

F. Bignucolo – Impianti di produzione dell'energia elettrica

SEZIONE B – IMPIANTI DI PRODUZIONE A FONTE RINNOVABILE

Capitolo 4

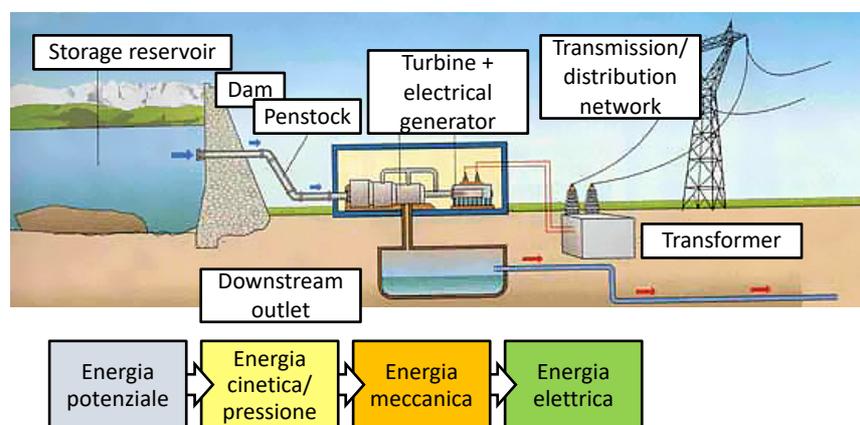
Impianti idroelettrici

1

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Un generico impianto idroelettrico

- Nelle centrali idroelettriche, l'energia potenziale dell'acqua si trasforma in energia cinetica/pressione
- L'energia del flusso fluido è poi convertita in energia meccanica dalla turbina, cui è collegato un generatore elettrico per la produzione di elettricità



2

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Potenza idroelettrica – Acqua in caduta in una tubazione

- Volume dell'elemento elementare di acqua

$$\text{Vol} = A \cdot dL$$

- Massa del volume elementare (ρ è la densità volumetrica dell'acqua [kg/m³])

$$m = \rho \cdot \text{Vol} = \rho \cdot (A \cdot dL)$$

- La quantità di lavoro dell'elemento elementare (g [m/s²] è l'accelerazione gravitazionale, dH in [m])

$$W = \text{Forza} \cdot \text{Spostamento} \quad (\text{lungo la direzione verticale}) \\ = [g \cdot \rho \cdot (A \cdot dL)] \cdot dH$$

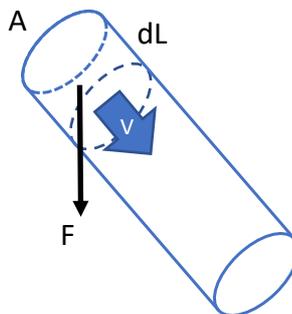
- Quantità di potenza associata all'elemento elementare

$$P_i = dW/dt = [g \cdot \rho \cdot (A \cdot dL/dt)] \cdot dH$$

- Considerando :

- L'intero volume nella tubazione (ovvero tutti gli elementi elementari di acqua) → Integrale in dL
- La portata d'acqua $Q = A \cdot V = A \cdot dL/dt$ [m³/s]
- Il peso specifico $\gamma = g \cdot \rho$ [N/m³]
- La densità volumetrica dell'acqua (1,000 [kg/m³])

- Potenza nominale idraulica P_i , in [kW]



$$P_i = \gamma \cdot Q \cdot H \cdot 10^{-3} \quad [\text{kW}]$$

3

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Classificazione degli impianti idroelettrici

Molteplici criteri di classificazione

• Potenza nominale P [MW]

- Grandi impianti: $P > 10$ MW → AT
- Piccoli impianti: $P = 1 - 10$ MW → MT
- Mini-impianti: $P = 0,1 - 1$ MW → MT
- Micro-impianti: $P < 0,1$ MW → BT

• Portata derivata

- Piccola portata: < 10 m³/s
- Media portata: $10 - 100$ m³/s
- Grande portata: $100 - 1.000$ m³/s
- Grandissima portata: > 1.000 m³/s

• Salto idraulico H [m] → Tipo di turbina

- Altissimo salto: $H > 1.000$ m
- Alto salto: $H = 250 - 1.000$ m
- Medio salto: $H = 50 - 250$ m
- Basso salto: $H < 50$ m

• Tipologia funzionale (in funzione del tempo necessario per riempire il serbatoio a monte dello sbarramento con la portata media annua del corso d'acqua):

- Ad accumulo tramite pompaggio: $T > 400$ ore
- A bacino/serbatoio: $T = 2-400/>400$ ore
- Ad acqua fluente: $T < 2$ ore

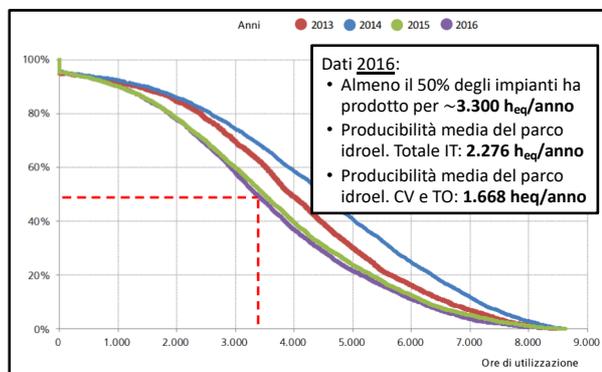
4

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Classificazione degli impianti idroelettrici

Prima caratterizzazione degli impianti

- **Producibilità** nel periodo temporale T, in [MWh/T]
→ Studio idrologico
 - Potenza nominale e producibilità non sono variabili tra loro indipendenti
- **Durata di utilizzazione equivalente h** in T, in [h/T]



Distribuzione % delle ore di utilizzazione degli impianti idroelettrici

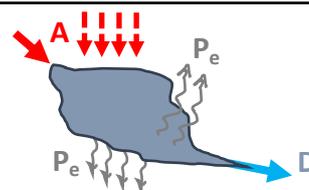
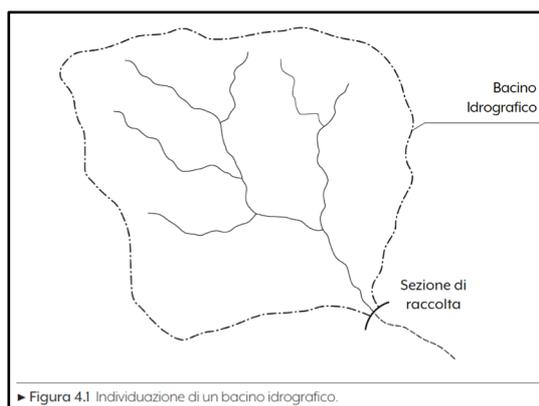
Tipologia	CV			TO			Totale			Potenza media [MW]	Producibilità media [h/anno]	
	Numero	Potenza [MW]	Energia E _t [GWh]	Numero	Potenza [MW]	Energia E _t [GWh]	Numero	Potenza [MW]	Energia E _t [GWh]			
Idroelettrici a serbatoio	23	1.263	1.286	4	3	5	27	1.267	1.291	46,9	1.019	Large hydro (HV)
Idroelettrici a bacino	40	1.558	1.663	9	5	18	49	1.563	1.680	31,9	1.075	
Idroelettrici ad acqua fluente	669	2.278	4.554	767	436	1.559	1.436	2.713	6.112	1,89	2.253	Mini-micro hydro (MV-LV)
Idroelettrici su acquedotto	67	53	218	70	11	51	137	63	269	0,46	4.270	

5

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Analisi idrogeologica

- Caratteristiche del bacino idrografico → Portata Q
- **Bacino idrografico**: porzione di territorio tributaria di afflussi meteorici con riferimento alla sezione di chiusura considerata
 - Più si sposta a valle la sezione di raccolta, maggiore è l'estensione del bacino idrografico
- Per un bacino idrografico si possono definire:
 - S [km²]: superficie del bacino
 - A [m³/anno]: quantità di **afflussi** in un determinato periodo (in genere un anno)
 - D [m³/anno]: quantità di **deflussi** in un determinato periodo (in genere un anno)
 - P_e [m³/anno]: **perdite** per evaporazione o per infiltrazione nel terreno, nel periodo di riferimento
- **Rendimento del bacino C** (valori tipici 30-85%)



$$C = \frac{D}{A} = \frac{A - P_e}{A} = 1 - \frac{P_e}{A}$$

6

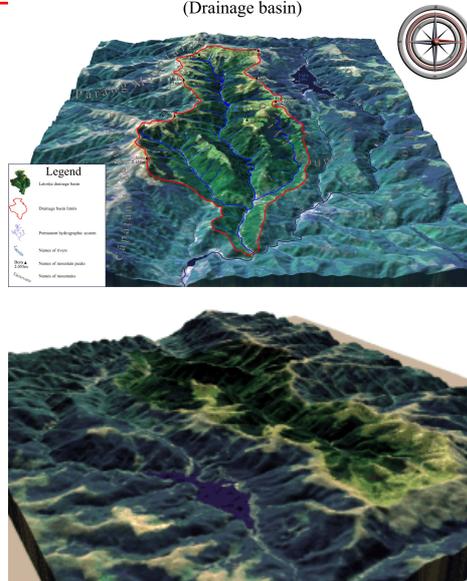
Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Analisi idrogeologica

- Caratteristiche del bacino idrografico → Portata Q
- **Bacino idrografico**: porzione di territorio tributaria di afflussi meteorici con riferimento alla sezione di chiusura considerata
 - Più si sposta a valle la sezione di raccolta, maggiore è l'estensione del bacino idrografico
- Per un bacino idrografico si possono definire:
 - S [km²]: superficie del bacino
 - A [m³/anno]: quantità di afflussi in un determinato periodo (in genere un anno)
 - D [m³/anno]: quantità di deflussi in un determinato periodo (in genere un anno)
 - P_e [m³/anno]: perdite per evaporazione o per infiltrazione nel terreno, nel periodo di riferimento
- **Rendimento del bacino C** (valori tipici 30-85%)

$$C = \frac{D}{A} = \frac{A - P_e}{A} = 1 - \frac{P_e}{A}$$

Latorița River, tributary of the Lotru River
(Drainage basin)



7

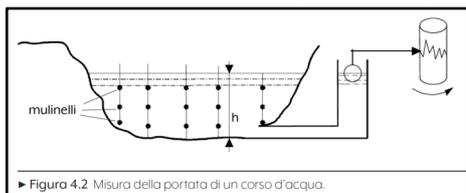
Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Analisi idrogeologica – Determinazione dei deflussi D

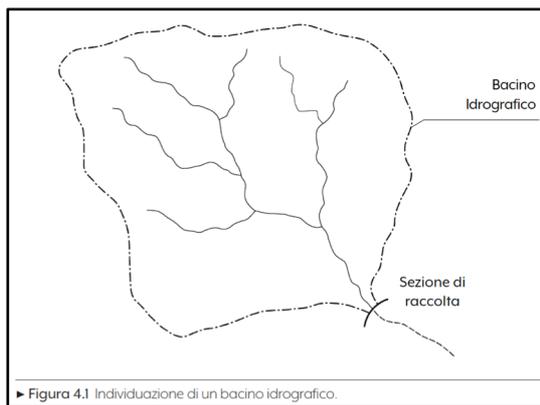
- Il deflusso in un determinato periodo T è l'integrale della portata derivata (in corrispondenza della sezione di raccolta)

$$D = \int_0^T Q(t) \cdot dt$$

- Per il rilevamento della portata è necessario:
 - Conoscenza della conformazione del corso d'acqua nella sezione di raccolta → Area = f(h)
 - Misura dell'altezza del corso d'acqua (idrometro)
 - Misura della velocità di deflusso (mulinelli tarati)



► Figura 4.2 Misura della portata di un corso d'acqua.



