

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

## 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**)

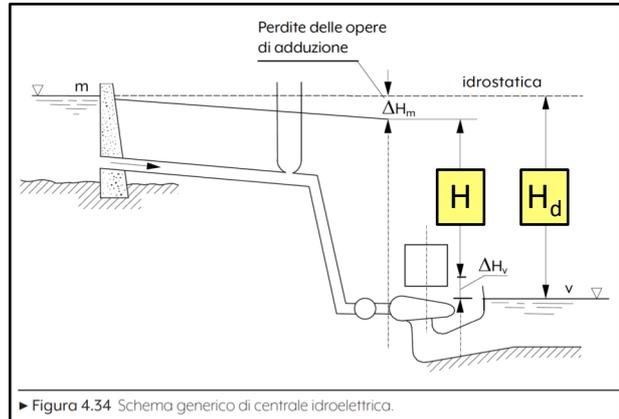
$$H_d = \left( H_m + \frac{V_m^2}{2g} + \frac{P_m}{\gamma} \right) - \left( H_v + \frac{V_v^2}{2g} + \frac{P_v}{\gamma} \right) \cong H_m - H_v = \Delta H_{\text{geodetico}}$$

- 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  $P_i$**

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



75

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

## Turbine idrauliche per grandi impianti

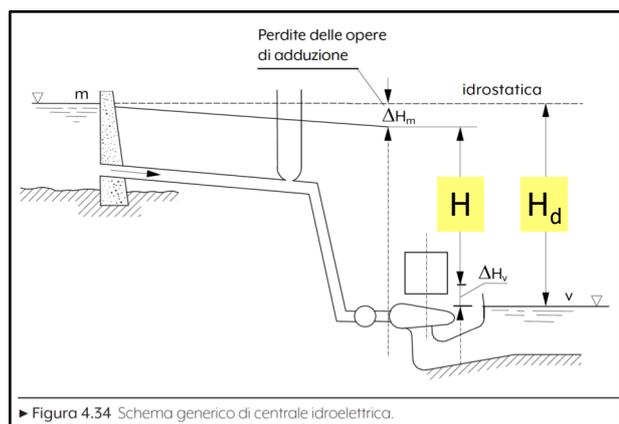
### Definizioni di base

- **Rendimento globale della turbina  $\eta_t$**

- $\eta_{\text{idr}}$  : **rendimento idraulico** (vortici, attriti, in particolare nella girante della turbina)  $\rightarrow 90\div 95\%$
  - $\eta_{\text{vol}}$  : **rendimento volumetrico** (fughe di fluido attraverso i giochi tra girante e parti fisse)  $\rightarrow \sim 99\%$
  - $\eta_{\text{mecc}}$  : **rendimento meccanico** (attriti nei supporti e assorbimento di potenza degli ausiliari)  $\rightarrow \sim 99\%$
- $\Pi$   
 $\sim 90\div 94\%$

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

$$P_t = \eta_t \cdot P_i$$



76

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

### Tipologie di turbine – Modalità di azione

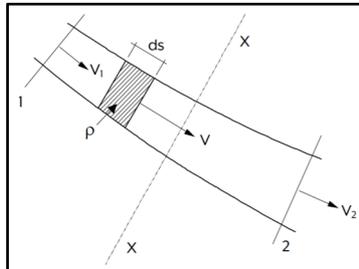
- Un elemento di fluido di lunghezza  $ds$  in moto tra due sezioni (1 e 2) genera una forza verso la direzione  $x-x$  se lungo tale direzione si manifesta una accelerazione  $a_x$

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

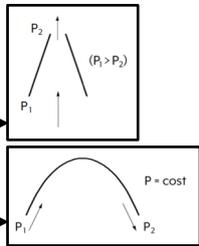
$\int_{1 \rightarrow 2}$

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

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



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



77

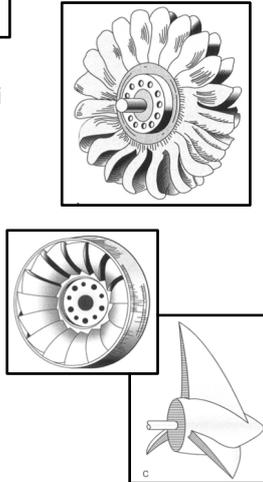
Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

### Tipologie di turbine – Modalità di azione

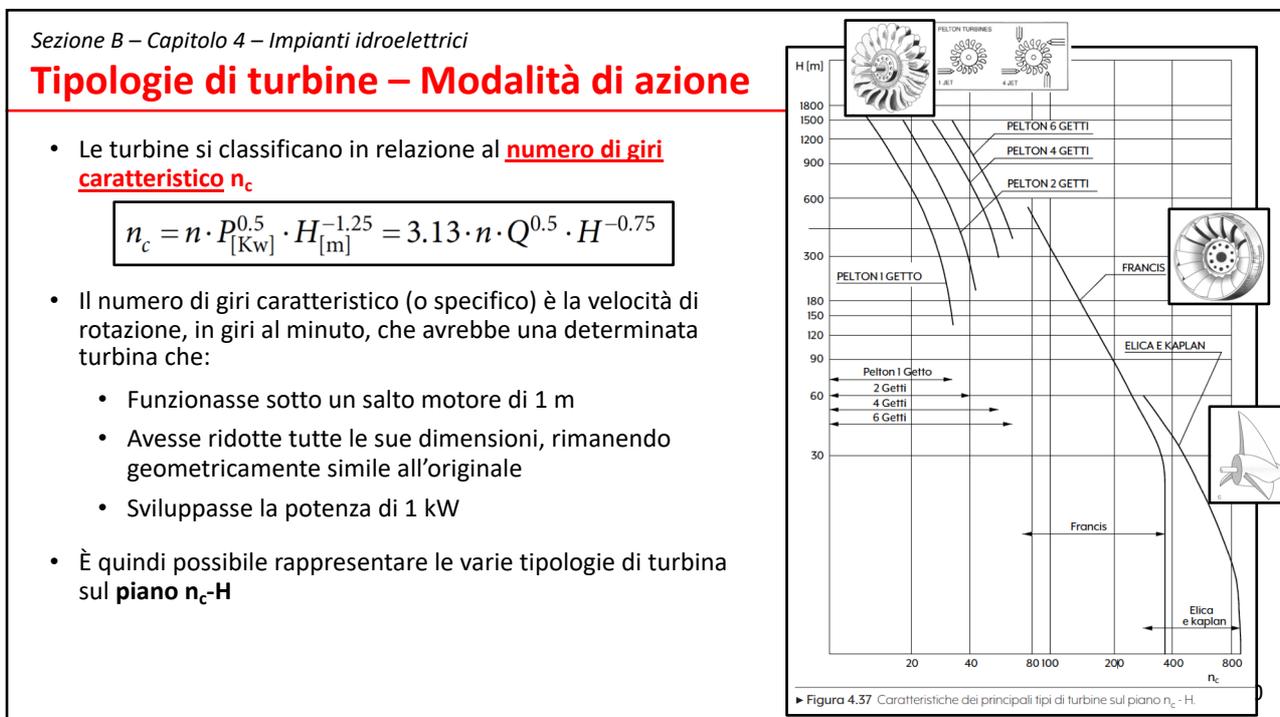
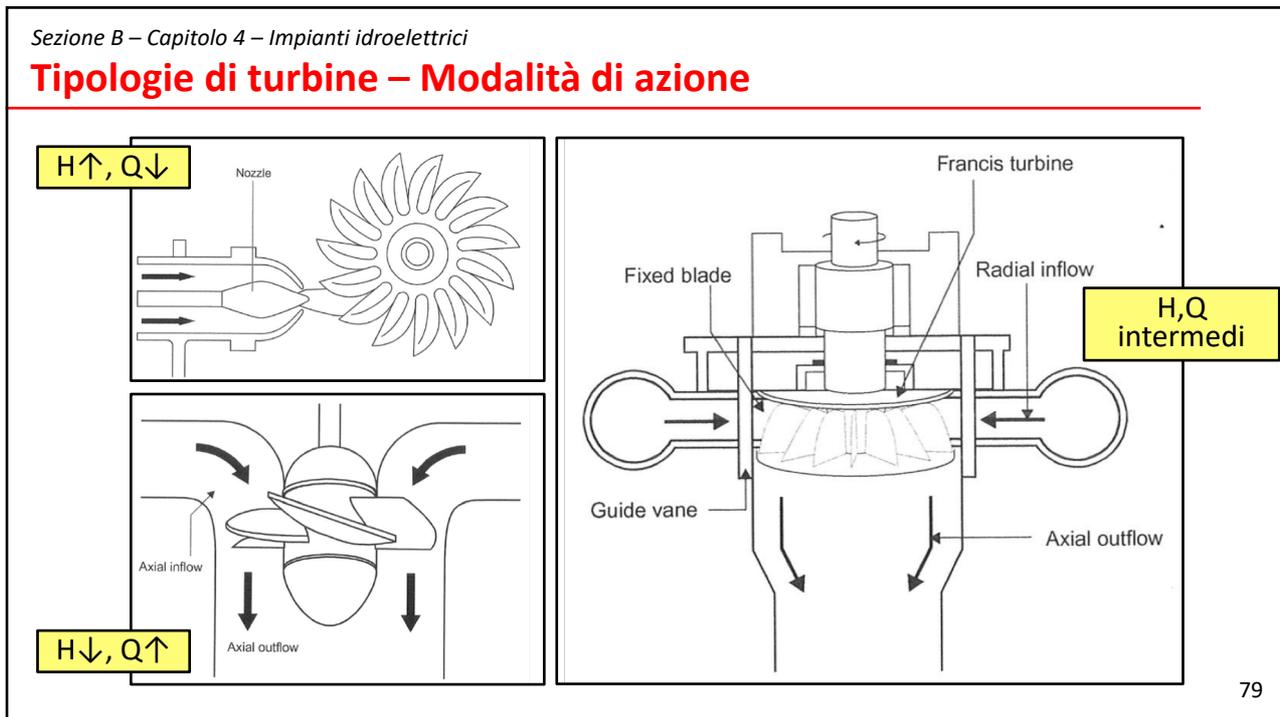
- Il **grado di reazione g.r.** esprime la quota parte di energia potenziale che non è convertita in cinetica nel distributore
  - $V_{i.r.}$  è la velocità dell'acqua in ingresso alla girante
  - $g.r.$  è compreso tra 0 e 1

