



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

TURBINA PELTON ALL'INTERNO DELLO SCENARIO ELETTRICO
ITALIANO: ANALISI DEL CAMPO DI IMPIEGO – IL SALTO
GEODETICO

Tutor Universitario: Prof.ssa Giovanna Cavazzini

Correlatore: Ing. Francesco Nascimben

Luca Bonello 2033133

Anno Accademico 2023/2024

SOMMARIO

Il settore idroelettrico, nonostante la crescita costante della capacità installata relativa ad impianti fotovoltaici ed eolici, occupa ancora indiscutibilmente il primo posto tra le fonti rinnovabili per quanto riguarda la produzione di energia elettrica in Italia. Tale aspetto può essere ricondotto sicuramente al fatto che i primi impianti idroelettrici sono iniziati a comparire in Italia verso la fine dell'Ottocento, portando poi alla costruzione di migliaia di centrali tuttora in funzione. La nascita di nuovi impianti, però, rallentata con l'avvento del nuovo millennio, non è stata accompagnata dalla creazione, a livello nazionale, di un database di impianti riportante informazioni riguardanti la posizione, la tipologia di impianto e le condizioni operative (salto, portata, potenza d'impianto principalmente). L'obiettivo di questa relazione è quindi quello di avanzare una prima proposta di database di impianti idroelettrici, catalogando ed analizzando nello specifico quelli dotati di turbine Pelton. nono, andandoli poi a confrontare con i range di salto geodetico solitamente indicati dallo stato dell'arte per tali applicazioni.

La prima parte dell'elaborato riporta una panoramica sull'energia idroelettrica, con particolare attenzione allo scenario italiano, trattando il ruolo ricoperto dall'idroelettrico nell'ambito delle fonti rinnovabili e i possibili scenari di sviluppo futuro di tale tecnologia. Inoltre, è descritto il principio di funzionamento delle centrali e il modo in cui, queste ultime, convertono l'energia proveniente dall'acqua in energia elettrica. Nella seconda parte dell'elaborato, invece, si riporta l'analisi qualitativa del funzionamento di una turbina Pelton, focalizzandosi sul principio di funzionamento e sulle caratteristiche che la contraddistinguono.

Infine, nell'ultima parte dell'elaborato, dopo aver descritto la struttura del database e dopo aver riportato i primi risultati ottenuti dall'analisi di letteratura, si è proceduto al confronto tra i valori di salto motore del campione di impianti presi in esame con i range indicati in letteratura, riscontrando un buon accordo tra i due.

INDICE

1 INTRODUZIONE.....	3
1.1 L'ENERGIA IDROELETTRICA	4
1.1.1 STATO ATTUALE E SCENARI FUTURI.....	5
1.1.2 SCENARIO NAZIONALE	7
1.2 IMPIANTI IDROELETTRICI	10
1.2.1 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO	10
1.2.2 TIPOLOGIE DI IMPIANTI	12
1.2.2.1 CENTRALI AD ACQUA FLUENTE.....	13
1.2.2.2 CENTRALI A BACINO	13
1.2.2.3 CENTRALI AD ACCUMULO O POMPAGGIO	14
1.3 TURBINE IDRAULICHE	14
1.3.1 GENERALITÀ	15
1.3.2 TURBINE AD AZIONE	16
1.3.3 TURBINE A REAZIONE	17
2 TURBINE PELTON.....	19
2.1 CENNI STORICI	19
2.2 DESCRIZIONE E PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO	20
2.3 PALE.....	22
2.4 INIETTORI	23
3 ANALISI SCENARIO ITALIANO.....	25
3.1 RISULTATI OTTENUTI DALLA RICERCA BIBLIOGRAFICA.....	26
4 CONCLUSIONI.....	33
5 BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	35

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1.1 Capacità installata nel mondo di fonti rinnovabili [2].....	6
Figura 1.2 Capacità installata nel mondo di fonti rinnovabili [2].....	6
Figura 1.3 Produzione energia idroelettrica per continenti [3].....	6
Figura 1.4 Potenza efficiente per fonte rinnovabile in Italia [4].....	7
Figura 1.5 Produzione di energia per fonte rinnovabile in Italia nel 2022 (sopra) e potenza installata per fonte rinnovabile negli ultimi anni (sotto) [4]	8
Figura 1.6 Potenza installata e numero di impianti per regione [4].....	9
Figura 1.7 Schema impianto idroelettrico [5].....	12
Figura 1.8 Centrale di Isola Serafini ad acqua fluente [7].....	13
Figura 1.9 Centrale di Barcis a bacino [8].....	13
Figura 1.10 Turbina Francis [6].....	15
Figura 1.11 Turbina ad azione tipo Banki [10]	16
Figura 1.12 Turbina ad azione tipo Turgo [11]	16
Figura 1.13 Turbina a reazione tipo Francis.....	17
Figura 1.14 Turbina a reazione tipo Kaplan	17
Figura 2.1 Ruota di Pelton (brevetto USA, ottobre 1880) [12]	19
Figura 2.2 Struttura turbina Pelton [14].....	20
Figura 2.3 Geometria pala turbina Pelton [13]	22
Figura 2.4 Componenti ugello [15] e [20].....	23
Figura 3.1 Salti impianti con turbine Pelton [16]	27
Figura 3.2 Posizione impianti analizzati nel diagramma di selezione turbine idrauliche [17]	28
Figura 3.3 Efficienza delle turbine idrauliche in funzione del numero tipico di macchina [18]	30
Figura 3.4 Centrale idroelettrica Santa Massenza [19].....	31

CAPITOLO 1

INTRODUZIONE

La turbina idraulica è uno dei componenti fondamentali di un impianto idroelettrico in quanto ricopre il ruolo di protagonista nella conversione in energia meccanica dell'energia potenziale e cinetica possedute dalla corrente fluida elaborata dalla girante. Il tutto accade senza la generazione di emissioni di gas serra, riducendo i fenomeni di riscaldamento legati all'effetto serra e collaborando attivamente alla limitazione del riscaldamento globale, principale causa del cambiamento climatico in atto. Un altro punto a favore, è costituito dallo sfruttamento di una fonte teoricamente inesauribile nel tempo, ossia l'energia derivante dal movimento dell'acqua. Sebbene esistano diverse fonti di energia rinnovabile, l'idroelettrico è ancora oggi la fonte rinnovabile che fornisce maggiori garanzie sia in termini di costanza nella produzione e sia in termini di maturità tecnologica. Inoltre, permette anche l'accumulo di energia, una caratteristica che molte altre fonti non riescono a garantire.

Esistono diverse tipologie di turbina, ognuna caratterizzata da un particolare campo di applicazione. Le turbine Pelton sono solitamente utilizzate all'interno di impianti idroelettrici che elaborano grandi salti e portate relativamente contenute. La turbina Pelton è la macchina idraulica che più delle altre è in grado di convertire l'energia potenziale della corrente fluida assicurando perdite contenute, garantendo così elevati livelli di efficienza. Lo sviluppo di questa tipologia di turbina attraverso gli anni ha permesso di raggiungere, ad oggi, rendimenti più che soddisfacenti, in alcuni casi anche maggiori del 90%. Il raggiungimento di un tale traguardo non pregiudica però la continua ricerca nel campo relativo a questa tipologia di turbina: tra le sfide future da affrontare, infatti, vi sono la gestione dell'erosione e dell'usura causate da particelle solide all'interno del flusso d'acqua, l'ampliamento del campo operativo ad alta efficienza per aumentarne la flessibilità e poter far fronte a periodi di scarsità d'acqua, e la riduzione dei costi di produzione e installazione mantenendo invariata efficienza e affidabilità, favorendo così la diffusione soprattutto nei paesi in via di sviluppo.

Il database proposto rappresenta uno strumento essenziale per definire lo stato dell'arte in termini di scelta delle turbine idrauliche all'interno del panorama idroelettrico italiano, in quanto riassume e raggruppa conoscenze derivanti da anni ed anni di esperienza, le quali hanno permesso (e permettono tuttora) di scegliere la turbina più adatta in base all'applicazione richiesta. Il presente lavoro si prefigge quindi l'obiettivo di individuare e analizzare gli impianti idroelettrici italiani dotati di turbina Pelton, confrontando i dati derivanti dalla ricerca bibliografica con i campi di impiego suggeriti in letteratura per la scelta di tale macchina idraulica. L'elaborato è suddiviso nelle seguenti sezioni:

- 1) Energia idroelettrica: stato attuale nel panorama mondiale e italiano;
- 2) Impianti idroelettrici: principio di funzionamento e tipologie di centrali;
- 3) Turbine idrauliche: generalità e classificazione secondo lo scambio energetico;
- 4) Turbine Pelton: descrizione e principio di funzionamento;
- 5) Analisi scenario italiano: confronto dei risultati ottenuti dalla ricerca bibliografica con quelli suggeriti dalla letteratura.

1.1 L'ENERGIA IDROELETTRICA

L'energia proveniente dall'acqua è tra le più antiche fonti di energia rinnovabile. Già all'epoca dei Romani, infatti, i corsi d'acqua venivano sfruttati per azionare mulini ad acqua che macinavano il grano per ottenere farine.

Nella storia dell'energia idraulica, una svolta importante avvenne nell'Ottocento, durante la rivoluzione industriale, quando l'energia derivante dall'acqua in movimento iniziò ad essere utilizzata per generare energia elettrica, dando quindi vita alle prime centrali idroelettriche. In questo periodo vengono introdotte le prime turbine idrauliche quali: turbina Fourneyron (oggi superata per le limitate condizioni di funzionamento e per problemi che si verificavano quando la portata diminuiva o la pressione si riduceva), turbina Francis (sviluppata nella metà del XIX secolo dall'ingegnere inglese James B. Francis), turbina Pelton (brevettata nel 1880 dal carpentiere Lester Allan Pelton) e turbina Kaplan (inventata nel 1913 dall'ingegnere Viktor Kaplan) [17]. Quest'ultime tre tipologie di turbine, con eventuali migliorie, sono tuttora in funzione.

Attualmente, l'energia idroelettrica svolge un ruolo cruciale nella transizione ecologica, essendo la fonte rinnovabile caratterizzata dalla quantità di energia elettrica prodotta più elevata a livello globale. È inoltre capace, tramite la tecnologia degli impianti di accumulo (anche detti impianti di pompaggio) di compensare la variabilità di offerta delle altre fonti rinnovabili, garantendo allo stesso tempo la stabilità della griglia elettrica nazionale. Questi ultimi impianti, infatti, sono dotati sia di un gruppo di pompaggio che di un gruppo di turbinaggio. Nei momenti in cui l'energia elettrica offerta da impianti che sfruttano fonti rinnovabili risulta maggiore della domanda di energia elettrica da parte della rete, tali impianti sono in grado di immagazzinare l'energia in sovrappiù pompando l'acqua dal serbatoio inferiore a quello superiore. Nei momenti in cui, invece, la domanda di energia elettrica da parte della rete aumenta, gli impianti ad accumulo possono funzionare in modalità di turbinaggio, producendo l'energia necessaria a soddisfare i picchi di richiesta di energia elettrica, mantenendo la stabilità della rete. Gli impianti di pompaggio permettono di immagazzinare l'eccesso di produzione diurna dovuto agli impianti fotovoltaici ed eolici, pompando l'acqua dal bacino inferiore a quello

superiore, mantenendo tale energia a disposizione per soddisfare eventuali richieste di energia in differita nel tempo.

