

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

Sede di Forlì

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

Classe L-9

ELABORATO FINALE DI LAUREA

in

Disegno tecnico assistito dal calcolatore (c.i)

**STUDIO ED OTTIMIZZAZIONE DI UNA
TURBINA IDRAULICA PER PICCOLI STRAMAZZI**

CANDIDATO

Andrea Ugolini

RELATORE

Prof. Ing. Luca Piancastelli

Anno Accademico 2014/2015

Sessione I

Indice

| | |
|---|-----------|
| 1.Le fonti rinnovabili..... | 5 |
| 2.L'energia idroelettrica..... | 11 |
| 2.1 Introduzione generale..... | 11 |
| 2.2 Europa 2020-20 | 14 |
| 2.3 Il ruolo dell' energia idroelettrica | 16 |
| 2.4 Micro e pico | 18 |
| 3.Il ciclo dell'acqua | 21 |
| 3.1 L'acqua | 21 |
| 3.2 Vento e nuvole | 23 |
| 3.3 Il servizio idrico..... | 24 |
| 4. Idraulica..... | 27 |
| 4.1 Introduzione all'idraulica | 27 |
| 4.2 Energia e carico idraulico | 27 |
| 4.3 Perdite di carico | 30 |
| 4.4 Potenza idraulica a disposizione..... | 30 |
| 5. Moto dei fluidi | 33 |
| 5.1 Equazione del moto nei fluidi | 33 |
| 6 Turbine idrauliche | 35 |
| 6.1 Classificazione turbine ad alta efficienza | 35 |
| 6.1.1 Turbine Pelton | 36 |
| 6.1.2 Turbine Francis..... | 38 |
| 6.1.3 Turbine Kaplan e turbine a elica..... | 41 |
| 6.2 La turbina Banki-Michell | 43 |
| 6.2.1 Caratteristiche principali..... | 43 |
| 6.2.2 Energia prodotta..... | 47 |
| 7 Ideazione della prima turbina | 51 |
| 7.1 Idea iniziale..... | 51 |
| 7.2 Dimensionamento dell'impianto..... | 52 |

| | |
|--|------------|
| 7.3 La turbina | 53 |
| 7.3.1 L'idea di partenza | 53 |
| 7.4 Dimensionamento della turbina | 57 |
| 7.4.1 Velocità e angoli delle pale | 57 |
| 7.4.2 Numero di giri | 59 |
| 7.4.3 Diametro del rotore..... | 60 |
| 7.4.4 Geometria e numero di pale | 62 |
| 7.4.5 Geometria dell'iniettore..... | 63 |
| 7.4.6 Carcassa..... | 66 |
| 7.4.7 Assemblaggio | 67 |
| 8.La Seconda Turbina | 69 |
| 8.1 Introduzione..... | 69 |
| 8.2 Turbina Darrieus..... | 69 |
| 8.3 Limite di Betz..... | 72 |
| 8.4 Principio di funzionamento | 76 |
| 8.5 Specifiche di progetto | 80 |
| 8.6 Il profilo delle pale NACA | 82 |
| 8.6.1 Caratteri generali | 82 |
| 8.6.2 Scelta del profilo..... | 84 |
| 8.7 Simulazione con FluidSimulation | 85 |
| 8.8 Configurazioni | 101 |
| 8.8.1.Tiranti | 101 |
| 8.8.2. A doppio appoggio con cuscinetto | 102 |
| Conclusioni..... | 105 |
| Bibliografia e sitografia: | 107 |

Premessa

Lo sfruttamento del ciclo dell'acqua per la produzione di energia ha le sue origini fin dagli inizi della evoluzione tecnologica: abbiamo notizia che già i romani e i greci utilizzavano l'energia cinetica prodotta per azionare semplici macchine come i mulini ad acqua. Le prime macchine degli studiosi rinascimentali sfruttavano l'energia contenuta in un flusso d'acqua per l'irrigazione e la bonifica di zone paludose. Con l'inizio dell'era moderna e con la rivoluzione industriale l'energia idraulica ha giocato un ruolo di primaria importanza per la produzione di potenza elettrica, soprattutto nel nostro paese nel quale erano carenti risorse di altro tipo. Nell'ultima parte dell'Ottocento, con l'invenzione della **turbina**, l'energia idroelettrica divenne una delle principali fonti di energia utilizzata dall'umanità, tanto che ad oggi riesce a ricoprire circa un quinto **dell'intero fabbisogno globale di energia**. In **Italia**, secondo dati del 2010, le centrali idroelettriche producono circa il 14% del fabbisogno lordo.

Nei confronti di questa importante risorsa si guarda con interesse in relazione ad obiettivi sempre più rilevanti di riduzione delle forme di inquinamento su scala globale e inoltre come campo in cui portare avanti, in scala ridotta, iniziative di sfruttamento su piccola scala per realizzare progetti di recupero energetico (come può essere lo sfruttamento di piccoli fiumi o canali). In conclusione l'energia e l'idraulica sono due mondi strettamente collegati e questo legame si manterrà anche negli anni a venire. Dato che i luoghi di collocazione di impianti di grandi portate sono ormai terminati, da ora in poi, soprattutto in Italia, l'idroelettrico sarà caratterizzato dalla diffusione di impianti di dimensioni sempre più ridotte nell'ottica delle smartgrid.

Quindi le potenzialità del “micro” e “pico” idroelettrico appaiono tutt’oggi promettenti per il raggiungimento di importanti obiettivi sul piano economico, ambientale ed energetico.

In questa tesi si concentrerà l’attenzione su impianti pico e micro idroelettrici , in grado di generare potenza elettrica a partire da flussi d’acqua modesti e salti geodetici limitati (dai 2 ai 4 metri): inoltre, la possibilità di sfruttare stramazzi preesistenti come piccoli sbarramenti del corso d’acqua permetterà l’installazione di più macchine in serie che ridurrà notevolmente i costi iniziali di investimento per la realizzazione dell’impianto e consentirà il recupero di una maggiore quantità di energia.

Introduzione

I piccoli impianti idroelettrici sono caratterizzati da una potenza installata ridotta che comporta l'utilizzo di strutture molto minori rispetto ad una diga; esse hanno un minore impatto ambientale ed inoltre sono più sicure, in quanto sfruttano eventualmente un piccolo volume d'acqua nel bacino. Questa potrebbe essere la strada da seguire per i prossimi investimenti sulle energie alternative, alla luce della direttiva europea 2009/28 che ha fissato l'obiettivo del 20% di energia proveniente da fonti rinnovabili.

Per l'Italia il cosiddetto "oro blu" è una risorsa non da sottovalutare: circa i tre quarti dell'energia proveniente da fonti pulite deriva dalle centrali idroelettriche, inoltre esistono delle possibilità di impiego di tale risorsa in piccola scala che rendono vane le critiche relative all'impatto sull'ambiente.

Il procedimento di base è sempre lo stesso: trasformare l'energia cinetica e potenziale della massa d'acqua che si sposta da una quota superiore ad una inferiore, prima in energia meccanica tramite una turbina e poi, in energia elettrica per mezzo di un alternatore. L'Organizzazione delle Nazioni Unite per lo Sviluppo Industriale definisce "micro" gli impianti idroelettrici che hanno una potenza installata inferiore ai 100 kW; e "pico" quelli che hanno una potenza inferiore al kW.

Questi impianti di dimensioni ridotte hanno l'enorme vantaggio di inserirsi nell'ambiente con applicazioni di limitato impatto; i pochi componenti necessari sono il generatore, la turbina, il motore elettrico con i rispettivi cavi, e la carcassa con il condotto di invaso; in alcuni casi, all'occorrenza, una condotta per incanalare l'acqua.

Installando questi impianti non vi è distruzione della fauna ittica, i fiumi non vengono lasciati in secca per mesi e non si alterano le falde acquifere.

In sostanza si potrebbe investire sul “pico-hydro” tutte quelle volte in cui si presenta un fabbisogno energetico da soddisfare e si ha a disposizione una portata limitata di acqua.