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

- Turbine ad azione  $\rightarrow$  Nel distributore (spina Doble) avviene l'intera conversione di energia da potenziale a cinetica  $\rightarrow$  Turbina opera a pressione atmosferica
  - Turbina **Pelton**  $\rightarrow g.r. = 0$
- Turbina a reazione  $\rightarrow$  La velocità di efflusso dal distributore (ovvero la velocità di ingresso in turbina) non corrisponde all'intera energia potenziale  $\rightarrow$  Acqua in pressione
  - Turbine **Francis** e **Kaplan**  $\rightarrow g.r. > 0$
  - 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

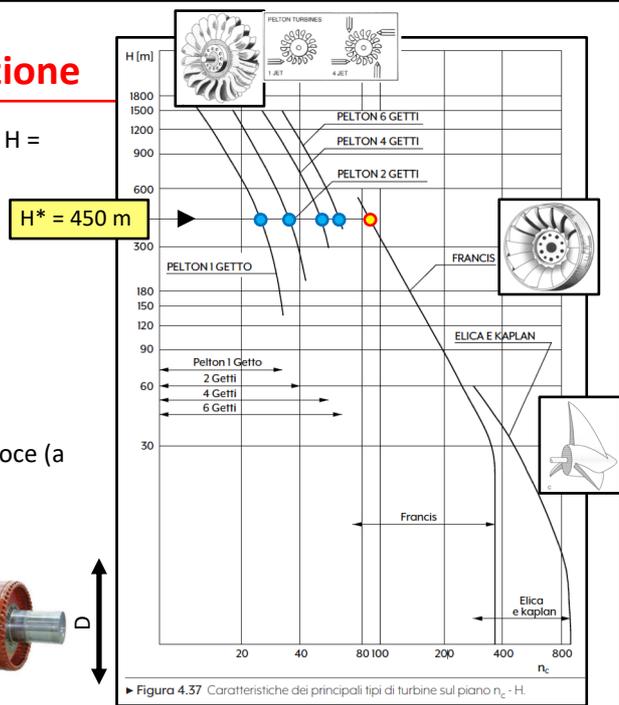
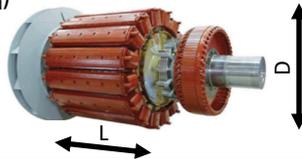
- Le diverse soluzioni hanno  $n_c$  diversi

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

- 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 ↓



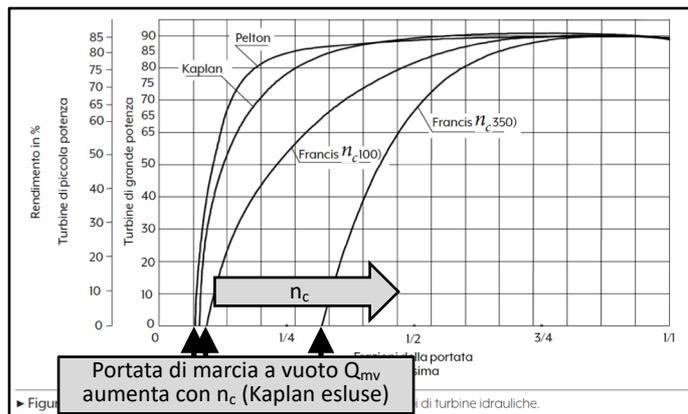
► Figura 4.37 Caratteristiche dei principali tipi di turbine sul piano  $n_c - H$ .

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



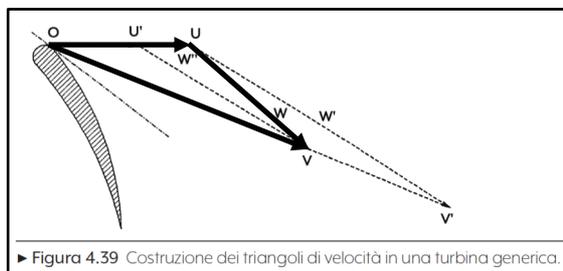
**Criterio di base:** migliore utilizzazione dell'energia idraulica disponibile →  
 Massimo rendimento medio ponderale per i vari regimi di funzionamento previsti

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.

