



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

**Dipartimento di Ingegneria Industriale DII**

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

**Relazione per la prova finale**

*Gestione del colpo d'ariete nello scenario  
idroelettrico italiano*

Tutor Universitario: Prof.ssa Giovanna Cavazzini

Correlatore: Ing. Francesco Nascimben

Giosuè Bergamin - 2000088

Anno Accademico 2023/2024



## Sommario

<b>0. Introduzione .....</b>	<b>5</b>
<b>1. Fenomenologia del colpo d'ariete .....</b>	<b>7</b>
1.1. Generalità sul colpo d'ariete.....	7
1.2. Equazioni fondamentali del colpo d'ariete.....	8
1.3. Calcolo della sovrappressione .....	10
1.3.1. Chiusura brusca .....	12
1.3.2. Manovra più pericolosa.....	12
<b>2. Tipologie di impianti .....</b>	<b>15</b>
2.1. Impianti con turbina Pelton .....	16
2.2. Impianti con turbina Francis.....	17
2.3. Impianti con turbina ad elica e Kaplan .....	19
2.4. Comportamento dell'impianto ad un brusco distacco dalla rete .....	20
<b>3. Sistemi per la riduzione del colpo d'ariete .....</b>	<b>23</b>
3.1. Aumento dell'inerzia della turbina .....	23
3.2. Pozzo piezometrico.....	24
3.2.1. Varianti del pozzo piezometrico.....	26
3.3. Bypass .....	27
3.3.1. Tegolo deviatore.....	27
3.3.2. Valvola di scarico sincrono .....	28
3.4. Sovradimensionamento.....	29
3.5. Adozione dei metodi.....	30
<b>4. Prevenzione del colpo d'ariete in Italia .....</b>	<b>31</b>
4.1. Metodi di contrasto della sovrappressione negli impianti italiani.....	31
4.2. Impianti montuosi.....	32
4.3. Impianti fluviali .....	33
<b>5. Danni ed incidenti per colpo d'ariete.....</b>	<b>35</b>
5.1. Incidente di Oigawa (Giappone).....	35
5.2. Incidente di Lapino (Polonia) .....	36
5.3. Incidente di Sayano-Shushenskaya (Russia) .....	36
5.4. Incidenti in Italia.....	37
5.4.1. Incidente della Centrale di Pont-Saint-Martin 1958 .....	37
5.4.2. Incidente della Centrale di Cadarese 1969 .....	38
<b>6. Conclusioni .....</b>	<b>39</b>
<b>7. Bibliografia .....</b>	<b>41</b>



## 0. Introduzione

In questo lavoro verrà esaminato il fenomeno del colpo d'ariete, condizione che si può verificare in ogni impianto idraulico di qualunque dimensione se si prevede la possibilità di alterare il flusso del fluido in maniera improvvisa da un valore di regime ad un altro fino ad arrivare anche ad una completa chiusura dello stesso.

Il colpo d'ariete è presente in ogni impianto idraulico da quelli civili a quelli industriali, il focus del presente elaborato si concentrerà sull'analisi di tale problematica associata agli impianti idroelettrici dove i salti idrici e le portate di fluido possono assumere valori molto grandi.

Il primo aspetto che verrà trattato è relativo alla fenomenologia del colpo d'ariete, valutato dal punto di vista fisico e matematico, in particolare verrà esaminato un modello semplificato per la determinazione delle sovrappressioni dovute al colpo d'ariete all'interno delle condotte forzate, avvalendosi in particolar modo degli studi di Allievi relativi al moto perturbato all'interno di condotte.

Successivamente, esaminato il fenomeno del colpo d'ariete, si andrà ad illustrare brevemente i principali impianti idroelettrici attualmente esistenti al fine di poter valutare i metodi di prevenzione di questa problematica, per il contrasto dell'insorgenza di sovrappressioni nella zona terminale delle condotte forzate che adducono il fluido nel distributore della turbina.

In particolare si riportano le principali tipologie di sistemi proposti per limitare il colpo d'ariete, valutando quindi il tipo di soluzione più opportuna in base al tipo d'impianto analizzato in base agli aspetti fisici ed il funzionamento, prendendo in considerazione anche il caso in cui si accetti la sovrappressione al distributore e si opti per un sovradimensionamento della condotta forzata.



## 1. Fenomenologia del colpo d'ariete

Lo studio di questo fenomeno è relativamente recente; infatti le prime ricerche sull'argomento risalgono ad inizio del '900 da parte dell'ingegnere italiano Lorenzo Allievi che iniziò ad interessarsi a questo fenomeno in seguito alla deflagrazione della condotta forzata che colpì l'impianto dove egli lavorava, andando quindi a definire le equazioni generali che regolano la sovrappressione all'interno di condotte.

Facendo riferimento agli studi di Allievi in merito al moto perturbato nelle condotte [2], si è ottenuta un'equazione utile al fine di determinare le sovrappressioni in base al tipo di manovra eseguita dal distributore determinando un modello matematico utile ai fini della progettazione.

### 1.1. Generalità sul colpo d'ariete

Si ipotizzi una chiusura rapida da parte dell'organo di manovra tale da ridurre bruscamente il flusso d'acqua in una condotta forzata; in tali casi si manifesta subito a monte dell'organo di manovra un aumento di pressione che si propaga lungo la condotta con verso contrario a quello posseduto dal moto del fluido.

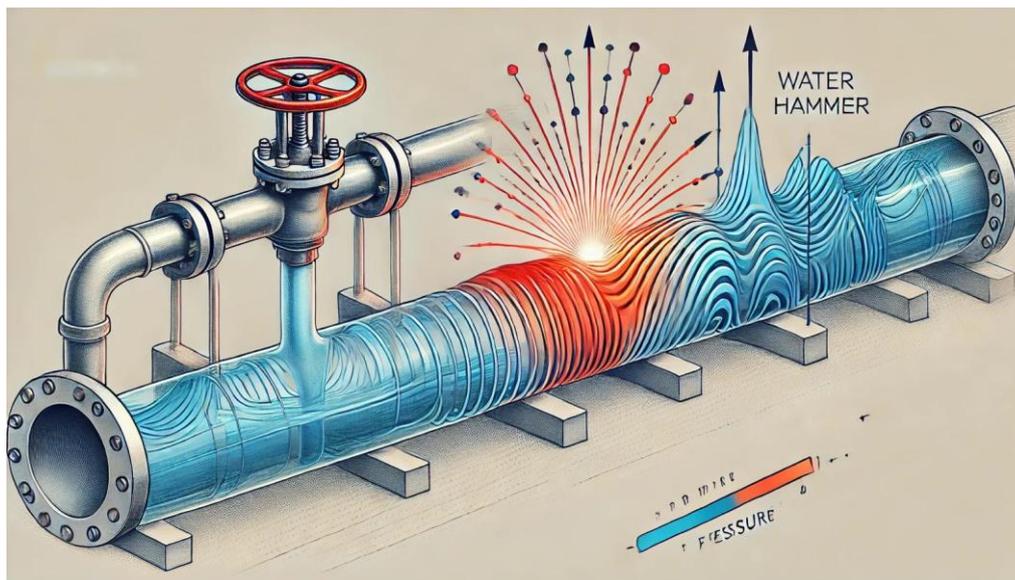
L'energia cinetica posseduta dall'acqua deve, per effetto della chiusura, trasformarsi in un'altra forma di energia; in particolare essa verrà convertita e/o dissipata in forma di energia elastica o di deformazione, tuttavia a causa della bassa comprimibilità dell'acqua e delle piccole deformazioni che può subire la condotta si assiste ad un elevatissimo aumento della pressione necessaria per l'immagazzinamento dell'energia all'interno del fluido.

In prima istanza, si può quindi procedere uguagliando l'energia cinetica posseduta dalla corrente con il lavoro di deformazione dell'acqua, ottenendo la seguente equazione:

$$\frac{1}{2} \frac{p^2}{E} = \frac{1}{2} \frac{\gamma}{g} v^2 \quad (1.1)$$

$E$  : modulo di elasticità del fluido (per l'acqua si ha  $2 \cdot 10^8$  N/m<sup>2</sup> a temperatura di 10 °C)

$\gamma$  : peso specifico del fluido



**Figura 1:** accumulo delle sovrapressioni in prossimità di una valvola chiusa bruscamente [15]

Andando a risolvere questa equazione si trova un valore della pressione espresso in metri di colonna d'acqua (m.c.a) pari a circa 142 m per ogni unità di velocità [1].

## 1.2. Equazioni fondamentali del colpo d'ariete

Per uno studio più dettagliato del fenomeno in esame si consideri un tratto di condotta infinitesimo; quando l'organo regolatore esegue una chiusura la velocità all'interno del volume infinitesimo non si annulla immediatamente, portando quindi (in un istante infinitesimo  $dt$ ) all'accumulo di un certo volume d'acqua all'interno del tratto considerato; tale accumulo è causato in parte dalla compressione del fluido e in parte dalla dilatazione elastica della tubazione.

Stimando quindi i singoli contributi di accumulo d'acqua dovuti all'immagazzinamento del fluido per compressione dello stesso e all'aumento del diametro della tubazione causato dalla spinta di pressione esercitata dall'acqua sulle pareti della condotta stessa, si può ottenere la prima delle due equazioni differenziali che regolano il moto all'interno della condotta in condizioni di colpo d'ariete (eq. 1.2).

La seconda equazione differenziale (eq. 1.3) si ottiene a partire dal principio di d'Alembert, considerando come azioni esterne la risultante delle pressioni agente sulle facce dell'elemento

infinitesimo di condotta considerato e la componente del peso lungo l'asse della condotta applicato sempre sul volume dell'elemento infinitesimo considerato.

Raggruppando le due equazioni sopra citate in un sistema si ottiene:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{g}{c^2} \frac{\partial y}{\partial t} \\ \frac{\partial v}{\partial t} = g \frac{\partial y}{\partial x} + g \sin(\alpha) \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (1.2) \\ (1.3) \end{array}$$

$y$ : pressione in m.c.a.

$\alpha$ : angolo di inclinazione della condotta rispetto all'orizzontale

$c$ : celerità di propagazione dell'onda di pressione

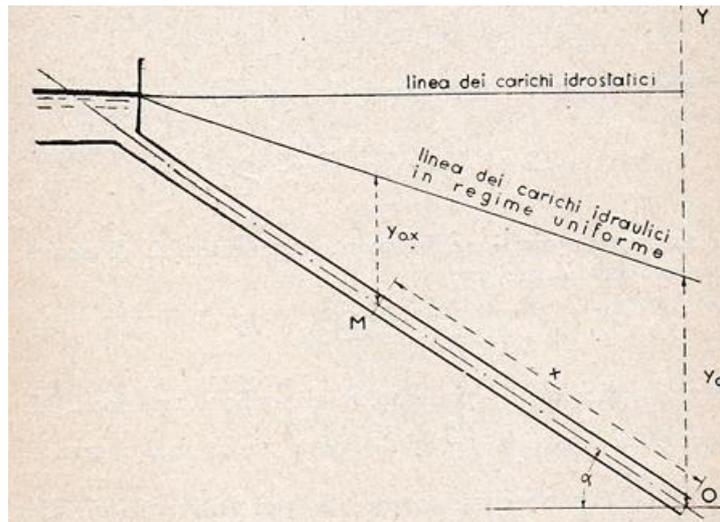
In particolare la celerità ricopre una grande importanza in quanto rappresenta la velocità di propagazione delle sovrappressioni all'interno della condotta che nel caso ideale corrisponde alla velocità di propagazione del suono all'interno dell'acqua.

