



# scienza attiva®

EDIZIONE 2015/2016

AGRICOLTURA, ALIMENTAZIONE E SOSTENIBILITA'

## *L'energia idroelettrica*

**Andrea Cagninei**

***Politecnico di Torino***

*Documento di livello: A*



Un progetto di



agorà scienza  
centro interuniversitario



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TORINO



scienza attiva®

---

L'energia idroelettrica è ad oggi, in Italia, la principale fonte energetica rinnovabile. Si basa sulla conversione dell'energia potenziale posseduta da una certa massa d'acqua, posta ad una certa quota, in energia cinetica, che può essere a sua volta convertita in energia elettrica all'interno di apposite centrali.

## Cenni introduttivi

L'energia potenziale posseduta da una massa d'acqua di volume  $V$  posta ad una quota  $H$  è pari a:

$$E = V \cdot \gamma \cdot H$$

Con  $\gamma$  si indica il peso specifico dell'acqua, pari a  $9810 \text{ N/m}^3$ . Questa energia potenziale è quella sfruttata dagli impianti idroelettrici. Tale energia viene opportunamente convertita in energia cinetica, attraverso condotte o canali, e convertita in energia elettrica, solitamente tramite turbine.

Ricaviamo la potenza teorica disponibile per un impianto idroelettrico, ottenuta dividendo l'energia disponibile per il tempo, dato che  $E = P \cdot t$ , e convertendo quindi il volume in portata, dato che  $V = Q \cdot t$ .

Supponiamo di considerare un termine  $\eta$ , ovvero il rendimento complessivo di generazione, una differenza di quota tra serbatoio e turbina di trasformazione (detto salto) pari ad  $H$ , e una portata in ingresso costante e pari a  $Q$ . La potenza disponibile è:

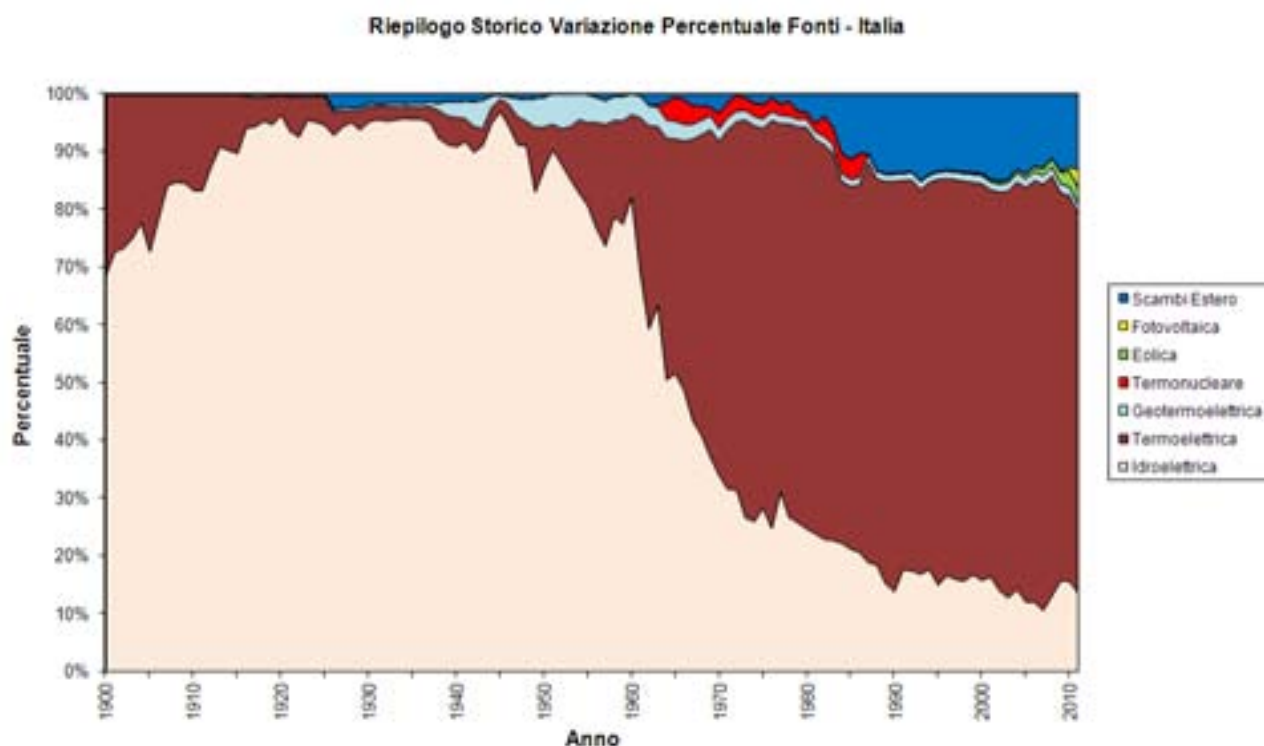
$$P = Q \cdot \gamma \cdot H \cdot \eta$$

La potenza disponibile è quindi funzione della portata disponibile, funzione del tipo corso d'acqua che stiamo sfruttando, del salto, funzione del dislivello tra il serbatoio e la centrale di trasformazione e del rendimento di trasformazione, funzione della tipologia di turbine, delle perdite in condotte e canali, e dell'efficienza delle trasformazioni in energia elettrica. In ogni caso, il rendimento è sempre un numero minore di 1, il cui valore medio può aggirarsi intorno a 0.8.

Le opere per la produzione di energia elettrica devono essere progettate tenendo presente questa relazione per sfruttare al meglio l'energia disponibile. In una situazione con grandi portate e piccoli salti (ad esempio un fiume in pianura), andrà costruita una centrale ad acqua fluente per ottimizzare lo sfruttamento della risorsa, mentre in un bacino montano, con portate minori ed irregolari ma grandi dislivelli, si costruirà un serbatoio per regolarizzare le portate e sfruttare al meglio il salto disponibile.