► Figura 4.1 Individuazione di un bacino idrografico.



8

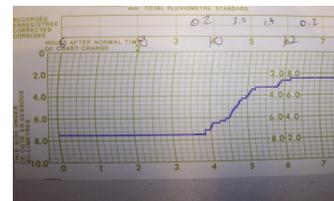
Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Analisi idrogeologica – Determinazione dei afflussi A

- Gli afflussi da corso d'acqua si determinano analogamente ai deflussi
- Il calcolo degli afflussi piovani elabora le misure di un certo numero di **pluviometri**
 - **Media aritmetica** delle misure raccolte (approssimato)
 - **Metodo dei topoieti**: ad ogni pluviometro è associata una certa zona del bacino, caratterizzata da una conformazione topografica omogenea
 - Gli afflussi piovani sono determinati come media pesata delle misure raccolte da ciascun pluviometro installato
 - **Metodo delle isoiete**: i rilievi provenienti dalla rete di pluviometri sono usati per tracciare delle linee iso-precipitazione (isoiete)
 - Gli afflussi piovani si determinano integrando le aree di eguale precipitazione sulla superficie del bacino idrografico



Un **pluviometro** (noto anche come **udometro**) è uno strumento utilizzato da meteorologi e idrologi per raccogliere e misurare la quantità di precipitazioni liquide in un determinato periodo di tempo

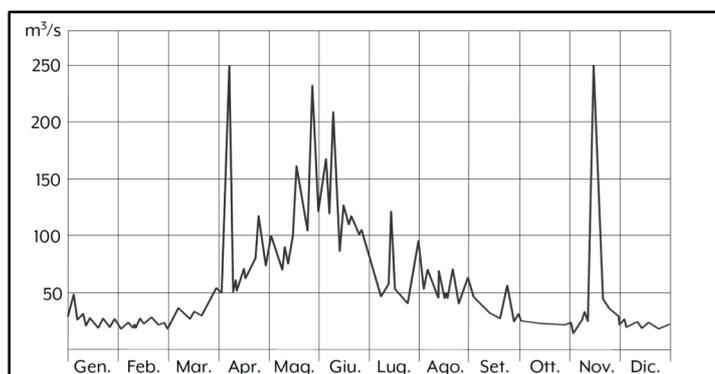


9

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Classificazione degli impianti idroelettrici

- Rilevati A e D, è possibile calcolare il rendimento del bacino C
- Noto C, a partire da serie storiche di A, può essere ricostruito l'andamento cronologico di D
 - **Curva cronologica delle portate** → Variabilità della fonte primaria nel caso di impianti ad acqua fluente



► Figura 4.3 Esempio di curva cronologica delle portate giornaliere rilevate in una determinata sezione del bacino idrografico.

10

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Anno tipico

- È necessario costruire un anno di riferimento sul quale effettuare delle valutazioni inerenti il dimensionamento dell'impianto idroelettrico
- Anno tipico:** anno, storicamente verificatosi, avente caratteristiche che più si avvicinano all'anno medio
 → È minima la somma degli scarti quadratici medi

1972	Q_G	Q_F	Q_M	...	Q_D
.
2002	Q_G	.	.	.	.

Elaborazione dell'anno medio (\neq anno tipico):

- Ogni mese dell'anno medio ha portata media tra gli stessi mesi dei vari anni

$$Q_{mG} = \frac{\sum Q_G}{n}$$

$$Q_{mD} = \frac{\sum Q_D}{n}$$

1972	$(Q_G - Q_{mG})^2$	...	$(Q_D - Q_{mD})^2$	$\sum_1^{12} (Q_i - Q_{mi})^2$
.
2002	$(Q_G - Q_{mG})^2$	...	$(Q_D - Q_{mD})^2$	.

Identificazione dell'anno tipico:

- Calcolo degli scarti quadratici medi
- Per ogni anno, somma degli scarti quadratici medi sui 12 mesi
- L'anno tipico è quello che ha il minimo valore nella colonna più a destra

Curva di durata dell'anno tipico

11

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Impianto ad acqua fluente – Taglia più conveniente

- Per un impianto idroelettrico (in prima approssimazione):
 - Il costo investimento dipende dalla potenza nominale
 - A parità di salto idraulico, **Costo \equiv Portata massima turbinabile Q_M**
 - I ricavi dipendono dall'energia prodotta
 - A parità di salto idraulico, dalla quantità di acqua turbinata
 - Ricavi \equiv Portata media turbinata Q_m** (partendo dal curva di durata, Q_m è l'ordinata di compenso dell'area in grigio, sottesa sull'asse delle portate tra 0 e Q_M)

Non c'è interesse economico a dimensionare un impianto oltre il ginocchio

Costo di installazione

12

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Impianto a serbatoio – Capacità di invaso

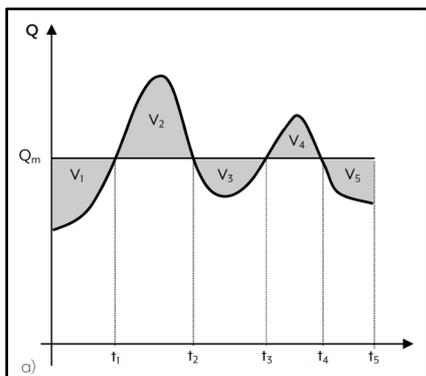
- Per un impianto idroelettrico a serbatoio è interessante valutare:
 - La capacità del serbatoio richiesta al fine di poter derivare una portata costante, pari alla media della portata affluita (detratte le perdite P_e)
 - Le modalità di erogazioni consentite da un serbatoio assegnato (di capacità V_s)

13

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Impianto a serbatoio – Capacità di invaso

- Per un impianto idroelettrico a serbatoio è interessante valutare:
 - La **capacità del serbatoio** richiesta al fine di poter derivare una portata costante, pari alla media della portata affluita (detratte le perdite P_e)
 - Individuare i volumi d’acqua che devono essere trattenuti nel periodo di esubero
 - Individuare i volumi che possono essere forniti in periodi di carenza



- Considerando un volume d’acqua nel serbatoio V_0 a $t = 0$, si deve verificare che il serbatoio non sia mai vuoto e ritorni al volume V_0 alla fine del periodo, ovvero:

$$\begin{cases} (V_0 - V_1) \geq 0 \\ (V_0 - V_1 + V_2 - V_3) \geq 0 \\ (V_0 - V_1 + V_2 - V_3 + V_4 - V_5) = V_0 \end{cases} \Rightarrow V_0$$

- La **capacità minima del serbatoio** è quindi pari a:

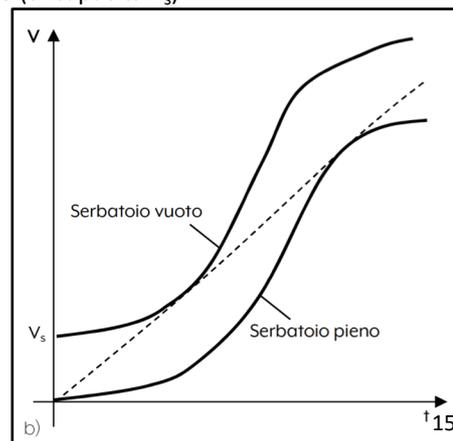
$$\text{Max} \left[(V_0 - V_1 + V_2); (V_0 - V_1 + V_2 - V_3 + V_4) \right]$$

14

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Impianto a serbatoio – Capacità di invaso

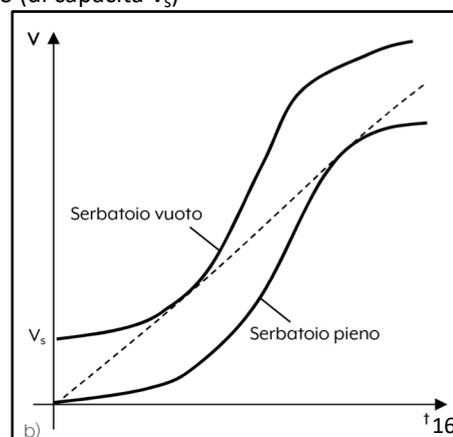
- Per un impianto idroelettrico a serbatoio è interessante valutare:
 - La capacità del serbatoio richiesta al fine di poter derivare una portata costante, pari alla media della portata affluita (detratte le perdite P_e)
 - Le **modalità di erogazioni consentite** da un serbatoio assegnato (di capacità V_s)
 - Integrando nel tempo la curva dei deflussi Q , si ottiene la curva inferiore, in $[m^3]$ → Curva di serbatoio pieno
 - Traslando verticalmente tale curva della quantità V_s si ottiene la curva di serbatoio vuoto
 - Una erogazione qualsiasi dell'impianto è pari all'integrazione dei deflussi effettivi nel tempo → Curva di funzionamento
 - La curva di funzionamento deve restare all'interno dei limiti di serbatoio vuoto e pieno (se la Q derivata è maggiore di quella disponibile, il serbatoio si svuota e la curva di funzionamento si avvicina alla curva di serbatoio vuoto)



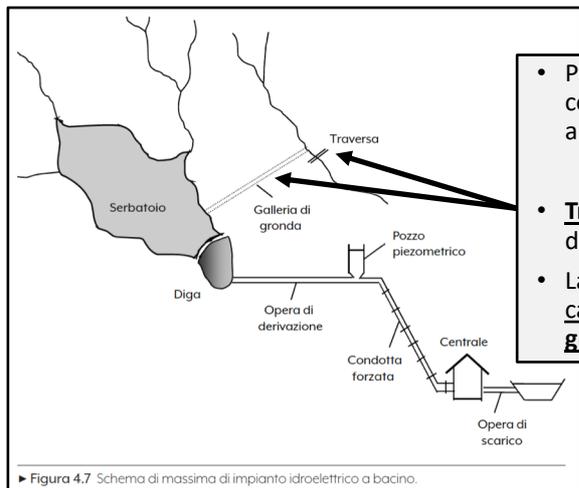
Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Impianto a serbatoio – Capacità di invaso

- Per un impianto idroelettrico a serbatoio è interessante valutare:
 - La capacità del serbatoio richiesta al fine di poter derivare una portata costante, pari alla media della portata affluita (detratte le perdite P_e)
 - Le **modalità di erogazioni consentite** da un serbatoio assegnato (di capacità V_s)
 - La legge di erogazione che presenta il minor scostamento dall'erogazione a portata costante è quella che si determina con la "regola del filo teso"
 - Altri elementi da considerare:
 - La portata derivata deve essere nel range $0 - Q_M$
 - $Q > Q_M$ sarebbero scaricate a valle senza generare energia elettrica
 - Eventuali limiti inferiori di portata stagionale concordati con acquedotti o consorzi irrigui (portata minima vitale)
 - Vincoli sul livello di invaso in determinati periodi dell'anno (ragioni di sicurezza)