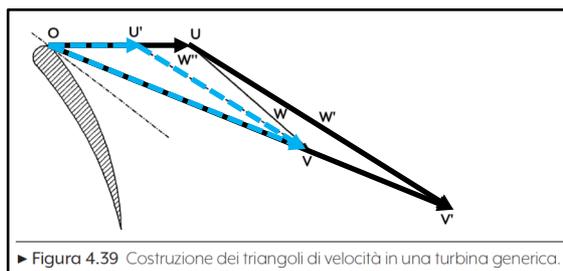
- Corretto funzionamento della turbina (massimo rendimento) → Il vettore velocità relativa  $W$  deve essere tangente al profilo di ingresso della palettatura

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

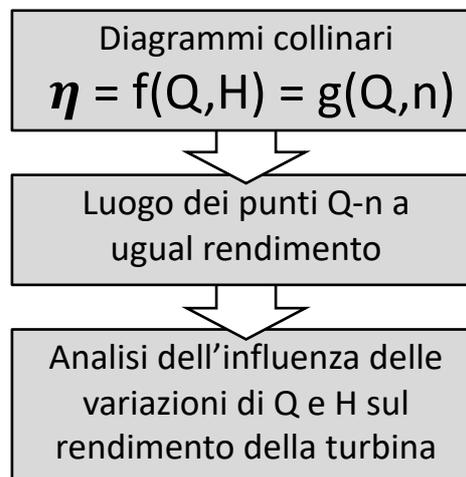
$$\begin{cases} U = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} \propto n \\ V = \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \propto \sqrt{H} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} V \propto \sqrt{H} \\ U \propto n \end{cases} \rightarrow \sqrt{\frac{H'}{H}} = \frac{n}{n'} \rightarrow n' = n \sqrt{\frac{H}{H'}}$$

**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  $n'$**

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

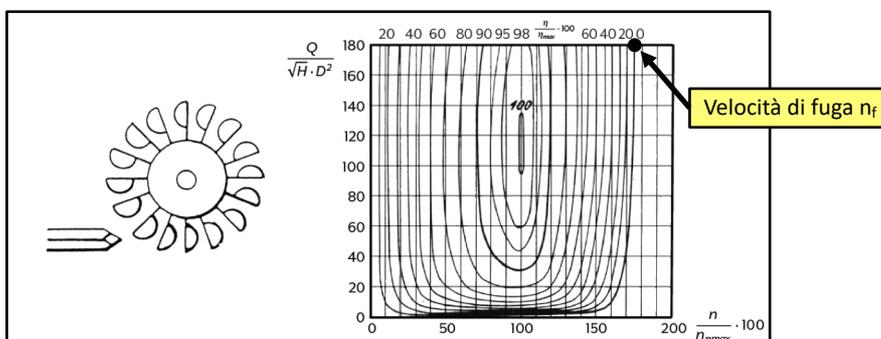


85

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



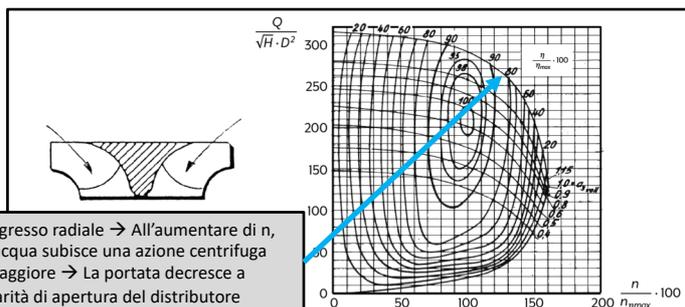
► Figura 4.40 Esempio di diagramma collinare di turbine Pelton ( $n_c = 55, n \cdot D \cdot H^{0.5} = 50$ ).

86

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

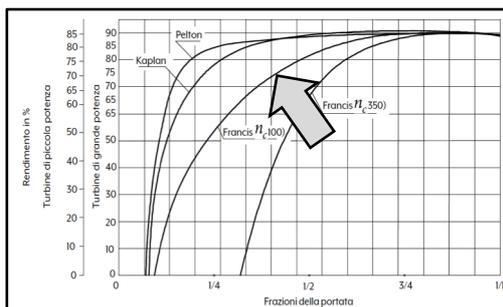
### Diagrammi collinari

- 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



Ingresso radiale  $\rightarrow$  All'aumentare di  $n$ , l'acqua subisce una azione centrifuga maggiore  $\rightarrow$  La portata decresce a parità di apertura del distributore

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

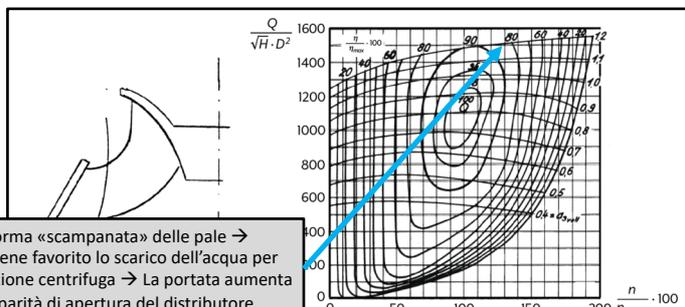


► Figura 4.38 Caratteristiche di rendimento dei principali tipi di turbine idrauliche.

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

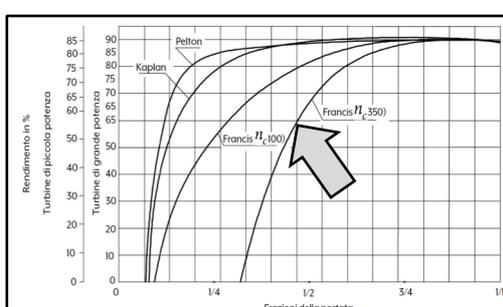
### Diagrammi collinari

- 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)



Forma «scampanata» delle pale  $\rightarrow$  Viene favorito lo scarico dell'acqua per azione centrifuga  $\rightarrow$  La portata aumenta a parità di apertura del distributore

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

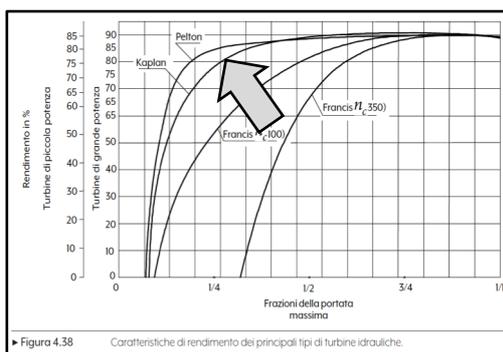
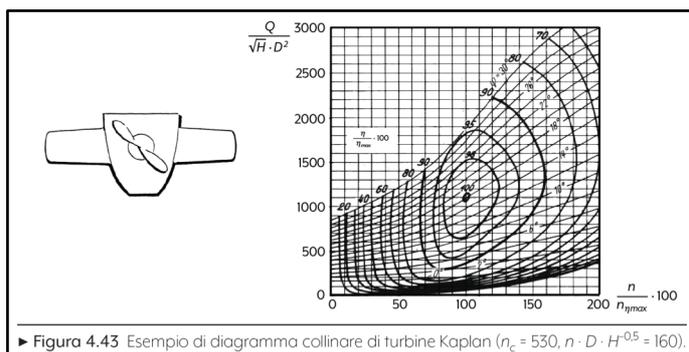


► Figura 4.38 Caratteristiche di rendimento dei principali tipi di turbine idrauliche.

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

### Diagrammi collinari

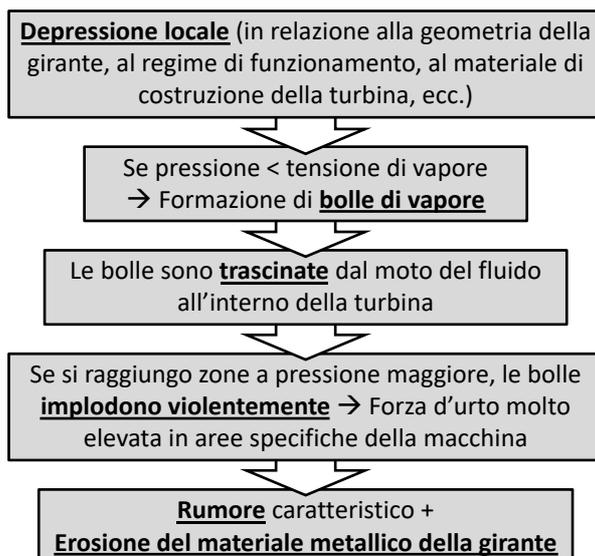
- Per la **turbina ad elica** ( $n_c$  molto alto, >300):
  - Le turbine a elica con pale fisse avrebbero un crollo del rendimento per portate appena inferiori a quella massima
  - Si realizzano giranti con regolazione continua del passo (**turbine Kaplan**) per ottenere una curva di rendimento elevata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



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**)  $\sigma$

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

- $H_b$  : 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

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

- Quanto vale numericamente il coefficiente di Thoma  $\sigma$ ?