Tuttavia, come ogni tecnologia, anche l'idroelettrico presenta aspetti negativi. La costruzione di opere civili importanti quali dighe, condotte forzate e centrali può richiedere interventi che deturpano l'ambiente e portano al disboscamento di aree montane, oltre a influenzare pesantemente flora e fauna locali e a rallentare aspramente la corrente di eventuali corsi d'acqua. È fondamentale valutare attentamente il contesto ambientale prima di avviare la costruzione, considerando l'impatto su flora e fauna. Inoltre, il cambiamento climatico rende sempre più difficile sfruttare l'energia idroelettrica, con una significativa riduzione delle precipitazioni negli ultimi anni che ha comportato un leggero calo generalizzato della produzione idroelettrica mondiale [2].

Per il futuro, sarà essenziale ampliare il più possibile il campo operativo di tutte le macchine idrauliche, adottando soluzioni che permettano l'ottenimento di efficienze elevate anche in presenza di portate d'acqua ridotte, ottimizzando l'uso delle risorse idriche disponibili. È quindi necessario mantenere viva la ricerca in questi campi per mantenere inalterata la validità di questo tipo di impianti nonostante le incertezze climatiche.

1.1.1 STATO ATTUALE E SCENARI FUTURI

Il rapporto *“Statistical Review of World Energy”* [1] ha evidenziato una crescita globale della domanda energetica di circa 1% rispetto al 2022 e del 3% rispetto al periodo precedente la pandemia. Attualmente, circa l'82% dell'energia mondiale deriva da combustibili fossili. Nel 2022, le emissioni di anidride carbonica sono aumentate dello 0,8%, raggiungendo un livello di 39,3 miliardi di tonnellate.

Le energie rinnovabili rappresentano solo il 14% della produzione energetica globale. Negli ultimi anni, si è registrato un significativo aumento di potenza installata: nel 2022, l'83% della potenza aggiunta nel mondo proveniva da fonti rinnovabili. Sempre nel 2022 si è registrato un aumento del 14%, raggiungendo una capacità totale di 3372 GW. L'Asia ha contribuito al 60% della nuova capacità aggiunta, con un incremento di 174,9 GW, raggiungendo il 48% di capacità installata mondiale. L'Europa è cresciuta di 57,3 GW (+8,8%) e il Nord America di 29,1 GW (+6,3%). Il Medio Oriente ha sperimentato una espansione record con 3,2 GW di nuova potenza (+12,8%).

Le fonti rinnovabili con la crescita più rilevante sono l'eolico e il solare, rappresentando complessivamente il 90% di tutta la nuova capacità installata di energie rinnovabili. Nel 2022, sono stati aggiunti 266 GW, con il 72% dei quali proveniente dal solare, considerata la fonte rinnovabile più economica. Nel solare, il fotovoltaico ha rappresentato quasi tutto l'aumento di potenza, 191 GW contro i 0,125GW di solare termico.

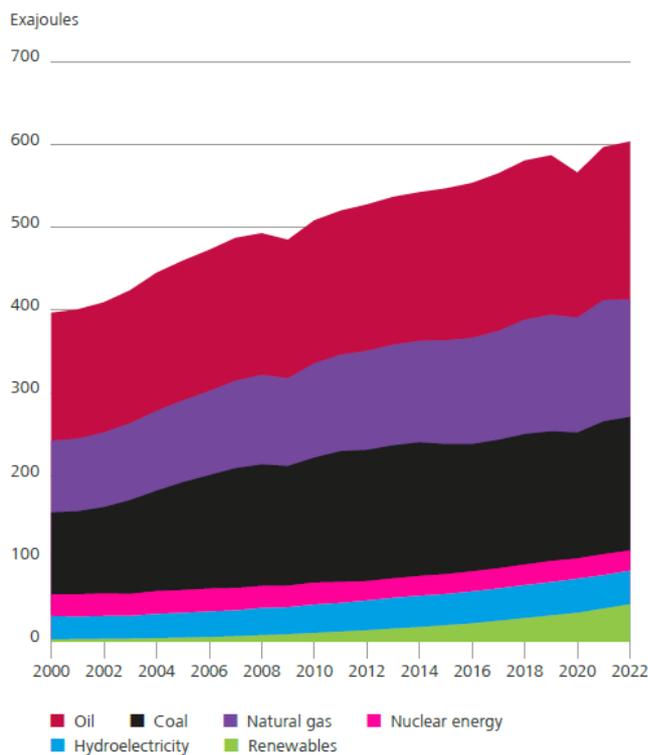


Figura 1.1 Consumo globale di energia [1]

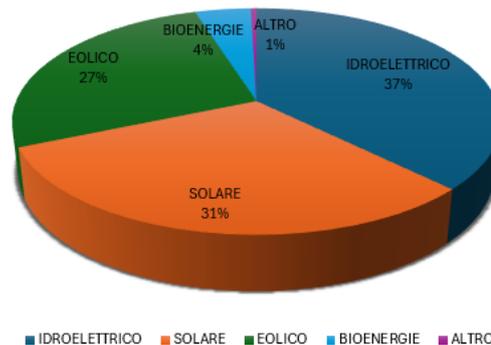


Figura 1.2 Capacità installata nel mondo di fonti rinnovabili [2]

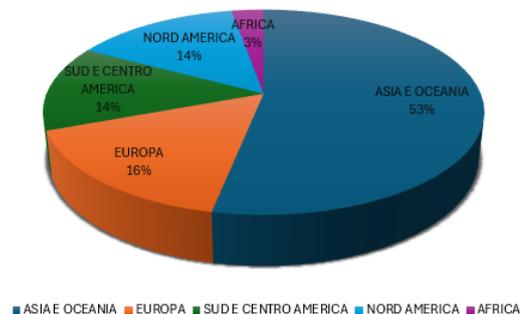


Figura 1.3 Produzione energia idroelettrica per continenti [3]

I paesi che hanno registrato i maggiori aumenti sono Cina (+86 GW), Stati Uniti (+17,6 GW), India (+13,5 GW) e Brasile (+9,9 GW). Per l'eolico, la crescita è stata leggermente inferiore rispetto ai due anni precedenti, con un incremento di 75 GW. Sempre la Cina guida la classifica contribuendo con quasi la metà (+37 GW), seguita dagli Stati Uniti (+7,8 GW), mentre il resto della crescita si è concentrato principalmente in Brasile.

L'energia idroelettrica rimane la principale fonte di energia rinnovabile, rappresentando circa il 7% della produzione di energia elettrica globale. Nel 2022 l'elettricità generata da fonti idroelettriche è aumentata del 3,7%. Anche la capacità installata ha visto un incremento del 2,7%, in linea con gli ultimi due anni, raggiungendo la capacità di 1397GW di potenza; in particolare gli impianti di pompaggio hanno registrato un +6%. La capacità installata si differenzia dall'energia prodotta perché rappresenta il potenziale di produrre energia, indipendentemente dal fatto che l'impianto sia in funzione o meno.

Due terzi dell'espansione dell'idroelettrico sono avvenuti in Cina, a seguire si trovano Canada, Etiopia, Laos e Pakistan. È la prima volta dopo il 2016 che si registra un aumento di oltre 30GW di nuova capacità installata. L'idroelettrico fornisce circa 4400 TWh di energia, che corrisponde al 15% dell'elettricità mondiale. Secondo l'International Renewable Energy Agency (IRENA) [2] la potenza

complessiva degli impianti idroelettrici nel mondo rappresenta il 37% del totale delle fonti rinnovabili.

In diversi paesi nel mondo, l'energia idroelettrica è responsabile di oltre il 50% della produzione dell'elettricità. La Cina rimane leader globale in questo settore, producendo il 30,1% dell'energia idroelettrica mondiale, seguita da Cile con il 9,9%, Canada con il 9,2% e Stati Uniti con il 6,0%.

L'Europa contribuisce per il 16% dell'intera produzione globale di energia idroelettrica con 258GW di capacità installata che permettono di generare circa 570TWh di energia. I dati mostrano che si è raggiunto da tempo la piena maturità visto che tra il 2015 e il 2020 la capacità idroelettrica è cresciuta solo del 6% (+14GW). Inoltre, le normative europee più rigide sull'impatto ambientale rendono quasi impossibile la costruzione di nuovi grandi impianti [3].

Il paese europeo che contribuisce di più è la Norvegia, a seguire si trovano Turchia e Francia. L'Italia si trova al quarto posto e contribuisce per il 9%.

1.1.2 SCENARIO NAZIONALE

In Italia, circa un terzo dell'energia prodotta proviene da fonti rinnovabili. La produzione di energia varia a seconda delle caratteristiche del territorio e alla distribuzione delle risorse. L'energia idroelettrica è dominante dove la conformazione orografica del territorio permette di immagazzinare grandi quantità d'acqua a quote elevate (ad esempio in corrispondenza dell'arco alpino), garantendo la possibilità di sfruttare l'energia potenziale derivante da grandi masse d'acqua in movimento. Il fotovoltaico è diffuso principalmente al Sud, grazie alla maggiore esposizione solare. L'energia eolica è sfruttata soprattutto nelle isole di Sicilia e Sardegna. Infine, l'energia geotermica è concentrata principalmente in Toscana.

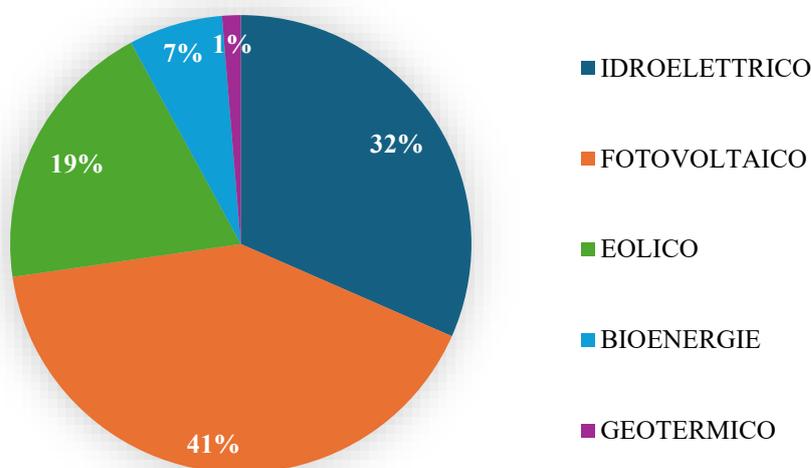


Figura 1.4 Potenza efficiente per fonte rinnovabile in Italia [4]

Secondo dati Terna [4], la fonte rinnovabile con maggior capacità installata è il fotovoltaico (Figura 1.4), che rappresenta il 41% della capacità totale da fonti rinnovabili. A seguire si trova l'energia idroelettrica che ricopre il 32%, mentre l'eolico occupa il terzo posto con il 19%.

Analizzando l'incremento di capacità nel biennio 2021-2022, il fotovoltaico ha mostrato la crescita maggiore con un aumento dell'11%, una potenza equivalente a 2,5 GW, raggiungendo una potenza di 25 GW. L'energia eolica ha visto un incremento del 5,1%, corrispondente a 0,5GW di nuova capacità. L'idroelettrico è cresciuto in misura minore, ossia lo 0,5%, però continua a rappresentare ancora una delle prime fonti di energia rinnovabile. Questo si può ricondurre sicuramente al fatto che i primi impianti idroelettrici sono iniziati a comparire in Italia verso la fine dell'Ottocento, con il primo costruito nel 1895 sul fiume Adda. Tuttavia, la crescita dell'idroelettrico è rallentata a causa dell'esaurimento di risorse naturali sfruttabili per la costruzione di nuovi grandi impianti.