Questa tesi ha come scopo principale lo studio e l’ottimizzazione della producibilità di un sistema pico-idroelettrico che si adatti a queste condizioni di funzionamento e utilizzo. Partendo da alcuni dati di progetto fondamentali, ovvero la velocità del corso d’acqua, la portata d’acqua a disposizione e il salto idraulico netto, si è proceduto con il dimensionamento della girante.

Nel corso della progettazione si è tenuto conto di diversi fattori che hanno indirizzato le scelte di progetto impiegate: in particolare si è cercato di creare un prodotto con le seguenti caratteristiche:

- Efficienza
- Flessibilità
- Producibilità su larga scala
- Semplicità di costruzione

Una parte importante del lavoro di tesi è la realizzazione di un modello CAD del sistema utilizzando il software SolidWorks, fornito dall’Università di Bologna ; tramite il disegno si avrà un’idea più precisa e dettagliata del modello e si potranno vedere le prove fluidodinamiche realizzate con il FluidSimulation.

1.Le fonti rinnovabili

La denominazione di ‘energie rinnovabili’ comprende le forme di energia prodotte da fonti derivanti da specifiche risorse naturali che, per loro caratteristica intrinseca, si rigenerano almeno alla stessa velocità con cui vengono consumate o non sono “esauribili” nella scala dei tempi di “ere geologiche” e, per estensione, il cui utilizzo non pregiudica le stesse risorse naturali per le generazioni future.

Le fonti di energia rinnovabili si rigenerano dopo l'utilizzo.

Questo potrebbe apparentemente violare il primo postulato della termodinamica, in base al quale nulla si crea e nulla si distrugge, ma tutto si trasforma. Le fonti rinnovabili non nascono dal nulla, sono frutto di un processo naturale che le origina. Ad esempio, l'energia solare è generata dal Sole continuamente e i raggi solari la veicolano nello spazio verso ogni direzione. L'uomo può utilizzare o meno l'energia solare, poiché quest'ultima viene continuamente prodotta. Una risorsa rinnovabile esauribile (es. boschi, pesci, ecc.) si riproduce nel tempo a un determinato tasso di rigenerazione che deve essere necessariamente superiore al tasso di sfruttamento (o tasso d'uso) da parte dell'uomo.

Stiamo parlando quindi di forme di energia alternative alle tradizionali fonti fossili (relative alle energie non rinnovabili). Quando utilizziamo il petrolio in una combustione, questo si trasforma in modo irreversibile in calore, scorie e gas. Una volta utilizzato non è possibile riprodurre il petrolio. Molte di queste fonti rinnovabili hanno la caratteristica di essere anche energie pulite, ovvero che non immettono in atmosfera sostanze nocive e/o climatizzanti quali ad esempio la CO₂.

Esse sono dunque alla base della cosiddetta “economia verde”.

Una risorsa rinnovabile si dice anche "sostenibile", se il tasso di rigenerazione della medesima è uguale o superiore a quello di utilizzo.

Tale concetto implica la necessità di un uso razionale delle risorse rinnovabili ed è particolarmente importante per quelle risorse come ad esempio, le forestali per le quali la disponibilità non è indefinita rispetto ai tempi d'evoluzione della civiltà umana sulla Terra, quali invece le fonti solari o eoliche. Le risorse rinnovabili presentano numerosi vantaggi, di cui i maggiori sono senza dubbio l'assenza di emissioni inquinanti durante il loro utilizzo (infatti sono chiamate "fonti pulite") e la loro inesauribilità. L'utilizzo di queste fonti non ne pregiudica la disponibilità nel futuro e sono preziosissime risorse per creare energia riducendo al minimo l'impatto ambientale. In questo modo si tutela la natura nel rispetto delle prossime generazioni e, oltretutto, si limitano i costi di produzione e distribuzione di energia.

Per quanto riguarda le risorse rinnovabili di tipo energetico, si considerano tali:

- l'irraggiamento solare (per produrre energia termica ed energia elettrica);
- il vento (fonte di energia meccanica ed energia elettrica);
- le biomasse (combustione, per generazione termica e cogenerazione di calore ed elettricità).
- le maree e le correnti marine in genere;
- i salti di quota dell'acqua (fonte idroelettrica).

In senso lato, si possono considerare "fonti" rinnovabili anche i "pozzi" termici utilizzabili per il raffrescamento passivo degli edifici:

- aria (raffrescamento microclimatico);
- terreno (raffrescamento geotermico);
- acqua nebulizzata (raffrescamento evaporativo);
- cielo notturno (raffrescamento radiativo).

Le fonti di energia rinnovabili associate a tali risorse sono quindi l'energia idroelettrica, quella solare, eolica, marina e geotermica, ovvero quelle fonti il cui utilizzo attuale non ne pregiudica la disponibilità nel futuro. Al contrario, le energie "non rinnovabili", sono limitate nel futuro sia per avere lunghi periodi di formazione, di molto superiori a quelli di consumo attuale (in particolare fonti fossili quali petrolio, carbone, gas naturale), sia per essere presenti in riserve esauribili nel giro di poche centinaia di generazioni umane.

Serve sottolineare come le forme di energia presenti sul nostro pianeta hanno quasi tutte origine dall'irraggiamento solare. Le eccezioni sono l'energia nucleare, l'energia geotermica e quella delle maree. Senza il Sole non ci sarebbe infatti il vento, causato dal non uniforme riscaldamento delle masse d'aria, e con esso l'energia eolica. L'energia delle biomasse è energia solare immagazzinata chimicamente, attraverso il processo della fotosintesi clorofilliana. L'energia idroelettrica, che sfrutta le cadute d'acqua, non esisterebbe senza il ciclo dell'acqua dall'evaporazione alla pioggia, innescato dal Sole. Persino i combustibili fossili (carbone, petrolio, gas naturale) derivano dall'energia del sole immagazzinata nella biomassa milioni di anni fa attraverso il processo della fotosintesi clorofilliana, ma non sono rinnovabili in tempi storici.

La crisi energetica del 1973 ha portato a studiare delle strade alternative ai combustibili fossili; questo perché i paesi arabi aumentarono all'improvviso il prezzo del greggio causando un aumento globale del costo di tutti i suoi relativi derivati, come l'energia elettrica e i carburanti. A causa di questo avvenimento i paesi più industrializzati iniziarono a capire l'importanza e l'urgenza di essere il più indipendenti possibile dal punto di vista energetico ed iniziarono a pensare di passare all'utilizzo di energie alternative.

Tutt'ora, la quasi totalità dell'energia (circa l'80%) proviene da fonti fossili, anche se sta diventando sempre più evidente che queste ultime, a

causa dell'utilizzo intensivo, siano destinate ad esaurirsi in un futuro prossimo.

Le paure per il disordine sui vari mercati dei combustibili fossili e le variazioni dei prezzi, spostano l'attenzione sulle politiche energetiche sostenibili che includano lo sviluppo e l'applicazione di fonti energetiche rinnovabili. Ci sono comunque numerose limitazioni che ne impediscono un impiego totalitario: per fare un esempio, l'eolico e il solare sono fonti dette "intermittenti", dato che dipendono dalla presenza del vento e del sole. In più hanno bisogno di luoghi con prestabilite caratteristiche territoriali ed ambientali (aree ventilate per l'eolico e aree soleggiate ed estese per il solare) tali da rendere conveniente la loro applicazione senza che l'ambiente stesso subisca un impatto significativo.

Nonostante ciò si deve precisare che questi impianti non comportano modifiche permanenti che danneggiano il territorio, in quanto vi è possibilità di smantellare completamente gli stessi.

Parlando dell'Italia, per lungo tempo (fino a circa i primi anni '60) la produzione energetica è stata in larga parte "rinnovabile", grazie in particolare alle centrali idroelettriche dell'arco alpino e, in misura minore, dell'Appennino (oltre a quote minori relative alla geotermia in Toscana). Oggi tuttavia, a causa dell'accresciuta richiesta di energia, nonché al quasi esaurimento della possibilità di nuove grandi installazioni idroelettriche, le rinnovabili rappresentano quote minori della produzione.