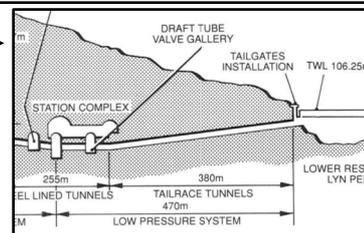
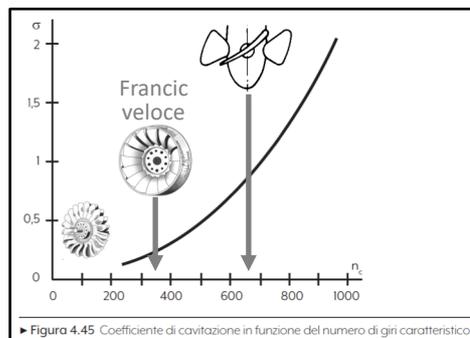
► Figura 4.44 Individuazione dell'altezza massima di aspirazione.

92

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

## Cavitazione

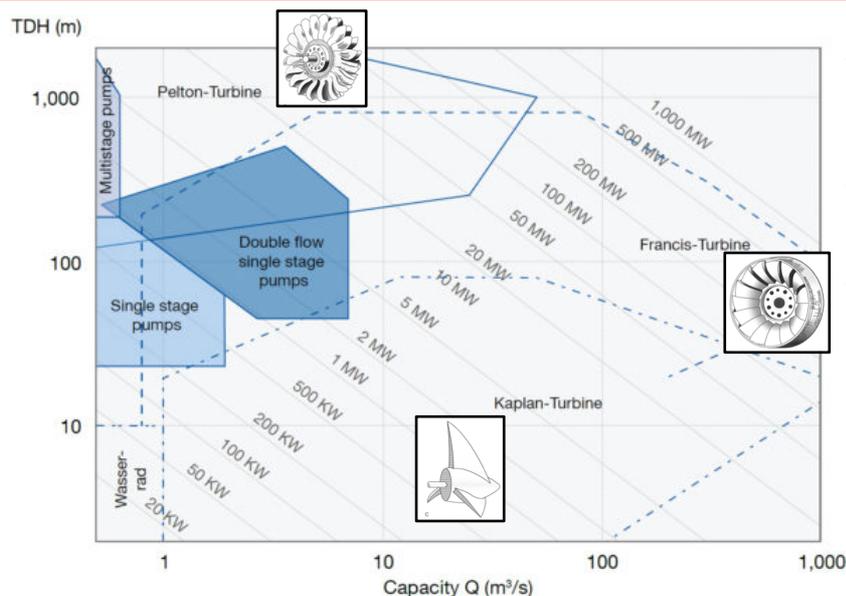
- È possibile evitare (o perlomeno diminuire) il manifestarsi della cavitazione tramite:
  - Utilizzo di materiali aventi migliori caratteristiche meccaniche (tipicamente acciaio inox)
  - Installazione corretta** del macchinario idraulico
    - I costruttori forniscono l'andamento grafico di  $\sigma$  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

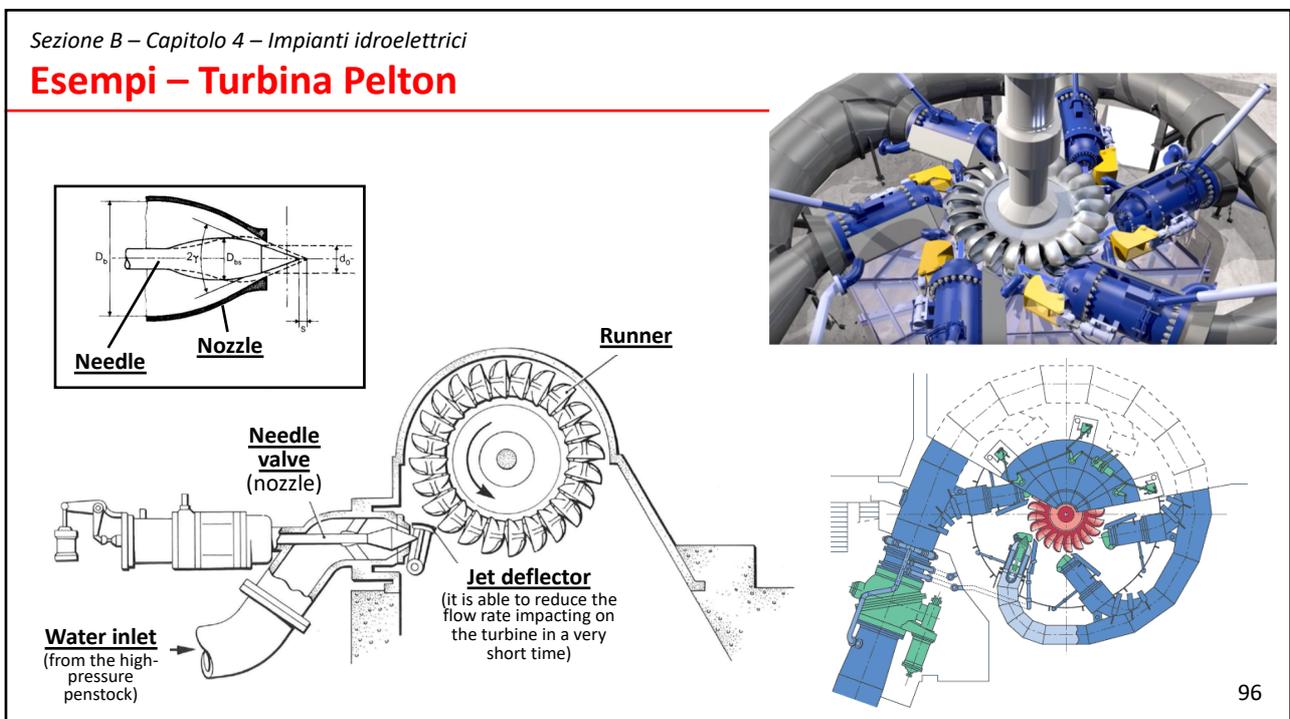
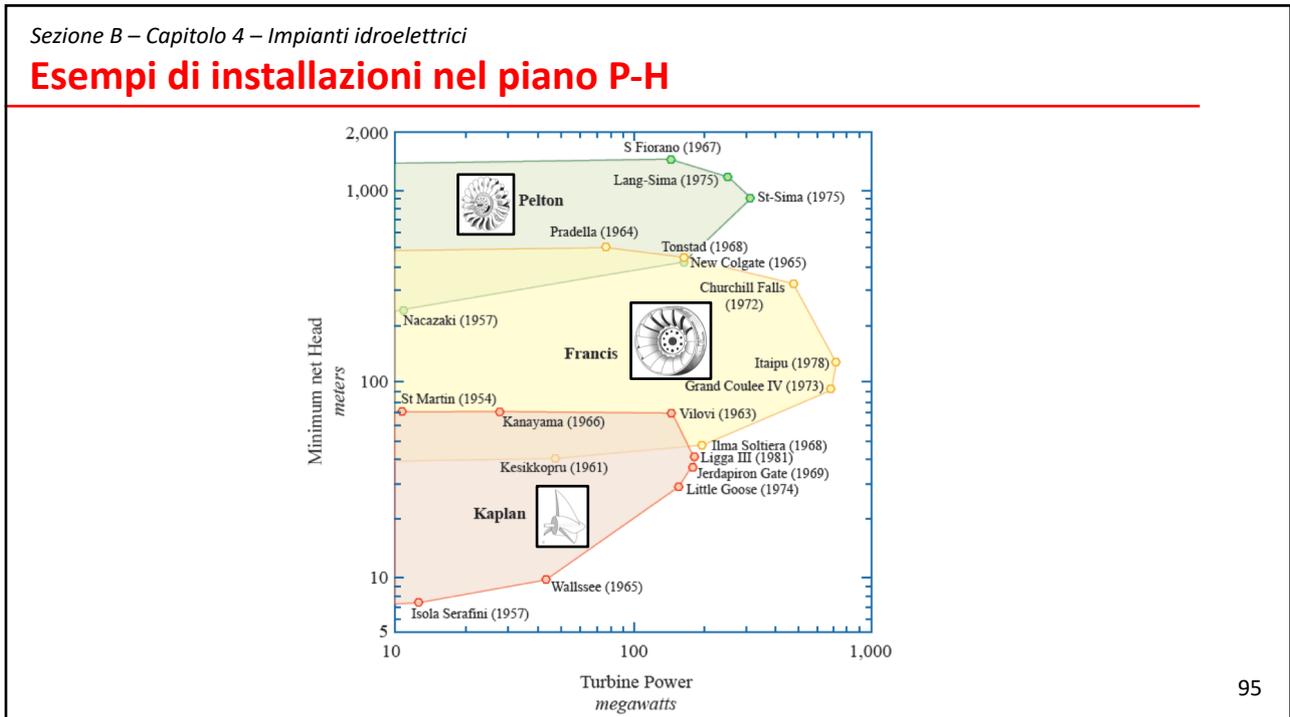
Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