Per quanto riguarda la fonte geotermoelettrica non ha visto variazioni di potenza, mentre le bioenergie hanno addirittura sperimentato una riduzione del 1,6%. Nel complesso il sistema energetico italiano è cresciuto del 5,3% di potenza efficiente totale nel biennio 2021-22.

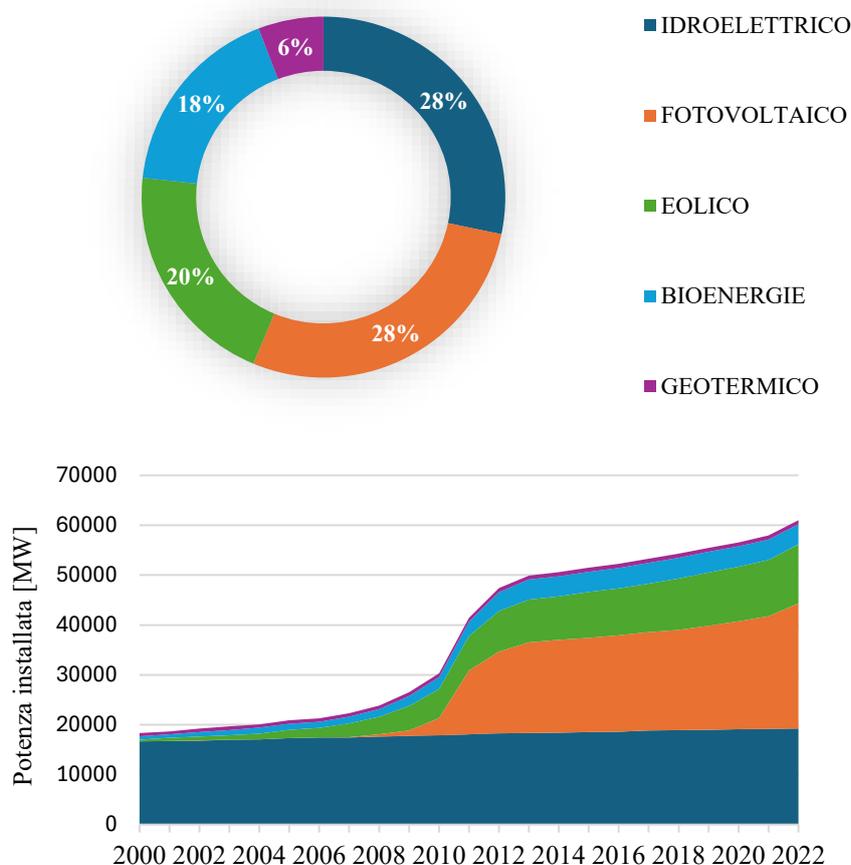


Figura 1.5 Produzione di energia per fonte rinnovabile in Italia nel 2022 (sopra) e potenza installata per fonte rinnovabile negli ultimi anni (sotto) [4]

Analizzando, invece, la producibilità relativa alle varie fonti rinnovabili, si osserva, in Figura 1.5, come il fotovoltaico, nonostante il grande vantaggio in termini di potenza installata rispetto agli altri impianti, non riesca a garantire una maggiore produzione di energia elettrica; infatti, lo si trova a pari merito con l'idroelettrico, con 28GWh di energia, prodotta nell'arco di un anno. Ciò è dovuto al fatto che il fotovoltaico può produrre energia solo durante le ore diurne, a differenza dell'idroelettrico, che può operare continuamente. Seguono l'eolico, le bioenergie e il geotermoelettrico.

Nel biennio 2021-2022, l'energia prodotta da fonti rinnovabili è diminuita mediamente del 13,7%, principalmente a causa di un calo del 37,5% nella produzione idroelettrica, da ricondursi alle condizioni di meteo sfavorevole. L'unica fonte rinnovabile ad aver sperimentato un aumento è l'energia fotovoltaica con una crescita del 12,4%.

Tabella 1.1 Produzione di energia per tipologia di impianto [4]

<i>Produzione per impianto idroelettrico anno 2022</i>	
<u><i>Tipologia di impianto</i></u>	<u><i>Energia prodotta</i></u>
<i>Bacino</i>	7100GWh (23,5%)
<i>Fluente</i>	14300GWh (47,2%)
<i>Serbatoio</i>	8900GWh (29,3%)

POTENZA INSTALLATA

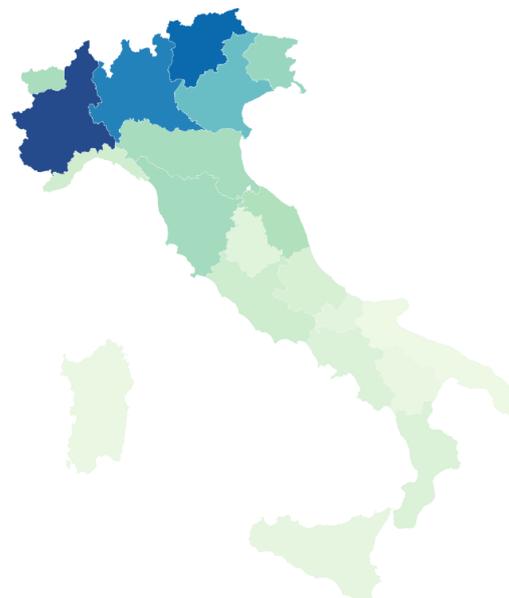
DATI ESPRESSI IN MW
0 5,696



Source: Tema • Created with Datawrapper

IMPIANTI IDROELETTRICI IN ITALIA

IMPIANTI
0 1,041



Source: Tema • Created with Datawrapper

Figura 1.6 Potenza installata e numero di impianti per regione [4]

Focalizzandosi sull'idroelettrico possiamo notare come la maggior parte dell'energia derivi principalmente da impianti ad acqua fluente, in particolare il 47,2% dell'intera energia idroelettrica. Seguono poi gli impianti a serbatoio che generano il 29,3% dell'energia e infine quelli a bacino con il 23,5%. Le prime due tipologie di impianti sono quelle che hanno registrato una maggiore riduzione dell'energia prodotta, con un calo del 42,5%.

Le regioni che contribuiscono maggiormente alla produzione di energia idroelettrica sono situate nella parte settentrionale della penisola (Figura 1.6) e corrispondono alla regione di Lombardia, Trentino-Alto Adige, e Piemonte, rispettivamente con il 22,5%, il 21% e il 13,8%.

1.2 IMPIANTI IDROELETTRICI

In questo capitolo viene illustrato il funzionamento di un impianto idroelettrico tradizionale, descrivendo nel dettaglio come avviene la conversione dell'energia posseduta dalla corrente fluida in energia meccanica e successivamente in energia elettrica. All'interno di questi paragrafi sono riportati anche i principali componenti che caratterizzano ogni impianto e le loro funzioni specifiche.

Nelle pagine seguenti, vengono inoltre delineate le particolarità di ciascun tipo di centrale idroelettrica, operando una possibile classificazione delle stesse.

1.2.1 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

Un impianto idroelettrico (Figura 1.7) è un complesso di opere idrauliche, macchine, apparecchiature, edifici e servizi destinati alla trasformazione di energia idraulica in energia elettrica. La centrale idroelettrica è quella parte dell'impianto che comprende l'insieme dei gruppi idroelettrici, le relative apparecchiature e l'edificio che lo ospita.

L'impianto idroelettrico genera potenza, prima meccanica e poi elettrica, sfruttando l'energia potenziale contenuta in grandi masse d'acqua; l'operazione di conversione dell'energia idraulica in energia meccanica avviene grazie alla turbina idraulica, mentre la successiva conversione dell'energia meccanica disponibile all'albero in energia elettrica è garantita dall'alternatore, accoppiati direttamente all'asse della turbina.

Per far fluire la portata dal serbatoio superiore a quello inferiore ogni impianto idroelettrico necessita della presenza di diversi componenti quali:

- *Le opere di sbarramento* che permettono di raccogliere e conservare la risorsa idrica necessaria all'alimentazione dell'impianto. Le dighe possono essere di due tipologie: a gravità (la cui resistenza è affidata unicamente al peso della costruzione) e ad arco (la cui spinta

dell'acqua viene trasferita ai vincoli laterali e quindi sui fianchi laterali della valle o montagna). Negli impianti ad acqua fluente la diga ha il compito di deviare parte del fiume in un canale laterale.

- *La condotta forzata* è una tubazione che ha lo scopo di portare l'acqua in pressione dal serbatoio superiore fino alla turbina, è dotata di organi di regolazione che servono a variare la portata d'acqua fluente verso la centrale.
- *La centrale* è la struttura che ospita turbine, generatori e sala di controllo. Si può trovare in superficie oppure in caverna.
- *La condotta di scarico* è il canale che permette di far confluire l'acqua verso il serbatoio posto a valle della turbina.

Si possono trovare componenti secondari, non necessari alla generazione di energia elettrica, ma presenti per garantire sicurezza e sostenibilità ambientale, quali lo sfioratore, lo sgrigliatore ed altre soluzioni per evitare/limitare il passaggio di pesci e dei sedimenti attraverso le macchine idrauliche. Lo sfioratore è un canale secondario attraverso il quale l'acqua può arrivare al serbatoio a valle senza passare per la centrale, serve ad evitare sovraccarichi del serbatoio a monte. Il sistema by-pass dei pesci è un sistema che ricrea un percorso parallelo a quello della centrale idroelettrica per consentire il passaggio dei pesci in sicurezza. Il sistema by-pass dei sedimenti, invece, presenta concettualmente la stessa struttura di quello previsto per il by-pass dei pesci, con l'obiettivo di permettere un passaggio facilitato dei sedimenti lungo un percorso in parallelo con la centrale, per ridurre l'accumulo di quest'ultimi sul fondo del serbatoio e per limitare l'erosione delle turbine.

Per quanto riguarda la stima/valutazione delle prestazioni e delle caratteristiche degli impianti idroelettrici la potenza idraulica che si può estrarre da una data portata d'acqua, a meno di perdite, è data da:

$$P_{\text{teorica}} = \rho Q_v g H \quad (1)$$

Dove:

- $\rho = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ è la densità dell'acqua
- $Q_v \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$ è la portata volumetrica
- H [m] è il salto elaborabile dalla turbina

La potenza effettiva, invece, è minore ed è definita da:

$$P_{\text{effettiva}} = \eta \rho Q_v g H \quad (2)$$

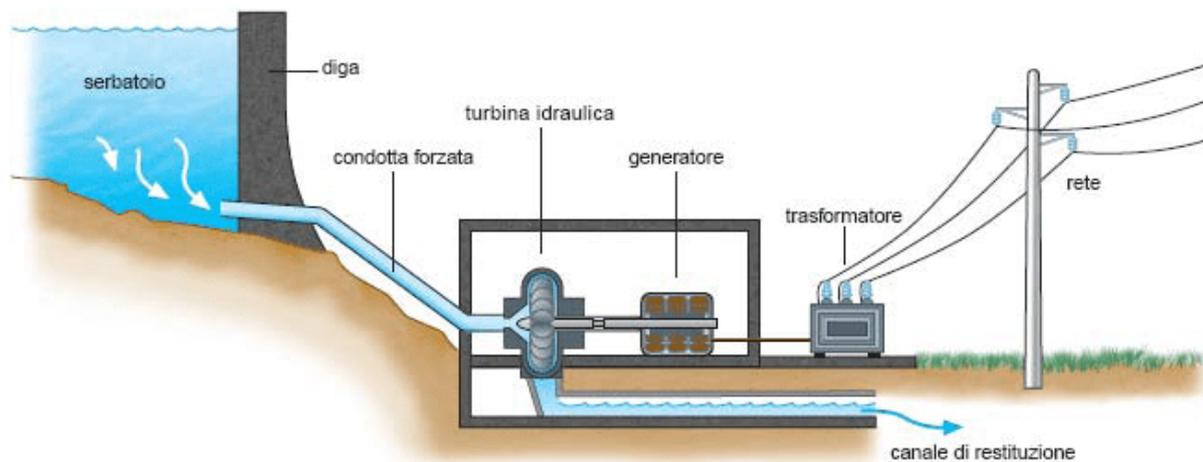


Figura 1.7 Schema impianto idroelettrico [5]

All'interno dell'equazione (2) il termine che compare è il rendimento η che tiene conto dei vari contributi di perdita attraverso i vari organi dell'impianto.