Elementi costitutivi di un impianto idroelettrico tipo

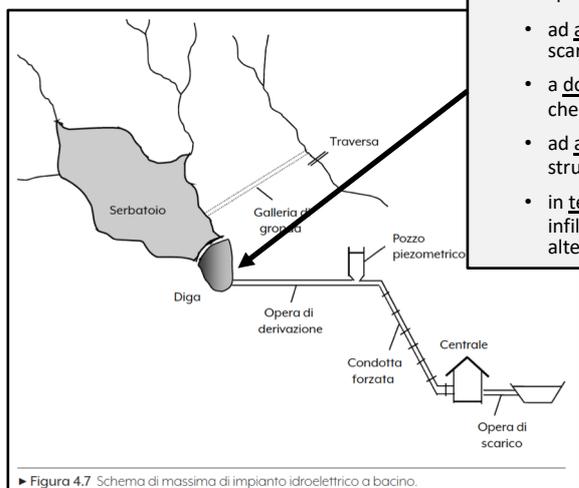


- Per incrementare la potenzialità dell'impianto si convogliano nel serbatoio anche i deflussi associati a bacini idrografici adiacenti al bacino principale
 - Aumento degli afflussi A
- **Traversa** (piccola diga) in corrispondenza al corso d'acqua secondario
- La portata del corso d'acqua è convogliata in un canale artificiale a pelo libero o in una **galleria di gronda** che attraversa lo spartiacque

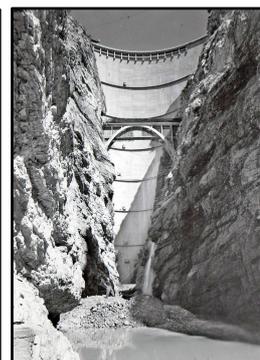
► Figura 4.7 Schema di massima di impianto idroelettrico a bacino.

17

Elementi costitutivi di un impianto idroelettrico tipo



- **Diga:**
 - a gravità: sviluppo rettilineo e contrastano la spinta dell'acqua unicamente con il proprio peso
 - ad arco: hanno uno sviluppo di tipo arcuato e scaricano la spinta dell'acqua sugli spallamenti
 - a doppio arco: arcuate sia in sezione orizzontale che in sezione verticale
 - ad arco-gravità: combinazione delle due strutture precedenti
 - in terra: economiche ma possono dare luogo a infiltrazioni d'acqua (solo per costruzioni con altezza di ritenuta non troppo elevata)



► Figura 4.7 Schema di massima di impianto idroelettrico a bacino.

18

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Elementi costitutivi di un impianto idroelettrico tipo

- Le **griglie** trattengono i corpi solidi e i detriti per evitare che vadano ad intasare o danneggiare le opere a valle

► Figura 4.7 Schema di massima di impianto idroelettrico a bacino.

19

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Elementi costitutivi di un impianto idroelettrico tipo

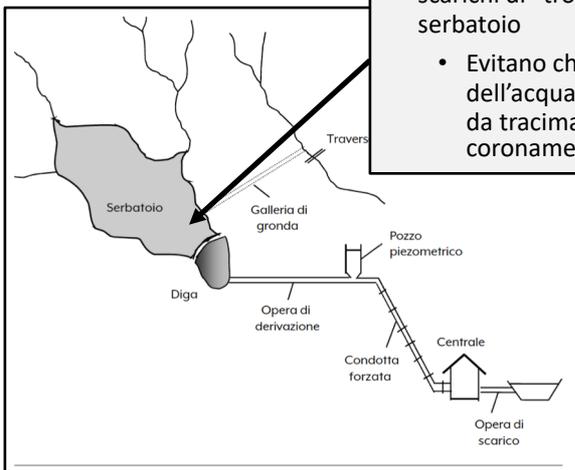
- In caso di opere di presa a pelo libero, sono normalmente realizzate le **vasche di decantazione**
 - L'acqua, scorrendo a bassa velocità, deposita detriti, ghiaia e sabbia
 - Ciò permette di allungare sensibilmente la vita media delle turbine

► Figura 4.7 Schema di massima di impianto idroelettrico a bacino.

20

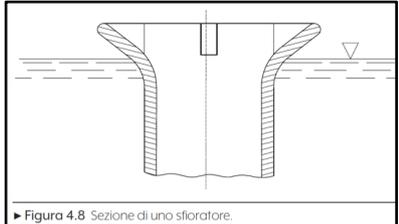
Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Elementi costitutivi di un impianto idroelettrico tipo



► Figura 4.7 Schema di massima di impianto idroelettrico a bacino.

- Gli **sfiatori** funzionano come scarichi di “troppo pieno” per il serbatoio
- Evitano che il livello dell’acqua si innalzi al punto da trascinare dal coronamento della diga



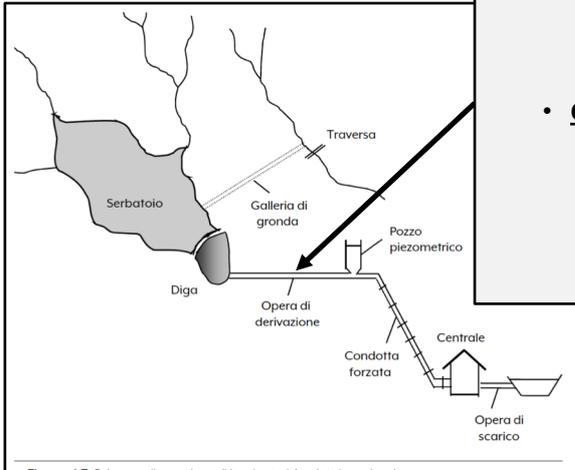
► Figura 4.8 Sezione di uno sfiatore.



21

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Elementi costitutivi di un impianto idroelettrico tipo



► Figura 4.7 Schema di massima di impianto idroelettrico a bacino.

- Opera di derivazione:
 - **Galleria in pressione**
 - PRO: nessun vincolo di tracciato, tempo di regolazione della portata sensibilmente inferiore
 - CONTRO: costo
 - **Canale a pelo libero**
 - PRO: minor costo per unità di lunghezza, minori perdite di carico (raggio equivalente inferiore)
 - SVANTAGGI: devono seguire il profilo altimetrico del terreno, lenta propagazione dei transitori (nell’ordine dei minuti)

22

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Elementi costitutivi di un impianto idroelettrico tipo

- Alla fine dell'opera di derivazione
 - **Pozzo piezometrico** (per impianti con derivazione in pressione)
 - Riduce la sovra-pressione di colpo d'ariete nella condotta forzata
 - Evitare che la sovra-pressione in condotta forzata si propaghi in galleria
 - **Vasca di carico** (per impianti con derivazione a pelo libero)
 - Facilita i transitori idraulici di avviamento/arresto (riduzione dei tempi di propagazione idraulica)

► Figura 4.7 Schema di massima di impianto idroelettrico a bacino.

23

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Elementi costitutivi di un impianto idroelettrico tipo

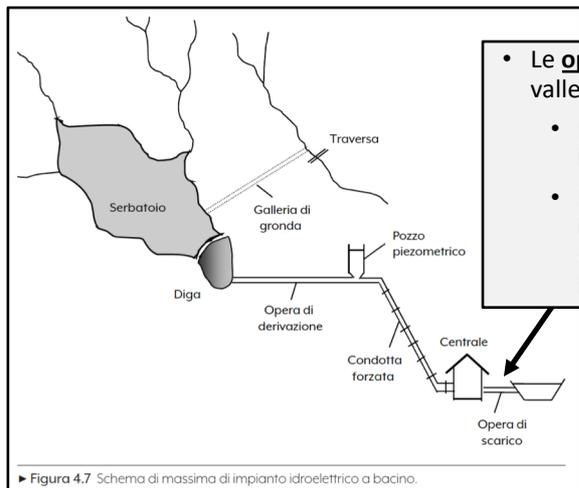
- **Condotta forzata** (o condotte forzate) per l'adduzione dell'acqua al macchinario in centrale
 - All'aperto
 - In caverna
 - In pozzo
 - Nel corpo diga (in caso di salto utile abbastanza modesto)

► Figura 4.7 Schema di massima di impianto idroelettrico a bacino.

24

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Elementi costitutivi di un impianto idroelettrico tipo

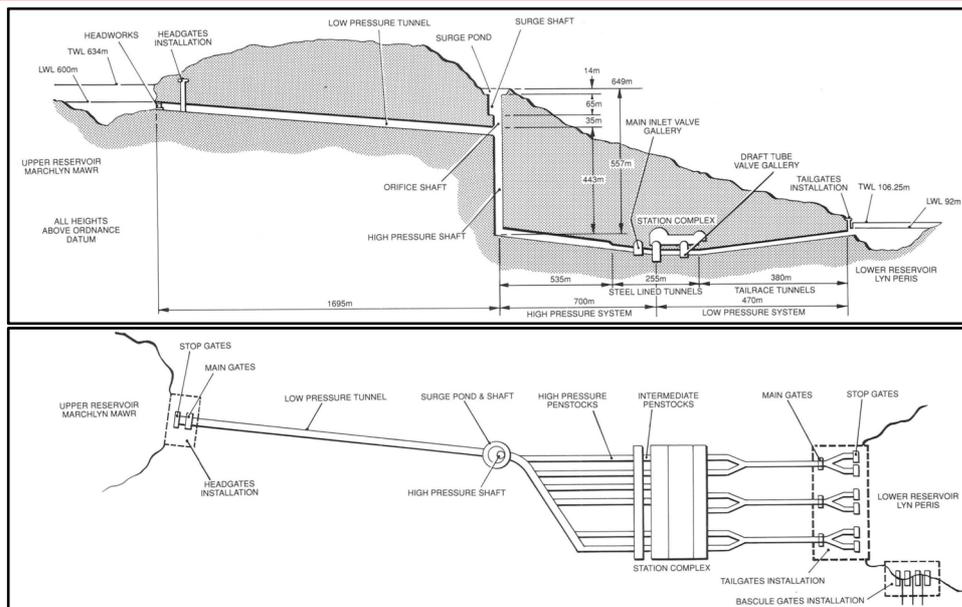


- Le **opere di restituzione (o di scarico)** sono poste a valle della centrale
 - Possono essere costituite da un canale a pelo libero oppure da una condotta in pressione
 - In certi casi lo scarico può essere collegato ad un bacino di rimodulazione (per svincolare le esigenze dell'impianto da quelle dell'eventuale rete idrica o irrigua a valle)

► Figura 4.7 Schema di massima di impianto idroelettrico a bacino.

