

Turbine idrauliche per grandi impianti

Definizioni di base

- **Caduta o salto disponibile totale H_d** la differenza tra le altezze totali (energie) associate a due punti, uno a monte (**m**) e uno a valle (**v**)

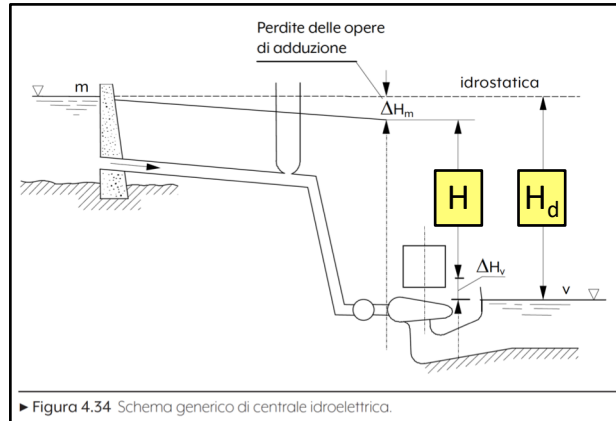
$$H_d = \left(H_m + \frac{V_m^2}{2g} + \frac{P_m}{\gamma} \right) - \left(H_v + \frac{V_v^2}{2g} + \frac{P_v}{\gamma} \right) \cong H_m - H_v = \Delta H_{\text{geodetico}}$$

- Il **salto motore netto H** si ottiene detraendo le perdite di carico associate alle opere di
 - Adduzione, a monte della turbina $\rightarrow \Delta H_m$
 - Scarico, a valle della turbina $\rightarrow \Delta H_v$

$$\Delta H = \Delta H_m + \Delta H_v \quad \rightarrow \quad H = H_d - \Delta H$$

- **Potenza idraulica immessa in turbina P_i**

$$P_i = \gamma \cdot Q \cdot H = 9,81 \cdot Q \cdot H \quad [\text{kW}]$$



Turbine idrauliche per grandi impianti

Definizioni di base

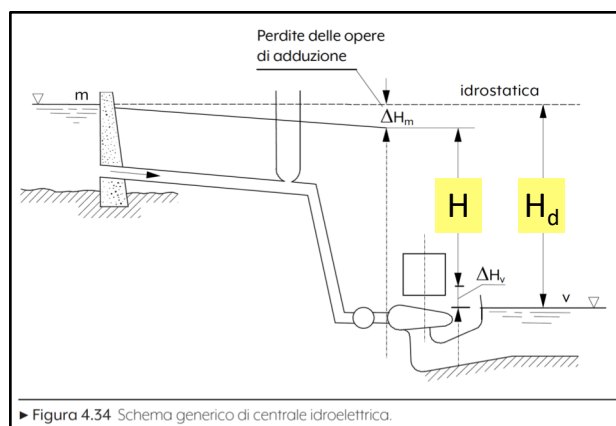
- **Rendimento globale della turbina η_t**

- η_{idr} : **rendimento idraulico** (vortici, attriti, in particolare nella girante della turbina) $\rightarrow 90\div 95\%$
- η_{vol} : **rendimento volumetrico** (fughe di fluido attraverso i giochi tra girante e parti fisse) $\rightarrow \sim 99\%$
- η_{mecc} : **rendimento meccanico** (attriti nei supporti e assorbimento di potenza degli ausiliari) $\rightarrow \sim 99\%$

Π
 $\sim 90\div 94\%$

- **Potenza meccanica disponibile all'asse turbina P_t**

$$P_t = \eta_t \cdot P_i$$



Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

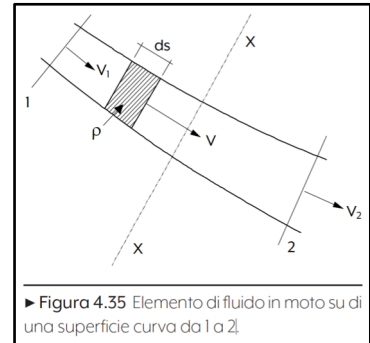
Tipologie di turbine – Modalità di azione

- Un elemento di fluido di lunghezza ds in moto tra due sezioni (1 e 2) genera una forza verso la direzione x-x se lungo tale direzione si manifesta una accelerazione a_x

$$dF_x = dm \cdot a_x = \rho \cdot A \cdot ds \cdot \frac{dv_x}{dt} = \rho A \frac{ds}{dt} \cdot dv_x = \rho Q dv_x$$

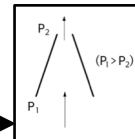
↓ $\int_{1 \rightarrow 2}$

$$F_x = \rho Q (v_{1x} - v_{2x}) \quad [N]$$



► Figura 4.35 Elemento di fluido in moto su di una superficie curva da 1 a 2.

- Variazione della componente di velocità secondo la direzione di moto → Forza F_x nella sezione x-x
 - Modificare la sezione di deflusso → Variazione del modulo del vettore velocità → Variazione di pressione → **Turbine a reazione**
 - Deviare il moto del fluido → Modificare la sola direzione del vettore velocità → Funzionamento e pressione costante → **Turbine ad azione**



77

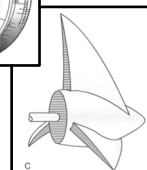
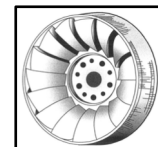
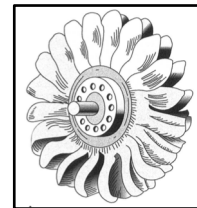
Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Tipologie di turbine – Modalità di azione

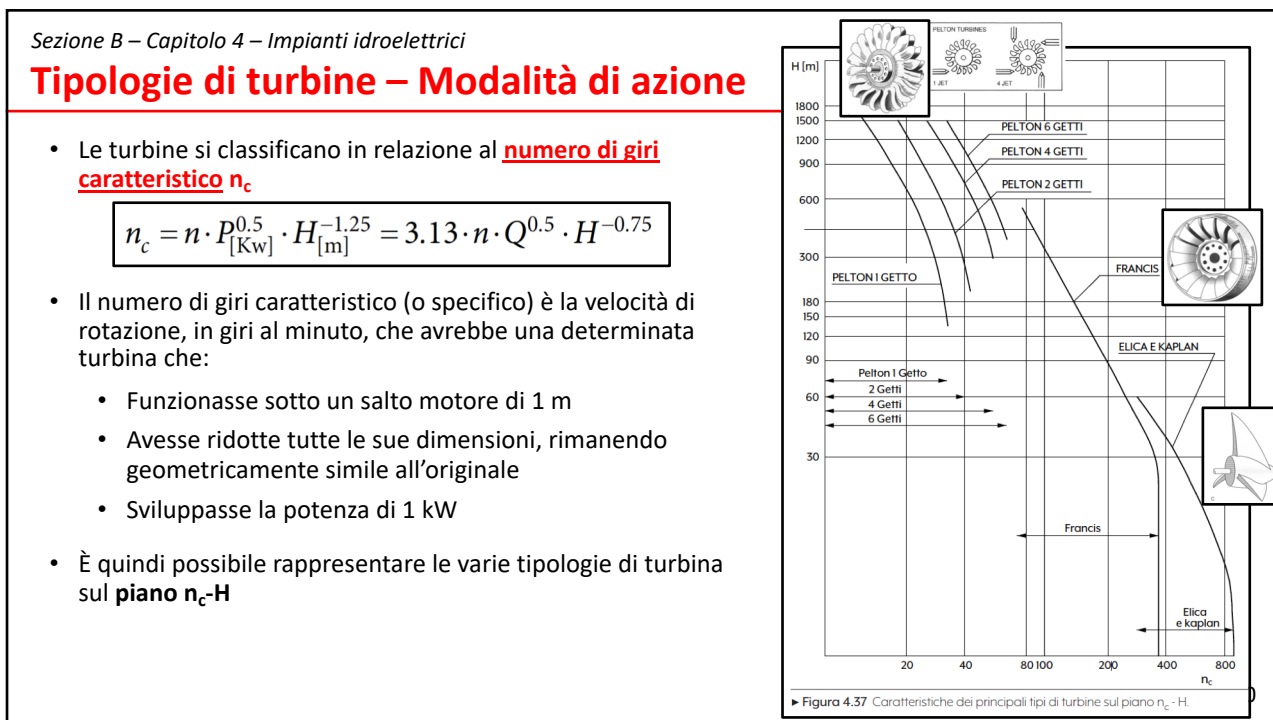
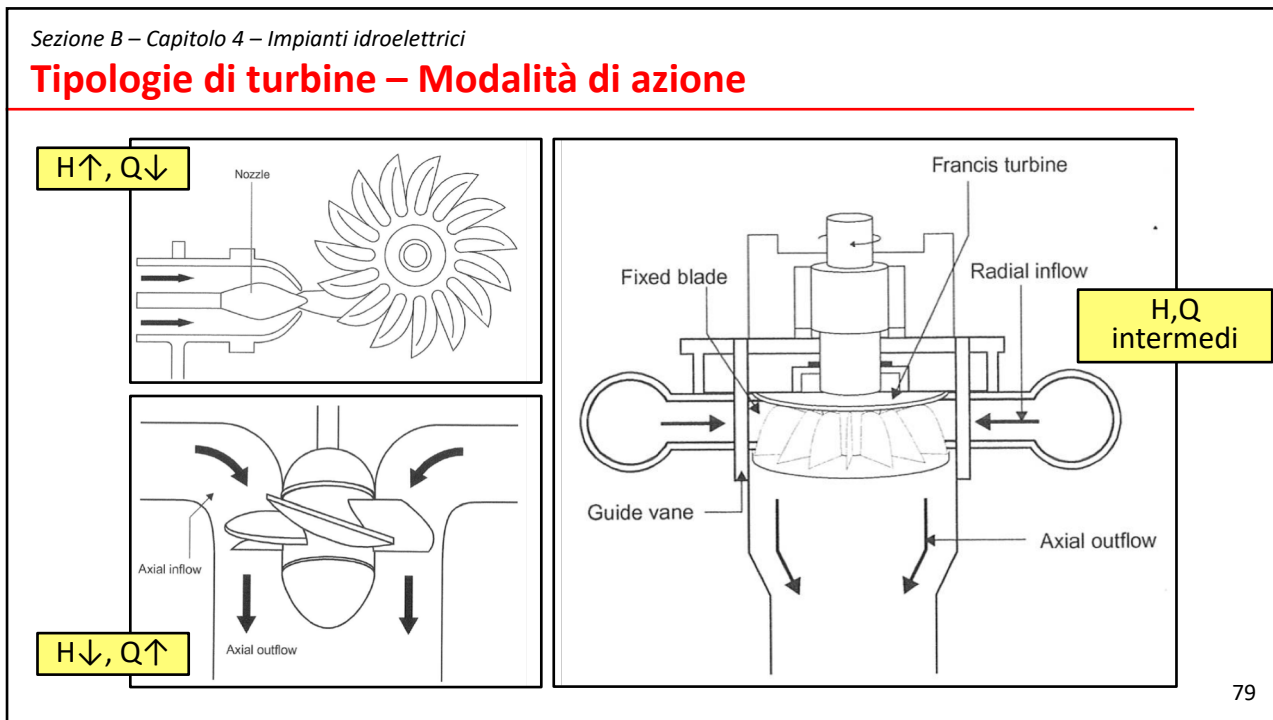
- Il **grado di reazione g.r.** esprime la quota parte di energia potenziale che non è convertita in cinetica nel distributore
 - $V_{i.r.}$ è la velocità dell'acqua in ingresso alla girante
 - $g.r.$ è compreso tra 0 e 1