1.2.2 TIPOLOGIE DI IMPIANTI

Esistono diverse modalità di classificazione degli impianti idroelettrici. Una di queste, ad esempio, prende a riferimento la potenza installata, suddividendoli in sei categorie:

- pico -Hydro (<5kW);
- micro-Hydro (5kW<P<100kW);
- mini-Hydro(100kW<P<1MW);
- small-Hydro (1MW<P<10MW);
- medium-Hydro (10MW<P<50MW);
- large-Hydro (P>50MW).

Un'altra modalità di classificazione prende in esame il salto disponibile dividendo gli impianti idroelettrici in impianti caratterizzati da:

- salto piccolo (H<30m);
- salto medio (30m<H<100m);
- salto alto (H>100m).

La classificazione più diffusa, invece, si basa sulla tipologia di sistema di accumulo della risorsa idrica e sulle funzioni che l'impianto è in grado di garantire. Considerando quest'ultima modalità di classificazione, possono essere individuati tre diverse tipologie di centrali, le quali sono riportate di seguito.



Figura 1.8 Centrale di Isola Serafini ad acqua fluente [7]



Figura 1.9 Centrale di Barcis a bacino [8]

1.2.2.1 CENTRALI AD ACQUA FLUENTE

Le centrali ad acqua fluente incanalano il flusso naturale di un fiume o torrente verso la centrale per poi reintrodurre la stessa portata d'acqua nello stesso fiume in un punto più a valle (un esempio di impianto ad acqua fluente è riportato in Figura 1.8). Esse devono garantire la presenza un deflusso minimo vitale, ossia devono permettere che una certa quantità d'acqua (definita per legge) fluisca indisturbata seguendo il naturale percorso fluviale, in modo da consentire il passaggio dei pesci e l'approvvigionamento di acqua per scopi civili ed agricoli. Non presentano solitamente bacini di raccolta dell'acqua (o almeno, se presenti, sono di durata d'invaso contenuta) e solitamente sviluppano piccoli salti. L'energia prodotta da questo tipo di centrali segue la stagionalità delle precipitazioni; infatti, il picco di energia prodotta da questi impianti viene solitamente raggiunto nei periodi caratterizzati da piovosità intense, mentre nel periodo estivo è solitamente accompagnato da una riduzione considerevole della producibilità dalla ridotta disponibilità d'acqua a causa di possibili situazioni di siccità.

1.2.2.2 CENTRALI A BACINO

Le centrali a bacino (o a serbatoio) sono caratterizzate dalla presenza di un bacino (o serbatoio) superiore, naturale o artificiale (in presenza di una diga), dove viene accumulata la risorsa idrica in attesa del suo utilizzo. In Figura 1.9 viene riportato un esempio di questa tipologia di centrale. La differenza tra impianti a bacino e serbatoio dipende dalla durata dell'invaso (ossia il tempo medio in cui la risorsa idrica rimane disponibile all'interno del bacino superiore prima di essere utilizzata): in particolare, gli impianti a bacino sono caratterizzati da una durata d'invaso compresa tra 2 e 400 ore, mentre quelli a serbatoio presentano una durata d'invaso superiore alle 400 ore. Una delle peculiarità di questa tipologia di centrale è l'elasticità di risposta ad eventuali variazioni improvvise di richiesta di energia da parte della rete elettrica nazionale, dovuta al fatto che la presenza di grandi masse

d'acqua immagazzinate in quota permettono lo sfruttamento dell'energia disponibile in qualsiasi momento.

1.2.2.3 CENTRALI AD ACCUMULO O POMPAGGIO

Le centrali ad accumulo hanno la caratteristica di operare tra due serbatoi, generalmente artificiali, disposti a quote diverse. Uno dei due serbatoi, detto serbatoio superiore, è posizionato a monte dell'impianto mentre l'altro serbatoio, detto serbatoio inferiore, è posto a valle della centrale. A seconda di come è stato realizzato il collegamento tra la centrale idroelettrica ed il serbatoio inferiore si distinguono due tipi di impianti di accumulo:

- *Impianti con stazioni di pompaggio di gronda:* le pompe sono collegate a un serbatoio inferiore fisicamente distinto da quello in cui scaricano le turbine. Non si possono avere cicli di pompaggio.
- *Impianti di pompaggio puro:* le pompe e le turbine sono collegate allo stesso serbatoio inferiore. Il ciclo di pompaggio può essere ripetuto infinite volte.

Questa tipologia di impianto può funzionare sia in modalità di produzione energetica, sia in modalità di accumulo di energia. Nel primo caso, il funzionamento è analogo a quello di un impianto idroelettrico tradizionale: l'acqua viene fatta scorrere dal serbatoio superiore a quello inferiore attraverso la turbina idraulica, con produzione di energia elettrica all'alternatore. Tali impianti devono essere quindi dotati di macchine idrauliche ed elettriche in grado di garantire sia la fase di turbinaggio che quella di pompaggio della risorsa idrica.

Nel secondo caso, invece, l'impianto assorbe energia elettrica dalla rete per alimentare il motore elettrico che aziona la pompa, la quale permette di far scorrere portata dal serbatoio inferiore a quello superiore e accumulare nuovamente risorsa idrica per successive fasi di produzione. Questa seconda modalità di funzionamento permette comunque di utilizzare l'energia in eccesso prodotta dagli impianti fotovoltaici ed eolici durante le ore di massima resa, garantendo contemporaneamente la stabilità della rete e l'accumulo di energia prodotta e che verrebbe inevitabilmente persa. Gli impianti ad accumulo svolgono quindi un ruolo importantissimo nel garantire l'integrità del sistema elettrico nazionale.

1.3 TURBINE IDRAULICHE

Le turbine idrauliche ricoprono un ruolo fondamentale all'interno di un impianto idroelettrico in quanto svolgono la funzione di conversione dell'energia idraulica in energia meccanica.

1.3.1 GENERALITÀ

La turbina idraulica è una turbomacchina motrice e costituisce il componente di una centrale in grado di trasformare l'energia potenziale e cinetica della corrente fluida che la attraversa in energia meccanica. Il salto geodetico elaborabile dalle turbine idrauliche può variare da qualche decina di metri fino ad altezze superiori ai mille metri. Queste macchine idrauliche presentano solitamente un rendimento molto elevato, essendo in grado di convertire in energia meccanica oltre il 90% dell'energia posseduta dalla portata d'acqua elaborata. Lo scambio energetico tra fluido ed elementi mobili della macchina avviene per variazione del momento della quantità di moto del fluido secondo la teoria delle turbomacchine.

Come per tutte le altre macchine, è sempre possibile individuare una parte fissa, detta parte statorica, e una parte in movimento, chiamata rotore o girante, la quale è l'effettiva responsabile del trasferimento di energia dall'acqua all'albero su cui è calettata.

La parte statorica svolge diverse funzioni: ha il compito di regolare la portata in arrivo alla girante, indirizzandone il flusso in modo da minimizzare urti e perdite di energia.

Le turbine idrauliche sono classificate in due grandi categorie, a seconda della loro geometria, del modo in cui l'acqua attraversa la macchina e della modalità secondo cui avviene lo scambio di energia attraverso la girante. In particolare, le turbine idrauliche si suddividono in turbine ad azione e turbine a reazione.



Figura 1.10 Turbina Francis [6]

1.3.2 TURBINE AD AZIONE

Nelle *turbine ad azione* l'energia potenziale è interamente trasformata in energia cinetica a valle dell'organo statorico.

Tra le turbine ad azione, la più diffusa è sicuramente la turbina Pelton. È una turbina a flusso tangenziale e può lavorare ad asse orizzontale o verticale. Una descrizione più dettagliata verrà fornita in seguito all'interno di un paragrafo dedicato. Fanno parte di questa categoria anche le turbine Banki e Turgo.

La *turbina Banki* (o *Ossberger*) (Figura 1.11) è composta da due componenti principali quali: l'ugello, il cui compito è quello di controllare il flusso d'acqua, e la girante, la cui funzione è estrarre potenza dalla risorsa idrica. È una turbina a flusso incrociato perché l'acqua colpisce due volte le pale della girante: il getto d'acqua interagisce con le pale la prima volta quando sono vicine all'ugello, e poi una seconda volta quando il flusso raggiunge il lato opposto della girante. Esse operano in un range di salti compreso tra pochi metri fino a 200 metri e un intervallo di portate compreso tra 0,5 e 10 metri cubi al secondo [9].

La *turbina Turgo* (Figura 1.12) è stata inventata e brevettata da Eric Crewdson nel 1919. A differenza della turbina Pelton, nella turbina Turgo l'ugello è disposto con l'asse inclinato rispetto al piano di rotazione della girante. Di conseguenza la risorsa idrica esce dall'ugello, entra in contatto con la girante da un lato e viene evacuata nel lato opposto. Questo permette di minimizzare l'interferenza del deflusso con i getti. Grazie all'affidabilità e robustezza che la caratterizzano, questa tipologia di turbina richiede una bassa manutenzione. È poco diffusa per la complessità costruttiva e per la minor efficienza idraulica a confronto con la turbina Pelton. Essa viene scelta per un range di funzionamento simile a quello della turbina Pelton ma è più adatta per medie altezze (intervallo compreso tra 50 e 250 metri) e per un range di portate più ampio (fino a 10 metri cubi al secondo) [11].