## Posizionamento dei tipi di turbina nel piano Q-H



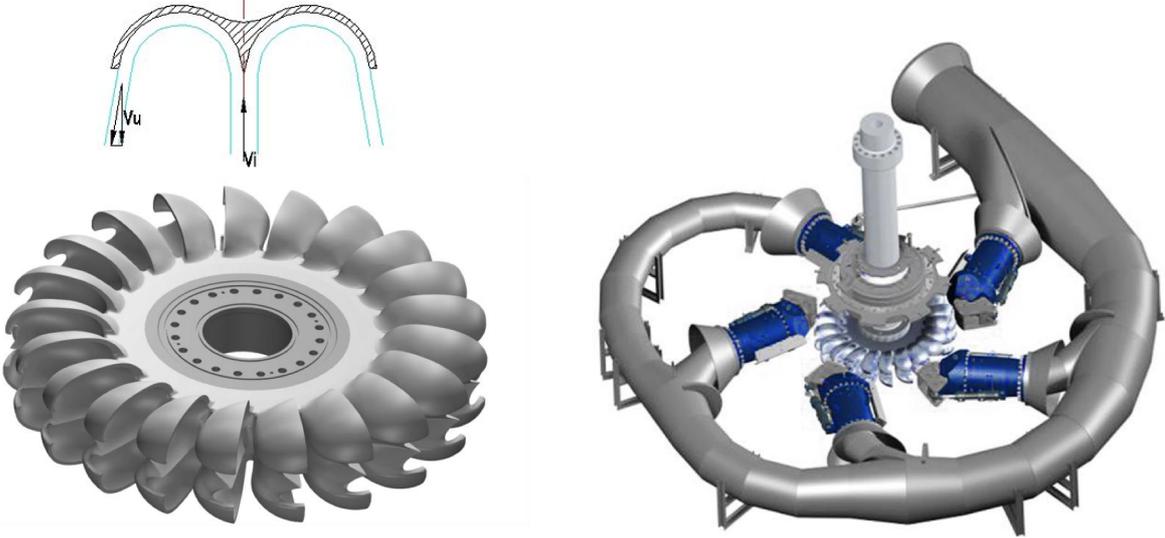
- Nel piano Q-H, usando una doppia scala logaritmica, le **curve a potenza costante** diventano rettilinee
- La portata delle turbine può essere molto più elevata della portata delle pompe
- Per aumentare la prevalenza delle pompe possono essere realizzate macchine multistadio

94



Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

### Esempi – Turbina Pelton



The image contains two diagrams. On the left is a 3D model of a Pelton runner, a circular wheel with multiple curved blades. Above it is a schematic showing two jets of water striking the blades, with velocity vectors  $V_u$  and  $V_l$  indicated. On the right is a 3D model of a 5-jet Pelton structure, showing a central shaft with five nozzles arranged in a circle, each directing a jet of water at the runner.

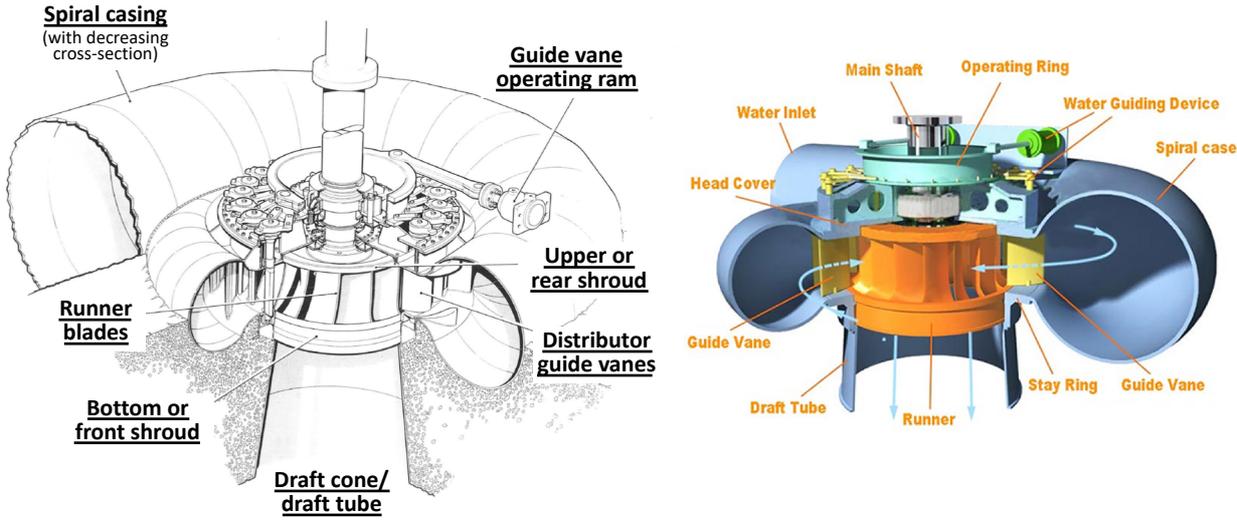
**Pelton runner**

**5-jet Pelton structure**

97

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

### Esempi – Turbina Francis



The image contains two diagrams of a Francis turbine. The left diagram is a detailed cross-section showing the spiral casing, guide vane operating ram, upper or rear shroud, distributor guide vanes, runner blades, bottom or front shroud, and draft cone/draft tube. The right diagram is a 3D cutaway view with labels: Water Inlet, Head Cover, Guide Vane, Draft Tube, Runner, Stay Ring, Guide Vane, Spiral case, Water Guiding Device, Operating Ring, and Main Shaft.

