



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE DII
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

Impianti idroelettrici ad accumulo nello scenario energetico italiano

Relatore

Prof. Cavazzini Giovanna

Correlatore

Ing. Nascimben Francesco

Laureando

Bertelli Pietro

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

Data di laurea 17/07/2024

Sommario

Recentemente, a seguito del processo di cambiamento climatico in atto, è stata posta maggiore attenzione all'impatto ambientale delle attività antropiche sul pianeta, concentrandosi principalmente sulla riduzione delle emissioni di gas serra e sulla salvaguardia degli ecosistemi e lavorando nell'ottica di garantire una maggiore sostenibilità in ambito industriale ed energetico. Per quanto riguarda quest'ultimo settore, una politica rivolta sempre più verso la produzione di energia attraverso lo sfruttamento di fonti rinnovabili è stata adottata negli ultimi anni nei paesi occidentali (compresa l'Italia) andando a realizzare un notevole numero di impianti fotovoltaici ed eolici. Tali impianti, nonostante permettano di produrre energia in maniera completamente pulita, presentano purtroppo una grande controindicazione: il loro funzionamento dipende infatti da fonti energetiche altamente variabili nel tempo, aspetto che può costituire un problema non da poco nell'ottica di garantire stabilità alla rete elettrica nazionale sia nel caso in cui tali impianti producano troppa energia, sia nei momenti in cui tali impianti siano impossibilitati a funzionare (mancanza di luce solare o correnti d'aria deboli). All'interno di questo scenario, gli impianti idroelettrici ricoprono ancora un ruolo rilevante, sia dal punto di vista della produzione diretta di energia elettrica, sia dal punto di vista del mantenimento della stabilità della griglia elettrica nazionale. Quest'ultimo aspetto è appannaggio praticamente completo degli impianti di pompaggio o ad accumulo, i quali sono in grado di lavorare sia in modalità di produzione di energia quando la griglia ha necessità di sopperire velocemente ad una richiesta improvvisa di energia elettrica, sia in modalità di accumulo di energia quando la produzione di energia a livello nazionale è più elevata dell'effettiva richiesta a livello di consumi. Con l'obiettivo di approfondire il ruolo ricoperto dagli impianti ad accumulo all'interno dello scenario energetico italiano, il presente elaborato di tesi si inserisce all'interno di un progetto più ampio, consistente nella creazione di un database nazionale contenente le informazioni principali relative alle centrali idroelettriche presenti sul territorio

nazionale, come ad esempio la loro tipologia e le loro condizioni operative di salto, portata e potenza efficiente. L'obiettivo primario di questa tesi è stato quindi quello di lavorare alla realizzazione di una prima versione del database, soffermandosi in particolare sulle centrali ad accumulo. L'elaborato si prefigge di operare una ricerca in letteratura e sui siti dei principali produttori energetici nazionali delle condizioni operative e delle informazioni relative a potenza e producibilità annua di tali impianti idroelettrici. Da questi dati è stato possibile realizzare un confronto con altre tipologie di impianti, sia idroelettrici, che solari ed eolici, dal quale si è dimostrato il forte ruolo strategico ricoperto dalle centrali idroelettriche ad accumulo nella produzione e gestione della rete elettrica nazionale. Nella prima parte della tesi è stata descritta la produzione energetica italiana osservando i contributi delle varie fonti energetiche rinnovabili nella totalità di energia prodotta. In seguito, si è posta l'attenzione sulle centrali idroelettriche con una breve classificazione e descrizione delle varie tipologie. Si sono descritte dal punto di vista generale le centrali ad accumulo per poi andare a caratterizzare alcune di quelle presenti sul territorio nazionale e di cui si sono reperiti i dati. In particolare, si sono messe in luce le varie tipologie di gruppi produttivi utilizzati in questi impianti avendo cura di descrivere anche le differenze tra gli stessi. Nella parte finale, dopo aver descritto la realizzazione e la struttura del database, si è svolto il confronto qualitativo tra la potenza e la producibilità annua delle centrali idroelettriche ad accumulo rispetto alla totalità delle centrali idroelettriche, di fatto dimostrando il loro ruolo di rilevanza nella gestione della rete elettrica.

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Le centrali idroelettriche	4
1.2	Definizione parametri operativi	9
2	Le centrali idroelettriche ad accumulo	11
2.1	Centrali ad accumulo ed opere civili	13
2.1.1	Dighe in terrapieno	13
2.1.2	Dighe in cemento	13
2.1.3	Dighe a gravità	14
2.1.4	Dighe ad arco	14
2.1.5	Dighe a contrafforti	14
2.2	Centrali ad accumulo-Aspetti meccanici	15
2.2.1	Gruppi quaternari	16
2.2.2	Gruppi ternari	17
2.2.3	Gruppi binari	19
2.3	Centrali ad accumulo-Aspetti elettrici	20
2.3.1	Servizio di rampa	20
2.3.2	Modulazione della potenza di rete	21
2.3.3	Riserva rotante	21
2.3.4	Rifasamento	21
2.3.5	Modulazione della forma d'onda	22
2.3.6	Gestione della produzione energetica	22
3	Raccolta e analisi dei dati	27
3.1	Realizzazione del database	27

3.2	Analisi dei dati-Impianti ad accumulo	31
4	Conclusione	35

Elenco delle figure

1.1	Numero di impianti per fonte rinnovabile	2
1.2	Potenza installata per fonte rinnovabile	2
1.3	Produzione annua per fonte rinnovabile	2
1.4	Producibilità impianti per fonte energetica	4
1.5	Schema idraulico della centrale idroelettrica a bacino di Nove Nuova [3] .	5
1.6	Schema di una centrale ad acqua fluente [4]	7
1.7	Schema idraulico della centrale di Gressoney [5]	8
1.8	Schema di una centrale idroelettrica ad accumulo [6]	8
2.1	Schema di un impianto idroelettrico a pompaggio nei due diversi funzionamenti [10]	12
2.2	Le varie configurazioni di diga più diffuse, rispettivamente in terrapieno (a), ad gravità (b), ad arco (c) e a contrafforte (d)	15
2.3	Rappresentazione di un gruppo ternario [12]	18
2.4	Rappresentazione di un gruppo binario [3]	20
2.5	Diagrammi di carico: (a) rappresentazione di un diagramma di carico e scostamento tra il carico reale e quello stimato, (b) diagramma di carico giornaliero che descrive la pianificazione della produzione energetica [11]	25
2.6	Diagrammi di carico giornalieri valutati nel giorno di Pasquetta e il successivo giorno lavorativo [11]	25
2.7	Diagrammi di carico mensili [11]	25
3.1	Diagrammi statistici di rendimento in funzione del numero tipico di macchina per turbine (a) e pompe (b) [14]	28
3.2	Diagramma del campo di funzionamento delle turbine idrauliche	32

3.3	Diagramma campi di funzionamento pompe-turbine idrauliche reversibili monostadio e multistadio un funzione di potenza e prevalenza	34
-----	---	----

Capitolo 1

Introduzione

Negli ultimi anni, l'osservazione di eventi climatici di natura estrema (ad esempio, siccità prolungata alternata a fenomeni piovosi ad altissima intensità) è sempre più frequente su scala globale a causa delle dinamiche innescate dal surriscaldamento globale, in atto ormai da decenni. La comunità scientifica mondiale ha identificato l'uomo e le sue attività come uno dei possibili e principali responsabili di questo trend, dovuto prevalentemente ad un ingente aumento dell'emissione di gas serra in atmosfera, con una conseguente intensificazione del fenomeno noto come "effetto serra". Altri effetti collaterali dell'aumento generalizzato delle temperature sono, ad esempio, lo scioglimento di parti consistenti di ghiacciai (con il conseguente innalzamento della quota delle nevi perenni), lo sconvolgimento di flora e fauna a livello locale, causando addirittura l'estinzione di alcune specie. Per scongiurare il raggiungimento di condizioni critiche di surriscaldamento globale, che porterebbe ad una serie di eventi irreversibili [1] un gran numero di accordi sono stati siglati tra le varie nazioni con l'obiettivo di ridurre e limitare il più possibile l'effetto ambientale delle attività umane sul pianeta. In particolare, l'Europa punta inizialmente alla riduzione delle emissioni di gas serra del 55% entro il 2030 con l'obiettivo finale di raggiungere la neutralità carbonica entro il 2050 [2].

Come conseguenza della nuova politica europea in tema di ambiente, l'Europa stessa ha emanato una serie di leggi che prevedono l'efficientamento degli edifici ed una gestione dei rifiuti e della produzione industriale basata su principi di economia circolare. Uno dei settori maggiormente interessati da queste nuove direttive è sicuramente il settore energetico, il quale provvede alla fornitura di energia elettrica all'intera rete nazionale, permettendo lo svolgimento di tutte le attività pubbliche, private ed industriali.

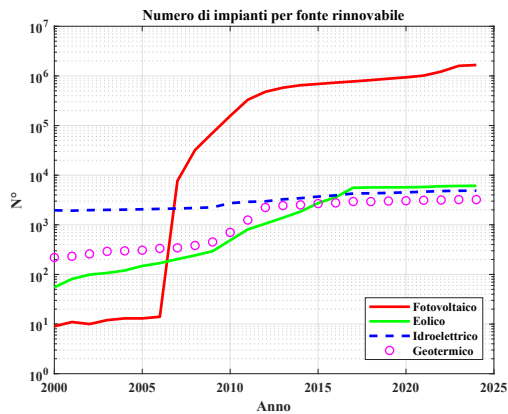


Figura 1.1: Numero di impianti per fonte rinnovabile

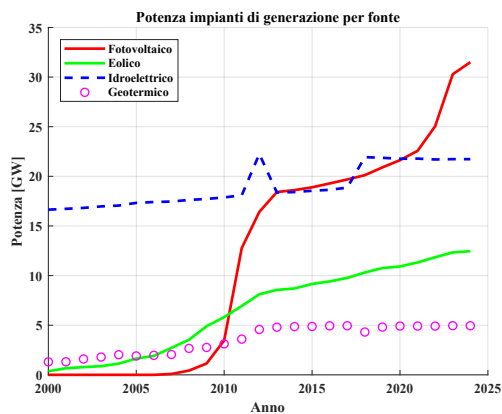


Figura 1.2: Potenza installata per fonte rinnovabile

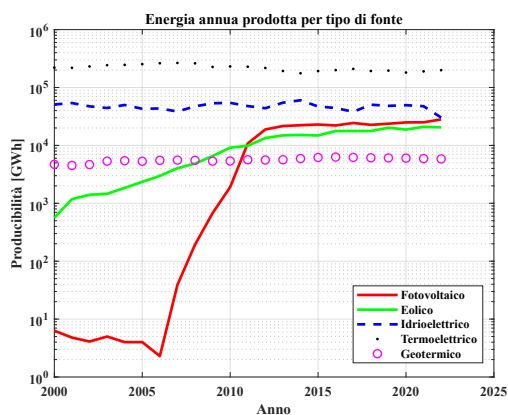


Figura 1.3: Produzione annua per fonte rinnovabile

Negli ultimi anni, per ridurre l'impatto ambientale del settore energetico in termini di emissioni di gas serra, si è fatto molto affidamento sia sulla conversione degli impianti a carbone ad impianti a gas naturale, sia sulla costruzione di un maggior numero di impianti che sfruttano fonti rinnovabili, incrementando quindi la produzione di energia elettrica pulita. Nel caso italiano, la grande disponibilità di energia eolica e solare, soprattutto nelle regioni meridionali, ha quindi permesso di costruire, negli ultimi anni, un grande numero di impianti fotovoltaici e eolici che permettono di produrre un'importante quantità di energia quando tali risorse risultano disponibili. Questa tendenza è confermata dai report mensili stilati da Terna (società italiana che si occupa della gestione, monitoraggio e manutenzione dell'intera rete elettrica nazionale) i quali riportano diverse statistiche riguardanti la tipologia, il numero, la potenza e la producibilità delle centrali energetiche italiane. Tali statistiche sono riportate brevemente all'interno dei grafici proposti all'interno delle figure 1.1, 1.2, 1.3.

