



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea magistrale in Ingegneria Meccanica

**STUDIO E PROGETTAZIONE DI UN IMPIANTO MICRO-IDROELETTRICO:
RIQUALIFICAZIONE DI UN MULINO IN LOCALITA' SAN DONATO (FABRIANO)**

**DESIGN OF A MICRO-HYDROPOWER PLANT: REFURBISHMENT OF AN OLD WATER
MILL IN SAN DONATO (FABRIANO)**

Relatore:

Ing. Rossi Mosè, Ph.D.

Tesi di Laurea di:

Marzia Di Tommaso

Correlatore:

Ing. Margione Diego

A.A. 2022/2023

INDICE

NOMENCLATURA	4
INTRODUZIONE	7
1. Il settore idroelettrico in Europa e in Italia	9
1.1 Stato attuale e scenari futuri del settore	10
1.1.1 Idroelettrico nel Mondo	10
1.1.2 Idroelettrico in Europa ed Italia	10
1.2 Classificazione centrali idroelettriche	13
1.3 Il mini-idroelettrico.	17
2. Caso studio	19
2.1 Riqualificazione di un vecchio mulino in località San Donato, Fabriano (AN)	20
2.2 Opere civili e meccaniche	21
3. Dimensionamento e progettazione dell'impianto	26
3.1 Le paratoie	27
3.1.1 Componenti delle paratoie	28
3.1.2 Applicazioni principali e obiettivi delle paratoie	30
3.1.3 Movimento del diaframma e passaggio dell'acqua	31
3.1.4 Tipologie di paratoie	33
3.1.4.1 Paratoie a ribalta o ventola	33
3.1.4.2 Paratoia a cilindro	34
3.1.4.3 Stoplog	35
3.1.4.4 Paratoia scorrevole	36
3.1.4.5 Paratoie a cingoli	39
3.1.4.6 Paratoia obliqua	40
3.1.4.7 Paratoie a rulli	40
3.1.4.8 Paratoia segmento	41
3.1.4.9 Paratoia a settore	42
3.1.4.10 Paratoia Stoney	43
3.1.4.11 Paratoia a tamburo	44
3.1.4.12 Paratoia a trappola d'orso	44
3.1.4.13 Paratoia a ruota fissa	45
3.1.5 Criteri di selezione delle paratoie	46
3.2 Condotte interrato e forzate	48

3.3 Sgrigliatore	49
3.4 Vasca di carico.....	50
3.5 Turbina	50
3.5.1 Classificazione e tipologia di turbine	50
3.5.1.1 Turbina Pelton	51
3.5.1.2 Turbina Francis	53
3.5.1.3 Turbina Kaplan.....	56
3.5.1.4 Turbina Banki.....	57
3.5.1.5 Turbina Turgo.....	58
3.5.2 Scelta delle possibili turbine da installare.....	59
3.6 Generatori elettrici	63
4. Risultati e commenti.....	66
4.1 Analisi tecnica dell'impianto.....	67
4.1.1 Scelta della turbina idraulica	67
4.1.2 Scelta definitiva dell'impianto.....	76
4.2 Analisi economica dell'impianto.....	84
CONCLUSIONI	88
REFERENZE	90
INDICE FIGURE.....	91
BIBLIOGRAFIA	93

NOMENCLATURA

η_g = rendimento globale turbina

η_m = rendimento del moltiplicatore dei giri

η_{gen} = rendimento del generatore

η_{tr} = rendimento del trasformatore

φ = coefficiente di efflusso;

g = accelerazione gravitazionale $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

H = salto netto $[m]$

\vec{c}_1 = velocità d'uscita del getto dal distributore $\left[\frac{m}{s}\right]$

\vec{u}_1 = velocità di trascinamento $\left[\frac{m}{s}\right]$

\vec{v}_1 = velocità assoluta $\left[\frac{m}{s}\right]$

ρ = densità del fluido $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

Q = portata acqua $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

v_i = velocità del fluido in ingresso della girante $\left[\frac{m}{s}\right]$

v_u = velocità del fluido in uscita della girante $\left[\frac{m}{s}\right]$

D = diametro della girante $[m]$

n = numero di giri $\left[\frac{giri}{min}\right]$

G = grado di reazione

H_u = salto utile $[m]$

η_T = rendimento turbina

η_i = rendimento idraulico turbina

P_m = potenza meccanica utile [W]

p_e = pressione in ingresso del diffusore [Pa]

v_e = velocità in ingresso del diffusore $\left[\frac{m}{s}\right]$

p_v = tensione di vapore [Pa]

z_e = quota ingresso del diffusore [m]

z_0 = quota dello scarico [m]

h_f = perdite per attrito

Y = perdita di carico tra le sezioni in ingresso del diffusore

$NPSH_A$ = Net Positive Suction Head Available [mca]

$NPSH_R$ = Net Positive Suction Head Required [mca]

ω = velocità di rotazione della turbina [s^{-1}]

P = Potenza [W]

η = rendimento globale

S = spinto sulle pale [N]

n_c = numero di giri caratteristico

n_s = numero di giri specifico $\left[\frac{m^{\frac{3}{4}}}{s^{\frac{1}{2}}}\right]$

H_s = minima altezza d'installazione della girante [m]

p_{atm} = pressione atmosferica [Pa]

P_{ideale} = potenza ideale [kW]

\dot{m} = portata volumetrica [kg/s]

v_1 = velocità assoluta [m/s]

u_1 = velocità di trascinamento [m/s]

w_1 = velocità relativa [m/s]

w_{1t} = velocità relativa, componente di trascinamento [m/s]

w_{1r} = velocità relativa, componente relativa [m/s]

α_1 = angolo compreso tra velocità assoluta e relativa [°]

D_1 = diametro esterno [m]

D_2 = diametro interno [m]

n_g = numero di giri del generatore

P_e = potenza estraibile [kW]

u_e = velocità di trascinamento esterna [m/s]

$D_{girante}$ = diametro girante [m]

$v_{1\ esterno}$ = velocità assoluta esterna in ingresso [m/s]

$v_{assiale\ ideale}$ = velocità assiale ideale [m/s]

$w_{1\ esterno}$ = velocità relativa esterna [m/s]

$v_{1\ diametro\ pale}$ = velocità assoluta al diametro medio delle pale [m/s]

w_2 = velocità relativa in uscita [m/s]

β_2 = angolo compreso tra la velocità di trascinamento e quella relativa in uscita [°]

σ = coefficiente di Thoma [m]

n_{qe} = numero caratteristico

$v_{fine\ divergente}$ = velocità in uscita dal diffusore [m/s]

$S_{fine\ divergente}$ = sezione di fine diffusore [m²]

F = forza rappresentante il carico distribuito [N]

INTRODUZIONE

L'energia rinnovabile è una fonte di energia alternativa a quella tradizionale e ha come caratteristica quella di non emettere sostanze inquinanti o che alterino il clima.

Le principali fonti di energia rinnovabile è rappresentata da fonti che non risultano soggette ad esaurimento come: la luce solare, il vento, l'acqua, il calore geotermico e le biomasse. Sono fonti utilizzate principalmente per la produzione di energia elettrica, ma anche per la microgenerazione di energia elettrica per esempio in paesi in via di sviluppo o aree remote.

I sistemi di energia rinnovabile diventano sempre più efficienti, grazie alle nuove tecnologie, ma anche più economiche.

In particolare, l'energia idroelettrica rappresenta una tra le più antiche fonti di energia rinnovabile e tra le più diffuse secondo IRENA (International Renewable Energy Agency); nel 2022, la potenza complessiva degli impianti idroelettrici rappresenta circa il 30% del totale delle fonti rinnovabili presenti.

Nonostante la sua presenza longeva, sono state sviluppate numerose tecnologie che permettono di trasformare in elettricità quasi il 90 % dell'energia che l'acqua possiede. Inoltre, gli impianti idroelettrici presentano un basso impatto ambientale ed un'elevata efficienza, fattori che partecipano ad un'ottima resa finale degli impianti.

Il progetto in esame riportato in questa tesi di laurea consiste nella riqualificazione di un antico mulino, sito in località San Donato (Fabriano - AN) in una centrale micro-idroelettrica. Per quanto riguarda la riqualificazione, questa consiste nella ristrutturazione dell'edificio esistente e della rimessa in uso dell'opera di presa e del canale di adduzione, mentre per la centrale idroelettrica sono state progettate, dimensionate e realizzate le tre paratoie che servono per la pulizia dell'acqua insieme all'utilizzo dello sgrigliatore. Infine, è stata dimensionata e realizzata la turbina scelta per la centrale e definito il generatore correlato.

Importante è anche la valutazione economica che viene svolta su questa tipologia di progetto poiché permette di valutare la convenienza economica di utilizzare questa

fonte di energia. Sono stati presi in considerazione vari parametri per fare questa valutazione, dal costo delle singole macchine a quello dell'energia idrica in Italia, fino a valutare quanta potenza si riesce a ricavare da una centrale che presenta delle caratteristiche similari.

Nel dettaglio, la tesi è sviluppata in base a quanto segue:

- Nel primo capitolo viene presentata una panoramica del settore idroelettrico nel Mondo e in Europa, in particolare in Italia. Inoltre è presente la classificazione delle centrali idroelettriche ponendo attenzione alle centrali mini-idroelettriche;
- Nel secondo capitolo è definito l'obiettivo di studio e i relativi lavori in termini di opere civili e meccaniche che sono state svolte;
- Nel terzo capitolo sono esposte le varie classificazioni delle diverse apparecchiature relative all'impianto idroelettrico oggetto di studio: paratoie, sgrigliatore, turbine, generatori. Inoltre sono descritte le caratteristiche delle condotte forzate e della vasca di carico.
- Il quarto capitolo presenta l'intera analisi tecnico-economica di questo progetto. Sono definite: le diverse opere civili svolte, la progettazione e il dimensionamento delle tre paratoie che fanno parte di questa centrale e la progettazione dello sgrigliatore. È fondamentale il confronto tra due diverse turbine idrauliche, precisamente Francis e Banki, per valutare quale delle due, dopo progettazione preliminare, permetta di recuperare maggiore energie a parità di efficienza ed ingombri. Una volta scelta la macchina idraulica motrice, si affronta quindi la parte relativa al suo dimensionamento e all'accoppiamento col generatore elettrico.

1. Il settore idroelettrico in Europa e in Italia.

In questo capitolo verrà descritto quello che è il settore idroelettrico sia nel Mondo che in Europa specificatamente l'Italia, andando a confrontare il loro impiego, la loro numerosità e quello che si prevede abbia come sviluppo futuro.

Si procede poi con la classificazione delle centrali idroelettriche in base: al salto geodetico, alla portata sfruttabile ed alla potenza. Si parlerà poi nello specifico del settore mini-idroelettrico.

1.1 Stato attuale e scenari futuri del settore

1.1.1 Idroelettrico nel Mondo

A livello globale l'energia idroelettrica rappresenta il 50% dell'elettricità prodotta. Negli scorsi 15 anni la Cina è stata la leader di questo mercato, in quanto da sola risultava essere la responsabile del 50% dell'espansione della capacità lorda globale. Oltre la Cina, India e Brasile contribuiscono per circa il 30% alla capacità idroelettrica mondiale.

Quindi a partire dal 2005, la Cina ha la più grande fetta di sviluppo idroelettrico nel mondo, seguito da: Brasile, Stati Uniti d' America, Canada, Russia, Giappone e India.

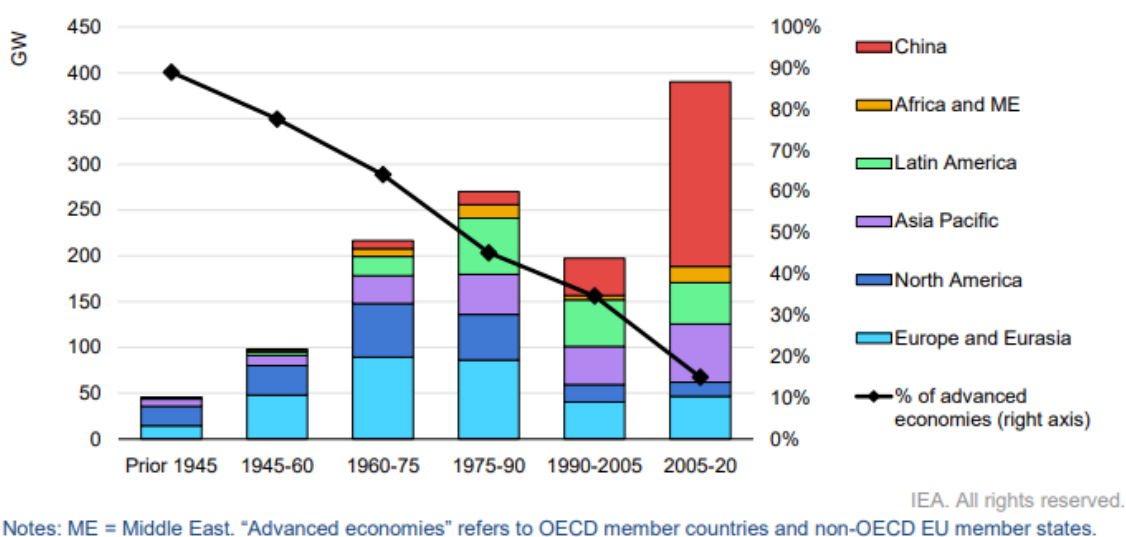


Figura 1: Capacità idroelettrica nel mondo nel corso degli anni [1]

1.1.2 Idroelettrico in Europa ed Italia

In Europa è installato il 19% della potenza idroelettrica mondiale che corrisponde a 254 GW e ad una produzione di 670 TWh, ovvero il 16% della produzione complessiva del continente [1].

Il settore idroelettrico ha ormai una piena maturità in Europa, come si evince dal fatto che tra il 2015 e il 2020 la sua capacità è aumentata solo del 6% (+ 14 GW).

Tuttavia, l'aumento della potenzialità dell'idroelettrico in Europa, soprattutto quello di grande scala, risulta essere limitata perché diverse normative e diversi aspetti legati

all’impatto ambientale in combinazione con lo sfruttamento dei principali corsi d’acqua, rendono difficile la loro realizzazione.

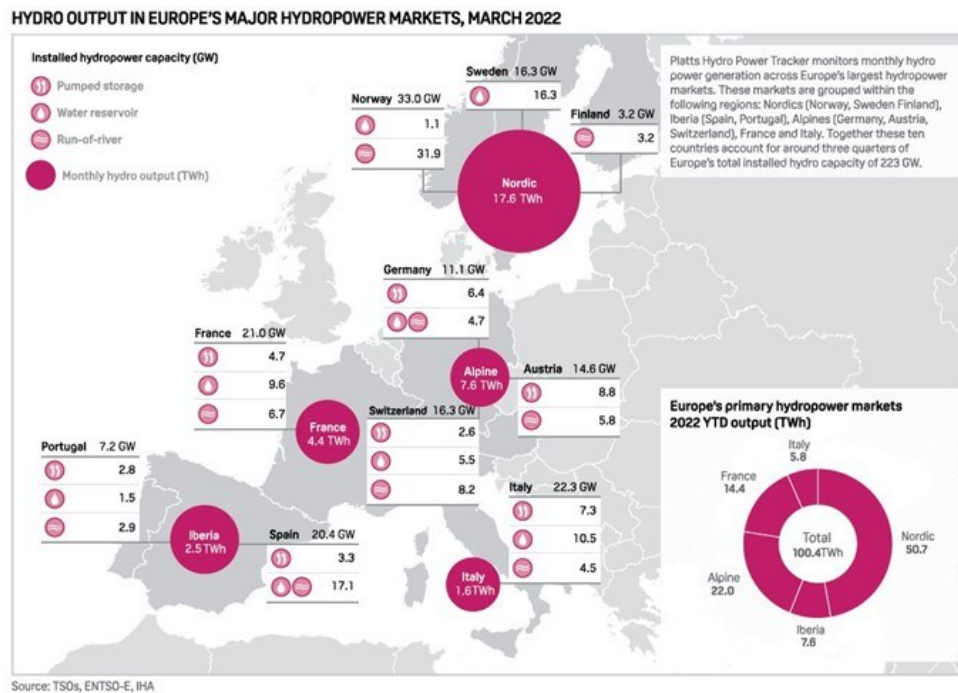


Figura 2: Grafico della distribuzione dell'energia idroelettrica in Europa [2]

L’idroelettrico rappresenta la fonte rinnovabile con la storia più longeva in Italia, partendo dagli ultimi anni dell’ 800 quando era vi era un forte sviluppo di sistemi idraulici che permettevano di ricavare energia pulita dall’acqua [2].

Nel 2018, secondo Terna, il numero delle centrali idroelettriche in Italia è pari a 4337.

Nel 2019, Terna ha calcolato una crescita netta di 64 impianti che comprendono 74 nuovi ingressi e 10 dismissioni.

Tuttavia la distribuzione delle centrali idroelettriche non è uniforme in Italia; infatti, la maggior parte degli impianti e della potenza installata si trova lungo le catene Alpine inoltre, la conformazione fisica dell’ Italia permette di avere forti pendenze del terreno che aiutano nella produttività degli impianti idroelettrici.

Tabella 1: Dati relativi alla distribuzione delle centrale idroelettriche in Italia

REGIONI	NUMERO IMPIANTI	POTENZA NAZIONALE
Piemonte	930	14.6%
Lombardia	661	27.2%
Trento	268	19.3% (insieme a Trento)
Bolzano	543	
Veneto	392	6.2%
Valle d'Aosta	173	5.2%
Friuli Venezia Giulia	233	2.8%
Abruzzo	71	5.4%
Calabria	54	4.1%
Umbria	45	2.8%

Secondo il GSE, al termine del 2018, l' Italia ha raggiunto una capacità massima di idroelettrico installato di 18.94 GW pari al 35% della potenza nazionale ottenuta da fonti rinnovabili.

Nel dicembre del 2022, la potenza idroelettrica installata era pari ad un totale di 21.816 MW ottenuti da 4789 impianti, di cui 339 con una potenza superiore a 10 MW pari all'83 % della potenza installata.

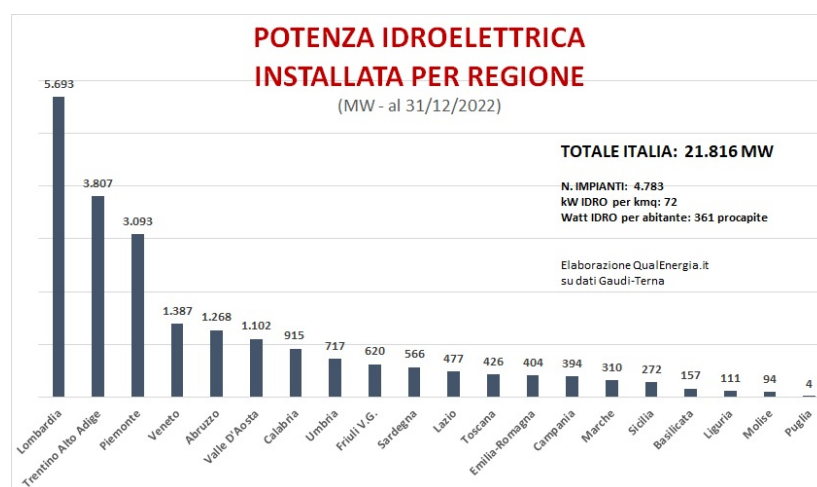


Figura 3: Potenza idroelettrica installata per regione in Italia [3]

Nel 2022 l'idroelettrico ha generato quasi 28 *TWh*, in calo del 37.7% rispetto al 2021, coprendo l'8.3% della richiesta elettrica richiesta a livello nazionale. La causa di questa diminuzione di produzione è principalmente imputata alle condizioni metereologiche, ma ci sono anche altre cause tra cui la dismissione di alcuni impianti idroelettrici di grossa taglia.

Per quello che concerne la prospettiva di questa fonte d'energia, in Italia non sembra essere prevista una crescita esponenziale rispetto alle altre fonti rinnovabili; ma si hanno molteplici prospetti di sviluppo soprattutto per quello che riguarda lo sfruttamento di fiumi e la riqualificazioni di vecchie centrali, aumentando quindi sia la capacità, anche se di poco rispetto al panorama nazionale, che l'efficienza degli impianti stessi.

In Italia la maggior parte delle centrali è datata, il che comporta una diminuzione del potenziale idroelettrico. Inoltre, i cambiamenti climatici sono un'altra forte causa della riduzione di energia prodotta da questa fonte rinnovabile..

Sia le nuove tecnologie che la digitalizzazione permettono di avere impianti più flessibili ma e longevi, tra cui la manutenzione predittiva e dispositivi IoT (Internet of Things). Queste migliorie permettono di avere buone efficienze anche con diversi regimi di portata, ma anche una migliore gestione dei flussi d'acqua e di energia in funzione del fabbisogno energetico da soddisfare.

L' IoT sta entrando fortemente nell'operatività delle centrali idroelettriche, aumentandone la loro sostenibilità

Si può dunque affermare che, anche se il solare e l'eolico saranno protagonisti importanti del futuro panorama energetico europeo, l'idroelettrico manterrà comunque una quota maggiore di un terzo nel panorama globale delle energie rinnovabili.

1.2 Classificazione centrali idroelettriche

Le centrali idroelettriche si possono classificare: in base al salto geodetico sfruttabile, alle portate elaborate ed alla potenza massima estraibile. In base alle caratteristiche

precedentemente menzionate s'identifica, quindi, la tipologia di macchina più idonea da installare in un determinato sito.

Per salto geodetico s'intende il dislivello presente tra la quota in cui è presente la risorsa idrica da sfruttare e il livello a cui, la stessa, viene restituita dopo essere stata elaborata dalla turbina idraulica. La portata, invece, è il volume d'acqua che viene elaborata dall'impianto nell'unità di tempo. Infine, la potenza è data dal prodotto tra la portata volumetrica elaborata dalla turbina e dal salto geodetico, moltiplicata a sua volta per la densità del liquido elaborato $[\frac{kg}{m^3}]$ e per l'accelerazione gravitazionale $g [\frac{m}{s^2}]$ e dal rendimento totale d'impianto.

$$P = Q \cdot H \cdot \rho \cdot g \cdot \eta \quad [W] \quad (1)$$

Il rendimento totale dell'impianto è definito tramite il prodotto dei rendimenti delle singole componenti idrauliche della centrale, ovvero il rendimento: globale della turbina, del moltiplicatore di giri, del generatore e del trasformatore.

$$\eta = \eta_g \cdot \eta_m \cdot \eta_{gen} \cdot \eta_{tr} \quad (2)$$

Per quanto riguarda la classificazione in base al salto geodetico si ha:

- Salti elevati: maggiori o uguali a 100 m;
- Salti medi: compresi tra 30 m e 100 m;
- Salti bassi: compresi tra 2 m e 30 m.

Per quanto riguarda la classificazione in base alle portate volumetriche da elaborare si ha:

- Piccola portata: minore di 10 m³/s;
- Media portata: compresa tra 10 m³/s e 100 m³/s;
- Grande portata: compresa tra 100 m³/s e 1000 m³/s;
- Altissima portata: maggiore di 1000 m³/s.

La suddivisione che viene fatta in base alla taglia degli impianti è basata sulla potenza installata, la quale definisce la tipologia dell'impianto in:

- Grande idroelettrico: potenza superiore a 100 MW;
- Medio idroelettrico: potenza compresa tra 10 MW e 100 Mw;
- Piccolo idroelettrico: potenza compresa tra 1 MW e 10 MW;
- Mini-idroelettrico: potenza compresa tra i 100 kW e 1 MW;
- Micro-idroelettrico: potenza compresa tra i 5 kW fino a 100 kW;
- Pico-idroelettrico: potenza inferiore a 5 kW (generalmente sono centrali destinate all'autoconsumo di utenze isolate).