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Elementi costitutivi di un impianto idroelettrico tipo



Sezione pseudo-longitudinale dell'impianto:

- Galleria in pressione
- Pozzo piezometrico
- Condotta forzata in pozzo/caverna

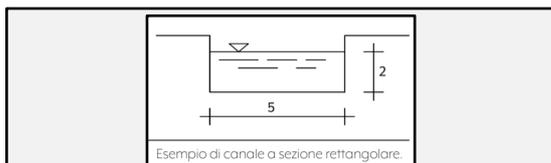
Vista in pianta dell'impianto

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Raggio idraulico e perdite di carico

- Il **raggio idraulico** è il rapporto tra la sezione di deflusso e il perimetro bagnato
 - Le perdite di carico sono inversamente proporzionali al raggio idraulico

$$R = \frac{A}{P_b} \quad [m]$$



- Canale rettangolare a pelo libero
- Sezione di deflusso $A = 10 \text{ m}^2$
- Perimetro bagnato $P_b = 9 \text{ m}$
- Raggio idraulico $R = 1,1 \text{ m}$
- Perdite di carico ↓



- Condotta cilindrica in pressione
- Sezione di deflusso $A = \pi D^2/4$
- Perimetro bagnato $P_b = \pi D$
- Raggio idraulico $R = D/4$
- A parità di sezione di deflusso $D = 3,57 \text{ m}$
- Raggio idraulico $R = 0,89$
- Perdite di carico ↑

27

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Transitori idraulici

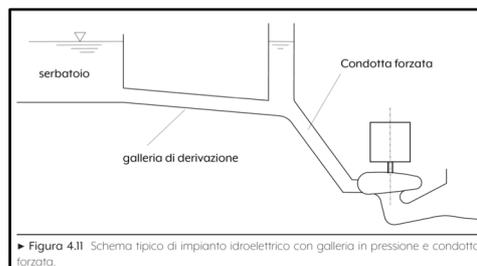
- Variazione di portata turbinata → Duplici transitorio idraulico:

- **Transitorio nella condotta forzata**

- Riduzione della portata → Onda di sovra-pressione
- Velocità di propagazione verso monte $\sim 1.000 \text{ m/s}$
- Riflessione nel pozzo piezometrico
- Sequenza di oscillazioni di pressione in condotta forzata (tempi tipici dell'ordine dei secondi)
 - Sono trascurabili i lavori d'attrito
 - Non sono trascurabili i lavori di dilatazione della condotta forzata e di compressione dell'acqua

- **Transitorio nella galleria**

- Sistema serbatoio-galleria-pozzo piezometrico
- La riduzione della portata in condotta forzata innalza il livello dell'acqua nel pozzo piezometrico
- Oscillazioni di massa tra il pozzo piezometrico e il serbatoio
- Tempi di oscillazione dell'ordine dei minuti o decine di minuti
- Non sono trascurabili i lavori d'attrito
- Sono trascurabili i lavori associati alla "elasticità" del fluido e della galleria



Costanti di tempo molto diverse tra i due fenomeni

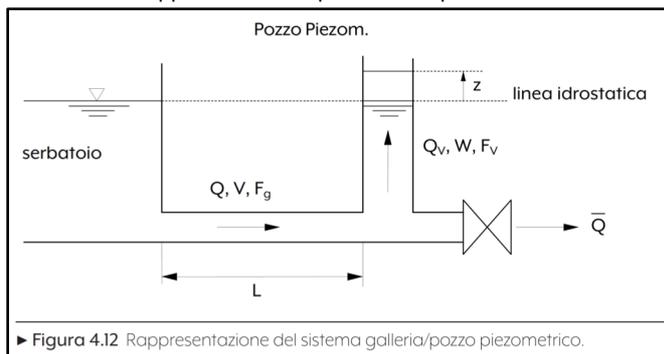
I due fenomeni possono essere studiati come **indipendenti**

28

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Transitorio idraulico del sistema galleria-pozzo piezometrico

- Ipotesi di studio
 - Livello idrostatico nel serbatoio costante
 - Pozzo piezometrico cilindrico
 - Galleria in pressione priva di elasticità;
 - Regolazione della portata immediatamente a valle del pozzo piezometrico (come se non ci fosse la condotta forzata)
 - Approssimazione possibile in quanto le due dinamiche sono di fatto reciprocamente indipendenti



- L e F_g : lunghezza e sezione della galleria in pressione
- Q e V: portata e velocità dell'acqua in galleria
- \bar{Q} : portata uscente dal sistema (verso la turbina)
- F_v : sezione del pozzo piezometrico;
- Q_v e W: portata e velocità dell'acqua nel pozzo piezometrico
- Z: quota del pelo libero nel pozzo piezometrico (rispetto alla linea idrostatica)
- $R = KQ^2$: perdite di carico nella galleria

29

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Transitorio idraulico del sistema galleria-pozzo piezometrico

Teorema delle forze vive Equazione di continuità

La variazione di energia cinetica posseduta da un certo volume di fluido, a seguito del transitorio di regolazione, è pari al lavoro esterno compiuto su di esso

$$dE_c = d \left(m \frac{V^2}{2} \right) = dL_{attr.} + dL_{press.}$$

$$dE_c = d \left(\rho L F_g \frac{V^2}{2} \right) = \rho L F_g V dV = -\gamma R F_g V dt - \gamma Z F_g V dt$$

- Nel tempo dt, la massa di fluido si sposta di Vdt
- Nel mentre, viene contrastata da:
 - forze di attrito (resistenze idrauliche $R = KQ^2$)
 - forze dovute alle differenze delle pressioni γZ presenti agli estremi del sistema

Lavoro elementare d'attrito

$$dL_{attr.} = -(\gamma \cdot R \cdot F_g) \cdot V \cdot dt$$

Lavoro elementare di pressione

$$dL_{press.} = -(\gamma \cdot Z \cdot F_g) \cdot V \cdot dt$$

30

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Transitorio idraulico del sistema galleria-pozzo piezometrico

- Si ricava dunque

$$\frac{LF_g dV}{gF_g dt} = -R - Z$$

- Conservazione della portata →

$$Q - \bar{Q} = Q_V = F_V W = F_V \frac{dZ}{dt} \quad \left(\text{essendo } W = \frac{dZ}{dt} \right)$$

- Necessario considerare il contributo stabilizzante (dissipativo) delle perdite per attrito
- Si ricava il sistema di equazioni

$$\begin{cases} \frac{L}{gF_g} \cdot \frac{dQ}{dt} + KQ|Q| + Z = 0 \\ Q - \bar{Q} = F_V \frac{dZ}{dt} \end{cases}$$

31

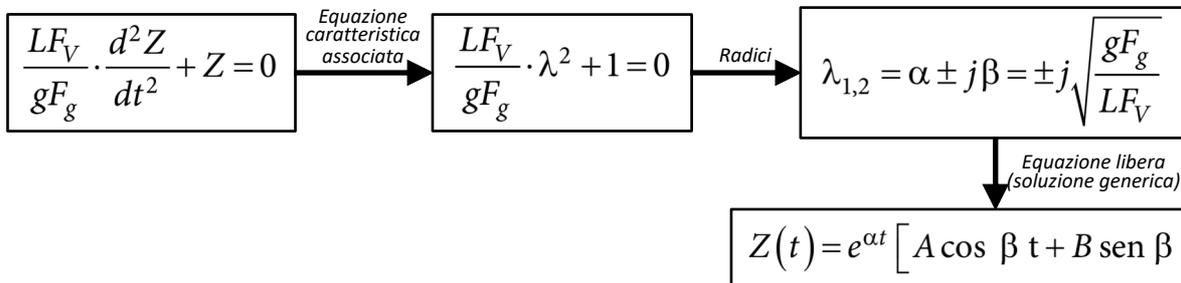
Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Transitorio idraulico del sistema galleria-pozzo piezometrico

- Ipotesi di chiusura istantanea della valvola sulla condotta forzata → Variazione a gradino della portata \bar{Q}
- Derivata della seconda equazione del sistema

$$\frac{dQ}{dt} = F_V \frac{d^2 Z}{dt^2}$$

- Introducendo tale espressione nella prima equazione e trascurando gli attriti ($K = 0$)



32

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Transitorio idraulico del sistema galleria-pozzo piezometrico

- Condizioni al contorno → Regime imperturbato prima dell'evento (per $t = 0$)
 - Quota del pelo libero nel pozzo piezometrico pari alla quota del serbatoio per $t = 0^+ \rightarrow Z(0^+) = Z(0^-) = 0$

$$z(0) = 0 \rightarrow A = 0$$

- Conservazione della portata nell'istante $t = 0^+$
 - La portata che fluisce nel pozzo piezometrico è pari a $(Q - \bar{Q}) = F_g (V_0 - \bar{V}_0) = Q_v = F_v W \rightarrow$ All'istante $t = 0^+$ si ha

$$W(0) = \frac{dZ}{dt}(0) = B\beta = \frac{F_g}{F_v} (V_0 - \bar{V}_0)$$

$$B = \frac{F_g}{F_v} \cdot \sqrt{\frac{LF_v}{gF_g}} \cdot (V_0 - \bar{V}_0)$$

- L'evoluzione dell'altezza del pelo libero nel pozzo piezometrico è quindi pari a

$$Z(t) = (V_0 - \bar{V}_0) \cdot \sqrt{\frac{LF_g}{gF_v}} \cdot \text{sen} \sqrt{\frac{gF_g}{LF_v}} \cdot t$$

33

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Transitorio idraulico del sistema galleria-pozzo piezometrico

- In caso di chiusura totale a gradino (ovvero molto rapida)
 - Ampiezza dell'oscillazione del pelo libero nel pozzo piezometrico
 - Periodo dell'oscillazione di massa

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{LF_v}{gF_g}}$$

$$\frac{Z_{max}}{Z_{min}} = \pm V_0 \cdot \sqrt{\frac{LF_g}{gF_v}}$$

Esempio numerico:

- Lunghezza della galleria in pressione $L = 2.500$ m
- Rapporto F_v/F_g pari a 4,5
- V_0 pari a 5 m/s



- Oscillazione del livello dell'acqua nel pozzo piezometrico circa 37 metri
- Periodo di oscillazione di circa 3,5 minuti

34

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Dimensionamento del pozzo piezometrico

• **Funzioni** del pozzo piezometrico:

- Limitare la sovrappressione per colpo d'ariete (formula di Michaud)
- Impedire che la sovrappressione si propaghi a monte di esso

$$\Delta H \cong \frac{2L_c V}{g t_{ch}}$$

• **Requisiti essenziali** per un pozzo piezometrico:

- Evitare le tracimazioni
- Evitare l'ingresso d'aria in galleria

L'intera ampiezza di oscillazione del pelo libero deve essere contenuta nel pozzo piezometrico

Volume minimo del pozzo piezometrico

$$Vol \cong 2Z_{max} F_V = 2V_0 \sqrt{\frac{L \cdot F_g}{g \cdot F_V} \cdot F_V^2}$$

$$Vol = K \sqrt{F_V}$$

- Funzionamento stabile → Smorzamento delle oscillazioni di massa tra serbatoio e pozzo piezometrico
- Costo contenuto → Costo ≡ Volume del pozzo ≡ (Sezione del pozzo)^{0,5}

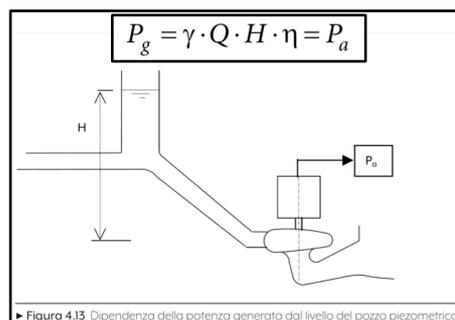
35

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Dimensionamento del pozzo piezometrico