Come facilmente osservabile dai diagrammi riportati in precedenza, si evince il forte interesse per una produzione energetica maggiormente incentrata sullo sfruttamento di fonti rinnovabili. Si osserva infatti non solo un aumento esponenziale del numero di impianti fotovoltaici ma anche un loro importante aumento esprimibile in termini di potenza installata. Infatti, possiamo notare come la capacità installata totale relativa agli impianti fotovoltaici sia maggiore rispetto a tutte le altre fonti, portando l'Italia ad essere uno dei paesi europei che sfruttano maggiormente la fonte energetica solare.

Tra le fonti rinnovabili, un ruolo di primaria importanza è svolto ancora oggi dal settore idroelettrico, le cui centrali presentano tutt'ora alti valori sia di capacità installata totale che di producibilità totale annua, essendo state per lungo tempo persino l'unica fonte di energia elettrica del paese.

In figura 1.4 è riportato l'andamento della producibilità annua dal 2000 ai nostri giorni. Dall'osservazione di tale figura è possibile apprezzare come l'intera produzione energetica italiana negli anni si sia ripartita tra le varie fonti energetiche. In particolare, si può notare come le centrali idroelettriche abbiano avuto, nell'ultimo periodo, una produzione annua che risulta essere piuttosto costante, nonostante negli ultimi anni il numero di centrali idroelettriche sia leggermente aumentato, figura 1.1. Questo è probabilmente dovuto al fatto che i siti adatti alla costruzione di centrali idroelettriche sono già stati abbondantemente sfruttati, raggiungendo una condizione di saturazione. La tipologia di centrale che può ancora essere realizzata sono le centrali ad accumulo le quali non richiedono la

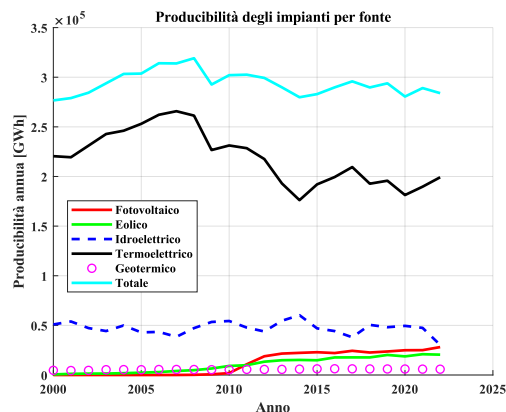


Figura 1.4: Produttività impianti per fonte energetica

presenza di fiumi e corsi d'acqua che garantiscano un costante afflusso di acqua per il loro funzionamento in quanto gestiscono un volume fissato tra due serbatoi. Dai diagrammi si evince anche una fluttuazione dell'energia prodotta dalle centrali idroelettriche causata dagli importanti lavori di manutenzione o ammodernamento di queste ultime o, anche a causa di lunghi periodi di siccità che possono manifestarsi con maggiore intensità di anno in anno, costringendo allo spegnimento di alcuni impianti idroelettrici causa dell'elevata scarsità d'acqua, con evidenti perdite di profitto e la necessità di sopperire alla mancata produzione di energia elettrica garantita da tali centrali tramite altre fonti, spesso di natura fossile. Nonostante queste criticità si può osservare che comunque la produzione energetica delle centrali idroelettriche è significativa ed è in grado di coprire circa il 17% della richiesta energetica nazionale.

1.1 Le centrali idroelettriche

Le centrali idroelettriche sono impianti per la produzione di energia elettrica che sfruttano l'acqua come fluido operativo. Il funzionamento della centrale prevede la conversione dell'energia cinetica e potenziale della corrente fluida in energia meccanica prima (alla turbina idraulica) ed in energia elettrica successivamente (all'alternatore). L'energia del fluido si manifesta principalmente come energia potenziale, solitamente immagazzinata all'interno di acqua posta ad alta quota e convertita successivamente in energia cinetica sfruttabile al gruppo di produzione della centrale. Questo trasferimento di energia avviene per mezzo di una macchina idraulica denominata *turbina*, la quale assorbe l'energia del

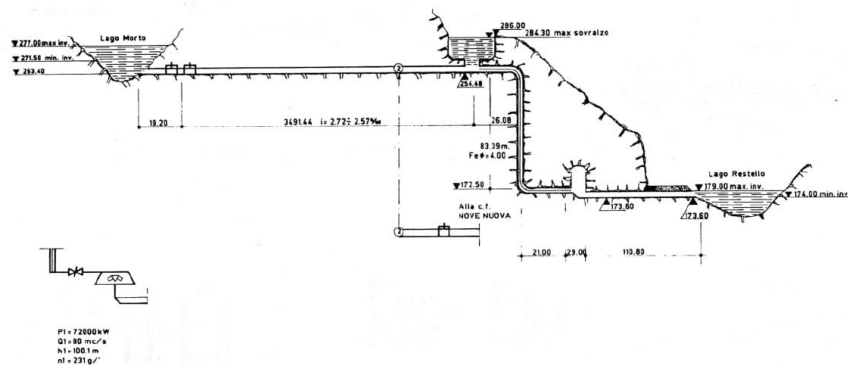


Figura 1.5: Schema idraulico della centrale idroelettrica a bacino di Nove Nuova [3]

fluido e la converte in energia meccanica all'albero, con la quale viene messo in rotazione un alternatore, producendo così energia elettrica. La risorsa idrica può essere prelevata in modi differenti, o tramite opere di derivazione di un percorso idrico o tramite vere e proprie opere civili con la realizzazione di bacini per l'accumulo della risorsa stessa.

Di seguito è riportato lo schema impiantistico di una centrale idroelettrica a bacino. Si tratta della centrale idroelettrica di Nove Nuova che è il secondo impianto a cascata che sfrutta le acque provenienti dal lago di Santa Croce. Le centrali idroelettriche possono essere di quattro differenti tipologie:

- Ad acqua fluente
- A bacino
- A serbatoio
- Ad accumulo

Le varie tipologie di centrale idroelettriche si differenziano principalmente in base alla loro architettura, che ne definisce anche il principio di funzionamento. Maggiori dettagli in merito verranno forniti nei paragrafi successivi.

Le centrali possono essere classificate anche in base alla loro potenza di impianto e si distinguono in:

- Micro idroelettrico con potenza $P < 100 \text{ KW}$
- Mini idroelettrico con potenza $P < 1 \text{ MW}$
- Piccolo idroelettrico con potenza $P < 10 \text{ MW}$
- Grande idroelettrico con potenza $P > 10 \text{ MW}$

Centrale idroelettrica ad acqua fluente

La centrale ad acqua fluente è la tipologia di impianto idroelettrico più diffusa in quanto concettualmente molto semplice da realizzare, anche in piccola scala, ed è in grado di produrre energia fino a quando è presente acqua nel percorso idrico in cui è inserita. La sua diffusione a livello italiano è dovuta alla grande abbondanza di corsi d'acqua sfruttabili sul territorio, con una densità maggiore al nord grazie alla presenza di diffuse zone montuose che permettono di poter avere accesso a fonti idriche in quota (caratterizzate quindi da elevati valori di energia potenziale) abbondanti grazie alla presenza dei ghiacciai.

La particolarità di questi impianti è data dall'assenza di un vero e proprio sistema di accumulo d'acqua duraturo, essendo i relativi bacini caratterizzati da una durata di invaso massima pari a due ore. Di fatto una centrale ad acqua fluente opera sfruttando la corrente fluida derivante da fiumi già presenti nel territorio circostante, prelevando parte della portata del fiume tramite opere di presa e convogliandola poi all'interno della centrale per la produzione di energia.

A volte, per massimizzare l'energia ottenibile, le centrali sono disposte a cascata, una di seguito all'altra. Sono state realizzate anche centrali che sfruttano le portate in uscita da altre centrali, sempre con l'obiettivo di sfruttare il più possibile la risorsa idrica per la produzione di energia elettrica.

In figura 1.6 è riportato lo schema intuitivo di una centrale ad acqua fluente in cui si può facilmente osservare l'opera di presa con cui, in questo caso, la quasi totalità della portata del fiume è derivata all'interno della centrale al fine di produrre energia elettrica. Una volta utilizzata la corrente per la produzione viene poi re-inserita nel normale flusso d'acqua.

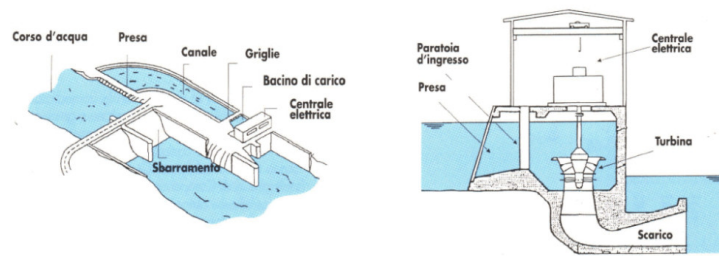


Figura 1.6: Schema di una centrale ad acqua fluente [4]

Centrale idroelettrica a serbatoio o a bacino

Le centrali a serbatoio e a bacino differiscono rispetto alle centrali ad acqua fluente in quanto esse non sono costantemente attraversate da una corrente fluida, ma la risorsa idrica è accumulata in un bacino per poter essere utilizzata secondo necessità. Di conseguenza, le centrali a serbatoio e a bacino non sono sempre in funzionamento e possono essere attivate e disattivate a piacere.

Dal punto di vista del principio di funzionamento, le centrali a serbatoio e a bacino sono praticamente analoghe. Entrambe, infatti, sono caratterizzate dalla presenza di un bacino di accumulo della risorsa idrica a monte della centrale, mentre a valle l'acqua può confluire direttamente in un fiume oppure, nel caso in cui si abbiano più centrali a cascata (per esempio, il complesso di centrali sul lago di Santa Croce), in un ulteriore bacino, con il quale viene poi alimentata la centrale successiva.