Tale valore determinato sempre da Allievi è funzione del tipo di materiale, del diametro e dello spessore della condotta oltre che delle proprietà del fluido come il peso specifico;  $c$  assume solitamente valori molto elevati, (1000 m/s) e varia in base al tipo di impianto analizzato.

Andando a risolvere il sistema di equazioni differenziali si ottiene l'integrale generale nella forma:

$$\left\{ \begin{array}{l} v = v_0 - \frac{g}{c} \left[ F_1 \left( t - \frac{x}{c} \right) - F_2 \left( t + \frac{x}{c} \right) \right] \\ y = y_0 - x \sin(\alpha) + F_1 \left( t - \frac{x}{c} \right) - F_2 \left( t + \frac{x}{c} \right) \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (1.4) \\ (1.5) \end{array}$$

Dove  $v$  rappresenta la velocità del fluido alla fine della manovra, inoltre  $F_1$  e  $F_2$  sono due funzioni delle variabili:  $\left( t - \frac{x}{c} \right)$  e  $\left( t + \frac{x}{c} \right)$  che rappresentano delle onde elastiche che si spostano nella condotta con celerità  $+c$  ( $F_1$ ) e  $-c$  ( $F_2$ ) [2].



**Figura 2:** schematizzazione di una condotta forzata, l'asse x è in asse con la condotta forzata [2]

### 1.3. Calcolo della sovrappressione

Prendendo in considerazione la stessa situazione analizzata in precedenza (Figura 2) (condotta forzata inclinata di un certo angolo  $\alpha$ ) si può studiare la sovrappressione dovuta al colpo d'ariete, considerando la condotta forzata come priva d'attrito in quanto questo, data la dimensione delle condotte, non supera solitamente 1-2% del salto disponibile.

Definiamo quindi  $\xi$  come l'eccesso del carico istantaneo, ossia la sovrappressione dovuta al moto perturbato; tale valore si ricava dalla differenza tra il carico idrostatico iniziale e il valore del carico in un punto arbitrario ( $\xi = y_0 - x \sin(\alpha)$ ). Riorganizzando l'equazione (1.5) si ottiene:

$$\xi = F_1 \left( t - \frac{x}{c} \right) - F_2 \left( t + \frac{x}{c} \right) \quad (1.6)$$

Risulta chiaro quindi che la sovrappressione è indipendente dal carico iniziale ma è funzione solo di  $t$  e  $x$ ; tale risultato diviene ovvio in quanto il colpo d'ariete dipende dalle forze d'inerzia delle masse in moto e non dalle pressioni statiche iniziali.

Sia ora  $L$  la lunghezza della condotta tra il distributore della turbina e il serbatoio; l'onda di pressione che percorre la condotta nelle due direzioni prima ascendendo e poi discendendo impiegherà un tempo pari a:

$$\tau = \frac{2L}{c} \quad (1.7)$$

Considerando il punto subito a monte del distributore in fase di chiusura, all'istante  $t = 0$  si ha che i valori di  $F_1(0)$  e  $F_2(0)$  sono uguali. A monte della condotta, invece, la presenza di un serbatoio sufficientemente grande permette di ritenere la pressione all'imbocco costante. Si avrà quindi una situazione del tipo:

$$F_2 \left( t + \frac{x}{c} \right) = - F_1 \left( t - \frac{x}{c} \right) \quad (1.8)$$

Ciò significa che la funzione  $F_2$  valutata all'otturatore in un dato istante è uguale ma con segno contrario a quello che aveva la funzione  $F_1$  nello stesso punto ma  $\tau/2$  secondi prima. In altri termini, la funzione  $F_2$  assume esattamente gli stessi valori di  $F_1$  cambiati di segno con un ritardo di  $\tau$  secondi su  $F_1$ .  $F_2$  non è che una riflessione di  $F_1$  all'imbocco e che ripercorre la condotta col segno opposto. Di conseguenza, si può esprimere la seconda funzione ( $F_2$ ) come uguale a  $F_1$  cambiandone il segno e imponendo il ritardo  $\tau$ , così da avere una sola funzione incognita.

Ora è possibile semplificare la complessità dell'equazione (1.4), considerando un'unica funzione  $f$ , la quale esprime la legge con cui viene modificato, più o meno bruscamente, l'efflusso d'acqua al distributore della turbina.

Con l'obiettivo di valutare cosa succede in un punto in corrispondenza del distributore (identificato con coordinata  $x = 0$ ) particolarizzando il sistema di equazioni (1.4) – (1.5) si ottiene:

$$\begin{cases} v = v_0 - \frac{g}{c} [f(t) + f(t - \tau)] & (1.9) \\ y = y_0 + f(t) - f(t - \tau) & (1.10) \end{cases}$$

All'istante iniziale la perturbazione parte dall'estremo a valle e percorre tutta la condotta in direzione ascendente fino a raggiungere l'estremità superiore dove viene riflessa ripercorrendo la condotta in senso opposto con gli stessi valori e celerità.

Si ha quindi un primo periodo di durata  $\tau/2$  nel quale l'onda di perturbazione è ascendente ed un altro periodo sempre di durata  $\tau/2$  dove l'onda discendente ripercorre la condotta.

Nella realtà la regolazione non è di tipo istantaneo ma si ha solitamente un transitorio di chiusura; in questo caso quindi, l'onda discendente incontra l'onda ascendente provocata dalla perturbazione di regolazione successiva; nel punto d'incontro, le due onde non riflettono cambiando di segno, ma sommano i loro effetti amplificando il fenomeno, che diventa sempre più complesso tanto più duratura è la manovra.

Allievi, valutando il tempo  $\tau$ , ha diviso in due categorie le operazioni di chiusura: se la chiusura è fatta in un tempo  $T < \tau$  allora si parla di chiusura brusca, se invece si ha  $T > \tau$  allora si parla di chiusura lenta. Dal punto di vista ingegneristico è di maggior interesse la chiusura brusca in quanto essa è la più pericolosa per l'integrità strutturale delle condotte [2], [3].

### 1.3.1. Chiusura brusca

Nel caso di una chiusura brusca si ha  $T < \tau$ . Il sistema di equazioni (1.9) – (1.10) si semplifica ulteriormente, in quanto la componente  $f(t - \tau)$  sparisce proprio perché risulta anche  $t < \tau$ , e di conseguenza l'onda riflessa non ha abbastanza tempo per raggiungere l'estremità a valle della condotta. Dalla prima delle due equazioni del sistema si può quindi ricavare:

$$\xi = \frac{c}{g} (v_0 - v) \quad (1.11)$$

Dove la sovrappressione  $\xi$  è pari a  $f(t)$ : in particolare, nel caso di una chiusura completa del distributore, si ha che  $v$  va a zero. Rimane quindi solamente  $v_0$ ; tale sovrappressione persiste fino al momento in cui non sopraggiunge un'onda di depressione.

Il valore massimo della sovrappressione verrà raggiunto in tutti i punti della condotta per i quali l'onda di pressione, per compiere il percorso di risalita della condotta, impiegherà un tempo maggiore di  $T$ ; da questo punto in poi le sovrappressioni decresceranno linearmente fino al serbatoio.

Nel caso invece di una brusca chiusura parziale si avrà una situazione simile, con la differenza che in quest'ultimo caso la sovrappressione risulterà minore in quanto l'acqua dopo la manovra mantiene una certa velocità  $v$  di efflusso dal distributore.

La formula (1.11) conferma ulteriormente che il fenomeno del colpo d'ariete non dipende dalla pressione idrostatica ma unicamente dall'inerzia del fluido; infatti, nella formula (1.11) compare la velocità del fluido e la celerità che dipende proprio dal peso specifico dell'acqua e non si ha nessuna dipendenza dall'altezza di carico [1], [3].

### 1.3.2. Manovra più pericolosa

La manovra più pericolosa è quella che genera la maggior sovrappressione  $\xi$ . La conoscenza del valore della sovrappressione è necessaria nella progettazione delle condotte per determinarne lo spessore allo scopo di evitare cedimenti durante il fenomeno del colpo d'ariete. Questa manovra prevede di partire da un'apertura già ridotta e tale che la chiusura sia effettuata proprio nel tempo  $\tau$ .

Si ottiene quindi:

$$\xi_m = \frac{c v'_0}{g} = \frac{2 L v_0}{g T} \quad (1.12)$$

In cui  $v'_0$  è la velocità all'inizio della manovra e  $v_0$  è la velocità di regime corrispondente alla massima apertura del distributore [1], [3].

Per una maggior comprensione del colpo d'ariete è utile analizzare anche la sua fenomenologia durante un'operazione di chiusura lenta, processo analizzato sempre dall'ingegner Allievi e per cui si consiglia di consultare: "Note dell'ingegner Allievi da 1 a 5".