$$g.r. = \frac{H - \frac{V_{i.r.}^2}{2g}}{H}$$

- Turbine ad azione → Nel distributore (spina Doble) avviene l'intera conversione di energia da potenziale a cinetica → Turbina opera a pressione atmosferica
 - Turbina **Pelton** → $g.r. = 0$
- Turbina a reazione → La velocità di efflusso dal distributore (ovvero la velocità di ingresso in turbina) non corrisponde all'intera energia potenziale → Acqua in pressione
 - Turbine **Francis** e **Kaplan** → $g.r. > 0$
 - Nelle turbine a reazione, una parte dell'energia in ingresso alla turbina è comunque di tipo cinetico ($g.r. < 1$)
 - Il grado di reazione aumenta con la diminuzione del salto motore



78



Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Tipologie di turbine – Modalità di azione

- La scelta della turbina può non essere univoca (es. per $H = 450$ m)
- Criteri di scelta del progettista:
 - Esperienza professionale
 - Analisi tecnico-economiche

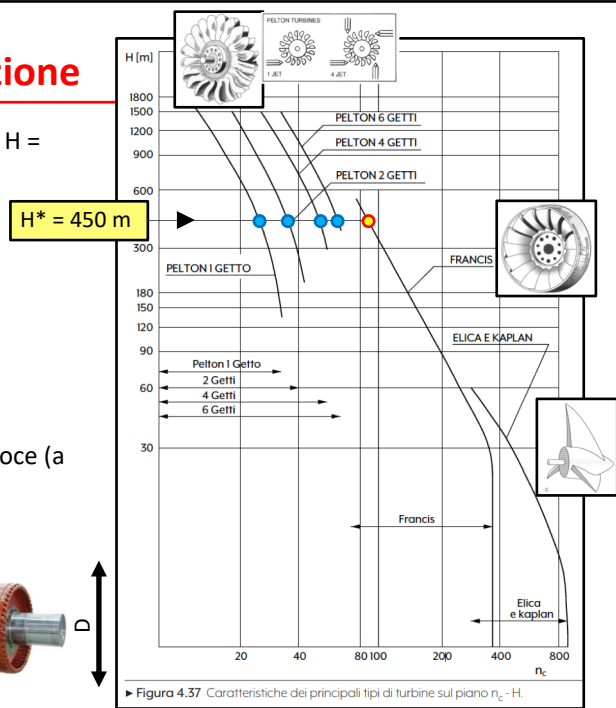
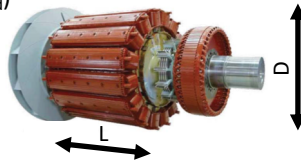
- Le diverse soluzioni hanno n_c diversi

$$n = n_c \cdot P^{-0.5} \cdot H^{1.25} \rightarrow n \propto n_c$$

- Turbina Francis sarebbe una macchina più veloce (a parità di salto e potenza)
- Dimensioni del gruppo turbina-alternatore ↓ (costante di utilizzazione C_d)

$$D^2 L = C_d \cdot \frac{P_a}{n} \propto \frac{1}{n}$$

- Costo ↓



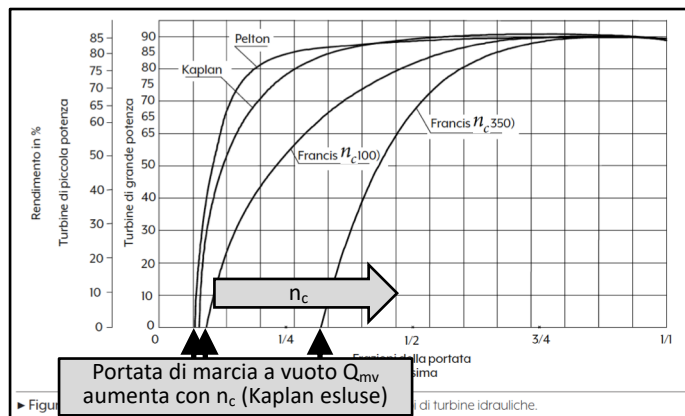
► Figura 4.37 Caratteristiche dei principali tipi di turbine sul piano $n_c - H$.

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Ripartizione della potenza complessiva di centrale

- Può essere opportuno (scelta progettuale) o necessario (disponibilità di turbine e altri dispositivi correlati) **ripartire la potenza complessiva della centrale** in più gruppi di generazione operanti in parallelo
- Aspetti da considerare:

- Limite di potenza delle turbine realizzabili
- Andamento del rendimento a regimi parziali ($P < P_{max}$)
 - In figura è riportato l'andamento in funzione della sola portata turbinata Q , rispetto a Q_{max}
- Contenimento delle spese di impianto e di esercizio
 - Per questo aspetto, la soluzione con il minor numero di gruppi è evidentemente la più conveniente



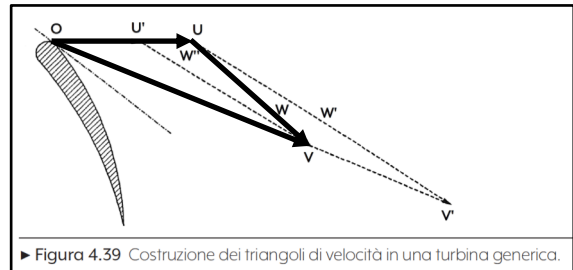
Criterio di base: migliore utilizzazione dell'energia idraulica disponibile →
Massimo rendimento medio ponderale per i vari regimi di funzionamento previsti

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Diagrammi collinari

- Triangoli delle velocità di una generica turbina
 - Velocità periferica U della girante (di diametro D , alla velocità di rotazione n)
 - Velocità assoluta dell'acqua V , dove $\varphi = (1 - g.r.)$

$$\begin{cases} U = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} \propto n \\ V = \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \propto \sqrt{H} \end{cases}$$



► Figura 4.39 Costruzione dei triangoli di velocità in una turbina generica.