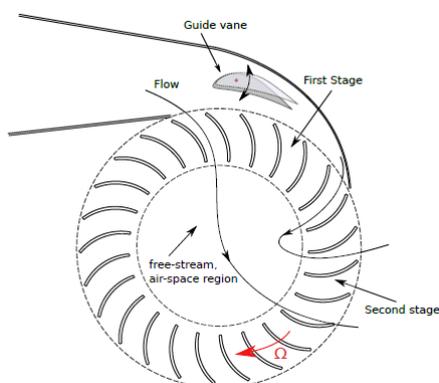


Figura 1.11 Turbina ad azione tipo Banki [10]

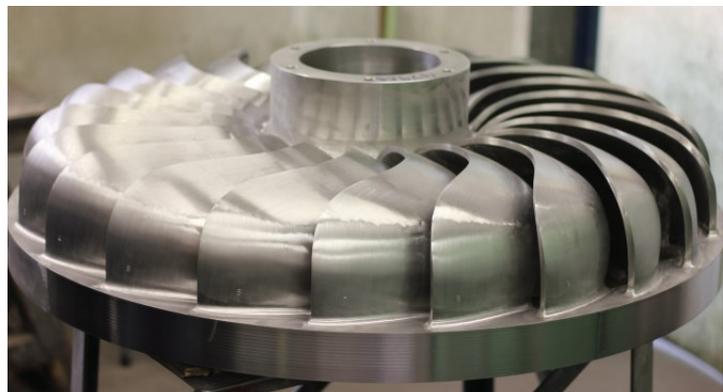


Figura 1.1 Turbina ad azione tipo Turgo [11]



Figura 1.2 Turbina a reazione tipo Francis

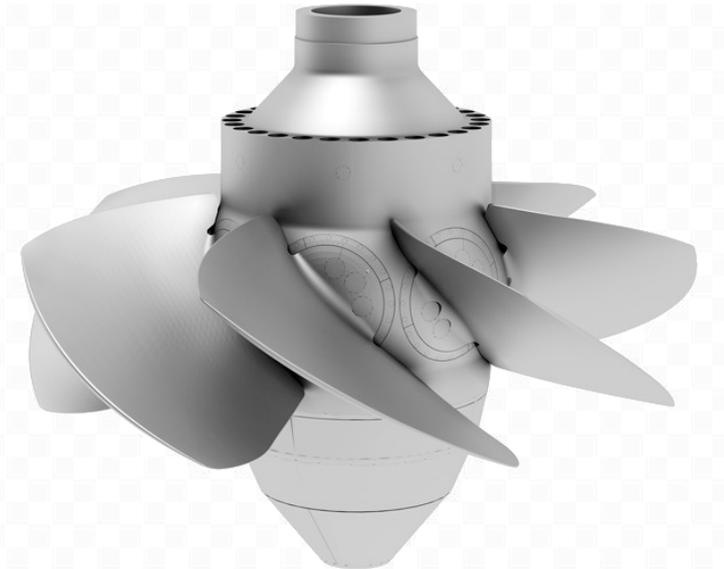


Figura 1.3 Turbina a reazione tipo Kaplan

1.3.3 TURBINE A REAZIONE

Nelle **turbine a reazione** l'energia potenziale viene parzialmente trasformata in energia cinetica a valle della parte statorica e la restante frazione viene convertita all'interno della girante. Queste turbine operano solitamente in configurazione completamente sommersa in acqua.

Le turbine idrauliche a reazione sono nella maggior parte dei casi dotate di una corona di pale direttrici fisse (pale-predistributrici), di una schiera di pale ad angolo con calettamento variabile (pale distributrici) e di una girante palettata, oltre che da una cassa spiraliforme (detta voluta) e dal tubo di scarico. La portata viene regolata operando sulla chiusura/apertura del distributore mediante la rotazione di pale distributrici per mezzo di servomeccanismi: variando la portata si ha una variazione della velocità in ingresso della girante, variando quindi il grado di reazione della macchina.

Come le turbine ad azione, anche quelle a reazione sono caratterizzate da elevate efficienze per una vasta gamma di portate e salti. L'efficienza può raggiungere ben oltre il 90% e sono utilizzabili in impianti idroelettrici con importanti variazioni stagionali nel flusso dell'acqua grazie alla possibilità di regolazione che garantisce un campo operativo molto ampio.

Il principio di funzionamento di queste turbine richiede quindi l'introduzione di una nuova grandezza, che prende il nome di *grado di reazione* ed è definito come il rapporto tra la differenza di entalpia statica che il fluido sperimenta attraverso la girante e la differenza di entalpia totale calcolabile tra monte e valle dell'intera macchina.

Le principali tipologie di turbine idrauliche a reazione sono le turbine Francis e Kaplan. La *turbina Francis* (Figura 1.13) è una turbina idraulica a flusso centripeto: l'acqua raggiunge la girante tramite

un condotto a chiocciola (detto voluta), nel quale una serie di pale predistributrici e distributrici indirizzano il flusso in modo tale da garantire buone condizioni di incidenza all'ingresso delle pale della girante. Essa può essere installata sia nella configurazione ad asse orizzontale che in quella ad asse verticale e viene scelta nelle applicazioni in cui è richiesta l'elaborazione di correnti fluide caratterizzate da dislivelli intermedi, (da 10 fino a 800 metri), e portate d'acqua comprese solitamente tra i 2 e i 100 metri cubi al secondo [17].

La *turbina Kaplan* (Figura 1.14), invece, è una turbina idraulica a flusso assiale. È caratterizzata da un basso numero di pale, calettate su un mozzo centrale, il cui angolo di calettamento può essere fatto variare in base alle condizioni operative per ottenere sempre le migliori condizioni di incidenza e, di conseguenza, anche le migliori prestazioni in termini di efficienza per un range di portate molto ampio. È solitamente scelta nelle applicazioni in cui è richiesta l'elaborazione di correnti fluide caratterizzate da salti contenuti (fino a 70 metri) [17] e portate molto elevate (maggiore di 200 metri cubi al secondo) [6].

CAPITOLO 2

TURBINE PELTON

In questo capitolo viene descritto lo stato dell'arte riguardante la turbina Pelton. Sebbene sia stata inventata ormai due secoli fa, continua ad essere una delle soluzioni più efficaci ed efficienti negli impianti in cui flussi d'acqua caratterizzati da elevati salti e portate contenute devono essere elaborati. Questo è dovuto in particolare alla ricerca continua promossa nel tempo in questo campo, che ha permesso di ottenere informazioni di dettaglio riguardanti l'influenza dei vari parametri geometrici sulle prestazioni e di individuare i materiali più adatti per conferire alla girante una maggiore resistenza alla corrosione e all'erosione.

2.1 CENNI STORICI

Le moderne turbine Pelton sono il frutto del progresso tecnologico applicato al primo prototipo, realizzato dall'ingegnere americano Lester Allan Pelton, nel 1879 ispirandosi alle ruote idrauliche ad azione con cucchiai a forma di tazza. All'epoca queste ruote erano montate su piccole applicazioni meccaniche, soprattutto nell'ambito dell'estrazione dell'oro nelle miniere americane, per fornire energia meccanica ad alcuni dispositivi a costo di contare su rendimenti molto bassi. La svolta avvenne quando Pelton comprese che dividendo tramite un tagliente ogni singolo cucchiaio in due cavità, definendo così una pala con forma a doppio cucchiaio, si poteva ottenere un notevole aumento di prestazioni di tali ruote.

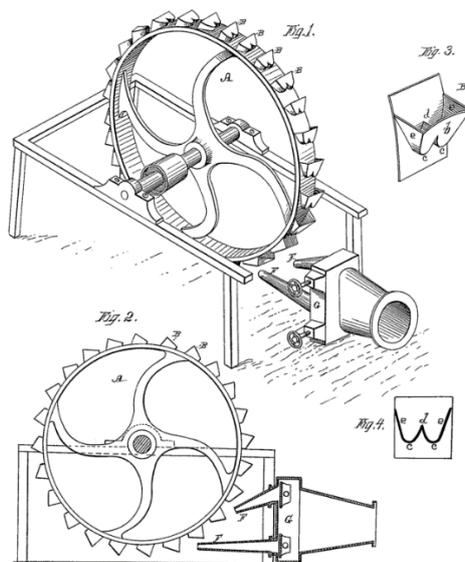


Figura 2.1 Ruota di Pelton (brevetto USA, ottobre 1880) [12]

Questa intuizione, infatti, permetteva al cucchiaio di dividere il getto in due parti ottenendo così la massima interazione tra getto e girante e ricevendo di conseguenza una massima spinta possibile. Inoltre, l'intaglio dava la possibilità di dimensionare i bordi di ingresso e uscita del flusso d'acqua in modo separato con lo scopo di ridurre le perdite per incidenza. Ulteriori prove ed esperimenti sul prototipo portarono poi al deposito del brevetto nel 1880 (Figura 2.1) dando ufficialmente vita a questa nuova tipologia di ruota che prese il nome proprio del suo inventore.

2.2 DESCRIZIONE E PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

La turbina Pelton viene utilizzata per grandi dislivelli, tra i 200 e i 1400 metri, e portate d'acqua inferiori ai 50 metri cubi al secondo [6]. L'efficienza, per il range di applicazione descritto, può comunemente raggiungere il 90%. Questo è dovuto principalmente al miglioramento della qualità del getto e dell'ottimizzazione dell'interazione tra getto e pala.

La turbina Pelton [13] consiste in una ruota con pale a doppio cucchiaio installate nella periferia della girante e con uno o più iniettori (o ugelli) che generano getti d'acqua ad alta velocità (Figura 2.2). Il trasferimento di energia avviene attraverso l'interazione tra il getto ad alta velocità e i cucchiai delle pale, i quali deviano la rispettiva metà del getto di un angolo di circa 180° , ottenendo così la massima variazione di quantità di moto, e di conseguenza la massima spinta sul cucchiaio. Sulla base di questo tipo di interazione, la progettazione di turbine Pelton si focalizza in particolare sugli aspetti fluidodinamici dell'interazione getto-pala, studiando il moto del fluido all'interno del cucchiaio in maniera dettagliata per massimizzare l'efficienza, e sugli aspetti strutturali, per definire lo stato di sollecitazione agente sulla pala e determinarne la resistenza meccanica.

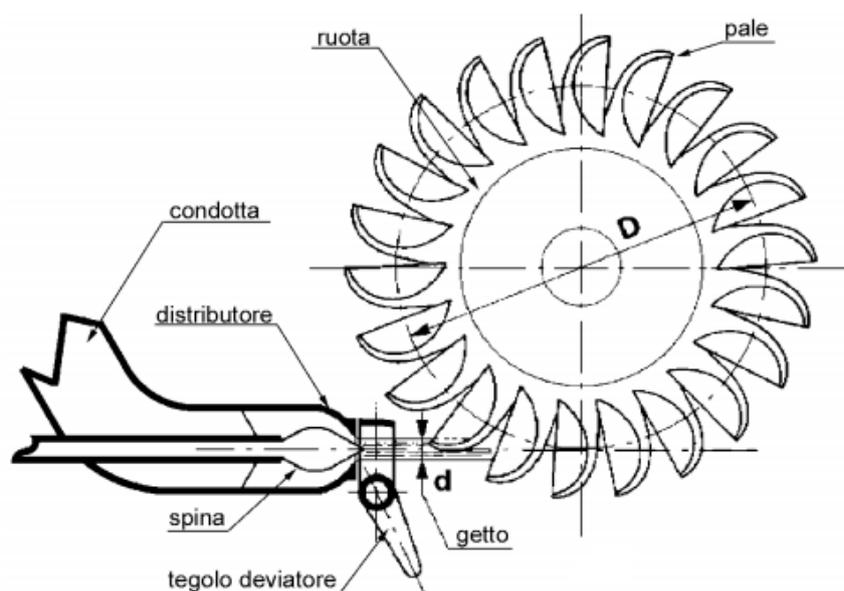


Figura 2.2 Struttura turbina Pelton [14]

Solitamente installate in impianti a serbatoio o a bacino, questa tipologia di turbine, sfruttano l'energia idraulica immagazzinata sotto forma di energia potenziale in bacini/serbatoi posti ad altissima quota. Esse, quindi, sono turbine idrauliche tipicamente installate in impianti idroelettrici alpini. La conversione dell'energia potenziale in cinetica viene garantita dall'ugello che prevede l'espansione della corrente fluida direttamente in atmosfera, dando vita ad un getto di forma cilindrica caratterizzato da un proprio diametro. Grazie agli iniettori l'energia potenziale viene interamente convertita in energia cinetica. Questa tipologia di turbina è caratterizzata da un grado di reazione nullo poiché è nulla la variazione di pressione statica attraverso la girante dal momento che l'acqua, una volta uscita dall'iniettore, si trova sempre a pressione atmosferica. Questo significa che tutta l'energia resa disponibile alla girante è esclusivamente in forma di energia cinetica. L'asse del getto è posizionato in modo tale da garantire che il fluido in uscita dagli ugelli sia sempre tangente alla circonferenza media della ruota, al fine di ridurre al minimo le perdite per incidenza.