L'unica differenza tra le centrali a serbatoio e quelle a bacino è rappresentata dal volume di invaso, o più precisamente dalla durata di invaso. Per *durata di invaso* si intende il tempo medio di permanenza della risorsa idrica all'interno del bacino/serbatoio prima di essere poi effettivamente utilizzata. È possibile quindi distinguere le due tipologie di centrale basandosi sulla durata di invaso e si ottiene così la seguente classificazione:

- Centrale a bacino se la durata di invaso è < 400 ore
- Centrale a serbatoio se la durata di invaso è > 400 ore

Un esempio di centrale a bacino è rappresentato dall'impianto di Nove, riportato in figura 1.6 in cui la centrale è alimentata a monte dal lago Morto (bacino artificiale a valle della centrale di Fadalto in grado di accumulare fino a circa 24 milioni di metri cubi di acqua) e scarica la portata elaborata all'interno del lago del Rastrello. Un esempio invece di centrale a serbatoio è quella di Gressoney in cui la centrale è alimentata dal serbatoio realizzato

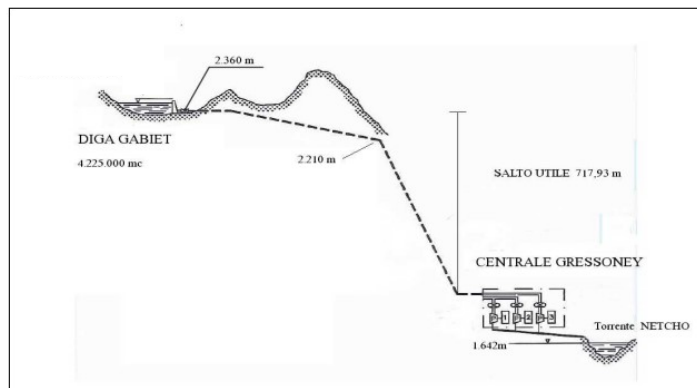


Figura 1.7: Schema idraulico della centrale di Gressoney [5]

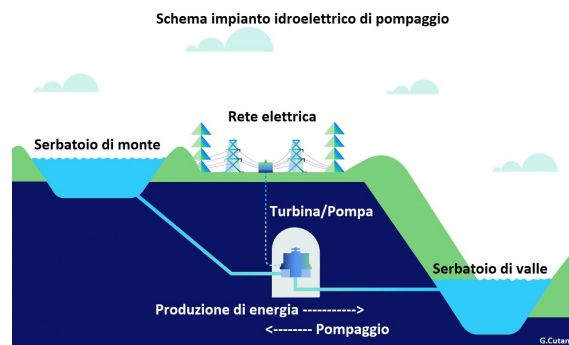


Figura 1.8: Schema di una centrale idroelettrica ad accumulo [6]

mediante la diga di Gabiet, con una capacità totale di invaso di 4.17 milioni di metri cubi di risorsa idrica e che scarica la portata turbinata nel vicino torrente Netchò. Riportiamo in seguito lo schema della centrale figura 1.7:

Centrale idroelettrica ad accumulo

Le centrali idroelettriche ad accumulo sono una tipologia particolare di centrale idroelettrica in cui la centrale gestisce il volume di fluido tra due differenti bacini, quello di monte e quello di valle. A differenza delle altre centrali, oltre alla funzione di produzione energetica mediante turbine idrauliche, le centrali ad accumulo sono dotate di pompe centrifughe in grado di fornire energia al fluido e riportare il volume d'acqua dal bacino di valle a quello di monte. Questi impianti, sfruttando il costo inferiore dell'energia elettrica nelle ore notturne o nel caso di sovrabbondanza di energia nella rete, possono utilizzare le pompe

per riportare l'acqua a monte per poterla poi utilizzare quando è richiesta l'immissione di potenza nella rete elettrica. Le centrali ad accumulo verranno affrontate nel dettaglio nel capitolo seguente. Riportiamo in figura 1.8 lo schema di una centrale ad accumulo.

1.2 Definizione parametri operativi

Tutte le centrali idroelettriche sono caratterizzate da una serie di grandezze che permettono di descriverle dal punto di vista ingegneristico, che vengono definite nel presente paragrafo e che sono state poi inserite all'interno del database per la caratterizzazione delle centrali osservate.

- Salto H [m]: si definisce salto H l'energia posseduta dal fluido per unità di peso e può essere riferita sia alla pressione, sia alla velocità sia al salto geodetico. Nel nostro caso per salto H ci riferiamo al salto geodetico. In particolare, distinguiamo in salto lordo riferito alla differenza tra i peli liberi del serbatoio di monte alla centrale e quello di valle e Salto netto o motore è intesa invece la differenza tra la quota del pelo libero del serbatoio di monte con l'asse della girante della macchina idraulica [7].
- Portata Q [m^3/s]: si definisce portata volumetrica il volume di fluido che attraversa una data sezione in un certo intervallo di tempo [7].
- Densità ρ [Kg/m^3][8]: è definita come la massa per unità di volume [7].
- Potenza idraulica P_{id} [W]: si definisce potenza idraulica la potenza prodotta da una macchina ideale che lavora un fluido ideale caratterizzato da un certo salto e una certa portata e può essere calcolato come [7]:

$$P_{idraulica} = \rho * Q * g * h \quad [W] \quad (1.1)$$

- Numero di giri n [$giri/min$]: questa grandezza descrive la velocità di rotazione di una macchina rotante caratterizzando il numero di rotazioni complete che avvengono per unità di tempo.
- Velocità angolare ω [rad/s]: questa grandezza è un'ulteriore grandezza caratterizzante la velocità di rotazione di un corpo descrivendone l'angolo percorso dall'e-

lemento in una unità di tempo. È possibile convertire la velocità angolare con il numero di giri mediante la seguente formula:

$$\omega = \frac{2 * \pi * n}{60} \quad [Rad/s] \quad (1.2)$$

- Producibilità annua P_{annua} [Wh]: la producibilità annua descrive la quantità di energia prodotta da una centrale nell'arco di un anno solare. La sua unità di misura è il wattora.

- Rendimento η [-]: per rendimento si definisce il rapporto tra l'energia effettivamente ottenuta e quella massima ottenibile. In questo caso il rendimento è definito come [7] [7]:

$$\eta = \frac{P_{effettiva}}{P_{idraulica}} \quad [-] \quad (1.3)$$

- Numero tipico K [-]: il numero tipico, chiamato anche velocità specifica è uno dei gruppi adimensionali con cui vengono descritte le turbomacchine ed è calcolabile con la seguente espressione [7]:

$$K = \frac{Q^{(1/2)}}{(gh)^{(3/4)}} \quad [-] \quad (1.4)$$

- Rendimento di pompaggio o rendimento medio $\eta_{pompaggio}$ [-]: il rendimento di pompaggio, la cui formula è riportata di seguito, costituisce un rendimento di impianto che raggruppa il rendimento delle macchine idrauliche nelle due diverse modalità di funzionamento. Considerando un volume finito di fluido, il rendimento di pompaggio descrive il rapporto tra l'energia ottenibile turbinando tale quantità di fluido rispetto alla quantità di energia per svolgerne il pompaggio. Di fatto questo parametro descrive la bontà dell'impianto nel riutilizzo della massa fluida [9].

$$\eta_{pompaggio} = \eta_{turbina} * \eta_{pompa} \quad [-] \quad (1.5)$$

Capitolo 2

Le centrali idroelettriche ad accumulo

Le centrali ad accumulo costituiscono una delle quattro categorie in cui sono suddivisi gli impianti idroelettrici. Le centrali ad accumulo operano tra due bacini di accumulo (uno a monte dell'impianto e uno a valle di esso) e sono attrezzate con gruppi di macchine idrauliche ed elettriche in grado di operare sia in modalità di produzione di energia elettrica, sia in modalità di pompaggio.

Nella prima modalità, in completa analogia con le altre centrali idroelettriche, l'energia potenziale dell'acqua accumulata nel bacino/serbatoio posta a monte della centrale viene sfruttata facendo scorrere l'acqua dal serbatoio di monte a quello di valle, facendo ruotare la turbina idraulica. La macchina assorbe l'energia cinetica derivante dalla corrente fluida, convertendola in energia meccanica, a sua volta utilizzata per la movimentazione di un alternatore con cui viene poi prodotta l'energia elettrica.

Nella seconda modalità, invece, la portata d'acqua compie il percorso inverso rispetto a quello intrapreso nelle fasi di produzione di energia elettrica, venendo trasferita dal serbatoio inferiore a quello superiore tramite l'utilizzo di pompe assorbendo energia dalla rete per fornire energia al fluido e permette all'acqua di essere rimmagazzinata al serbatoio superiore. Alternando queste due modalità di funzionamento, un volume di fluido fino d'acqua viene quindi continuamente riutilizzato.

Come detto in precedenza, per poter realizzare sia le funzioni di turbinaggio che di pompaggio, la centrale è dotata di macchine in grado di operare entrambe le fasi e che vengono organizzate in gruppi di macchine idrauliche ed elettriche il cui numero determina la configurazione d'impianto. In figura 2.1 è presentato uno schema di centrale ad accumulo insieme alle due diverse modalità di funzionamento. La possibilità di operare un continuo

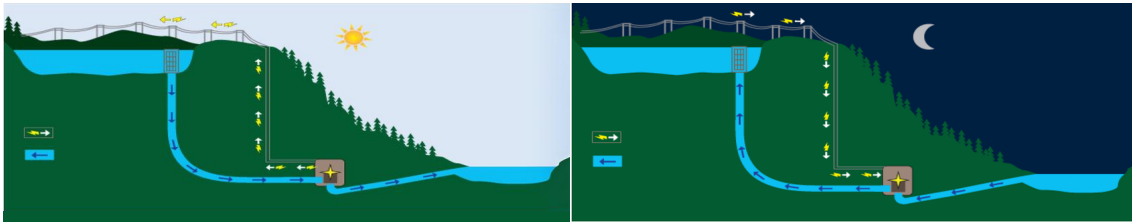


Figura 2.1: Schema di un impianto idroelettrico a pompaggio nei due diversi funzionamenti [10]

ricircolo della massa idrica contenuta nei bacini della centrale permette alla stessa di operare in condizioni di scarsità di acqua derivabile dai fiumi presenti nei pressi della centrale, non richiedendo l'apporto di volume idrico se non per compensare il volume d'acqua dissipato per evaporazione.

Le centrali idroelettriche, in particolare quelle ad accumulo, rappresentano una sfida ingegneristica di notevole complessità per diversi ambiti. Primo di questi è sicuramente l'ambito civile, in quanto è necessaria la realizzazione di opere di invaso, di presa, oltre che alla costruzione della centrale stessa e lo scavo delle condotte forzate. Il secondo aspetto è certamente legato all'ambito meccanico, con la scelta e costruzione dell'anima della centrale stessa, ovvero i gruppi idroelettrici che operano la conversione dell'energia fluida in energia elettrica e viceversa. Ultimo aspetto, ma non per importanza, è quello legato al collegamento elettrico alla rete elettrica nazionale ad altissima tensione, responsabile della distribuzione di energia elettrica in tutto il paese. La dimensione di questi impianti è dettata dall'economia di scala, che richiede impianti di notevole potenza e bacini con elevatissimi volumi di invaso per poter ottenere un ritorno economico. Per avere una centrale ad accumulo economicamente vantaggiosa è necessario che essa produca un'elevata quantità di energia elettrica. Affinché ciò avvenga sono necessarie macchine idrauliche di dimensioni notevoli e che vengano alimentate per lunghi periodi di tempo. Di conseguenza le centrali ad accumulo sono caratterizzate da opere di invaso di enormi proporzioni con cui alimentare le grandi macchine idrauliche installate nella centrale. Infine, a causa della notevole dimensione e costo, le centrali ad accumulo, non sono molto diffuse nel territorio italiano, nonostante il loro ruolo rilevante nella gestione della rete elettrica. Infatti, come riportato da Terna [11], attualmente sono presenti solamente 23 centrali, di cui il 70% collocato nei paesi del Nord Italia. Tuttavia, negli ultimi anni sono stati avanzati diversi progetti per la realizzazione di ulteriori centrali ad accumulo, soprattutto nel centro Italia.