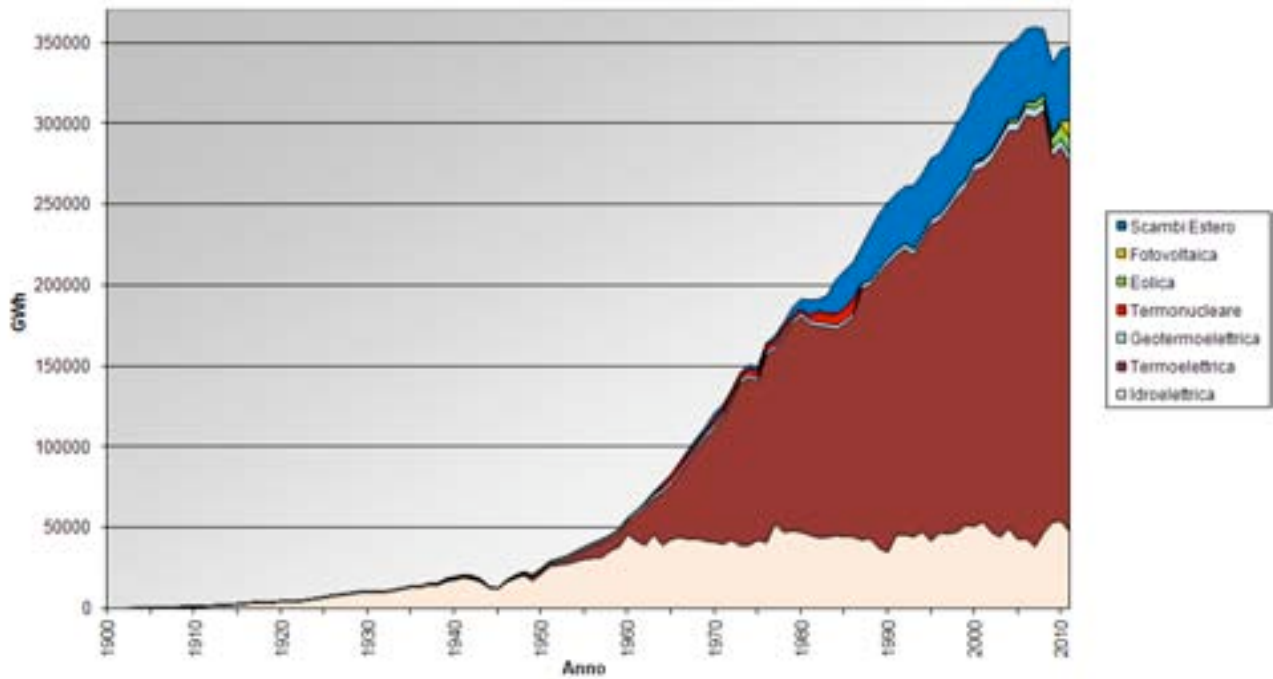
## L'energia idroelettrica in Italia

L'Italia ha un'elevata disponibilità di energia idroelettrica, in particolare nei serbatoi costruiti lungo l'arco alpino. La maggior parte degli impianti per la produzione di energia idroelettrica è stata realizzata nella prima metà del '900: l'energia idroelettrica ha sostenuto la richiesta energetica della prima industrializzazione in Italia. Fino al 1960 la prevalenza dell'energia elettrica prodotta in Italia è derivata da fonti idroelettriche. Da quel punto in poi le fonti termoelettriche hanno preso il sopravvento, in contemporanea con l'incremento di domanda derivante dal boom industriale del dopoguerra. Nel 2007 il 12.3 % dell'energia complessiva prodotta in Italia proveniva da fonti idroelettriche. Tale situazione è rappresentata nel seguente grafico.



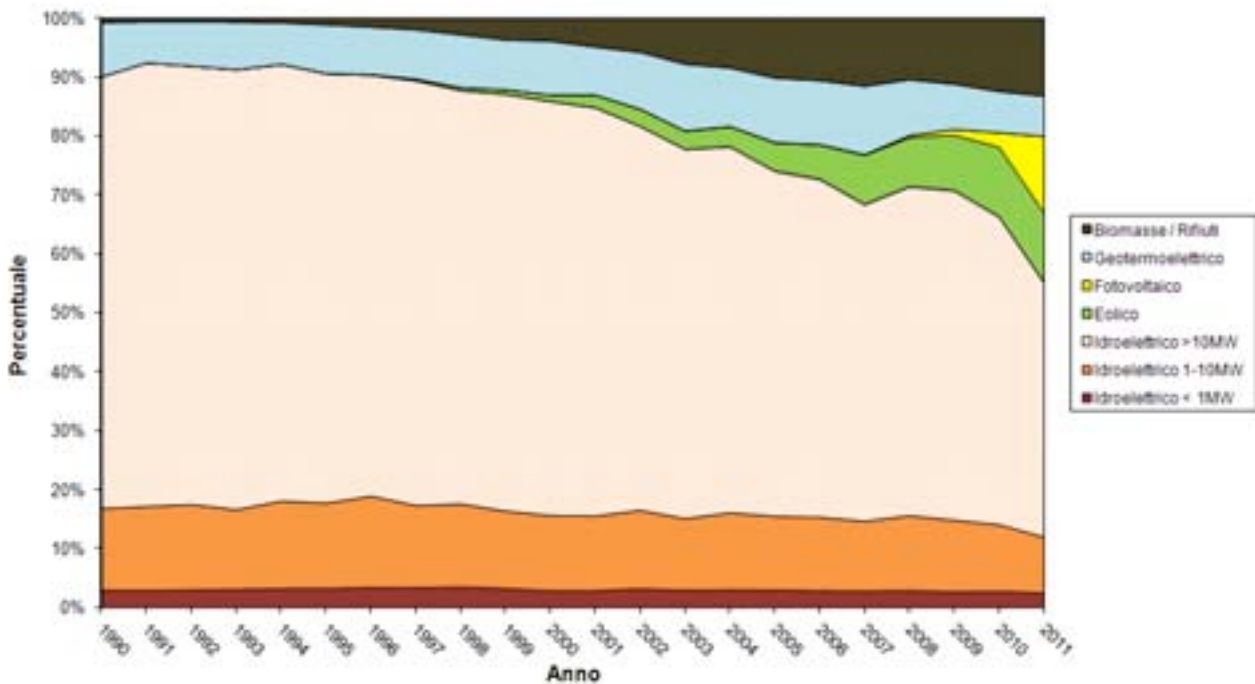
Dall'analisi del grafico seguente si nota invece come la produzione di energia idroelettrica in Italia sia praticamente costante dal 1960: questo perchè si è praticamente da allora si sta già sfruttando la quasi totalità della risorsa idroelettrica disponibile.

Riepilogo Storico della Produzione di Energia in Italia



Confrontata con le altre fonti energetiche rinnovabili l'idroelettrico mantiene la sua prevalenza nonostante il boom delle altre fonti negli ultimi anni, dovuto ad appositi incentivi. Ad oggi l'energia idroelettrica rappresenta più del 50 % dell'energia rinnovabile complessivamente prodotta in Italia.

Variatione Percentuale Fonti Rinnovabili - Italia



## Tipologie di impianti idroelettrici

Come riportato in precedenza, la tipologia di impianto viene scelta in funzione del tipo di risorsa disponibile per ottenere la massima produzione di energia.

### Impianti in pressione con condotte forzate

Questi impianti vengono costruiti laddove si ha a disposizione un salto rilevante e un serbatoio, sovente realizzato con la costruzione di uno sbarramento. Per questo motivo, sono impianti tipici delle zone montane, dove è relativamente facile costruire un invaso artificiale costruendo uno sbarramento all'interno di una valle. Lo schema tipico di questi impianti è riportato in figura.



Il serbatoio è realizzato nella posizione che permette di immagazzinare il maggior volume possibile, raccogliendo le acque della maggior parte del bacino fluviale di riferimento essendo posto alla maggior quota, per massimizzare il salto. Ovviamente si cerca la soluzione ottimale come compromesso tra queste esigenze, scegliendo anche una posizione che sia favorevole alla costruzione della diga.

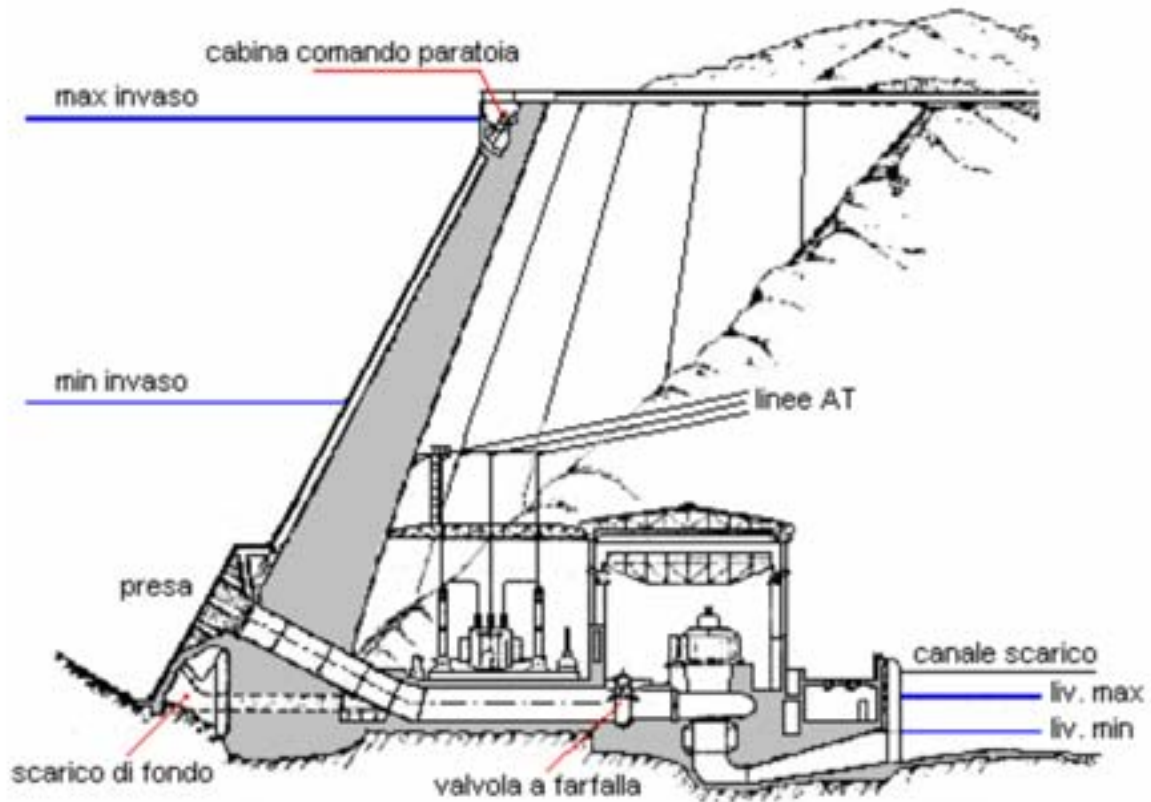
Il condotto di derivazione è una galleria dove l'acqua scorre in pressione, ovvero una condotta interamente riempita d'acqua, che trasporta una certa portata fino al pozzo piezometrico, da cui parte la condotta forzata. La condotta forzata trasporta in pressione la portata fino alla centrale di trasformazione, limitando al minimo le perdite e con una velocità tale da permettere il funzionamento ottimale delle turbine.