Trascurando le perdite, la velocità del getto in uscita viene calcolata, dall'equazione di Bernoulli, tramite la seguente espressione:

$$C_0 = \sqrt{2gH} \quad (3)$$

Dove H definisce il salto netto all'ingresso dell'iniettore il quale rappresenta la massima energia meccanica che si potrebbe estrarre in assenza di perdite alla girante, ossia in condizioni ideali. Nel caso reale, le perdite di efficienza all'uscita dell'ugello vengono conteggiate considerando un ulteriore coefficiente (coefficiente di perdita dell'impianto) il quale tiene conto delle perdite di energia proprie dell'iniettore.

La seconda fase di conversione dell'energia da cinetica a meccanica avviene grazie all'interazione tra il getto e le pale della turbina. Il getto, con sezione circolare, colpisce le pale a forma di doppio cucchiaio il cui tagliente centrale affilato ha la funzione di minimizzare le perdite idrauliche dovute all'impatto con il getto. Appena il getto entra in contatto con la pala, esso viene diviso in due parti simmetriche, prosegue scorrendo lungo le superfici del cucchiaio per poi essere scaricato nella sezione di uscita della pala, con una velocità assoluta caratterizzata da una componente tangenziale che deve essere minimizzata per ottenere il massimo rendimento. La conversione dell'energia cinetica del getto in energia meccanica all'albero avviene mentre il getto di fluido scorre sulla superficie della pala, venendo deviato dalla pala stessa. La deviazione del fluido da parte della pala sottintende la presenza di un'azione meccanica esercitata dalla pala sul fluido, il quale a sua volta, per il terzo principio della dinamica, eserciterà sulla pala una forza pari e contraria che determina la spinta operata dal fluido sul cucchiaio.

Per quanto riguarda la disposizione delle turbine Pelton, la configurazione più diffusa è ad asse orizzontale a singolo getto, in quanto garantisce il contenimento dei costi ed al contempo elimina possibili problemi derivanti dal mutuo disturbo dei getti dei vari iniettori.

Uno dei fattori principali da attenzionare in fase di dimensionamento della girante di una ruota Pelton riguarda il tipo di sollecitazione; infatti, la pala è sottoposta a una sollecitazione di fatica che può provocare la rottura nella regione posta alla loro radice.

2.3 PALE

Le pale (Figura 2.3) sono soggette a forte usura perché investite da flusso d'acqua uscente dall'iniettore. Fenomeni di usura si verificano soprattutto nelle centrali in cui non è disponibile alcun sistema efficiente per la sedimentazione di particelle trasportate dai fiumi, le quali, interagendo con le pale della girante, asportano materiale ad ogni impatto. Di conseguenza, la realizzazione di cucchiai per ruote Pelton deve prevedere l'utilizzo di materiali ad alta resistenza e di lavorazioni di finitura superficiale per ridurre attriti e azioni di usura che potrebbero portare ad importanti alterazioni geometriche, tra cui la variazione degli angoli di ingresso e uscita. I cucchiai possono essere realizzati sia per asportazione di truciolo che per fusione. La girante può essere realizzata come corpo unico oppure prevedere il fissaggio dei cucchiai al disco tramite giunzioni bullonate, le quali rendono più semplici eventuali operazioni di manutenzione e sostituzione dei cucchiai.

La scelta del numero di pale viene fatta con l'obiettivo di controllare il carico palare e deve garantire la completa intercettazione del getto da parte delle pale, evitando così perdite di energia facilmente evitabili.

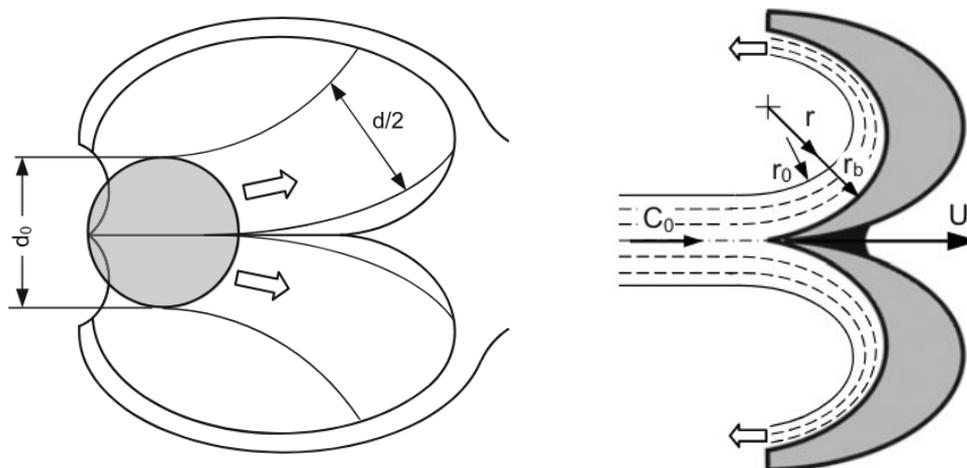


Figura 2.3 Geometria pala turbina Pelton [13]

2.4 INIETTORI

L'iniettore svolge principalmente due funzioni: la prima, già riportata in precedenza, è quella di convertire interamente l'energia dell'acqua da potenziale a cinetica. La seconda consiste nella regolazione della portata. Nei casi in cui si realizzi una brusca diminuzione di potenza richiesta dalla rete (dovuta, ad esempio, al distacco improvviso di un carico elettrico importante), per diminuire la potenza meccanica generata dalla girante si agisce operando una riduzione di portata. La chiusura dell'ugello, però, non può avvenire troppo velocemente perché potrebbe provocare l'insorgenza di sovrapressioni e forti sollecitazioni nelle condotte forzate, introducendo il fenomeno del colpo d'ariete. La soluzione al problema è stata trovata negli anni ricorrendo all'installazione di un tegolo deviatore appena dopo l'uscita dell'ugello (Figura 2.4), il quale permette di deviare parzialmente o totalmente il getto impedendo a quest'ultimo di colpire la pala e consentendo una rapida riduzione di potenza in caso di necessità.

L'iniettore è quindi composto dal bocchello e da una spina di regolazione collegata a un servomotore esterno o interno alla tubazione in pressione.

Gli iniettori possono essere più di uno e il loro numero dipende principalmente dal rapporto tra il diametro della girante e quello del getto. Nelle turbine ad asse orizzontale si possono installare al massimo due iniettori per limitare fenomeni di disturbo reciproco dei getti, mentre negli impianti di grande potenza con turbina ad asse verticale si possono realizzare anche configurazioni aventi fino a sei ugelli.

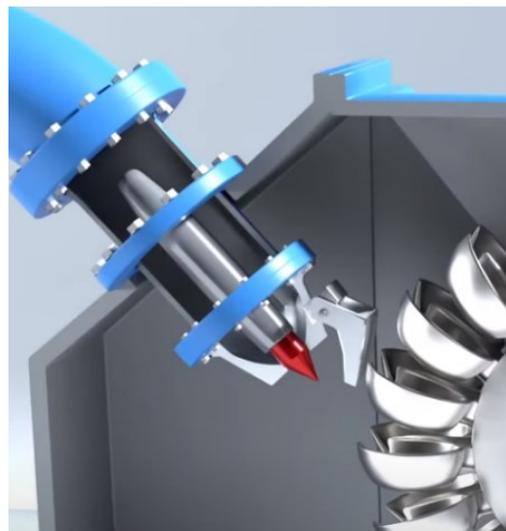
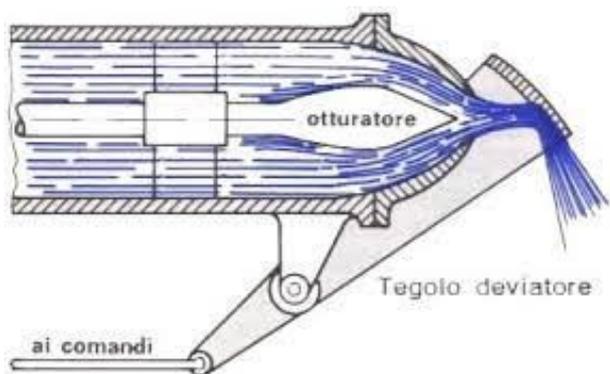


Figura 2.4 Componenti ugello [15] e [20]

CAPITOLO 3

ANALISI SCENARIO ITALIANO

In Italia sono presenti 4860 impianti idroelettrici attualmente operativi e non esiste un database pubblico che li raggruppi. Una prima proposta di database, avanzata in questa relazione all'interno di progetto più ampio, prevede di riportare e di riassumere le informazioni principali dei singoli impianti idroelettrici. Queste informazioni sono state ricavate eseguendo una prima ricerca bibliografica su una piccola porzione di impianti per i quali era possibile ottenere i dati, in particolare sono stati analizzati 202 impianti, circa il 4% della totalità degli impianti presenti sul territorio nazionale. La previsione futura è quella di continuare questa ricerca, espandendola fino a raggiungere la totalità degli impianti, al fine di ottenere analisi statistiche sempre più precise.

Le informazioni riportate nel database sono:

- nome dell'impianto;
- posizione geografica (regione e comune);
- fiume o bacino di alimentazione;
- compagnia di gestione;
- tipologia di impianti (ad acqua fluente, a serbatoio o bacino e ad accumulo);
- anno di realizzazione;
- salto motore (minimo, massimo e nominale);
- portata (minima, massima e nominale);
- velocità di rotazione della girante;
- diametro della girante;
- numero tipico di macchina K;
- potenza idraulica e potenza installata;
- stima rendimento impianto;
- energia annuale prodotta;
- numero e tipologia della turbina idraulica.

Le informazioni di numero tipico di macchina, potenza idraulica e rendimento impianto sono state ricavate in seguito all'elaborazione dei dati raccolti, nel caso in cui fossero disponibili tutte le informazioni necessarie per lo svolgimento dei calcoli. Il numero tipico di macchina K è un numero adimensionale che permette la scelta della tipologia di turbina idraulica più adatta alle condizioni

operative presenti (Tabella 2.1), in particolare quella che presenta un'efficienza più elevata. È definito dalla seguente relazione:

$$K = \omega \frac{Q_v^{0,5}}{(gh)^{0,75}} \quad (3)$$

La successiva grandezza calcolata, la potenza idraulica, rappresenta la potenza teorica che si può estrarre da una data portata d'acqua e si ricava dall'equazione (1). Infine, la stima del rendimento dell'impianto si ottiene dal rapporto tra potenza effettiva e potenza idraulica, ossia:

$$\eta = \frac{P_{effettiva}}{P_{idraulica}} \quad (4)$$

3.1 RISULTATI OTTENUTI DALLA RICERCA BIBLIOGRAFICA

Lo studio si concentra sull'analisi dei salti degli impianti idroelettrici nei quali è installata la turbina Pelton. Dal campione di impianti analizzati più di un terzo (70 su 202 impianti) utilizza la turbina Pelton per ricavare energia meccanica dall'acqua. Questo è dovuto per la presenza di catene montuose, grazie alle quali si possono ottenere forti dislivelli. Infatti, questi impianti si trovano localizzati principalmente nell'Italia settentrionale, nelle regioni di Trentino Alto-Adige, Lombardia e Piemonte, ossia regioni particolarmente montuose.