Nel 2012 l'Italia ha prodotto circa 92,2 TWh di elettricità da fonti rinnovabili, pari al 26,9% del fabbisogno nazionale lordo, con il 12,8% proveniente da fonte idroelettrica, 1,6% dal geotermico, 3,9% eolico, 5,5% fotovoltaico, il 3,6% da biomasse.

Con tali valori, circa il 90% della produzione rinnovabile è prodotto con impianti definiti "programmabili" e l'Italia risulta essere il terzo produttore di elettricità da fonti rinnovabili nell'UE-15.

È da notare, tuttavia, che solo negli ultimi anni la produzione rinnovabile italiana è cresciuta in maniera significativa grazie ad una sensibile crescita delle fonti eolica, fotovoltaica e da combustione di biomassa, in quanto per lungo tempo tale produzione era costituita essenzialmente solo dalle fonti idroelettrica e geotermica, di fatto quasi giunte alla saturazione del potenziale economicamente sfruttabile in Italia; inoltre, nonostante gli incentivi, l'Italia deve anche fare i conti con ritardi legislativi e, soprattutto, di adeguatezza delle reti di distribuzione.

Parlando della produttività dell' eolico e del fotovoltaico, spesso le ore/anno effettive di funzionamento degli impianti sono minori rispetto alle ore/anno di funzionamento preventivate in sede di progettazione; questo accade perché le analisi preventive potrebbero essere troppo ottimistiche. Nel periodo che va dal 1 gennaio e il 31 luglio 2012 sono stati prodotti 11,473 TWh di energia derivante dal fotovoltaico, che corrisponde al 5.9% del consumo totale , 24,522 TWh da idroelettrico, pari al 12,7% e 7,579 TWh da eolico (il 3,9%).

Qui sotto sono riportati i grafici che mostrano la produzione di energia da fonti rinnovabili in Italia, dal 1990 al 2012 e la variazione percentuale della produzione di energia dalle diverse fonti nello stesso periodo.

Riepilogo Produzione Energia Fonti Rinnovabili - Italia

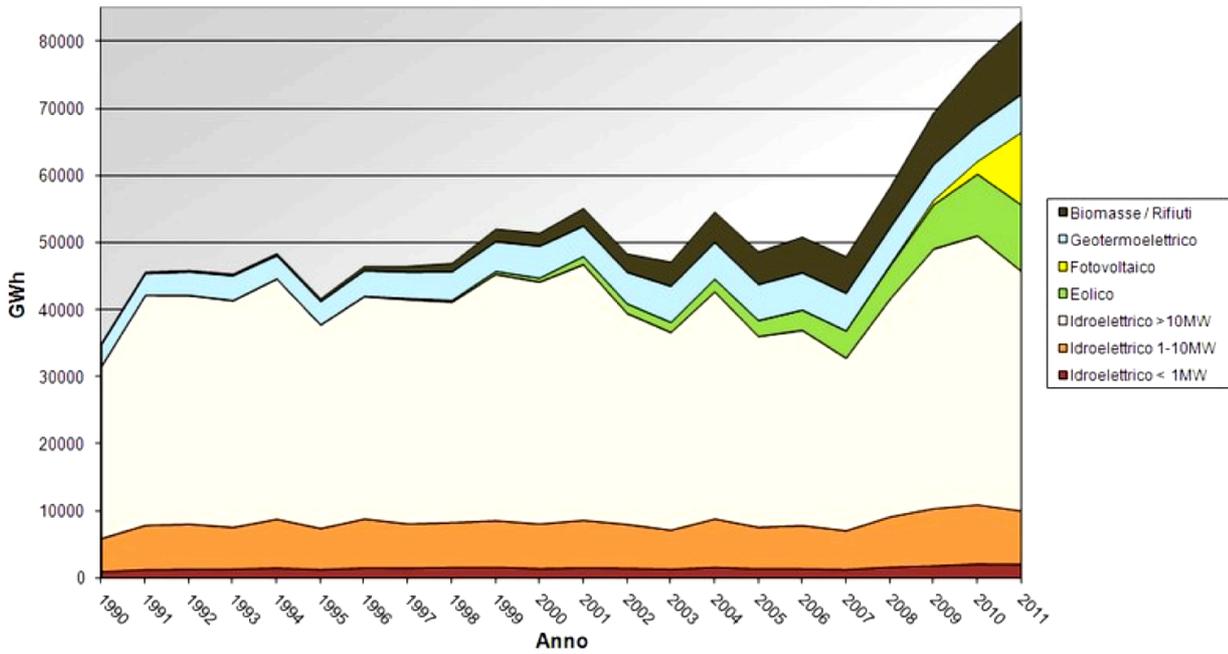


Figure 1.1 produzione di energia da fonti rinnovabili

Variazione Percentuale Fonti Rinnovabili - Italia

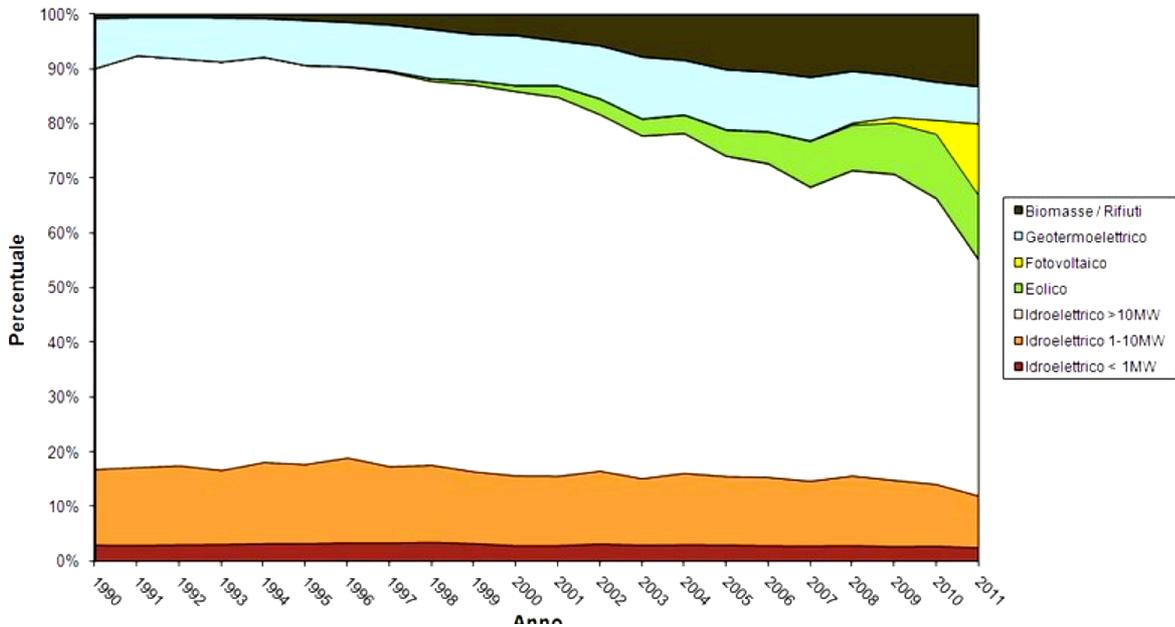


Figure 1.2 variazione percentuale da fonti rinnovabili

2.L'energia idroelettrica

2.1 Introduzione generale

L'energia idroelettrica è una fonte di energia alternativa e rinnovabile, che sfrutta la trasformazione dell'energia potenziale gravitazionale, posseduta da una certa massa d'acqua ad una certa quota altimetrica, in energia cinetica al superamento di un certo dislivello; tale energia cinetica viene infine trasformata in energia elettrica in una centrale idroelettrica grazie ad un alternatore accoppiato ad una turbina.



Figura 2.1 Come sfruttare l'energia dell'acqua

Si iniziò a pensare a come sfruttare l'acqua come energia fin dall'antichità, questo perché si voleva trovare un sostituto all'energia muscolare umana o animale.

Per questo sono nate le prime macchine idrauliche come ruote che producono energia meccanica dalle forze cinetiche e potenziali dell'acqua e mettono in azione segherie, frontoi, macine che permettono la produzione in maniera continuativa e in quantità elevata.