Per quanto concerne la classificazione in portate, le centrali idroelettriche si possono classificare in tre tipologie di impianto: centrali ad acqua fluente, centrali a bacino e centrali ad accumulo (pump-hydro).

- Le centrali ad acqua fluente utilizzano la portata naturale di un corso fluviale che, presenta dei piccoli salti durante il flusso dell'acqua nell'alveo. In questo modo l'acqua viene convogliata tramite un canale di derivazione, senza quindi l'uso di condotte forzate, in turbina.

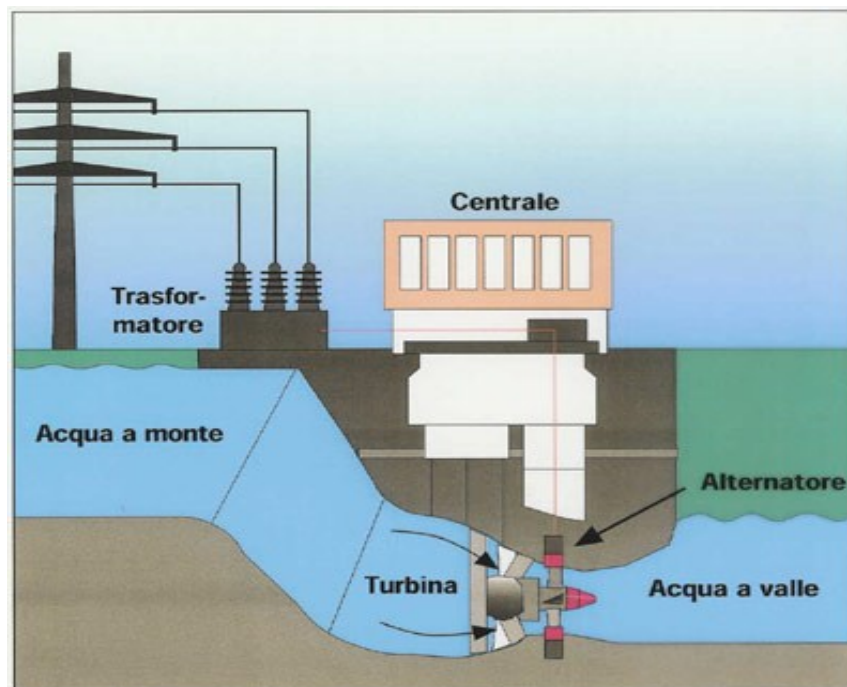


Figura 4: Schema di un impianto idroelettrico ad acqua fluente [4]

- Le centrali a bacino, invece, usano un bacino di raccolta dell' acqua (di carica), che può essere naturale o realizzato con la formazione di una diga. L'acqua viene convogliata mediante condotte forzate dal bacino fino alle turbine idrauliche che generano energia meccanica e convertita successivamente in energia elettrica mediante un generatore elettrico. La presenza del bacino di monte permette di controllare le portate elaborate in turbina e, di conseguenza, gestire e controllare al meglio la capacità di produzione di energia.

A valle dell'impianto si trova un bacino di raccolta (di calma) dove vengono scaricate le acque che hanno attraversato le turbine. Dopodiché, queste vengono reimmesse nel corso d'acqua originario.

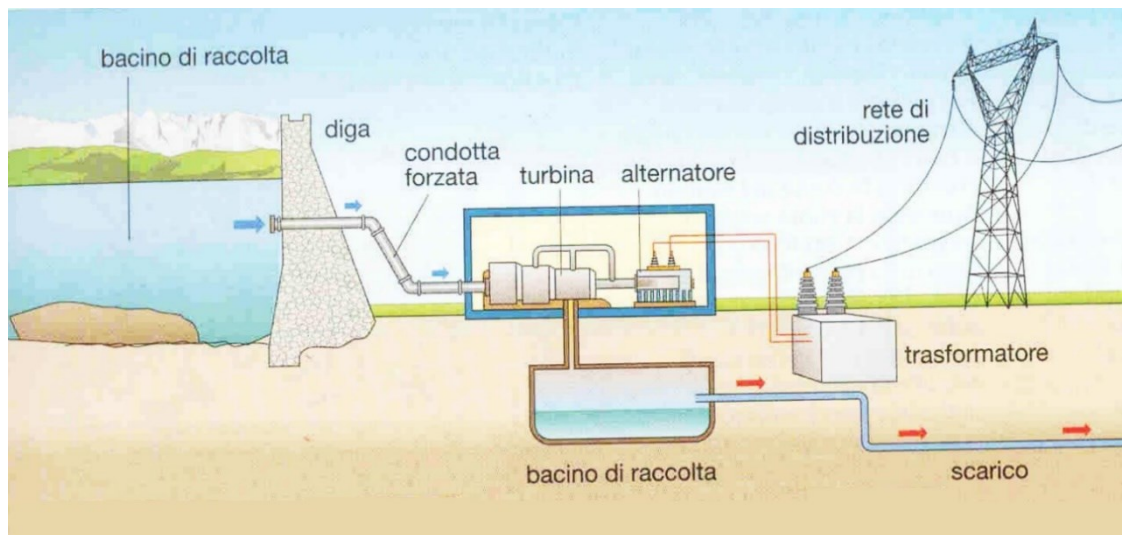


Figura 5: Schema di un impianto idroelettrico a bacino [4]

- Le centrali ad accumulo hanno due serbatoi posizionati a quote differenti, generalmente noti come bacino di monte e di valle, dove quello a valle funziona da riserva energetica. Nelle ore o nei momenti di minore richiesta energetica, l'acqua viene pompata dal bacino di valle a quello di monte tramite una stazione di pompaggio; in questo modo si riesce ad avere maggiore sicurezza nei momenti di maggiore richiesta energetica. In alcuni impianti, al posto del sistema di pompaggio si può utilizzare la turbina di tipo Francis che, grazie alle sue caratteristiche di irreversibilità (funzionamento in modalità turbina nelle fasi di produzione e di pompa nelle fasi di ripristino delle condizioni del bacino di

monte), permette di riportare l'acqua al serbatoio di monte. Questo tipo di impianto prende il nome di "pump-hydro".

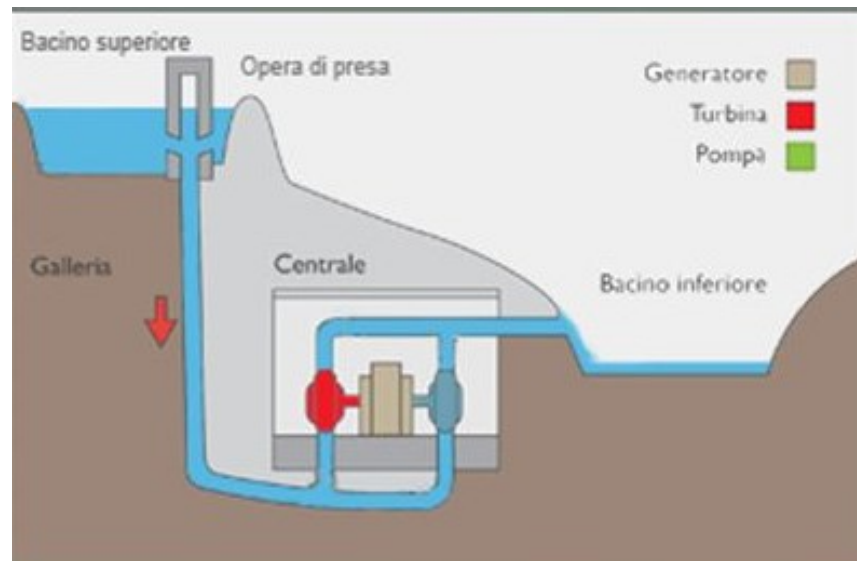


Figura 6: Schema di un impianto idroelettrico con bacini di accumulo [5]

1.3 Il mini-idroelettrico.

La maggior parte delle nuove installazioni idroelettriche che vengono e verranno installate in Italia appartengono alla categoria del mini-idroelettrico, ovvero impianti di taglia compresa tra i 100 kW ed 1 MW [3].

Il mini-idroelettrico è considerato uno dei settori nel quale si possono raggiungere maggiori sviluppi, perché:

- Può contribuire alla copertura della domanda elettrica nazionale poiché, anche se di potenza limitata, possono essere dislocati ed installati in diverse zone fluviali. Contribuiscono inoltre alla generazione distribuita e all'ampliamento del mix energetico;
- Salvaguardando l'ambiente in quanto le loro modalità costruttive sono di scarso impatto sul territorio;
- I costi di installazione e i tempi di ritorno degli investimenti economici sono più competitivi a differenza di altre fonti rinnovabili per via delle incentivazioni previste.

Per quanto riguarda gli impianti mini-idroelettrici, questi presentano sia vantaggi che svantaggi.

I vantaggi che si possono ottenere tramite l'installazione di un impianto mini-idroelettrico sono relativi a:

- Modesto impatto ambientale rispetto al territorio in cui questo si trova;
- Un contenimento degli investimenti, in quanto non richiede strutture imponenti e costose, avendo di conseguenza un tempo di ritorno di investimento minore di 10 anni;
- Minore e poco onerosa manutenzione dell'impianto, poiché non richiede un personale fisso ma un intervento saltuario e programmato da parte di un operatore per verificarne il funzionamento;
- Gestione da remoto con l'ausilio di sistemi di comando e controllo tramite PLC, ma anche monitorare i dati dall'impianto stesso;
- Sfruttamento anche di modesti corsi d'acqua;
- Miglioramento dell'assetto idrogeologico del territorio circostante l'impianto;
- Inserimento dei sistemi di distribuzione ed irrigazione di acque già presenti sul territorio.

Gli svantaggi che si possono incontrare invece sono relativi a:

- Possibilità di avere tecnologie di costruzione dell'impianto che siano di bassa efficienza e poco moderne;
- Danneggiato del patrimonio naturalistico per via di cantieri, strade ed opere di presa.

2. Caso studio

In questo capitolo verrà fornita una panoramica sul sito relativo all'installazione dell'impianto micro-idroelettrico. In particolare, vengono definiti e descritti le lavorazioni delle opere civili e meccaniche.

2.1 Riqualificazione di un vecchio mulino in località San Donato, Fabriano (AN)

Il mulino in esame è localizzato nel Comune di Fabriano (AN), nei pressi della strada provinciale N.16 che collega Fabriano a Sassoferrato e si presenta sulla riva destra del fiume Marena. A circa 6.7 km a nord-ovest da Fabriano, il fiume è attraversato da una briglia di sbarramento dal quale si ha un salto geodetico di 7 m. A monte di questa si ha un bacino di accumulo dal quale viene prelevata l'acqua che verrà convogliata inizialmente nella vasca di accumulo e poi elaborata dalla centrale idroelettrica.

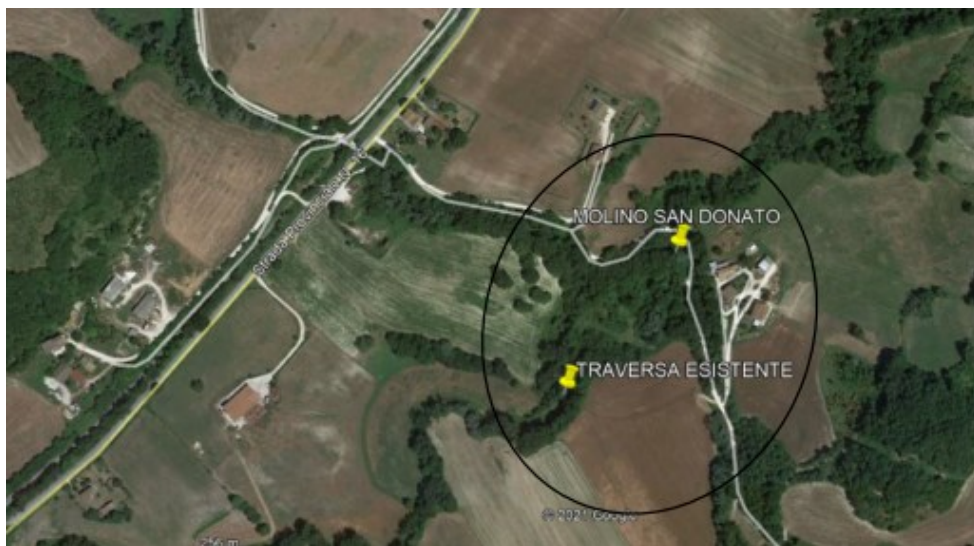


Figura 7: Panoramica geografica del fiume Marena e del sito in esame

L'edificio in cui è stato installato l'impianto micro-idroelettrico è un vecchio mulino che sfruttava l'energia derivante dall'acqua per la macina del grano. A monte dello stabile è ancora presente un salto idraulico da cui inizia un canale con tre bocche di carico che alimentavano tre giranti.

L'obiettivo del presente lavoro di tesi riguarda la riqualificazione di tale edificio e la realizzazione della centrale idroelettrica, la cui energia elettrica prodotta verrà venduta alla rete elettrica nazionale.



Figura 8: Edificio prima dei lavori

2.2 Opere civili e meccaniche

Il progetto prevede anche la ristrutturazione edilizia dell'edificio con un recupero integrale delle murature interne ed esterne.

Per ciò che concerne l'impianto micro-idroelettrico, invece si è utilizzato il canale di adduzione già esistente ristabilendo la quota di derivazione che permetterà l'alimentazione del canale stesso. Ciò viene fatto mediante l'abbassamento di 0.3 m del fondo dell'imbocco rispetto alla quota della briglia.



Figura 9: Presa del canale di derivazione con quota di +0.8 m rispetto quella attuale dei alveo fluviale

Il canale esistente è stato consolidato mediante calcestruzzo fino alla paratoia sghiaiatrice, mentre la parte restante è rimasta invariata a parte la sua pulizia dalla vegetazione.

Prima del canale di adduzione si trova: la paratoia di testa canale che va a regolare il flusso d'acqua all'interno del canale fino alla vasca di carico, e una paratoia sghiaiatrice che è già presente e che verrà riutilizzata così com'è ora.



Figura 10: Riprofilatura del canale d'adduzione esistente



Figura 11: Paratoia sghiaiatrice originale

Il canale prosegue fino alla vasca di carico che è posizionata vicino alla struttura per evitare problemi d' infiltrazioni. Sono presenti una paratoia dissabbiatrice che elimina i detriti dall'acqua prima che questa entri nella condotta, e uno sgrigliatore che permette la pulizia dell'acqua da detriti che hanno una dimensione maggiore di 10 mm. La paratoia lavora attraverso un braccio telescopico che viene comandato da un servomotore oleodinamico.



Figura 12: Vasca di carico del mulino attualmente presente

Una volta separato dai detriti, il flusso d'acqua passa all'interno di una condotta forzata interrata (DN 750) in acciaio fin dentro la centrale mini-idroelettrica che verrà posta nella parte inferiore dell'edificio attuale.

La portata dell'acqua elaborata viene ceduta nuovamente al corso d'acqua iniziale tramite un canale di scarico munito di un diffusore che seguirà il percorso già esistente di scarico del mulino.

Il progetto nella sua interezza è consistito nelle seguenti opere civili e meccaniche:

- Ristrutturazione integrale dell'edificio con recupero della muratura portante;
- Riattivazione dell'opera di presa già esistente con un abbassamento del fondo del canale in ingresso di 0.3 m;
- Riprofilatura del canale in terra esistente per l'alimentazione della vasca di carico;
- Installazione della paratoia di testa canale e sghiaiatrice, e di uno sgrigliatore oleodinamico al fine di ottenere acqua pulita prima dell'ingresso nella condotta;
- Realizzazione di una condotta interrata (DN750) di lunghezza circa 30 m che permette all'acqua di fluire dalla vasca di carico alla centrale idroelettrica. A ridosso della vasca di carico è prevista una tubazione con aeroforo per.
- Realizzazione della centrale mini-idroelettrica nell'area occupata dal vecchio edificio.
- Realizzazione di un diffusore di scarico interrato che permette di recuperare, energia cinetica allo scarico e, di conseguenza, consente alla turbina di sfruttare un maggiore salto netto.

L'energia elettrica che viene prodotta dalla centrale, viene ceduta alla rete di distribuzione elettrica locale. La connessione della centrale idroelettrica è in bassa tensione in quanto è un impianto che presenta una potenza inferiore ai 100 kW. Maggiori informazioni relative all'allaccio dell'impianto mini- idroelettrico alla rete

elettrica non vengono fornite in questo elaborato di tesi in quanto fuori dall'obiettivo di lavoro.

3. Dimensionamento e progettazione dell'impianto

In questo capitolo si definiscono le principali macchine idrauliche ed elettromeccaniche per un corretto funzionamento di una centrale idroelettrica, come paratoie, sgrigliatore, turbine e generatore. Oltre a questi macchinari, si andranno a descrivere quelle che sono le tipologie di condotte necessarie per il trasferimento dell'acqua dalla vasca di carico all'ingresso in turbina.

3.1 Le paratoie

La costruzione delle paratoie è connessa allo sviluppo, dell'irrigazione, dell'approvvigionamento idrico e dei sistemi di navigazione fluviale [4].

In principio l'acqua veniva fermata da piccole dighe e successivamente convogliata all'interno di canali di irrigazioni laterali, mentre quella in eccesso veniva scaricata al di sopra dell'argine. Sono state costruite quindi delle "dighe mobili" che, potevano essere rimosse dalla loro posizione naturale in modo da permettere il passaggio dell'acqua in eccesso e consentire maggiore sicurezza e flessibilità nell'esercizio delle opere idrauliche.

I primi canali che servivano per il trasporto delle merci e per lo scarico di acque alluvionali furono costruiti in Cina. Difatti, costruendo due dighe ad una determinata distanza, le barche avevano accesso alla vasca che si creava tra le due dighe e il loro livello dell'acqua poteva essere alzato o abbassato lentamente.

In seguito alla Cina, lo sviluppo di tale paratoia si è poi spostato nei Paesi Bassi che, seguendo il modello cinese, costruirono paratoie provviste di contrappesi in piombo e dotati di sacchi che permettevano di svuotare gradualmente i bacini di accumulo.

Nel 1795 fu completato il primo canale con la presenza di paratoie in America, ovvero il canale di Little Falls. Le paratoie presentavano un design insolito, composto da due diaframmi a battente in legno posti all'estremità di ogni paratoia; ma invece di chiudersi su un piano planare, queste si chiudevano per formare un angolo che punti alla corrente, che permetteva il loro bloccaggio grazie alla pressione dell'acqua. Vicino alla base delle grandi paratoie erano presenti saracinesche o piccole piastre che, ruotando verticalmente, permettevano all'acqua di entrare o uscire da un bacino.

Di una paratoia a segmenti, la più antica applicazione risale al 1853 sul fiume Senna dove furono installate quattro paratoie larghe 8.75 m e alte 1 m. Queste paratoie furono progettate dall'ingegnere Poirée che inventò anche la diga ad ago, usata per la prima volta nel 1834 sul fiume Yonne.

Un'altra applicazione fu quella sul delta del Nilo nel 1860 dove furono costruite 132 paratoie a segmenti larghe 6 m e alte 5.1 m per le dighe Rosetta e Damietta. Le braccia

della paratoia erano soggette a trazione e dunque chiamati in inglese “ cylindrical gates with radiuses subjected to traction”, ovvero paratoie cilindriche con raggio soggetto a trazione.

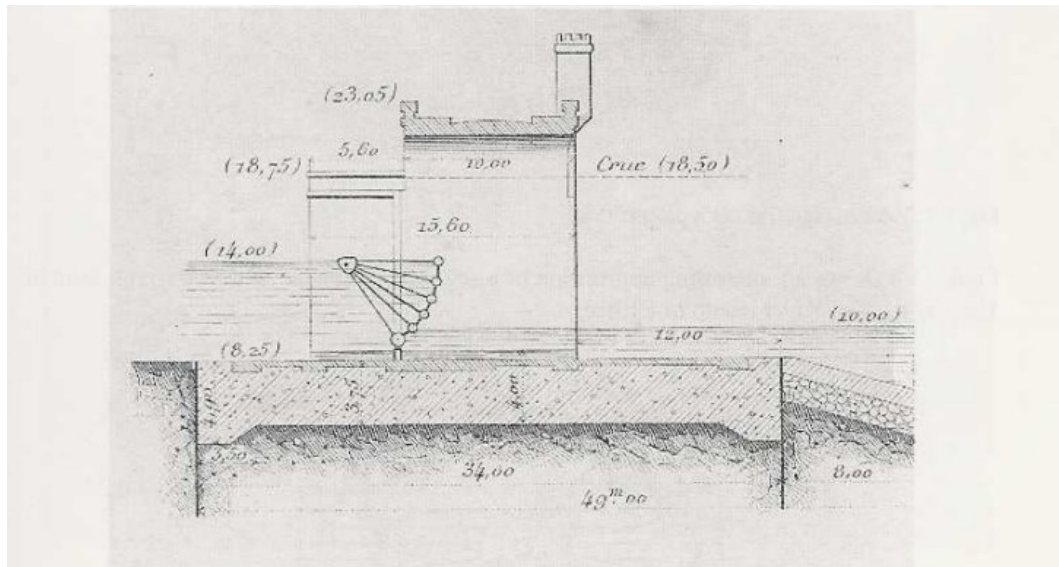


Figura 13 Retro di una paratoia a segmenti, Diga di Rosetta, Egitto (1860) [6]

Nel 1870 furono inventate in America le paratoie parallele a segmenti in legno, che presentavano tre bracci radiali posti in movimento mediante due catene installate a monte dell'intelaiatura. Questa paratoia sarebbe stata installata in tandem affinché potesse funzionare come paratoia di chiusura, oltre ad avere il compito di riempire e svuotare la vasca.

Le prime apparizioni di questi tipi di paratoie in Europa avvennero in Germania, a Berlino, intorno al 1894-1895 dove una paratoia presentava una luce di 12 m ed un'altezza di 1.87 m.

3.1.1 Componenti delle paratoie

Una paratoia è composta principalmente da tre elementi: diaframma, parti incassate e dispositivo di manovra. Il diaframma è un elemento mobile, che ha la funzione di paratia di passaggio dell'acqua. Le guarnizioni, responsabili della tenuta dell'acqua, sono in genere formate da strisce di gomma avvitate sul diaframma. Oltre alle guarnizioni, anche gli elementi di sostegno sono fissati sul diaframma.

Le parti incassate sono tutti i componenti che vengono annegati nel calcestruzzo, e che permettono di indirizzare e alloggiare il diaframma; inoltre permettono di ridistribuire le forze che agiscono sulle paratoie nel calcestruzzo fungendo come elemento di supporto per la tenuta.

I componenti fondamentali delle parti incassate sono: travetto, binari di scorrimento (gargame), guide laterali, controguide, sedi delle tenute del diaframma.

Il travetto è l'elemento orizzontale posizionato inferiormente e appartenente alle parti incassate. Questo funziona come supporto per il diaframma della paratoia o per la guarnizione inferiore.

Il gargame è un elemento di supporto che distribuisce i carichi trasmessi dalle ruote oppure dai rulli.

La stessa funzione è esercitata dal binario di scorrimento rispetto ai carichi trasmessi dalle travi verticali dalle estremità delle paratoie.

Le guide e le controguide laterali limitano lo spostamento dell'anta in orizzontale e sono definite per assorbire le relative sollecitazioni.

L'architrave è un elemento che serve solamente nel caso di paratoie sommerse per completare, assieme alle guide laterali e alla soglia, il telaio per il passaggio dell'acqua. Questa si trova nella parte superiore del gargame in direzione orizzontale, per chiudere il passaggio dell'acqua, sostiene la guarnizione superiore, e serve per la protezione del calcestruzzo contro l'erosione causata dall'acqua che scorre ad alta velocità.