Impianti di questo tipo consentono una notevole regolazione delle portate. Se le dimensioni del serbatoio sono sufficienti, è possibile immagazzinare parte delle portate entranti durante un periodo dell'anno caratterizzato da notevole portate (primavera ed autunno, nelle valli alpine), per sfruttarle in periodi di magra (estate ed inverno).

Questo schema può essere modificato o integrato con più serbatoi e centrali di trasformazione collegate, a seconda della conformazione del bacino in cui sono realizzate le centrali idroelettriche.

### Impianti direttamente connessi a diga

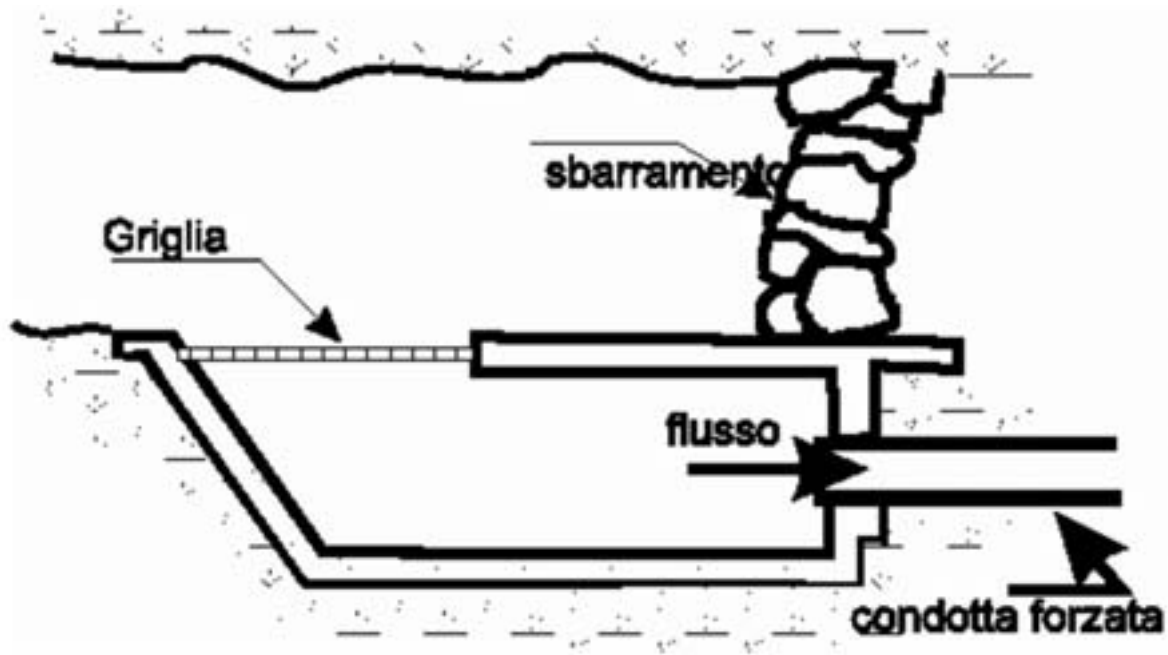
Qualora la valle si presti alla costruzione di un invaso ma non sia possibile, o economicamente conveniente, realizzare le opere di derivazione e la centrale ad una quota inferiore, è possibile realizzare la centrale di trasformazione direttamente a ridosso della diga.



Questa configurazione non permette di sfruttare tutto il volume di invaso, dato che la quota minima di invaso si deve comunque trovare al di sopra della quota della centrale di trasformazione.

### **Impianti a pelo libero con condotte forzate**

Nel caso in cui non sia possibile costruire un serbatoio con una diga vera e propria, vengono realizzati sbarramenti con minori dimensioni che creano un modesto bacino di accumolo da cui parte un canale di derivazione a luce libera, ovvero non chiuso in una condotta. Da tale canale parte poi la condotta forzata fino alla centrale di trasformazione.

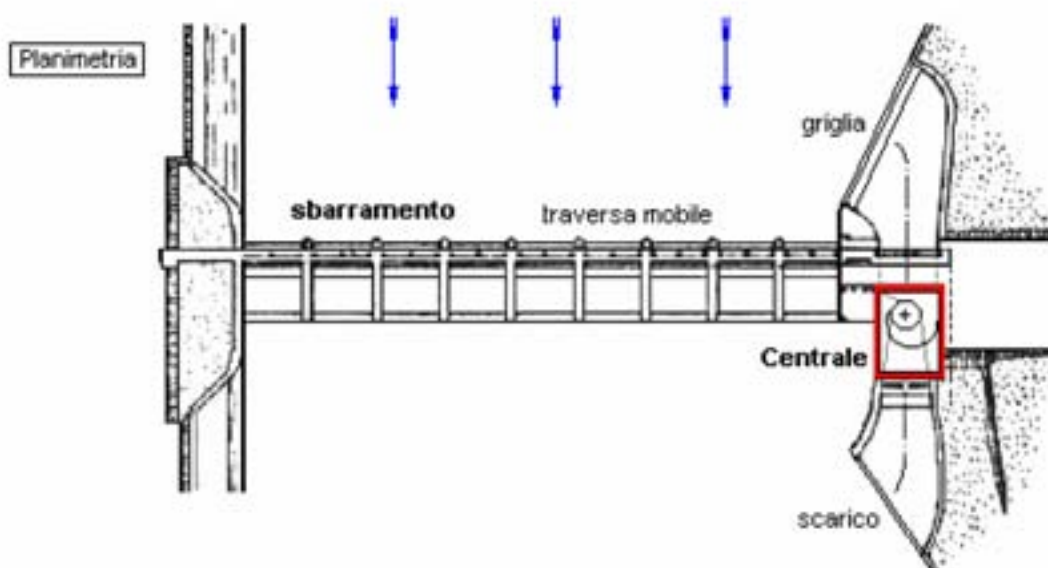


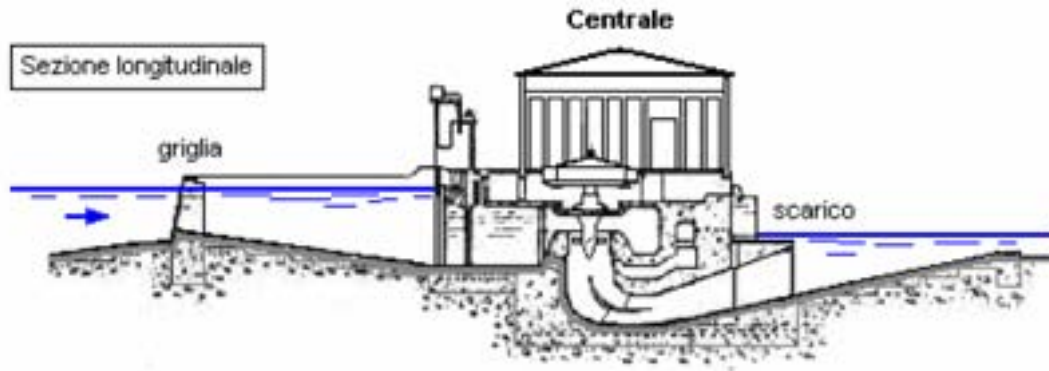
Centrali di questo tipo consentono una minore regolazione delle portate, data la scarsa dimensione del serbatoio di accumolo.