Questa forma di energia ha però dei difetti: la si deve utilizzare solo vicino al bacino o al corso d'acqua e inoltre non è trasportabile.

Si è risolto il problema del trasporto solo con l'avvento dei primi generatori elettrici rotanti come alternatori e dinamo, i quali accoppiati con le macchine idrauliche permettono di trasformare l'energia in elettricità, facilmente trasportabile nelle lunghe distanze e convertibile in energia motrice o calore.

La prima centrale idroelettrica nasce grazie all'ingegno dell'imprenditore e ambientalista inglese William George Armstrong. Questi, nel 1878, fa progettare la sua abitazione di campagna Cartington, in Inghilterra, dall'architetto scozzese Norman Shaw, la chiama Cragside e la fa dotare di una ruota idraulica che sfrutta per azionare la lavanderia, un girarrosto, un ascensore e una dinamo. Con l'energia prodotta dalla dinamo alimenta una lampada ad arco, che poco tempo dopo sostituisce con una lampada ad incandescenza, appena inventata dall'inglese Joseph Wilson Swan, e illumina così artificialmente la sua galleria d'arte.

Nel 1881 viene inaugurata la prima centrale idroelettrica costruita per fornire energia alla città di New York; si chiama Schoelkopf Power Station No.1 ed è alimentata dal corso d'acqua che termina nelle cascate del Niagara.

Due anni dopo, il tecnico Lorenzo Vanossi idea e mette in opera, a Chiavenna, in provincia di Sondrio, il primo impianto microelettrico italiano azionato idraulicamente; questo alimenta 30 lampade a incandescenza per illuminare il cotonificio Amman e sostituisce gli obsoleti e fumosi lucignoli a petrolio impiegati precedentemente.

In Italia la prima centrale idroelettrica entra in funzione nel 1883 a Tivoli e produce 62 kW in corrente continua alla tensione di 100 V.

Continua, nel corso degli anni, lo sviluppo di impianti idroelettrici, fino ad arrivare ai giorni nostri, nei quali si riesce ad autoprodurre energia domestica come era in origine.

L'attuale successo di questa forma di sfruttamento e generazione di energia è sostanzialmente dovuto all'enorme disponibilità di tecnologie e prodotti affidabili, alla convenienza economica (si pensi ad esempio alla possibilità di poter produrre indipendentemente da crisi economiche e politiche, contrariamente a molte fonti oggi utilizzate) e alla valenza etica di tutte le fonti rinnovabili nell'ottica del rispetto dell'ambiente.

Esistono poi i piccoli impianti di produzione denominati micro e pico, nel passato destinati a funzioni di alimentazione di soccorso per abitazioni isolate (rifugi alpini, baite, isole, ecc.) o, nel settore agricolo in particolare, per l'azionamento di pompe dell'acqua per pozzi, mulini e così via. Oggi presentano taglie fino a 100 kW e possono soddisfare molte utenze domestiche e industriali di piccole dimensioni, godendo di tutti gli incentivi vigenti.

Come per tutti gli investimenti basati sullo sfruttamento di fonti rinnovabili, la produzione di energia dipende dalla disponibilità della fonte energetica, in questo caso idrica, pertanto le caratteristiche e l'ubicazione geografica dell'impianto determinano la continuità della produzione.

Se relazionati con i principali impianti alimentati da altre fonti rinnovabili, gli impianti micro e pico idroelettrici richiedono la presenza di importanti infrastrutture, quali corsi o invasi, e concessioni per lo sfruttamento dell'acqua. Tuttavia, dato che possono operare indipendentemente dalla presenza della luce, consentono di produrre energia in quantità superiori rispetto ad un impianto fotovoltaico.

In aggiunta si dimostrano vantaggiosi rispetto al geotermico, praticabile solo in limitatissime realtà geografiche, oppure ancora alle biomasse, soggette al variare del costo del combustibile e al continuo controllo e abbattimento delle emissioni gassose.

E' da sottolineare che il settore sta ampliando il proprio raggio d'azione con lo sfruttamento delle energie del mare, come le maree, le onde e le correnti.

2.2 Europa 2020-20

L'Unione Europea deve decidere qual è l'Europa che vuole nel 2020. Con la strategia Europa 2020, l'UE punta a uscire dalla crisi e a preparare l'economia dell'Unione per il prossimo decennio. Tre priorità chiave e cinque ambiziosi obiettivi per **rilanciare il sistema economico e promuovere una crescita "intelligente, sostenibile e solidale"** basata su un maggiore coordinamento delle politiche nazionali ed europee.

Tra il 2000 e il 2010 l'UE ha cercato di migliorare crescita e occupazione con la Strategia di Lisbona. Europa 2020 succede a Lisbona, condividendone alcuni aspetti, e individua **tre priorità**:

- crescita intelligente: sviluppare un'economia basata sulla conoscenza e sull'innovazione;
- crescita sostenibile: promuovere un'economia più efficiente sotto il profilo delle risorse, più verde e più competitiva;
- crescita inclusiva: promuovere un'economia con un alto tasso di occupazione che favorisca la coesione sociale e territoriale.

La Commissione europea propone **cinque obiettivi** da raggiungere entro il 2020:

- ❖ il 75% delle persone di età compresa tra 20 e 64 anni deve avere un lavoro;
- ❖ il 3% del PIL dell'UE deve essere investito in **ricerca e sviluppo**;
- ❖ i traguardi "20-20-20" in materia di **clima/energia** devono essere raggiunti: riduzione delle emissioni di gas serra del 20% (o persino del 30%, se le condizioni lo permettono) rispetto al 1990; 20% del fabbisogno di energia ricavato da fonti rinnovabili; aumento del 20% dell'efficienza energetica;
- ❖ il tasso di **abbandono scolastico** deve essere inferiore al 10% e almeno il 40% dei giovani (30-34enni) deve essere laureato;
- ❖ 20 milioni di persone in meno devono essere a rischio di **povertà**.

Questa azione è mirata a indirizzare l'Europa verso un futuro sostenibile sviluppando un'economia a basse emissioni di CO₂ improntata all'efficienza energetica, rafforzando la sostenibilità e la sicurezza degli approvvigionamenti, contribuendo nel contempo a promuovere lo sviluppo economico e l'occupazione e a limitare i costi energetici per le famiglie e le imprese. Infatti, privilegiando le fonti rinnovabili, sarà possibile ridurre su base annua il consumo di combustibili fossili di 200–300 milioni di tonnellate e le emissioni di CO₂ di ben 600–900 milioni di tonnellate, riducendo inoltre progressivamente la dipendenza dalle forniture esterne e le esposizioni alle fluttuazioni dei prezzi dei combustibili fossili.

Il compito di ciascun paese sarà proprio promuovere lo sviluppo e il consumo di fonti rinnovabili per la produzione di energia elettrica, il condizionamento dell'aria, il riscaldamento, e i trasporti.

In Italia, con il Programma nazionale di riforma (Dipartimento politiche europee – Programma nazionale di riforma – novembre 2010), al momento si è adottato un obiettivo del 13,4% sull'efficienza energetica misurato come risparmio di energia primaria del 17% delle energie pulite.

2.3 Il ruolo dell' energia idroelettrica

Dato che le centrali idroelettriche sono degli impianti industriali imponenti, la loro ubicazione in aree favorevoli dal punto di vista ambientale non si concilia con il desiderio che questi luoghi restino in tutto e per tutto naturali, senza interventi dell'uomo. Inoltre lo sfruttamento dell'acqua fa sì che alcuni luoghi siano impoveriti a favore di altri oltre al fatto che si può compromettere l'esistenza di alcune specie ittiche. Ma bisogna tenere bene a mente che lo sfruttamento di energia idroelettrica permette di evitare l'inquinamento dell'atmosfera con emissione di gas serra prodotti dalle centrali di generazione.

Per sfruttare appieno il potenziale dell'acqua bisognerebbe **utilizzare l'intera gamma degli impianti**: da quelli più grandi a quelli piccoli e mini, compresi gli impianti a pompaggio, che costituiscono ancora la forma di stoccaggio dell'energia elettrica più competitiva e affidabile, nonché l'unica in grado di restituire grandi quantità di energia.