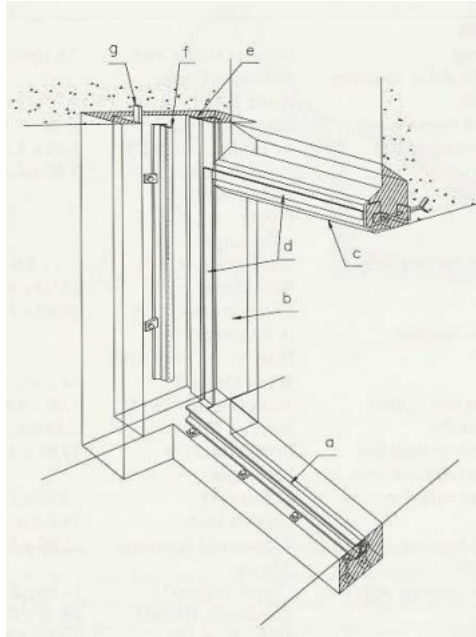


Figura 14 Schema delle parti incassate: (a) travetto, (b) fessura per il rivestimento, (c) architrave, (d) guida per la guarnizione, (e) linea guida per la ruota, (f) guide laterali, (g) controguide [6]

3.1.2 Applicazioni principali e obiettivi delle paratoie

Le paratoie presentano un ampio range di applicazione in diversi campi dell'ingegneria idraulica, e possono essere impiegate per:

- Protezione dalle inondazioni;
- Protezione delle varie apparecchiature, ovvero installazione a monte delle turbine idrauliche di paratoie d' emergenza;
- Controllo del livello dei serbatoi situati vicino zone residenziali o non allagabili;
- Mantenimento del livello d'acqua nei serbatoi costanti;
- Pulizia dei serbatoi (porte di scarico dove si potrebbero depositare i detriti);
- Regolazione del flusso delle dighe.
- Manutenzione di tutte le apparecchiature;
- Chiusura delle condotte che hanno derivazione fluviale;
- Opera di presa nel caso di centrali idroelettriche con adduzione idrica;
- Irrigazione;

- Controllo degli scarichi di fondo;
- Dighe di navigazione.

A seconda della destinazione d'uso, le paratoie si possono classificare in paratoie di servizio, paratoie di emergenza e paratoie di manutenzione.

Le paratoie di servizio vengono utilizzate per la regolazione continua del flusso oppure del livello dell'acqua. Appartengono a questa categoria la paratoia sfioratore, la paratoia di scarico di fondo, la paratoia di chiusura, la paratoia automatica per il controllo delle piene.

Le paratoie di emergenza sono utilizzate saltuariamente per intercettare il flusso d'acqua all'interno delle condotte o dei canali, generalmente queste vengono progettate per essere o aperte o chiuse. In casi particolari possono essere usate con aperture parziali, come nel caso della paratoia di presa, dove si procede con il riempimento della condotta forzata con un leggero sollevamento della paratoia. In questa tipologia di paratoia si trovano le paratoie di presa, installate a monte delle condotte forzate e a monte di quelle di scarico di fondo.

Le paratoie di manutenzione, invece, permettono lo svuotamento della condotta o del canale per accedervi per la manutenzione delle principali attrezzature delle centrali idroelettriche.

3.1.3 Movimento del diaframma e passaggio dell'acqua

A seconda del movimento che il diaframma svolge lungo le guide, le paratoie si possono classificare in:

- Paratoia con traslazione che, a loro volta, si dividono in: scorrevoli e avvolgibili. Il diaframma si muove lungo le guide vincendo l'attrito durante lo scorrimento, con pattini o piastre d'appoggio, tra le parti incassate e quelle mobili. Le paratoie avvolgibili, invece, usano per questo scopo ruote o rulli;
- Paratoia di rotazione: il diaframma ruota attorno all'asse di una cerniera. Nel caso di paratoie a ribalta, a settore o a tamburo, l'asse della cerniera è posto

orizzontalmente sulla soglia. Per paratoie oblique, invece, gli assi delle cerniere sono verticali e posti vicini alle pareti della vasca:

- Paratoia di trasla-rotazione: l'unica opzione è quella di una paratoia avvolgibile che presenta un moto combinato di rotazione e traslazione. Il suo diaframma ha una struttura cilindrica con asse orizzontale che ruota attorno ad una cremagliera posta in un incavo inclinato su ogni pilone di estremità.

Il passaggio dell'acqua relazionato alla posizione del diaframma definisce vari situazioni, come:

- Scarico sopra il diaframma, che può essere a battente, a trappola e a tamburo. In fase di apertura, il diaframma si abbassa attorno all'asse della cerniera posto sul davanzale e, permette il passaggio dell'acqua al di sopra della paratoia;
- Scarico sotto il diaframma, che può essere a scorrimento, a rulli, a segmenti, a ruota fissa, a visiera e a scavatore; muovendosi verso l'alto facendo defluire l'acqua al di sotto della paratoia;
- Scarico sopra e sotto il diaframma, che possono essere misti o a doppia paratoia, permettendo lo scarico in modo alternato sopra e sotto il diaframma a seconda di quelle che sono le esigenze operative.

A seconda della posizione di apertura del diaframma rispetto al corso d'acqua, le paratoie possono avere la briglia oppure essere sommerse, quest'ultime sono dotate di tenuta su tutto il perimetro di passaggio dell'acqua mentre le altre non hanno tenuta sul bordo superiore.

Tutte le tipologie di paratoie possono essere usate per opere fuori dall'acqua, ma solamente alcune possono essere utilizzate per impianti sommersi. In base alla portata al di sopra della soglia le paratoie possono essere classificate come:

- Paratoie a bassa prevalenza: fino a 15 m;
- Paratoie a media prevalenza: da 15 m a 30 m;
- Paratoie ad alta prevalenza: oltre 30 m.

3.1.4 Tipologie di paratoie

3.1.4.1 Paratoie a ribalta o ventola

Questa tipologia di paratoia è formata da un piano di contenimento rettilineo o curvo basato su un asse fisso in corrispondenza della soglia. Se progettato con un diaframma a forma di pancia di pesce, questa paratoia si aziona solamente da un'estremità per un'ampiezza massima fino a 20 m (elevata resistenza alla torsione). In questo caso i cuscinetti sono ancorati alla soglia e sono distanziati da 2.5 m fino a 4 m.

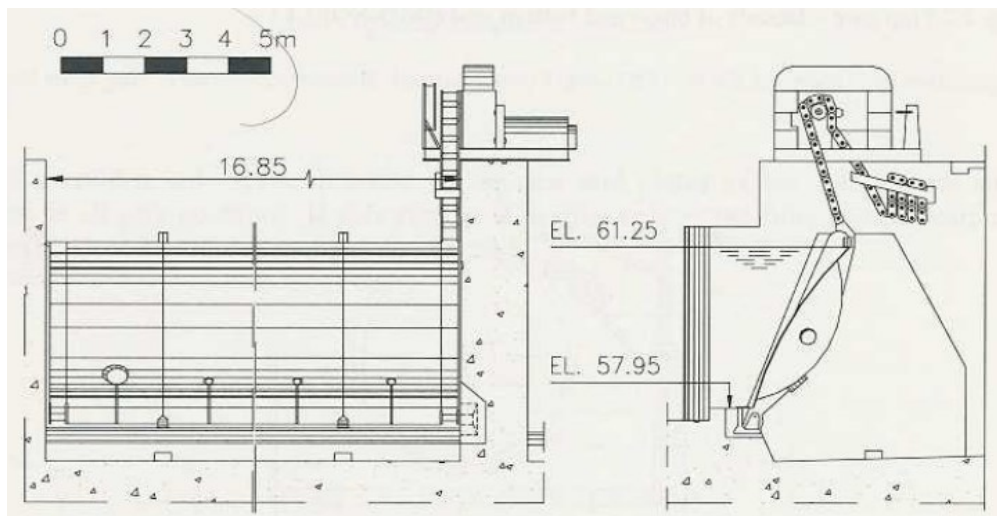


Figura 15: Paratoia a ribalta, Diga Villeperrot, ampiezza 16.85 m e altezza 3.3 m [6]

Quando il diaframma è completamente sollevato, la paratoia forma un angolo con l'asse orizzontale variabile tra i 60° ai 70°. Quando invece la sua posizione è completamente abbassata, questa forma una superficie continua con il fondo della paratoia, non rappresentando quindi un ostacolo al flusso dell'acqua.

Generalmente questa tipologia di paratoia può essere dotata di contrappesi che permettono di ridurre le forze di manovra.

Le paratoie di questo tipo, che durante il funzionamento sono parzialmente aperte, possono essere soggette ad elevate oscillazioni date dalla creazione di una zona di bassa pressione sotto la falda. Questo problema può essere eliminato o anche minimizzato tramite la costruzione di prese d'aria con uscita al molo, oppure con uso di pezzi metallici posizionati sopra la paratoia, distanziati da 2 m a 4 m, che rompono la stabilità della falda d'acqua straripante.



Figura 16: Vista di una paratoia a ribalta con interruzione delle falde [6]

Questi varchi che si vanno a formare hanno una grande flessibilità operativa poiché consentono:

- Una regolazione precisa del livello del serbatoio, con l'abbassamento graduale del diaframma, che scarica l'acqua ad un'altezza prossima a quella del canale a valle di questa;
- Il passaggio di materiale galleggiante tramite l'abbassamento del diaframma, facendo perdere poca acqua dal serbatoio;
- Di scaricare un elevato volume d'acqua andando a sollevare entrambi i diaframmi.

3.1.4.2 Paratoia a cilindro

Queste paratoie hanno una forma cilindrica presentano un movimento di traslazione verticale. Sono generalmente destinate nel caso di torri di presa, e possono essere progettate per pressione esterna o interna.

La paratoia a cilindro è sollevata da una serie di vapori verticali che arrivano fino alla sommità della torre, dove le rispettive sommità sono collegate a dei sollevatori a vite motorizzati. Grazie alla loro forma cilindrica e alla disposizione verticale, la pressione idraulica risulta bilanciata.

Per il movimento della paratoia basta vincere il peso della paratoia stessa, degli steli, delle guarnizioni e delle guide, oltre che gli attriti e le forze di spinta verso il basso che si generano con la sua apertura e la chiusura.

I fianchi laterali della paratoia sono guidati da cuscinetti fissati nella struttura della torre e distanziati in modo tale da evitare deformazioni nel momento in cui la paratoia è spinta verso il basso a causa dell'attrito.

Le guarnizioni laterali, posizionate internamente, non permettono la fuoriuscita dell'acqua dalla camera idraulica; mentre la guarnizione laterale esterna impedisce l'ingresso dell'acqua del serbatoio all'interno della camera idraulica.

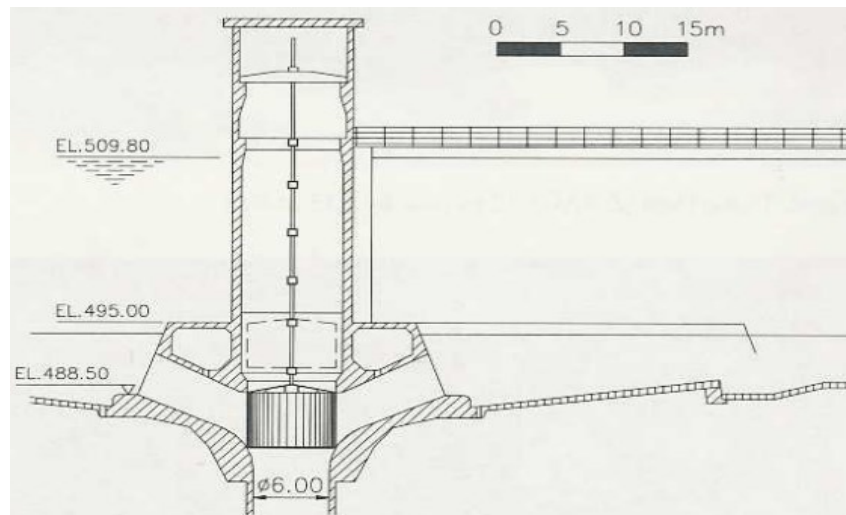


Figura 17: Paratoia a cilindro, Vianden Powerplant [6]

3.1.4.3 Stoplog

È una tipologia di paratoia utilizzata per la manutenzione e la riparazione delle principali apparecchiature di una centrale idroelettrica.

La loro costruzione è simile a quella di una paratoia scorrevole, dunque non hanno ruote o rulli a meno che non si abbiano casi particolari di guide inclinate o per l'intercettazione del flusso tramite l'abbassamento dei pannelli.

L'altezza e la qualità dei pannelli dello stoplog sono influenzate da:

- La capacità di sollevamento del carroponete;
- L'altezza della gru a cavalletto, che dipende dall'altezza del pannello;
- La difficoltà di stoccaggio dei pannelli alti;
- Il limite di trasporto per le vie che permettono l'accesso al sito (la larghezza massima che è possibile trasportare su autostrada o ferrovia è di 3 m ed

eventualmente si devono provvedere modifiche o interventi tali per cui permettano il loro passaggio/trasporto).

Andando a valutare in modo scrupoloso questi fattori, il progettista potrà determinare l'altezza adeguata per i pannelli dello stoplog.

Gli stoplog per le dighe sono dotati di guarnizioni laterali poste sulla soglia e tra i pannelli. Quest'ultimi possono essere uguali oppure progettati affinché ognuno di essi resista alla corrispondente pressione; in questo caso è necessario rispettare una sequenza definita di installazione.

I principali vantaggi di queste paratoie sono: maggiore sicurezza, flessibilità e rapidità di funzionamento perché, in generale, non vi è alcuna sequenza da eseguire per installare i pannelli.

I pannelli sono posizionati ma anche rimossi sotto pressioni bilanciate tramite gru, paranchi mobili o gru a cavalletto, con l'aiuto di travi di sollevamento. Una volta posizionata la paratoia, il passaggio dell'acqua viene drenato; dato che i pannelli sono posti sotto battente bilanciato, bisogna premere le guarnizioni contro le proprie sedi in modo da impedire il passaggio dell'acqua nella zona che deve essere drenata.

3.1.4.4 Paratoia scorrevole

La paratoia scorrevole è la tipologia più semplice di paratoie piatte. È composta da un diaframma che scorre lungo delle guide laterali che sono annegate o fissate al cemento. Il diaframma presenta delle superfici di scorrimento, in genere metalliche, che sono a contatto con le guide laterali ed hanno funzione di tenuta.

Queste vengono utilizzate come dispositivi di controllo per i canali d'irrigazione, opere fognarie, scarichi di fondo o anche per piccole prese e sfioratori di invasi perché presentano un funzionamento semplice e sicuro, oltre che richiedere poca manutenzione. Altre caratteristiche peculiari del loro funzionamento sono la trasmissione uniforme del carico idrostatico e l'assenza di vibrazioni nelle parziali aperture della paratoia dovute alle grandi forze d'attrito che si hanno tra le superfici di scorrimento.

Questa tipologia di paratoia è sconsigliata per installazioni che richiedono la chiusura per gravità a causa delle forze d'attrito durante il loro scorrimento.



Figura 18: Paratoia scorrevole in acciaio inossidabile (H.Fontaine) [6]

Le paratoie scorrevoli possono essere realizzate in legno, ghisa, acciaio fuso o strutturale. In generale, le paratoie in metallo sono consigliate per la loro resistenza ad elevate altezze, mentre quelle in legno sono economiche, durevoli e resistono bene alla corrosione.

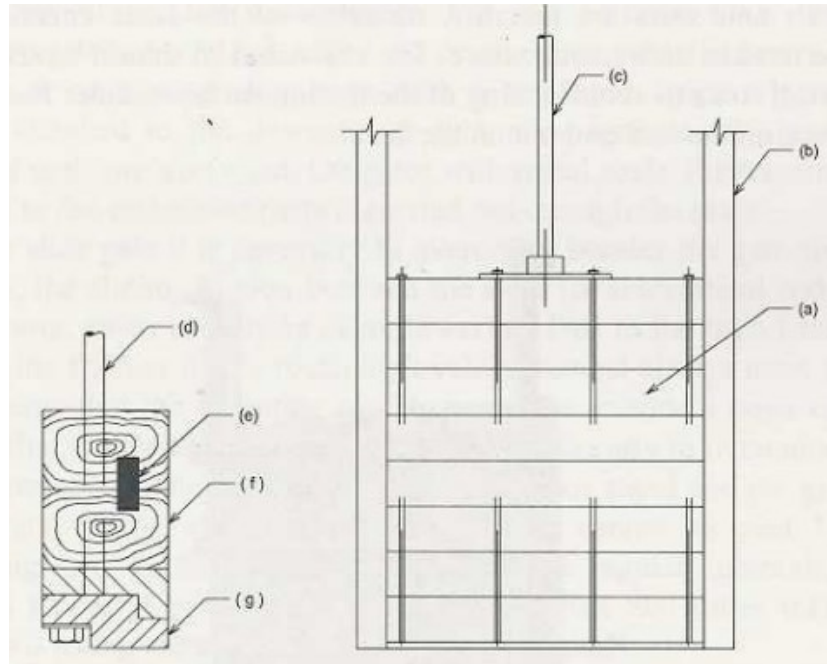


Figura 19: Paratoia scorrevole legnosa, (a) diaframma, (b) guide laterali, (c) sistema di apertura, (d) tirante, (e) linguetta legno, (f) fascio di legno (g) sigillo finale [6]

Il diaframma della paratoia è composto da travi orizzontali in legno, piallate su tutte le superfici che sono calettate rigidamente con dei listelli metallici, o di legno, che percorrono l'intera lunghezza dei legni. I tiranti verticali hanno il compito di tenere uniti i singoli pezzi di legno. Le guide della paratoia possono essere realizzate in ghisa, legno o acciaio strutturale e si estendono per una altezza che è pari al doppio di quella del diaframma.

Qualora venissero scelte guarnizioni e sedi metalliche, le paratoie devono essere costruite di un materiale che non abbia la stessa composizione chimica; infatti, i materiali di tenuta devono essere leggermente più morbidi rispetto a quelli delle sedi. Il diaframma è formato da una lamiera piana rinforzata con dei profilati laminati saldati a monte.

Per movimentare il diaframma si deve vincere sia il peso del diaframma che le forze di discesa, oltre che gli attriti di strisciamento tra le guarnizioni e le parti incassate sia in salita che in discesa del diaframma. Le forze d'attrito generalmente raggiungono valori molto elevati tali da superare il peso del diaframma; quindi, il meccanismo di manovra dovrà fornire una forza motrice verso il basso tale da vincere le forze d'attrito.

3.1.4.5 Paratoie a cingoli

Queste paratoie sono formate da un diaframma che è sostenuto da travi verticali in prossimità degli scivoli. Intorno alle travi verticali sono montate dei rulli di tipo a cingoli.

Queste paratoie sono consigliate per installazioni ad alto battente a causa del basso attrito sui rulli e dell' elevata capacità di carico.

I principali svantaggi delle paratoie a cingoli rispetto a quelle a ruote fisse sono:

- Costi iniziali maggiori;
- Costi di manutenzione maggiori i quali derivano dalla presenza elevata di parti mobili;
- Necessità di una regolazione ad alta precisione tra il battistrada del rullo e le piastre del rullo durante le operazioni;
- Possibilità di rottura di rulli o perni che vanno a compromettere il funzionamento della rulliera;
- Possibilità di danneggiare i rulli per un carico eccentrico derivante dalla flessione del diaframma della paratoia.

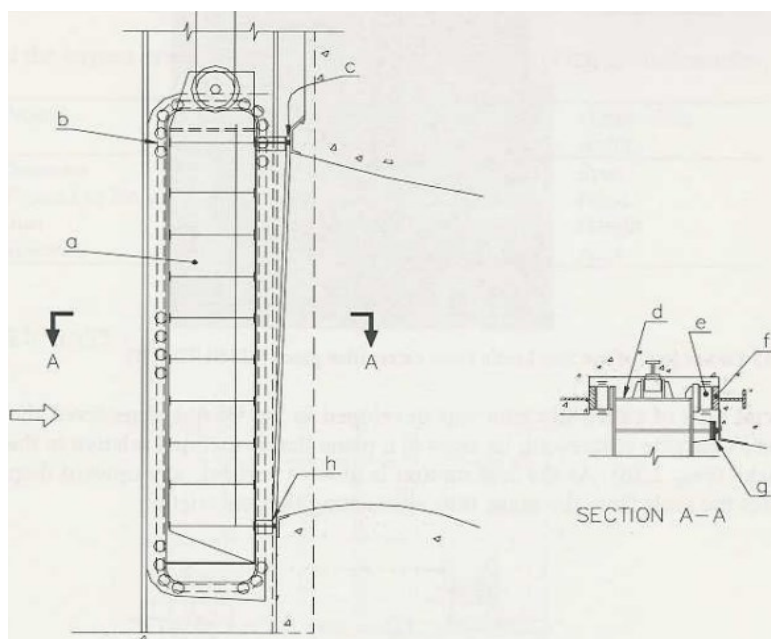


Figura 20: Paratoia a cingoli: (a) diaframma, (b) catena di rulli, (c) guarnizione superiore, (d) fine trave, (e) rulli, (f) guida rulli, (g) guarnizione laterale, (h) guarnizione inferiore [6]

Queste paratoie sono progettate come protezione di prese di acqua ad alta prevalenza e sono utilizzate solamente in posizioni di completa apertura o completa chiusura, eccetto che non venga usata nel caso di riempimento di una condotta in operazioni di fessurazione o di chiusure di emergenza. Generalmente, l' apertura e la chiusura normali si hanno con pressioni bilanciate, mentre la chiusura di emergenza per l'intercettazione della condotta è effettuata per gravità.

3.1.4.6 Paratoia obliqua

Questa tipologia di paratoia viene usata come paratoia di navigazione, essendo formata da due diaframmi rotanti con asse della cerniera verticale poste nelle pareti della vasca. La paratoia obliqua è di semplice costruzione e di semplice funzionamento; infatti, questa potrà essere aperta e chiusa molto rapidamente a differenza delle altre tipologie di paratoie.

3.1.4.7 Paratoie a rulli

Queste paratoie presentano dei cilindri orizzontali in acciaio con annessi ingranaggi dentati ad ogni estremità. Viene utilizzata maggiormente nei paesi del Nord, dove la presenza di grandi masse di ghiaccio galleggiante e le bassissime temperature, ostacolano o bloccano il funzionamento delle paratoie convenzionali.

Si associano molto spesso queste paratoie a dighe a basso battente e per installazioni dove si vuole avere un'ampia apertura tra i pilastri per il passaggio di ghiaccio e detriti.

Il cilindro orizzontale è curvo e formato da piastre d'acciaio curvate e irrigidite da longheroni e telai fissati sulla superficie interna. La paratoia è sigillata all'estremità e al fondo, su cui si posa la paratoia quando è chiusa. Le guide laterali sono realizzate con lastre o laminati e annegati nel calcestruzzo.

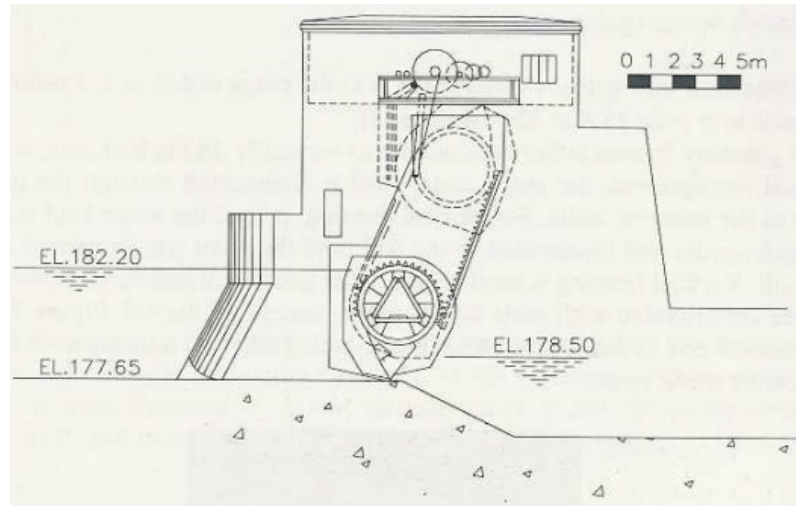


Figura 21: Paratoia a rulli [6]

3.1.4.8 Paratoia segmento

Questa paratoie è formata da una piastra curva composta da un segmento cilindrico, supportato da bracci compressi radiali che trasferiscono le forze idrauliche al cuscinetto.