• **Criterio di stabilità** del pozzo piezometrico

- Ipotesi: generatore che alimenta un carico elettrico P_a
- Se si alza la quota del pozzo piezometrico
 - Aumenta il salto utile H
 - Aumenta la potenza generata $P_g > P_a$ (costante)
 - Il gruppo tende ad accelerare
 - Interviene il regolatore che chiude parzialmente la valvola sulla condotta forzata per ridurre P_g ($Q \downarrow$)
 - Ulteriore crescita del livello dell'acqua nel pozzo piezometrico



• **Relazione di Thoma** → **Valore minimo di F_V**

- La sezione minima del pozzo dipende da $1/H$
 - Pozzo piezometrico può essere stretto in caso di alti salti, piuttosto largo in caso di bassi salti

$$F_V \geq \frac{V_0^2}{2g} \cdot \frac{L \cdot F_g}{R \cdot H}$$

36

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Dimensionamento del pozzo piezometrico

Forma costruttiva

- Bilancio energetico fra energia cinetica e potenziale nelle ipotesi:
 - Pozzo piezometrico cilindrico
 - Chiusura istantanea della valvola sulla condotta forzata
 - Assenza di perdite
 - C è il volume d'acqua al di sopra del livello idrostatico nel pozzo
 - Z_b è il livello del baricentro del volume entrato
- Obiettivi della scelta della forma costruttiva del pozzo piezometrico:
 - Contenere il volume d'acqua C entrante nel pozzo piezometrico durante l'oscillazione → Ridurre il volume del pozzo → Ridurre il costo del pozzo
 - Forma costruttiva che consenta di
 - Innalzare la quota Z_b del baricentro del volume entrato
 - Non aumentare l'altezza Z_{max}

$$\rho \cdot L \cdot Fg \cdot \frac{Vo^2}{2} = \rho \cdot g \cdot C \cdot Z_b$$

$$L \cdot Fg \cdot \frac{Vo^2}{2g} = C \cdot Z_b = C \cdot \frac{Z_{max}}{2}$$

Relazione valida in caso di pozzo piezometrico cilindrico

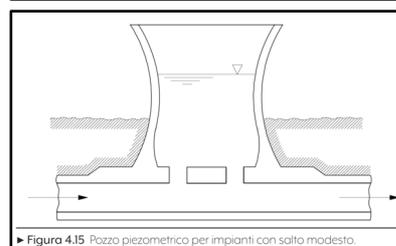
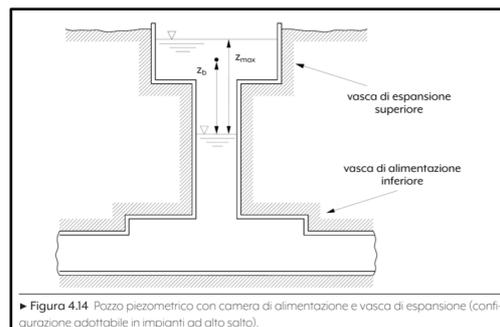
37

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Dimensionamento del pozzo piezometrico

Forma costruttiva

- Impianti ad alto salto
 - Pozzi piezometrici con vasca di espansione
 - La sezione della canna tra le due camere risulta notevolmente ridotta (comunque superiore alla formula di Thoma)
- Impianti a basso salto
 - La sezione minima del pozzo (Thoma) è decisamente superiore
 - È presente un restringimento appena accennato del pozzo piezometrico nella zona centrale
 - Una strozzatura nella sezione d'ingresso alla base del pozzo garantisce una adeguata azione antagonista in regime transitorio (non dà effetti in regime stazionario)



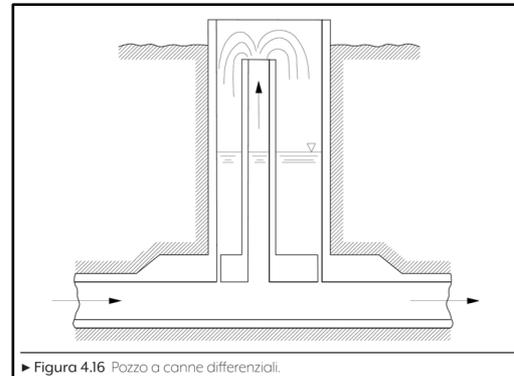
38

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Dimensionamento del pozzo piezometrico

Forma costruttiva

- Pozzo a canne differenziali
 - Il livello dell'acqua, per l'effetto di una riduzione di portata in centrale, si innalza rapidamente nella canna più sottile, che ha un'apertura alla base più ampia, trascinando successivamente nella canna più lunga
 - È rispettata la condizione di Thoma (ai fini della stabilità, la sezione da considerare è quella totale di entrambe le canne)
 - Efficace grado di smorzamento



► Figura 4.16 Pozzo a canne differenziali.

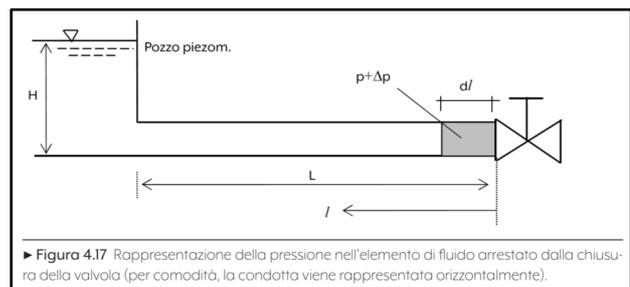
- Il calcolo reale di un pozzo piezometrico si discosta da quello teorico
 - Presenza di fenomeni dissipativi
 - Tempo di variazione della portata non nullo
- Si applica il metodo delle differenze finite di Eulero

39

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Transitorio idraulico nelle condotte forzate

- Ipotesi di base:
 - Nel pozzo piezometrico si mantiene una pressione p costante durante il transitorio
 - Caratteristiche geometriche ed elastiche della condotta uniformi lungo la lunghezza L
 - Condotta disposta in orizzontale, di sezione A
 - Attriti trascurabili
 - Chiusura istantanea della valvola a valle ($t_{ch} = 0$)
- Se non si considera l'elasticità di condotta e acqua, la pressione sarebbe teoricamente infinita
- Elasticità della condotta e dell'acqua
 - Energia cinetica dell'acqua → Energia elastica (deformazione della condotta + compressione acqua)
 - Nel tempo elementare dt dopo l'istante di chiusura
 - Arresto contro l'otturatore di un elemento di fluido di lunghezza dl , massa dm e velocità precedente V_0
 - Aumento della pressione dell'elemento infinitesimo ($p \rightarrow p + \Delta p$) → Colpo d'ariete



► Figura 4.17 Rappresentazione della pressione nell'elemento di fluido arrestato dalla chiusura della valvola (per comodità, la condotta viene rappresentata orizzontalmente).

40

Transitorio idraulico nelle condotte forzate

• Teorema della quantità di moto

- La variazione della quantità di moto di un elemento di colonna d'acqua corrisponde all'azione della forza di pressione nel tempo dt

$$dm \cdot V_0 = (\rho \cdot A \cdot dl) \cdot V_0 = F \cdot dt = \Delta p \cdot A \cdot dt$$

- La celerità della propagazione è a

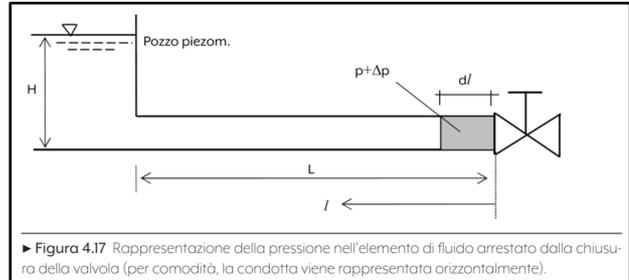
$$a = \frac{dl}{dt}$$

- La sovra-pressione che si genera è quindi calcolabile (nell'ipotesi di $t_{ch} = 0$)

$$\Delta p = \rho \cdot a \cdot V_0$$

- Tale sovra-pressione, in termini di dislivello

$$\Delta H = \frac{a \cdot V_0}{g} \quad [m]$$

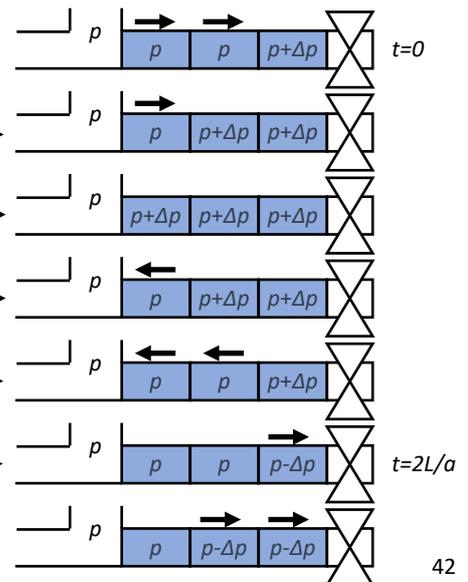


Esempio numerico:

- Celerità $a = 1.000 \text{ m/s}$
- Velocità precedente dell'acqua $V_0 = 5 \text{ m/s}$
- Intercettazione istantanea della portata
 - Sovra-pressione $\Delta H \cong 500 \text{ m}$ ($\sim 50 \text{ bar}$ poiché $1 \text{ bar} = 10,1974 \text{ m d'acqua}$)

Transitorio idraulico nelle condotte forzate

- Dopo un ulteriore tempo elementare dt un altro elemento di fluido di lunghezza dl si arresta
 - Nel secondo elemento infinitesimo si genera una sovra-pressione Δp
 - Il fenomeno si propaga verso monte fino a raggiungere il pozzo piezometrico
- L'ultimo elemento di liquido risulta squilibrato:
 - Possiede una pressione propria $p + \Delta p$
 - È contrastato da una pressione p costante (livello dell'acqua nel pozzo piezometrico)
- L'ultimo elemento dl di colonna di liquido tende quindi ad espandersi, muovendosi verso il serbatoio
- Dopo un tempo pari a $(2L/a)$ tutta la colonna è in movimento a velocità $-V_0$, con pressione p
- L'ultimo elemento posto a ridosso dell'otturatore tende a staccarsi dalla sezione di chiusura
 - Depressione di entità $-\Delta p$
- All'istante $(3L/a)$ il fenomeno giunge nuovamente all'imbocco a monte della condotta, dove viene nuovamente riflesso



Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Transitorio idraulico nelle condotte forzate

- All'istante $(4L/a)$ si ristabilisce in corrispondenza all'otturatore la pressione $p \rightarrow$ Stessa situazione rispetto a $t = 0$

► Figura 4.19 Andamento (ideale) della pressione osservata all'otturatore.

Otturatore (in centrale)

La durata della perturbazione della pressione è tanto più breve quanto più ci avviciniamo all'imbocco della condotta, lato pozzo piezometrico

► Figura 4.20 Andamento (ideale) della pressione osservata in una generica sezione della condotta a distanza l dall'otturatore.