**Spiral casing**  
(with decreasing cross-section)

**Guide vane operating ram**

**Upper or rear shroud**

**Distributor guide vanes**

**Runner blades**

**Bottom or front shroud**

**Draft cone/ draft tube**

**Water Inlet**

**Head Cover**

**Guide Vane**

**Draft Tube**

**Runner**

**Stay Ring**

**Guide Vane**

**Spiral case**

**Water Guiding Device**

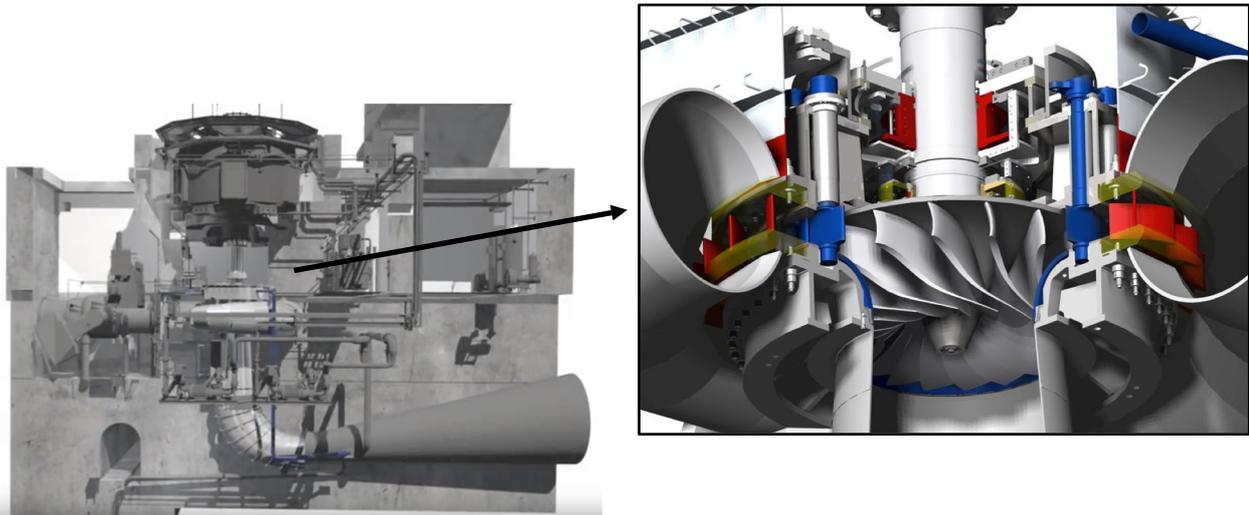
**Operating Ring**

**Main Shaft**

98

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

**Esempi – Turbina Francis**



99

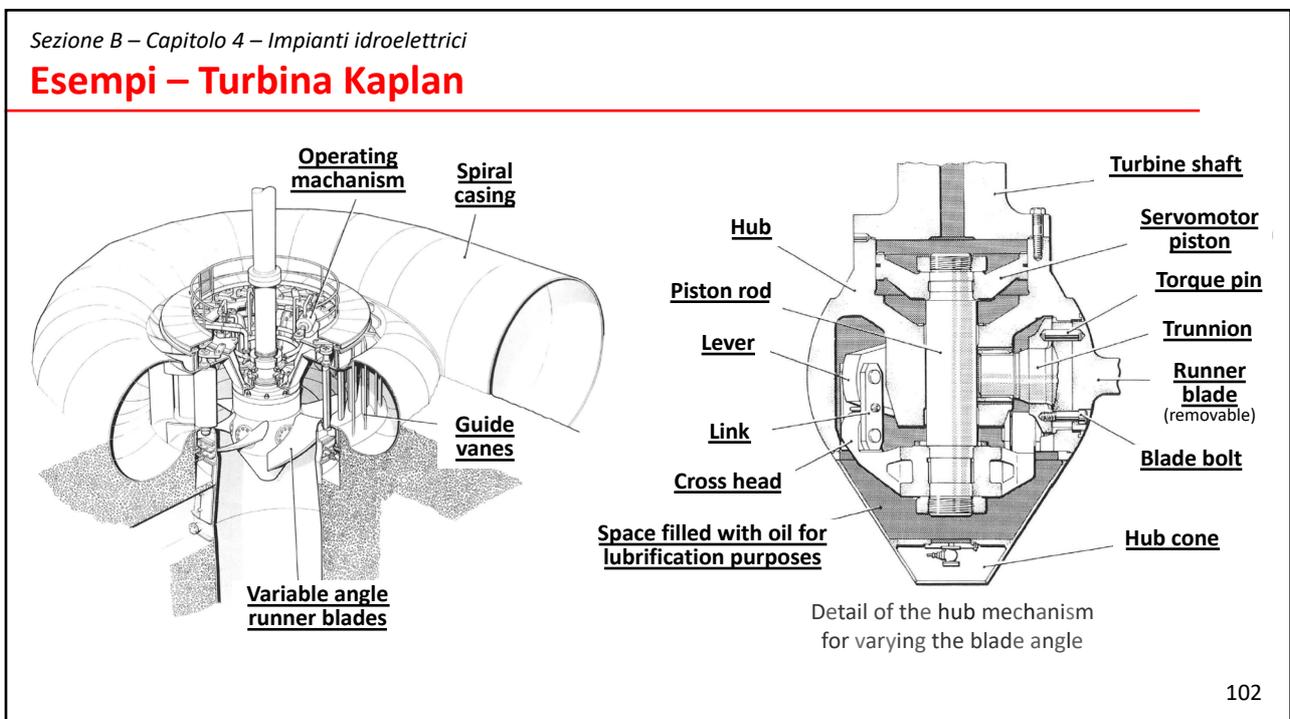
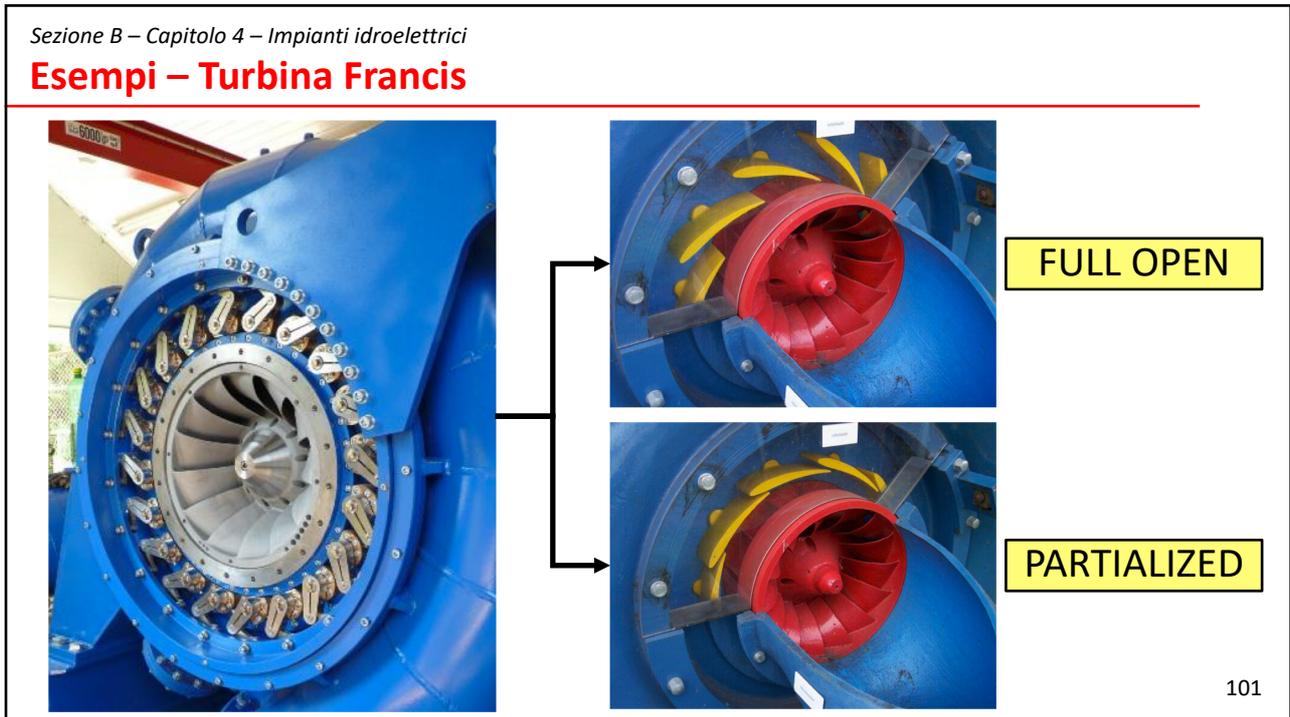
Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