Questa paratoia ruota attorno ad un asse orizzontale, che passa dal centro del cuscinetto e coincide con il centro del raggio di curvatura del diaframma. La spinta risultante della pressione dell'acqua passa attraverso il punto di rotazione e non ha una tendenza all'apertura o alla chiusura della paratoia. In alcune installazioni, le paratoie possono presentare contrappesi sui bracci opposti al diaframma per consentirne il funzionamento con poca potenza.

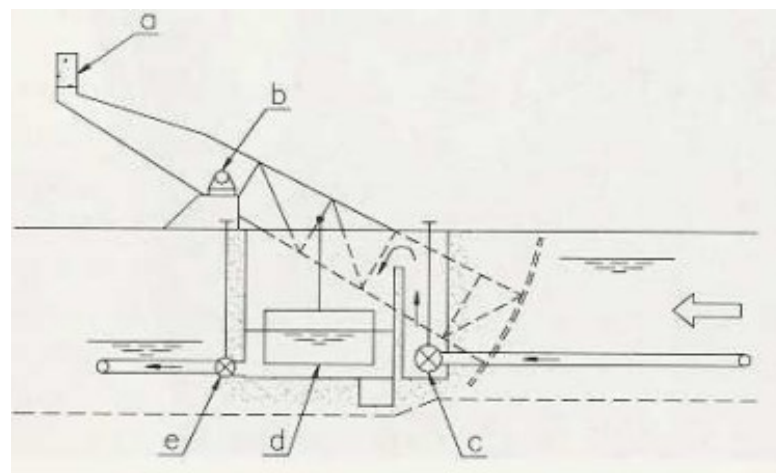


Figura 22: Paratoia a segmento automatica con contrappeso: (a) contrappeso, (b) cuscinetto, (c) valvola di mandata, (d) galleggiante, (e) valvola di drenaggio [6]

Una diversa configurazione di questa paratoia è quella che presenta due diaframmi concentrici. Il diaframma inferiore ha una forma classica a segmento e viene sollevata per permettere elevati scarichi d' acqua, mentre quella superiore presenta una coppia di bracci radiali che sono saldati nella parte superiore e spingono sul diaframma inferiore tramite dei rulli.

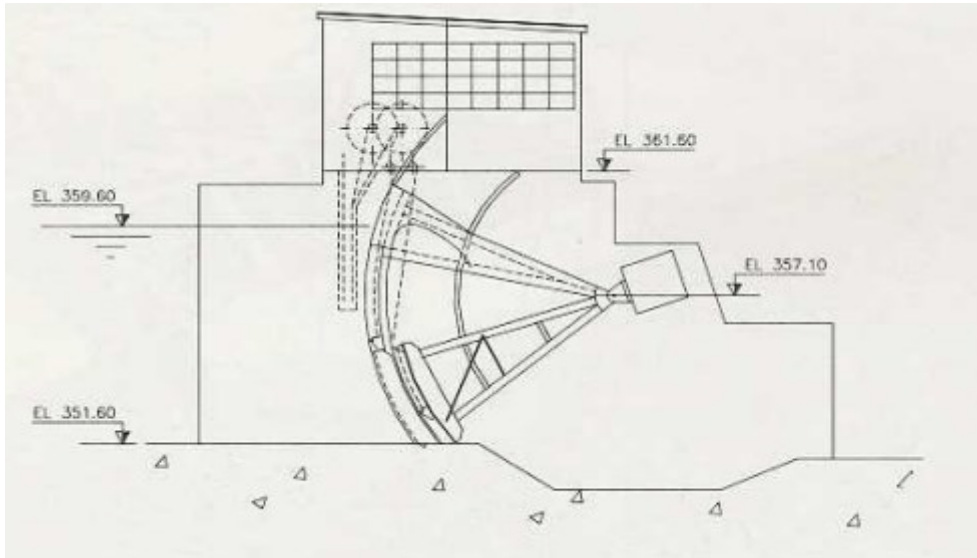


Figura 23: Paratoia a segmento doppio, Diga di Rapperswill-Auenstein (Zwag) [6]

3.1.4.9 Paratoia a settore

La paratoia a settore presenta un diaframma curvo ed ha nella parte superiore una superficie piena, in direzione radiale fino ai cuscinetti, che dà al profilo del diaframma una forma di settore circolare. La paratoia è incernierata sul lato a valle e il diaframma ha la forma di un corpo aperto sul lato inferiore radiale.

La paratoia permette un controllo automatico, preciso e sicuro senza utilizzare un alimentatore esterno; inoltre possono essere realizzati della lunghezza desiderata. L'altezza è limitata a circa 8 m e viene utilizzata principalmente in Europa dove è necessario scaricare una quantità di materiale galleggiante o ghiaccio molto elevato.

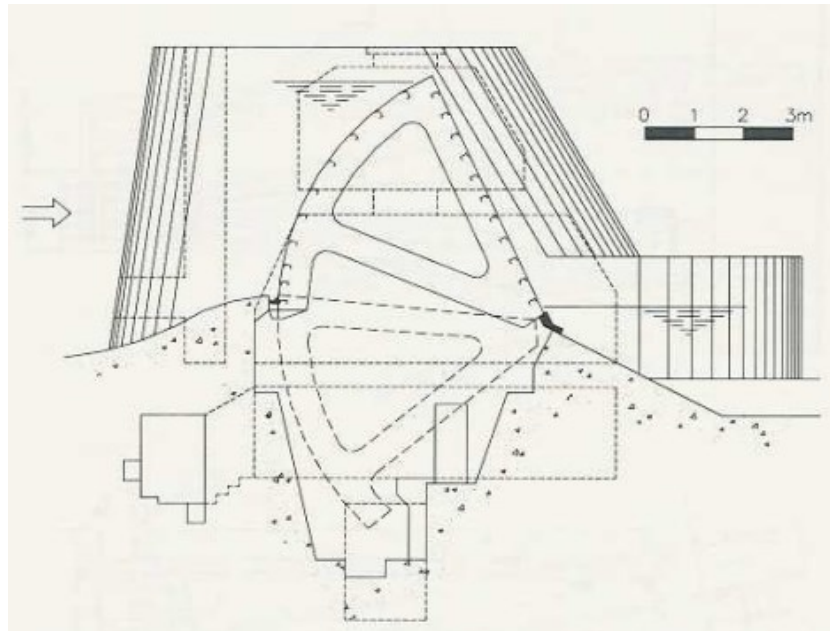


Figura 24: Paratoia a settore, Diga di St. Aldegund [6]

3.1.4.10 Paratoia Stoney

Questa paratoia presenta un treno di rulli orizzontali su entrambi i lati del telaio, posti tra due piastre verticali. I rulli vengono sollevati tramite un cavo d' acciaio che, a sua volta, scorre su una puleggia libera installata sopra le piastre verticali. Un' estremità è fissa in un punto sopraelevato sul molo e l'altra estremità è fissata alla paratoia durante il sollevamento.

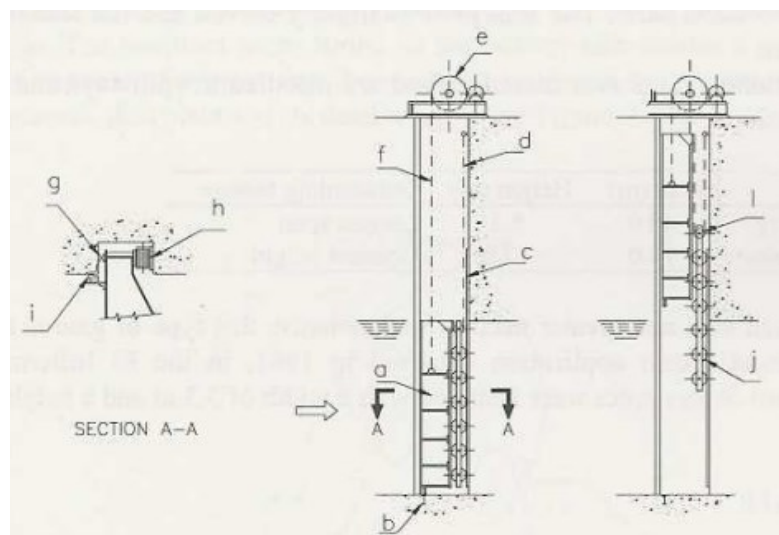


Figura 25: Paratoia Stoney: (a) diaframma, (b) soglia, (c) percorso dei rulli, (d) catena del treno di rulli, (e) montacarico, (f) cavo diaframma, (g) controguida, (h) rullo, (i) guarnizione laterale, (j) treno di rulli, (l) puleggia [6]

3.1.4.11 Paratoia a tamburo

Il diaframma di una paratoia a tamburo è una nave galleggiante orizzontale, che ha una forma di prisma triangolare incernierata a monte lungo il suo bordo inferiore. Le facciate a monte e a valle sono realizzate con lastre curve, mentre una lastra piana va a formare il fondo della paratoia.

Questa tipologia di paratoia è molto pesante, ma il suo funzionamento risulta completamente idraulico senza alcun utilizzo di un paranco. Tutti i lati della camera idraulica sono sigillati e la posizione della paratoia è controllata dall'applicazione della pressione dell'acqua di testa sotto la paratoia.

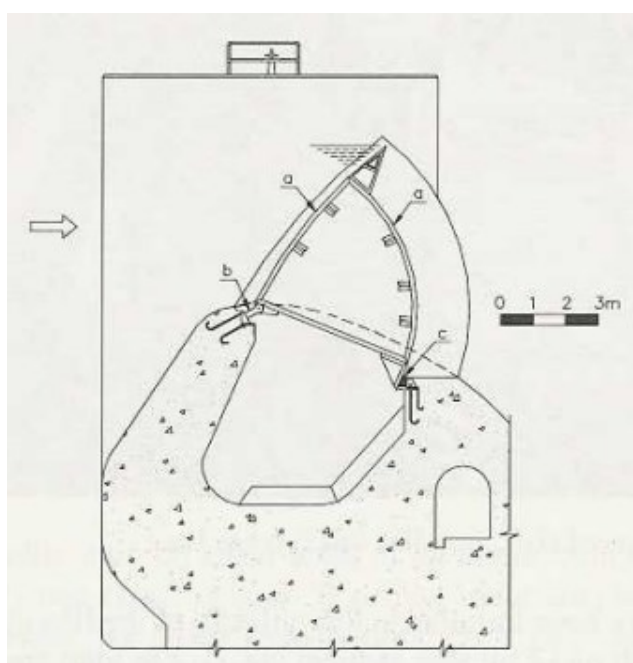


Figura 26: Paratoia a tamburo, Diga Friant (USA): (a) diaframma, (b) cerniera, (c) guarnizione [6]

3.1.4.12 Paratoia a trappola d'orso

Questa paratoia è formata da due foglie piatte, che sono incernierate orizzontalmente nelle loro estremità inferiori. L'estremità libera del diaframma a monte va a premere continuamente contro il diaframma a valle. Le foglie presentano una forma di V rovesciata, in posizione alzata o intermedia.

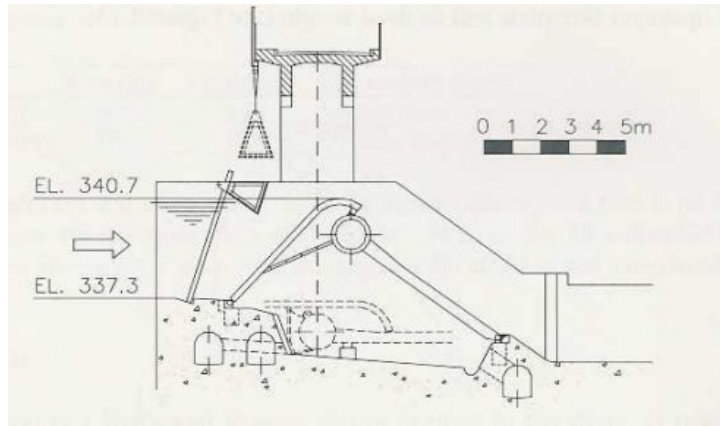


Figura 27: Paratoia a trappola d'orso, Giga Schinznach-Bad [6]

3.1.4.13 Paratoia a ruota fissa

È la tipologia di paratoia più comune ed è composta da un diaframma, ruote, alberi e guarnizioni. Il diaframma è formato da una lastra piatta irrigidita da travi orizzontali e nervature. Su ogni lato del diaframma, le estremità delle travi orizzontali risultano saldate ad una trave verticale. Le ruote vengono montate sugli alberi, fissati lateralmente al diaframma sulla trave verticale, per avere sia la funzione di ridurre le forze d'attrito che quella di trasmettere le forze del carico d'acqua sulle parti incassate.

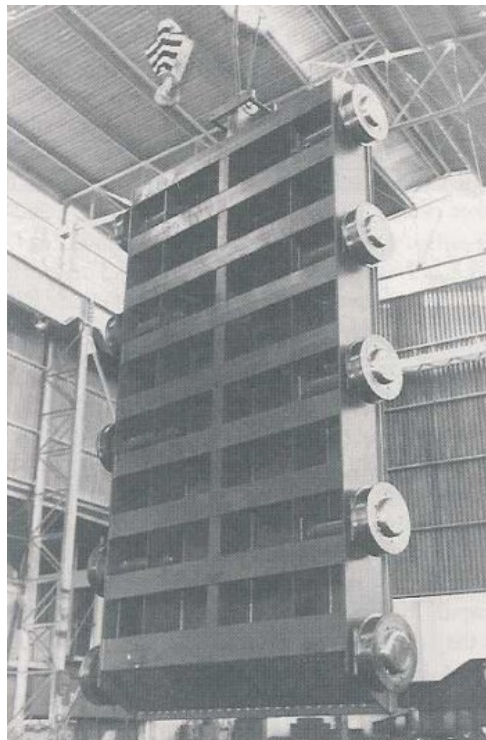


Figura 28: Paratoia a ruota fissa [6]

Queste paratoie vengono utilizzate maggiormente in impianti che richiedono la presenza di paratoie che possono chiudersi sotto il proprio peso, per questo motivo vengono utilizzati come dispositivi secondari per intercettare il flusso dell'acqua negli scarichi di fondo.

Nella parte superiore di questa paratoia si va ad installare un ponte di servizio per alloggiare i paranchi.

3.1.5 Criteri di selezione delle paratoie

La selezione della tipologia di paratoia più idonea per un'installazione idraulica, si basa su un'analisi completa di tutti i fattori che possano influenzare le prestazioni, il costo, la qualità e l'affidabilità delle apparecchiature, come:

- Peso ridotto;
- Semplice funzionalità;
- Requisiti strutturali vantaggiosi;
- Entità e direzioni delle forze trasmesse alle parti cementate e in calcestruzzo;
- Portata del paranco;
- Facilità nel trasporto e nel montaggio.

Le paratoie sono comunemente utilizzate nelle prese, negli sfioratori, negli scarichi inferiori, come serrature e come chiuse di acquedotti.

Nella scelta della paratoia è importante andare ad adattare le caratteristiche della paratoia a quelle che sono le esigenze del funzionamento dell'impianto idraulico che si sta studiando. Queste caratteristiche sono:

- Capacità di scarico: è la caratteristica più importante degli sfioratori, che è influenzata anche dalla geometria del molo e dello sfioratore stesso. Queste strutture devono essere libere da ostacoli e la migliore efficienza idraulica si ottiene con paratoie che non hanno bisogno di asole laterali;

- Scarico dei detriti galleggianti o del ghiaccio: in questo caso le paratoie servono per la regolazione precisa del livello dell'acqua, con lo scopo di avere il passaggio di detriti o ghiaccio galleggiante, con un piccolo flusso d'acqua;
- Funzionamento a pressione dell'acqua di testa: se non si vuole il funzionamento con i paranchi, le paratoie usate sono a: settore, tamburo e trappola d'orso. La pressione dell'acqua crea un momento flettente che è pari o superiore a quelli dati dal peso della paratoia e delle forze d'attrito che si oppongono alla direzione del movimento della paratoia. I livelli dell'acqua possono essere regolati manualmente o con una valvola galleggiante automatica;
- Carichi sulle strutture immerse nel calcestruzzo: le spinte dell'acqua sul diaframma vengono trasmesse al calcestruzzo tramite dei cardini o dei binari di sostegno, raggiungendo valori molto elevati. Il loro trasferimento dalla paratoia alla struttura viene effettuato di continuo con una serie di sostegni tramite una coppia di perni nel pilastro ed una serie di cerniere fissate alla soglia;
- Assenza di vibrazioni: è molto importante nel caso di paratoie con scarico che avviene dal basso. Maggiore è la forza d'attrito tra il diaframma e la guida, minore è la tendenza della paratoia alla vibrazione;
- Regolazione idraulica: il tipo di regolazione che può essere fatta su paratoie è a segmenti, a settori, a tamburo, a ribalta e a trappola d'orso. La regolazione è idraulica e viene effettuata tramite galleggianti e contrappesi senza l'uso di paranchi. Queste sono utilizzate per mantenere costanti i livelli della vasca di carico in prossimità di aree non allagabili o per proteggere le aree stesse dalle inondazioni. Sono anche usate per l'installazione in località con un clima ostile oppure che risulti di difficile accesso agli operatori;
- Chiusura automatica di emergenza: in molti casi le paratoie di presa sono progettate per la chiusura automatica sotto gravità nel caso di squilibrio di pressione, mancanza di energia elettrica, fuoriuscita dalla turbina oppure per l'interruzione del flusso d'acqua qualora la condotta forzata andasse in avaria.

3.2 Condotte interrate e forzate

Le condotte permettono all'acqua di spostarsi verso la parte principale della centrale idroelettrica, ovvero la turbina idraulica.

Le condotte interrate sono realizzate per permettere all'acqua di fluire verso la vasca di carico, generalmente sono in calcestruzzo o cementificate e hanno inizio con l'opera di presa dell'acqua.

Le condotte forzate, invece, collegano la vasca di carico con la macchina idraulica all'interno della centrale idroelettrica. Sono tubazioni in pressione, con sezione circolare, dove il diametro viene dimensionato a seconda della portata disponibile in modo tale da avere una velocità rientrante in un range di 1-3 m/s (il valore dipende dal materiale da cui è composta la condotta stessa).

Le condotte forzate si possono classificare a seconda del materiale da cui sono realizzate in:

- Metallo;
- Calcestruzzo, se si hanno impianti con salto modesto ed elevate portate;
- Materiali compositi.

Le condotte possono essere classificate anche a seconda della loro disposizione costruttiva:

- All'aperto: sono vantaggiose per i bassi costi di realizzazione e per una facilità d'ispezione, ma di contro sono esposti ad agenti atmosferici e ad escursioni termiche importanti. Per questo motivo si adoperano dei giunti di dilatazione per risolvere questo problema;
- In galleria: il loro vantaggio è quello di avere una riduzione della lunghezza della condotta e quindi permette un risparmio del materiale; tuttavia, hanno un costo elevato e non si ha la possibilità di effettuare un'ispezione esterna della condotta.

3.3 Sgrigliatore

Lo sgrigliatore è un dispositivo elettromeccanico che permette la rimozione dei detriti che si accumulano contro la griglia. Generalmente è posizionato subito prima della condotta forzata e all'interno della vasca di carico.

Lo sgrigliatore è un macchinario che presenta una struttura in cui sono presenti un diaframma, quindi di una vera e propria paratoia, e una griglia con un pettine che rimuove i detriti provenienti dall'acqua.

Molto spesso il pettine è azionato da dei cilindri oleodinamici ed è inoltre montato su un braccio collegato alla struttura su una sua estremità.

Il pettine esegue due movimenti fondamentali: inizialmente viene allontanato dalla griglia e sceso in acqua totalmente; successivamente, si riavvicina alla griglia in modo che esso entri a contatto con questa portando in superficie i detriti. I detriti sono convogliati all'interno di un canale o di una superficie fino a delle vasche di recupero senza possibilità di tornare nuovamente nell'acqua.

Esistono due tipi di sgrigliatori a corsa attiva o a corsa passiva: Gli sgrigliatori a corsa attiva procedono con la pulizia dall'alto verso il basso portando il materiale in fondo e tramite una benna salgono con il materiale sgrigliato. Gli sgrigliatori a corsa passiva effettuano una corsa verso il basso a vuoto, si allontanano dalla griglia si riavvicinano ad essa sul fondo eseguendo una corsa di risalita pulendo tramite un pettine [5].



Figura 29: Sgrigliatore con braccio telescopico, Orte (Italia), di proprietà della Renpower [7]

3.4 Vasca di carico

La vasca di carico è generalmente sempre presente nelle centrali idroelettriche. Il loro compito è quello di contenere l'acqua che deriva dai canali interrati e di utilizzarla all'interno della centrale per produrre energia elettrica.

3.5 Turbina

La turbina è una macchina rotativa che permette di trasformare l'energia cinetica di un fluido, sotto forma di velocità o di pressione, in energia meccanica.

La turbina è composta da una parte fissa detta distributore (o statore), e da una parte mobile detta girante (o rotore). Lo statore racchiude il fluido elaborato dal rotore all'interno di un volume definito, guidando e mantenendo la sua velocità costante grazie alla forma a chiocciola dello statore (es. turbina Francis). Dopodiché, il fluido agisce sulle palette del rotore, generando una coppia motrice che viene poi trasformata in energia elettrica mediante un alternatore.

3.5.1 Classificazione e tipologia di turbine

Le turbine possono essere classificate secondo:

- La traiettoria del flusso che le attraversa:
 - Turbina a flusso radiale quando questo entra radialmente all'asse di rotazione (albero) della girante della turbina (es. turbina Pelton, Turgo) ed esce assialmente;
 - Turbina a flusso assiale quando questo scorre parallelamente all'asse di rotazione della girante (es. turbina Kaplan, propeller) e mantiene tale direzione anche all'uscita della macchina;
 - Turbina a flusso misto quando questo scorre in parte radialmente ed in parte assialmente rispetto all'asse di rotazione della girante (es. turbina Francis).
- Natura del fluido che attraversa la turbina:
 - Fluido incomprimibile;
 - Fluido comprimibile.

- Modalità di conversione dell'energia:
 - Turbina ad azione: l'energia potenziale viene trasformata in energia cinetica all'interno del distributore. Questo comporta che l'energia cinetica del fluido all'ingresso della girante si trasforma in energia meccanica (es. turbina Pelton, Banki);
 - Turbina a reazione: l'energia potenziale viene trasformata in energia cinetica in parte nel distributore e in parte nella girante (es. turbina Francis).

La turbina idraulica è generalmente installata all'interno di un impianto che ha due serbatoi, uno di monte e uno di valle, a pressione atmosferica. La macchina sfrutta quindi il salto disponibile che è dato dal salto geodetico netto delle perdite di carico nelle condotte.

Le turbine idrauliche sono classificabili in turbine: Pelton, Francis, Kaplan, Banki e Turgo [6].

3.5.1.1 Turbina Pelton

La turbina Pelton è classificabile come una turbina ad azione che sfrutta salti elevati, compresi tra i 200 m e i 2000 m, ma elabora portate piccole generalmente minori di 50 m³/s.