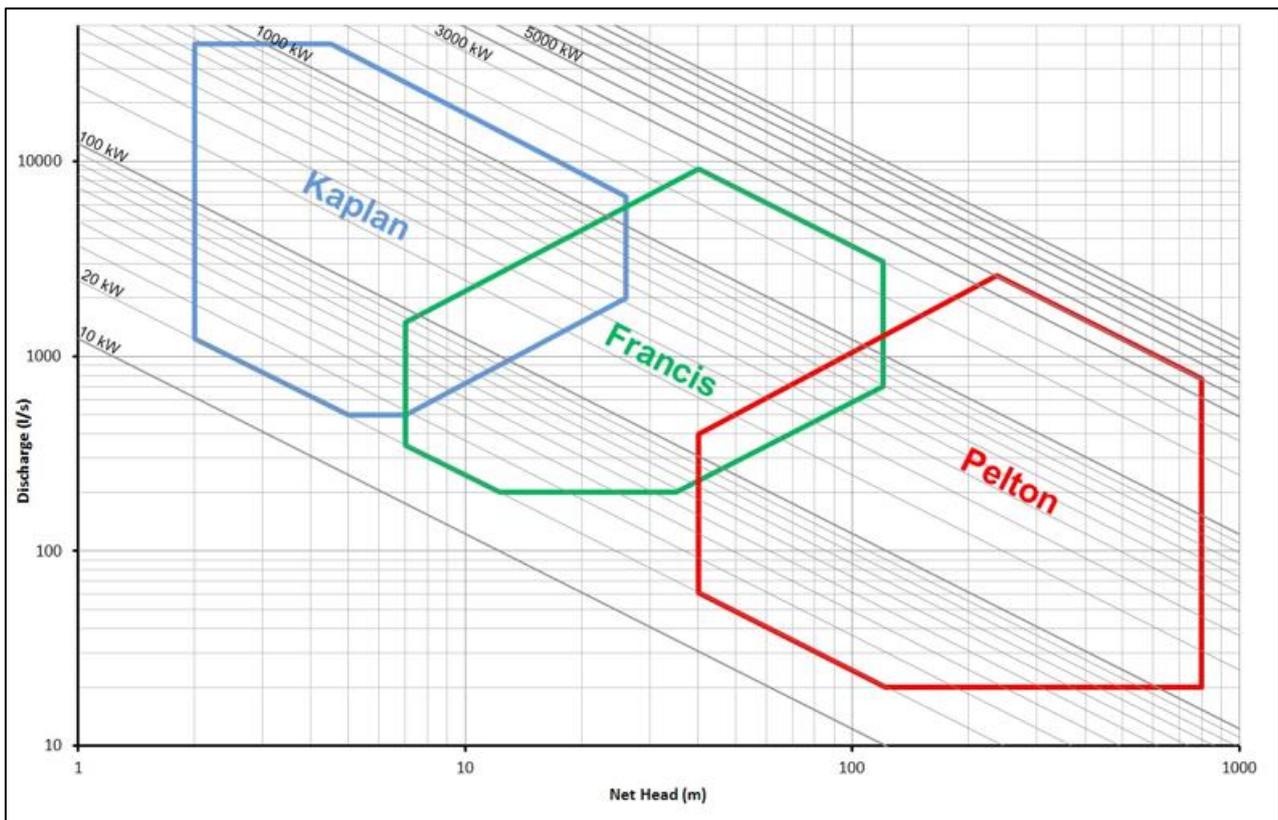
## 2. Tipologie di impianti

Prima di valutare nel dettaglio le tipologie di componenti e opere per attenuare gli effetti del colpo d'ariete, è importante capire le principali tipologie di impianti oggi in uso in quanto le soluzioni adottabili non sono sempre applicabili a tutti gli impianti.

In particolare nei moderni impianti idroelettrici si ricorre essenzialmente a tre tipologie di turbine per la generazione di potenza: Pelton, Francis e Kaplan. La scelta della turbina da impiegare non è casuale ma dipende soprattutto dal salto a disposizione e dalla portata d'acqua. In particolare si ha:

- 1) Salti elevati ( $50 \text{ m} < h < 1300 \text{ m}$ ) e portate contenute ( $Q < 5/10 \text{ m}^3/\text{s}$ ): Pelton [1]
- 2) Salti moderati ( $50 \text{ m} < h < 450 \text{ m}$ ) e portate moderate ( $Q < 50 - 100 \text{ m}^3/\text{s}$ ): Francis [1]
- 3) Salti contenuti ( $h < 50 \text{ m}$ ) e portate elevate ( $Q > 5 \text{ m}^3/\text{s}$ ): Kaplan [1]

Come si può vedere nella figura 3.



**Figura 3:** diagramma rappresentativo delle zone di lavoro delle turbine Pelton, Francis e ad elica o Kaplan. Il confronto è fatto tra l'altezza di carico (asse x) e la portata nominale (asse y) [4]

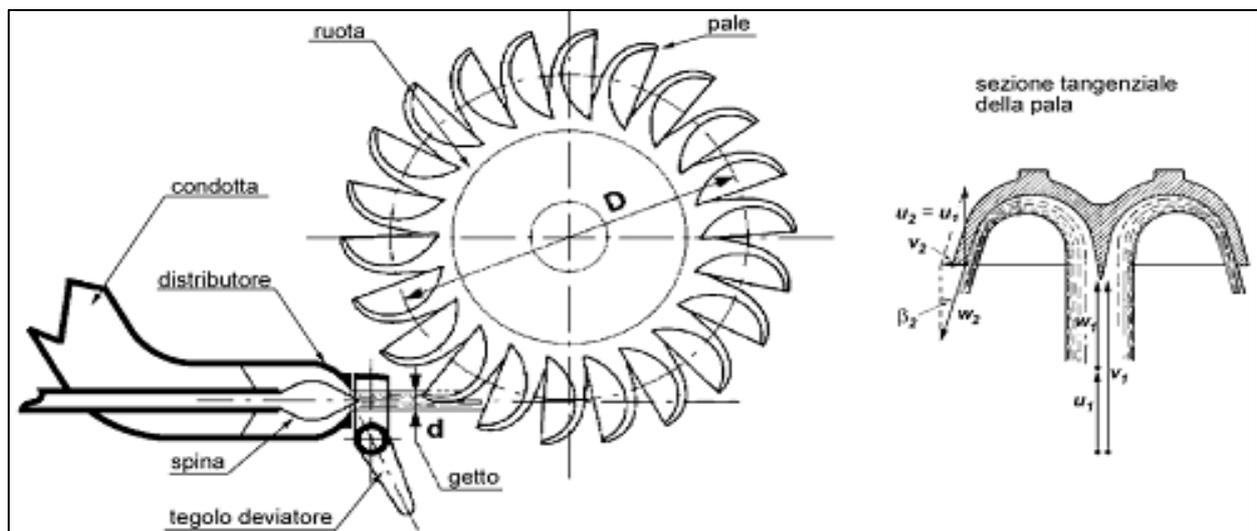
## 2.1. Impianti con turbina Pelton

Questa tipologia d'impianto sfrutta grandi salti con portate relativamente contenute; date le caratteristiche di funzionamento di questi impianti, essi si prestano per l'impiego nelle centrali a bacino o comunque d'alta montagna, dove le portate dei torrenti sono normalmente esigue (se confrontate con quelle dei grandi fiumi) ma l'alta quota mette a disposizione masse d'acqua caratterizzate da valori di energia potenziale gravitazionale molto elevati.

L'impianto si compone di una ruota di tipo Pelton azionata per mezzo di getti d'acqua ad elevata velocità che impattano sulle pale della girante; queste sono caratterizzate da una geometria a doppio cucchiaio, il cui tagliente divide il getto d'acqua in due; la conformazione a doppio cucchiaio permette l'espulsione dell'acqua posteriormente rispetto all'ingresso della stessa, massimizzando la variazione di quantità di moto e di conseguenza lo scambio energetico tra fluido e pala. Questo tipo di turbine sono dette ad azione, in quanto l'espansione della corrente fluida avviene completamente all'interno degli ugelli (organi statorici).

Questo tipo d'impianto è generalmente formato da bacini artificiali d'alta quota da cui l'acqua viene addotta da delle prese collegate ad una galleria forzata. Se l'impianto di generazione non è nelle vicinanze del bacino, l'acqua arriva alla turbina per mezzo di una condotta forzata che può raggiungere inclinazioni e lunghezze molto elevate.

Per le turbine di tipo Pelton il distributore è un ugello convergente; in particolare per la regolazione del flusso d'acqua, si utilizza un ugello di tipo Doble sagomato per ridurre al minimo le perdite per attriti durante il passaggio dell'acqua [4].



**Figura 4:** schema di una ruota Pelton con un solo ugello di tipo Doble, a destra si noti il particolare di una pala della girante con tagliente al centro e la caratteristica forma a doppio cucchiaio [4]



*Figura 5:* turbine Pelton della centrale di Roncovo Grande

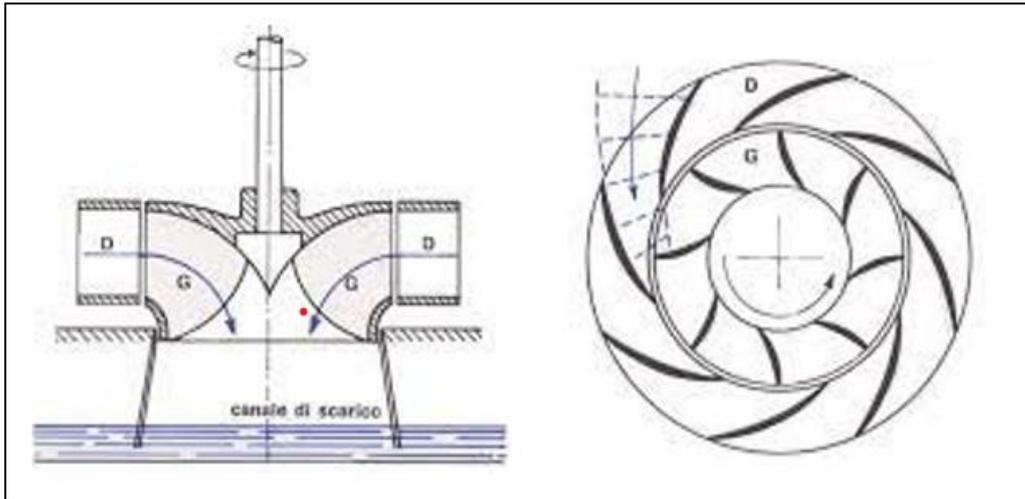
## 2.2. Impianti con turbina Francis

Questo tipo di impianti sono impiegati quando il salto è compreso tra i 50 e i 450 m con portate che arrivano fino a 50 - 100 m<sup>3</sup>/s [4], la turbina di tipo Francis è una turbina a flusso centripeto, in cui l'acqua arriva ad un distributore, formato da una serie di pale mobili le quali indirizzano il flusso in entrata alla girante e regolano la portata elaborata.

Le turbine Francis sono dette a reazione perché la corrente fluida varia la propria velocità e pressione in maniera continua all'interno della girante. Per ottimizzare il funzionamento della turbina l'espansione dell'acqua viene prolungata al di sotto della pressione atmosferica, così da creare una sorta di effetto vuoto, che fa aumentare ancora di più il salto disponibile.

A valle della girante, nello scarico, è necessario riportarsi alle condizioni atmosferiche, procedendo ad un rallentamento della corrente fluida grazie ad un diffusore, che converte la restante energia cinetica in pressione. Questo passaggio non solo consente di riportare la pressione del flusso d'acqua a quella atmosferica, ma permette di utilizzare quella quota finale di energia cinetica, non sfruttabile in turbina, che andrebbe altrimenti persa allo scarico.