### Impianti fluviali

Sono impianti realizzati direttamente nell'alveo di un fiume, in situazioni in cui non è possibile realizzare serbatoi di invaso, non sono disponibili notevoli salti ma si hanno a disposizione portate notevoli. Sono realizzati tipicamente su fiumi in pianura.

Prevedono la realizzazione di uno sbarramento che permetta la realizzazione di un salto di alcuni metri che viene sfruttato per la produzione di energia. In questo genere la portata disponibile viene immediatamente utilizzata, data la scarsa dimensione del serbatoio.





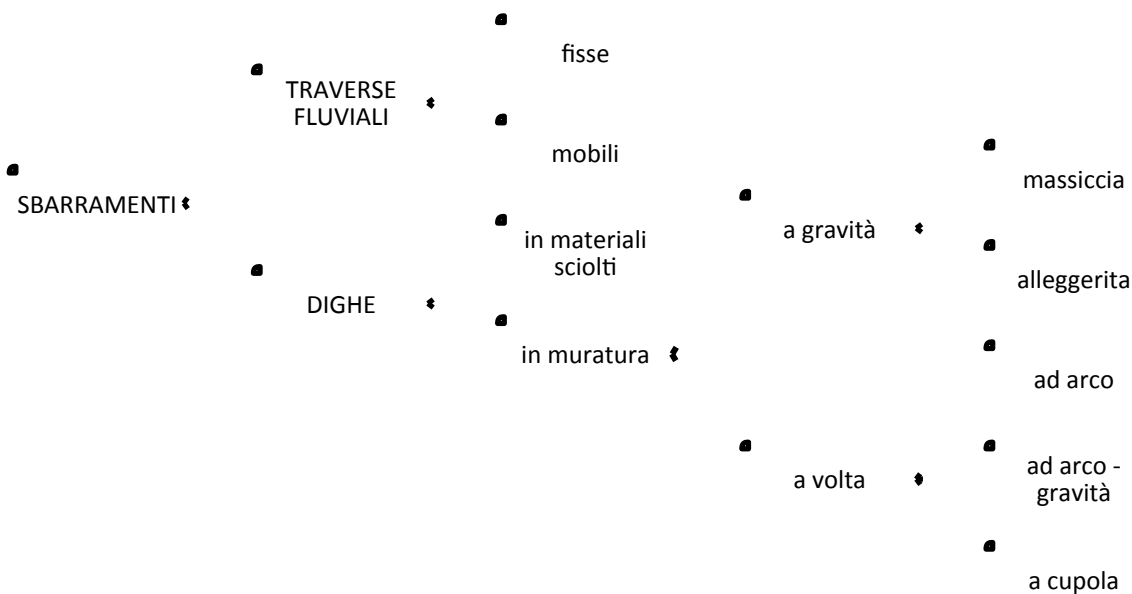
Spesso queste opere vengono abbinare a delle conche di navigazione che permettano la navigazione lungo il fiume su cui sono costruite e scale per i pesci, per mantenere il ciclo vitale della fauna fluviale.

In alternativa alla configurazione queste centrali possono essere realizzate con un canale che deriva la portata che si vuole sfruttare in una centrale posta in una posizione diversa lungo il fiume.



## Opere di sbarramento

Nella sezione precedente è stato evidenziato come diversi tipi di impianti idroelettrici richiedano diversi tipi di sbarramento. Gli sbarramenti vengono così classificati:

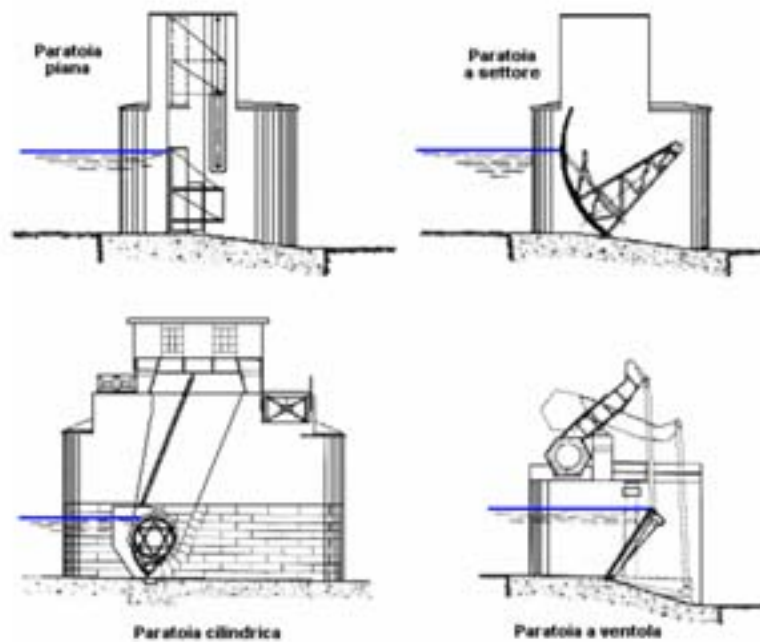


### Traverse fluviali

Le traverse inserite in un corso d'acqua creano un rigurgito a monte, in modo da convogliare le portate verso le opere di presa e derivazione. Sono strutture tipicamente utilizzate negli impianti ad acqua fluente, o laddove si voglia realizzare un canale di derivazione in un corso d'acqua.

Le traverse fisse sono costruite come strutture all'interno dell'alveo del fiume, in muratura, calcestruzzo o altri materiali. Non consentono una regolazione del livello del serbatoio, e devono essere provviste di opere per la rimozione di ghiaia e sedimenti.

Le traverse mobili sono costituite da opere fisse che sorreggono le paratoie mobili, solitamente in metallo. Le paratoie mobili sono collegate ad organi di manovra di vario tipo, che ne permettono il sollevamento e la regolazione del livello a monte. Possono avere varie forme, più o meno adatte al tipo di utilizzo.