- Corretto funzionamento della turbina (massimo rendimento) → Il vettore velocità relativa W deve essere tangente al profilo di ingresso della palettatura

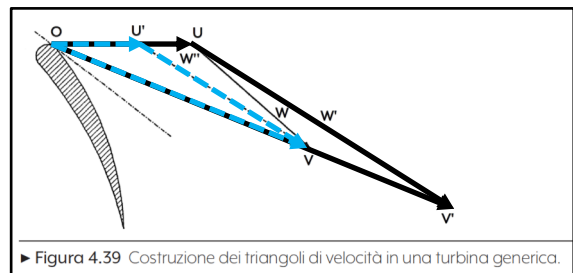
83

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Diagrammi collinari

- Cosa succede se variano le condizioni di lavoro rispetto alle condizioni ottimali?

- Ad esempio, se aumenta il salto, ovvero $H \rightarrow H'$ ($H' > H$)
 - Aumenta la velocità assoluta dell'acqua ($V' > V$)
 - Cambia la velocità relativa $W \rightarrow W'$
- Il funzionamento reale della turbina (triangolo nero $UW'V'$) è analogo al funzionamento rappresentato dal triangolo simile $U'W''V$ (triangolo in azzurro tratteggiato)



► Figura 4.39 Costruzione dei triangoli di velocità in una turbina generica.

- Per la similitudine tra i triangoli si ha

$$\frac{V'}{V} = \frac{U}{U'}$$

$$\begin{cases} U = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} \propto n \\ V = \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \propto \sqrt{H} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} V \propto \sqrt{H} \\ U \propto n \end{cases} \rightarrow \sqrt{\frac{H'}{H}} = \frac{n}{n'} \rightarrow n' = n \sqrt{\frac{H}{H'}}$$

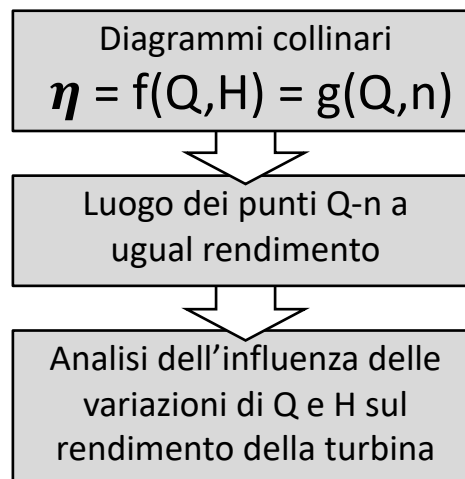
Se $H \rightarrow H'$, la turbina si porterà a lavorare in condizioni analoghe a quelle che avrebbe con la stessa portata e regime di rotazione n'

84

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Diagrammi collinari

- I **diagrammi collinari** costituiscono la rappresentazione più completa e sintetica del comportamento delle turbine nelle varie condizioni di funzionamento
 - Viene rappresentato il rendimento della turbina al variare della portata Q e del salto H (ovvero del numero di giri n, vedi slide precedenti)
 - Sono rappresentate quindi delle curve iso-rendimento al variare di Q e H
 - I diagrammi collinari conservano la loro validità per turbine simili, aventi cioè la stessa velocità caratteristica
 - L'asse orizzontale può essere riferito al regime di rotazione in cui si ha il massimo rendimento della turbina
 - L'asse verticale può essere riferito alla portata della macchina simile con salto unitario e diametro della girante unitario

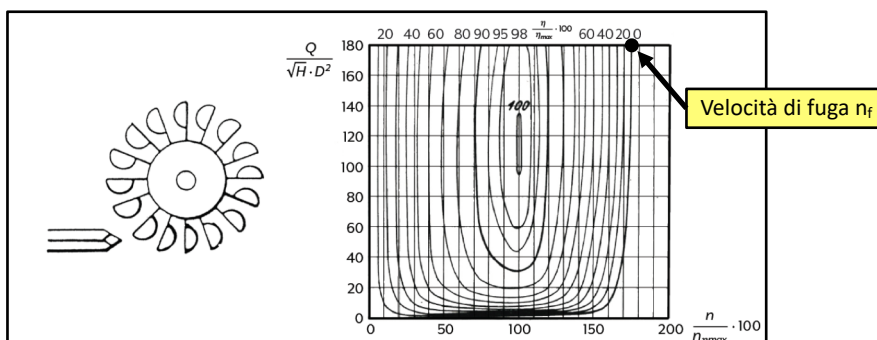


85

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Diagrammi collinari

- Per la **turbina Pelton**:
 - Il rendimento si conserva elevato per ampie escursioni di portata
 - Comportamento non ideale per variazioni di H → variazioni di n
 - Le turbine Pelton funzionano con salti elevati, per cui le variazioni relative di salto $\Delta H/H \downarrow$
 - La **velocità di fuga n_f** è quella raggiunta dal gruppo a vuoto ($\eta=0$) con massima apertura del distributore



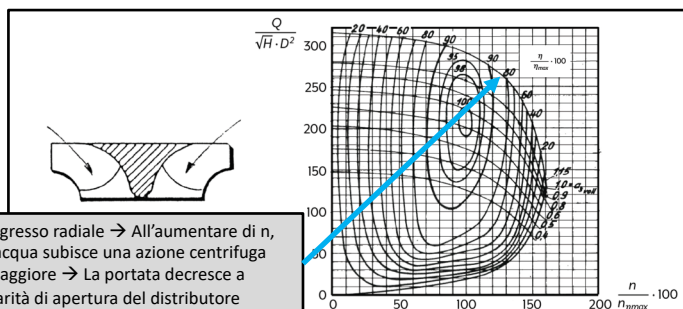
► Figura 4.40 Esempio di diagramma collinare di turbine Pelton ($n_c = 55, n \cdot D \cdot H^{0.5} = 50$).

86

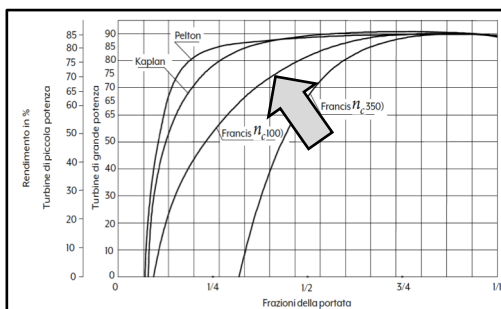
Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Diagrammi collinari

- Per la **turbina Francis lente** (n_c basso, $\approx 70 \div 100$):
 - Maggior apertura delle curve iso-rendimento \rightarrow Rispetto alle Pelton, migliore adattamento al funzionamento con salto H variabile
 - Sono tuttavia piuttosto sensibili alla variazione della portata \rightarrow Sconsigliato funzionamento a regime fortemente parzializzato



► Figura 4.41 Esempio di diagramma collinare di turbine Francis lente ($n_c = 75, n \cdot D \cdot H^{0.5} = 53$).



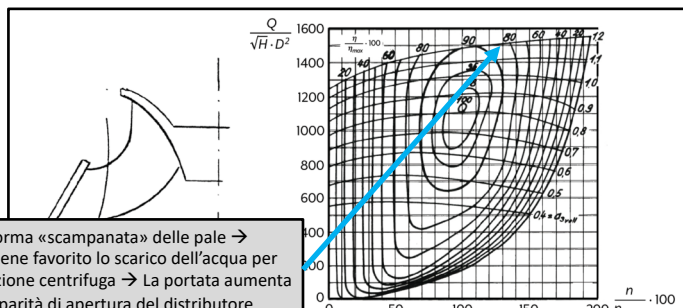
► Figura 4.38 Caratteristiche di rendimento dei principali tipi di turbine idrauliche.

87

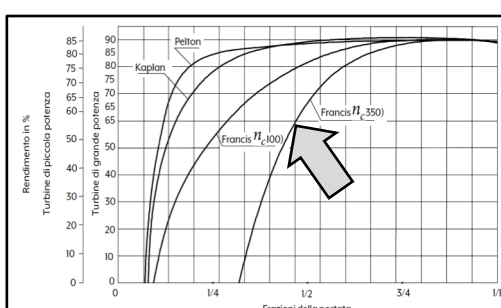
Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Diagrammi collinari

- Per la **turbina Francis veloci** (n_c alto, $\approx 250 \div 350$):
 - Le curve iso-rendimento diventano sempre più aperte e disposte in orizzontale \rightarrow Il funzionamento a portata variabile è ulteriormente sfavorito \rightarrow Decrescita marcata del rendimento per $Q/Q_{max} \downarrow$
 - Se $n_c \uparrow \rightarrow$ Aumenta la portata di marcia a vuoto Q_{mv}
 - (5-10)% Q_{max} per Pelton \rightarrow (30-40)% Q_{max} per le turbine ad elica veloci (senza regolazione di passo)



► Figura 4.42 Esempio di diagramma collinare di turbine Francis veloci ($n_c = 300, n \cdot D \cdot H^{0.5} = 89$).