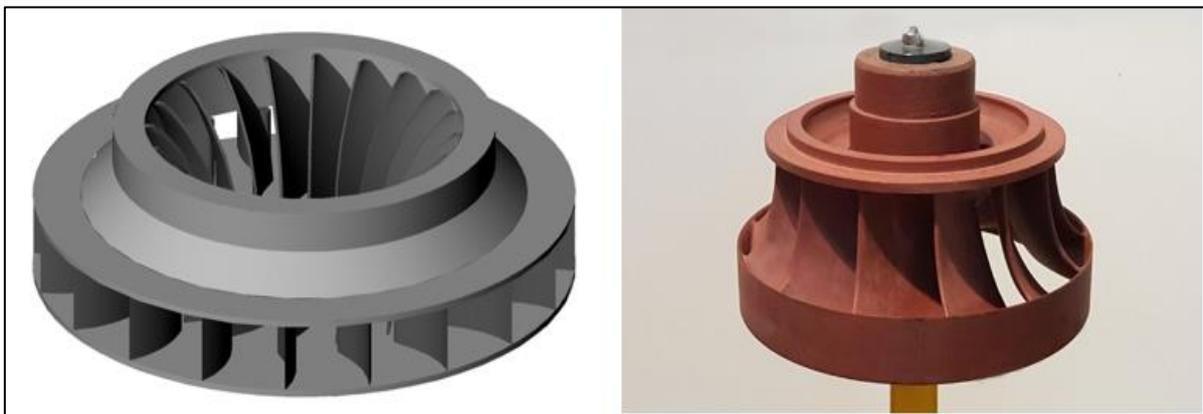
Se si esagera con la depressione alla fine della palettatura si può raggiungere la tensione di vapore, innescando fenomeni di cavitazione per cui l'acqua, scesa al di sotto della pressione di liquido saturo, si trasforma in vapore. Queste bolle, una volta raggiunte zone con pressione più elevate, implodono causando onde di pressione che vanno a danneggiare ed erodere le pareti della turbina.



**Figura 6:** schema di funzionamento di una turbina Francis, si noti a destra dove è evidenziato il passaggio del fluido attraverso il distributore D e la girante G

Un impianto con turbina Francis si compone quindi di una condotta forzata che dal bacino fa arrivare l'acqua in una voluta a chiocciola dove entra nel distributore palettato che indirizza il fluido verso la girante per poi uscirne assialmente con pressione minore della  $P_{atm}$ , ristabilita poi per mezzo di un canale diffusore troncoconico che termina con lo scarico all'interno del bacino di scarico. Tale operazione segue il principio di Bernoulli, procedendo ad un rallentamento del fluido che comporta un recupero di pressione. Il limite teorico per questa struttura è di 10,33 m.c.a. anche se nella pratica tale installazione non supera i 5 m e solo nei casi estremi tocca i 7 m [1].

Per le turbine di tipo Francis oggi si fanno altre tre distinzioni in base alla portata e salto disponibili in: Francis tradizionali, veloci e ultra veloci. Esse sono caratterizzate da portate di design via via più importanti con una conseguente variazione di geometria delle palette, la cui geometria ottimale tende ad assumere, per aumenti della portata, lunghezze delle pale più contenute ed una conformazione più simile alle turbine assiali (Figura 7) [4].



**Figura 7:** confronto tra Francis tradizionale a sinistra e Francis veloce a destra

### 2.3. Impianti con turbina ad elica e Kaplan

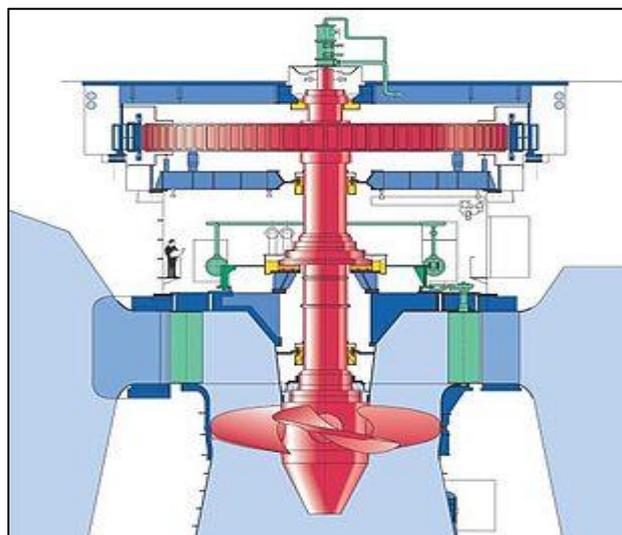
Questo tipo d'impianti sfrutta le turbine ad elica e Kaplan, le turbine caratterizzate dallo sviluppo più recente. Anch'esse, come le turbine Francis, sono turbine a reazione e sfruttano salti contenuti (dell'ordine di qualche decina di metri) a fronte di portate molto elevate (200 – 300 m<sup>3</sup>/s) [4].

In particolare la turbina Kaplan costruttivamente assume una configurazione di un'elica, in cui le pale sono orientabili, al variare della portata d'acqua e del salto permettendo di mantenere rendimenti elevati fino a portate pari anche al 20-30% della portata nominale [4].

Negli impianti dotati di turbina assiale, quindi, per motivazioni di carattere economico si utilizzano solitamente turbine ad elica fissa per coprire la parte di carico costante, essendo meno costose, mentre le componenti fluttuanti del carico richiesto dalla rete sono affidate alle turbine Kaplan, che permettono l'ottenimento di rendimenti elevati per un ampio range di portate grazie alla capacità di regolazione.

Questo permette a questi impianti di usare un numero minore di turbine che, a causa della loro complessità costruttiva risultano in genere più costose delle normali macchine ad elica fissa.

Anche negli impianti dotati di turbine ad elica l'acqua viene convogliata verso la sala macchine tramite condotte forzate ma nei casi dove le altezze di carico sono particolarmente basse e le portate molto elevate, come negli sbarramenti fluviali, si può ricorrere a soluzioni in camera libera. Allo scarico della turbina, come negli impianti con turbina Francis, si prevede solitamente un diffusore troncoconico che permette di sfruttare salti maggior alla turbina e che ripristina la pressione atmosferica nell'acqua prima di essere scaricata.



**Figura 8:** schematizzazione di una turbina Kaplan, si noti il distributore che devia il fluido in verde



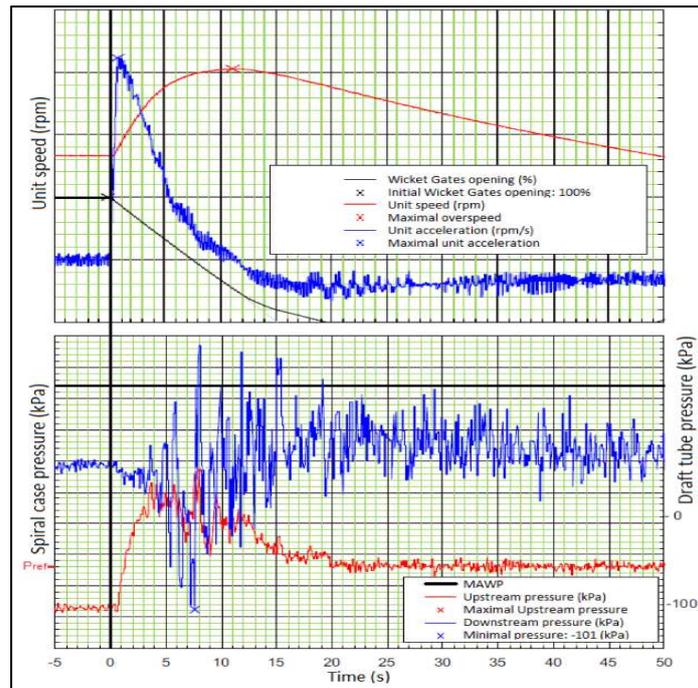
*Figura 9:* esempio di girante Kaplan di grandi dimensioni

#### 2.4. Comportamento dell'impianto ad un brusco distacco dalla rete

Generalmente la necessità di variare il flusso dell'acqua in una centrale idroelettrica è correlata alla variazione della richiesta energetica della rete a cui è collegata. Tipicamente, al termine della giornata lavorativa, si assiste ad un calo della richiesta elettrica, con la conseguente necessità di un adeguamento dell'impianto alle nuove condizioni di carico. L'eventuale arresto dell'impianto costituisce naturalmente la condizione più severa per quanto riguarda il colpo d'ariete.

La procedura d'arresto inizia con il cosiddetto "momento zero", quando l'unità idroelettrica viene scollegata dalla rete elettrica e alle saracinesche viene ordinato di chiudersi tramite la sequenza di protezione. La turbina tende ad accelerare la velocità, aumentando fino al valore di sovra velocità (la "x" rossa nel grafico superiore, riportato in figura 10). Si può osservare come i picchi di pressione massima nella cassa d'oscillazione non si verificano all'inizio, quando i cancelli a saracinesca iniziano a chiudersi da completamente aperti 100%, ma più tardi attorno al 70% per la prima volta, e aumentano ancora di più al 50% per la seconda volta (Figura 10). È possibile rilevare facilmente una correlazione tra i picchi di sovrappressione nella cassa d'oscillazione e la fluttuazione di pressione all'interno del tubo di tiraggio [14].

Si nota inoltre che la durata complessiva del fenomeno non supera i 50 – 60 secondi per riottenere condizioni quasi stazionarie. Il fenomeno, però, raggiunge i picchi di velocità per la macchina e di pressione per la condotta e la cassa d'oscillazione entro i primi 15 – 20 secondi (Figura 10). Ciò rende l'orizzonte temporale d'azione del fenomeno della brusca chiusura molto rapido se confrontato con i normali tempi per la regolazione degli impianti idroelettrici (che durante le operazioni di modifica del carico impiegano tempi molto superiori) [5].



**Figura 10:** Analisi temporale dei parametri: rigetto del carico della turbina Francis installata in una centrale idroelettrica [5]



### 3. Sistemi per la riduzione del colpo d'ariete

Come visto in precedenza il colpo d'ariete consiste sostanzialmente in una sovrappressione che raggiunge il suo picco in corrispondenza del distributore della turbina. Tale picco, però, se non viene adeguatamente mitigato, può creare danni molto gravi non solo al distributore ma anche alla condotta stessa fino ad arrivare, nei casi più gravi, ad un collasso strutturale della condotta.

Oltre all'evidente danno economico per la riparazione dell'impianto, in caso di danni provocati dal colpo d'ariete si ha il temporaneo fermo dell'impianto per la generazione di elettricità, nonché il rischio di mettere in pericolo le vite degli operatori che in quel momento sono in servizio.

Le principali soluzioni tecniche per la riduzione delle sovrappressioni che verranno analizzate sono:

- Aumento dell'inerzia della turbina
- Pozzo piezometrico (e varianti)
- Bypass

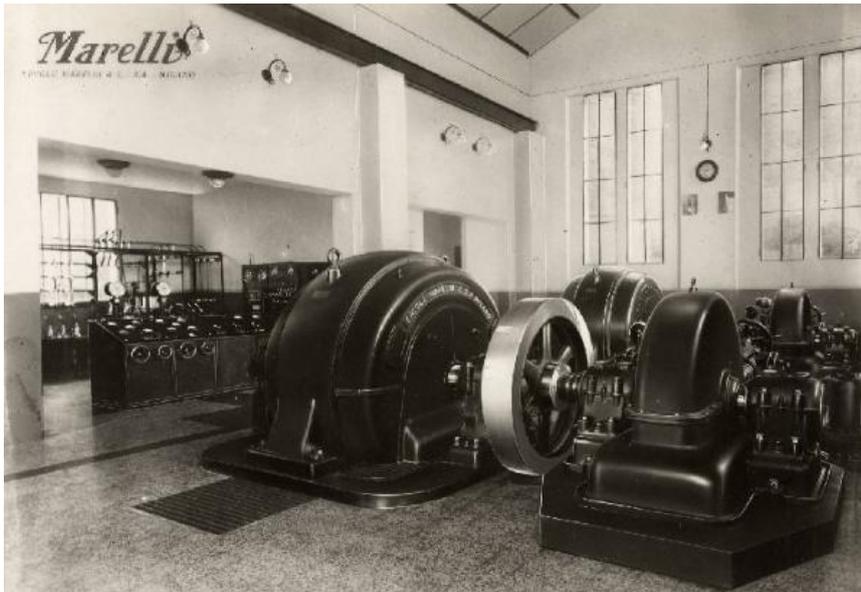
#### 3.1. Aumento dell'inerzia della turbina

La riduzione del carico ha come conseguenza l'aumento della velocità della turbina; tale aumento di velocità viene contrastato, in prima battuta, aumentando l'inerzia del gruppo turbina. Questo permette di far agire il distributore più lentamente mitigando così gli effetti del colpo d'ariete.