## Dighe

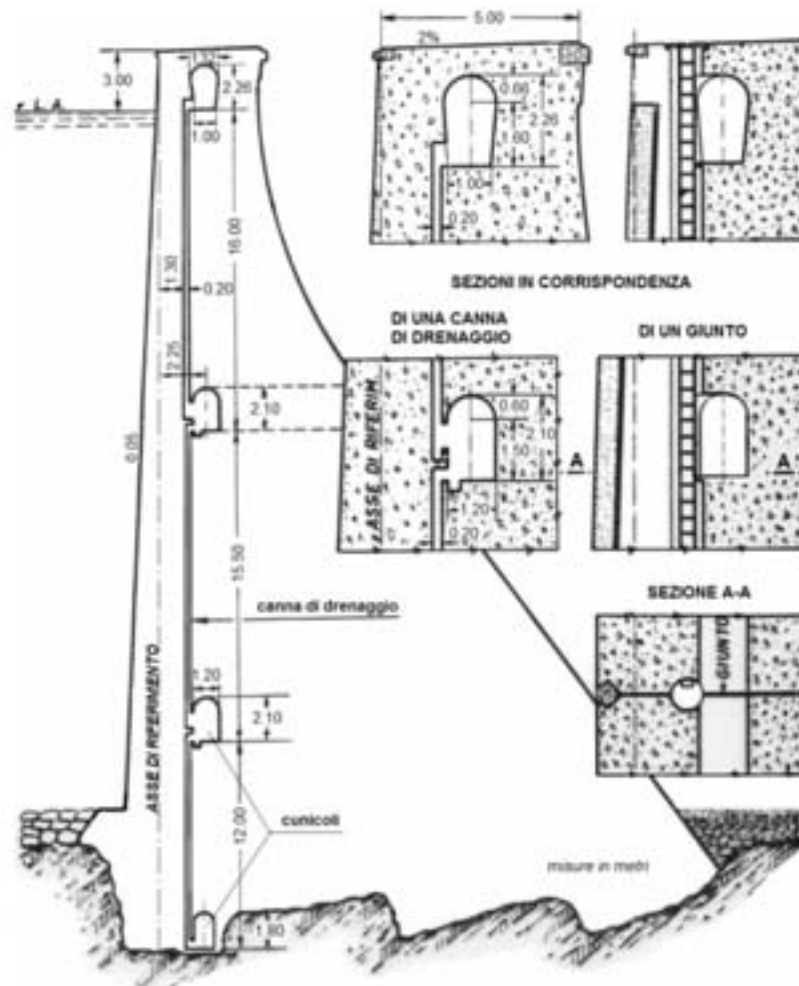
Le dighe sono opere di sbarramento che servono per creare una notevole sopraelevazione del livello idrico a monte e realizzano un serbatoio, ovvero un vaso artificiale. Il serbatoio di monte viene sfruttato per l'immagazzinamento dei volumi d'acqua da sfruttare ai fini della produzione di energia elettrica. L'altezza di una diga è definita come la differenza tra la quota minima a valle e la quota del coronamento, ovvero del punto più alto della diga.

Le dighe si suddividono tra dighe in materiali sciolti e dighe in muratura.

Le dighe in materiali sciolti sono la tipologia di diga più vecchia che si conosca, e possono essere realizzate in terra, in massi a scogliera o in muratura a secco. Sono dighe che resistono alla spinta dell'acqua con il loro peso, e non possono essere in alcun caso sormontate per evitare l'erosione del materiale che le costituisce. Data la ridotta resistenza dei materiali di cui sono costituite, non possono eccedere altezze di qualche decina di metri.

Le dighe in muratura possono essere a gravità o a volta, e sono costituite prevalentemente in muratura (per le dighe a gravità) o in calcestruzzo.

Le dighe a gravità massiccia possono essere costruite in muratura o in calcestruzzo, e sono la tipologia di diga a gravità più diffusa. Hanno una sezione triangolare, e resistono alla spinta dell'acqua a monte grazie al loro peso. La seguente figura rappresenta un esempio di sezione trasversale di una diga a gravità massiccia.



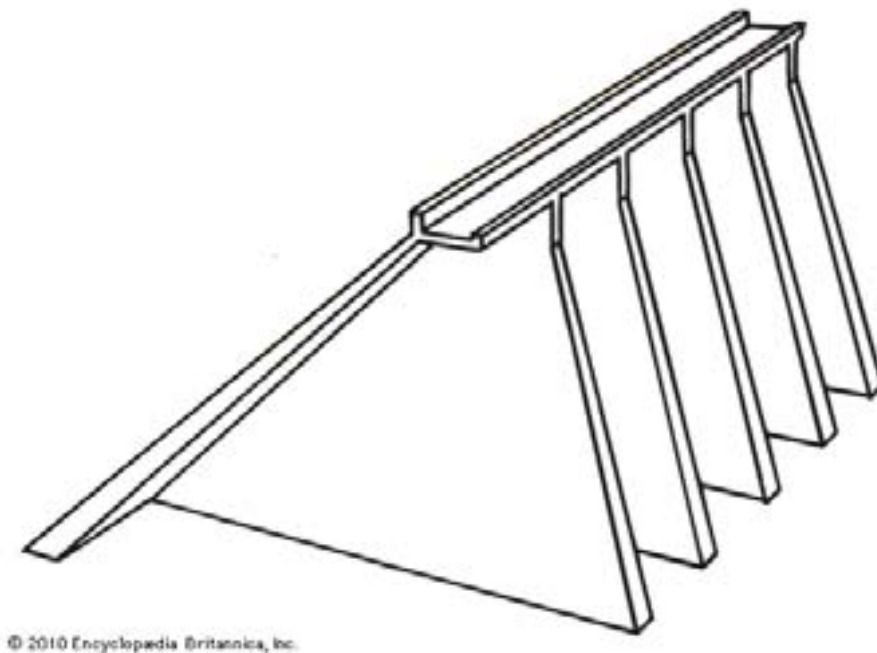
All'interno del corpo della diga sono costruite diverse gallerie di ispezioni e dreni, che servono a tenere sotto controllo le condizioni della diga e a drenare l'acqua che si infiltra al di sotto e all'interno della diga. Il corpo della diga deve essere reso solidale al terreno di fondazione con opportune iniezioni di consolidamento, per prevenire scivolamenti.

All'interno della diga, e alla sua base, sono realizzati dei dreni, ovvero delle perforazioni di piccolo diametro che percorrono l'intera altezza della diga. I dreni servono a rimuovere l'acqua che si infiltra al di sotto della diga e che tenderebbe a sollevarla, riducendone la stabilità. L'acqua dei dreni è poi allontanata attraverso i cunicoli di ispezione.

Le dighe in calcestruzzo sono realizzate per getti successivi, ovvero da una serie di conci. Questi conci sono tra loro collegati da giunti opportunamente riempiti di materiale che ne garantisca la tenuta idraulica, e al tempo stesso permettono di assorbire parte delle deformazioni che si possono verificare nel corpo diga.

Le dighe a gravità alleggerita hanno una forma triangolare maggiormente accentuata rispetto a quelle a gravità massiccia, in modo da poter sfruttare parte della spinta idrostatica per migliorare la stabilità. In questa maniera è possibile realizzare delle sezioni orizzontali con profili a T, riducendo il volume di materiale utilizzato e di conseguenza i costi. Altri tipi di dighe alleggerite sono quelle a speroni o contrafforti, dove alcuni contrafforti, in calcestruzzo armato o comunque di elevata resistenza, sorreggono delle lastre in calcestruzzo che formano il vero corpo diga. Anche in questo caso il risparmio di materiale comporta una riduzione dei costi di realizzazione.

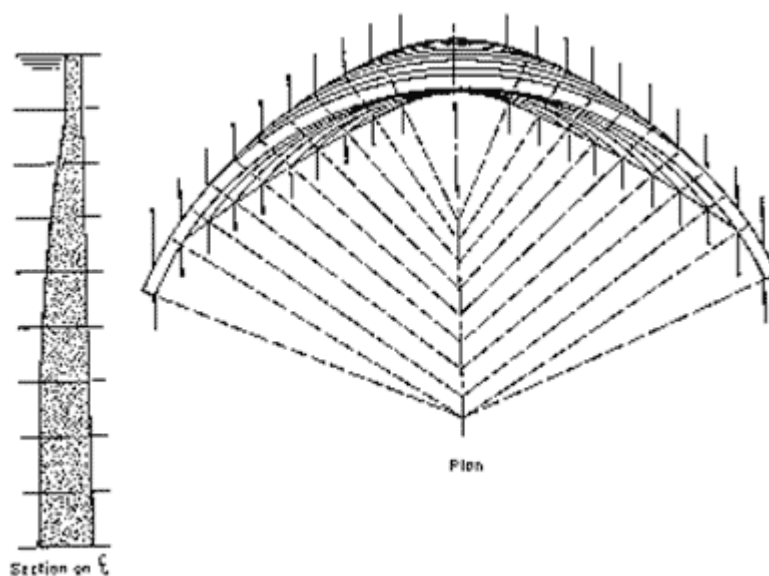
La seguente immagine rappresenta schematicamente il lato di valle di una diga a contrafforti.