La tipologia di turbina più utilizzata risulta comunque quella di tipo Francis con quasi il 40% degli impianti (81 su 202 impianti). Questo è dovuto probabilmente alla sua flessibilità di applicazione; infatti, a differenza delle Pelton, le turbine Francis possono operare in modo anche reversibile rendendole applicabili in impianti di pompaggio, i quali gli ultimi anni stanno rivestendo un ruolo cruciale per migliorare la flessibilità e resilienza del sistema elettrico nazionale.

Tabella 3.1 Valori caratteristici turbine idrauliche

Turbine idrauliche	K
Pelton	0,04 ÷ 0,35
Francis lente	0,35 ÷ 0,60
Francis medie	0,60 ÷ 1,20
Francis veloci	1,20 ÷ 2,50
Kaplan	2,50 ÷ 6,00

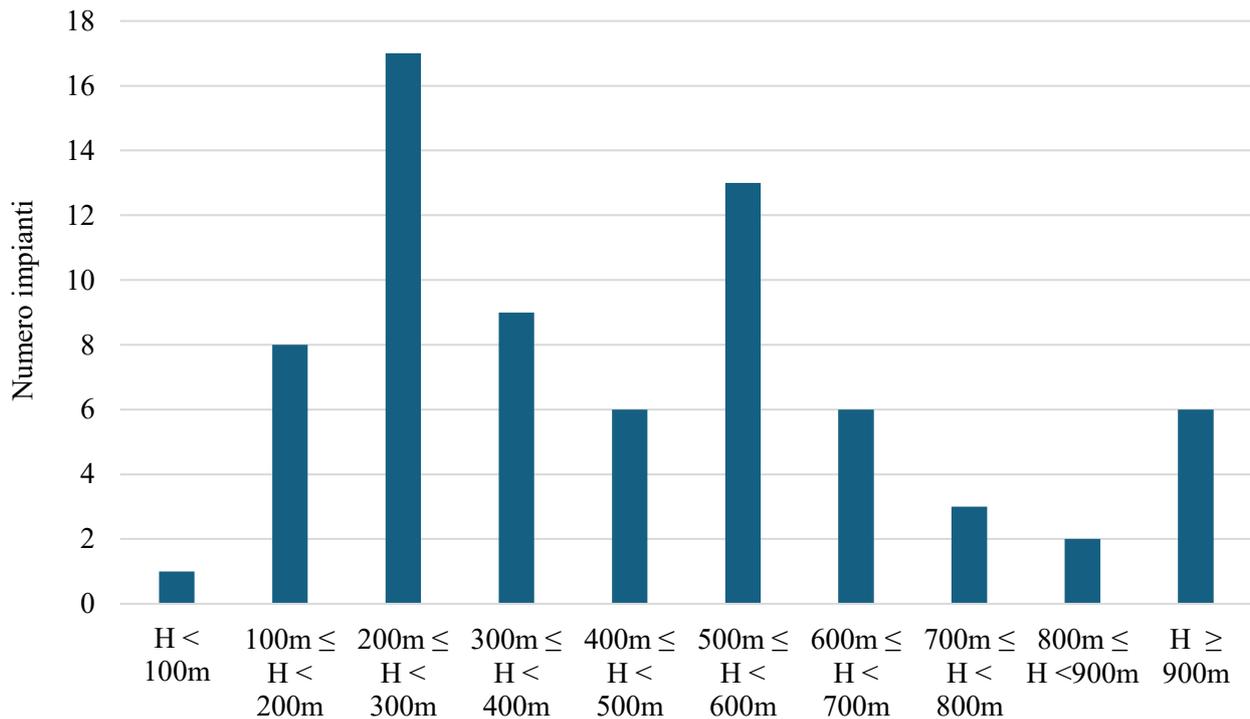


Figura 3.1 Salti impianti con turbine Pelton [16]

Dagli impianti con turbine Pelton analizzati si rileva che l'intervallo di altezze recante una maggiore concentrazione di impianti corrisponde ai range di 200m – 300m e di 500m – 600m, rispettivamente il 24% e il 18%. A parte il primo intervallo, il minor numero di impianti si riscontra nell'intervallo 800m – 900m e nell'intervallo precedente. Nell'ultimo intervallo, che comprende le altezze al di sopra dei 900 metri, si trovano diversi impianti, in numero pari all'8,5% del campione analizzato.

Il salto minimo rilevato è 83 metri, della centrale di Braulio, in Lombardia. Si tratta di una centrale che raccoglie le acque dal canale Gavia-Forni-Braulio e sfrutta un bacino imbrifero, cioè un bacino che raccoglie le acque piovane. È situata all'interno del parco nazionale dello Stelvio e per ridurre al minimo l'impatto ambientale è stata costruita in caverna.

Il salto massimo, osservabile all'interno del database, invece, è di 1400 metri, della centrale di San Fiorano, sempre in Lombardia. È una centrale idroelettrica di generazione e pompaggio, situata in una caverna scavata nella roccia, che sfrutta le acque afferenti all'esistente serbatoio del lago d'Arno. È la centrale idroelettrica italiana che presenta il maggior dislivello medio tra bacino e turbina.

Il salto medio delle centrali considerate corrisponde a 470 metri. Le centrali che hanno un salto prossimo a quello medio si trovano sparse in diverse regioni a nord della nazione: Lombardia, Veneto, Piemonte, Trentino, Emilia-Romagna, Valle d'Aosta.

Ricorrendo al calcolo dello scarto quadratico medio sul campione di salti geodetici presi in considerazione, si è potuta calcolare la dispersione statistica, valutando quindi la distanza dalla media aritmetica dei vari elementi del campione selezionato. Questo parametro statistico è un indicatore molto importante all'interno delle analisi statistiche ed è definito dalla seguente formula:

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (H_i - \bar{H})^2} \quad (5)$$

Dai calcoli si è ottenuto un valore di 295 metri. Questo significa che il 68% percento circa degli impianti idroelettrici italiani dotati di turbine Pelton si trova in un intervallo compreso tra 175 metri e 765 metri. È interessante notare come tale intervallo di salti geodetici sia pienamente in linea con i range di salto geodetico definiti dalla letteratura per la scelta delle turbine Pelton.

Se si prendono i dati di salto e portata, caratterizzanti la singola turbina Pelton, di trenta impianti ricavati dal database e si rappresenta la loro posizione nel diagramma (Figura 3.2), dove sono mostrati il range di operatività delle turbine in funzione della portata e salto, si può osservare come tali turbine rientrino all'interno del campo di utilizzo delle turbine Pelton.

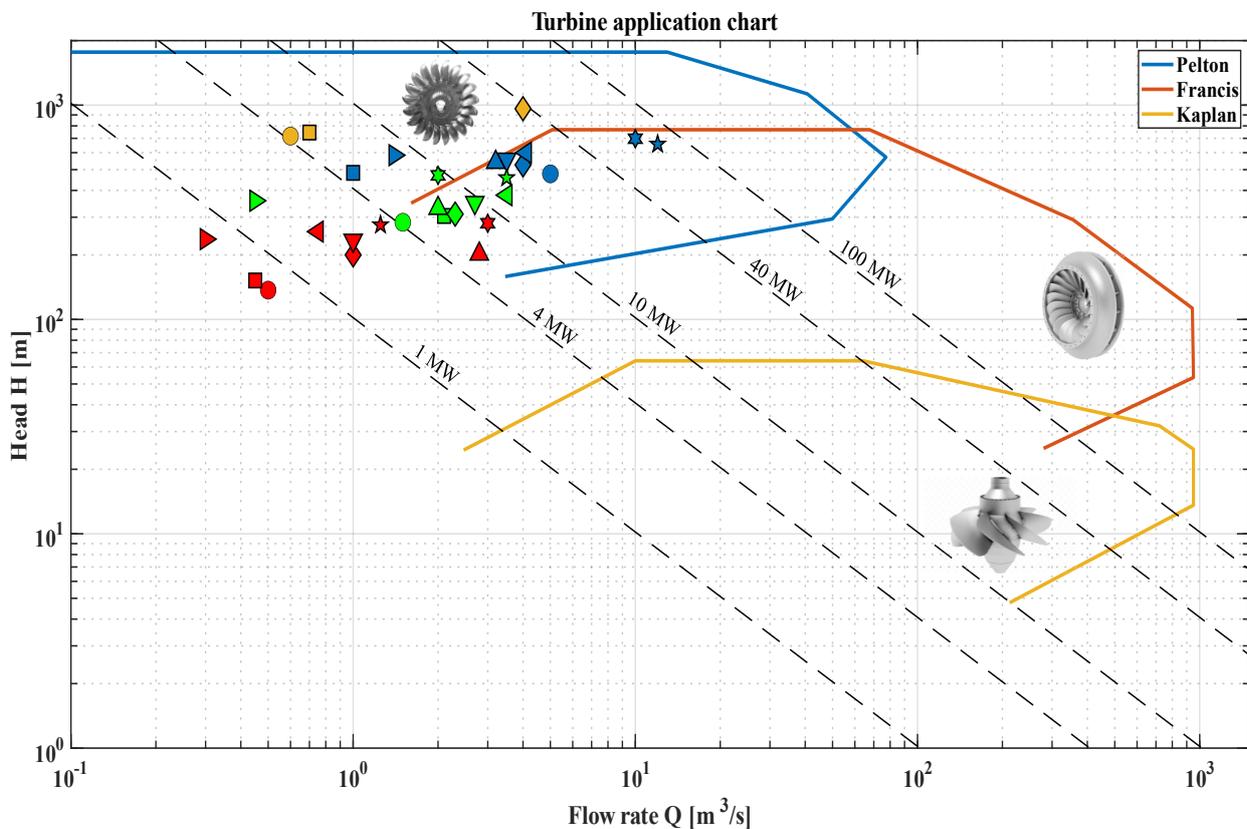


Figura 3.2 Posizione impianti analizzati nel diagramma di selezione turbine idrauliche [17]

Tabella 3.2 Corrispondenza simboli–impianti della Figura 3.2

SIMBOLO	NOME IMPIANTO	H [m]	Q_{VIMP} [m ³ /s]	Q_{VTURB} [m ³ /s]	N° PELTON
●	CIAMPATO 2	137	1,5	0,50	3
■	CASTRULLO	152	0,5	0,50	1
◆	ANZUNO	200	1,0	1,00	1
▲	CHAMPAGNE 2	202	17,0	2,83	6
▼	SOPALU'	234	2,0	1,00	2
◀	DESEDAN	237	0,6	0,30	2
▶	ARSON 1	257	3,0	0,75	4
★	MOLINI	276	7,0	1,75	4
☆	CHATILLON	281	12,0	3,00	4
●	TUSCIANO	284	3,0	1,50	2
■	FORNO DI ZOLDO	304	4,2	2,10	2
◆	VENAMARTELLO	310	9,0	2,25	4
▲	MALGA CIAPELA 2	330	4,1	2,05	2
▼	SIGNAYES	351	16	2,67	6
◀	MOLINO	358	0,9	0,45	2
▶	ZUINO	380	7,0	3,50	2
★	SAVINER	458	3,5	3,5	1
☆	CHAMPAGNE 1	470	6,0	2,00	3
●	LANA	478	30,0	5,00	3
■	PERRERES	483	2,0	1,00	2
◆	PALLANZENO	526	8,0	4,00	2
▲	PONT-SAINT-MARTIN	541	9,5	3,17	3
▼	COVALOU	559	10,5	3,50	3
◀	CHAVONNE	584	7,0	1,40	5
▶	ISOLLAZ	600	8,2	4,10	2
★	SAN GIACOMO	657	85,0	12,00	6
☆	ARDENNO	697	10,0	10,00	1
●	GRESSONEY	717	1,2	0,60	2
■	HONE 2	745	2,0	0,67	3
◆	VALPELLINE	962	16,0	4,00	4

Si può quindi affermare che i risultati raccolti nel database risultano in linea con i valori di letteratura e di conseguenza con i range di operatività ottimale per le turbine Pelton. Una buona parte dei punti inseriti nel grafico, oltre a posizionarsi all'interno della zona di operatività della turbina Pelton, si trovano anche nella zona di interesse per le turbine Francis. In particolare, la maggior parte di tali punti è disposta vicino al limite superiore, in termini di salto, per la scelta di turbine di tipo Francis. Per tali applicazioni, quindi, la scelta sarebbe potuta ricadere anche su quest'ultima tipologia di macchina.