Questa soluzione è particolarmente efficace negli impianti di piccole dimensioni, dove l'aumento dell'inerzia dei sistemi rotanti come la turbina o l'adozione dei volani è facilitata se confrontata con i grandi impianti.

L'aumento dell'inerzia della turbina rende più difficile il cambiamento improvviso di velocità, e questo aiuta a smorzare le variazioni di pressione quando cambia improvvisamente il carico alla turbina, potendo di conseguenza eseguire una chiusura più lenta, riducendo così gli effetti del colpo d'ariete.

Si può ricorrere alternativamente ad un volano; esso è una ruota caratterizzata da un'elevata inerzia che immagazzina energia rotazionale. Aggiungendo volani alle turbine più piccole, queste possono accumulare più energia e rilasciarla in modo graduale, stabilizzando il sistema e riducendo gli sbalzi di pressione.



*Figura 11:* volano per l'aumento d'inerzia accoppiato con una turbina Pelton della centrale d'Arsa

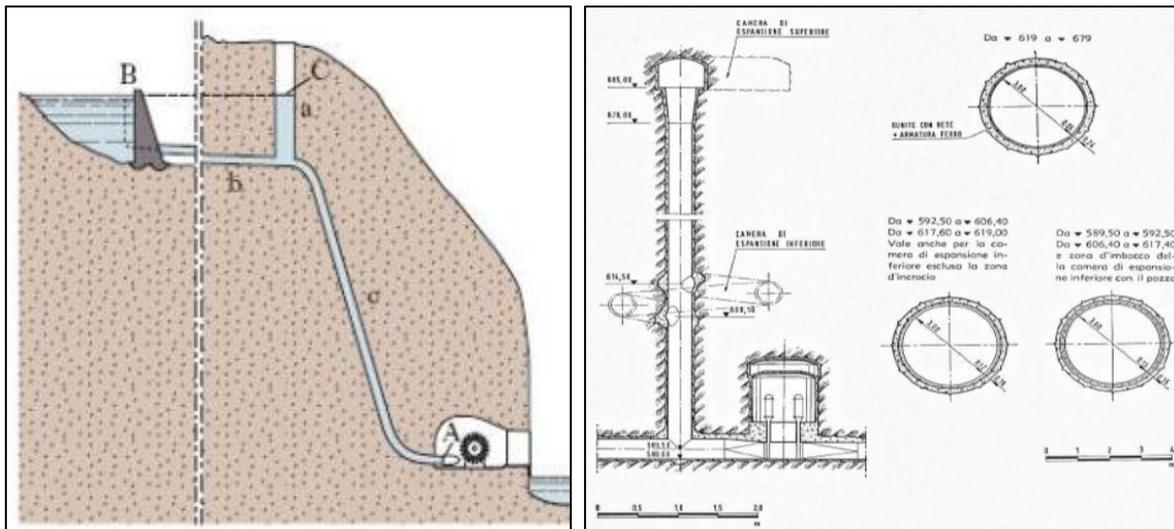
L'ultimo elemento a cui è facile aumentare l'inerzia è il generatore, il quale è collegato alla turbina. Aumentare la sua inerzia ad esempio, rendendo i suoi componenti rotanti più massicci o usando materiali caratterizzati da maggiore densità riduce la rapidità di rallentamento o accelerazione, rendendo il sistema più stabile durante le fluttuazioni del carico.

In sintesi, aumentando l'inerzia, le variazioni di velocità delle turbine e dei generatori diventano più gradualmente, potendo così procedere a chiusure meno brusche e ridurre l'impatto del colpo d'ariete sulle strutture idrauliche [4], [7].

### 3.2. Pozzo piezometrico

Il pozzo piezometrico, noto anche come serbatoio piezometrico o vasca d'oscillazione, è una soluzione idraulica progettata per mitigare gli effetti negativi del colpo d'ariete negli impianti idroelettrici o in altre reti di tubazioni. Si tratta di una colonna verticale d'acqua, collegata direttamente alla condotta principale, ideata per assorbire rapidamente le variazioni di pressione.

Quando si verifica un colpo d'ariete, la pressione all'interno della condotta principale aumenta bruscamente. Il pozzo piezometrico, offrendo una via di minor resistenza, permette all'acqua di risalire nella colonna verticale, contribuendo a dissipare l'energia cinetica dell'onda di pressione. In questo modo, si evitano fluttuazioni di pressione eccessive nel sistema, riducendo i rischi di danneggiamento alle strutture idrauliche.



**Figura 12:** schematizzazione dell'installazione ideale di un pozzo piezometrico a sinistra [6], a destra è rappresentato il pozzo piezometrico della centrale di Colomber (Vajont)

Il design tradizionale di molti impianti idroelettrici vede un vaso di monte dal quale origina una galleria forzata con pendenza molto contenuta, che prosegue fino alle vicinanze della centrale. Qui, si verifica un cambio di pendenza marcato, trasformando la galleria in una condotta forzata molto più ripida. Esattamente in questo punto di transizione, viene solitamente inserita una condotta verticale normalmente con sbocco all'aria libera (figura 12).

Il pozzo piezometrico riesce quindi a ridurre le sovrappressioni andando ad accorciare virtualmente la lunghezza della condotta in quanto, ai fini del colpo d'ariete, la porzione della stessa interessata dalla sovrappressione è solitamente quella compresa tra il distributore e il pozzo piezometrico stesso. Come visto nel capitolo 1, si ha che la sovrappressione è maggiore quando la regolazione è brusca, ed essa dipende dalla celerità e dalla lunghezza della condotta [1].

Quindi andando ad inserire un pozzo piezometrico all'inizio della condotta forzata è possibile eliminare dal calcolo della lunghezza della tubazione la galleria forzata, che può essere molto lunga. La nuova lunghezza viene quindi misurata fino al pozzo piezometrico, questa diminuzione della lunghezza riduce molto il valore di  $\tau$ , portando manovre che prima erano considerate brusche ad essere considerare come lente [2].

Un altro vantaggio dei pozzi piezometrici è lo smorzamento delle oscillazioni di massa dell'acqua. Nel caso di una chiusura da parte del distributore con conseguente riduzione della portata, a causa dell'elevata inerzia del fluido, l'acqua comincia a risalire nel pozzo. L'energia cinetica del fluido si trasforma quindi in energia potenziale gravitazionale, aumentando il livello dell'acqua all'interno del pozzo ed impedendo che l'energia si converta interamente in energia di pressione sul fondo della condotta [3].

Si osservano quindi delle oscillazioni di massa tra il pozzo e la galleria forzata in quanto la condotta forzata si può considerare come cieca. Gli attriti all'interno del pozzo smorzano poi più o meno rapidamente queste oscillazioni in base alla geometria e al tipo di pozzo piezometrico.

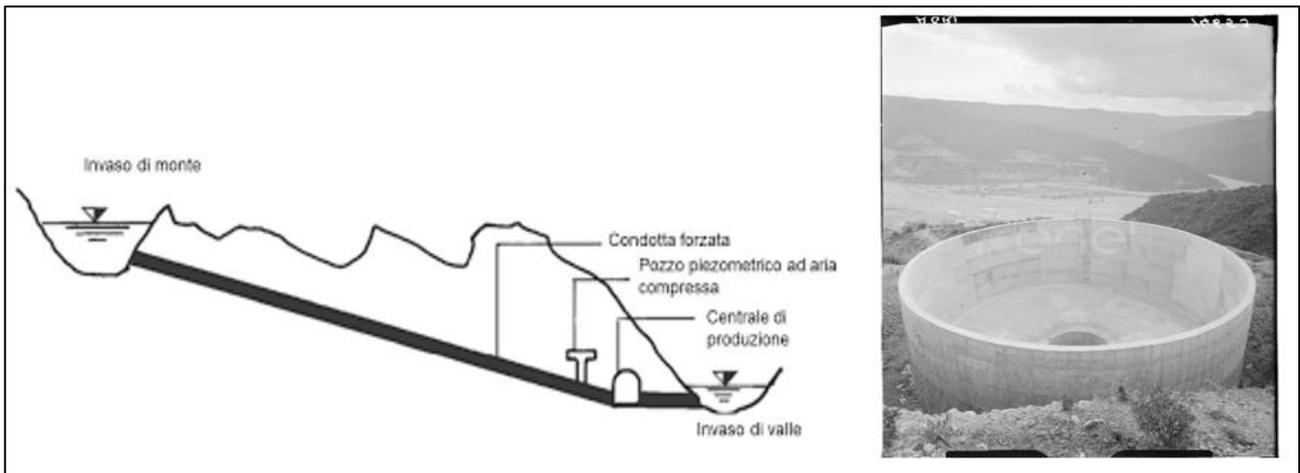
La principale problematica riguardante l'installazione di un pozzo piezometrico riguarda il sito di posizionamento; infatti il pozzo piezometrico è una struttura verticale che richiede spazio sia in altezza che in larghezza. Se l'impianto è situato in un'area con vincoli di spazio, potrebbe essere difficile trovare un luogo adeguato all'installazione [6].

Alcune soluzioni a tale problematica possono essere l'adozione di varianti del pozzo piezometrico "classico"; tali installazioni però risultano spesso più costose ma si rendono necessarie per la protezione dell'impianto.

### 3.2.1. Varianti del pozzo piezometrico

Alcune soluzioni sono:

- Pozzo piezometrico a camera chiusa: invece di una colonna aperta, si utilizza una camera chiusa con aria o gas compressi. La compressione dell'aria o del gas all'interno della camera smorza le variazioni di pressione senza la necessità di una struttura alta e ingombrante.
- Pozzo piezometrico ridotto o a sfioro: questa variante prevede una lunghezza del pozzo inferiore; l'acqua può quindi andare a sfioro e tracimare dal pozzo, comportando una evidente perdita di fluido che può essere riassorbita con delle opere di presa a valle del pozzo.
- Serbatoi di espansione orizzontali: Invece di una colonna verticale, si possono utilizzare serbatoi disposti orizzontalmente che assorbono le fluttuazioni di pressione. Questi serbatoi occupano meno spazio in altezza e possono essere collocati più facilmente in spazi limitati.
- Pozzo piezometrico multiplo: Si utilizzano più pozzi piezometrici più piccoli e distribuiti lungo la condotta, invece di un solo grande pozzo. Questo riduce l'impatto di una singola struttura alta e consente una migliore distribuzione degli effetti del colpo d'ariete lungo l'impianto [6].