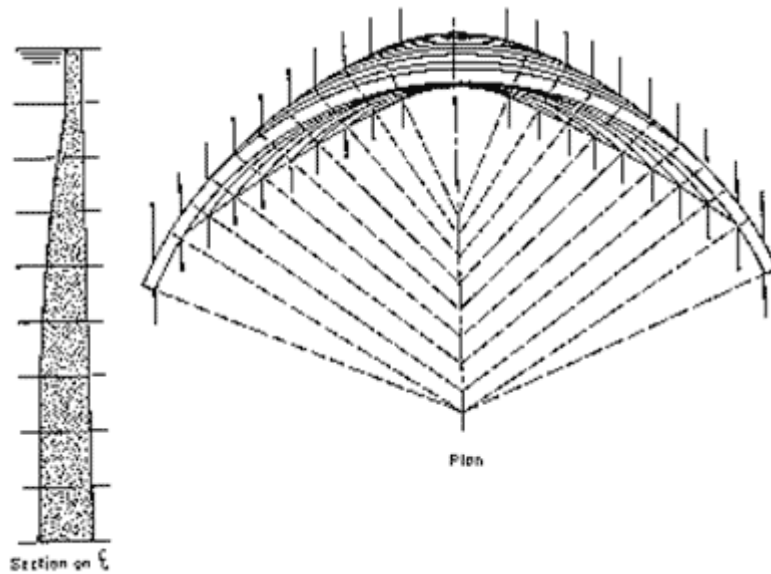
Le dighe a volta sono particolari tipi di dighe in calcestruzzo, in cui la forma planimetrica è un arco. Si prestano bene a sbarrare valli strette, dato che la forma ad arco consente di scaricare la spinta dell'acqua sulle pareti della valle dove è inserita la diga.

Si parla di dighe ad arco nel caso in cui si abbia una semplice curvatura planimetrica, in dighe ad arco-gravità se una sezione più bassa della diga resista agli sforzi con un comportamento simile alle dighe a gravità, e di dighe a cupola se la curvatura è doppia, sia nel senso planimetrico che altimetrico, ovvero se il raggio di curvatura è variabile con la quota.

Di seguito è riportato lo schema di una diga ad arco a singola curvatura.



La seguente immagine rappresenta invece lo schema di una diga a doppia curvatura.



Le dighe ad arco garantiscono un notevole risparmio di materiale e costi rispetto alle dighe a gravità. Devono però essere realizzate in zone adatte, laddove le pareti delle valli possono resistere agli sforzi trasmessi dall'arco. Per migliorare la sicurezza della struttura solitamente viene realizzato un pulvino, ovvero una congiunzione in calcestruzzo tra il corpo della diga e le pareti rocciose della valle in cui è inserita.

## Opere di scarico

Le dighe sono completate da diverse opere di scarico, che permettono lo svuotamento dell'invaso in caso di necessità.

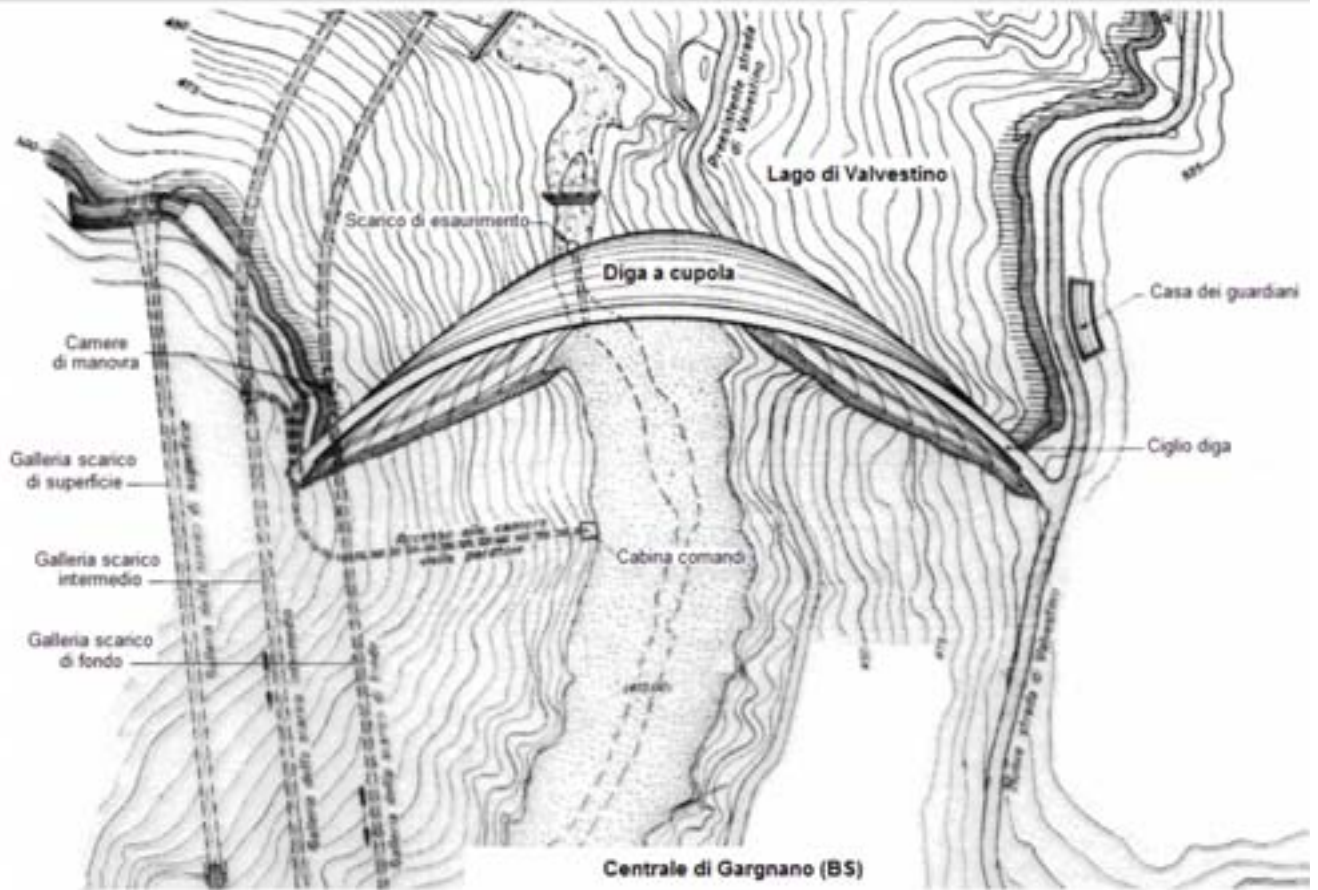
Ogni diga è dotata di uno o più sfioratori di superficie, che sono opere di scarico a luce libera (ovvero a diretto contatto con l'esterno), che permettono lo scarico automatico dell'invaso qualora si superi una quota massima prestabilita. Hanno una sorta di funzione di "troppo pieno", per evitare che la diga venga invasata eccessivamente in caso di eventi di piena, e non necessitano dell'intervento umano per entrare in funzione qualora si superi la quota di massimo invaso della diga.

Gli scarichi di alleggerimento, posti solitamente a circa metà dell'altezza dell'invaso, sono invece opere che funzionano in pressione, ovvero completamente sommersi da acqua, e permettono lo svuotamento di una portata prima che la diga sia completamente riempita, se questo fosse necessario.

Gli scarichi di fondo, anch'essi adatti a funzionare in pressione, consentono lo svuotamento completo dell'invaso, e sono spesso ricavati al piede della diga. Sia gli scarichi di fondo che di alleggerimento sono realizzati in modo da poter essere controllati con valvole e paratie per essere aperti e chiusi a piacimento, in caso di necessità.

Gli invasi sono inoltre completati da opere di derivazione di vario genere, che servono per derivare le portate necessarie per la produzione di energia idroelettrica. Queste opere di derivazione devono essere costruite in modo da limitare l'afflusso di portata solida (ovvero ghiaia, sedimenti ed altri detriti) all'interno delle condotte, per evitare che danneggino le turbine.