L'acqua, proveniente dalla vasca di carico, arriva alla turbina tramite una condotta forzata. L'acqua entra in contatto col distributore, nel quale avviene la completa conversione di energia potenziale in energia cinetica. Nella valutazione della velocità di uscita del getto dal distributore, si tiene conto delle piccole perdite di energia:

$$c_1 = \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad (3)$$

Il getto, una volta nel distributore, colpisce le pale presenti nella girante. Bisogna avere un angolo relativo (angolo tra i vettori velocità relativa e di trascinamento) il più vicino possibile a quello costruttivo, per diminuire le perdite localizzate dovute all'impatto del fluido sul bordo di entrata delle pale rotoriche. Per questo motivo, le pale vengono sagomate a forma di doppio cucchiaio con un coltello centrale. In

questo modo la velocità relativa all'ingresso del fluido nella girante è tangente al coltello.

$$\vec{v}_1 = \vec{c}_1 - \vec{u}_1 \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad (4)$$

Una volta che il getto colpisce il coltello, si divide in due getti simmetrici che seguono il profilo dei due cucchiai. Successivamente l'acqua viene scaricata all'esterno affinché la velocità assoluta in uscita sia più piccola di quella in ingresso.

La deviazione del fluido genera una spinta sulle pale che è definita come segue:

$$S = \rho \cdot Q \cdot (v_i - v_u) \quad [N] \quad (5)$$

La velocità di trascinamento, è quella che permette di ottenere la massima trasformazione dell'energia idraulica contenuta nel fluido in energia meccanica di rotazione della girante.

$$u_1 = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad (6)$$

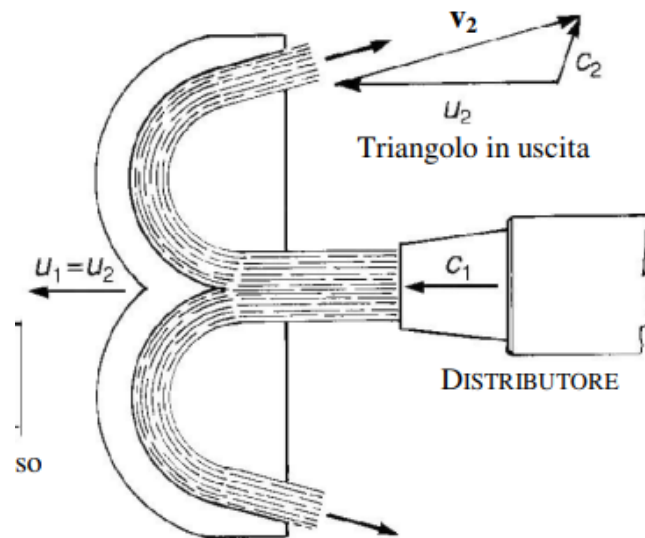


Figura 30: Schematizzazione della velocità per la turbina Pelton [8]

Il parametro determinante nella scelta di una tipologia di turbina è il numero di giri caratteristico n_c . Il numero di giri caratteristico viene definito dalla seguente equazione:

$$n_c = n \cdot \frac{\sqrt{Q}}{H^{1.25}} \quad (7)$$

La potenza meccanica che una turbina Pelton permette di ottenere è:

$$P_m = \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot Q \cdot \eta_T}{1000} [W] \quad (8)$$



Figura 31: Turbina Pelton [9]

3.5.1.2 Turbina Francis

La turbina Francis è una turbina idraulica a reazione che sfrutta dei salti non elevati, compresi tra i 10 m e i 400 m, mentre le portate d'acqua con cui lavora sono elevate tra i 2 e i 100 m³/s.

Questa turbina è composta da un distributore fisso posto esternamente ad una girante e da una voluta, che accoglie l'acqua proveniente dalla condotta forzata. La voluta presenta una sezione decrescente per garantire lo stesso valore di portata entrante nel distributore.

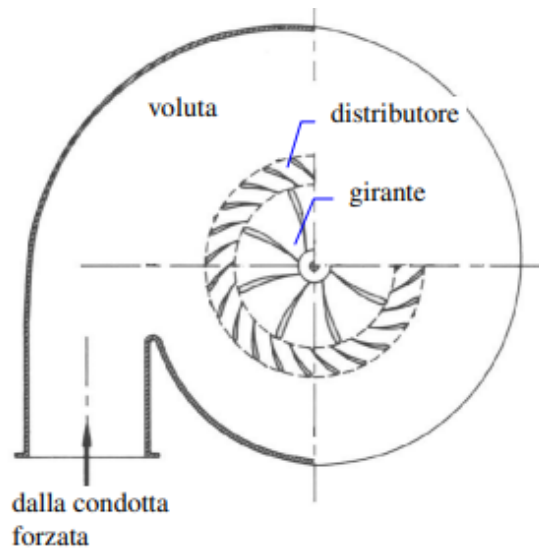


Figura 32 Schematizzazione parti della turbina Francis [10]

Durante il percorso dell'acqua all'interno del distributore si ha una trasformazione di una parte dell'energia in energia cinetica, ovvero si ha un aumento della velocità dell'acqua. La velocità di uscita dell'acqua dal distributore è uguale alla velocità assoluta d'ingresso del fluido nella girante, definita come \vec{c}_1 .

Per questa tipologia di turbina viene definito il *Grado di Reazione* G , parametro che permette la qualificazione delle turbine a reazione. Il *Grado di Reazione* G è definito come il rapporto tra l'energia idraulica che non viene trasformata in energia cinetica all'interno del distributore e l'energia disponibile all'ingresso della girante. Inoltre presenta un valore compreso tra 0.3 e 0.8 ed è definito come segue:

$$G = \frac{H_u - \frac{c_1^2}{2 \cdot g}}{H_u} \quad (9)$$

dove l'energia disponibile all'ingresso della girante H_u viene definito come rapporto tra il salto e il rendimento idraulico della turbina:

$$H_u = \eta_i \cdot H \quad [m] \quad (10)$$

Noti il rendimento idraulico e il salto si può calcolare la velocità di efflusso del fluido nel distributore, pari alla velocità assoluta d'ingresso del fluido nella girante.

$$c_1 = \sqrt{2 \cdot g \cdot \eta_i \cdot H \cdot (1 - G)} \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad (11)$$

L'acqua, in uscita dalla girante, entrerà nel diffusore ovvero un tubo divergente che permette di recuperare l'energia che viene persa allo scarico. Questo recupero consiste nell'aspirazione dell'acqua della girante attraverso una depressione creata nella sezione di uscita della girante, che permette di recuperare il dislivello tra la turbina e il bacino di scarico.

Per dimensionare la turbina devono essere noti: salto geodetico H , il numero di giri n con cui funziona la turbina e la potenza meccanica utile P_m che la turbina deve erogare per soddisfare le caratteristiche dell'impianto. Grazie alla definizione di questi parametri, si può calcolare il numero di giri caratteristico della turbina n_c .

$$n_c = n \cdot \frac{\sqrt{P_m}}{H^{1.25}} \quad (12)$$

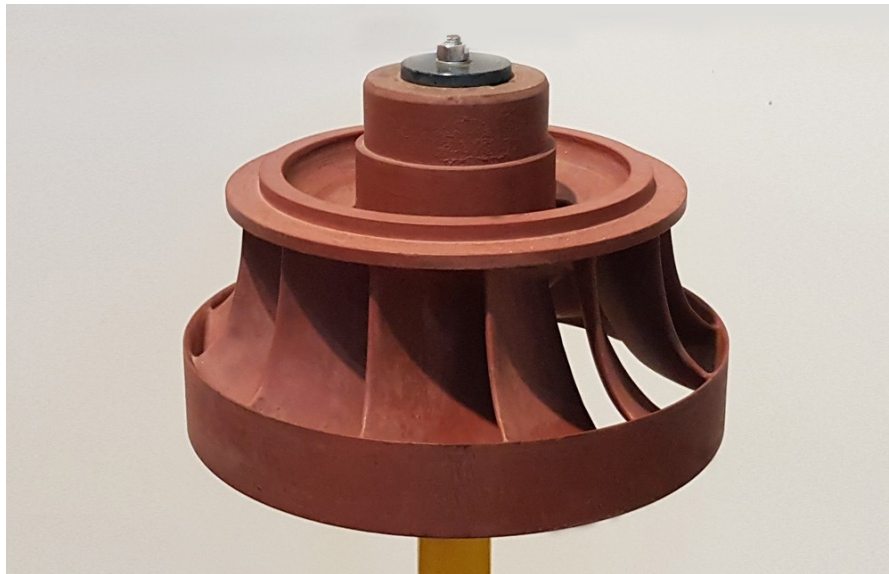


Figura 33: Girante turbina Francis [11]



Figura 34: Turbina Francis [12]

3.5.1.3 Turbina Kaplan

La turbina Kaplan è una turbina idraulica a reazione e viene utilizzata nel caso di salti inferiori a 10 m e con portate comprese tra i 200 e i 300 m³/s. Questa è formata da un'elica che presenta pale orientabili.

Dal punto di vista geometrico è molto simile ad un'elica con pale orientabili. questo avviene al variare della portata d'acqua che permette di mantenere elevato il rendimento fino a portate del 20-30% di quella nominale. Inoltre, presenta deflettori statorici fissi che permettono di orientare il flusso.

Grazie ad un sistema di orientamento dei deflettori statorici si può variare la portata, ampliando il range della portata ideale andando così ad ottimizzare il rendimento.

Tramite una condotta a forma di chiocciola, il fluido raggiunge la turbina attraverso il distributore che dà permette la rotazione della girante all'interno della quale il flusso, deviato di 90°, la investe in direzione assiale.

Come per la Francis allo scarico si recupera energia cinetica grazie alla presenza del diffusore.

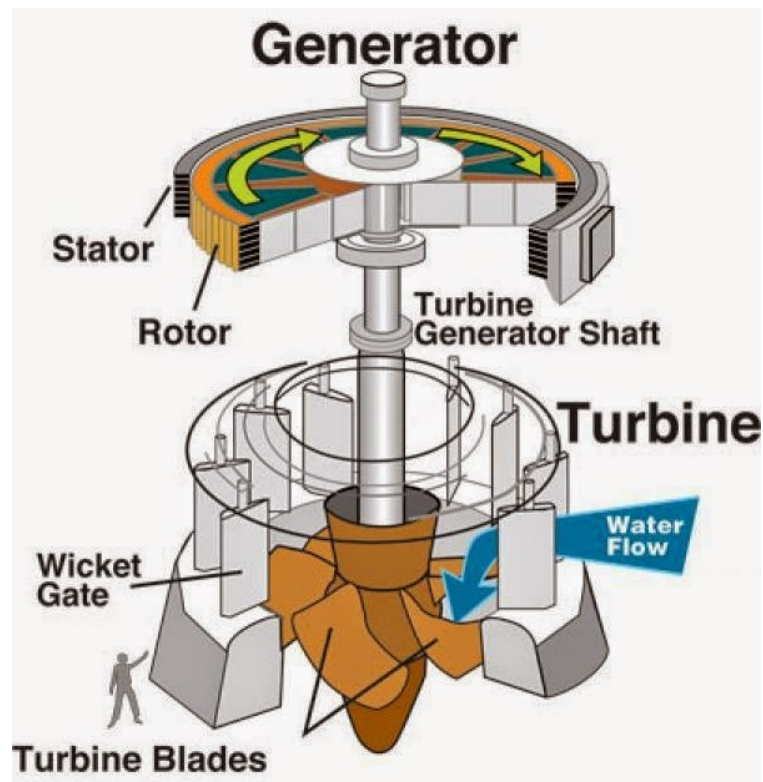


Figura 35: Turbina Kaplan, con vista sui singoli componenti [13]

3.5.1.4 Turbina Banki

La turbina Banki viene utilizzata per salti compresi tra 2 e 200 m e per portate individuate in un range che va da 40 a 13000 l/s.

Un pregio di questa turbina è la sua semplice costruzione; infatti, è composta dal rotore, dall'iniettore e dalla cassa. Il rotore è formato dalle pale e dall'albero centrale. L'iniettore presenta una cassa che circonda una parte del rotore e non assicura una variazione di portata che può essere fino all' 83% in meno di quella di progetto. La cassa è situata sull'albero della turbina ed è composta da una condotta di scarico che aiuta nel rendimento totale ma non in egual modo delle altre turbine (Francis).

L'acqua viene direzionata dall'iniettore verso le pale e si muove trasversalmente nel rotore andando verso lo scarico, attraversando le pale ma dal lato opposto; queste vengono così percorse in ambedue i sensi rimuovendo così i corpi estranei dalla turbina. Con il contatto fluido-pale si mette in rotazione il rotore e, di conseguenza, l'albero trasmette l'energia meccanica prodotta al generatore di corrente elettrica.

Questa tipologia di turbina presenta un rendimento inferiore rispetto a quello che si può ottenere con le altre turbine, variabile tra 0.80 e 0.88, ma rimane costante nonostante si abbia una variazione di portata importante.

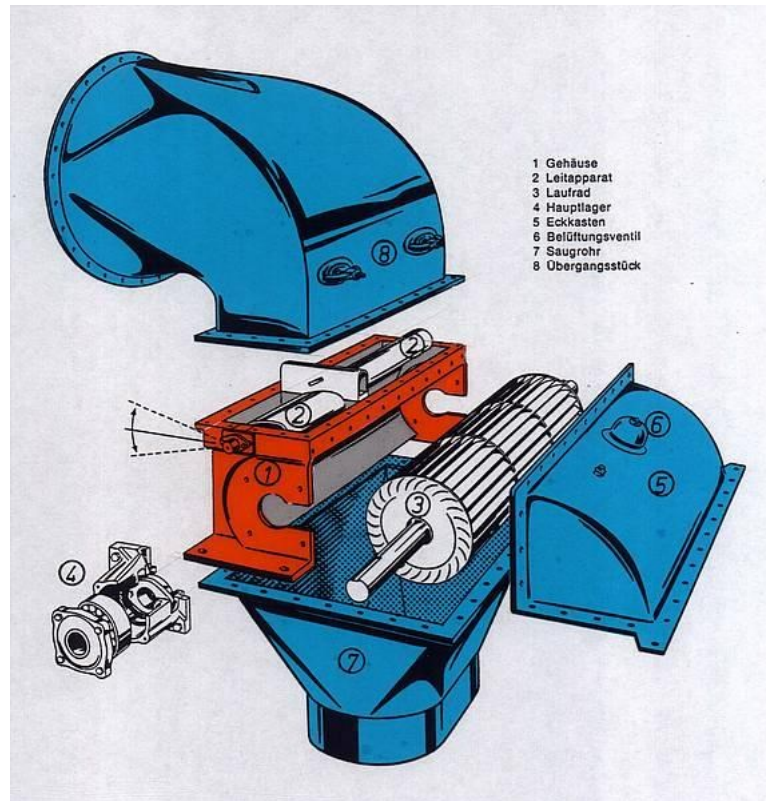


Figura 36: Turbina Banki [14]

3.5.1.5 Turbina Turgo

La turbina Turgo lavora con salti compresi tra 50 e 250 m, ma di contro presenta un'efficienza minore rispetto alle turbine Pelton e Francis.

Questa turbina è formalmente simile alle turbine Pelton; tuttavia, le pale hanno una forma e una disposizione differente (con angolo di 20° rispetto all'orizzontale) affinché il getto d'acqua uscente riesca a colpirne contemporaneamente più di una.

Il diametro minore della girante fa sì che, a parità di velocità periferica, si abbia una maggiore velocità angolare che rende più semplice l'accoppiamento diretto con il generatore.



Figura 37: Turbina Turgo [15]

3.5.2 Scelta delle possibili turbine da installare

La scelta della turbina da installare dipende da diversi parametri quali salto netto, portata da elaborare in turbina, numero di giri, velocità di rotazione, fenomeno di cavitazione, velocità di fuga e, dal punto di vista economico, il costo.

- Salto netto: se consideriamo impianti a bassa caduta, la scelta della turbina risulta non essere facile perché questa deve elaborare grandi volumi d'acqua. Nelle turbine ad azione il salto si misura dal punto d'impatto del getto posizionato sopra il livello di valle e questo implica una perdita di salto rispetto alle turbine a reazione che invece sfruttano tutto il salto presente.
- Portata: è fondamentale conoscere il regime delle portate dell'acqua da sfruttare prima di scegliere la turbina. Si utilizza la curva di durata del flusso (Flow Duration Curve) che determina gli andamenti della portata di progetto che, assieme al salto, definiscono un punto nel piano dove sono presenti i campi di funzionamento di ogni tipologia di turbina.

La scelta della turbina determina l'identificazione della portata minima e massima che la turbina riesce ad elaborare.

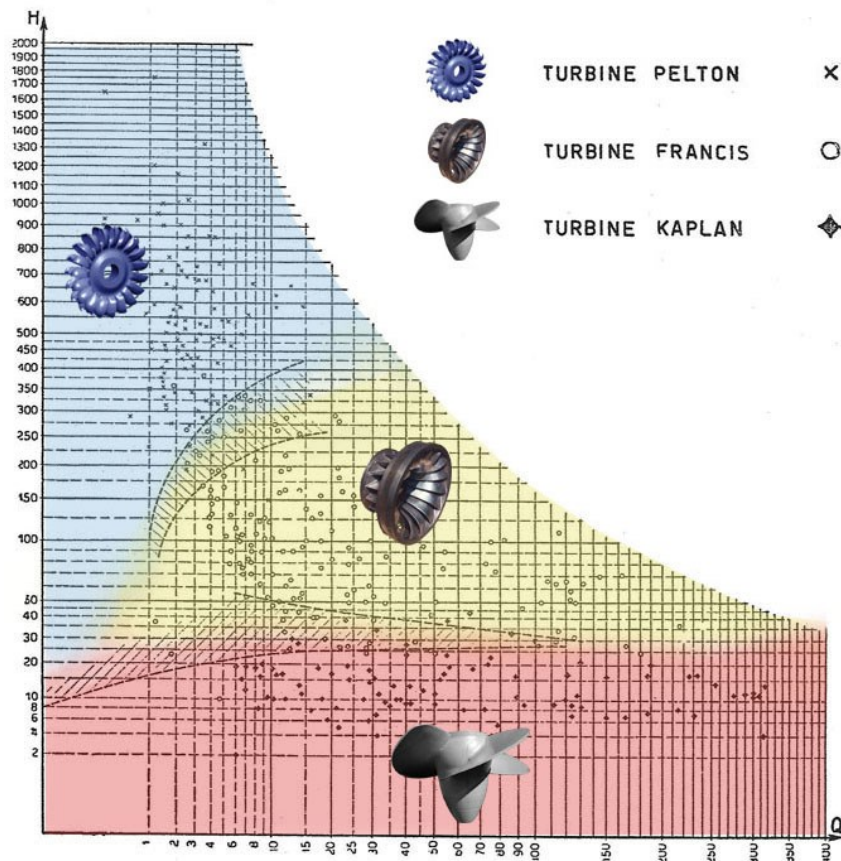


Figura 38: Grafico che classifica le turbine a seconda della portata minima che possono lavorare [16]

- Numero di giri specifico: gli indici di similitudine geometrica e cinematica sono efficacemente riassunti dal numero caratteristico che correla le grandezze operative della turbina (portata volumetrica Q e prevalenza H) con quelle cinematiche (velocità di rotazione (n)). Macchine aventi lo stesso numero di giri specifico n_s sono quindi confrontabili tra di loro.

Il numero di giri specifico è definito come:

$$n_s = n \frac{Q^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{3}{4}}} \quad (13)$$

Il numero di giri caratteristico invece varia a seconda della tipologia della turbina.

Tabella 2: Variazione del numero di giri caratteristico a seconda della tipologia di turbina e del salto H

Tipologia di turbina		Numero giri caratteristico n_c	Salto H [m]
Pelton	1 getto	10-30	200-1800
	2 getti	17-42	
	4 getti	24-70	
Francis	Lenta	70-100	400-240
	Normale	100-200	240-90
	Veloce	200-300	90-50
	Veloce	300-450	50-30
Kaplan		400-600	30-18
		600-800	18-10
		800-1000	10-5
		1000-1200	5-1

- Velocità di rotazione: quando si sceglie la turbina bisogna tener conto delle possibili velocità di sincronismo col generatore, sia che la turbina venga accoppiata direttamente al generatore sia che si utilizzi un moltiplicatore di giri;
- Velocità di fuga: caratteristica che dipende dalla tipologia di turbina e va a rappresentare la velocità massima che può raggiungere in caso di distacco del carico nel momento in cui la turbina lavora al massimo carico. Aumentando la velocità di fuga, si va ad aumentare il costo del generatore e del moltiplicatore di giri in modo tale che possa resistere alle sollecitazioni maggiori.

Tabella 3: Definizione velocità di fuga in base alla tipologia di turbina e della velocità normale

Tipologia di turbina	Velocità normale [rpm]	Velocità di fuga n_{max}/n
Kaplan	75-100	2.0-2.4
Francis	500-1500	1.8-2.2
Pelton	500-1500	1.8-2.0
Banki (cross-flow)	60-1000	1.8-2.0
Turgo	600-1000	2

- Rendimento meccanico: è definito come il rapporto tra la potenza meccanica che viene trasmessa all'asse della turbina e la potenza idraulica assorbita nelle condizioni di salto e portate nominali. Generalmente le turbine ad azione sfruttano un salto netto minore, mentre quelle a reazione, avendo perdite maggiori, sfruttano un salto utile minore rispetto al salto netto. Una turbina viene progettata per lavorare al punto di massimo rendimento che corrisponde generalmente all' 80% della portata massima.

Oltre al rendimento meccanico, si definiscono altri due rendimenti: volumetrico e idraulico. Il rendimento volumetrico è pari al rapporto tra il volume d'aria che è effettivamente intrappolata nel cilindro e il volume d'aria alle condizioni di funzionamento. Il rendimento idraulico è pari al rapporto tra la potenza idraulica e quella utile, definisce quindi la capacità della macchina di trasformare l'energia meccanica in energia idraulica.

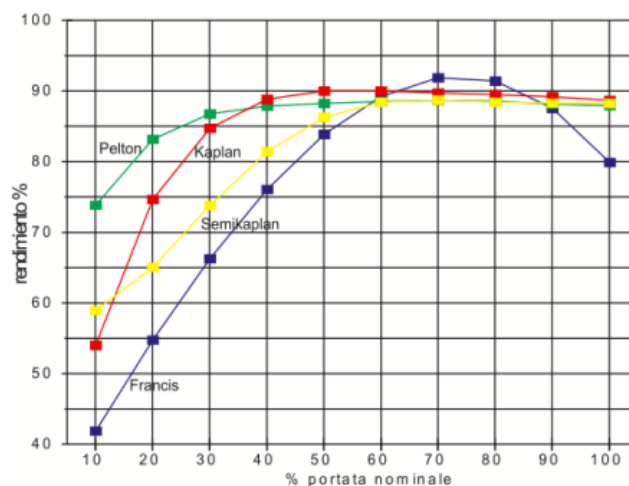


Figura 39: Grafico che classifica le turbine a seconda del rendimento che possono avere [17]

- Cavitazione: fenomeno che si verifica nel momento in cui la pressione del liquido in movimento scende al di sotto della sua tensione di vapore. Questo implica la formazione di bolle e il loro collasso, dopo il recupero di pressione, può generare esplosioni e forte rumore con conseguente danneggiamento delle superfici delle pale rotoriche. Per evitare che si venga ad avere cavitazione è necessario fare un confronto tra il NPSH (Net Positive Suction Head) disponibile e richiesto.

L'NPSH disponibile viene valutato tra l'uscita dalla girante e l'ingresso nel diffusore. All'ingresso nel diffusore questo parametro si definisce come segue:

$$NPSH_A = \left(\frac{p_e}{\rho \cdot g} + \frac{V_e^2}{2 \cdot g} \right) - \frac{p_v}{\rho \cdot g} \quad [mca] \quad (14)$$

Considerando l'ingresso del diffusore e la superficie a valle di esso, indicato col pedice 0 e supponendo che l'energia cinetica a valle allo scarico sia trascurabile ed inoltre che il fluido non sia viscoso e presenti una densità costante, si applica il principio di Bernoulli ottenendo:

$$\frac{p_e}{\rho \cdot g} + \frac{V_e^2}{2 \cdot g} + z_e = \frac{p_0}{\rho \cdot g} + z_0 + h_f \quad (15)$$

Dalla seguente formula si possono elidere i termini di velocità e pressione per definire il valore dell' $NPSH_A$ come:

$$NPSH_A = \frac{p_0}{\rho \cdot g} - \frac{p_v}{\rho \cdot g} - (z_e - z_0) + h_f \quad [mca] \quad (16)$$

L'NPSH è un parametro caratteristico che si ricava da una curva fornita direttamente dal costruttore, curva che viene definita in funzione della portata, della prevalenza e del rendimento.