Attualmente l'energia idroelettrica rappresenta il 17% dell'energia consumata nel mondo; in Europa in particolare copre l'11% della domanda di elettricità.

L'Unione Europea ha calcolato che, per raggiungere gli obiettivi del 2020, l'energia idroelettrica dovrà crescere di 16000 MW, per la maggior parte

mediante nuove centrali di taglia mini e pico, che si ritiene siano le uniche ad avere ancora spazio di crescita, in un territorio come quello europeo, dove i corsi d'acqua sono sfruttati fin dalle origini e dove ancora oggi rappresentano la prima fonte di energia rinnovabile.

Alcuni paesi dipendono in gran parte dall'energia idroelettrica, come il Paraguay (100%) e la Norvegia (98%), seguiti da Brasile (85%), Venezuela (69%) e Canada (61%).

L'Italia in questa classifica occupa il 14° posto con il 18%, corrispondente a 51117 GWh prodotti alla fine del 2010 (fonte GSE) da circa 3000 impianti di cui 302 di taglia importante. In Italia, le regioni principali produttrici sono quelle dell'arco alpino, come Lombardia, Piemonte e Trentino Alto Adige, che da sole rappresentano il 60% della capacità italiana.

Al momento, il più grande produttore di energia idroelettrica è la Cina, con 652 TWh all'anno, mentre gli Stati Uniti vantano il maggior numero di impianti micro-idroelettrici.

2.4 Micro e pico

Gli impianti idroelettrici, per l'estrema variabilità delle soluzioni, sono distinti e classificati in funzione di alcuni parametri caratteristici.

Si ha una classificazione secondo lo schema delle opere:

- A deflusso naturale o ad acqua fluente;
- A deflusso regolato;
- Ad accumulazione con pompaggio;
- Mareomotori.

Negli impianti ad acqua fluente, costruiti su fiumi e canali, la produzione di energia è dipendente per modi e tempi dalla disponibilità nel corso d'acqua che può essere influenzata dalle stagioni o dalle necessità di regolazione della portata d'acqua.

Negli impianti a deflusso regolato, la produzione di energia sfrutta invece l'acqua immagazzinata in un invaso o bacino di raccolta in modo artificiale, ad esempio creato frapponendo una diga a un corso d'acqua.

L'interesse a realizzare un bacino o una vasca di carico deriva da una differenza del prezzo dell'energia elettrica in ore di punta (ore piene, solitamente diurne) e non (ore vuote, ore notturne): in questo modo sarà possibile far funzionare l'impianto prevalentemente in ore piene e riempirlo in ore vuote.

L'immagazzinamento dell'acqua può avvenire anche convogliando acque da punti più bassi del bacino tramite un gruppo di pompaggio, oppure è la stessa turbina idraulica che si converte o si accoppia a una pompa e così restituisce, in fasi di inutilizzo, l'acqua prelevata; l'impianto di questo tipo più famoso in Italia è quello delle Marmore in provincia di Terni.

Gli impianti mareomotori sfruttano invece le correnti e le maree come fonte di energia e rappresentano al momento quelli più interessanti come nuova opportunità di sfruttamento di questa fonte di energia, nonché per i rilevanti sviluppi tecnologici in corso.

In funzione del salto (H), gli impianti sono invece classificati come:

- < 10 m: bassi;
- da 10 fino a 100 m: medi;
- da 100 fino a 1000 m: alti;
- Oltre i 1000 m: altissimi.

I salti bassi si riferiscono a impianti che sfruttano direttamente i corsi d'acqua mentre i salti più alti solitamente sfruttano dei bacini.

In funzione della portata (Q), gli impianti sono invece classificati come:

- < 10 m³/s: piccoli;
- Compresa tra 10 e 100 m³/s: medi;
- Compresa tra 100 e 1000 m³/s: grandi;
- Oltre i 1000 m³/s: grandissimi.

La classificazione degli impianti per salto e portata serve a definire la tecnologia utile per poi sfruttare l'energia disponibile e di conseguenza le caratteristiche di impianto.

In funzione della potenza, gli impianti sono invece classificati come:

- < 1 kW: pico;
- < 100 kW: micro;
- < 10 MW: mini;
- 10 MW: piccole centrali;
- 30 MW: grandi centrali.

Gli impianti di taglia pico e micro, si possono impiegare per la produzione di elettricità per singole utenze o gruppi di utenze, connesse alla rete elettrica in bassa tensione o anche isolate dalla rete elettrica.

Per le centrali micro di taglia superiore ai 20 kW, vi è l'obbligo dell'imposizione fiscale, l'obbligo di registrazione di Officina elettrica e conseguente obbligo di denuncia all'Ufficio Tecnico di Finanza.

3.Il ciclo dell'acqua

3.1 L'acqua

L'acqua è uno degli elementi presenti sulla Terra che si può trovare in tutti e tre gli stati fisici (liquido, solido e gassoso). Lo stato liquido è rinvenuto nei mari, fiumi, oceani, lo stato solido nei ghiacciai o nella neve e lo stato di gas nel vapore acqueo presente nell'aria. Il nostro pianeta è principalmente ricoperto da acqua; la Terra primordiale era un globo di magma, ma i magmi contengono una notevole quantità di acqua. L'acqua liberata dai magmi come vapore cominciò a raffreddare l'atmosfera e la superficie terrestre fino al punto di poter restare in superficie in forma liquida. L'attività vulcanica continuò e continua a liberare acqua nell'atmosfera, incrementando le masse d'acqua superficiali e profonde. Inoltre, ogni reazione chimica produce acqua.

La sua predominanza è dovuta al cambio ciclico di stato favorito dal sole che permette ad essa di generarsi di continuo: questo processo è chiamato ciclo dell'acqua.

Il ciclo idrologico non ha un punto di partenza, ma un buon posto da dove cominciare è il mare.

Il sole, che attiva il ciclo dell'acqua, riscalda l'acqua del mare. Parte di essa evapora nell'aria. L'evaporazione avviene anche dalle acque dolci dei laghi e dei fiumi. Sul continente, l'evapotraspirazione, che è l'acqua traspirata dagli esseri viventi (soprattutto dai vegetali) ed evaporata dal sole, apporta vapore all'aria. Una piccola quantità d'acqua nell'atmosfera proviene dalla sublimazione, che è il passaggio allo stato di vapore direttamente dallo stato solido (ghiaccio, neve, brina) saltando completamente la fase di fusione.

La maggior parte delle nuvole che portano neve e pioggia in Italia si forma nell'Oceano Atlantico, nei pressi delle Azzorre, ed è spinta da venti anticiclonici, in movimento da ovest a est, fino sulla nostra penisola. Quando, lungo il loro percorso, le nuvole raggiungono ostacoli quali catene montuose o turbolenze con direzioni contrarie, si generano le piogge. Qualche precipitazione cade come neve e può accumularsi come calotte glaciali o ghiacciai. La neve, nei climi più caldi, si scioglie con l'arrivo della primavera, e l'acqua di fusione fluisce tramite fiumi o ruscelli.

Mentre una gran parte delle precipitazioni cade nei mari, una parte cade sulle terre emerse dove, a causa della gravità, fluisce come ruscellamento superficiale. Parte di esso raggiunge i fiumi e si muove come flusso incanalato verso il mare, mentre un'altra parte si accumula come acqua dolce nei laghi e nei fiumi. Non tutto il ruscellamento scorre in corpi idrici superficiali.

Molto se ne infiltra nel terreno. Parte dell'acqua raggiunge le profondità del terreno ed alimenta gli acquiferi (rocce saturate con acqua mobile che affiora in sorgenti o estraibile con pozzi o gallerie) che immagazzinano enormi quantità di acqua dolce sotterranea per lunghi periodi di tempo. Parte dell'acqua sotterranea sta vicino alla superficie terrestre e può filtrare di nuovo entro corpi idrici superficiali (e nel mare), mentre parte trova vie d'uscita nella superficie della terra ed emerge come sorgenti d'acqua dolce. Nel tempo, tuttavia, quest'acqua continua a muoversi, e parte rientra nel mare dove il ciclo termina per poi ricominciare.