**Esempi – Turbina Francis**



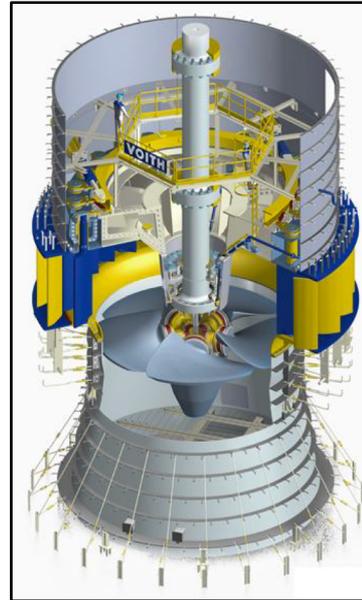
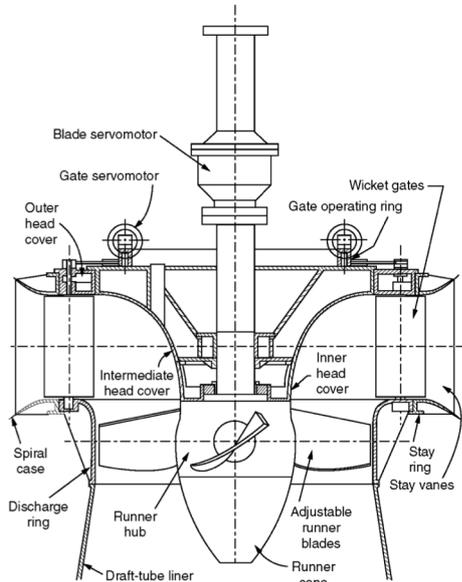
Three Gorges Dam, People's Republic of China  
 Rated power output 700 MW per turbine  
 Rated net head 80.6 m

100



Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

### Esempi – Turbina Kaplan



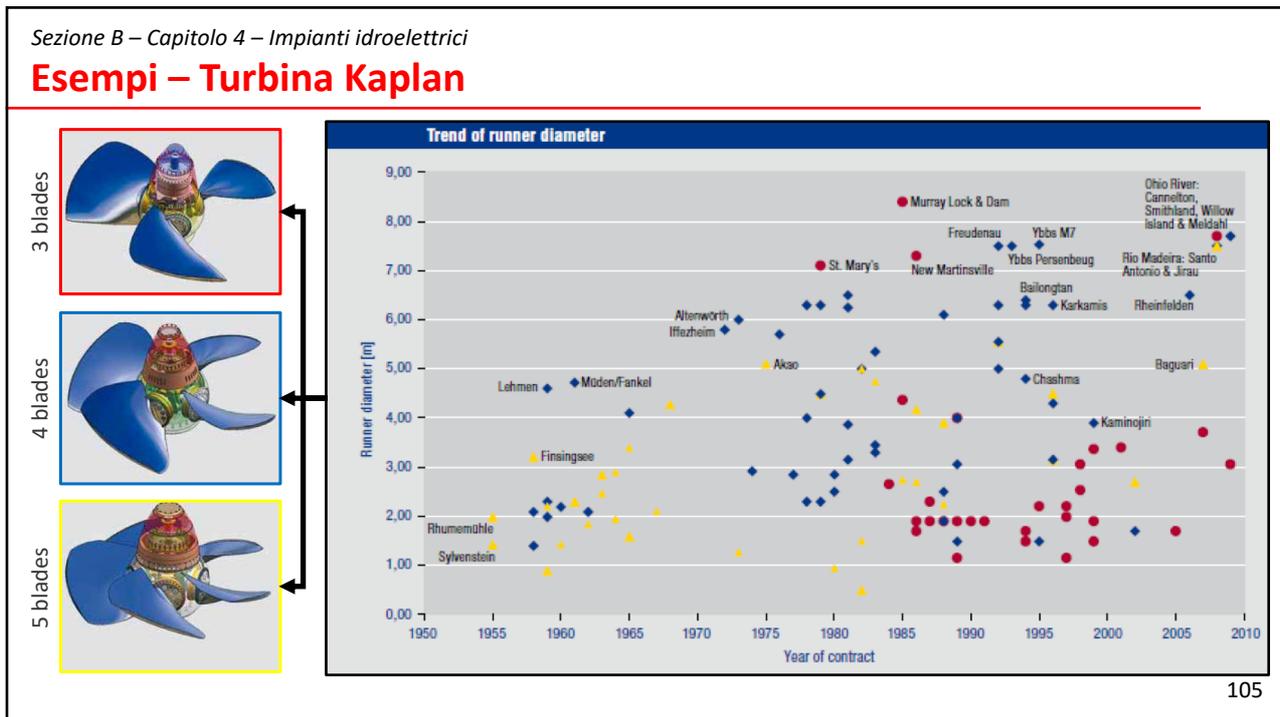
103

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 "mareomotrici")
    - Per contro, esistono delle limitazioni nella costruzione del generatore →  $P_n$  limitata

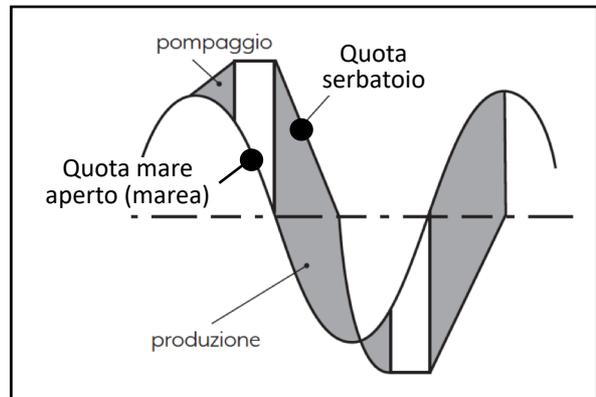
► Figura 4.47 Gruppo idroelettrico a bulbo.

106

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

## Impianti idroelettrici particolari

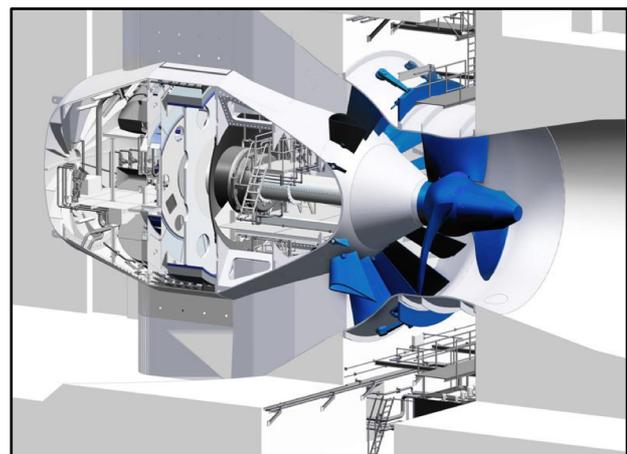
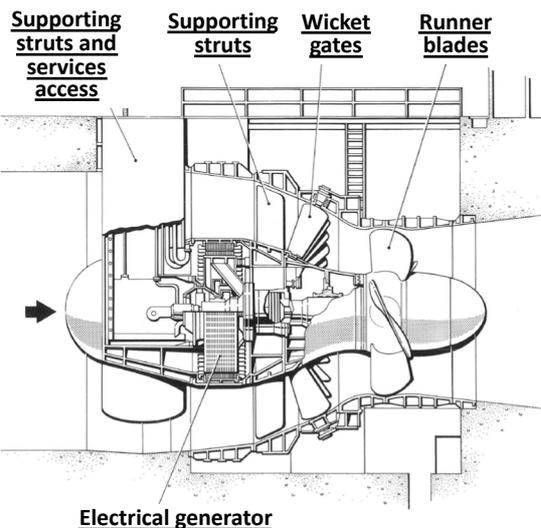
- Gli impianti “maremotrici” possono sfruttare una differenza di altezza tra il mare aperto e un bacino chiuso con uno sbarramento
- Per disporre di un salto sufficiente a produrre efficacemente energia elettrica, si enfatizza il salto tra i due bacini d’acqua con delle fasi intermedie di pompaggio
- 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