Per evitare la cavitazione è necessario che $NPSH_A > NPSH_R$.

Per evitare la cavitazione si deve calcolare H_S , cioè l'altezza massima d'aspirazione che rappresenta la distanza tra il pelo libero dell'acqua nel canale e la sezione a valle della girante, parametro che viene definito come segue:

$$H_S = \frac{p_{atm} - p_v}{\rho \cdot g} - Y - NPSH_R \quad [m] \quad (17)$$

3.6 Generatori elettrici

Il generatore elettrico, definito anche come alternatore, è una macchina elettrica rotante converte l'energia meccanica in energia elettrica sotto forma di corrente, alternata generata dall'albero del rotore avente una frequenza pari a 50 o 60 Hz a seconda del luogo d'installazione.

I generatori possono essere di due tipologie: sincroni e asincroni.

I generatori sincroni sono caratterizzati da una frequenza della tensione generata che è legata alla velocità di rotazione. Il loro funzionamento è basato sull'induzione elettromagnetica in base alla quale si ha una spira conduttrice concatenata con flusso magnetico variabile che genera una forza elettromotrice indotta.

I generatori sincroni sono costruiti da un rotore, ovvero una parte cilindrica calettata sull'albero di rotazione che produce il campo magnetico mediante i poli eccitati dalla corrente continua, e da uno statore che contiene gli avvolgimenti dove si genera la forza elettromotrice indotta. Il campo magnetico rotante viene generato dal rotore tramite gli elettromagneti, il quale numero è definito dal prodotto del numero delle fasi e il numero di coppie polari; ad esempio se si ha un alternatore trifase a due poli questo presenta una coppia polare e tre elettromagneti, mentre se l'alternatore è trifase a quattro poli questo presenterà due coppie polari e sei elettromagneti. Gli elettromagneti in tutti i casi sono alimentati opportunamente.

In alternativa agli elettromagneti, che come detto sono alimentati, si possono utilizzare i magneti permanenti che non hanno bisogno di alimentazione; presenteranno però una sola coppia polare per ogni coppia di poli statorici.

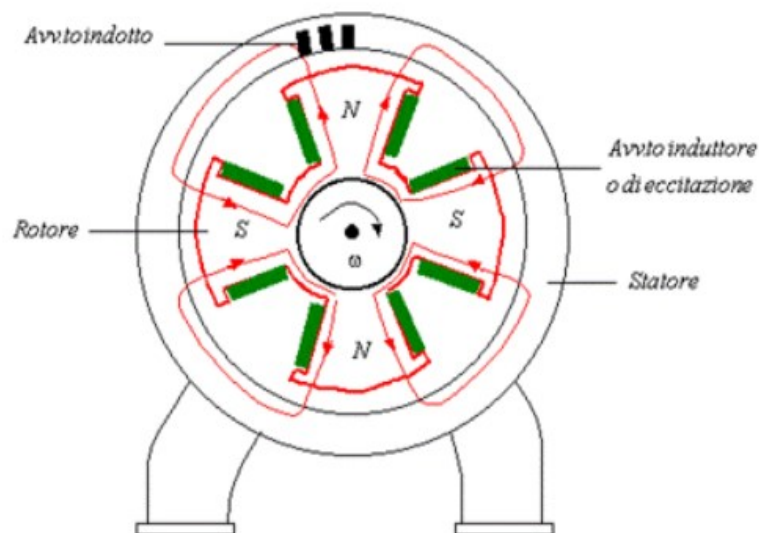


Figura 40: Schema di un generatore sincrono [18]

Il motore asincrono è utilizzato come tale quando le potenze considerate sono contenute ma soprattutto quando è collegato alla rete elettrica nazionale che è tenuta in tensione da alternatori sincroni.

Questo motore per funzionare come generatore deve prelevare l'energia reattiva dalla rete per magnetizzarla all'interno di un circuito rotorico, il rotore viene avviato mediante una fonte meccanica esterna e portato in ipersincronismo, cioè quando il campo magnetico del rotore ruota più velocemente del campo magnetico dello statore, diventando così un generatore di energia. Dunque mentre il generatore eroga potenza attiva verso la rete nazionale, assorbe potenza reattiva in modo che il campo magnetico rotante risulti sempre alimentato.

Per le turbine idrauliche, che cedono energia in parallelo alla rete nazionale, i generatori asincroni possono essere utilizzati a loro volta in parallelo alla rete che provvede alla tensione di eccitazione [7].

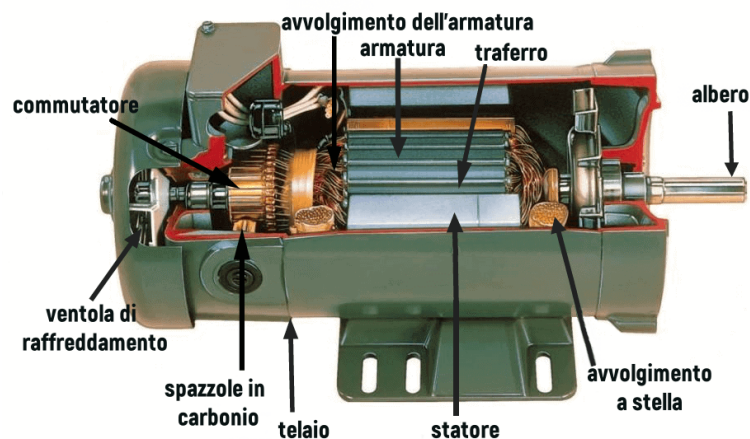


Figura 41: Motore asincrono [19]

4. Risultati e commenti

In questo capitolo sono esposti i risultati relativi al progetto in esame. Sono definite le opere civili e la progettazione delle macchine idrauliche, necessarie per il funzionamento della centrale mini-idroelettrica. Vengono quindi riportati i risultati delle analisi statiche ottenute sui diaframmi delle paratoie e le analisi statiche e d'inerzia sulla paratia di sicurezza dello sgrigliatore. Inoltre sono analizzati i risultati del dimensionamento della turbina Francis e Banki, e la successiva scelta finale. Infine, vengono riportati i dati relativi alla parte economica ricavabile con l'utilizzo di questa centrale.

4.1 Analisi tecnica dell'impianto

4.1.1 Scelta della turbina idraulica

In questo elaborato di tesi sono state valutate due tipologie di turbine: Banki e Francis. Entrambe le macchine idrauliche motrici sono dimensionate considerando le stesse condizioni nominali iniziali, ovvero un salto idraulico netto pari a 9 m e la portata nominale del fiume di $0.65 \frac{m^3}{s}$.

Il dimensionamento delle turbine consiste nella valutazione dei triangoli di velocità e del calcolo della potenza estraibile da esse.

La prima analisi è stata effettuata sulla turbina Banki. Il calcolo della potenza idealmente ottenibile da questa macchina nelle condizioni nominali in ingresso:

$$P_{ideale} = \frac{H \cdot \dot{m}}{200} = 29.25 \text{ kW} \quad (18)$$

Una volta definita la potenza ideale si è proceduto con il calcolo dei triangoli di velocità in ingresso della turbina.

Le tre velocità in questione sono: velocità assoluta in ingresso v_1 , velocità periferica u_1 e velocità relativa w_1 calcolate come segue:

$$v_1 = 4.34 \cdot \sqrt{H} \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad (19)$$

$$u_1 = \frac{1}{2} \cdot v_1 \cdot \cos \alpha_1 \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad (20)$$

$$w_1 = \sqrt{w_{1t}^2 + w_{1r}^2} \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad (21)$$

L'angolo α_1 (valutato in radianti [rad]) è compreso tra la velocità assoluta v_1 e la velocità periferica u_1 . Tipicamente, per queste turbine ha un valore compreso tra i 15° e i 25°. Oltre all'angolo α_1 si prende in considerazione anche l'angolo β_1 , cioè l'angolo tra la velocità relativa w_1 e la velocità periferica u_1 .

I valori ottenuti delle velocità e dei rispettivi angoli nella sezione d'ingresso della turbina Banki sono riportati in Tabella 4:

Tabella 4: Valori delle velocità e dei relativi angoli per la turbina Banki nella sezione d'ingresso

Dato	Valore	Unità di misura
v_1	13.02	m/s
u_1	6.25	m/s
w_1	7.21	m/s
α_1	16	°
β_1	150	°

Dai valori ottenuti si procede quindi con la rappresentazione del triangolo di velocità in ingresso alla turbina Banki.

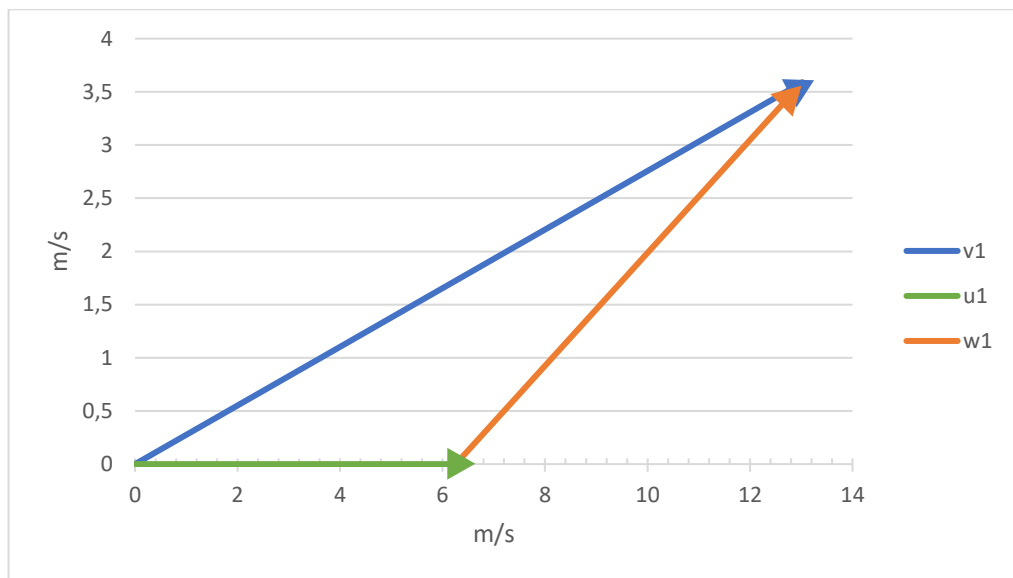


Figura 42: Triangolo di velocità in ingresso della turbina Banki

Il numero di giri considerato per la turbina in esame è pari a 3000 [rpm], valore che permette di avere il diametro esterno del rotore all'interno dei range stabiliti per la turbina Banki ($200\text{ mm} < D_1 < 400\text{ mm}$). Si calcola quindi il numero di giri caratteristico n_c che serve a confermare se, date le condizioni di salto idraulica e portata di progetto, la turbina Banki può essere considerata per essere installata in questo impianto:

$$n_c = n \cdot \frac{\sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H^3}} \quad (22)$$

In questo caso il valore di n_c è pari a 48.74, e rientra nel range definito per la turbina in esame ($18 < n_c < 50$).

Sono stati valutati poi i diametri, interno ed esterno, del rotore. Questi valgono rispettivamente 0.25 m e 0.38 m e sono calcolati mediante le seguenti formule:

$$D_1 = 39.9 \cdot \frac{\sqrt{H}}{n_g} \quad [m] \quad (23)$$

$$D_2 = 0.67 \cdot D_1 \quad [m] \quad (24)$$

Infine, il rendimento di tale turbina risulta essere uguale a 81%.

Dunque si può calcolare la potenza realmente estraibile P_e dalla turbina Banki in esame che vale 23.69 kW e calcolabile tramite la seguente equazione:

$$P_e = P_{ideale} \cdot \eta \quad [kW] \quad (25)$$

Tabella 5 riporta i dati significativi ottenuti con la turbina Banki nelle condizioni iniziali di salto netto pari a 9 m e portata $0.65 \frac{m^3}{s}$.

Tabella 5: Dati ottenuti nel caso di scelta della turbina Banki

Dati	Valore	Unità di misura
Velocità assoluta	13.02	m/s
α_1	16	°
Velocità periferica	6.25	m/s
Velocità relativa	7.21	m/s
β_1	150	°
n_g	3000	rpm
n	48.74	
D_1	0.38	m
D_2	0.25	m
z	24	
D_c	0.28	m
Y	60	°

f	0.166	
P_e	23.69	kW
η	0.81	

Successivamente, è stato affrontato il dimensionamento di una turbina Francis considerando le stesse condizioni nominali di progetto precedenti, quindi salto netto di 9 m e una portata nominale di $0.65 \frac{m^3}{s}$.

La potenza idealmente ottenibile in questo caso, secondo l' Eq. (18) è pari a 57.39 kW.

Per questa turbina, il numero di giri scelto è pari a 500 rpm e, tramite questo valore, è stato calcolato il numero di giri specifico pari a $77.58 \frac{m^{3/4}}{s^{1/2}}$ secondo l' Eq (26):

$$n_s = n \cdot \frac{\sqrt{Q}}{\sqrt[4]{H^3}} \left[\frac{m^{\frac{3}{4}}}{s^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (26)$$

Il diametro della girante e del mozzo sono noti, in quanto già a disposizione dell'azienda, e sono rispettivamente 0.48 m e 0.15 m. Con questi due valori noti è possibile calcolare la sezione utile di passaggio pari a $0.16 m^2$.

La velocità assiale ideale della turbina è data dal rapporto tra la portata nominale e la sezione ideale di passaggio che è $3.98 m^2$; in aggiunta, si valuta la velocità di rotazione ω che è pari a $52.36 s^{-1}$ e la velocità assoluta relativa al diametro delle pale v_1 diametro medio che è $8.67 m/s$.

Si procede poi con il calcolo delle velocità in ingresso ed in uscita dalla turbina. Le tre componenti, che andranno a formare il triangolo di velocità in ingresso, sono la velocità di trascinamento, la velocità assoluta e la velocità relative. Queste vengono definite tramite le Eq. (27) e (28), rispettivamente.

$$u_1 = \omega \cdot \frac{D_{girante}}{2} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (27)$$

$$v_1 = \frac{v_{assiale\ ideale}}{\cos \alpha_1} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (28)$$

$$w_1 = v_1 \text{ diametro pale} - u_1 \left[\frac{m}{s} \right] \quad (29)$$

L'angolo α_1 è pari a 65.34° e, oltre ad esso, è stato valutato anche β_1 pari a 50.01° .

Per la turbina Francis sono state valutate anche le velocità relative in uscita dalla turbina e l'angolo β_2 che si forma tra la velocità relativa e quella di trascinamento. La velocità relativa in uscita dalla turbina è data dal rapporto tra la velocità assoluta relativa al diametro della pale e il coseno dell'angolo β_2 .

$$w_2 = \frac{v_1 \text{ diametro pale}}{\cos \beta_2} \quad (30)$$

Tabella 6 riporta i valori delle velocità in ingresso e in uscita dalla turbina Francis e i rispettivi angoli.

Tabella 6: Valori di velocità e angoli della turbina Francis

Dati	Valori	Unità di misura
Velocità assoluta in ingresso	9.54	m/s
Velocità di trascinamento in ingresso	12.57	m/s
Velocità relativa in ingresso	5.57	m/s
α_1	65.34	°
β_1	50.01	°
Velocità relativa in uscita	9.16	m/s
β_2	64.23	°

I valori delle velocità vengono, poi, rappresentate tramite i triangoli di velocità in ingresso e in uscita dalla turbina.

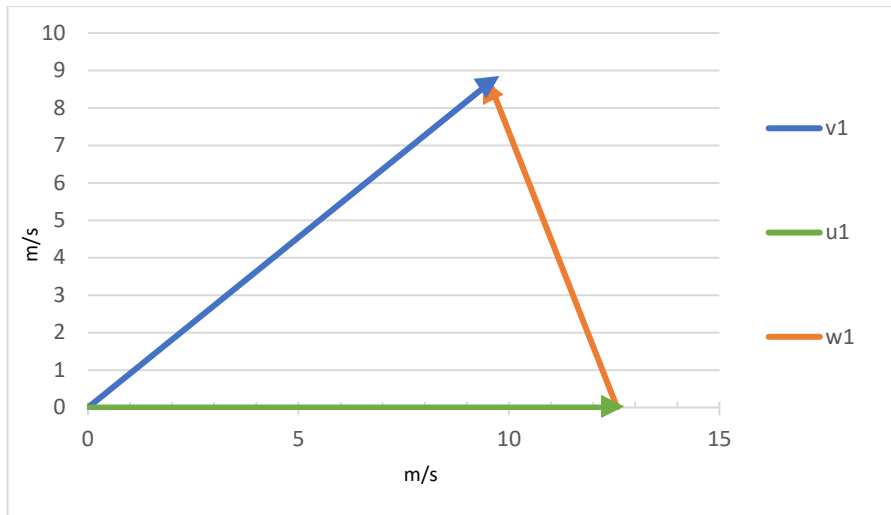


Figura 43: Triangolo di velocità in ingresso alla turbina Francis

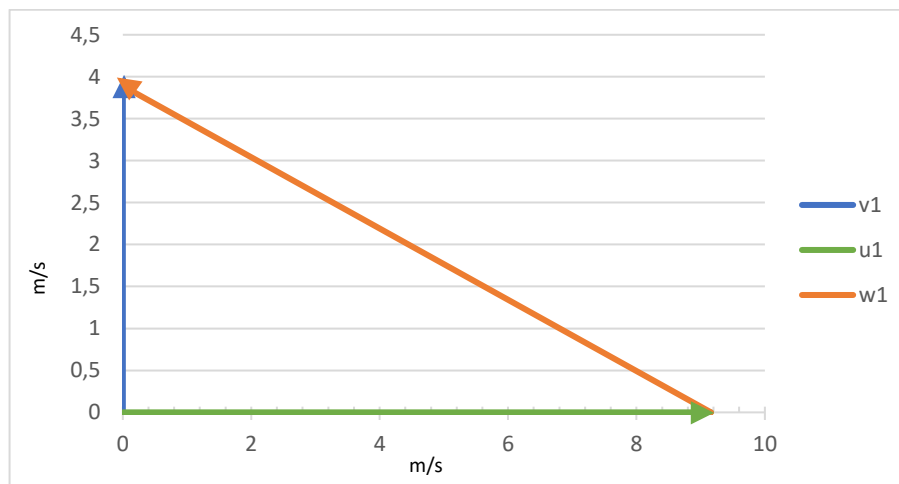


Figura 44: Triangolo di velocità in uscita dalla turbina Francis

Un'ulteriore parametro che viene calcolato nel caso della turbina Francis è il suo grado di reazione G , pari a 48.44 %, mediante l' Eq. (31):

$$G = 1 - \frac{(v_1^2 \text{ diametro pale})}{(2 \cdot 9.81 \cdot H)} \quad (31)$$

Infine, viene definito il rendimento, pari all'81% e uguale a quello della Banki precedentemente dimensionata, che permette il calcolo della potenza estraibile dalla turbina.

Il valore della potenza estraibile è di 46.48 kW calcolabile tramite l' Eq. (25).

Tabella 7 riassume tutti i dati ottenuti dal dimensionamento della turbina Francis in esame.

Tabella 7: Tabella riassuntiva dei dati caratteristici della turbina Francis

Dati	Valori	Unità di misura
Velocità assoluta in ingresso	9.54	<i>m/s</i>
Velocità di trascinamento in ingresso	12.57	<i>m/s</i>
Velocità relativa in ingresso	5.57	<i>m/s</i>
α_1	65.34	°
β_1	50.01	°
Velocità relativa in uscita	9.16	<i>m/s</i>
β_2	64.23	°
C_1 diametro medio	8.67	<i>m/s</i>
Sezione ideale di passaggio	3.98	<i>m</i> ²
P_{ideale}	57.39	<i>kW</i>
n	500	<i>rpm</i>
n_s	77.58	$\frac{m^{3/4}}{s^{1/2}}$
$D_{girante}$	0.48	<i>m</i>
D_{mozzo}	0.15	<i>m</i>
ω	52.36	1/ <i>s</i>
z	16	
η	0.81	
P_e	46.48	<i>kW</i>
G	48.44%	

Da questo dimensionamento si arriva alla conclusione che, a parità di condizioni nominali e di rendimento, la turbina Francis permette di ottenere una potenza estraibile superiore rispetto a quella ottenibile con la turbina Banki. Infatti, utilizzando la turbina Francis è possibile estrarre 46.46 kW a differenza della Banki che permette di estrarre 23.69 kW (-49%).

Dopo la scelta della turbina Francis si continua con la valutazione del fenomeno della cavitazione per la pressione dell'acqua in uscita dalla turbina non scenda al di sotto di quella di vapore (c.a. 2300 Pa) a date temperatura e pressione atmosferica. Infatti si ha che, la pressione dell'acqua in vapore a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ è pari a 2331 Pa , mentre la pressione atmosferica allo scarico è 98807 Pa .

Si passa quindi al calcolo dell'altezza minima, rispetto al pelo libero della quota in cui viene rilasciata l'acqua, alla quale si può installare la girante; per fare ciò bisogna valutare il coefficiente di Thoma che in questo caso è pari a 0.253 , ottenuto Eq. (32)

$$\sigma = 1.2715 \cdot n_{qe}^{1.41} + \frac{V^2}{2 \cdot g \cdot H_n} \text{ [m]} \quad (32)$$

La minima altezza in cui si può installare la girante della turbina rispetto valle è 8.365 m , calcolato come segue:

$$H_s = \frac{p_{atm} - p_v}{\rho \cdot g} + \frac{V^2}{2 \cdot g} - \sigma \cdot H \text{ [m]} \quad (33)$$

Una volta stabilita la turbina funzionale per la centrale in esame e, valutati tutti i fenomeni che devono essere evitati, si è proseguito con la progettazione del diffusore.

Il diffusore, o divergente, è il componente che permette di recuperare la massima quantità di energia allo scarico che altrimenti andrebbe persa.

La velocità dell'acqua all'inizio del divergente è calcolata come rapporto tra il salto netto e la sezione di inizio divergente ed è pari a 3.98 m/s . Importante, nella progettazione del diffusore, è il valore della velocità in uscita da esso che deve avere un valore all'incirca pari ad 1 m/s . La velocità in uscita del diffusore viene calcolata come:

$$v_{fine\ divergente} = \frac{H}{S_{fine\ divergente}} [m] \quad (34)$$

Dunque, noto il salto idraulico netto (9 m), si definisce il diametro finale del divergente e la sua altezza. Andando a scegliere un diametro in uscita del divergente pari a 0.9 m e un'altezza di 2 m, si è riuscito ad ottenere la velocità in uscita del divergente pari a 1.02 m/s.

Altro parametro da tenere in considerazione è l'angolo di semi apertura del diffusore che teoricamente deve essere compreso tra i 5 ° e gli 8 °. Per questo progetto si è ottenuto un angolo di semi apertura pari a 5.99 °.

Dunque, sia la velocità in uscita dal diffusore che il suo angolo di semi apertura presentano due valori rientranti nei rispettivi range precedentemente definiti.

Prima di realizzare il disegno CAD del diffusore, si è valutata la perdita di carico che si ottiene lungo esso valutando la sezione d'imbocco, del tratto rettilineo, della curva a 90 ° e la sezione dello scarico. Questa risulta essere pari a 0.00734 m.

Grazie all'utilizzo del diffusore, si può quindi recuperare la maggior parte dell'energia che altrimenti andrebbe persa. Quindi l'energia persa alla fine dell'impianto è il 0.59 %.