Punto della condotta distante l dall'otturatore

43

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Transitorio idraulico nelle condotte forzate

- Nella realtà il tempo di chiusura t_{ch} non è nullo
 - Tempo di azionamento degli organi di intercettazione idraulica
- È possibile calcolare la sovra-pressione di colpo d'ariete ipotizzando che la riduzione della portata sia lineare nel tempo di chiusura $t_{ch} \rightarrow$ **Trattazione dell'Allievi**
 - Si definisce il **ritmo della condotta** $\tau_0 = \frac{2 \cdot L}{a}$
 - Se $t_{ch} > \tau_0 \rightarrow$ Attenuazione della sovra-pressione

$$\Delta p = \rho \cdot a \cdot V_0 \cdot \frac{\tau_0}{t_{ch}}$$

\longleftrightarrow

$$\Delta H = \frac{a \cdot V_0}{g} \cdot \frac{\tau_0}{t_{ch}} = \frac{2 \cdot L \cdot V_0}{g \cdot t_{ch}}$$

- D'altro canto, il tempo di chiusura t_{ch} deve restare sufficientemente piccolo per limitare il transitorio di sovra-velocità dovuto al distacco del carico elettrico \rightarrow **Condizioni di fuga**
- Generalmente $t_{ch} \geq 4$ s (velocità dei servomotori)

44

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Condotte forzate

Caratteristiche e classificazione

- **Materiale:**
 - Metallo (prevalentemente)
 - Calcestruzzo (precompresso o centrifugato) negli impianti con salto modesto e grandi portate
 - Materiali compositi (es. fibra di carbonio, limite legato ai costi)
- **Disposizione costruttiva:**
 - All'aperto
 - PRO: costi di realizzazione minori, facilità di ispezione
 - CONTRO: esposizione agli agenti atmosferici e a notevoli escursioni termiche → giunti di dilatazione
 - In galleria (libera o bloccata)
 - PRO: riduzione della lunghezza della condotta (minore sovrappressione per colpo d'ariete), risparmio di materiale (sforzi scaricati sulla roccia circostante), protezione contro eventi bellici ed attentati terroristici
 - CONTRO: non è possibile l'ispezione esterna, costi



45

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Condotte forzate

Caratteristiche e classificazione

- **Numero delle condotte:**
 - La soluzione di un'unica condotta è in genere la più economica, ma non sempre è fattibile
 - Grandi portate → Diametri ↑ (problemi di trasporto) → Elevati spessori (difficoltà di saldatura)
 - Formula di Mariotte: nota la pressione p e definito il materiale (massima sollecitazione ammissibile σ), si ha diametro D → spessore s

$$s = pD/2\sigma$$

- A parità di perdite, il peso per la realizzazione di n condotte in parallelo (anziché una sola) dipende dalla relazione

$$G_n = G_1 \cdot \sqrt[n]{n}$$

- Fattore (+15%) per tenere conto degli accessori (giunti, appoggi, ecc.).



46

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

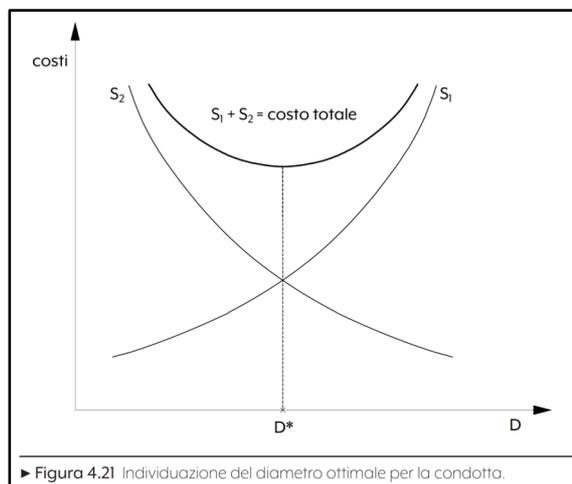
Condotte forzate

Caratteristiche e classificazione

- **Diametro delle condotte:**
 - Criterio di maggiore convenienza economica:
 - Costo di realizzazione S_1 (rata annua di ammortamento) $\propto D$
 - Costo di gestione S_2 (perdite di carico in condotta)
 - **Formula di Darcy** per la determinazione delle perdite in condotta, in [m]

$$\Delta H = \beta \frac{Q^2}{D^5} L \quad [\text{m}]$$

- $S_2 \propto 1/D^5$
- Il diametro ottimale D^* minimizza la somma delle perdite (S_1+S_2)



47

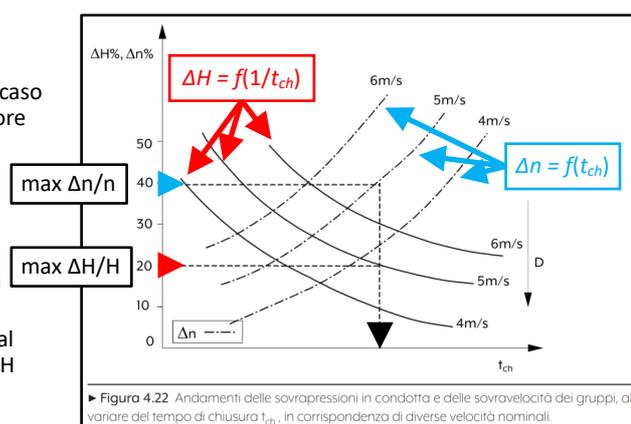
Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Dimensionamento delle condotte forzate

Diametro minimo

- La scelta di t_{ch} è frutto di un compromesso tecnico:
 - Se $t_{ch} \uparrow \rightarrow \Delta H \downarrow$ (sovra-pressione in condotta)
 - Se $t_{ch} \uparrow \rightarrow \Delta n \uparrow$ (aumento di velocità del gruppo in caso di perdita del carico elettrico, es. apertura interruttore di macchina)
- Criterio di dimensionamento di t_{ch} :
 - $\Delta H/H < 20-30\%$
 - $\Delta n/n < 40-50\%$ della
- Sia $\Delta H/H$ che $\Delta n/n$ dipendono dalla velocità dell'acqua in condotta V_0 , che dipende dal diametro della condotta D
- Nota la portata $Q_0 \rightarrow V_0 \rightarrow$ Primo valore del diametro D al fine di produrre una sovra-pressione per colpo d'ariete ΔH non superiore al 25% circa del salto motore H

$$V_0 = \frac{Q_0}{\pi \frac{D^2}{4}} \iff \Delta H = \frac{2LV_0}{gt_{ch}}$$



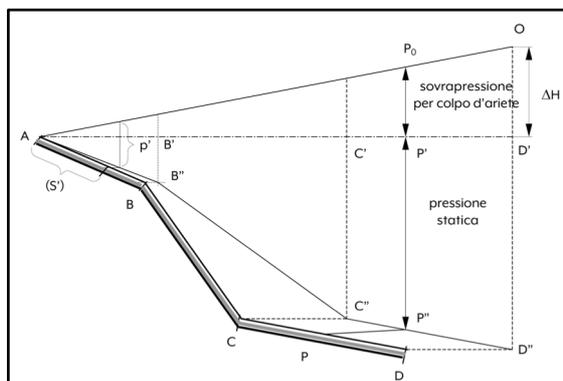
48

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Dimensionamento delle condotte forzate

Pressione di dimensionamento

- Procedura grafica:
 - Disegno in scala del profilo della condotta forzata (ABCD)
 - Si riportano in orizzontale a partire da A i segmenti AB' (di lunghezza AB), B'C' (di lunghezza BC), ecc.
 - La sovra-pressione per colpo d'ariete cresce linearmente lungo la lunghezza della condotta, dal pozzo piezometrico verso la centrale (in centrale vale ΔH)
 - D'O (di lunghezza ΔH)
 - Nel punto generico P, la massima pressione è la somma di
 - Pressione idrostatica P'P''
 - Sovra-pressione per colpo d'ariete P_0P'
 - In generale, la pressione di esercizio è pari alla distanza in verticale tra il segmento AO e la spezzata AB''C''D''



► Figura 4.23 Procedura grafica per la determinazione della pressione nei vari tratti di condotta

49

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

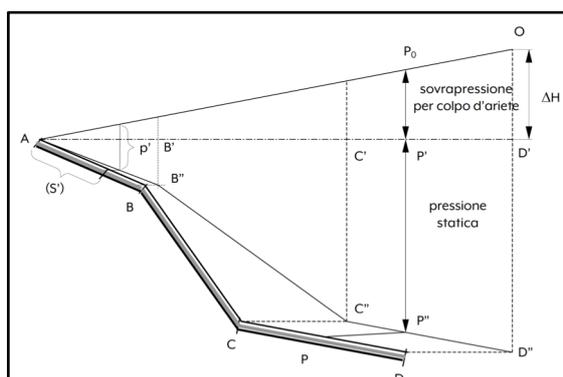
Dimensionamento delle condotte forzate

Spessori della condotta forzata

- La pressione di esercizio cresce dal pozzo piezometrico verso la centrale in quanto:
 - La pressione idrostatica dipende dalla differenza di quota rispetto al pelo libero del pozzo piezometrico
 - La pressione per colpo d'ariete aumenta con la lunghezza della colonna
- Partendo da monte, lo spessore s' del primo tratto di condotta, in cui è più bassa la pressione interna, verrà determinato dalla verifica allo schiacciamento
- Tale spessore può sopportare pressioni fino a p'

$$p' = 2 \frac{s' \sigma}{D}$$

- Graficamente si può valutare la lunghezza di condotta che può fare uso dello spessore s'
- Successivamente si aumenta lo spessore e si ripete la procedura



► Figura 4.23 Procedura grafica per la determinazione della pressione nei vari tratti di condotta

$$s'' = s' + \Delta s \quad (\Delta s \text{ è di solito } 1 \text{ mm})$$

50

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

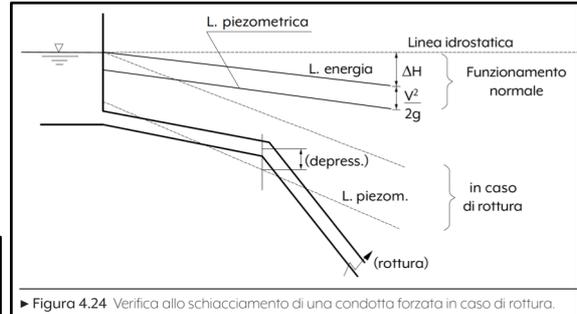
Dimensionamento delle condotte forzate

Verifica contro il rischio di schiacciamento

- In caso di rottura della condotta la velocità dell'acqua aumenta notevolmente → $Q \uparrow$ e Perdite di carico \uparrow
- Abbassamento della linea piezometrica → Depressione accentuata in corrispondenza ai vertici (dove il profilo della condotta è più alto della linea piezometrica)
 - Rischio di schiacciamento del tubo
- Si ha schiacciamento se la differenza di pressione esterno/ interno supera il valore limite della relazione di Eulero

$$p = \frac{3EJ}{R^3} \quad [\text{bar}]$$

- E è il modulo di elasticità del materiale ($2 \cdot 10^7$ [N/cm²] per l'acciaio)
- J è il momento d'inerzia della parete del tubo ($s^3/12$)
- R è il raggio esterno della condotta
- Sperimentalmente per $p = 2$ bar → spessore minimo $s = 1\% D$
- Inoltre, in caso di condotta bloccata in galleria, occorre tener conto anche del rischio di schiacciamento dovuto allo strato sovrastante di roccia (in caso di infiltrazioni d'acqua)