2.1 Centrali ad accumulo ed opere civili

Per la realizzazione di una centrale ad accumulo, l'opera di tipo civile più importante è sicuramente la realizzazione dei bacini artificiali in cui accumulare la risorsa idrica. La struttura che permette di realizzare un bacino artificiale in cui immagazzinare volumi di acqua è chiamata *diga*. Le dighe vengono classificate in base alla loro progettazione e realizzazione e possono essere dei seguenti tipi:

- Dighe in terrapieno
- Dighe in cemento
- Dighe a gravità
- Dighe ad arco
- Dighe a contrafforti

La scelta di una di queste soluzioni dipende da una molteplicità di fattori, tra cui la topologia e geologia del luogo in cui si vuole realizzare l'invaso, il volume d'acqua da accumulare e anche lo scopo di tale vaso.

2.1.1 Dighe in terrapieno

Le dighe in terrapieno sono strutture costituite compattando diversi materiali, solitamente terra, roccia e cemento, al fine di realizzare un serbatoio aperto in cui accumulare la massa idrica. Generalmente la struttura è costituita da un nucleo in argilla o calcestruzzo, che viene ricoperto da uno strato di materiale impermeabile per poi essere ricoperto da roccia o terra. La superficie della diga viene infine ricoperta di uno strato di calcestruzzo in modo da proteggere la diga dall'effetto erosivo delle onde e di altre forze idrauliche. Un esempio di diga in terrapieno è riportato in figura 2.2a.

2.1.2 Dighe in cemento

Le dighe in cemento sono realizzate completamente in calcestruzzo e qualora necessitino di resistenze maggiori possono essere costruite utilizzando calcestruzzo armato. Tra le dighe in cemento, le più rilevanti sono quelle a gravità e ad arco.

2.1.3 Dighe a gravità

Le dighe a gravità sono strutture realizzate in calcestruzzo in quanto presenta una elevata resistenza a compressione, per sopportare il peso sia della struttura della diga stessa, sia dell'acqua contenuta nel bacino. Spesso il calcestruzzo viene rinforzato per aumentarne la resistenza e la durata. Questa tipologia di struttura risulta essere imponente in quanto sfrutta il peso della diga stessa per resistere alla spinta idrostatica esercitata dalla massa fluida accumulata all'interno del bacino e che in parte viene indirizzata sugli ancoraggi rocciosi su cui è solidamente posizionata la struttura. Questa tipologia di diga presenta un'elevata stabilità e durata e in particolare garantisce un'importante resistenza ai fenomeni estremi, tra cui i terremoti. Un esempio di diga a gravità è riportato in figura 2.2b.

2.1.4 Dighe ad arco

Le dighe ad arco sono solitamente realizzate in calcestruzzo, come le dighe a gravità, e sono caratterizzate da una struttura curva che permette loro di resistere alle sollecitazioni esercitate dalla massa fluida, conferendo allo stesso tempo grande stabilità dell'opera. La diga scarica le sollecitazioni a cui è sottoposta sugli ancoraggi rocciosi su cui è vincolata. Questa tipologia di diga richiede una precisa progettazione in quanto tutti gli elementi concorrono ugualmente alla sicurezza e stabilità della struttura. Particolare attenzione viene posta nei riguardi della resistenza ai fenomeni estremi come i terremoti, in quanto tale struttura risulta soffrire molto tali eventi. Un esempio di diga ad arco è riportato in figura 2.2c.

2.1.5 Dighe a contrafforti

La diga a contrafforti, costruita in calcestruzzo, fa affidamento sull'utilizzo di contrafforti per il supporto della parete della diga. I contrafforti, di forma solitamente triangolare, non solo devono sostenere il peso della diga ma anche resistere alla pressione esercitata dalla massa fluida. La corretta realizzazione della diga prevede che la parete effettiva della diga scarichi le sue sollecitazioni sui contrafforti. Questi ultimi devono essere solidamente ancorati per garantire la stabilità della struttura. Un esempio di diga a contrafforti è riportato in figura 2.2d.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2.2: Le varie configurazioni di diga più diffuse, rispettivamente in terrapieno (a), ad gravità (b), ad arco (c) e a contrafforte (d)

2.2 Centrali ad accumulo-Aspetti meccanici

Le centrali idroelettriche ad accumulo, dal punto di vista meccanico, presentano sfide di complessità maggiore rispetto alle normali centrali idroelettriche, dovute principalmente alle dimensioni considerevoli delle macchine idrauliche ed elettriche (dovute alle grandi potenze in gioco) e al modo in cui queste possono operare. Concettualmente, per poter garantire entrambe le modalità di funzionamento, le centrali ad accumulo, devono essere dotate di una macchina idraulica (turbina) ed una macchina elettrica (alternatore) per la fase di turbinaggio ed una macchina idraulica (pompa) ed una macchina elettrica (motore) per assicurare la fase di pompaggio.

Ultimamente, per ridurre la dimensione dell'impianto e la complessità della macchina, si progettano macchine idrauliche in grado di svolgere entrambe le funzioni: tali macchine

vengono definite come macchine reversibili. In quest'ultima configurazione, sfruttando la possibilità di utilizzare la macchina elettrica sia in modalità di generatore che di motore, la macchina idraulica è in grado di assorbire energia dal fluido per produrre energia elettrica, sia di fornire energia meccanica alla massa fluida per permettere il flusso verso il bacino superiore.

La progettazione di macchine reversibili è complessa dal punto di vista fluidodinamico in quanto non posso presentare rendimenti tanto elevati quanto le singole macchine idrauliche di cui svolgono le funzioni: per ottenere rendimenti elevati è quindi necessario che la macchina reversibile venga progettata nei minimi dettagli.

Le centrali ad accumulo, come già descritto, presentano generalmente due macchine idrauliche differenti in cui una svolge la funzione di pompa e l'altra di turbina. I gruppi costituiti dalla turbina (macchina idraulica motrice) e dall'alternatore (macchina elettrica) vengono definiti come gruppi di generazione, mentre i gruppi costituiti dalla pompa (macchina idraulica operatrice) e motore elettrico (macchina elettrica) vengono definiti come gruppi di pompaggio. È poi possibile operare una distinzione delle possibili configurazioni di impianto di pompaggio in base al numero di macchine presenti, ottenendo tre differenti tipologie:

- Gruppi quaternari
- Gruppi ternari
- Gruppi binari

2.2.1 Gruppi quaternari

In questa tipologia di configurazione le due macchine idrauliche (turbina e pompa) sono due macchine distinte. Come conseguenza esse devono essere collegate a due macchine elettriche differenti.

Solitamente questo tipo di impianto viene utilizzato quando la turbina e la pompa presentano condizioni operative eccessivamente discordanti tra di loro da rendere impossibile la realizzazione di una macchina idraulica reversibile o la movimentazione mediante la stessa macchina elettrica. Questa scelta costruttiva presenta la criticità dell'ingombro in quanto sia le macchine idrauliche che elettriche sono tutte separate, e considerando le potenze in gioco, lo spazio occupato risulta notevole.

La scelta della separazione delle macchine idrauliche, nonostante l'ingombro, permette di massimizzare il rendimento della singola macchina, di fatto rendendo tale scelta economicamente vantaggiosa quando le altre scelte non risultano possibili.

La corrente configurazione, oltre a massimizzare i rendimenti per ogni singola macchina, presenta dei vantaggi anche dal punto di vista della manutenzione. Infatti, grazie alla separazione delle macchine idrauliche ed elettriche è possibile eseguire le operazioni di manutenzione e di eventuale riparazione senza dover fermare l'altra macchina.

I gruppi quaternari sono caratterizzati dall'avviamento tramite il metodo definito come back-to-back [3]. Tramite questo metodo di avviamento è possibile mettere in funzione la pompa idraulica senza doverla direttamente collegare alla rete. Infatti, con questa tecnica si sfrutta l'energia prodotta dall'alternatore collegato alla turbina per alimentare il motore elettrico connesso alla pompa. Questo permette l'avviamento della pompa fino a quando non viene raggiunta la velocità di sincronismo, ottenuta la quale avviene il collegamento in parallelo con la rete elettrica. Terminato l'avviamento, la turbina viene disinserita e la pompa continua il suo funzionamento assorbendo energia dalla rete elettrica. Questi impianti risultano quindi essere i più flessibili tra quelli ad accumulo, ma anche i più costosi, dato l'alto numero di macchine necessario per la sua realizzazione. La loro quasi totalità è stata sostituita dai più economici e compatti impianti ternari e binari.

2.2.2 Gruppi ternari

Il gruppo ternario è la configurazione più diffusa. Esso viene progettato opportunamente in modo tale che le due macchine idrauliche, ancora distinte, possano essere collegate alla stessa macchina elettrica. Questa tipologia può essere realizzata qualora la turbina e la pompa vengano progettate in modo tale da ruotare con il medesimo regime di rotazione. Così facendo, progettando correttamente anche la macchina elettrica, è possibile collegare entrambe le macchine idrauliche alla stessa macchina elettrica capace di funzionare sia da alternatore che da motore elettrico. Come si può osservare in figura 2.3 il gruppo è costituito da una turbina e da una pompa centrifuga posizionati su alberi coassiali differenti che possono essere portati in rotazione mediante un giunto innestabile a macchine ferme. Normalmente, poiché il range di funzionamento possibile con elevati rendimenti di una turbina è più ampio di quello di una pompa, la tipologia di pompa centrifuga utilizzata per garantire la prevalenza necessaria ad accumulare nuovamente acqua nel serbatoio su-

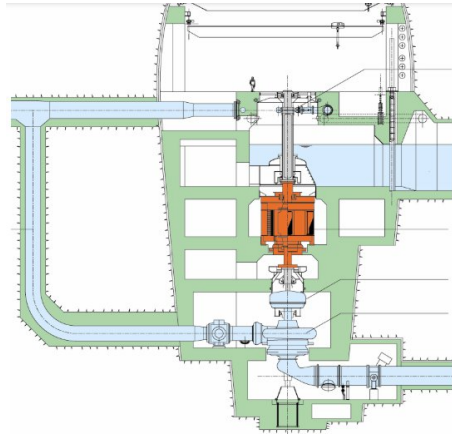


Figura 2.3: Rappresentazione di un gruppo ternario [12]

periore è di tipo multistadio: questa tipologia di pompe permette di conferire prevalenza al fluido in maniera efficiente, dividendo il salto totale da trasferire all'acqua su un certo numero di stadi consecutivi posti in serie e rotanti alla stessa velocità di rotazione (essendo calettati sullo stesso albero). Anche in questa configurazione del gruppo di generazione è possibile avviare il pompaggio senza dover eseguire un diretto allacciamento con la rete. La procedura in questo caso si discosta leggermente da quella di back-to-back in quanto invece di utilizzare un altro gruppo, per realizzare l'avviamento si usa la turbina stessa. La procedura prevede l'accoppiamento della turbina e della pompa mediante il giunto, di fatto vincolando la turbina e la pompa a ruotare in solido. Avvenuto il collegamento, viene avviata la turbina immettendo portata dal serbatoio superiore. L'attivazione della turbina genera la produzione di coppia meccanica con la quale si mette in movimento la pompa fino al raggiungimento della velocità di sincronismo. Raggiunta tale velocità viene ridotta la portata di fluido alla turbina fino al suo arresto e viene realizzato il parallelo tra la macchina elettrica (funzionante da motore) e la rete elettrica. In questa particolare configurazione la turbina non può più essere scollegata dalla pompa. Quindi il motore elettrico è costretto a movimentare anche la turbina causando perdite. Per evitare un eccessivo aumento delle perdite a causa del trascinamento della turbina essa viene fatta ruotare in aria. Infine, nei gruppi ternari la pompa centrifuga è sempre installata al di sotto della turbina in quanto permette di ridurre la quota di installazione della macchina rispetto al pelo libero del serbatoio inferiore permettendo la riduzione dei fenomeni di cavitazione che si manifesta all'ingresso della pompa.