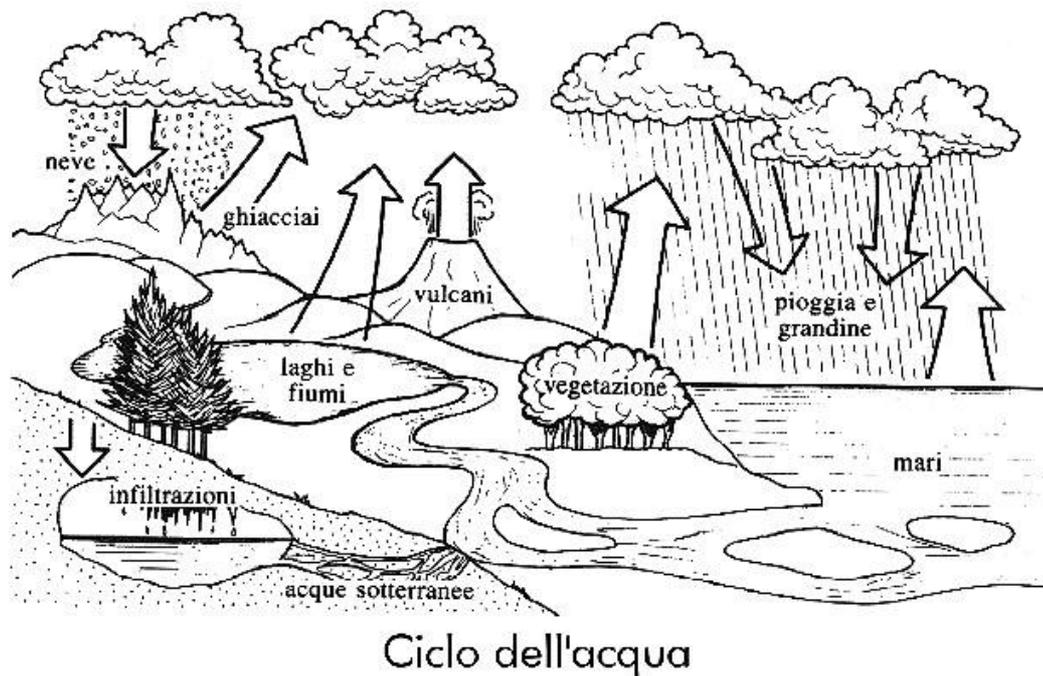


Figura 3.1 il ciclo dell'acqua

3.2 Vento e nuvole

Le nubi si possono formare, a qualsiasi altitudine, in funzione del momento in cui l'aria si raffredda fino a raggiungere la condensazione del vapore acqueo in essa contenuto (il cosiddetto punto di rugiada). Il vapore condensa attorno a particelle di pulviscolo e forma tante piccole goccioline d'acqua o di ghiaccio a basse temperature che vanno ad aggregarsi in formazioni o cristalli. Quando incontrano un fronte di pressione o temperatura diversa dalla propria, le nubi danno origine a precipitazioni, sotto forma di pioggia, neve, pioviggine, grandine, nebbia, ghiaccio, rugiada e così via.

I venti sono responsabili dello spostamento delle nuvole e crescono di intensità con l'aumentare della differenza di pressione e l'avvicinarsi di due fronti di pressione; in pratica, il vento è un effetto del motore

termodinamico dei cicli naturali meteorologici della Terra, in cui il calore diviene movimento che viene disperso a contatto con la sorgente fredda. Le nubi hanno la funzione di bilanciare l'equilibrio termico fra la radiazione solare in arrivo e quella che viene emessa dalla crosta terrestre.

3.3 Il servizio idrico

In Italia, dal 1999, la legge afferma che tutte le acque pubbliche sono classificate come bene pubblico (acqua di falda e di sorgente, fiumi, laghi, mari). Questa normativa sull'utilizzazione delle acque discende dal diritto pubblico; il principio che la muove è la cura del bene comune e la salvaguardia dei diritti altrui, garantendo in maniera prioritaria l'utilizzo umano, quindi quello agricolo poi quello legato alle industrie.

L'acqua viene utilizzata per molteplici scopi, rivestendo un ruolo centrale in tutte le attività che ne fanno uso, diretto o indiretto. Negli ultimi decenni i consumi mondiali di acqua sono aumentati di quasi dieci volte: circa il 70% dell'acqua consumata sulla Terra è impiegata per l'uso agricolo, il 20% per l'industria, il 10% per gli usi domestici. In Italia il settore agricolo assorbe il 60% dell'intera domanda di acqua del Paese, seguito dal settore industriale ed energetico con il 25% e dagli usi civili per il 15%.

Il comportamento di un corso d'acqua è quindi strettamente legato al clima del bacino idrografico a cui appartiene e alle sue caratteristiche geologiche e morfologiche, cioè alla natura dei suoli.

Durante un evento di pioggia, quando viene raggiunta la capacità di ritenzione massima del suolo, le acque di precipitazione ruscellano sui pendii del bacino concentrandosi nei torrenti e nei fiumi in un tempo più o

meno lungo. Questo tempo varia in funzione di due parametri essenziali: la topografia del bacino e l'utilizzazione del suolo.

Le risorse idriche sono da considerarsi di natura instabile (anche in funzione dei cambiamenti globali climatici in atto) e variano annualmente, stagionalmente e giornalmente. Col fatto che in parte sono regolabili in maniera artificiale, possono essere impiegate come forma propulsiva per un impianto idroelettrico, ma necessariamente devono essere inserite all'interno di schemi generali idrologici e del clima del luogo nei quali si ipotizza di realizzare un impianto di questo tipo. In linea di massima, le mappe e tutte le informazioni riferite al sito preso in esame sono da tenere presente in fase di valutazione iniziale, per capire, quindi, se valga la pena o meno realizzare l'impianto. In questa fase è opportuno ricordare che i corsi d'acqua sono anche dei percorsi biologici da rispettare sia per la natura che li circonda, sia per la fauna che li abita. Per questo motivo, anche in questo caso è necessaria una verifica sul sito scelto per l'installazione.

4. Idraulica

4.1 Introduzione all'idraulica

La scienza che studia il moto di fluidi incomprimibili a densità costante, come l'acqua, all'interno dei condotti si chiama idraulica; tramite essa si riuscirono a realizzare dei nuovi metodi di irrigazione e successivamente di fognature, dighe, acquedotti e porti, ma anche valvole, tubazioni, serbatoi e macchine operatrici come le pompe e motrici come le turbine. Approfondendo questi studi si riuscì ad acquisire un controllo maggiore sul comportamento dei fluidi.

Prima di proseguire con le leggi fisiche è importante ricordare che tutto ciò che diremo sarà riferito all'acqua nel suo stato liquido e considerato incomprimibile; per questo avrà le seguenti peculiarità:

- Densità 1000 Kg/m^3 alla temperatura di 4°C .
- Peso specifico $\gamma = \text{densità} \cdot g$ alla temperatura di 4°C .
- Per quanto riguarda la gravità, si assume come valore di riferimento $g=9.81 \text{ m/s}^2$

4.2 Energia e carico idraulico

Si consideri un fluido in regime stazionario posto ad una determinata altezza e pressione che scorre in una tubazione nella quale cambi l'area della sezione trasversale e la quota; la corrente idraulica possiede energia in tre forme: potenziale, cinetica e di pressione.

Nel 1738, lo scienziato svizzero Bernoulli enunciò il seguente teorema che esprime la legge di conservazione dell'energia nel caso di una massa fluida in movimento:

$$H = h + \frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} \quad (\text{m}) \quad (4.1)$$

Con:

H: energia specifica disponibile;

h: quota geodetica;

P: pressione;

ρ : densità dell'acqua;

g: accelerazione di gravità;

V: velocità del fluido.