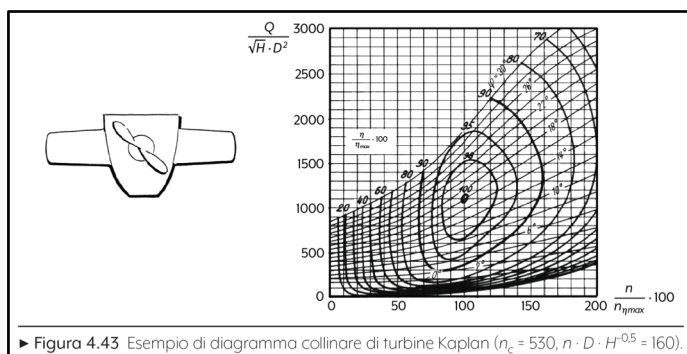
► Figura 4.38 Caratteristiche di rendimento dei principali tipi di turbine idrauliche.

88

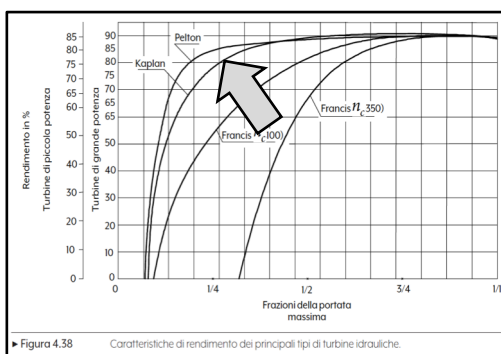
Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Diagrammi collinari

- Per la **turbina ad elica** (n_c molto alto, >300):
 - Le turbine a elica con pale fisse avrebbero un crollo del rendimento per portate appena inferiori a quella massima
 - Si realizzano giranti con regolazione continua del passo (**turbine Kaplan**) per ottenere una curva di rendimento elevata anche a basse portate → Si riduce **notevolmente** la portata di marcia a vuoto Q_{mv}



► Figura 4.43 Esempio di diagramma collinare di turbine Kaplan ($n_c = 530$, $n \cdot D \cdot H^{0,5} = 160$).

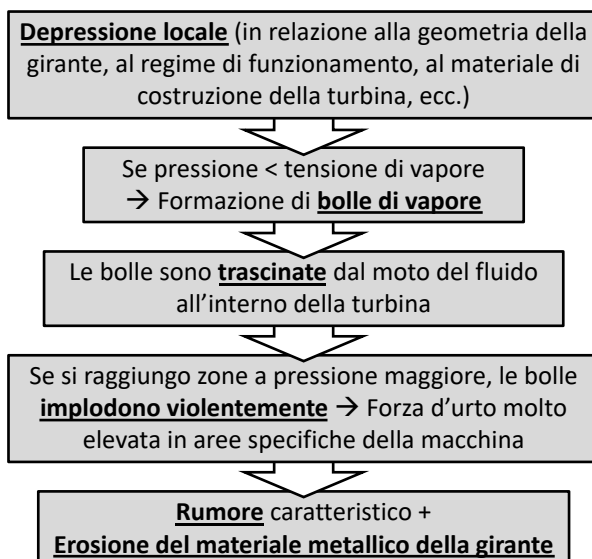


► Figura 4.38 Caratteristiche di rendimento dei principali tipi di turbine idrauliche.

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Cavitazione

- Nel caso di **turbine ad azione**, la pressione dell'acqua in turbina è quella atmosferica
 - L'installazione deve essere fatta sopra al livello del bacino di valle (scarico per gravità)
- Per le **turbine a reazione** l'altezza di installazione non è arbitraria
 - È necessario mantenere la pressione del fluido nella turbina al di sopra della tensione di vapore al fine di evitare la comparsa di **cavitazione**



Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Cavitazione

Giranti di turbine Kaplan (sopra) e Francis (sinistra, vista da sotto) con seri problemi di cavitazione

91

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Cavitazione

- È possibile evitare (o perlomeno diminuire) il manifestarsi della cavitazione tramite:
 - Utilizzo di materiali aventi migliori caratteristiche meccaniche (tipicamente acciaio inox)
 - **Installazione corretta** del macchinario idraulico
 - **Massima altezza di aspirazione**, rispetto al livello di pelo libero del bacino a valle ($H_{a,max}$)
 - **Coefficiente di cavitazione** (o **coefficiente di Thoma**) σ

$$\sigma = \frac{H_b - H_v - H_a}{H} = f(n_c)$$

- H_b : altezza barometrica nel punto d'installazione della turbina (corrispondente alla pressione atmosferica) $\cong 10$ m
- H_v : altezza corrispondente alla tensione di vapore ($\sim 0,2$ m), che dipende dalla temperatura dell'acqua
- H_a : altezza di aspirazione
- H : salto motore utile

$H_a \cong 9.8 - \cdot \sigma \cdot H \quad [m]$

- Quanto vale numericamente il coefficiente di Thoma σ ?

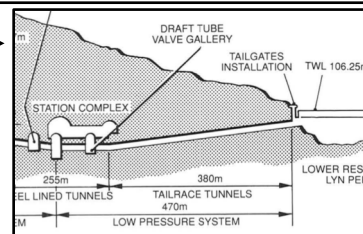
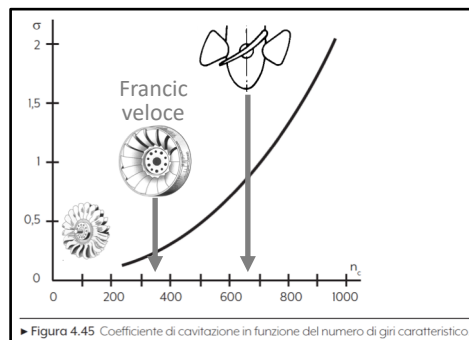
► **Figura 4.44** Individuazione dell'altezza massima di aspirazione.

92

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Cavitazione

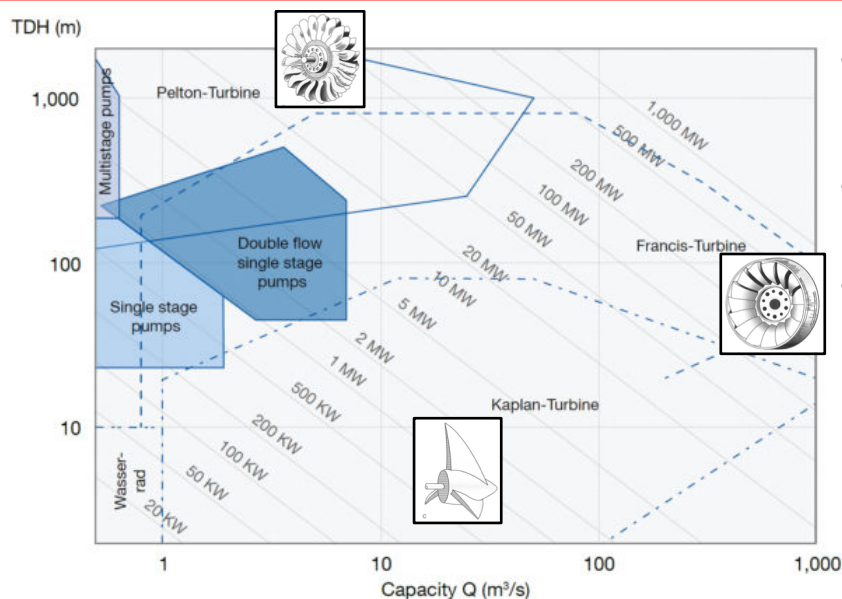
- È possibile evitare (o perlomeno diminuire) il manifestarsi della cavitazione tramite:
 - Utilizzo di materiali aventi migliori caratteristiche meccaniche (tipicamente acciaio inox)
 - Installazione corretta** del macchinario idraulico
 - I costruttori forniscono l'andamento grafico di σ in funzione di n_c
 - Tipo di macchina (n_c) $\rightarrow \sigma \rightarrow H_{a,max}$ (noto H)
 - Se velocità caratteristica $n_c \uparrow \rightarrow \sigma \uparrow$
 - $H_{a,max}$ può diventare negativa
 - Installazione della turbina **"sotto battente"** (altezza sul livello del mare inferiore rispetto al pelo libero del bacino di scarico)
 - Adozione di organi di intercettazione a valle della turbina, per evitare allagamenti se la turbina è aperta per manutenzione