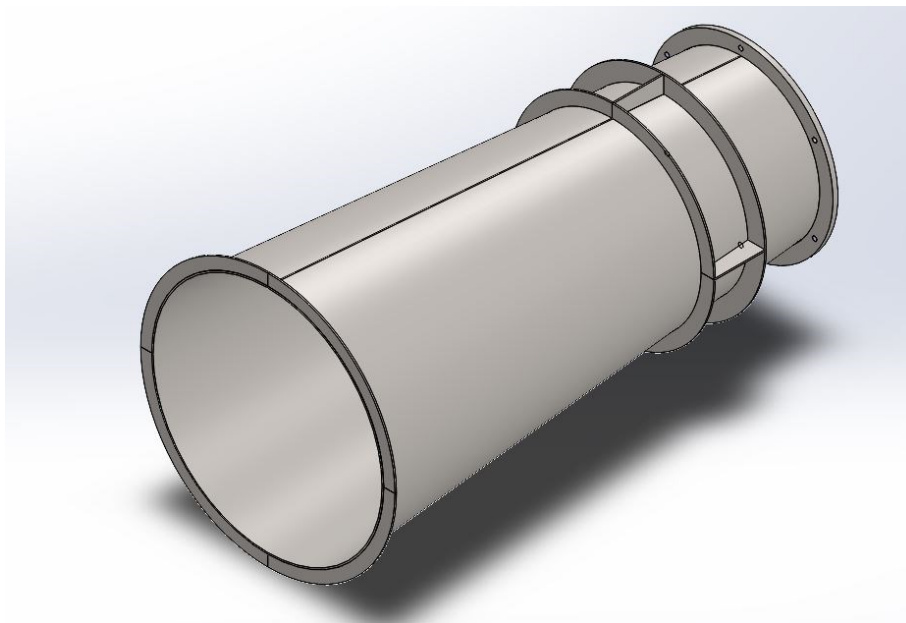


Figura 45: Diffusore progettato ex novo

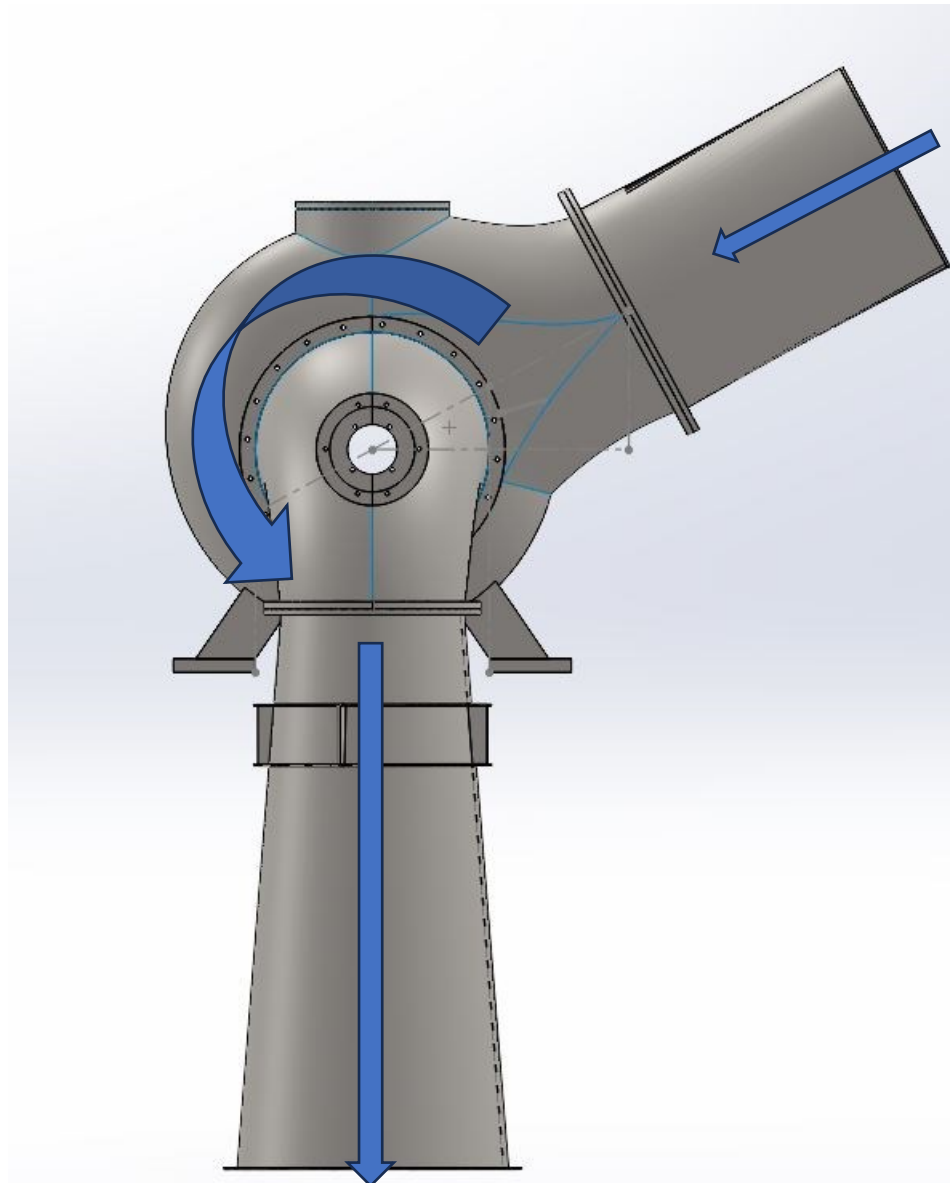


Figura 46: Turbina Francis restaurata con diffusore ex novo (solo parti fisse)

4.1.2 Scelta definitiva dell'impianto

L'impianto è formato non solo dalla turbina idraulica, ma anche da componentistica meccanica e opere civili, che sono state modificate e progettate in base a quello che questa centrale mini-idroelettrica necessitava.

I lavori svolti nel caso delle opere civili sono diversi. In primo luogo è stato abbassato il fondo del canale d'adduzione rispetto la briglia in modo tale da permettere di riattivare l'opera di presa esistente. Il fondo del canale è stato abbassato di 0.3 m rispetto al punto iniziale, ottenendo così un dislivello totale tra il fondo della briglia e il fondo del canale di 0.8 m .

Il canale d'adduzione (Figura 45) si estende per una lunghezza di 2 m e presenta una forma rettangolare con una larghezza iniziale pari a 2 m e quella finale di 1 m; inoltre il dislivello tra la briglia e il fondo del canale nella sua parte finale è pari ad 1 m.

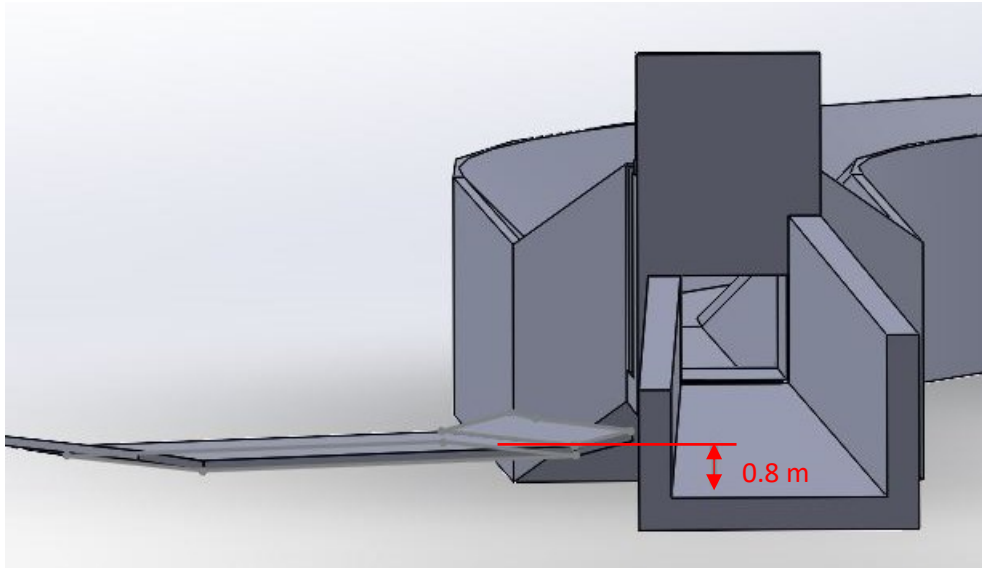


Figura 47: Briglia e canale d'adduzione

Subito dopo il canale d'adduzione, vengono posti dei muri in cemento armato, ricavando da esso lo spazio necessario alla posa della paratoia di testa canale e della paratoia sghiaiatrice.

Si prosegue quindi con il canale che presenta un cambio di sezione (Figura 46), da rettangolare a trapezoidale, che copre una lunghezza di 30 m arrivando alla vasca di carico.

La vasca di carico (Figura 47) presenta una prima parte rettangolare lunga circa 4 m dove è presente il muro sfioratore posizionato alla stessa quota della briglia. La vasca di carico presenta una profondità di 1.7 m e, al suo interno, vengono alloggiati la paratoia dissabbiatrice e lo sgrigliatore.

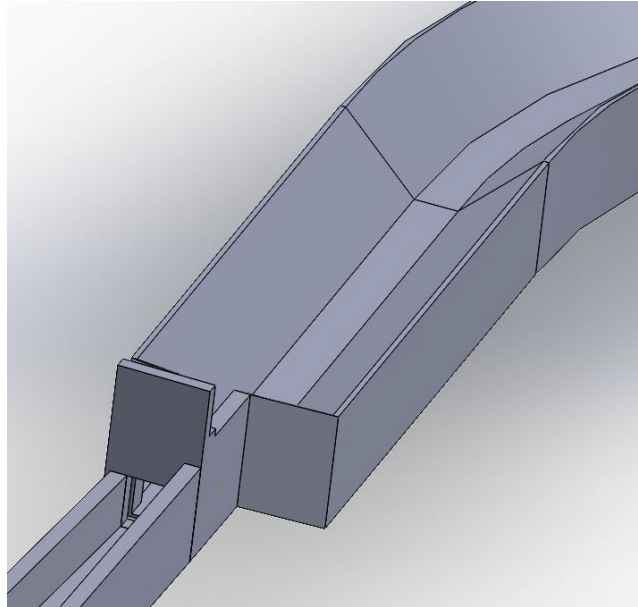


Figura 48: Transizione canale da rettangolare a trapezoidale

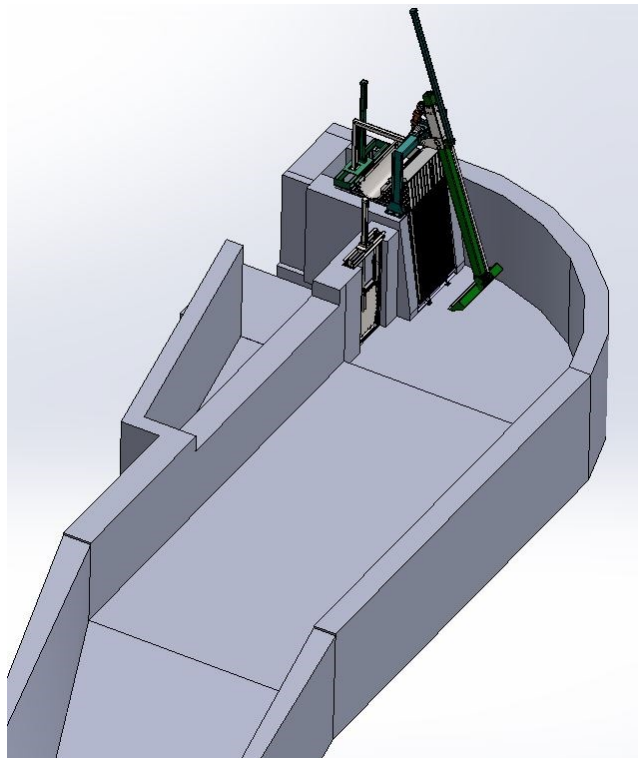


Figura 49: Vasca di carico

In questa centrale mini-idroelettrica, oltre alla turbina idraulica, sono state quindi progettate e dimensionate ulteriori componenti, ovvero: tre paratoie (Figura 48) e sgrigliatore. Per ognuna delle paratoie deve essere effettuata un' analisi statica per verificare la loro resistenza a carichi noti.

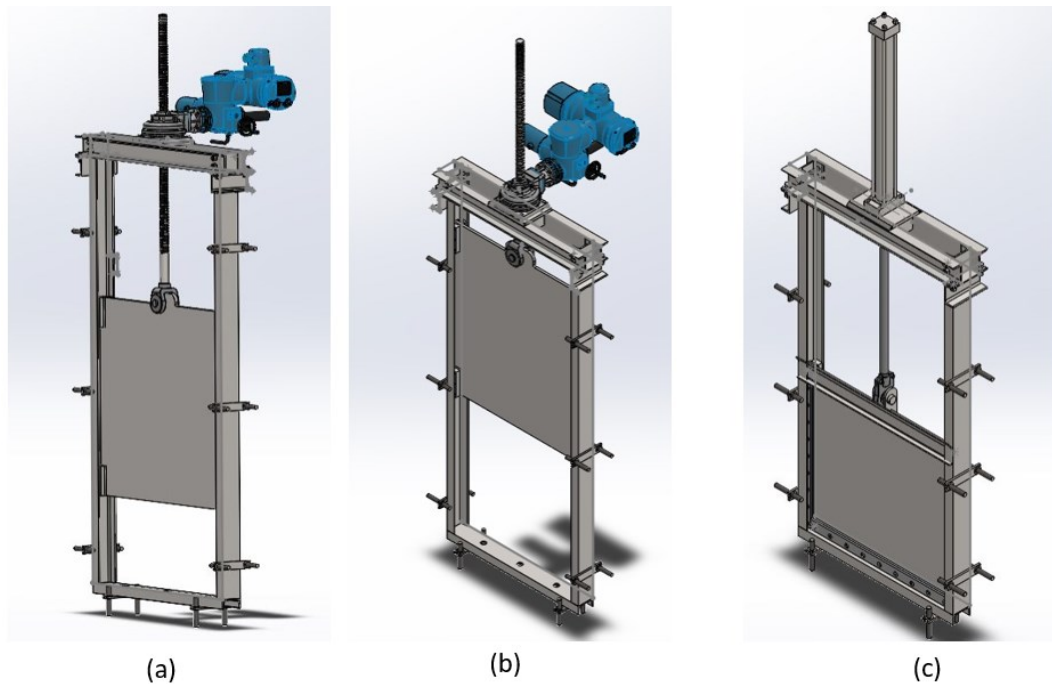


Figura 50: (a) Paratoia testa canale, (b) paratoia sghiaiatrice, (c) paratoia dissabbiatrice

L'analisi statica del diaframma viene effettuata tenendo conto del carico massimo d'acqua sulla paratoia, equivalente al valore della piena bicentenaria del fiume in cui verrà installato l'impianto idroelettrico in esame e pari a $Q = 57.84 \frac{m^3}{s}$.

Quest' analisi è stata eseguita tramite il programma SolidWorks, procedendo secondo gli step elencati:

1. Valutazione dei battenti d'acqua sul diaframma, cioè la distanza tra il fondo della briglia e la superficie inferiore della paratoia quando essa è chiusa;
2. Definizione del materiale del diaframma e dei vincoli imposti su di essa;
3. Definizione e valutazione del carico che viene generato sul diaframma, carico distribuito triangolare definito tramite la forza di gravità e una forza F calcolata come:

$$F = 9.81 * 1000 * "y" \quad [N] \quad (35)$$

dove "y" rappresenta l'altezza del diaframma della paratoia in considerazione.

I risultati ottenuti da questa analisi e le condizioni iniziali di partenza vengono descritti nelle Tabelle 8, 9 e 10.

Tabella 8: Risultati analisi statica della paratoia di testa canale

PARATOIA TESTA CANALE	
Battente [m]	3
Materiale	S275JR
Vincolo	Bordi posteriori laterali
Carico [N]	1765,59
Min Von Mises [MPa]	$4,64 \cdot e^{-05}$
Max Von Mises [MPa]	0,225

Tabella 9: Risultati analisi statica della paratoia sghiaiatrice

PARATOIA SGHIAIATRICE	
Battente [m]	3
Materiale	S275JR
Vincolo	Bordi posteriori laterali
Carico [N]	1146,85
Min Von Mises [MPa]	$3,217 \cdot e^{-05}$
Max Von Mises [MPa]	$1,528 \cdot e^{-01}$

Tabella 10: Risultati analisi statica paratoia dissabbiatrice

PARATOIA DISSABBIATRICE	
Battente [m]	3,4
Materiale	S275JR
Vincolo	Bordi posteriori laterali
Carico [N]	878,411
Min Von Mises [MPa]	$4,450 \cdot e^{-04}$
Max Von Mises [MPa]	$3,800 \cdot e^{-01}$

Oltre alle sollecitazioni e ai carichi sono state valutate anche le deformazioni del diaframma sottoposto al carico d'acqua (Figura 49, Figura 50 e Figura 51).

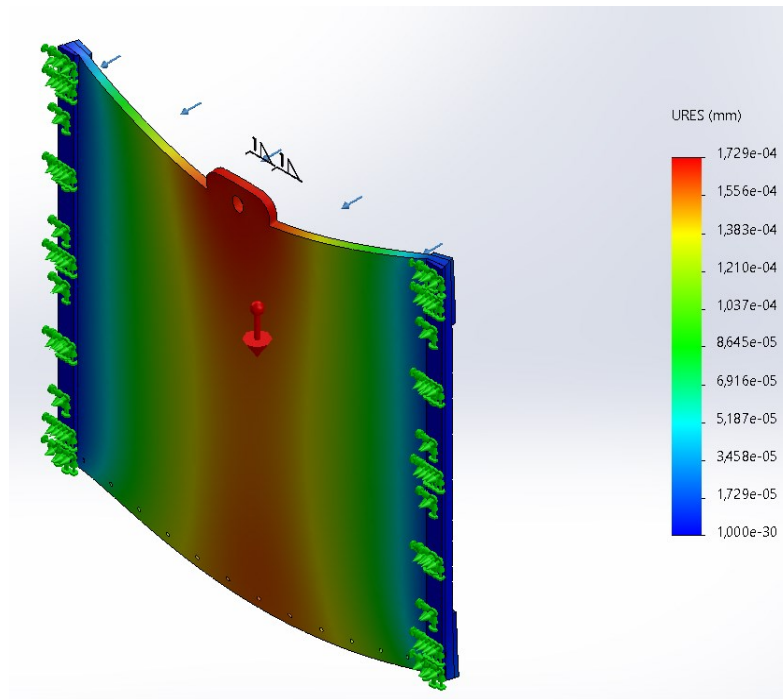


Figura 51: Deformazione diaframma paratoia di testa canale

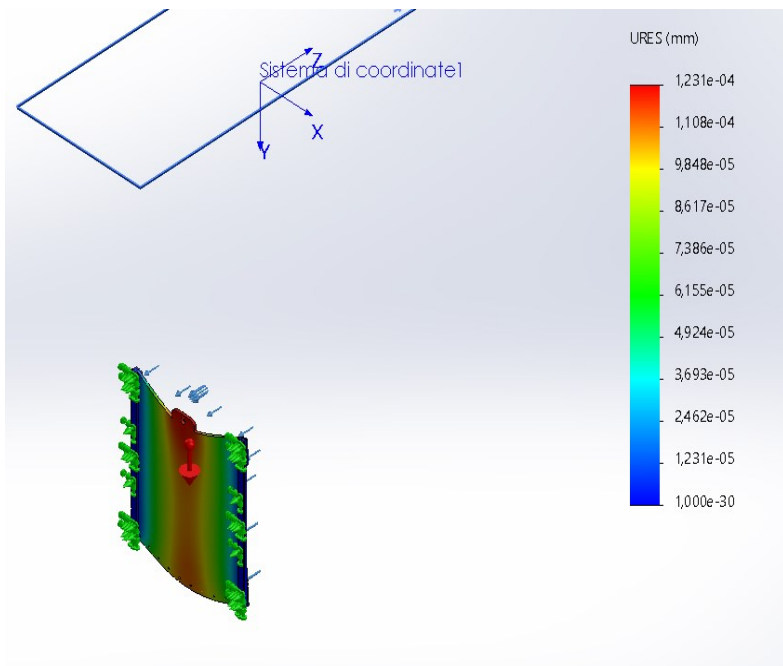


Figura 52: Deformazione diaframma paratoia sghiaiatrice

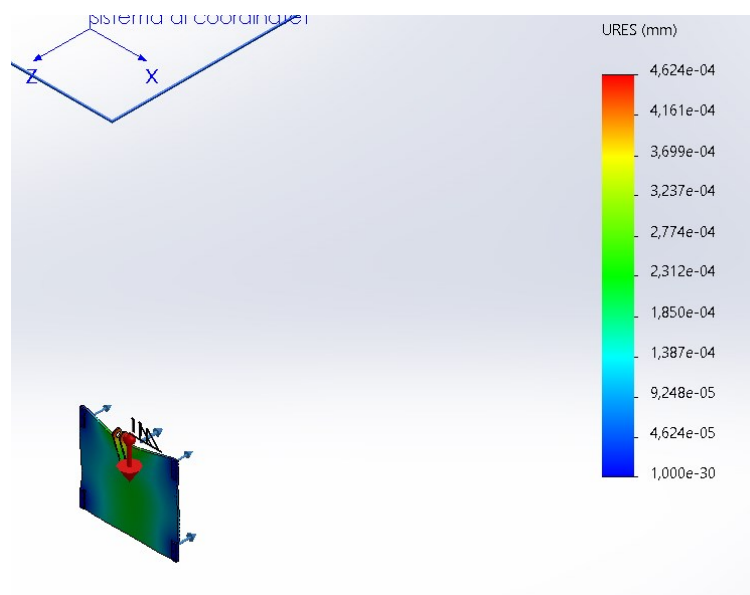


Figura 53: Deformazione diaframma paratoia dissabbiatrice

Lo sgrigliatore progettato per l'impianto idroelettrico in esame presenta un pettine, con dentiera in nylon che permette di catturare i detriti e trascinarli contro una griglia. Quest'ultima presenta una luce netta tra le lamelle pari a 9 mm.

Nella parte posteriore dello sgrigliatore è presente una paratoia di sicurezza, fondamentale in quanto deve chiudersi in situazioni di emergenza o nel caso di manutenzione della turbina.

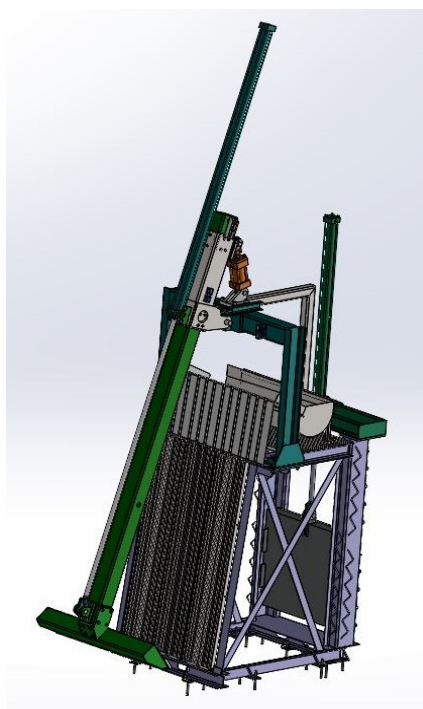


Figura 54: Sgrigliatore per l'impianto idroelettrico in esame

Oltre all'analisi statica del diaframma, per la paratoia di sicurezza viene eseguita un'analisi delle forze d'inerzia. L'analisi delle forze d'inerzia consiste nel verificare la chiusura d'emergenza della paratoia tenendo conto della forza peso di questa e deve risultare superiore alla forza d'attrito di pattini e rulli.