51

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

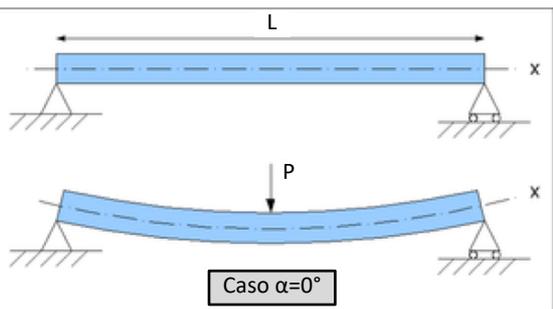
Dimensionamento delle condotte forzate

Sollecitazione a flessione

- Necessario dimensionare i punti di appoggio della condotta (numero e tipo di selle d'appoggio)
- Tra due appoggi consecutivi, la tubazione piena d'acqua esercita ed è sottoposta a sollecitazione a flessione
 - Carico P uniformemente distribuito (per unità di lunghezza) della condotta
 - Distanza tra due appoggi L
 - Angolo α di inclinazione della condotta rispetto all'orizzontale
- Il momento flettente M

$$M = \frac{1}{8} PL^2 \cos\alpha$$

- Se $W = J/R$ è il modulo di resistenza a flessione del materiale, la sollecitazione specifica che interessa le fibre può essere calcolata e verificata con il valore limite del materiale



$$\sigma = \frac{M}{W} \quad [\text{N/mm}^2]$$

52

Dimensionamento delle condotte forzate

Analisi economica

COSTI DI REALIZZAZIONE

- Note lunghezza, diametro e spessore dei vari tratti di condotta, si può determinarne il peso complessivo

$$G = \sum_i \gamma_{Fe} \cdot \pi \cdot D \cdot s_i \cdot L_i = \sum_i \gamma_{Fe} \frac{\pi D^2 \rho_i L_i}{2\sigma}$$

- Il costo di realizzazione è pari a C, considerando una maggiorazione del 15% e il costo c del materiale in [€/kg]

$$C = G \cdot 1,15 \cdot c$$

- Il costo complessivo è ripartito in n quote annue, considerando il tasso d'interesse annuo sul capitale i%

$$S_1 = C \cdot r \quad \text{dove} \quad r = \frac{\left(\frac{i\%}{100} + 1\right)^n \cdot \frac{i\%}{100}}{\left(\frac{i\%}{100} + 1\right)^n - 1}$$

COSTI DI GESTIONE

- Perdita economica causata dalle minore produzione elettrica conseguente alle perdite di carico ΔH_r sulla condotta forzata

- Portata di funzionamento Q_r ,
- Rendimento del gruppo η_r alla portata Q_r ,
- Numero di ore annue di funzionamento n_r alla portata Q_r ,

- Perdita di energia elettrica per perdite di carico

$$\Delta E = \sum_{r=1}^n 9,81 \cdot Q_r \cdot \Delta H_r \cdot \eta_r \cdot n_r \quad [\text{kWh}]$$

- Tale valore energetico è valorizzabile in termini economici noto il prezzo riconosciuto per l'immissione di energia elettrica in rete c_e , in [€/kWh]

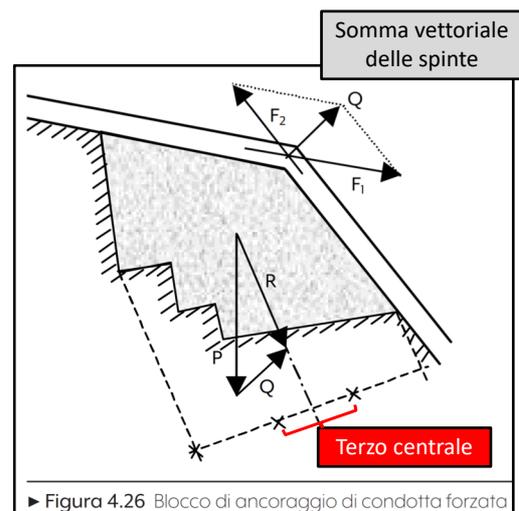
$$S_2 = \Delta E \cdot c_e$$

53

Dimensionamento delle condotte forzate

Stabilità dei blocchi di ancoraggio

- I blocchi di ancoraggio vincolano la condotta al terreno (ai vertici e ogni 200-300 m nei tratti rettilinei)
- Le sollecitazioni esercitate dai due tronchi di condotta sono riconducibili principalmente a due cause:
 - Spinte assiali dei tubi (dilatazione termica o attriti)
 - Spinte di tipo idrostatico esercitate dal fluido
- I blocchi di ancoraggio devono essere verificati:
 - Per il carico σ esercitato sul terreno
 - Verificare che il carico applicato non sia superiore a quello ritenuto accettabile in base alla composizione del terreno
 - Contro il rovesciamento
 - Metodo grafico (con opportuno margine di sicurezza)
 - Verificare che la risultante R (somma vettoriale delle spinte Q e peso P) giaccia su una retta d'azione che intersechi il terzo medio della proiezione della base del blocco su una linea ortogonale alla direzione di R stessa



► Figura 4.26 Blocco di ancoraggio di condotta forzata

54

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Dimensionamento delle condotte forzate

Tipologie costruttive

- Condotte forzate in metallo
- Condotte forzate in calcestruzzo

55

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Dimensionamento delle condotte forzate

Tipologie costruttive

- Condotte forzate in **metallo**
 - Mannesmann
 - Chiodate
 - Saldate
 - Blindate (a caldo o a freddo)
 - Surpressate

56

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Dimensionamento delle condotte forzate

Tipologie costruttive

- Condotte forzate in **metallo**
 - **Mannesmann**
 - Processo di fabbricazione in grado di realizzare tubazioni prive di saldatura longitudinale
 - Talvolta usate per diametri fino al metro
 - Ottime caratteristiche meccaniche
 - Scarso impiego a causa del costo elevato

57

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Dimensionamento delle condotte forzate

Tipologie costruttive

- Condotte forzate in **metallo**
 - Mannesmann
 - **Chiodate**
 - Non più utilizzate a causa delle migliorate tecniche di esecuzione e controllo delle saldature
 - I chiodi comportano un aumento delle perdite di carico

58

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Dimensionamento delle condotte forzate

Tipologie costruttive

- Condotte forzate in **metallo**
 - Mannesmann
 - Chiodate
 - **Saldate**
 - Lamiere calandrate saldate longitudinalmente e trasversalmente
 - Realizzabili spessori fino a 100 mm
 - Raramente si usano spessori oltre i 50 mm
 - Acciai con carico di rottura fino a circa 500 N/mm² (presenze maggiori di carbonio rendono più complessa la saldatura del metallo)

59

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Dimensionamento delle condotte forzate

Tipologie costruttive

- Condotte forzate in **metallo**
 - Mannesmann
 - Chiodate
 - Saldate
 - **Blindate (a caldo o a freddo)** → Riduzione fino al 75% dello spessore della condotta
 - Anelli esterni di rinforzo per la tenuta alla pressione interna
 - Blindatura a caldo:
 - Inserimento a caldo degli anelli circolari
 - Interferenza nell'accoppiamento tra anelli e condotta dopo il raffreddamento
 - Blindatura a freddo:
 - Anelli vengono montati con gioco
 - La camicia viene fatta aderire mediante dilatazione, oltre il limite di parziale snervamento (pompaggio di acqua ad alta pressione nei vari tronchi di condotta)
 - Lo snervamento produce una deformazione plastica del materiale
 - Gli anelli non devono andare in snervamento ma restare in deformazione elastica (acciai con carico di rottura attorno a 1.000 N/mm²)

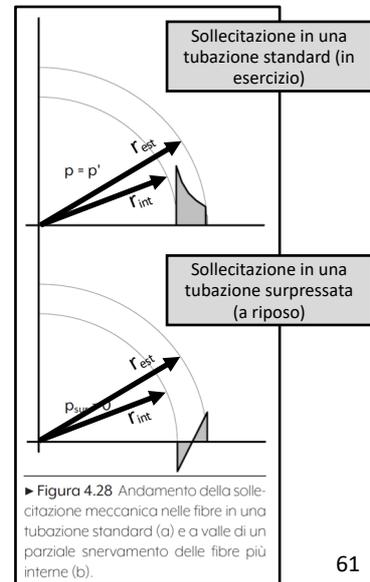
60

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Dimensionamento delle condotte forzate

Tipologie costruttive

- Condotte forzate in **metallo**
 - Mannesmann
 - Chiodate
 - Saldate
 - Blindate (a caldo o a freddo)
 - **Surpressate**
 - Snervamento delle fibre più interne della condotta e quindi un migliore sfruttamento del materiale
 - In una tubazione normale, le fibre più interne sono più sollecitate, mentre quelle più esterne sono più scariche
 - Processo a pressione per il parziale snervamento delle fibre più interne
 - A riposo (pressione nulla) le fibre più esterne tendono a comprimere quelle interne (dilatata in maniera plastica)
 - In condizioni di esercizio, sollecitazione distribuita più uniformemente tra fibre interne ed esterne
 - Migliore sfruttamento del materiale e contenimento dello spessore della condotta



61

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Dimensionamento delle condotte forzate

Tipologie costruttive

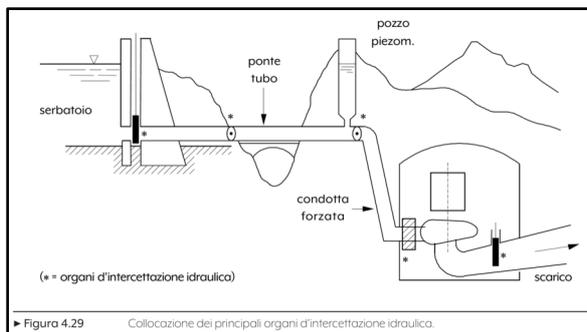
- Condotte forzate in metallo
 - Mannesmann
 - Chiodate
 - Saldate
 - Blindate (a caldo o a freddo)
 - Surpressate
- Condotte forzate in **calcestruzzo** (portate elevate e salto motore ridotto)
 - Calcestruzzo precompresso:
 - Struttura a layer con tubazione con semplice armatura longitudinale, avvolta da un cavo di acciaio armonico opportunamente tensionato e rivestita da un ulteriore getto
 - Calcestruzzo centrifugato:
 - Più compatto
 - Migliori proprietà meccaniche
 - Ridotta permeabilità all'acqua

62

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Organi di intercettazione idraulica

- Analogamente a interruttori ed i sezionatori in un circuito elettrico, gli organi di intercettazione idraulica hanno funzione
 - **Protezione** (in grado di agire con fluido in moto)
 - **Sezionamento** (agiscono solo con fluido fermo per operazioni di manutenzione o ispezione, ma garantiscono lo stato di aperto/chiuso ai fini della sicurezza)



63

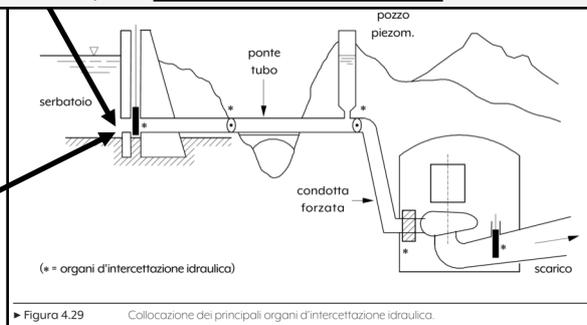
Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Organi di intercettazione idraulica