Il fatto che, a parità di condizioni, la scelta sia ricaduta per tali punti su una turbina di tipo Pelton è probabilmente da ascrivere a considerazioni riguardanti il rendimento che può essere garantito nella conversione dell'energia. Come detto in precedenza, questi punti, rappresentati in Figura 3.2, si trovano attorno al limite superiore della zona delle turbine Francis. A parità di velocità di rotazione ω , quindi, tutti quei punti sono caratterizzati da salti motori elevati e portate contenute, spesso contraddistinti da valori contenuti di numero tipico di macchina K .

Per tali valori di K , compatibili sia con il limite inferiore del range di numeri tipici di macchina che caratterizzano le turbine Francis, sia con il limite superiore del range delle Pelton, il rendimento massimo ottenibile da una turbina Francis (secondo esperienza maturata negli anni) risulta essere, per valori bassi di K , minore rispetto alla massima efficienza ottenibile con una turbina Pelton per lo stesso range di numero tipico (vedi la zona corrispondente, indicata dal tratto rosso in Figura 3.3).

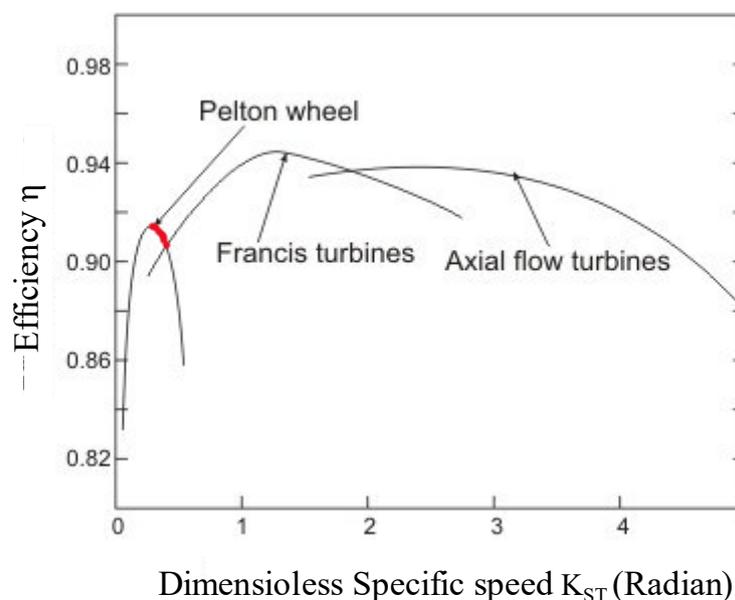


Figura 3.3 Efficienza delle turbine idrauliche in funzione del numero tipico di macchina [18]

Tale zona è probabilmente quella che caratterizza, in termini di K , il limite superiore delle turbine Francis all'interno del diagramma di Figura 3.2. Di conseguenza, per queste condizioni la turbina Pelton risulta essere la turbina idraulica in grado di garantire lo scambio energetico più efficiente. Questo è uno dei possibili motivi per i quali gli impianti riportati in Figura 3.2 risultano essere dotati di turbina Pelton al posto della turbina Francis. Per portate più elevate e salti motori più contenuti, la situazione si inverte, rendendo la turbina Francis più appetibile in termini di rendimento.

All'interno della Tabella 3.2, si mostra la corrispondenza tra i simboli, all'interno della Figura 3.2, e i rispettivi impianti presi in analisi. È fondamentale considerare la portata della singola turbina, anziché quella totale dell'impianto, poiché l'analisi si concentra sulla portata specifica di ciascuna turbina. Nell'impianto di San Giacomo la portata della singola turbina non corrisponde a quella dell'impianto rapportata al numero di turbine perché è presente anche un gruppo turbina-generatore equipaggiato con turbina Francis.

Analizzando, invece, la tipologia di impianti si osserva che il numero degli impianti a serbatoio supera leggermente quelli ad acqua fluente: 39 impianti a serbatoio contro i 26 impianti ad acqua fluente. La restante parte degli impianti (5 impianti) del database non è stata individuata la tipologia. Per quanto riguarda i gestori, tra le società di maggior rilievo nella gestione degli impianti idroelettrici troviamo la compagnia energetica Enel. Gli altri gestori che possiamo notare sono A2A, Tirreno Power, CVA (compagnia valdostana delle acque), Edison e Iren.



Figura 3.4 Centrale idroelettrica Santa Massenza [19]

Inoltre, si osserva che le principali compagnie non si specializzano sulla gestione di una tipologia di impianti, al contrario, esse puntano a diversificare gli impianti e ad avere un'ampia gamma di tipologie per soddisfare al meglio le richieste di energia da un lato, e adattarsi alle condizioni ambientali e stagionali dall'altro.

Negli impianti analizzati sono mediamente installate dalle 2 alle 3 turbine idrauliche di tipo Pelton. Ci sono però delle eccezioni come la centrale di Santa Massenza, situata nella provincia di Trento e gestita da Hydro Dolomiti Energia, dove sono installate 15 turbine Pelton ad asse orizzontale. È la centrale più potente tra quelle costruite in caverna.

Vi sono anche altre centrali caratterizzate da un numero di turbine superiore alla media, come ad esempio la centrale di Champagne 2 e Signayes in Valle d'Aosta, quella di Lana in Trentino e quella di Premadio in Lombardia, dotate tutte di 6 turbine Pelton ciascuna.

CAPITOLO 4

CONCLUSIONI

In questa relazione è stato esaminato il funzionamento delle turbine Pelton e il loro ruolo negli impianti idroelettrici italiani, concentrandosi in particolare sul campo di applicazione in termini di salto motore.

Prima di procedere con l'esposizione dello stato dell'arte della turbina Pelton è stata fornita una panoramica generale sulla produzione di energia attuale e sullo stato della transizione energetica. In particolare, è stato analizzato il ruolo dell'energia idroelettrica nel contesto delle energie rinnovabili, deducendo che per rispettare gli obiettivi di riduzione delle emissioni è necessaria una continua ricerca per l'efficientamento e lo sviluppo dell'idroelettrico.

Il database proposto si pone l'obiettivo di fornire un quadro generale della situazione dell'energia idroelettrica in Italia, evidenziando le condizioni operative di ciascun impianto. In particolare, per gli impianti equipaggiati con turbina Pelton i cui dati fossero disponibili si è verificato che le condizioni di applicazione in termini di salto motore fossero in linea con quelle fornite dallo stato dell'arte, per la scelta delle turbine Pelton, trovando un ottimo riscontro.

L'analisi dei dati raccolti nel database riguardanti impianti con turbina Pelton ha evidenziato che l'intervallo di salti geodetici con la maggiore concentrazione di impianti corrisponde ai range di 200m – 300m e di 500m – 600m. Inoltre, è emersa che la tipologia di impianti leggermente predominante per l'installazione di turbine Pelton risulta essere quella a serbatoio.

Considerando il grafico di selezione delle turbine idrauliche, si nota un buon accordo tra i dati raccolti e lo stato dell'arte. In generale, gli impianti italiani dotati di turbina Pelton si collocano principalmente nella zona centrale dell'area racchiusa dal campo di operatività delle turbine Pelton. Quest'osservazione è da ricondurre al fatto che gli impianti elaborano portate tendenzialmente medio-piccole rispetto a quelle riportate in letteratura, generando potenze spesso inferiori ai 40MW.

Possibili sviluppi futuri consistono nell'ampliamento del database relativo agli impianti idroelettrici nazionali, con lo sviluppo di analisi statistiche basate su parametri nuovi ed aggiornate di pari passo con l'inserimento di nuovi dati.

CAPITOLO 5

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- [1] Wayth N., Davenport J., *Statistical Review of World Energy*, (72° edizione), 2023.
- [2] IRENA, Renewable capacity statistic, 2023.
- [3] Gill R., Rich E., IHA, *World Hydropower Outlook*, 2023.
- [4] Terna Driving Energy, <https://www.terna.it/it/sistema-elettrico/statistiche/evoluzione-mercato-elettrico/capacita-fonti-rinnovabili>, consultato il 20/06/2024.
- [5] <https://www.educazionetecnicaonline.com/2012/01/06/la-centrale-idroelettrica/>, consultato il 07/07/2024.
- [6] Enel, <https://www.enelgreenpower.com/it/learning-hub/energie-rinnovabili/energia-idroelettrica/turbina-idroelettrica>, consultato il 07/07/2024.
- [7] Enel, <https://www.enelgreenpower.com/it/impianti/operativi/centrale-idroelettrica-isola-serafini>, consultato il 07/07/2024.
- [8] Dolomiti, <https://www.dolomiti.it/it/barcis> consultato il 07/07/2024.
- [9] Quaranta E., Perrier J. P., Revelli R., *Optimal design process of crossflow Banki turbines: Literature review and novel expeditious equations*, 2022.
- [10] Adhikari R., Design Improvement of Crossflow Hydro Turbine, Ph.D. Thesis, University of Calgary, Calgary, Canada, 2016.
- [11] Gilkes, Gilkes Turgo impulse hydro turbine; 2015, https://www.gilkes.com/user_uploads/turgo%20paper2.pdf, consultato il 07/07/2024.
- [12] Pelton LA. US Patent, 1880.
- [13] Zh. Zhang, *Pelton Turbines*, Springer, Switzerland, 2016.
- [14] Istituto G. Marconi, Turbine idrauliche, <https://www.marconiprato.edu.it/wp-content/uploads/2016/11/turbine-idrauliche-1.pdf>, consultato il 07/07/2024.

[15] Prof. Ing. Fantasia P., *Turbina Pelton*.

[16] Database turbine.

[17] S.L. Dixon, B. Eng., (1998), Fluid Mechanics, Thermodynamics of Turbomachinery.

[18] Keerthi Kumar N., BMS Institute of Technology and Management,
<https://bmsit.ac.in/public/assets/pdf/mech/studymaterial/18ME54%20-%20Keerthi%20Kumar.pdf>,
consultato il 07/07/2024.

[19] Trentino, <https://www.cultura.trentino.it/Luoghi/Tutti-i-luoghi-della-cultura/Centrale-Idroelettrica-di-Santa-Massenza>, consultato il 07/07/2024.

[20] Alperia, <https://www.youtube.com/watch?v=4dAZJmhcDfQ>, consultato il 07/07/2024.