2.2.3 Gruppi binari

I gruppi binari rappresentano l'ultima e più moderna configurazione disponibile per i gruppi di generazione/pompaggio installabili nelle centrali idroelettriche ad accumulo. In questa tipologia di impianti entrambe le macchine (idraulica ed elettrica) possono funzionare secondo entrambe le modalità, costituendo quindi un gruppo completamente reversibile. La macchina elettrica è quindi in grado di svolgere sia la funzione di motore che quella di generatore, mentre la macchina idraulica è in grado sia di garantire il funzionamento come pompa (conferendo energia al fluido), sia di assorbire energia dalla corrente fluida per poi produrre energia meccanica, configurandosi di fatto come una turbina idraulica. Questa particolare macchina reversibile prende il nome di *pompa-turbina*.

Le pompe-turbine installate in questa tipologia di impianto, tuttavia, presentano solitamente condizione operative caratterizzate da elevati salti, e quindi grandi prevalenze. Di conseguenza, data la volontà di realizzare un'unica macchina in grado di svolgere sia la funzione di pompa che di turbina è necessario che la macchina sia di tipo multistadio. La scelta multistadio permette la realizzazione di una pompa centrifuga multistadio ad elevato rendimento, ottenendo però una macchina idraulica meno performante in termini di efficienza durante la fase di turbinaggio rispetto alle turbine operanti nelle medesime condizioni e progettate ad-hoc. Generalmente, in questa tipologia di impianti, la macchina idraulica reversibile viene progettata in modo tale da ottenere il rendimento più elevato possibile durante la fase di pompaggio: si preferisce, infatti, ridurre al minimo la spesa relativa al pompaggio, permette di immagazzinare al serbatoio superiore un volume d'acqua maggiore a parità di costi, garantendo maggiori profitti futuri dati dalla presenza di un maggiore volume d'acqua elaborabile nelle successive fasi di turbinaggio. Questa configurazione permette inoltre di ridurre la complessità dell'impianto e i costi iniziali relativi al gruppo di generazione/pompaggio (in quanto deve essere realizzata una unica macchina elettrica e una sola macchina idraulica), ottenendo l'obiettivo prefissato con una soluzione molto compatta.

Anche in questa tipologia di configurazione l'avviamento risulta sostanzialmente identico alle configurazioni precedenti. L'avviamento, infatti, può essere effettuato senza il diretto collegamento alla rete, sfruttando la tecnica del back-to-back mediante differente gruppo di generazione. Risulta evidente che in mancanza di ulteriori gruppi di generazione (per esempio una centrale ad accumulo dotata di un singolo gruppo di produzione) l'avviamento tramite tecnica di back-to-back risulta irrealizzabile.

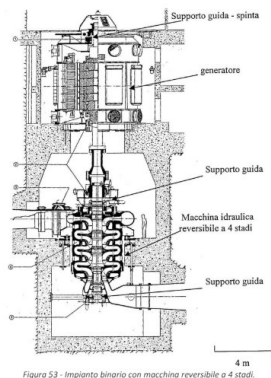


Figura 2.4: Rappresentazione di un gruppo binario [3]

2.3 Centrali ad accumulo-Aspetti elettrici

Questi impianti, oltre ad essere notevolmente complessi dal punto di vista strutturale e idraulico, ricoprono un ruolo fondamentale anche dal punto di vista elettrico in quanto sono responsabili indirettamente del mantenimento della stabilità della griglia elettrica nazionale nei momenti di sovrapproduzione di energia elettrica da parte di impianti a fonte rinnovabile e di gestione dei picchi di richiesta della rete. Tutti i ruoli di impatto sulla rete elettrica delle centrali idroelettriche ad accumulo vengono raccolti brevemente in seguito:

- Servizio di rampa
- Modulazione della potenza di rete
- Riserva rotante
- Rifasamento
- Correzione della forma d'onda
- Gestione della produzione energetica

2.3.1 Servizio di rampa

Il servizio di rampa è un servizio richiesto dalla società di gestione della rete per rendere il gruppo di generazione più flessibile permettendo di regolarne la quantità di energia che scambia con la rete stessa, sia in immissione che in assorbimento. Questo permette anche di facilitare il bilanciamento della rete in modo tale da equilibrare in ogni istante la

domanda di potenza attiva richiesta e l'effettiva produzione della stessa. Questo servizio viene definito con due differenti tipologie chiamate rispettivamente *a salire* e *a scendere*. Il servizio "a salire" prevede l'aumento dell'energia immessa in rete o la diminuzione dell'energia assorbita dalla stessa, mentre vale l'opposto per il servizio "a scendere" [9]. Per la realizzazione del servizio di rampa il gruppo di generazione fa affidamento sul cortocircuito idraulico in cui sono attive sia la pompa che la turbina. Così facendo la turbina produce energia mentre la pompa la assorbe e tramite la parzializzazione dei carichi sulle macchine è possibile ottenere una regolazione fine della potenza assorbita/immessa dalla centrale dalla/verso la rete in modo tale da realizzare il tipico andamento di rampa.

2.3.2 Modulazione della potenza di rete

Questa funzione permette la regolazione della potenza immessa e assorbita dalla rete mediante il metodo del cortocircuito idraulico. Risulta sostanzialmente analoga al servizio di rampa senza vincoli sull'andamento dello scambio energetico.

2.3.3 Riserva rotante

Le macchine elettriche utilizzate nelle centrali idroelettriche ad accumulo sono macchine elettriche sincrone, le quali presentano due avvolgimenti differenti: uno stazionario, solidale sulla carcassa della macchina elettrica, e uno rotante, solidale al rotore della macchina elettrica calettata all'albero su cui poi è posizionata la pompa-turbina. Questa tipologia di macchina elettrica è capace di lavorare come condensatore rotante, ossia è in grado, intervenendo sulle correnti di eccitazione dei due avvolgimenti e mantenendo la macchina disaccoppiata meccanicamente, di produrre potenza reattiva con cui bilanciare la rete [13].

2.3.4 Rifasamento

Il rifasamento della rete è diretta conseguenza della funzione di condensatore rotante. Tramite tale tecnica la macchina elettrica è in grado di assorbire o produrre potenza reattiva direttamente dalla rete e permettendone quindi il bilanciamento. I gruppi di generazione fanno parte dei sistemi di sicurezza della rete elettrica con cui garantirne la stabilità. Poiché i gruppi sono macchine di notevole dimensione, sono quindi dotate di elevata inerzia.

Di conseguenza le piccole variazioni di tensione e frequenza che la macchina elettrica riceve dalla rete non sono in grado di influenzarla in modo importante, di fatto fornendo alla rete elettrica. L'insieme di macchina elettrica e idraulica per gli impianti idroelettrici ad accumulo fa parte di un gruppo chiamato *riserva primaria* gestito dal controllore della rete Terna con cui intervenire quando la variazione di tensione e della frequenza di rete risulta significativa. In questa situazione il gestore della rete, grazie ai controlli automatizzati delle centrali, è in grado di variare la velocità di rotazione delle macchine elettriche e la quantità di portata che attraversa le macchine idrauliche. Con questo controllo sui gruppi di generazione Terna è in grado di contrastare le alterazioni pericolose della frequenza e della tensione di rete in modo tempestivo garantendone la funzionalità.

2.3.5 Modulazione della forma d'onda

I gruppi di generazione delle centrali ad accumulo sono in grado di modulare opportunamente la forma d'onda della rete permettendo di riportarla con forma prossima a quella della sinusoide ideale. Combinando infatti tutte le funzioni descritte in precedenza il gruppo di generazione risulta capace di ristabilire la qualità della potenza di rete.

2.3.6 Gestione della produzione energetica

L'ultimo aspetto elettrico delle centrali idroelettriche ad accumulo è il loro ruolo rilevante e strategico nella produzione e gestione della rete elettrica e soprattutto nella pianificazione della produzione energetica. Questi impianti non svolgono solo la funzione di produzione energetica, ma grazie alla loro rapidità di entrata in servizio permettono di compensare in tempi molto ridotti la variazione di domanda elettrica consentendo una più semplice gestione della produzione energetica. La gestione della domanda e dell'offerta di energia elettrica è di notevole importanza in quanto, per la conservazione delle potenze, deve essere garantito, in ogni istante, l'equilibrio energetico. Cioè, la quantità di energia immessa in rete deve sempre coincidere in ogni istante con quella effettivamente assorbita dalla totalità degli utilizzatori collegati alla rete elettrica. L'equilibrio della rete si presenta come una questione piuttosto delicata in quanto, come riportato da Terna tramite il costante monitoraggio della rete e la realizzazione di diagrammi che descrivono l'andamento della domanda di energia elettrica nell'arco giornaliero. Da questi diagrammi si può evincere come la distribuzione dei consumi energetici e di conseguenza quella della produzione

risultino essere non perfettamente omogenei. A tale diagramma dei consumi giornalieri è attribuito il nome di *diagramma di carico giornaliero*, di cui un esempio è riportato in figura 2.5a. Il diagramma, come osservabile nei vari report di Terna, non dipende solamente dall'arco giornaliero. Infatti, il diagramma di carico presenta una variabilità dovuta a diversi fattori, i quali devono tener conto della differenza di consumi tra i giorni infrasettimanali (lavorativi) e i giorni del fine settimana, della presenza o meno di festività e del mese (o stagione) in cui si effettua la misurazione. Come esempio esplicativo della variabilità di carico giornaliero osservabile al variare delle condizioni sopracitate, si riporta in figura 2.6 un confronto tra i consumi rilevati il giorno della festività di Pasquetta e quelli relativi al giorno successivo, normale giorno di ripresa lavorativa. Dall'osservazione dei diagrammi di Terna è possibile notare come nella giornata di Pasquetta, giorno festivo caratterizzato dalla chiusura di impianti produttivi ed uffici, il diagramma di carico presenta non solo una riduzione del picco di domanda energetica ma anche la riduzione del valore medio della potenza richiesta alla rete. Il giorno successivo, invece, essendo un normale giorno lavorativo, la ripresa di tutte le attività ha comportato un aumento considerevole della richiesta di energia elettrica rispetto al giorno precedente, decretando una notevole diversità tra i due diagrammi. Ragionamento analogo può essere fatto osservando i diagrammi di carico ottenibili per i diversi mesi, riportato in figura 2.7. Come descritto in precedenza, i consumi sono influenzati anche dal mese dell'anno in cui l'analisi della richiesta elettrica (e quindi dei consumi) viene condotta, in quanto nei periodi invernali si osserva solitamente un aumento dei consumi energetici dovuti al ricorso abbastanza diffuso del riscaldamento degli ambienti, mentre nel periodo estivo si ha un picco di richiesta ancora più accentuato a seguito del grande utilizzo degli impianti di condizionamento o raffrescamento. La presenza di una grande variabilità della domanda di energia elettrica impone quindi la necessità di affidare agli impianti idroelettrici, ed in particolare a quelli ad accumulo, l'arduo compito di mantenere sempre in equilibrio i contributi di domanda ed offerta di energia elettrica: gli impianti a pompaggio sono preferibili nel ricoprire questa funzione in quanto sono in grado di mantenere praticamente costante la disponibilità d'acqua nel serbatoio superiore a differenza delle centrali a bacino il cui livello del serbatoio superiore dipende principalmente dalle precipitazioni. Il gravoso compito di gestire la produzione elettrica fortunatamente è reso più semplice dall'elevato grado di automazione che caratterizza questa tipologia di impianti, tale da permetterne il controllo da remoto e di operare regolazioni precise in modo da rispettare perfettamente l'andamento dei con-

sumi. Terna ha inoltre messo a disposizione un diagramma giornaliero caratterizzante la distribuzione della produzione energetica per fonte in figura 2.5b.