**Figura 13:** schema di installazione di un pozzo piezometrico a gas compresso in una condotta impianto di Mandra Moretta a sinistra, a destra immagine della realizzazione di un pozzo piezometrico tradizionale [6]

### 3.3. Bypass

I sistemi di bypass si possono dividere in due gruppi: sistemi di bypass con tegolo deviatore e con valvola di scarico sincrono.

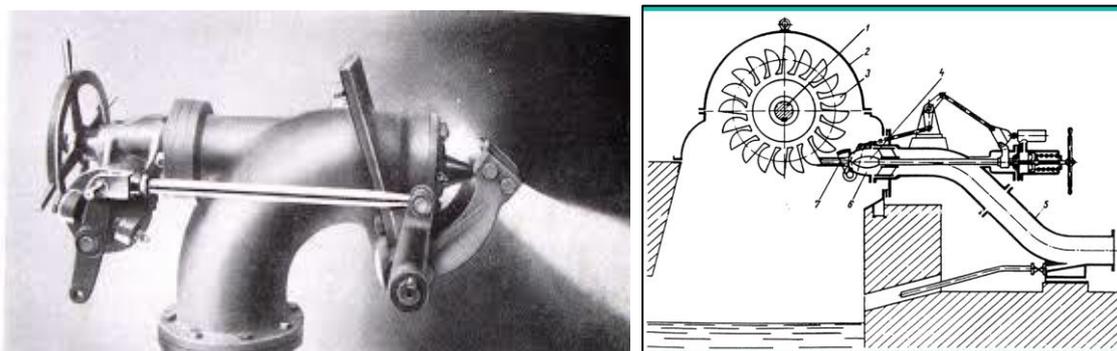
Questi dispositivi sono studiati per deviare il flusso del fluido mentre il distributore compie le operazioni di chiusura, così da impedire la formazione di sovrappressioni pericolose per l'impianto.

#### 3.3.1. Tegolo deviatore

Il tegolo deviatore è un sistema utilizzato unicamente nel caso di turbine Pelton, esso è un componente che interviene in situazioni in cui la turbina deve essere fermata o la portata d'acqua deve essere ridotta improvvisamente.

Il tegolo devia il getto d'acqua quando la turbina deve smettere di funzionare (ad esempio durante un arresto di emergenza o una manutenzione). Questo impedisce che l'acqua continui a colpire la ruota, cedendo energia alla girante e creando problemi di sovra velocità o danni.

Si ha inoltre un effetto di protezione della turbina: in assenza del tegolo deviatore infatti, l'acqua continuerebbe a colpire le pale, anche se la turbina fosse scollegata dal generatore. Questo potrebbe provocare usura meccanica o danni per l'eccessiva velocità. Il tegolo deviatore assicura che il flusso d'acqua sia indirizzato altrove, proteggendo la turbina.



**Figura 14:** tegolo deviatore in funzione durante un collaudo dello stesso a sinistra, a destra schema del distributore con tegolo impianto di Ponte Vannino

In sintesi, il tegolo deviatore nelle turbine Pelton è un sistema che permette di deviare rapidamente il flusso d'acqua in caso di necessità, proteggendo la turbina da danni e garantendo la sicurezza e l'efficienza dell'impianto [7].

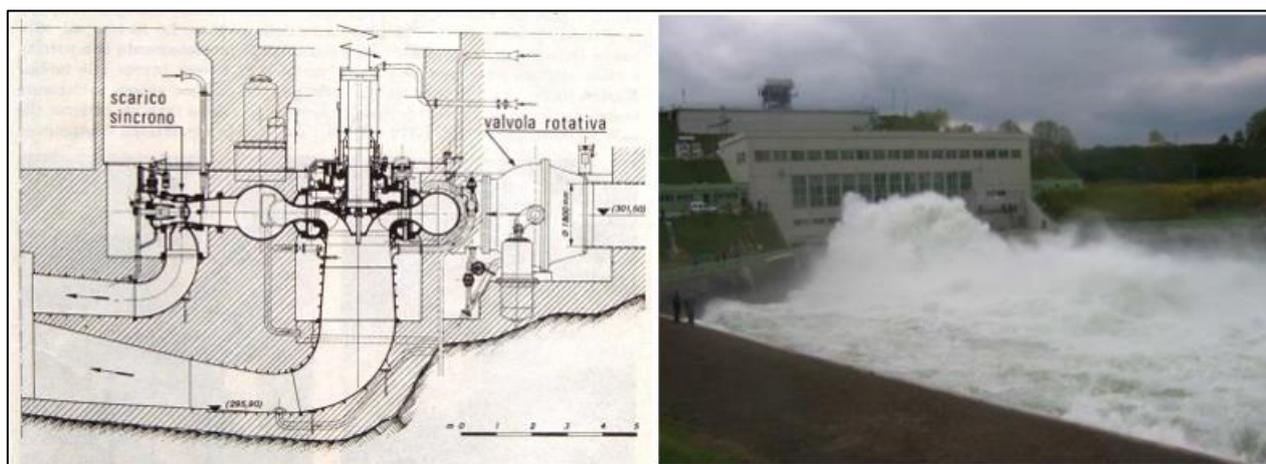
L'attivazione del tegolo deviatore è sincronizzata con la chiusura dell'ugello Doble tramite un insieme di aste che mettono in collegamento il movimento del volano regolatore, dell'ugello, col tegolo così da ottenere una regolazione mirata alla perdita minima di acqua.

### 3.3.2. Valvola di scarico sincrono

La valvola di scarico sincrono è un dispositivo essenziale negli impianti idroelettrici, progettato per gestire in modo sicuro e controllato l'acqua che fluisce all'interno del sistema, specialmente durante arresti improvvisi o variazioni rapide del flusso. È quindi un componente essenziale per l'attenuazione degli effetti del colpo d'ariete.

Si ha un rapido scarico dell'acqua quando il distributore viene chiuso per arrestare la turbina o c'è un cambio improvviso del flusso d'acqua. In questi casi la valvola di scarico sincrono si apre per rilasciare l'acqua in eccesso dal sistema. Questo consente di ridurre rapidamente la pressione nelle condotte, evitando un aumento pericoloso della pressione interna.

Queste valvole sono dette sincrone in quanto funzionano in sincronia con la chiusura del distributore della turbina. In altre parole, mentre il distributore della turbina si chiude per fermare il flusso verso la macchina, la valvola di scarico sincrono si apre contemporaneamente per permettere all'acqua in eccesso di essere scaricata in modo sicuro. Questo bilanciamento tra chiusura e scarico aiuta a prevenire oscillazioni di pressione che potrebbero danneggiare le tubazioni o altre parti dell'impianto.



**Figura 15:** schema di posizionamento di una valvola di scarico sincrono in un impianto di Cotilia con turbina Francis a sinistra, a destra si vede l'entrata in funzione delle valvole deviatrici nell'impianto Idroelettrico di Zlatoličje (Slovenia)

Negli impianti, il sistema di bypass con valvola di scarico è strategicamente posizionato per garantire massima efficienza e protezione: il bypass è generalmente collocato a monte delle turbine, permettendo una derivazione diretta dell'acqua verso il bacino di valle. Questo posizionamento garantisce che, in caso di necessità, l'acqua in eccesso venga rapidamente rilasciata, bypassando il sistema di turbine, e prevenendo quindi fluttuazioni di pressione dannose. La scelta precisa della posizione dipenderà da vari fattori, tra cui la configurazione dell'impianto e le caratteristiche idrauliche del sistema [7].

### 3.4. Sovradimensionamento

L'ultimo metodo che viene riportato è il sovradimensionamento delle condotte e degli organi che possono essere sottoposti ad sovrappressioni dovute al colpo d'ariete.

Per quanto questo possa sembrare un metodo non consigliabile in quanto si accetta di far subire all'impianto tutta la forza del colpo d'ariete risulta utile in quelle situazioni dove l'altezza di carico non è eccessivamente rilevante e in cui l'impianto presenta una potenza installata relativamente modesta per cui l'installazione di pozzi piezometrici o di valvole deviatrici risulta una soluzione troppo costosa.

Generalmente, il sovradimensionamento accettabile delle condotte può variare tra il 10% e il 20% rispetto alla dimensione standard utilizzate per il normale funzionamento. Questa percentuale dipende

da vari fattori tra cui: l'entità del colpo d'ariete, le condizioni operative dell'impianto e gli eventuali costi [8] [9].

Un'altra situazione in cui un sovradimensionamento può essere una soluzione è nel caso in cui il bacino da dove l'impianto preleva l'acqua abbia un rifornimento stagionale e la quantità d'acqua immagazzinata è limitata, con la conseguente necessità di limitare gli sprechi. Sistemi con bypass (che risultano molto utili per limitare le sovrappressioni) vanno a scaricare nel bacino d'uscita, creando una perdita che può essere non tollerabile con la dimensione del bacino a monte e quindi il bypass risulta una soluzione non applicabile [1].

### 3.5. Adozione dei metodi

Non esiste una soluzione univoca per ogni impianto ma si può adottare una serie di misure per la riduzione della sovrappressione nelle condotte forzate.

Per cui, nel caso in cui si renda necessaria l'adozione di una delle tecniche di mitigazione sopra elencate, nessuno vieta l'adozione di più di una di esse per garantire la sicurezza delle persone e dell'impianto. L'adozione di più metodi è anche funzione delle dimensioni dell'impianto; generalmente impianti molto grandi necessitano di più metodi per la prevenzione dal colpo d'ariete rispetto ad impianti di piccola potenza.

## 4. Prevenzione del colpo d'ariete in Italia

L'apporto di energia del settore idroelettrico nel mix energetico italiano pesa per il 14% del totale e rappresenta circa il 40% della potenza rinnovabile installata nel paese ciò la rende una fonte di energia non trascurabile in particolare in Italia vi sono 4860 impianti, si rende dunque necessario garantire il loro corretto funzionamento.

Tra i maggiori impianti italiani si possono citare: la Centrale Idroelettrica di Entracque (Luigi Einaudi), Diga di Santa Giustina, Centrale idroelettrica di San Giacomo, Centrale idroelettrica di Grosio, Centrale idroelettrica di Soverzene; queste sono solo alcune delle centrali sul suolo nazionale.

