Macchinario idraulico, le turbine

Turbine a reazione, **turbina a bulbo**

Riva Hydroart – Turbine a bulbo (PIT)

- ⇒ Il generatore è posizionato in un bulbo d'acciaio posizionato a monte della girante
- ⇒ Bassissime cadute (< 10 m)
 - Se $H < 6\text{ m}$ → girante a 3 pale
 - Altrimenti → 4 pale
- Doppia o semplice regolazione (Semplice: distributore o girante)
- ⇒ Struttura molto compatta
- ⇒ Posizionamento solo orizzontale



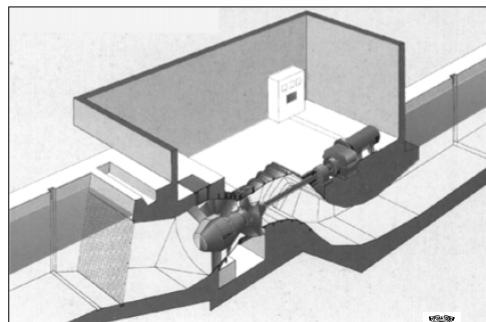
FMRGroup @ DMA-URLS

Macchinario idraulico, le turbine

Turbine a reazione, **turbina a S**

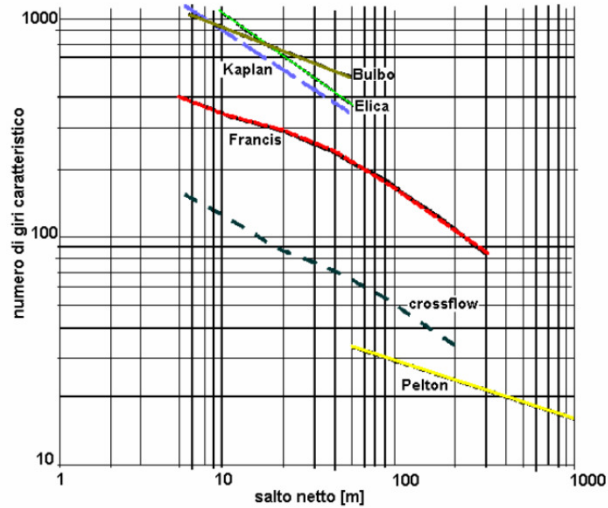
Riva Hydroart – Turbine ad S

- Turbine a S → campo delle basse e bassissime cadute (< 18-20 metri), con potenze che possono arrivare fino a 15 MW
- regolazione e prestazioni della macchina del tutto simili a quelle dei gruppi bulbo
- ⇒ si differenziano solo per avere il generatore a valle della girante invece che a monte.
- Per il resto (disposizione, taglie, moltiplicatori di velocità) sono del tutto simili alle turbine a bulbo



FMRGroup @ DMA-URLS

Criteri di scelta della turbina idraulica



Criteri di scelta della turbina idraulica

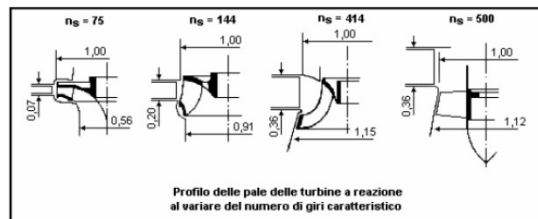
Il numero di giri caratteristico è funzione di alcuni parametri specifici delle turbine:

- per le turbine Pelton

$$n_s = 235 \frac{d}{D}$$

- per le turbine a reazione

$$n_s = 430 \sqrt{\frac{1g\alpha_1}{\cos\alpha_1}} \cdot \sqrt{\frac{1}{1-\varepsilon}} \cdot \sqrt{\frac{b_0}{D_1}}$$



Profilo delle pale delle turbine a reazione al variare del numero di giri caratteristico

	Salto [m]	n_s
Pelton	1000+400	5+25
Francis lente	300+100	60+120
Francis normali	100+50	120+250
Francis veloci	50+20	250+500
Eliche o Kaplan	50+5	500+1000