Dal diagramma si nota come le fonti energetiche rinnovabili presentano delle variazioni per quanto concerne la produzione energetica. In particolare, nella figura, si nota facilmente come sia il fotovoltaico che il solare risultino non continuativi. Questa affermazione sussiste anche per l'eolico che tuttavia non è visibile in quanto il diagramma rappresenta il carico mensile, ovvero il valore medio di energia prodotta in un mese. Poiché le fonti rinnovabili non sono di tipo continuativo e costante, bensì sono variabile ed intermittenti, vengono definite come *non programmabili*. Le altre fonti, tra cui il termoelettrico e il geotermico vengono invece definite come *programmabili* e costituiscono il contributo fondamentale del diagramma di carico, garantendo così i consumi di base. Per permettere il massimo sfruttamento delle fonti rinnovabili non programmabili e garantire il bilanciamento della domanda ed offerta di energia elettrica si utilizzano le centrali idroelettriche, in particolare quelle a serbatoio, a bacino e quelle ad accumulo che si inseriscono nella produzione energetica nel momento in cui le risorse non programmabili vengono a mancare. Si può infatti osservare che nel periodo di picco del fotovoltaico parte della produzione energetica viene ridotta, mantenendo tuttavia una componente che non può essere eliminata costituita dalle centrali idroelettriche ad acqua fluente. Come viene riportato in Figura 2.5b, poiché il picco di energia elettrica messa a disposizione dalle fonti rinnovabili è cospicuo e potrebbe eccedere la domanda energetica in un dato momento, le centrali ad accumulo possono funzionare in pompaggio durante le ore di massima produzione per consentire il massimo sfruttamento della risorsa rinnovabile e permettendo l'accumulo di risorsa idrica nei bacini superiori che poi potrà essere riutilizzata nel momento in cui non saranno più disponibili le risorse non programmabili. Le centrali termoelettriche, geotermiche, l'idroelettrico ad acqua fluente e una volta gli impianti nucleari, sono impianti utilizzati per ricoprire la produzione di energia elettrica di base. Questi diversi impianti sono realizzati per un funzionamento continuativo in quanto sono centrali che non possono essere fermate, come nel caso degli impianti geotermici e ad acqua fluente, o perché presentano lunghi tempi di accensione e spegnimento e notevoli perdite di rendimento ai carichi parziali. Generalmente, quindi, le centrali idroelettriche ad accumulo, ma anche quelle a bacino e a serbatoio, vengono utilizzate, grazie alla loro elevata flessibilità, rapidità di entrata in servizio e alla loro capacità di una regolazione fine, per la gestione al dettaglio del bilanciamento energetico della rete elettrica. Ad alcune delle centrali ad

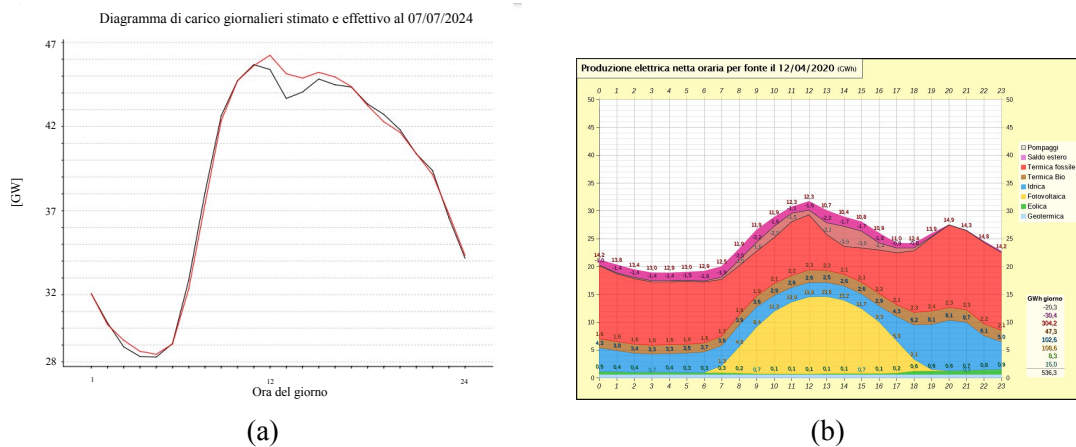


Figura 2.5: Diagrammi di carico: (a) rappresentazione di un diagramma di carico e scostamento tra il carico reale e quello stimato, (b) diagramma di carico giornaliero che descrive la pianificazione della produzione energetica [11]

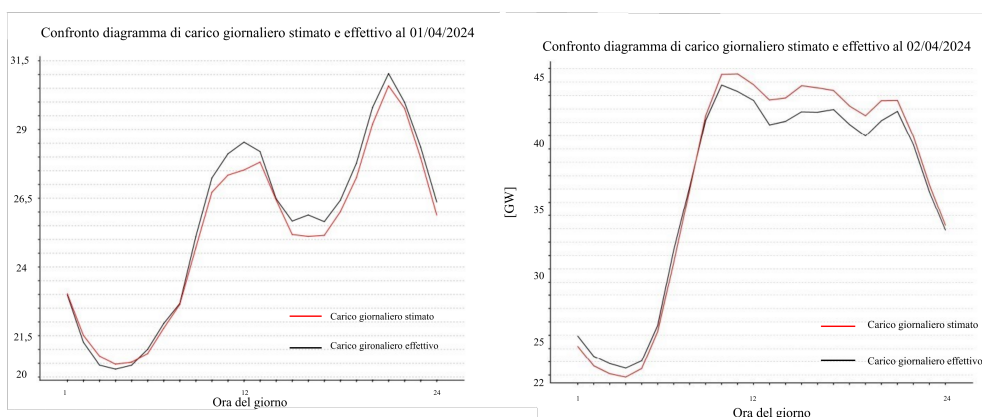


Figura 2.6: Diagrammi di carico giornalieri valutati nel giorno di Pasquetta e il successivo giorno lavorativo [11]

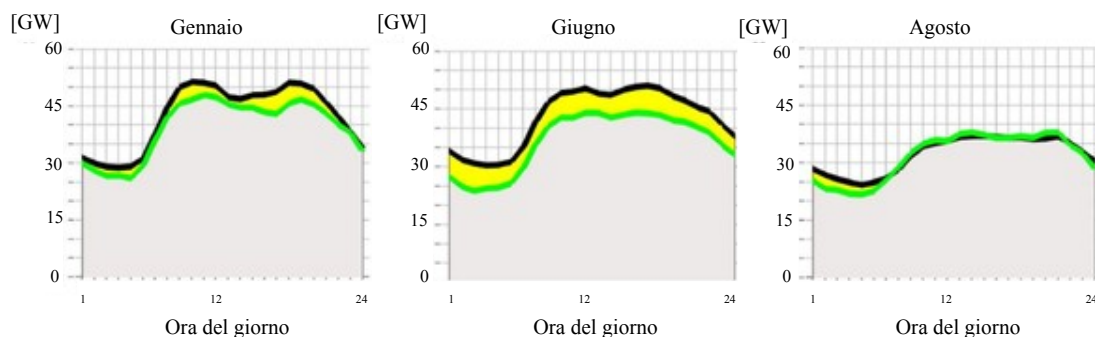


Figura 2.7: Diagrammi di carico mensili [11]

accumulo, infine, è attribuito un ruolo chiave all'interno della rete elettrica. Infatti, esse sono incaricate di ripristinare la rete elettrica del paese nella remota possibilità che possa avvenire un ulteriore blackout dell'intera rete [11].

Capitolo 3

Raccolta e analisi dei dati

3.1 Realizzazione del database

La presente tesi si inserisce all'interno di un progetto più ampio, che prevede la realizzazione di una prima proposta di database in cui riportare le informazioni disponibili riguardanti le centrali idroelettriche in attività presenti sul territorio italiano. Inizialmente si è svolta una ricerca bibliografica di tutte le informazioni disponibili per questa tipologia di impianti produttivi avendo cura di raccogliere e riportare informazioni riguardanti dati, disegni tecnici, schemi di impianto. Le informazioni raccolte caratterizzano solo una parte della totalità di impianti idroelettrici presenti e in particolare sono stati analizzati un numero di centrali pari a 202 rispetto alla totalità che risulta ammontare a 4860 impianti in tutta Italia [11]. Il numero di impianti preso in considerazione descrive solamente il quattro per cento di tutte le centrali idroelettriche distribuite sul suolo italiano. Di conseguenza si osserva la necessità di continuare questa opera di ricerca bibliografica al fine di rendere il database sempre più completo. Inizialmente, per ogni impianto, si è descritta l'ubicazione della centrale, avendo cura di riportare le informazioni riguardanti la regione, la provincia e la città in cui essa è stata realizzata, i corsi d'acqua o i serbatoi da cui ogniuna delle centrali è alimentata. In seguito, sono stati riportati i dati riguardanti la società incaricata della gestione dell'impianto, la tipologia di impianto (a bacino, a serbatoio, ad acqua fluente, ad accumulo) e l'anno di costruzione dello stesso. Si è poi passati alla descrizione degli impianti dal punto di vista ingegneristico, riportando i valori relativi alle grandezze fisiche caratterizzanti le macchine idrauliche installate, quali salto geodetico, portata e, se possibile, il numero di giri e il diametro della girante installata. Tra le ulteriori grandezze

prese in considerazione per la caratterizzazione dell'impianto sono stati poi riportati anche la potenza totale installata, la producibilità annua dell'impianto e il numero di macchine idrauliche presenti, divise per le tre tipologie (Pelton, Francis, Kaplan).

Nei casi in cui fossero disponibili tutti i dati indicati in precedenza, si sono svolti dei calcoli per determinare la potenza idraulica totale d'impianto, il numero tipico di macchina e una stima del rendimento totale d'impianto.