93

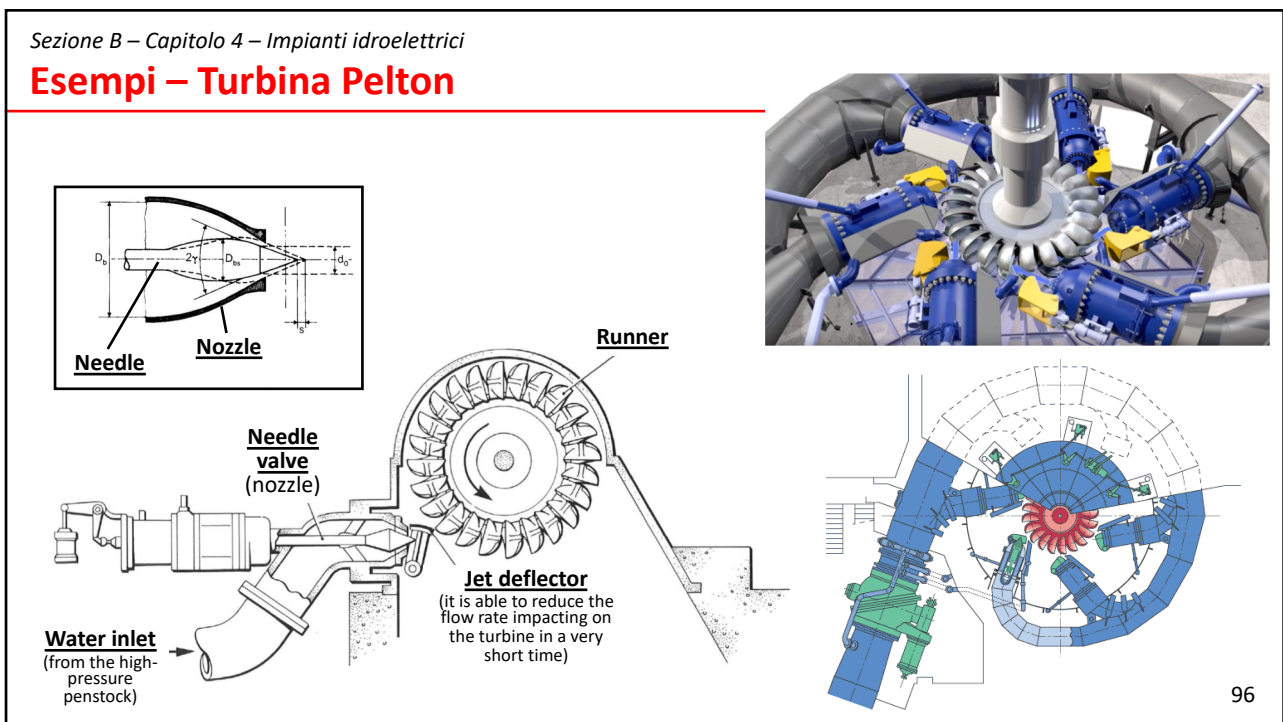
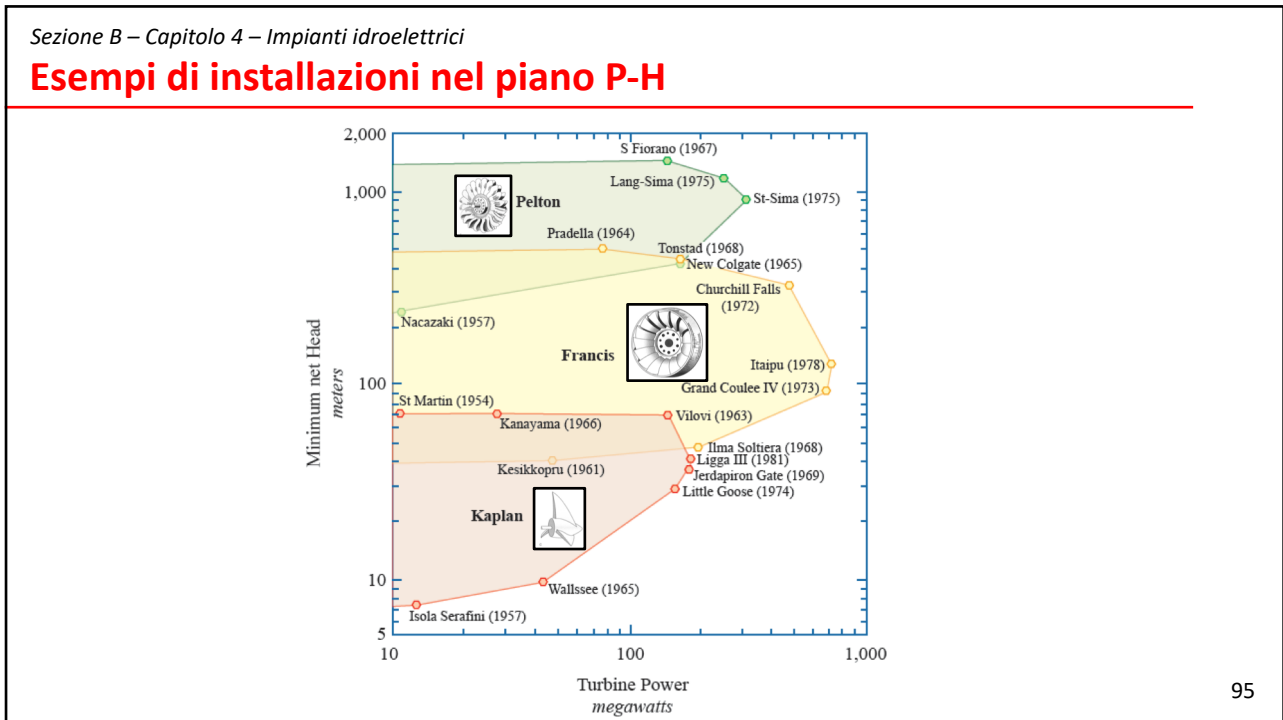
Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