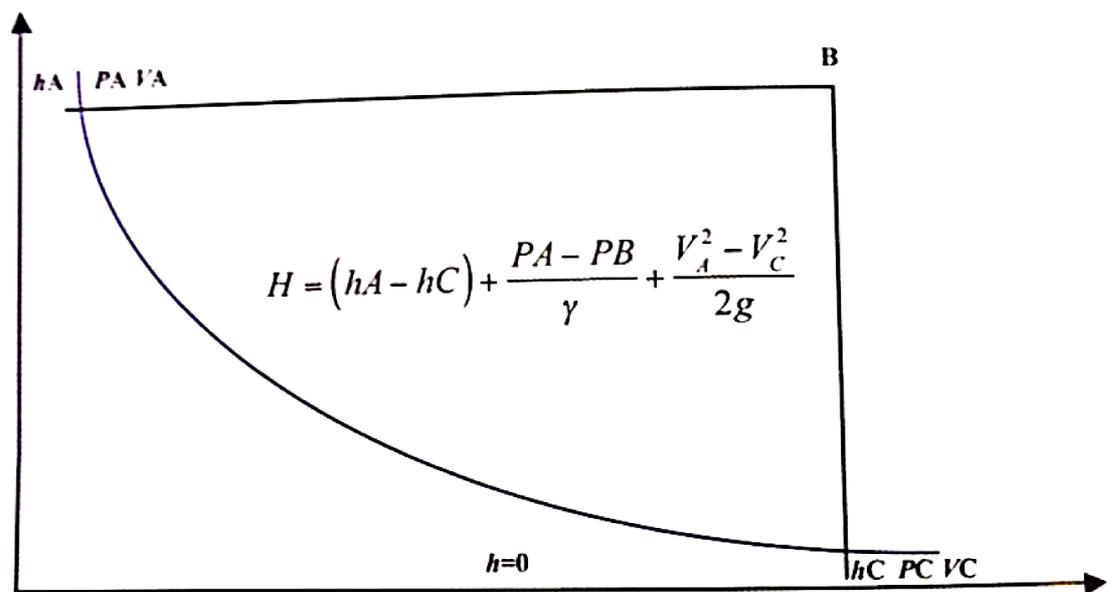


Figura 4.1 Grafico equazione di Bernoulli

L'equazione di Bernoulli è di grande importanza nella fluidodinamica e rappresenta un caso particolare della più generale equazione del bilancio dell'energia meccanica applicata ad un fluido ideale in moto, in cui siano nulle le resistenze al moto del fluido stesso dovute alla viscosità.

L'energia disponibile è la somma dell' energia di pressione $\frac{P}{\rho g}$ (altezza piezometrica), dell' energia cinetica $\frac{V^2}{2g}$ (altezza cinetica) e di quella potenziale h (altezza geodetica).

Il dislivello presente tra la sezione di valle (h_c) e quella di monte (h_a) indica l'energia potenziale che si ha a disposizione ed è vitale per imprimere movimento agli organi del gruppo di generazione di energia.

Questa differenza di quota, chiamata anche come *salto* o *caduta*, è espressa in metri (m) e si riferisce direttamente alla pressione, dove 10 metri indicano 1 bar, ovvero 100000 Pa.

Sono comunemente identificati 3 tipi di salto:

- salto disponibile o lordo (H_g);
- salto utile (H_n);
- salto netto o motore (H_m).

Il **salto disponibile o lordo** è dato dalla differenza di livello misurato tra la presa a monte sul corso d'acqua e lo scarico a valle del gruppo di generazione idroelettrico nel punto di restituzione idrologico.

Il **salto utile** è definito come il dislivello dei peli liberi a monte e a valle dei meccanismi motori. E' il valore di salto in base al quale vengono stabiliti i canoni di concessione.

Il **salto netto** o motore corrisponde al salto che viene effettivamente messo a disposizione della macchina idraulica, intesa come accoppiamento distributore e girante, ovvero per quanto descritto nell'equazione dove $V = 0$ (velocità di abbassamento del pelo libero trascurabile) e $P = 0$ (pressione relativa nulla).

4.3 Perdite di carico

L'energia dissipata dall'acqua a causa di attriti o ostacoli incontrati lungo la condotta è comunemente chiamata perdita di carico. Tali perdite possono essere distribuite e/o localizzate e si possono misurare in metri di colonna di fluido.

- Le **perdite di carico distribuite** sono causate dall'attrito del fluido contro le pareti del condotto e dalla viscosità:

$$R_d = \frac{-dP}{dL} = \frac{k_a \rho V^2}{D} \quad (4.2)$$

- **Perdite concentrate** (R_c) dovute a strozzature, gomiti nelle tubazioni, griglie ecc.:

$$R_c = k_c \rho \frac{V^2}{2} \quad (4.3)$$

4.4 Potenza idraulica a disposizione

L'energia idraulica, trasformata in potenza idraulica teorica disponibile, è data dal prodotto del fattore forza applicato alla massa d'acqua e dei fattori velocità e direzione a cui questa si muove:

$$P = \rho g H Q \quad (4.4)$$

Dove:

- P: potenza disponibile ;
- ρg : peso specifico dell'acqua;
- Q: portata d'acqua;
- H: salto netto.

Questa potenza è teorica; infatti da essa andranno tolte le perdite meccaniche della macchina per ottenere il reale valore della potenza a disposizione.

5. Moto dei fluidi

5.1 Equazione del moto nei fluidi

Consideriamo un sistema aperto che scambia quindi massa con l'esterno e utilizziamo un approccio euleriano studiando il sistema in un dato istante nel quale una massa unitaria attraversa tutto il sistema. Dal sistema esce fluido allo stato 2 ed entra allo stato 1 perciò:

$$u_2 + gz_2 + \frac{c_2^2}{2} - u_1 - gz_1 - \frac{c_1^2}{2} + l_{12} - q_{12} + p_2 v_2 - p_1 v_1 = 0 \quad (5.1)$$

che si può riscrivere come :

$$h_2 - h_1 + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) + l_{12} = q_{12} \quad (5.2)$$

e infine:

$$gdz + cdc + dh + dl = dq \quad (5.3)$$

(Equazione del moto dei fluidi per sistemi aperti in forma termica.)

Considerando poi che la nostra entalpia può essere scritta come :

$$dh = dq + vdp + dR \quad (5.4)$$

e sostituendola nella precedente si trova che :

$$gdz + cdc + vdp + dR + dl = 0 \quad (5.5)$$

(Equazione del moto dei fluidi per sistemi aperti in forma meccanica)

Se considero un osservatore situato sul rotore (la parte mobile della macchina), allora:

-Per questo osservatore la girante non si muove e dunque $dl = 0$

-Per l'osservatore mobile la velocità è quella relativa al fluido all'interno della macchina ovvero v

-Inoltre l'osservatore mobile vede un campo di forze centrifughe apparenti tali che :

$$F_c = m \omega^2 r \rightarrow dL_c = m \omega^2 r dr \rightarrow dl_c = \omega^2 r dr \rightarrow dl_c = -\omega^2 r dr \quad (5.6)$$

Con $u = \omega r$ e $du = \omega dr$ da cui:

$$dl_c = -u du \quad (5.7)$$

L'equazione per un osservatore in movimento sarà quindi:

$$v dv + g dz + v dp + dR - u du = 0 \quad (5.8)$$

Se sottraggo le due equazioni relative all'osservatore fisso e mobile ottengo che:

$$dl = v dv - c dc - u du \longrightarrow l = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} - \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} - \frac{u_2^2 - u_1^2}{2} \quad (5.9)$$

Una volta applicato il teorema di Carnot sul triangolo:

$$v^2 = u^2 + c^2 - 2 u c \cos \alpha \quad (5.10)$$

Sostituendo nella precedente si ha:

$$l = u_1 c_1 \cos \alpha_1 - u_2 c_2 \cos \alpha_2 \quad (5.11)$$

chiamata **Espressione di Eulero**.

6 Turbine idrauliche

6.1 Classificazione turbine ad alta efficienza

Le turbine idrauliche sono macchine a flusso continuo che vengono classificate secondo criteri diversi (alcuni dei quali già utilizzati nella classificazione delle pompe) e che sinteticamente di seguito elenchiamo.