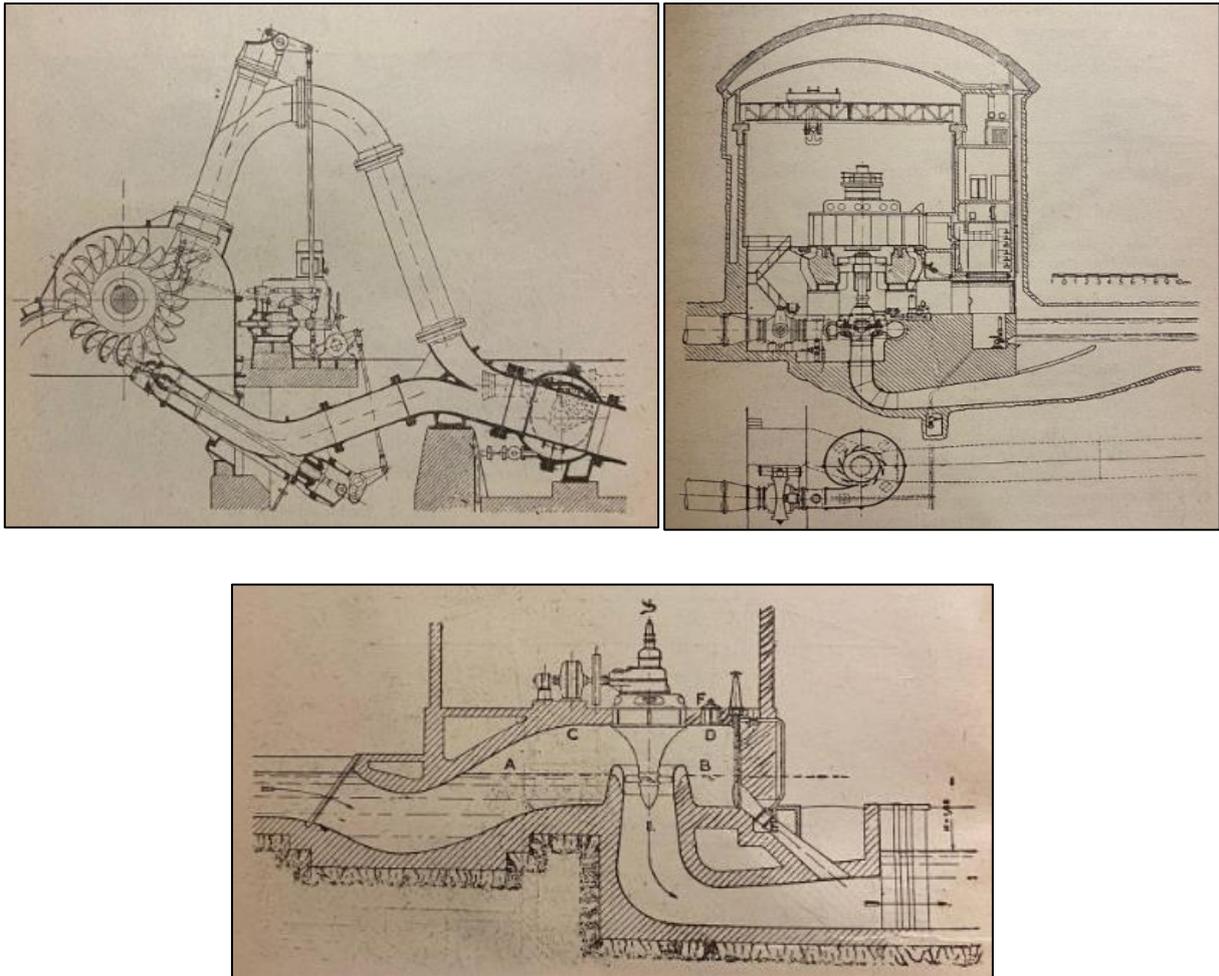
### 4.1. Metodi di contrasto della sovrappressione negli impianti italiani

Dall'analisi dei principali impianti italiani si denota la predilezione ad adottare un mix di soluzioni per la prevenzione del colpo d'ariete. In particolare nella maggioranza degli impianti idroelettrici si adotta una soluzione costituita da una valvola di scarico sincrono ed un pozzo piezometrico (questa soluzione è adottata negli impianti sopra citati).

Sugli impianti con ruota Pelton si adotta il tegolo deviatore in accoppiata con il pozzo piezometrico come mostrano gli impianti di Pieve di Cadore e la Diga di Cingoli.

Inoltre per le piccole applicazioni soprattutto quelle fluviali con modesti salti la soluzione più adottata è quella con valvola di scarico sincrono come dimostrano gli undici impianti situati lungo il fiume Brenta in gestione al Consorzio Bonifica Brenta.

La tendenza generale dello scenario idroelettrico nazionale è quindi quello dell'utilizzo di un'accoppiata di pozzo piezometrico e valvola di scarico o tegolo deviatore, per i grandi impianti dove le potenze e i costi giustificano l'adozione di più metodi di prevenzione, mentre per gli impianti di piccole dimensioni lungo il corso dei fiumi la protezione dell'impianto è generalmente affidata alle valvole di scarico.



**Figura 16:** schema di impianto di una turbina Pelton a sinistra con tegolo azionato dal regolatore tra le due condotte e a destra un esempio di valvola di scarico per turbina Francis, impianti di: Ponte e Soerverzene. Sotto si può vedere la valvola a saracinesca per lo scarico a valle per una turbina Kaplan in particolare nell'impianto di Calzè

## 4.2. Impianti montuosi

I principali impianti idroelettrici per potenza installata sono situati sull'arco alpino data la grande disponibilità di acqua e la possibilità di sfruttare salti di centinaia di metri. In questo scenario indipendentemente dal tipo di turbina adottata per la generazione della potenza, si rende necessario l'utilizzo del pozzo piezometrico così da limitare gli effetti delle oscillazioni di massa del fluido. Lo scenario alpino, inoltre, ben si sposa con l'installazione di pozzi piezometrici.

In aggiunta ai pozzi piezometrici in questi impianti, avendo salti elevati, si rende necessario adottare sistemi per deviare il fluido; si utilizzano, quindi in accoppiata ai pozzi, i tegoli deviatori o le valvole di scarico; in alcuni casi inoltre è possibile usare questi due sistemi insieme (teglolo deviatore e valvola

di scarico) per limitare ulteriormente le pressioni che potrebbero generarsi nella condotta come nell'impianto di Ponte Vannino (Figura 14).

### 4.3. Impianti fluviali

Gli impianti fluviali in Italia, avendo un rifornimento d'acqua costante, possono accettare di perdere parte dell'acqua in caso di spegnimento improvviso della centrale. Diventa quindi generalmente eccessivamente costoso a livello economico e di spazio fare ricorso a pozzi piezometrici in quanto le oscillazioni di massa, essendo rilevanti, richiederebbero spazi troppo grandi per essere dissipate. Inoltre si può sfruttare lo sbarramento del fiume stesso per ammortizzare tali oscillazioni. La soluzione adottata è quindi il solo utilizzo delle valvole di scarico sincrono che rappresentano una soluzione risolutiva per limitare le sovrappressioni.

In questo tipo d'impianti, inoltre, risulta generalmente semplice gestire le sovrappressioni in quanto nonostante le portate elevate, in caso di chiusura improvvisa dell'impianto è possibile aprire le saracinesche di canali appositamente adibiti a convogliare la portata d'acqua. Un'alternativa al canale deviatore è la costruzione dello sbarramento in modo tale che possa tracimare in maniera controllata, queste soluzioni non si escludono a vicenda come nel caso delle centrali di Taccani e di Isola Serafini (dove vengono applicati entrambi i sistemi).



**Figura 18:** impianto di Isola Serafini, si noti in basso le canalizzazioni per deviare l'eccesso di portata e il coronamento a sfioro dello sbarramento



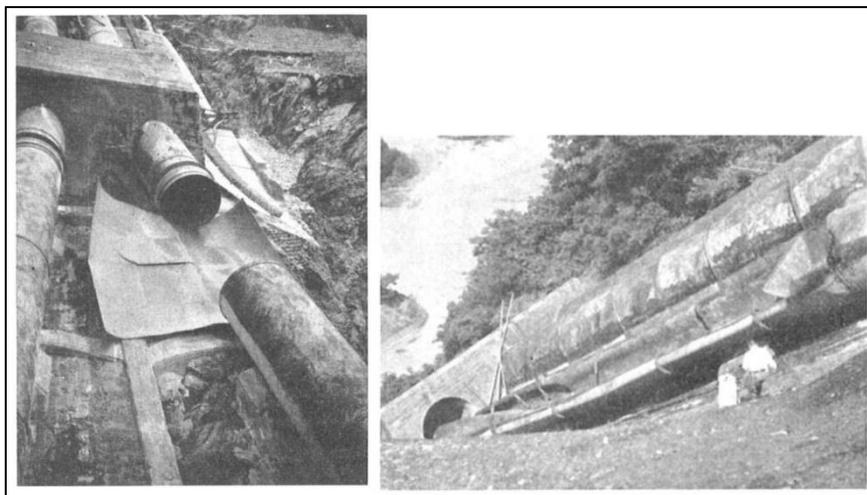
## 5. Danni ed incidenti per colpo d'ariete

Allo scopo di far capire al lettore la pericolosità del colpo d'ariete e quindi l'importanza dei sistemi visti precedentemente si illustrano ora alcuni casi gravi di incidenti nelle centrali idroelettriche causate dal colpo d'ariete che seppur meno dannosi e distruttivi di altri incidenti avvenuti in impianti idroelettrici come il disastro del Vajont (1963) e del Frejus (1959) (dovuti a motivazioni geologiche o strutturali), rientrano nella Energy-Related Severe Accident Database (ENSAD), un database completo sugli incidenti gravi nel settore energetico [10].

Secondo la Paul Scherrer Institut (PSI) si classificano come incidenti gravi tutti quegli eventi per cui si ha una o più delle seguenti conseguenze: almeno 5 vittime; almeno 10 feriti; almeno 200 sfollati; divieto esteso di consumo di cibo; rilascio di idrocarburi superiore a 10.000 t; bonifica forzata di terreni e acque su un'area di almeno 25 km<sup>2</sup>; perdita economica di almeno 5 milioni di USD (2000) [10].

### 5.1. Incidente di Oigawa (Giappone)

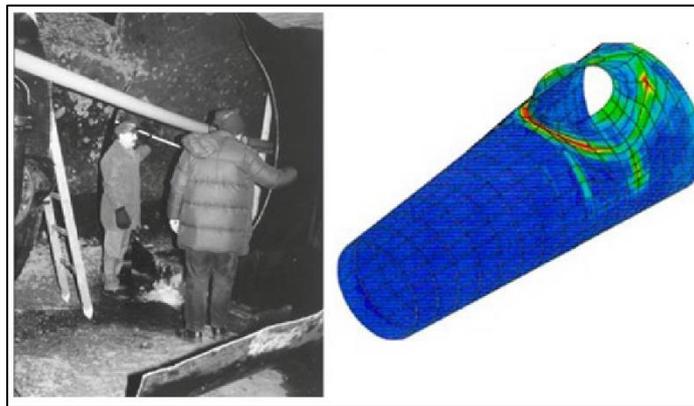
Nel 1950, in una centrale idroelettrica di Oigawa, fu segnalato un incidente catastrofico. La condotta forzata scoppiò 14 anni dopo la messa in servizio a causa della chiusura improvvisa di una valvola a farfalla. La causa principale dell'incidente fu la mancanza di una regolazione sicura della valvola a farfalla. Questo incidente uccise tre dipendenti, causò danni per 500 milioni di dollari e provocò una perdita di energia di 90 GWh in quel momento. Questo incidente rientra nella categoria grave, secondo la classificazione PSI [11].