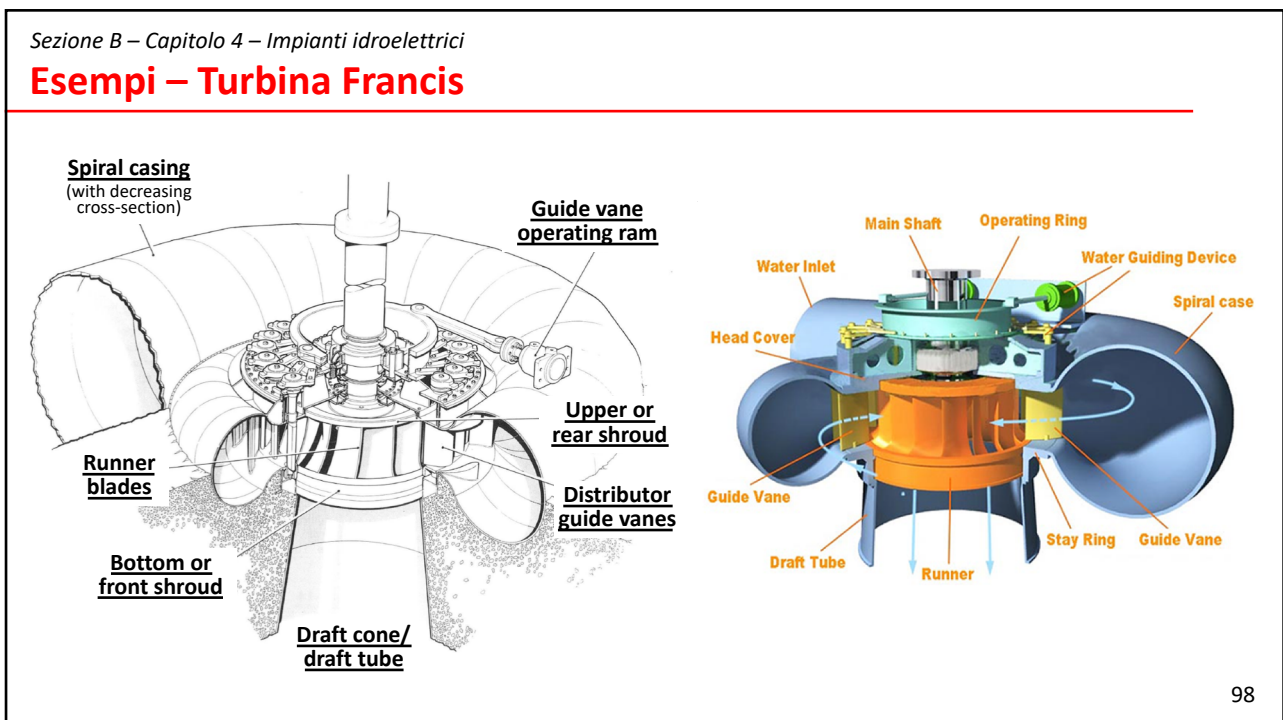
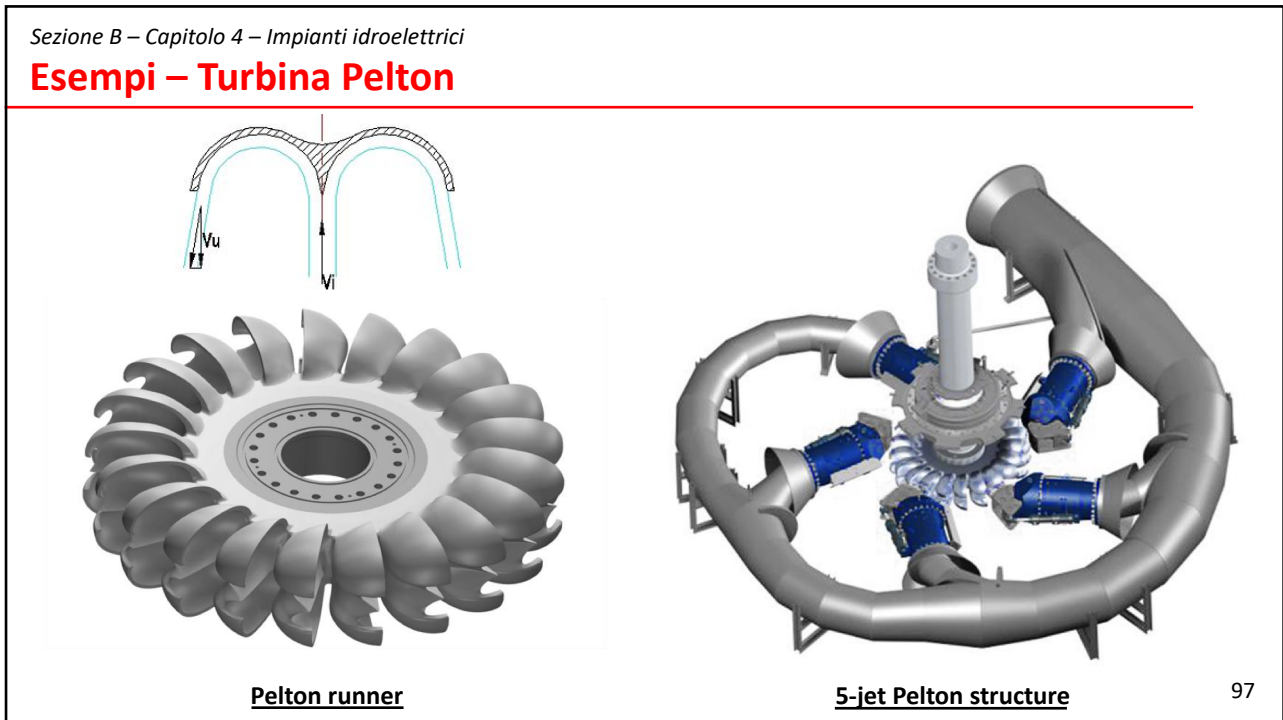
Posizionamento dei tipi di turbina nel piano Q-H



- Nel piano Q-H, usando una doppia scala logaritmica, le **curve a potenza costante** diventano rettilinee
- La portata delle turbine può essere molto più elevata della portata delle pompe
- Per aumentare la prevalenza delle pompe possono essere realizzate macchine multistadio

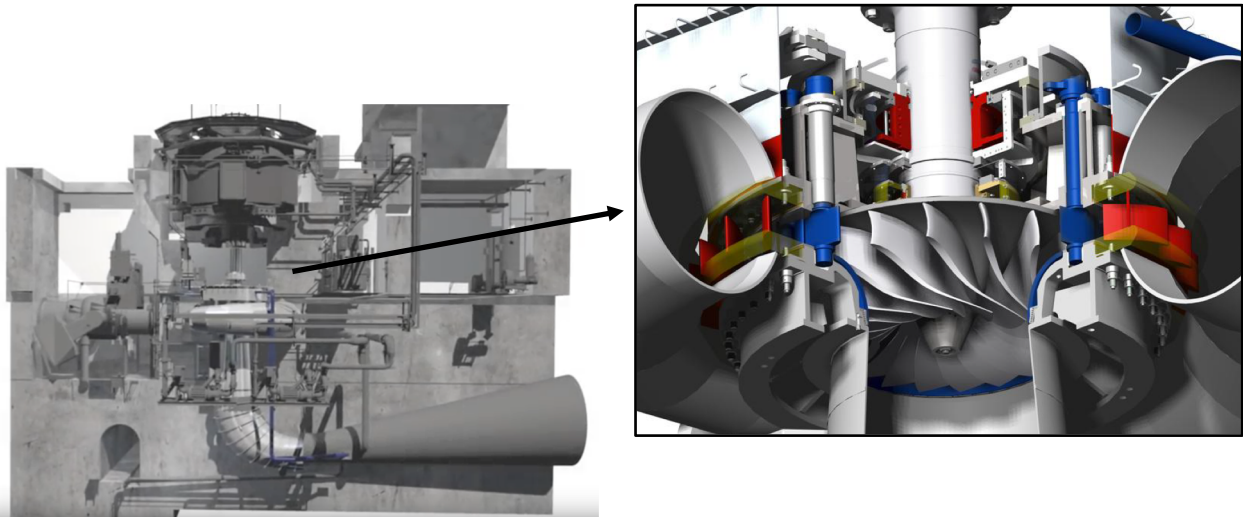
94





Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Esempi – Turbina Francis



99

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Esempi – Turbina Francis



Three Gorges Dam, People's Republic of China
 Rated power output 700 MW per turbine
 Rated net head 80.6 m

100

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Esempi – Turbina Francis



FULL OPEN

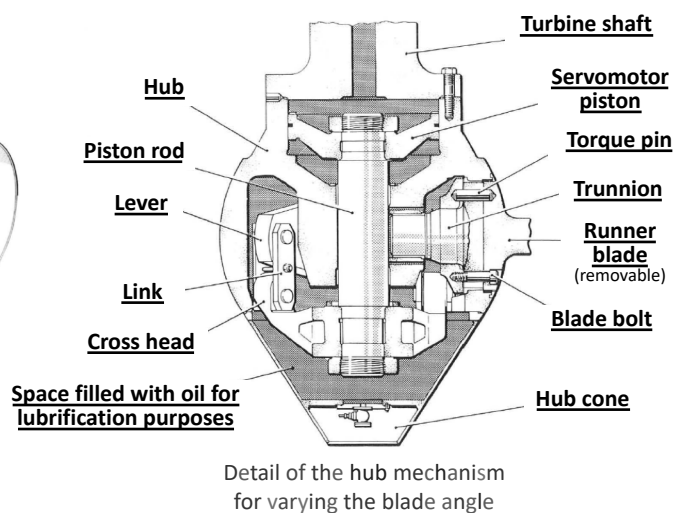
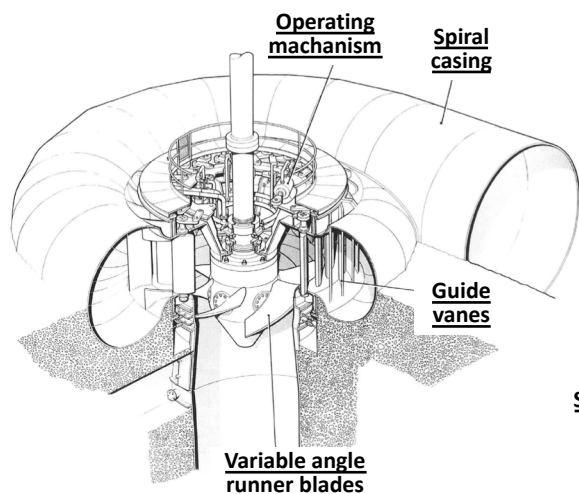