Dopo una prima analisi, è stato necessario aumentare lo spessore del diaframma della paratoia arrivando a definire un diaframma con spessore di 1 m e peso di 600 kg.

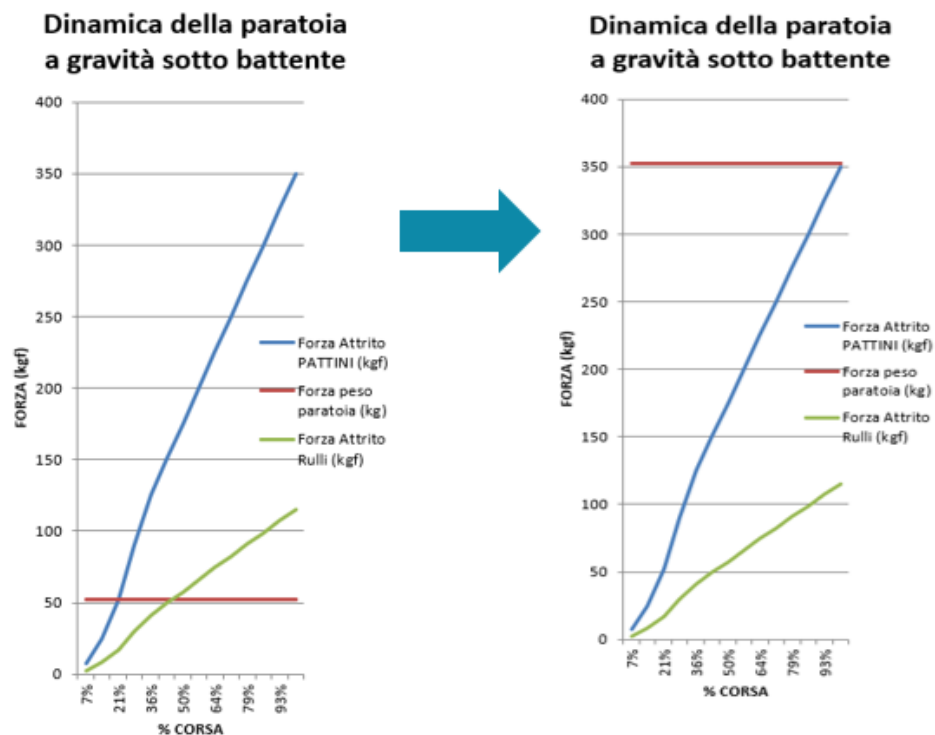


Figura 55: Analisi di forze d'inerzia. A sinistra diaframma iniziale, a destra diaframma da 600 kg.

Una volta progettate tutte le macchine idrauliche, ed analizzate tutte le opere civili da svolgere, viene scelto il generatore da correlare alla turbina.

Il generatore scelto è un generatore asincrono trifase C411 dove il raffreddamento avviene tramite una ventola calettata all'albero e il grado di protezione è IP55.

Il grado di protezione IP classifica il grado di protezione degli involucri per le apparecchiature elettriche. Viene indicato da due cifre caratteristiche con l'aggiunta, eventuale, di lettere addizionali.

La prima cifra indica il grado di protezione contro la penetrazione dei corpi solidi esterni (Tabella 11), mentre la seconda cifra indica il grado di protezione contro la penetrazione dei liquidi (Tabella 12). La prima, eventuale, lettera aggiuntiva indica il grado di protezione contro l'accesso a parti pericolose, mentre la seconda lettera aggiuntiva dà informazioni relative alla protezione del materiale.

Tabella 11: Prima cifra caratteristica del grado di protezione

IP	DESCRIZIONE
0	Protezione non presente
1	Protezione rispetto a corpi solidi con diametro >50 mm
2	Protezione rispetto a corpi solidi con diametro >20 mm
3	Protezione rispetto a corpi solidi con diametro >2.5 mm
4	Protezione rispetto a corpi solidi con diametro >1 mm
5	Protezione contro le polveri
6	Protezione totale contro le polveri

Tabella 12: Seconda cifra caratteristica del grado di protezione

IP	DESCRIZIONE
0	Protezione non presente
1	Protezione contro le cadute verticali di gocce d'acqua
2	Protezione contro le cadute di gocce d'acqua fino a 15 ° dalla verticale
3	Protezione contro le cadute di gocce d'acqua fino a 60 ° dalla verticale
4	Protezione contro spruzzi d'acqua in qualsiasi direzione
5	Protezione contro i getti d'acqua
6	Protezione contro i getti d'acqua potenti
7	Protezione contro gli effetti di immersioni temporanee
8	Protezione contro gli effetti di immersioni continue

Per quanto riguarda il raffreddamento dei generatori può essere di vario tipo:

- Ventilazione a flusso radiale;
- Ventilazione a flusso assiale;
- Aria circonferenziale;
- Ad idrogeno;
- Ad acqua.

4.2 Analisi economica dell'impianto

Dal punto di vista economico, la completa riqualificazione del mulino in esame comporta una spesa globale di 400.000 €.

Parte di questa spesa è investita per la costruzione delle apparecchiature idrauliche e delle opere civili ed è pari a 199500 €.

La parte restante comprende i costi relativi alla ristrutturazione dell'edificio, nel quale alloggerà la turbina idraulica.

Vengono riportate le singole voci che compongono la spesa totale di macchine idrauliche e opere civili (Tabella 13).

Tabella 13: Sintesi dei costi sostenuti per macchine idrauliche e opere civili per questo progetto in esame

MACCHINA IDRAULICA/OPERA CIVILE	COSTO
Opere civili (vasca di carico, canali,...)	45.000 €
Paratoia di testa canale	9.500 €
Paratoia sghiaiatrice	9.000 €
Paratoia dissabbiatrice	9.500 €
Sgrigliatore	18.000 €
Turbina	65.000 €
Generatore	8.500 €
Quadri e impianti elettrici	35.000 €
TOTALE	200.000 €

L'impianto micro-idroelettrico in esame produrrà 150.000 kWh/anno e il prezzo di vendita dell'elettricità, per questa tipologia d'impianto in Italia, è di 16.9 c€/kWh.

Il prezzo di vendita dell'elettricità è messo a disposizione dall'Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente (ARERA) che definisce il prezzo dell'elettricità a seconda della tipologia di impianto utilizzato e della sua taglia.

Tramite questa centrale micro-idroelettrica è possibile ottenere un guadagno economico annuo di circa 22.000 €, avendo considerato un 1% di costi di funzionamento e manutenzione (O&M).

Infine, si è valutato il Payback Period (PBP), ovvero il periodo necessario al recupero totale dell'investimento iniziale partendo dai valori in Tabella 14 nella quale sono riportati: anni, entrate, uscite e cash flow.

Figura 54 mostra è possibile vedere il punto di pareggio, ovvero il punto dopo il quale si realizza il profitto.

Tabella 14: Entrate e uscite relative all'impianto in esame. Cash Flow e definizione del punto di Break Point.

ANNO	ENTRATE	USCITE	CASH FLOW
0		-400.000 €	-400.000 €
1	+22.000 €		-378.000 €
2	+22.000 €		-356.000 €
3	+22.000 €		-334.000 €
4	+22.000 €		-312.000 €
5	+22.000 €		-290.000 €
6	+22.000 €		-268.000 €
7	+22.000 €		-246.000 €
8	+22.000 €		-224.000 €
9	+22.000 €		-202.000 €
10	+22.000 €		-180.000 €
11	+22.000 €		-158.000 €
12	+22.000 €		-136.000 €
13	+22.000 €		-114.000 €
14	+22.000 €		-92.000 €
15	+22.000 €		-70.000 €
16	+22.000 €		-48.000 €
17	+22.000 €		-26.000 €
18	+22.000 €		-4.000 €
19	+22.000 €		+18.000 €
20	+22.000 €		+40.000 €
21	+22.000 €		+62.000 €
22	+22.000 €		+84.000 €
23	+22.000 €		+106.000 €
24	+22.000 €		+128.000 €
25	+22.000 €		+150.000 €

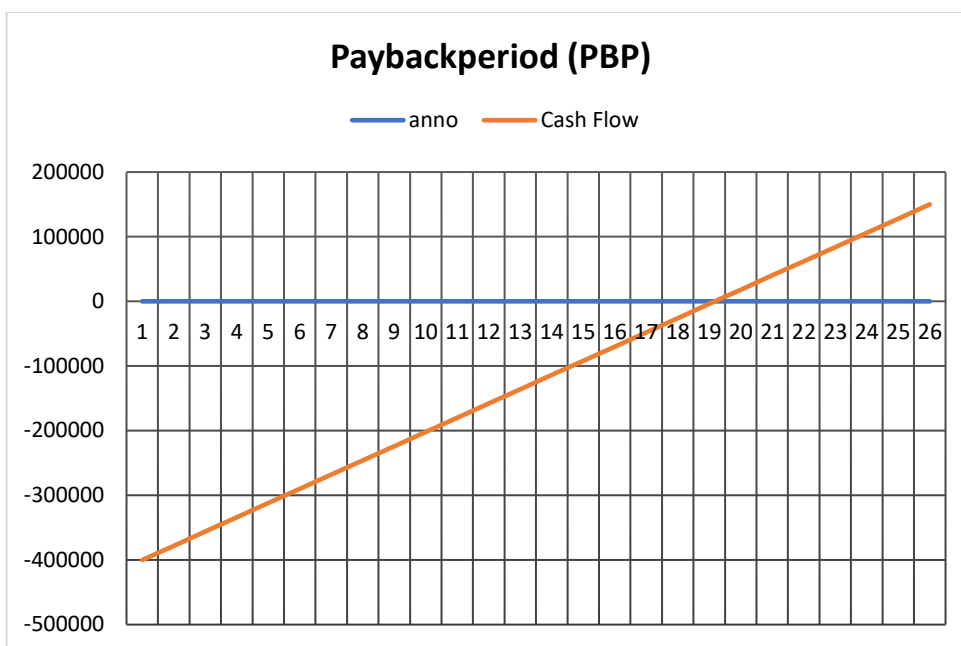


Figura 56: Grafico del periodo di ammortamento dell'investimento iniziale, relativo alla centrale mini-idroelettrica in esame

Da quanto riportato sopra (Tabella 14 e Figura 54) si evince che si inizierà ad ottenere profitto dopo 18 anni dall'investimento iniziale.

CONCLUSIONI

L'energia rinnovabile è una fonte di energia alternativa prodotta da fonti non esauribili; pertanto risulta importante progettare correttamente sistemi energetici tali da poterle sfruttare in maniera efficiente. In particolare, il settore idroelettrico risulta essere quel settore che permette di trasformare in elettricità la quasi totalità dell'energia posseduta dall'acqua.

Nello specifico, il piccolo idroelettrico può essere considerato in caso di impianti connessi direttamente alla rete, ma anche utilizzato per impianti al servizio di utenze non collegate alla rete elettrica. Fondamentale è la capacità dell'hidden hydropower, ovvero l'installazione di impianti idroelettrici di piccola taglia in aree rurali con problemi di elettrificazione, fornendo un'opzione energetica non fossile. In questo modo si può aumentare sia il numero di centrali idroelettriche sia l'affidabilità che avrà la rete elettrica.

L'obiettivo di questa tesi è quello di riqualificare un antico mulino, situato in località San Donato (Fabriano-AN), trasformandolo in una centrale micro-idroelettrica. Per fare ciò, oltre alla realizzazione di opere civili, sono state progettate e realizzate diverse apparecchiature idrauliche come le paratoie, lo sgrigliatore e la turbina idraulica.

I diaframmi delle tre paratoie necessarie in questo impianto e della paratoia di sicurezza, presentano dei bassi valori delle sollecitazioni di Von Mises e piccole deformazioni in funzione della massima portata d'acqua che il fiume possiede.

La scelta della turbina è stata definita mediante un pre-dimensionamento delle due tipologie considerate, cioè la turbina Banki e la turbina Francis.

Il pre-dimensionamento delle turbine è stato effettuato considerando le stesse condizioni nominali iniziali: salto netto pari a 9 m , portata nominale di $0.65 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ e lo stesso rendimento del 81%.

Dal dimensionamento risulta che dalla turbina Banki è possibile estrarre una potenza pari a 23.69 kW , mentre con la turbina Francis si può estrarre una potenza

corrispondente a 46.48 kW . Questo è il risultato più importante da considerare per la scelta della turbina, la quale appunto ricadrà sulla turbina Francis.

Stabilito l'utilizzo della turbina Francis è stato progettato e dimensionato il relativo diffusore in uscita dallo scarico. Questo presenta un diametro in uscita pari a 0.9 m e la sua altezza sarà di 2 m , che permetterà di avere in uscita dal diffusore stesso, una velocità pari a 1.02 m/s e un angolo di semi apertura di 5.99° .

Da questi dati ottenuti viene calcolata l'energia che viene persa all'uscita del diffusore che è solamente il 0.59% .

Dunque, è stata scelta la turbina Francis in quanto permette di ottenere, a parità di condizioni nominali e di rendimento, una potenza estraibile di circa due volte superiore a quella ottenibile con la turbina Banki. Inoltre il diffusore progettato permette di recuperare la quasi totalità dell'energia che altrimenti andrebbe persa.

Dal punto di vista economico la spesa sostenuta inizialmente per la riqualificazione del mulino è di 400.000 € . L'impianto produrrà 150.00 kWh/anno e, essendo di 16.9 c€/kWh il prezzo dell'elettricità in Italia per questa tipologia d'impianto, si otterrà un guadagno economico annuo di 22.000 € . Il periodo d'ammortamento per questa centrale è di 18 anni rispetto all'investimento iniziale.

In conclusione, questo elaborato di tesi può essere preso in considerazione per lo studio e progettazione di impianti simili a quello studiato.

REFERENZE

1. <https://www.rivistaenergia.it/2022/04/idroelettrico-il-gigante-dimenticato-dellelettricit-rinnovabile/#:~:text=In.>
2. <https://www.enelgreenpower.com/it/learning-hub/energie-rinnovabili/energia-idroelettrica/italia>
3. http://www.ambiente-energia.info/tutela_ambiente/mini_idroelettrico.html
4. Design of hydraulic gates, Paulo C.F.Erbisti, A.A. Balkema Publishers
5. <https://it.wikipedia.org/wiki/Sgrigliatore>
6. <https://it.wikipedia.org/wiki/Turbina>
7. <https://www.chimica-online.it/fisica/alternatore.htm>

INDICE FIGURE

Figura 1: Capacità idroelettrica nel mondo nel corso degli anni [1]	10
Figura 2: Grafico della distribuzione dell'energia idroelettrica in Europa [2]	11
Figura 3: Potenza idroelettrica installata per regione in Italia [3]	12
Figura 4: Schema di un impianto idroelettrico ad acqua fluente [4].....	15
Figura 5: Schema di un impianto idroelettrico a bacino [4]	16
Figura 6: Schema di un impianto idroelettrico con bacini di accumulo [5].....	17
Figura 7: Panoramica geografica del fiume Marena e del sito in esame	20
Figura 8: Edificio prima dei lavori	21
Figura 9: Presa del canale di derivazione con quota di +0.8 m rispetto quella attuale dei alveo fluviale	21
<i>Figura 10: Riprofilatura del canale d'adduzione esistente</i>	22
Figura 11: Paratoia sghiaiatrice originale	23
Figura 12: Vasca di carico del mulino attualmente presente	23
Figura 13 Retro di una paratoia a segmenti, Diga di Rosetta, Egitto (1860) [6]	28
Figura 14 Schema delle parti incassate: (a) travetto, (b) fessura per il rivestimento, (c) architrave, (d) guida per la guarnizione, (e) linea guida per la ruota, (f) guide laterali, (g) controguide [6].....	30
Figura 15: Paratoia a ribalta, Diga Villeperrot, ampiezza 16.85 m e altezza 3.3 m [6].....	33
Figura 16: Vista di una paratoia a ribalta con interruzione delle falde [6].....	34
Figura 17: Paratoia a cilindro, Vianden Powerplant [6].....	35
Figura 18: Paratoia scorrevole in acciaio inossidabile (H.Fontaine) [6].....	37
Figura 19: Paratoia scorrevole legnosa, (a) diaframma, (b) guide laterali, (c) sistema di apertura, (d) tirante, (e) linguetta legno, (f) fascio di legno (g) sigillo finale [6]	38
Figura 20: Paratoia a cingoli: (a) diaframma, (b) catena di rulli, (c) guarnizione superiore, (d) fine trave, (e) rulli, (f) guida rulli, (g) guarnizione laterale, (h) guarnizione inferiore [6].....	39
Figura 21: Paratoia a rulli [6]	41
Figura 22: Paratoia a segmento automatica con contrappeso: (a) contrappeso, (b) cuscinetto, (c) valvola di mandata, (d) galleggiante, (e) valvola di drenaggio [6]	41
Figura 23: Paratoia a segmento doppio, Diga di Rapperswill-Auenstein (Zwag) [6]	42
Figura 24: Paratoia a settore, Diga di St. Aldegund [6].....	43
Figura 25: Paratoia Stoney: (a) diaframma, (b) soglia, (c) percorso dei rulli, (d) catena del treno di rulli, (e) montacarico, (f) cavo diaframma, (g) controguida, (h) rullo, (i) guarnizione laterale, (j) treno di rulli, (l) puleggia [6]	43
Figura 26: Paratoia a tamburo, Diga Friant (USA): (a) diaframma, (b) cerniera, (c) guarnizione [6]	44
Figura 27: Paratoia a trappola d'orso, Giga Schinznach-Bad [6]	45
Figura 28: Paratoia a ruota fissa [6].....	45
Figura 29: Sgrigliatore con braccio telescopico, Orte (Italia), di proprietà della Renpower [7].....	49
Figura 30: Schematizzazione della velocità per la turbina Pelton [8]	52
Figura 31: Turbina Pelton [9]	53
Figura 32 Schematizzazione parti della turbina Francis [10].....	54
Figura 33: Girante turbina Francis [11].....	55

Figura 34: Turbina Francis [12]	56
Figura 35: Turbina Kaplan, con vista sui singoli componenti [13]	57
Figura 36: Turbina Banki [14]	58
Figura 37: Turbina Turgo [15]	59
Figura 38: Grafico che classifica le turbine a seconda della portata minima che possono lavorare [16]	60
Figura 39: Grafico che classifica le turbine a seconda del rendimento che possono avere [17]	62
Figura 40: Schema di un generatore sincrono [18]	64
Figura 41: Motore asincrono [19].....	65
Figura 42: Triangolo di velocità in ingresso della turbina Banki.....	68
Figura 43: Triangolo di velocità in ingresso alla turbina Francis.....	72
Figura 44: Triangolo di velocità in uscita dalla turbina Francis	72
Figura 45: Diffusore progettato ex novo.....	75
Figura 46: Turbina Francis restaurata con diffusore ex novo (solo parti fisse).....	76
Figura 47: Briglia e canale d'adduzione.....	77
Figura 48: Transizione canale da rettangolare a trapezoidale.....	78
Figura 49: Vasca di carico	78
Figura 50: (a) Paratoia testa canale, (b) paratoia sghiaiatrice, (c) paratoia dissabbiatrice	79
Figura 51: Deformazione diaframma paratoia di testa canale	81
Figura 52: Deformazione diaframma paratoia sghiaiatrice.....	81
Figura 53: Deformazione diaframma paratoia dissabbiatrice	82
Figura 54: Sgrigliatore per l'impianto idroelettrico in esame	82
Figura 55: Analisi di forze d'inerzia. A sinistra diaframma iniziale, a destra diaframma da 600 kg.	83
Figura 56: Grafico del periodo di ammortamento dell'investimento iniziale, relativo alla centrale mini- idroelettrica in esame	87

BIBLIOGRAFIA

- [1] IEA, «Hydropower Special Market Report,» 2021.
- [2] G. P. Repetto, «Idroelettrico: il gigante rinnovabile dimenticato,» [Online]. Available: <https://www.rivistaenergia.it/2022/04/idroelettrico-il-gigante-dimenticato-dellelectricita-rinnovabile/#:~:text=In>. [Consultato il giorno 18 Settembre 2023].
- [3] R. QualEnergia.it, «Idroelettrico e bioenergie: la potenza in esercizio a fine 2022 in Italia,» [Online]. Available: [https://www.qualenergia.it/articoli/idroelettrico-bioenergie-potenza-esercizio-fine-2022-italia/#:~:text=La%20potenza%20idroelettrica%20in%20Italia,potenza%20installata%20\(18.129%20MW\)](https://www.qualenergia.it/articoli/idroelettrico-bioenergie-potenza-esercizio-fine-2022-italia/#:~:text=La%20potenza%20idroelettrica%20in%20Italia,potenza%20installata%20(18.129%20MW)). [Consultato il giorno 18 Settembre 2023].
- [4] F. Next, «Centrale idroelettrica ad acqua fluente,» [Online]. Available: <https://www.frosionext.com/centrale-idroelettrica-ad-acqua-fluente/>. [Consultato il giorno 18 Settembre 2023].
- [5] E. Méngu, «IntornoTirano.it,» [Online]. Available: <https://www.intornotirano.it/articoli/economia-e-politica/gli-accumuli-di-energia-elettrica-una-forza-conservata>. [Consultato il giorno 10 ottobre 2023].
- [6] P. C. Erbisti, Design of Hydraulic Gates, Lisse: A.A. BALKEMA PUBLISHERS, 2004.
- [7] R. Group, «Renpower Group,» [Online]. Available: <https://renpower.group/sgrigliatori/telescopic-arm-orte-2/>. [Consultato il giorno 18 Settembre 2023].
- [8] fantasiaipsiam, «Wordpress,» [Online]. Available: <https://fantasiaipsiam.files.wordpress.com/2015/04/pelton.pdf>. [Consultato il giorno 07 ottobre 2023].
- [9] A. Nassiri, «Wikipedia,» [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Turbina_Pelton. [Consultato il giorno 18 Settembre 2023].
- [10] fantasiaipsiam, «Wordpress,» [Online]. Available: <https://fantasiaipsiam.files.wordpress.com/2013/04/francis.pdf>. [Consultato il giorno 07 Ottobre 2023].
- [11] M. S. d. M. e. d. Meccanismi, «Museo Storico dei Motori e dei Meccanismi,» [Online]. Available: <https://www.museomotori.unipa.it/scheda.php?id=84>. [Consultato il giorno 19 Settembre 2023].
- [12] G. Hydropower, «Getai Hydropower,» [Online]. Available: <https://es.gthec.cn/products/francis-turbine.html>. [Consultato il giorno 20 Settembre 2023].

- [13 A. Volza, «Vehicle CuE | Close-up Engineering,» [Online]. Available:
] <https://vehiclecue.it/turbina-kaplan-analisi-funzionamento/10674/>. [Consultato il giorno 20 Settembre 2023].
- [14 M. Amarancio e R. Flores, «Doc Player,» [Online]. Available: <https://docplayer.es/41285066-Turbina-de-flujo-transversal-o-michell-banki-mg-amancio-r-rojas-flores-mg-amancio-rojas-f-1.html>. [Consultato il giorno 20 Settembre 2023].
- [15 hydroag, «hydroag,» [Online]. Available: <https://www.hydro-ag.com/turbine-turgo/>. [Consultato il giorno 20 Settembre 2023].
- [16 G. Meazza, «GM HYDRO,» [Online]. Available: <https://www.gmhydro.it/it/fondamenti/>. [Consultato il giorno 07 Ottobre 2023].
- [17 R. Ricci, *Mini Idroelettrico Parte Terza*.
]
- [18 chimica-online, «chimica-online.it,» [Online]. Available: <https://www.chimica-online.it/fisica/alternatore.htm>. [Consultato il giorno 21 Settembre 2023].
- [19 S. Puglisi, «ProfPuglisiSalvatore,» [Online]. Available:
] <https://profpuglisisalvatore.altervista.org/didattica/differenza-tra-motore-sincrono-e-asincrono/>. [Consultato il giorno 21 Settembre 2023].