La potenza idraulica corrisponde alla massima potenza derivabile dalle macchine idrauliche installate per le condizioni operative considerate. Per il calcolo della potenza idraulica si è utilizzata la seguente relazione [7]:

$$P_{idraulica} = \frac{\rho * g * h * Q}{1000000} \quad [MW] \quad (3.1)$$

Il numero tipico K invece è un parametro che permette la scelta della tipologia di macchina in funzione delle condizioni operative di portata, salto e regime di rotazione e che può essere determinato tramite la seguente equazione [7]:

$$K = \omega * \frac{Q^{0.75}}{(gh)^{0.75}} \quad [-] \quad (3.2)$$

Il parametro K non solo permette di scegliere la tipologia di macchina idraulica più adatta per determinate condizioni operative, ma tramite diagrammi statistici, mostrati in figura 3.1a, 3.1b, fornisce anche una stima del massimo rendimento ottenibile da tale macchina se progettata opportunamente.

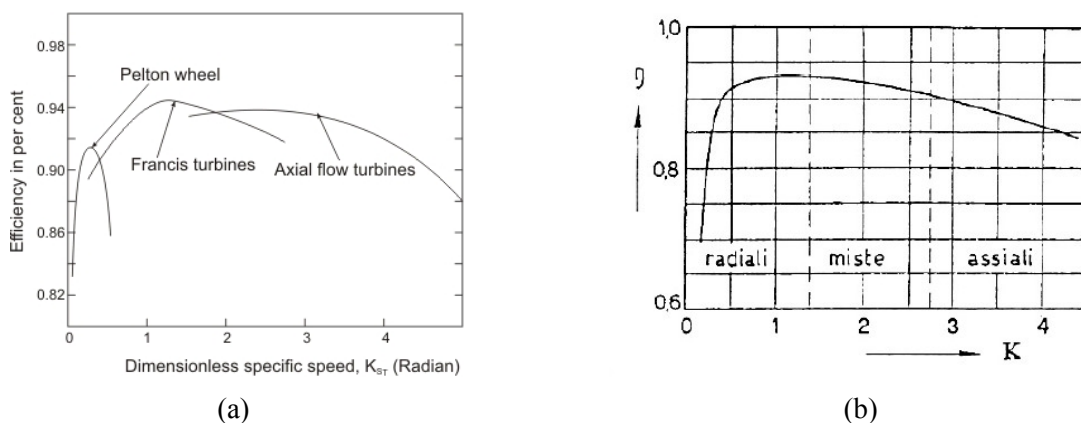


Figura 3.1: Diagrammi statistici di rendimento in funzione del numero tipico di macchina per turbine (a) e pompe (b) [14]

Avendo a disposizione i dati relativi a potenza idraulica e a potenza effettiva dell'impianto fornita dai gestori è stato possibile operare una stima del rendimento generale dell'impianto idroelettrico che tuttavia prevede l'utilizzo di formule differenziate a seconda del caso in cui la macchina idraulica funzioni come pompa o come turbina. Nel caso di turbina, il rendimento è definito come segue [7]:

$$\eta_{turbina} = \frac{P_{efficiante}}{P_{idraulica}} \quad [-] \quad (3.3)$$

Nel caso di un funzionamento in pompaggio, essendo le pompe classificabili come macchine operatrici, il rendimento d'impianto risulta pari a [7]:

$$\eta_{pompa} = \frac{P_{idraulica}}{P_{efficiante}} \quad [-] \quad (3.4)$$

Con il procedimento soprastante è stato possibile realizzare un database che presenta la struttura riportata nella tabella successiva 3.1.

Tabella 3.1: Esempio di porzione di database realizzato

IMPIANTO	INDIRIZZO	REGIONE	FIORE	CATEGORIE	TIPOLOGIA	ANNO	NUMERO TURBINE	CAPACITA' POTENZA		REGIME DI ROTAZIONE	VELOCITA' ANGOLARE	NUMERO TIPO	POTENZA IDRICA	POTENZA	RENDIMENTO	PRODUCIBILITA' ANNUA
								inl	inr/3s							
NOVE	Veneto Verso (TV)	Veneto	Piave	End	Bacino	1971	1	100.1	80	231	34.10	1.2334	76.91	65	84.51	289.6
CREGO	Venempio (CO)	Preonpe	Toce	End	Acqua fluente	1918	2	191	24	375	39.25	1.521	44.96	39.2	87.19	122.3
OLART	Nis (AO)	Valle d'Assia	Dora baltea	End	Acqua fluente	1958	2	75	60	375	49.25	1.521	44.145	38.5	87.21	178
GRABNA	Castelbarzoni (BS)	Veneto	Mise	End	Serbanzo	1955	2	89	61.5	488	47.25	1.121	35.537	13	86.66	178
GRABNA	Meduno (TV)	Veneto	Meduna	End	Bacino	1952	2	89.92	64	488	47.25	1.121	35.537	10	88.83	177.9
MEDLUNO	Meduno (TV)	Friuli Venezia Giulia	Meduna	End	Acqua fluente	1952	2	64	17.2	488	47.25	1.121	10.798	10	92.6	45.88
SIGNAVES	Assia (AO)	Valle d'Assia	Meduna	End	Acqua fluente	1951	6	351	16	53.57	56.1	1.121	55.092	42	76.2	210
ISOLA SERAVATI	Montebell D'organ (FC)	Emilia Romagna	Baldone Alunzore	End	Acqua fluente	1962	4	11	1000	600	5.61	2.647	107.91	90	83.4	484.39
LUIGIERAUDI	Emansque (CN)	Preonpe	Po	End	Assumito	1982	9	1048.600	129.27	600	62.8	0.696/0.816	1485.12	1180	80.1	410
PADALTO	Sadot (BS)	Lombardia	Anno	End	Assumito	1972	2	126.59	250	176.5	18.47	0.6	206.4	200	80.42	62.9
BARGLI	Vinengo (TV)	Lombardia	Piave	End	Assumito	1975	2	375	104.6	375	39.25	0.6	384.79	310	85.76	354
SAN GIACOMO	Fano Adriano (TE)	Emilia Romagna	Piave	End	Assumito	1947	4	656.6	83	83	47.25	1.121	547.5	448	81.83	290.89
DOMENICO CIMAROSA	Presenano (CB)	Abruzzo	Volturno	End	Assumito	1991	4	495	250.56	5000.000	52.362.8	1.02920.231	1216.7	1020	83.83	304
SAN PIORSANO	Selerno (BS)	Campania	Volturno	End	Assumito	1975	4	439.7	45.4	5000.000	52.362.8	1.02920.231	641.2	560	87.34	342
PROVVIDENZA	Campitelli (AQ)	Abruzzo	Oglio	End	Assumito	1949	5	1439.7	270	175	18.51	1.24850.451.4	22.778	170	74.65	70.46

Tabella 3.2: Dati di produzione energetica degli impianti idroelettrici italiani suddivisi per tipologia di impianto [11]

TIPOLOGIA DI IMPIANTO	NUMERO	POTENZA NOMINALE			POTENZA EFFICIENTE			PRODUCIBILITA' LORDA MEDIA ANNUA		DA APPORTI DI POMPAGGIO	TOTALE
		MOTORI PRIMI	GENERATORI	LORDA	NETTA	DA APPORTI NATURALI	di gronda				
IMPIANTI A SERBATOIO	n.	[MW]	[MVA]	[MW]	[MW]	[GWh]	[GWh]	volontario	[GWh]	[GWh]	
IMPIANTI A SERBATOIO A POMPA	193	12759.3	14442.3	12050.3	11939.4	11786.1	47.1	3367.9	15201.1		
IMPIANTI A BACINO	205	5484.5	6226.7	4932.5	4839.1	13978.7	27.9	3367.9	14006.5		
IMPIANTI AD ACQUA FLUENTE	4392	6661.1	7999.5	6226.8	6082.2	26215.4	9.3-	3367.9	26224.6		
ITALIA	4790	24904.8	28668.6	23209.6	22860.8	51980.1	84.2	3367.9	55432.2		

3.2 Analisi dei dati-Impianti ad accumulo

L'analisi del database risultante da questo primo step di ricerca bibliografica ha evidenziato la presenza di informazioni relative a solamente otto delle 23 totali centrali idroelettriche ad accumulo presenti sul territorio italiano. Risulta quindi un campione in esame corrispondente a circa il 35% degli impianti ad accumulo italiani, il quale può essere ritenuto abbastanza significativo. Dai dati ottenuti è stato possibile anche svolgere un confronto delle potenze e delle producibilità annue degli impianti ad accumulo rispetto alle altre centrali idroelettriche. Osservando i risultati della ricerca bibliografica, riportati in parte precedentemente, si nota come in generale la potenza installata nelle centrali ad accumulo sia significativamente superiore alla maggior parte delle centrali idroelettriche tradizionali. Infatti, la maggior parte delle centrali presentano una potenza installata che si aggira attorno ai 100 MW, mentre le centrali ad accumulo presentano potenze installate con un valore minimo circa tre volte superiore, senza prendere in considerazione i casi di impianti ad accumulo confrontabili con i più grandi impianti ad accumulo europei caratterizzati da potenze installate di oltre i 1000 MW. Come riportato in tabella 3.1, la potenza delle centrali ad accumulo corrisponde al 30% della potenza installata delle centrali idroelettriche italiane nella loro totalità. Questo è dovuto, come già descritto in precedenza, all'economia di scala che accompagna tali impianti e che richiede la realizzazione di impianti idroelettrici ad accumulo di elevata potenza e dimensione per generare un ritorno economico in tempi relativamente contenuti. Allo stesso modo si possono confrontare tra loro la producibilità annua delle centrali ad accumulo e la producibilità annua relativa alle centrali idroelettriche di stampo tradizionale. Riguardo alla producibilità degli impianti ad accumulo, come riportato nella tabella 3.1 si osserva come la producibilità annua media degli impianti ad accumulo sia nettamente superiore alla producibilità media degli impianti idroelettrici tradizionali a tal punto da risultare anche un ordine di grandezza superiore. In particolare, si nota come il 60% della produzione di energia elettrica delle centrali ad accumulo derivi dal pompaggio volontario, ovvero, la produzione energetica effettuata tramite il ricircolo della risorsa idrica. Infine, si osserva che la produzione energetica delle centrali ad accumulo ricopre solamente circa il 10% della produzione idroelettrica totale. L'andamento tipico della producibilità annua è strettamente legato al ruolo delle centrali ad accumulo. Come già descritto, le centrali ad accumulo sono in grado sia di fornire energia alla rete che assorbirla e tramite questa funzione vengono utilizzate per la gestione e la pianificazione della produzione energetica. La producibilità annua delle cen-

trali ad accumulo sembra inferiore rispetto alle centrali tradizionali; tuttavia, è necessario considerare la differenza tra il numero di impianti delle varie tipologie e soprattutto che le centrali ad accumulo, a differenza di quelle tradizionali, devono suddividere il tempo tra le funzioni di turbinaggio e di pompaggio che solitamente non possono avvenire contemporaneamente. Inoltre, la producibilità annua riportata all'interno della tabella 3.2 riporta solamente la produzione energetica in turbinaggio, senza considerare il consumo energetico per la realizzazione dei pompaggi. Si ricorda inoltre che, soprattutto in questi ultimi anni in cui è stato fortemente incentivato l'utilizzo di fonti rinnovabili per la produzione di energia elettrica in Italia, le centrali ad accumulo entrano in funzione prevalentemente nelle ore in cui gli impianti eolici e fotovoltaici raggiungono il picco di produzione energetica, operando in pompaggio per garantire il bilanciamento della potenza ed immagazzinare sotto forma di energia idraulica quell'energia che in caso contrario verrebbe totalmente persa, creando grossi problemi di stabilità di rete. I dati ottenuti vengono confermati da quelli rilevati e presentati da Terna nei loro report sulle centrali idroelettriche e che sono riportati in tabella 3.2.