PARTIALIZED

101

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

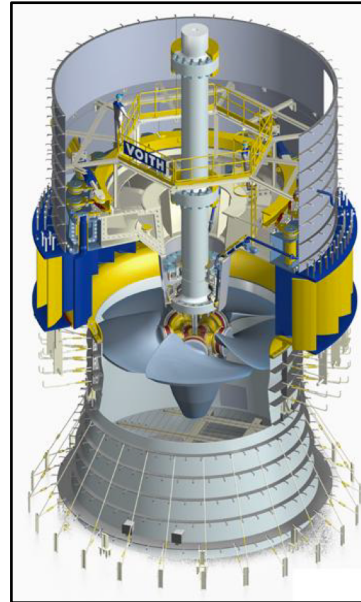
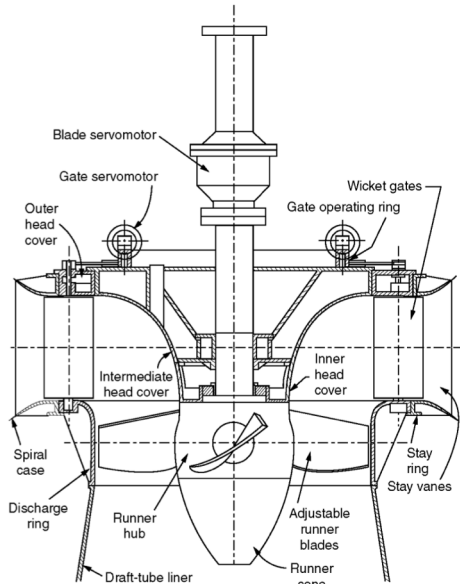
Esempi – Turbina Kaplan



102

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Esempi – Turbina Kaplan



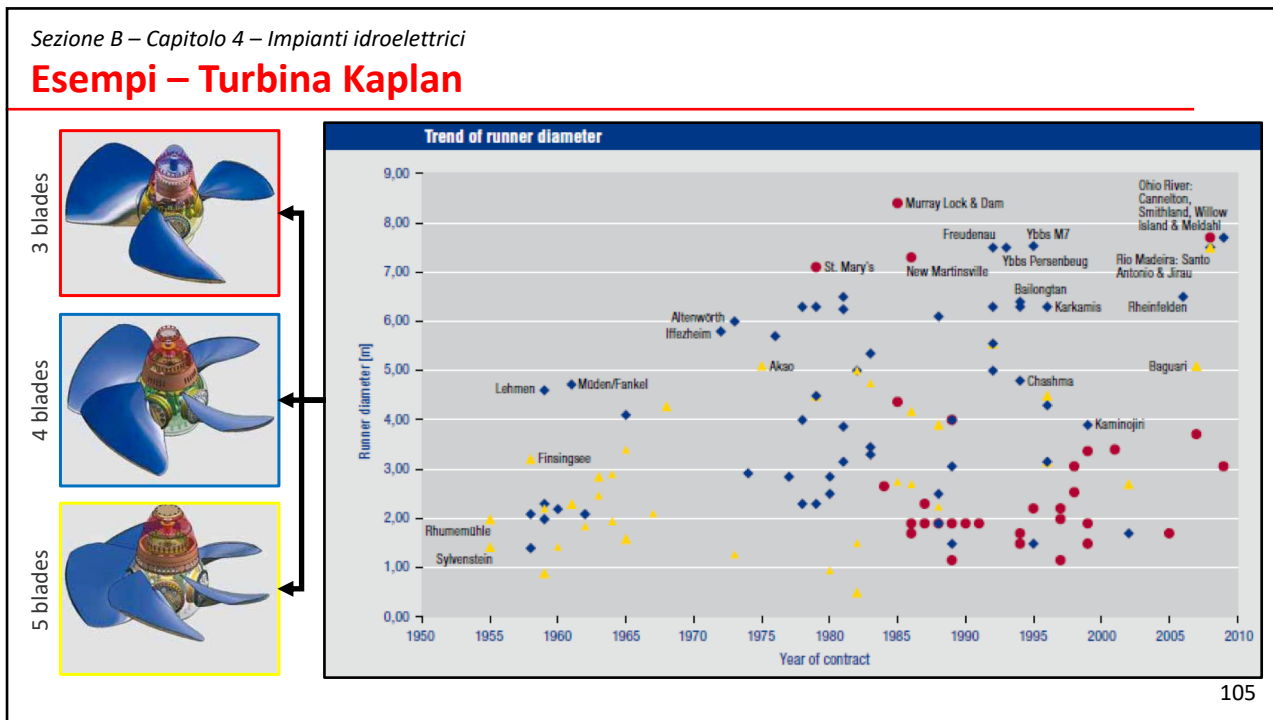
103

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Esempi – Turbina Kaplan



104



Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Impianti idroelettrici particolari

- In caso di salti molto piccoli, anche con gruppi Kaplan si ottengono velocità assolute molto basse → Obbligo di moltiplicare il numero dei poli dell'alternatore → Ripercussione sensibile sul costo dei gruppi (installazione e manutenzione)
- Sviluppo di gruppi intubati, equipaggiati con turbine a bulbo
 - L'alternatore può essere all'interno di una scocca a bulbo immersa nel flusso
 - Si risparmia la voluta a spirale e il diffusore è disposto orizzontalmente
 - Costruzione più compatta, con ingombro ridotto
 - Possibilità di funzionare reversibilmente (es. impianti "mareamotrici")
 - Per contro, esistono delle limitazioni nella costruzione del generatore → P_n limitata

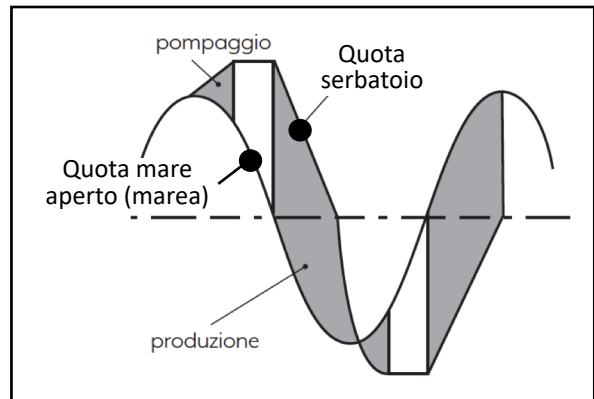
► Figura 4.47 Gruppo idroelettrico a bulbo.

106

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Impianti idroelettrici particolari

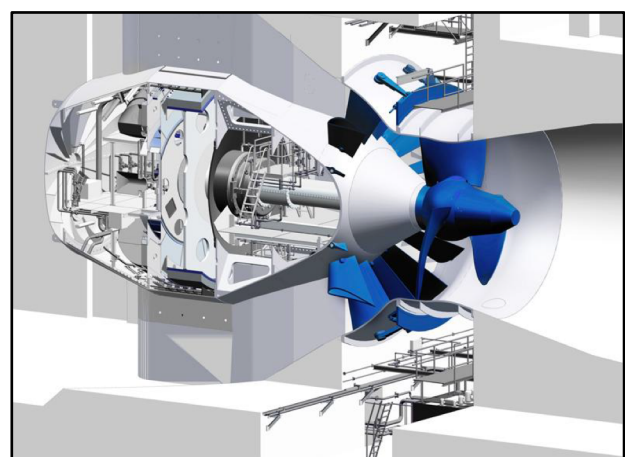
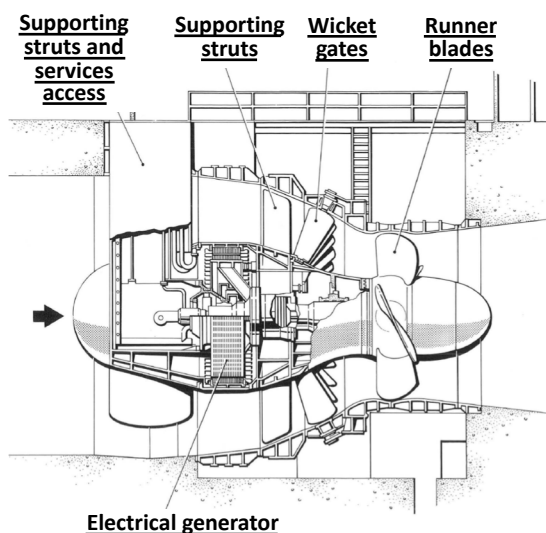
- Gli impianti “maremotrici” possono sfruttare una differenza di altezza tra il mare aperto e un bacino chiuso con uno sbarramento
- Per disporre di un salto sufficiente a produrre efficacemente energia elettrica, si enfatizza il salto tra i due bacini d’acqua con delle fasi intermedie di pompaggio
- La macchina deve essere reversibile in quanto può generare energia elettrica
 - Con acqua uscente dal bacino chiuso
 - Con acqua entrante nel bacino chiuso



107

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Impianti idroelettrici particolari