- Analogamente a interruttori ed i sezionatori in un circuito elettrico, gli organi di intercettazione idraulica hanno funzione
 - **Protezione** (in grado di agire con fluido in moto)
 - **Sezionamento** (agiscono solo con fluido fermo per operazioni di manutenzione o ispezione, ma garantiscono lo stato di aperto/chiuso ai fini della sicurezza)

Primo organo di intercettazione in corrispondenza allo sbarramento, a monte dell'opera di derivazione
 Può essere di semplice sezionamento se la galleria in pressione è tutta in roccia
 È tuttavia buona norma che possa manovrare anche sotto flusso

Griglie per trattenere corpi estranei trascinati dall'acqua



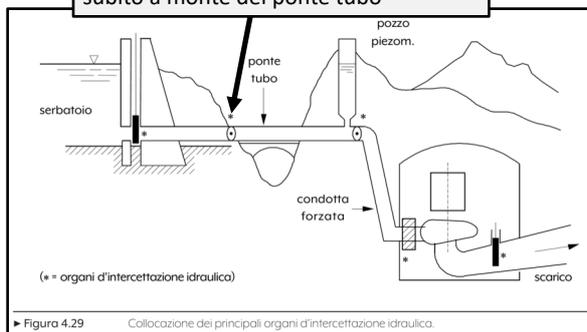
64

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Organi di intercettazione idraulica

- Analogamente a interruttori ed i sezionatori in un circuito elettrico, gli organi di intercettazione idraulica hanno funzione
 - **Protezione** (in grado di agire con fluido in moto)
 - **Sezionamento** (agiscono solo con fluido fermo per operazioni di manutenzione o ispezione, ma garantiscono lo stato di aperto/chiuso ai fini della sicurezza)

Se esiste qualche tratto "scoperto" (es. ponte tubo), è bene prevedere una valvola a farfalla con funzioni protettive, subito a monte del ponte tubo



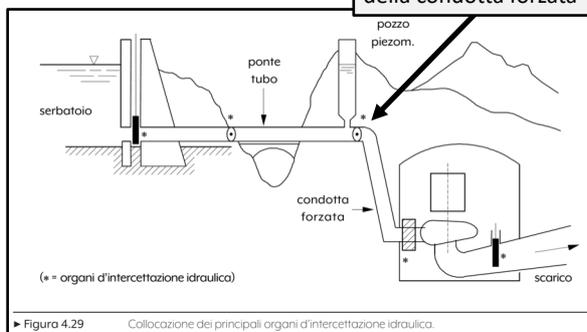
65

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Organi di intercettazione idraulica

- Analogamente a interruttori ed i sezionatori in un circuito elettrico, gli organi di intercettazione idraulica hanno funzione
 - **Protezione** (in grado di agire con fluido in moto)
 - **Sezionamento** (agiscono solo con fluido fermo per operazioni di manutenzione o ispezione, ma garantiscono lo stato di aperto/chiuso ai fini della sicurezza)

Una valvola a farfalla è prevista come organo di protezione all'inizio della condotta forzata



66

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Organi di intercettazione idraulica

- Analogamente a interruttori ed i sezionatori in un circuito elettrico, gli organi di intercettazione idraulica hanno funzione
 - Protezione** (in grado di agire con fluido in moto)
 - Sezionamento** (agiscono solo con fluido fermo per operazioni di manutenzione o ispezione, ma garantiscono lo stato di aperto/chiuso ai fini della sicurezza)

Sistema di intercettazione in centrale (valvola a farfalla o rotativa) per evitare l'allagamento della centrale in caso di rottura della turbina
 Consente anche l'intercettazione della portata in caso di **inceppamento del distributore** (es. presenza di corpi estranei tra le pale)

(*) = organi d'intercettazione idraulica

► Figura 4.29 Collocazione dei principali organi d'intercettazione idraulica.

67

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Organi di intercettazione idraulica

- Analogamente a interruttori ed i sezionatori in un circuito elettrico, gli organi di intercettazione idraulica hanno funzione
 - Protezione** (in grado di agire con fluido in moto)
 - Sezionamento** (agiscono solo con fluido fermo per operazioni di manutenzione o ispezione, ma garantiscono lo stato di aperto/chiuso ai fini della sicurezza)

In corrispondenza alle opere di restituzione sono disposte delle **paratoie con funzione di sezionamento e talvolta di protezione** (soprattutto in se c'è rischio di allagamento dal bacino di valle)

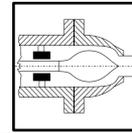
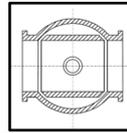
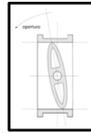
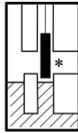
(*) = organi d'intercettazione idraulica

► Figura 4.29 Collocazione dei principali organi d'intercettazione idraulica.

68

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Organi di intercettazione idraulica



Caratteristiche \ Tipo	Paratoia piana	Valvola a farfalla	Valvola rotativa	Valvola a fuso
Pressione [m H ₂ O]	0÷100	0÷200	200÷2000	200÷2000
Portata [m ³ /s]	centinaia	centinaia	decine	decine
Chiusura sotto flusso	no/si	si	si	si
Tenuta	discreta	scarsa	ottima	ottima
Perdite di carico	elevate	molto elevate	bassissime	basse
Modulazione	no*	no	no	si
Costo	medio	basso	elevato	elevato

(*) si, se a settore.

► Tabella 4.1 Classificazione degli organi di intercettazione idraulica.

69

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Organi di intercettazione idraulica

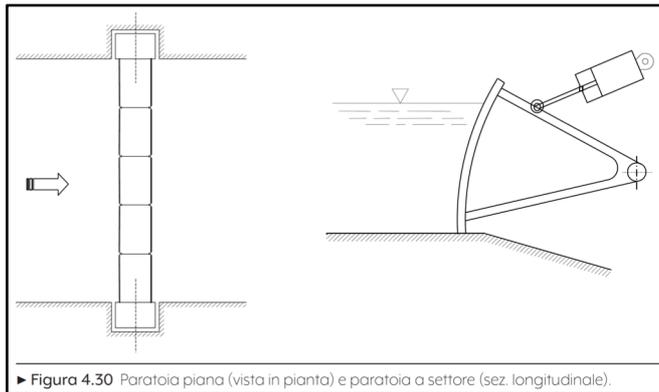
- Paratoia piana
- Valvola a farfalla
- Valvola rotativa
- Valvola a fuso (spina Doble)

70

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Organi di intercettazione idraulica

- **Paratoia piana**
 - Diaframma, costituito da lamiere e profilati metallici, che scorre verticalmente all'interno di due guide (gargani)
 - La paratoia può essere a strisciamento oppure a rulli (minori attriti)
 - Le paratoie piane non sono adatte ad effettuare una modulazione della portata
 - Una regolazione grossolana della portata può essere fatta con paratoie a settore



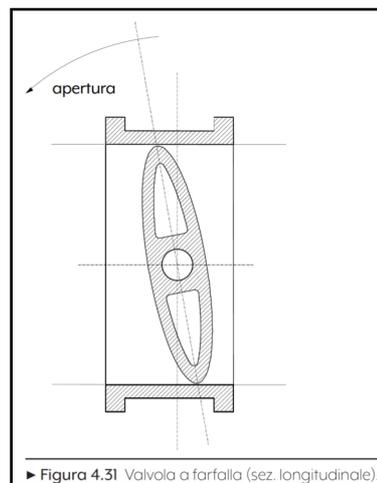
► Figura 4.30 Paratoia piana (vista in pianta) e paratoia a settore (sez. longitudinale).

71

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Organi di intercettazione idraulica

- Paratoia piana
- **Valvola a farfalla**
 - Diaframma a lente impernata in modo da poter ruotare di un quarto di giro
 - Sono impiegate per chiusure sotto flusso a comando automatico
 - Palmola (paletta inserita nel flusso d'acqua): se il flusso d'acqua esercita una certa forza sulla palmola ($\cong V^2$), si sganciano i fermi che tengono aperta la lente e la valvola si chiude
 - Ogni valvola è dotata di un by-pass che consente il graduale riempimento della condotta a valle



► Figura 4.31 Valvola a farfalla (sez. longitudinale).

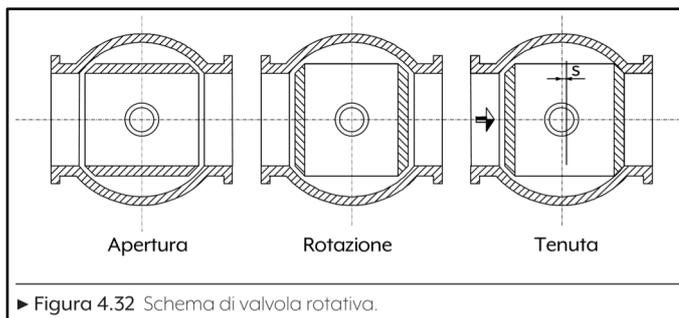


72

Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Organi di intercettazione idraulica

- Paratoia piana
- Valvola a farfalla
- **Valvola rotativa**
 - Otturatore sferico, di diametro superiore alla condotta, su cui è praticato un foro passante
 - Ottima tenuta idraulica (anelli di tenuta)
 - L'anello di tenuta di lavoro è quello a valle dell'otturatore (rispetto al flusso)



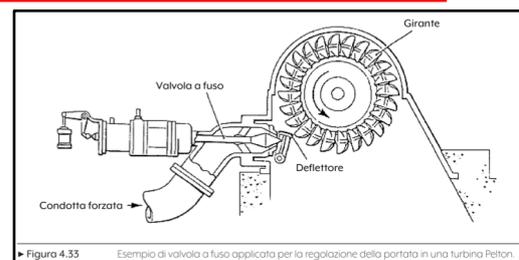
► Figura 4.32 Schema di valvola rotativa.

73

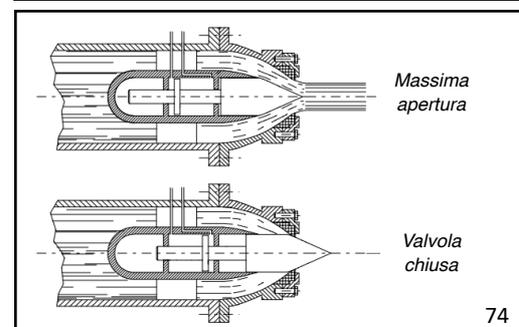
Sezione B – Capitolo 4 – Impianti idroelettrici

Organi di intercettazione idraulica

- Paratoia piana
- Valvola a farfalla
- Valvola rotativa
- **Valvola a fuso (spina Doble)**
 - Otturatore affusolato, conformato per realizzare il deflusso del liquido attraverso sezioni anulari di ampiezza variabile
 - Agevole modulazione della portata tramite spostamento assiale dell'otturatore
 - Notevole sviluppo longitudinale
 - Buona tenuta (si deteriora in caso di acqua con molte particelle abrasive, es. sabbia)
 - Largamente utilizzata nelle turbine ad azione (nelle macchine a reazione si usa la regolazione della portate tramite il controllo delle palettature del distributore)
 - Per contenere le sovra-pressioni in condotta (colpo d'ariete), la manovra di chiusura è piuttosto lenta
 - Per ridurre l'accelerazione della girante (fuga) si deviano i getti d'acqua degli introduttori con tegoli deviatori, in modo da non interessare le pale della ruota



► Figura 4.33 Esempio di valvola a fuso applicata per la regolazione della portata in una turbina Pelton.



74