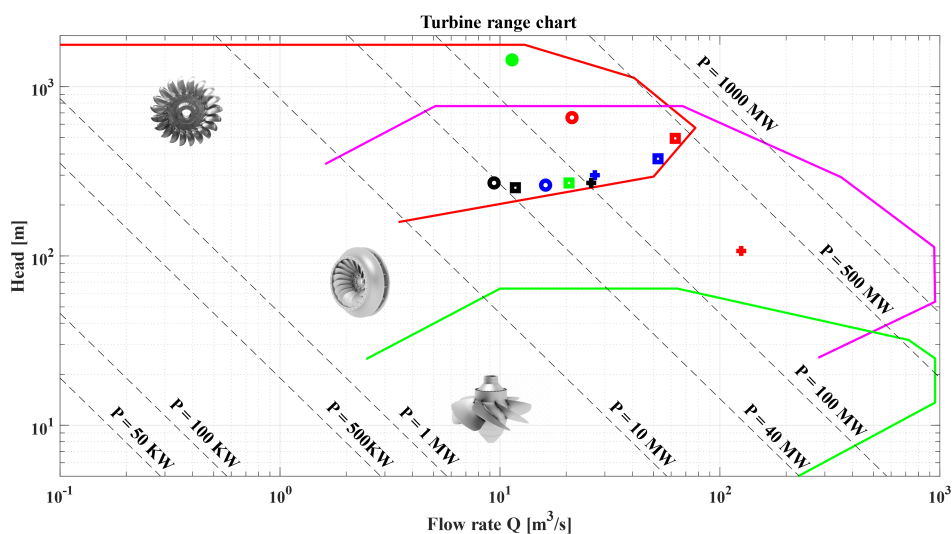


Figura 3.2: Diagramma del campo di funzionamento delle turbine idrauliche

Tabella 3.3: Tabella dati disponibili sulle macchine idrauliche installate nelle centrali ad accumulo

IMPIANTO	REGIONE	N	DATI							NUMERO TIPICO	SIMBOLO
			TURBINA	STADI	CADUTA	PORTATA	POTENZA	RENDIMENTO			
			[-]	[-]	[m]	[m ³ /s]	[MW]	[-]	[-]		
LUIGI EINAUDI	PIEMONTE	8	FRANCIS	4	262	16.125	133.125	80.3	0.698	bo	
		1	FRANCIS	2	300	27	125	78.65	0.816	b+	
BARGI	EMILIA ROMAGNA	2	FRANCIS	1	375	52.3	165	85.76	0.6	bs	
SAN GIACOMO	ABRUZZO	4	PELTON		656.6	21.25	112	81.82		ro	
FADALTO	VENETO	2	FRANCIS	1	107	125	120	91.45	1.12	r+	
DOM.CIMAROSA	CAMPANIA	4	FRANCIS	1	495	62.64	255	83.83		rs	
SAN. FIORANO	LOMBARDIA	2	PELTON		1439.7	11.35	140	87.33	0.136	go	
		2	PELTON		1439.7	11.35	140	87.33	0.163	g+	
PROVVIDENZA	ABRUZZO	2	FRANCIS	1	270	20.6	50	91.64	1.248	gs	
		2	FRANCIS	1	270	9.4	17.8	71.49	0.843	ko	
		1	FRANCIS	1	270	26	52.2	75.76	1.402	k+	
EDOLO	LOMBARDIA	8	FRANCIS	5	253	11.75	125	85.72	0.612	ks	

Sfruttando i dati raccolti, è stato possibile confrontare i valori di salto e di portata delle turbine idrauliche installate negli impianti ad accumulo analizzati con i campi di impiego consigliati in letteratura per la scelta della turbina idraulica più adatta all'applicazione richiesta, rappresentati schematicamente in figura 3.2.

Tale diagramma è stato poi popolato con i dati di salto e portata derivanti dagli impianti ad accumulo analizzati, indicando in blu le centrali ad accumulo dotate di turbine Francis e in rosso le centrali ad accumulo dotate di turbine Pelton. Come si evince dal diagramma le turbine installate nelle varie centrali ad accumulo rientrano nei rispettivi range di applicazione, confermando quanto proposto dallo stato dell'arte in tema di progettazione di tali macchine. Si può notare come le potenze in gioco di tali turbine siano molto elevate, in accordo con quanto descritto precedentemente e che la maggior parte delle macchine idrauliche si posiziona nella zona di sovrapposizione tra la turbina Pelton e Francis. Si giustifica la scelta dominante della turbina Francis a partire dalle indicazioni fornite dal diagramma statistico dei rendimenti in funzione del numero tipico di macchina K, figura 3.1a, in quanto al limite inferiore di salti caratteristici delle turbine Pelton si osservano rendimenti decisamente inferiori rispetto alla turbina Francis nelle medesime condizioni. Utilizzando le informazioni disponibili sulle centrali ad accumulo dotate di macchina idraulica reversibile, infine, è stata realizzata una verifica di scelta del gruppo reversibile tramite il diagramma di figura 3.3 che è stato popolato con i dati.

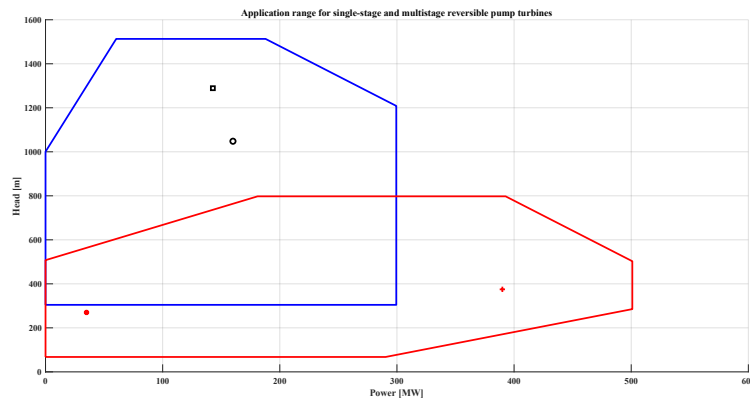


Figura 3.3: Diagramma campi di funzionamento pompe-turbine idrauliche reversibili monostadio e multistadio un funzione di potenza e prevalenza

Tabella 3.4: Tabella dati disponibili per macchine idrauliche reversibili negli impianti ad accumulo italiani

DATI							
IMPIANTO	REGIONE	PREVALENZA	POTENZA	GRAFICO	REALE	STADI	SIMBOLO
		[m]	[MW]			[-]	
LUIGI EINAUDI	Piemonte	1048	160	MULTI	MULTI	4	ko
BARGI	Emilia Romagna	375	390	MONO	MONO	1	r+
EDOLO	Lombardia	1289	142.85	MULTI	MULTI	5	ks
PROVVIDENZA	Abruzzo	270	35	MONO	MONO	1	r*

I dati riportati in nero rappresentano i dati di cui siamo certi della tipologia di macchina utilizzata. I punti rossi invece rappresentano le macchine di cui non siamo sicuri se la macchina sia monostadio. Si osserva come i dati ottenuti ricadano esclusivamente all'interno del proprio campo di scelta e in particolare nessun punto sia posizionato all'interno della zona in cui i range si sovrappongono.

Capitolo 4

Conclusione

Il lavoro di tesi ha portato alla realizzazione della prima versione del database caratterizzante le centrali idroelettriche attive presenti in Italia. È stato svolto un lavoro di ricerca bibliografica di tutte le informazioni disponibili che poi sono state inserite all'interno del database. Si sono descritte le centrali idroelettriche dal punto di vista generale per poi soffermarsi sulle centrali ad accumulo, argomento principale di questo elaborato. La descrizione delle centrali ad accumulo è stata esaustiva avendo cura di descrivere i principali aspetti ingegneristici caratterizzanti questo tipo di opera, partendo dalle opere di ingegneria civile con le opere di presa e costruzione dell'invaso, per poi passare all'ambito meccanico riguardante le macchine idrauliche installate. Per finire si è affrontato l'aspetto elettrico delle centrali idroelettriche ad accumulo e in particolare il loro ruolo di rilevanza nella gestione della produzione energetica e la stabilità della rete elettrica. Si è svolta poi un'analisi dei dati ottenuti per la realizzazione del database, confrontando la potenza e la producibilità annua delle centrali ad accumulo rispetto alle centrali idroelettriche tradizionali. Dai risultati ottenuti si è constatato il loro ruolo di importanza nonostante il numero contenuto di questi impianti rispetto alla totalità del settore idroelettrico. Infine, si è svolto un lavoro di verifica delle macchine idrauliche installate nelle centrali ad accumulo per controllare che fossero installate nei rispettivi campi di funzionamento.

Bibliografia

- [7] P. G. G. M. A. O. G. P. Vincenzo Dossena Giancarlo Ferrari, *Macchine a fluido*. CittàStudi, 2020.
- [8] W. W. H. A. P. R. Bruce R. Munson Theodore H. Okiishi, *Meccanica dei fluidi*. CittàStudi, 2020.
- [13] M. G. A. M. A. S. Giuseppe Chitarin Francesco Gnesotto, *Elettrotecnica 2 - Applicazioni*. Esculapio, 2020.
- [14] G. Ventrone, *Macchine per allievi ingegneri*. Cortina (Padova), 2006.
- [15] G. Krivchenko, *Hydraulic machines: turbines and pumps*. Lewis publishers, 1993.
- [16] G. Ferrari, *Hydraulic and thermal machines*. Esculapio, 2010.

Sitografia

- [1] NASA. (), indirizzo: <https://climate.nasa.gov/news/2865/a-degree-of-concern-why-global-temperatures-matter>. ultima consultazione (11/07/2024).
- [2] Europa. (), indirizzo: <https://www.mase.gov.it/pagina/cop-21-laccordo-di-parigi>. ultima consultazione (11/07/2024).
- [3] E. D. tedesco. (), indirizzo: <https://progettodighe.it>. ultima consultazione (11/07/2024).
- [4] Elettricasa. (), indirizzo: <https://www.elettricasa.it>. ultima consultazione (11/07/2024).
- [5] CVA. (), indirizzo: <https://cvaspa.it/centrale-di-gressoney>. ultima consultazione (11/07/2024).
- [6] Geomagazine. (), indirizzo: <https://www.geomagazine.it/2022/07/07/i-media-italiani-scoprono-le-batterie-ad-acqua-o-meglio-i-pompaggi-idroelettrici-degli-svizzeri>. ultima consultazione (11/07/2024).
- [9] E-distribuzione. «Servizi di flessibilità.» (), indirizzo: <https://www.e-distribuzione.it/progetti-e-innovazioni/il-progetto-edge/i-servizi-di-flessibilita--cosa-sono.html>. ultima consultazione (03/07/2024).
- [10] T. duepuntozero. (), indirizzo: <https://www.tecnologiaduepuntozero.it>. ultima consultazione (11/07/2024).
- [11] Terna. (), indirizzo: <https://www.terna.it/it>. ultima consultazione (03/07/2024).

[12] A. termotecnica italiana. (), indirizzo: <https://www.ati2000.it/>. ultima consultazione (11/07/2024).