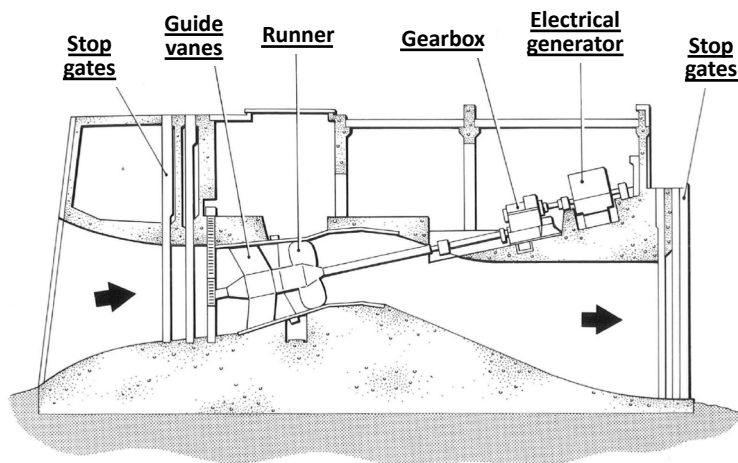


108

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Impianti idroelettrici particolari

- In alcuni casi, il generatore (e l'eventuale moltiplicatore di giri) sono posti all'esterno del bulbo immerso
- Vantaggi in termini di manutenzione e ingombro del bulbo nel canale di passaggio dell'acqua



109

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Esempi di installazione – Itaipu (Brazil-Paraguay) – Francis

- 25°25'27" South, 54°35'35" West
- Rated power output 14 GW (= 20 x 700 MW)
- Net head 118.4 m
- Nominal flow rate 13,800 m³/s (690 m³/s each turbine)
- Maximum annual generation (2008) 94.69 TWh (~1/3 of the Italian annual consumption)
- Turbine type: Francis, vertical axis
- Penstocks: 10.5 m diameter, 142.2 m length

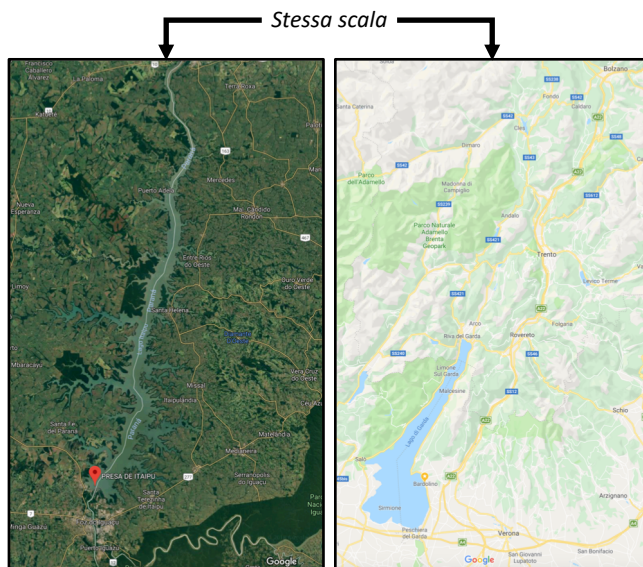


110

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

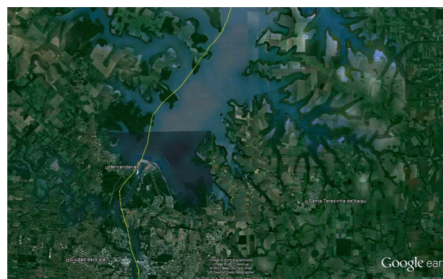
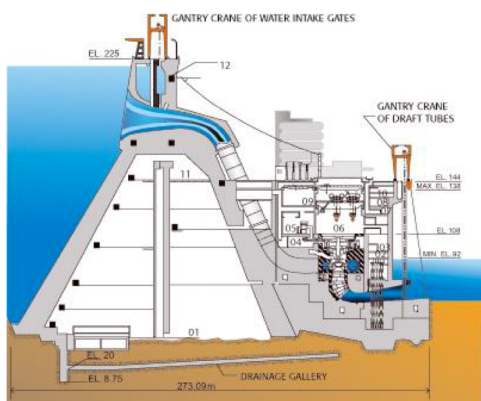
Esempi di installazione – Itaipu (Brazil-Paraguay) – Francis

- 25°25'27" South, 54°35'35" West
- Rated power output 14 GW (= 20 x 700 MW)
- Net head 118.4 m
- Nominal flow rate 13,800 m³/s (690 m³/s each turbine)
- Maximum annual generation (2008) 94.69 TWh (~1/3 of the Italian annual consumption)
- Turbine type: Francis, vertical axis
- Penstocks: 10.5 m diameter, 142.2 m length



Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Esempi di installazione – Itaipu (Brazil-Paraguay) – Francis



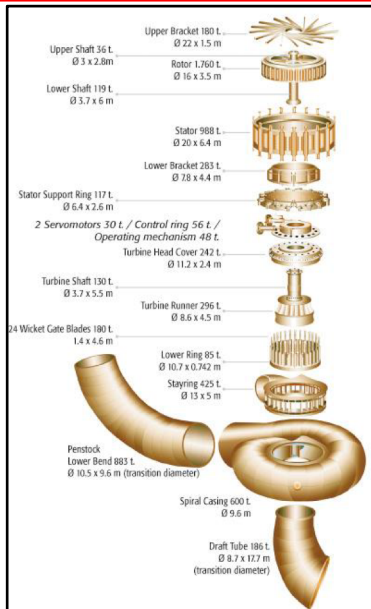
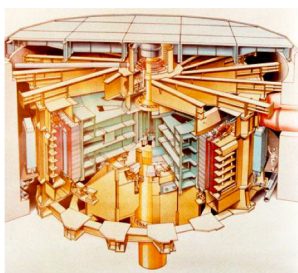
112

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Esempi di installazione – Itaipu (Brazil-Paraguay) – Francis

Electrical generator

Quantity	20 units
60 Hz Frequency	10 units
50 Hz Frequency	10 units
50/60 Hz Rated power	823.6/737.0 MVA
Rated voltage	18 kV
Number of 50/60 Hz poles	66/78
Moment of inertia - GD2	320,000 t.m ²
50/60 Hz Power factor	0.85/0.95
Heaviest piece - rotor	1,760 t
Weight of each 50/60 Hz unit	3,343/3,242 t



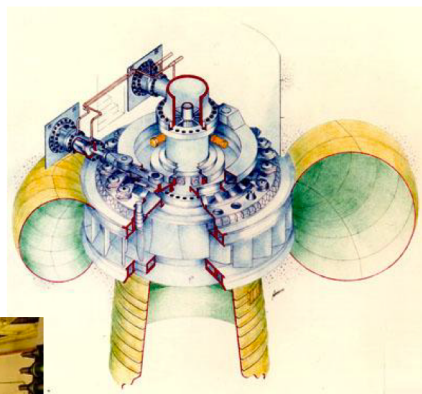
113

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Esempi di installazione – Itaipu (Brazil-Paraguay) – Francis

Turbines

Quantity	20
Type	Francis
Unit rated power	715 MW
Project speed - 50/60 Hz	90.9/92.3 rpm
Project net head	118.4 m
Unit rated flow	645 m ³ /s
Heaviest indivisible piece - rotor	296 t
Weight of each unit	3,360 t



114

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Esempi di installazione – Isola Serafini (Piacenza) – Kaplan

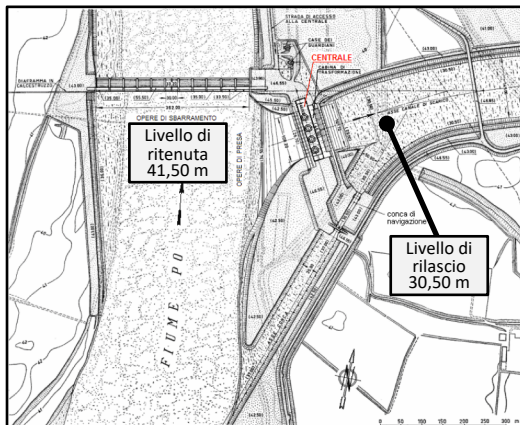
- Coordinates 45°5'4" North, 9°54'42" East
- Rated power output 82 MW
- Number of turbines 4
- Net head up to 11 m
- Overall flow rate up to 1,000 m³/s
- Annual generation up to 484 GWh
- Type of turbines Kaplan, vertical axis
- Runner diameter 7.6 m
- Rotational speed 53.6 rpm
- Generator power output 23 MVA
- Number of pole pairs 56



115

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Esempi di installazione – Isola Serafini (Piacenza) – Kaplan



116