La seguente figura riporta una vista planimetrica di una diga a cupola, con indicazione dei diversi scarichi.



## Centrali idroelettriche

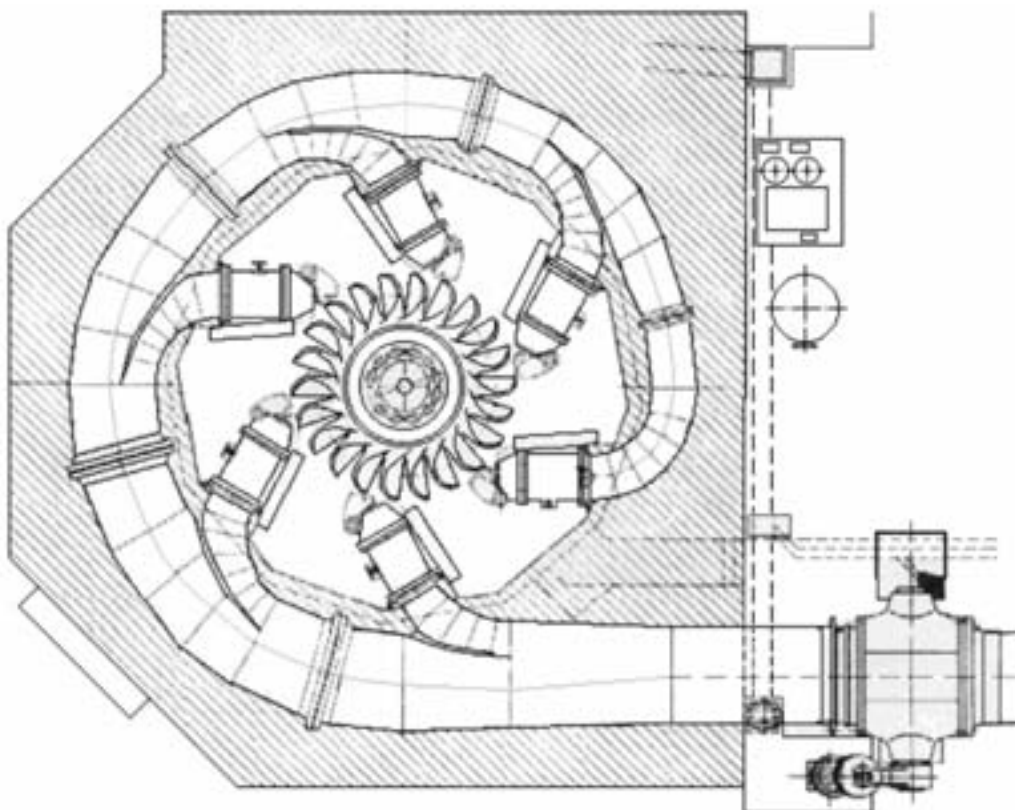
Le centrali idroelettriche sono strutture poste più o meno a valle dell'invaso, dove l'energia cinetica posseduta dall'acqua viene convertita in energia elettrica.

A seconda del tipo di impianto possono essere costruite direttamente a ridosso dello sbarramento (come per esempio nelle traverse fluviali) o a valle delle condotte forzate, in modo da sfruttare il salto derivante dalla differenza di quota tra serbatoio e centrale (come nelle centrali montane).

All'interno delle centrali si trovano apparecchi di tipo idraulico ed elettrico. Gli apparecchi idraulici principali sono le turbine, che trasformano la velocità dell'acqua in rotazione attorno ad un asse. Gli apparecchi elettrici sono i generatori, ed i trasformatori, che trasformano questa rotazione in energia elettrica e la gestiscono opportunamente per l'inserimento in rete.

Ci concentreremo ora in più dettagli sui principali tipi di turbine. Le turbine si distinguono in turbine ad azione, dove la turbina si trova al contatto con l'atmosfera ed è messa in rotazione dall'energia cinetica dell'acqua, e turbine a reazione, dove la turbina si trova completamente immersa in acqua ed è messa in moto in parte dell'energia cinetica dell'acqua ed in parte dalla pressione dell'acqua, trasformata in velocità dalla particolare geometria delle turbine.

La principale turbina ad azione è la turbina Pelton, riportata in figura.

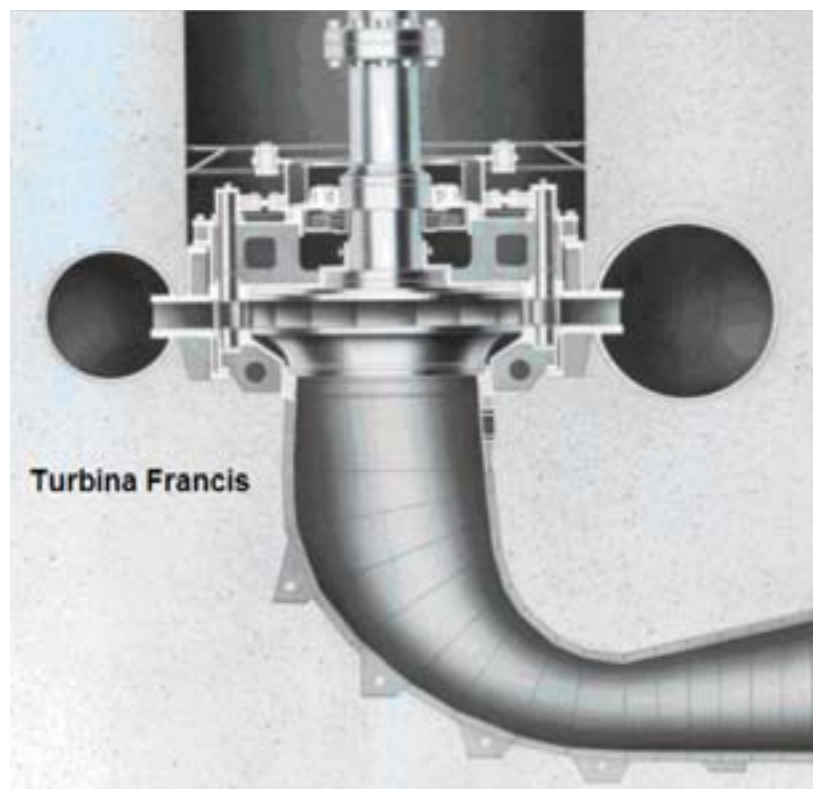


La turbina è costituita da una serie di cucchiai, costituiti da una doppia forma concava. La turbina viene colpita da uno o più getti d'acqua provenienti dalle condotte forzate e messa in rotazione. E' possibile regolare la velocità della turbina regolando l'afflusso dell'acqua. Questo genere di turbine, per impianti di grande potenza, raggiunge e supera rendimenti (ovvero rapporti tra energia dall'acqua in ingresso ed

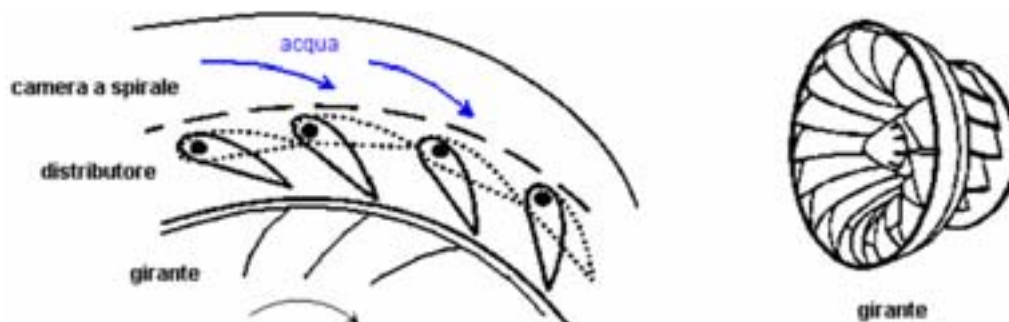
energia elettrica prodotta) superiori al 90%, per un intervallo di portate piuttosto ampio intorno alla portata di progetto. Per evitare il contatto tra la turbina e schizzi d'acqua, che potrebbero causarne il deterioramento, queste turbine vanno poste ad un certo dislivello dal punto di restituzione dell'acqua, spreco quindi alcuni metri di salto. Dato che solitamente vengono installate in impianti con grandi salti, questa perdita è comunque trascurabile.