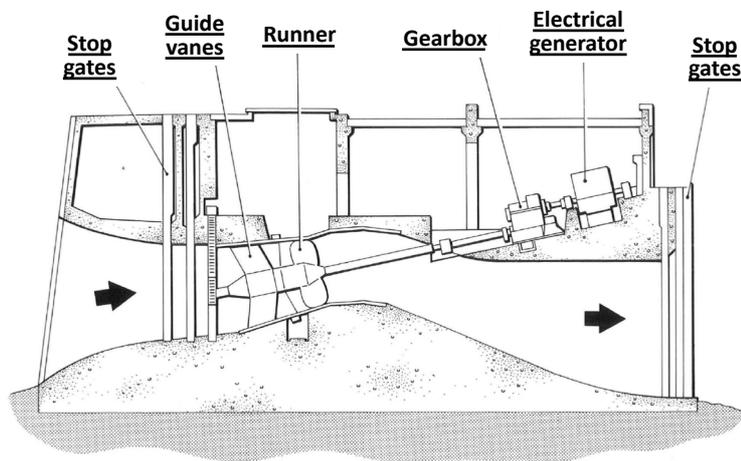


108

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 m<sup>3</sup>/s (690 m<sup>3</sup>/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

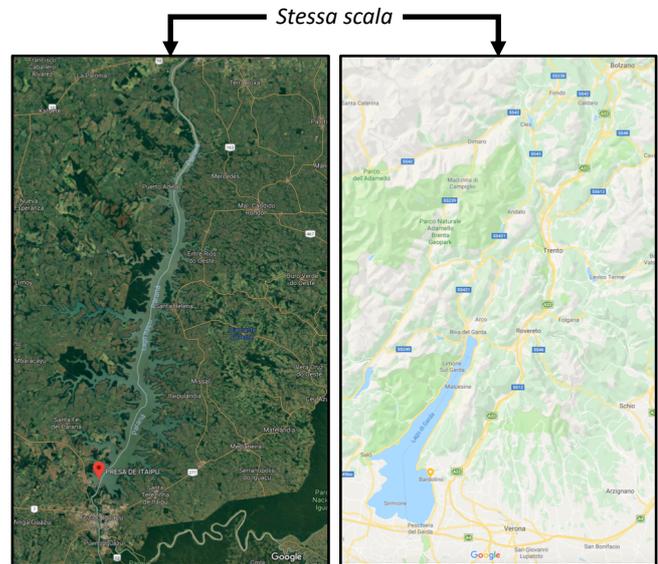


110

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

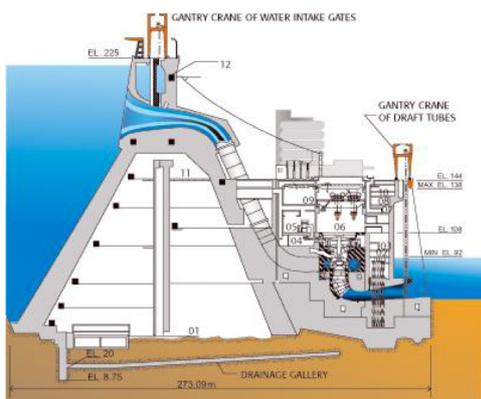
## Esempi di installazione – Itaipu (Brazil-Paraguay) – Francis

- 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 m<sup>3</sup>/s (690 m<sup>3</sup>/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



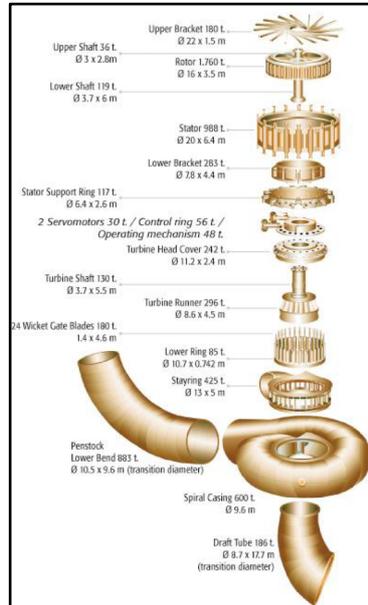
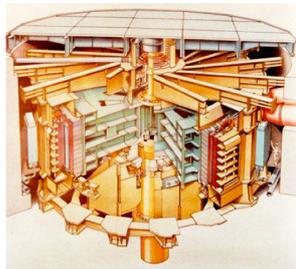
112

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 <sup>2</sup>
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



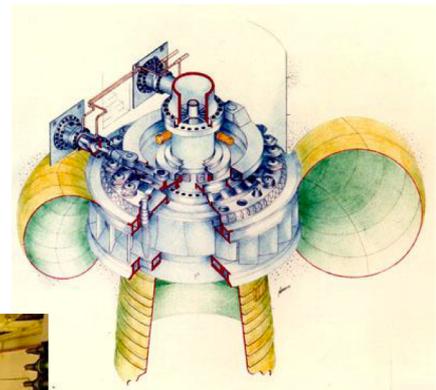
113

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 <sup>3</sup> /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

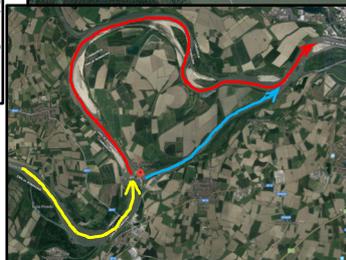
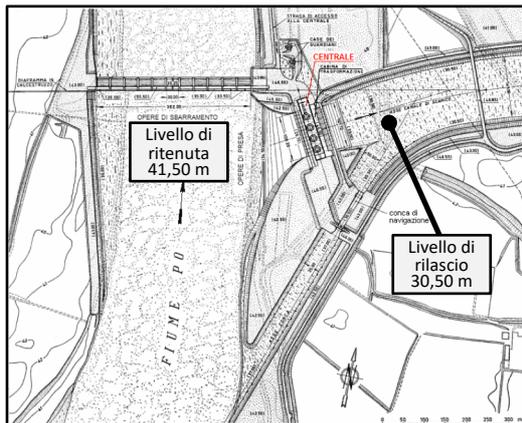
- Coordinates 45°5'4" North, 9°54'42" East
- Rated power output 82 MW
- Number of turbines 4
- Net head up to 11 m
- Overall flow rate up to 1,000 m<sup>3</sup>/s
- Annual generation up to 484 GWh
- Type of turbines Kaplan, vertical axis
- Runner diameter 7.6 m
- Rotational speed 53.6 rpm
- Generator power output 23 MVA
- Number of pole pairs 56



115

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

## Esempi di installazione – Isola Serafini (Piacenza) – Kaplan



116