**Figura 17:** danni riportati dalla condotta forzata a causa dello scoppio nella centrale di Oigawa

## 5.2. Incidente di Lapino (Polonia)

Un altro incidente si è verificato presso la centrale idroelettrica di Lapino nel 1997, dopo 70 anni di servizio. La condotta forzata in acciaio si è rotta durante una procedura di rifiuto del carico di solo il 50% della potenza nominale durante i test per l'implementazione di un nuovo regolatore. In questo caso, la chiusura rapida delle paratoie era preimpostata a circa 2 s per il 100% della corsa. La fatica e la corrosione sviluppatosi in 70 anni di funzionamento sono state identificate da Adamkowski come causa di questo incidente. La fatica e la corrosione hanno interessato la condotta forzata, portando a una bassa qualità dei giunti di saldatura, così come una mancanza di rinforzo nei punti caratterizzati da una grande concentrazione di sollecitazioni che ha contribuito alla rottura della condotta forzata [12].



*Figura 18:* visualizzazione con sistema ad elementi finiti del collasso avvenuto nella centrale di Lapino

## 5.3. Incidente di Sayano-Shushenskaya (Russia)

Il 17 agosto 2009 si è verificato un grave incidente alla turbina n. 2 della centrale idroelettrica di Sayano-Shushenskaya. Questo incidente è costato la vita a 75 persone e ha quasi distrutto la centrale elettrica da 6400 MW. Questo incidente rientra anch'esso nella categoria degli eventi gravi secondo la classificazione PSI. La centrale idroelettrica di Sayano-Shushenskaya è dotata di 10 turbine Francis da 650 MW con una prevalenza di progetto di 194 m, il che la rende la più grande centrale idroelettrica in Russia e una delle più grandi al mondo. Di conseguenza all'incidente, le unità idroelettriche n. 2, 7 e 9 sono state gravemente danneggiate secondo la prima ispezione eseguita presso la centrale idroelettrica di Sayano-Shushenskaya. La causa dell'incidente è stata la sovrappressione seguita ad una manovra brusca del distributore; l'onda di pressione ha quindi esercitato una forza tale che i perni

che ancoravano l'attacco del coperchio della turbina non hanno retto scoperciando interamente la turbina n.2 e danneggiando altri gruppi dell'impianto [13].



*Figura 19:* danni all'edificio turbine e al gruppo stesso all'arrivo dei soccorsi 17 agosto 2009 centrale di Sayano-Shushenskaya

## 5.4. Incidenti in Italia

Incidenti causati dal colpo d'ariete sono avvenuti anche in Italia anche se di entità minore rispetto agli eventi analizzati in precedenza.

In Italia i principali eventi sono stati: l'incidente alla Centrale di Pont-Saint-Martin (Valle d'Aosta) e l'incidente alla Centrale di Cadarese (Piemonte).

### 5.4.1. Incidente della Centrale di Pont-Saint-Martin 1958

L'incidente fu causato da un colpo d'ariete che ha portato alla distruzione del sistema di regolazione idraulico; a causa di una manovra troppo brusca, la sovrappressione che si è generata ha distrutto l'ugello della turbina facendola andare in fuga. L'accelerazione incontrollata della turbina ha quindi generato uno shock che ha provocato la rottura dell'alternatore, causando danni estesi. Questo incidente è spesso citato come esempio classico di disastri dovuti al colpo d'ariete, con conseguenze di rilievo anche dal punto di vista meccanico



*Figura 20:* danni causati alla centrale di Pont-Saint-Martin a seguito dell'incidente

#### 5.4.2. Incidente della Centrale di Cadarese 1969

L'incidente fu causato da un improvviso aumento della pressione durante il riempimento della condotta. L'aumento della pressione ha causato una serie di esplosioni nel sistema idraulico, con significativi danni strutturali. L'incidente è stato causato principalmente da un'errata gestione delle valvole di scarico e ha dimostrato l'importanza dei sistemi di controllo automatico per mitigare il rischio di colpo d'ariete.

Con questi esempi si cerca di far capire al lettore che a causa di un insieme di fattori come una scarsa manutenzione, l'uso di materiali scadenti e progettazione non accurata si può verificare un incidente anche catastrofico all'interno di un impianto idroelettrico, anche se di piccole dimensioni, per cui si rende necessario l'adozione di almeno uno dei metodi sopra elencati per mitigare l'effetto delle sovrappressioni.

Un aspetto essenziale, come detto, per evitare i danni da colpo d'ariete è anche una costante manutenzione degli impianti come dimostrato dall'incidente di Sayano–Shushenskaya. Tale operazione permette di sostituire in tempo i componenti che a causa delle sollecitazioni precedenti non sono più in grado di sostenere il carico operativo. Inoltre si garantisce sempre un'adeguata operatività delle valvole di scarico per evitare otturazioni o mal funzionanti.

In particolare in Italia l'ente che monitora gli impianti idroelettrici è il Ministero della Transizione Ecologica (MiTE). Esso gestisce la sicurezza degli impianti energetici attraverso la Direzione Generale per le Infrastrutture e la Sicurezza dei Sistemi Energetici e Geominerari.

## 6. Conclusioni

Il fenomeno del colpo d'ariete è una manifestazione critica nei sistemi idraulici che, se non adeguatamente mitigata, può causare danni significativi alle infrastrutture idrauliche, ridurre la vita utile dei componenti e interrompere il servizio. Esso si verifica quando il flusso di un fluido viene bruscamente rallentato o interrotto, generando onde di pressione intense all'interno della tubazione. Queste onde si propagano rapidamente lungo il condotto, riflettendosi e sovrapponendosi, e possono raggiungere pressioni molto elevate. Tali oscillazioni mettono a dura prova le pareti dei tubi, i giunti e altri componenti, aumentando il rischio di rotture e perdite di liquido, oltre a generare rumore e vibrazioni che accelerano l'usura meccanica del sistema.

La gestione efficace del colpo d'ariete è essenziale, soprattutto in impianti che operano con fluidi ad alta velocità o pressione, come gli impianti idroelettrici, le reti di distribuzione dell'acqua e i sistemi industriali di movimentazione di fluidi. Le tecniche di mitigazione si basano su un mix di soluzioni ingegneristiche, strumenti meccanici e pratiche operative, ciascuna con specifici vantaggi e limiti.

In primo luogo, l'uso di valvole di controllo a chiusura lenta come visto nel capitolo 1 è una delle tecniche più comuni per limitare il colpo d'ariete. Valvole con meccanismi idraulici o elettrici che regolano la velocità di apertura e chiusura consentono di controllare il flusso in modo graduale, riducendo il rischio di un'interruzione improvvisa che causerebbe un'onda di pressione. Queste valvole possono essere ulteriormente regolate per adattarsi alle caratteristiche specifiche del fluido e della rete, offrendo un controllo dinamico che consente di mantenere il sistema in sicurezza in diverse condizioni operative.

Un'altra soluzione ampiamente adottata è l'installazione di pozzi piezometrici o simili. Questi dispositivi funzionano come "ammortizzatori" che assorbono le variazioni di pressione, immagazzinando una certa quantità di fluido quando la pressione aumenta e rilasciandola quando la pressione diminuisce. Essi sono particolarmente efficaci in sistemi a lunga estensione, dove le onde di pressione possono percorrere distanze considerevoli e accumularsi. I pozzi piezometrici sono progettati per reagire rapidamente alle variazioni di pressione, contribuendo a stabilizzare il sistema e riducendo i picchi di pressione.

Altra tecnica di mitigazione è l'utilizzo di valvole di scarico sincrono o altri strumenti di sfogo dell'acqua, che permettono la fuoriuscita del fluido accumulatosi nella condotta e sul distributore, una delle cause principali del colpo d'ariete. Il rilascio controllato di acqua riduce il rischio di

accumuli improvvisi di pressione. L'installazione di sfiati nei punti critici del sistema aiuta a mantenere un flusso uniforme e ad evitare brusche variazioni di velocità e pressione.

Dal punto di vista della progettazione e gestione operativa, esistono strategie preventive che contribuiscono a limitare il colpo d'ariete. L'analisi transitoria delle reti idrauliche, ad esempio, consente di prevedere le variazioni di pressione in risposta a diversi scenari di flusso e di intervento, come l'apertura e chiusura di valvole. Una progettazione accurata consente di definire il posizionamento ideale di valvole, serbatoi e sfiati in modo da minimizzare i rischi.

Infine, nelle applicazioni idroelettriche si utilizzano sistemi di controllo e monitoraggio continuo, che permettono di rilevare variazioni di pressione in tempo reale e di intervenire tempestivamente per evitare picchi di pressione pericolosi. Sensori di pressione distribuiti lungo le tubature e collegati a sistemi di controllo automatici consentono di attuare interventi correttivi in base alle esigenze operative.

## 7. Bibliografia

- [1] G. Ippolito: Turbine idrauliche.
- [2] L. Allievi: Note dell'ingegner allievi da 1 a 5 (in particolare nota 3).
- [3] G. B. Ugolini Il colpo d'ariete: modi per attenuarne i dannosi effetti, mezzi per utilizzarlo a trasmissione di energia (onde soniche).
- [4] G. Buchi; R. Buchi: Le moderne turbine idrauliche (Kaplan, Francis, Pelton) ed i regolatori di velocità: teoria e pratica.
- [5] Lupa, S.I.; Gagnon, M.; Abdul-Nour, G. Water Hammer Interaction between Hydraulic Power Generators and Hydraulic Passages; World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM 2021): Bonito, Brasilia, 2021.
- [6] Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica: PD-R.4.2\_rel\_motovario\_02.
- [7] C. Zanchi; F. Lionetti Centrali idroelettriche.
- [8] ISO 14881.
- [9] EN 1991-1-4 (Eurocodice 1).
- [10] Hirschberg, S.; Spiekemann, G.; Dones, R. Severe Accidents in the Energy Sector; Technical Report No. 98-16; Paul Scherrer Institute: Viligen, Switzerland, 1998.
- [11] Bonin, C.C. Water Hammer Damage to Oigawa power station. J. Eng. Power. 1960.
- [12] Adamkowski, A. Case Study: Lapino Powerplant Penstock Failure. ASCE J. Hydraul. Eng. 2001.
- [13] Belash, I. Cause of the failure of the no. 2 hydraulic generating set at the Sayano-Shushenskaya HPP: Criticality of reability enhancement for water-power equipments. Power Technol. Eng. 2010.
- [14] Kolšek, T.; Duhovnik, J.; Bergant, A. Simulation of unsteady flow and runner rotation during shut-down of an axial water turbine. J. Hydraul. Res. 2006.
- [15] progettodighe.it