Le turbine Francis è una turbina a reazione molto diffusa. E' costituita da due distributori a corona circolare, che convogliano l'acqua verso la zona centrale dove è installata la girante, costituita da una serie di palette.

La distribuzione dell'acqua tra distributore e girante è regolata da una serie di alette, che permettono di regolare la velocità del flusso in ingresso alla girante per massimizzare il rendimento in funzione delle condizioni di funzionamento. Di seguito è riportato la sezione di una turbina Francis.



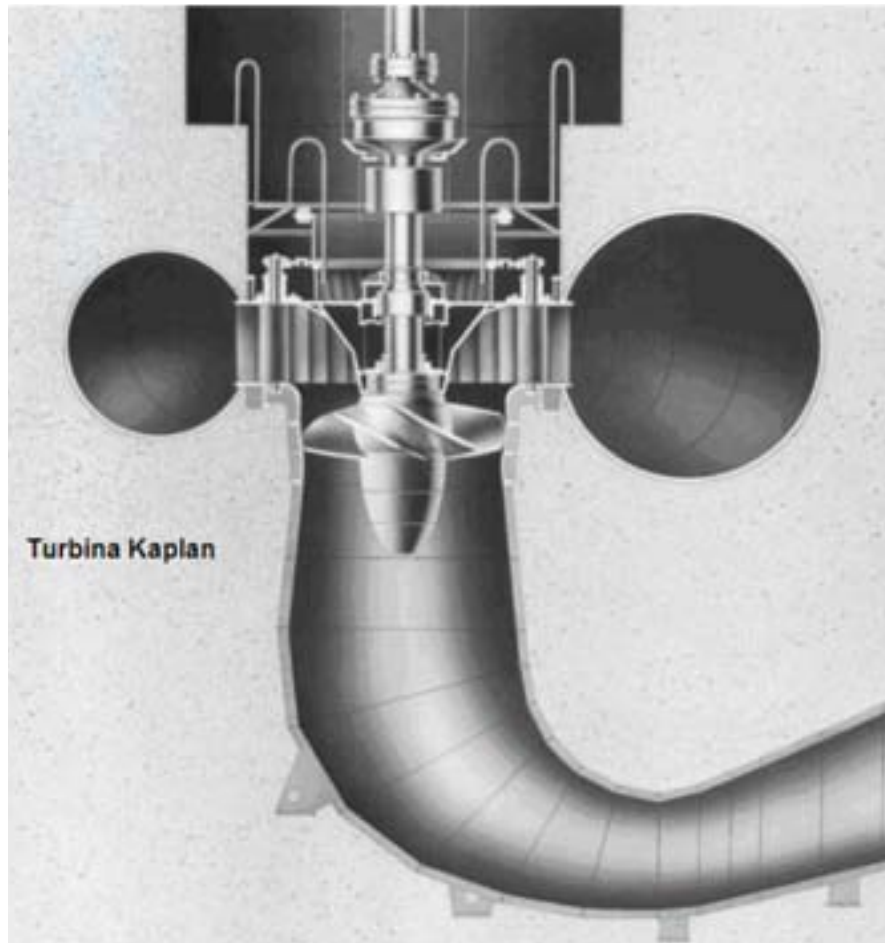
La seguente figura riporta invece lo schema delle alette che regolano il passaggio da distributore a girante ed uno schema della girante.





A valle della girante è solitamente posizionato un diffusore al fine di permettere un migliore deflusso delle portate e migliorare il rendimento della turbina. Queste turbine possono raggiungere picchi di rendimento anche maggiori delle turbine Pelton, ma solamente per portate prossime a quelle di dimensionamento.

Un altro tipo diffuso di turbine a reazione sono le turbine Kaplan. E' una turbina in cui la girante è una sorta di elica, in cui le pale si possono inclinare in modo da presentare sempre l'inclinazione delle pale più adatta a massimizzare il rendimento di trasformazione.



Queste turbine, anche se più costose di altri tipi, presentano una grande versatilità di funzionamento e sono spesso utilizzate in situazioni con notevoli variazioni di portate, come negli impianti fluviali.

La scelta della tipologia di turbina più opportuna è una procedura complessa, che deve tenere conto di diversi fattori: il costo della turbina, il suo rendimento, la variabilità delle portate in ingresso e l'influenza sulla produttività, le limitazioni tecniche che possono o meno favorire l'installazione di una turbina o di un'altra.

## Impianti di pompaggio

Una particolare attenzione va dedicata agli impianti di pompaggio. Si tratta di particolari impianti, che sono accoppiati alle centrali idroelettriche, il cui scopo è di gestire gli eccessi di energia presenti in rete.

Le centrali di tipo termoelettrico e nucleare hanno una notevole inerzia, ovvero devono mantenere un funzionamento pressochè costante nell'arco della giornata. Invece, gli impianti idroelettrici con serbatoio possono essere accesi o spenti con tempi relativamente brevi, agendo sulle opere di derivazione.

Dato che i consumi elettrici hanno una notevole variabilità durante la giornata, con picchi durante il giorno e minimi di richiesta durante la nottata, le centrali idroelettriche con serbatoi e impianti di pompaggio vengono utilizzate per assorbire questi picchi.

Una centrale di pompaggio è generalmente costituita da un serbatoio di monte, una centrale, ed un serbatoio di valle in cui vengono accumulati i volumi d'acqua turbinati. All'interno della centrale vengono posti degli impianti di pompaggio che possono prelevare acqua dal serbatoio di valle per restituirla a quello di monte, pronta per essere nuovamente turbinata in caso di necessità. La procedura comporta un certo "costo" energetico dovuto alle perdite dei successivi turbinaggi e pompaggi, che può essere limitato ottimizzando il funzionamento degli apparecchi.

Un uso tipico delle centrali di questo è utilizzare l'acqua accumulata nei serbatoi di monte per fornire energia durante le ore di richiesta massima, e spegnere le centrali idroelettriche quando la domanda è minima. Inoltre, quando la domanda è minima, si può avere un surplus di energia in rete, proveniente dalle centrali termoelettriche e nucleari estere, che non possono essere spente in breve tempo.

Questi surplus di energia possono essere utilizzati per alimentare i sistemi di pompaggio e riempire di nuovo i serbatoi di monte. In tale modo si ha di nuovo una disponibilità d'acqua per coprire eventuali picchi di domanda, e si è utilizzato il surplus di energia in rete che altrimenti sarebbe stato sprecato. In tale modo i serbatoi delle centrali idroelettriche funzionano come veri e propri accumulatori di energia potenziale, pronta ad essere utilizzata in caso di necessità.

Questo uso diventerà sempre di maggiore importanza con il diffondersi delle fonti energetiche rinnovabili, quali solari ed eolico. Tali fonti, pur non riducendo di molto l'impatto ambientale della produzione di energia, sono caratterizzate da forti discontinuità nella produzione, che può variare di molto nel corso della stessa giornata.

Le centrali idroelettriche con impianti di pompaggio possono assorbire i picchi di produttività nelle ore in cui la produttività da fonti rinnovabili è massima, e fornire energia in rete quando la produttività delle fonti rinnovabili cala, per esempio a causa delle condizioni atmosferiche.

## Bibliografia

- Dispense del corso di "Conversione dell'energia" del dott. Ing. Guido Belli dell'Università di Pavia, Facoltà di Ingegneria, Dipartimenti di Ingegneria Elettrica
- [www.wikipedia.it](http://www.wikipedia.it) per i grafici relativi alla produzione di energia elettrica in Italia