Criterio geometrico. Secondo questo criterio, le turbine idrauliche si suddividono in turbine radiali (centripete) e a flusso misto (turbine Francis), assiali a pale fisse o mobili (turbine Kaplan) e ruote tangenziali (turbine Pelton). In base a questo criterio le motrici idrauliche possono essere inoltre suddivise in motrici ad asse orizzontale o verticale, a vena (o camera) libera o chiusa, semplici o pluristadio.

Criterio funzionale. Secondo questo criterio le turbine sono classificate in base al salto motore o, preferibilmente, al numero di giri caratteristico. Si avranno quindi:

- a) Turbine per basse cadute (ad elica, Kaplan)
- b) Turbine per medie cadute (Francis)
- c) Turbine per alte cadute (Pelton)

Poiché la geometria ottimale di una macchina non dipende solo dal salto motore sfruttabile ma anche da altri fattori, quali portata e velocità di rotazione, alla precedente classificazione è preferibile quella basata sul numero di giri caratteristico, secondo la quale si avranno:

- a) Turbine lente (Pelton a uno o più getti)
- b) Turbine medie e veloci (Francis)
- c) Turbine veloci (ad elica e Kaplan)

6.1.1 Turbine Pelton

Nella fig. 6.1 è schematicamente rappresentata una turbina Pelton ad asse orizzontale e ad un getto: come si può osservare dalla figura, l'acqua, incanalata per mezzo di una condotta, giunge al livello della macchina in condizioni di elevata pressione che viene trasformata in energia cinetica nella parte terminale del distributore (boccaglio o ugello), a sezione decrescente e che scarica in aria alla pressione atmosferica. La velocità d'efflusso dal distributore sarà pari alla velocità torricelliana d'efflusso da un serbatoio a pelo libero costante ed uguale a:

$$v_1 = \varphi \sqrt{2g(h_g - y_e)} = \varphi \sqrt{2gh_m} \quad (6.1)$$

Dove h_g è il salto geodetico o caduta disponibile, pari alla differenza di quota tra il pelo libero nel bacino a monte della turbina e l'asse del getto, y_e sono le perdite di carico nella condotta d'adduzione alla turbina e φ è il coefficiente d'efflusso che tiene conto delle perdite idrauliche nel distributore.

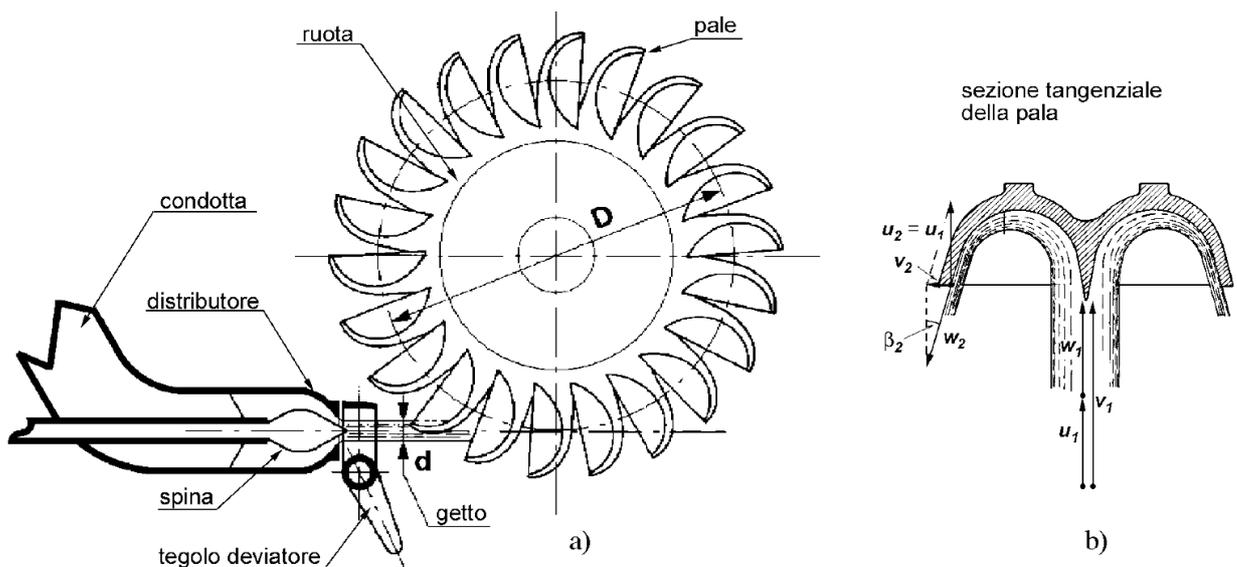


Figura 6.1 Schema Pelton

Si può osservare che la vena che interagisce con la pala della Pelton è a pressione costante e uguale alla pressione atmosferica (turbina a vena libera), sarà, quindi, costante, a meno delle perdite di carico, la velocità relativa w : la ruota Pelton, essendo nulla la variazione d'energia cinetica a cavallo della girante, è perciò una turbina ad azione.

La velocità relativa di massimo rendimento è all'incirca la metà della velocità assoluta v_1 e diminuisce quindi con il salto motore con conseguente diminuzione della spinta sulle pale e aumento del coefficiente di perdita sulle stesse.

La non possibilità di ridurre la pressione all'uscita del distributore con conseguente aumento delle velocità, assieme alla perdita di salto corrispondente al dislivello tra l'asse del getto e il pelo libero dell'acqua nel canale di scarico, rende questo tipo di turbine poco adatte ai bassi salti motori. All'interno del boccaglio è presente un otturatore (*spina Doble*) a bassa resistenza che permette la regolazione della portata erogata: l'avanzamento o l'arretramento della spina determina, infatti, la variazione della sezione di passaggio a velocità d'efflusso pressoché costante con conseguente variazione della portata fluente.

Il getto in uscita dal distributore alimenta tangenzialmente la girante e interagisce con le pale che, come si può osservare dalla fig. 6.1 b), hanno la forma di un doppio cucchiaio. Il getto, che colpisce la pala quasi centralmente, è ripartito nei due cucchiai ed è deviato di quasi 180° , conservando una componente ortogonale al getto che consente lo smaltimento laterale della portata. Per effetto della variazione della quantità di moto del getto che colpisce la pala, si determina sulla pala una spinta che mette in rotazione la girante; a causa della rotazione della girante, la pala, dopo aver percorso un certo angolo, si sottrarrà all'interazione col getto ma, prima che ciò avvenga, la pala successiva avrà già iniziato a interagire con il getto.

6.1.2 Turbine Francis

La turbina Francis, schematicamente rappresentata in fig. 6.2, è una macchina a reazione a vena chiusa, vale a dire senza punti di contatto con l'atmosfera e con pressione variabile da punto a punto tra l'ingresso del distributore e l'uscita della girante.

La sezione della voluta è decrescente in modo che, man mano che le porzioni di fluido attraversano il distributore, la velocità del getto si mantenga costante.

Per ottimizzare il funzionamento della turbina l'espansione dell'acqua viene prolungata al di sotto della pressione atmosferica, così da creare una sorta di effetto vuoto, che fa aumentare ancora di più la differenza di pressione.

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

Se si esagera nella ricerca del vuoto però si rischia di incappare nel fenomeno, sgradito, della cavitazione per cui l'acqua, scesa al di sotto della pressione di liquido saturo, si trasformerebbe in vapore, corrodendo e distruggendo i palettamenti della girante.

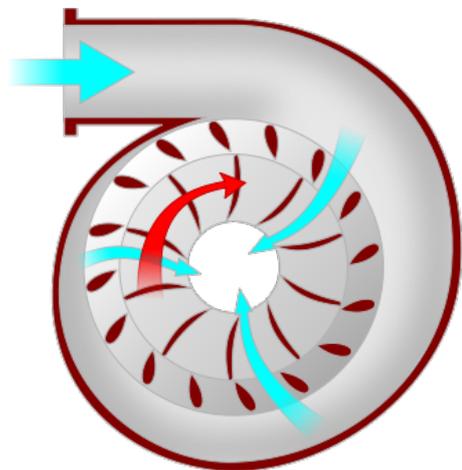


Figura 6.2 a) Girante Francis:

si nota dell'esterno, la chiocciola, il distributore e la girante all'interno. Il flusso di liquido è rappresentato in azzurro.

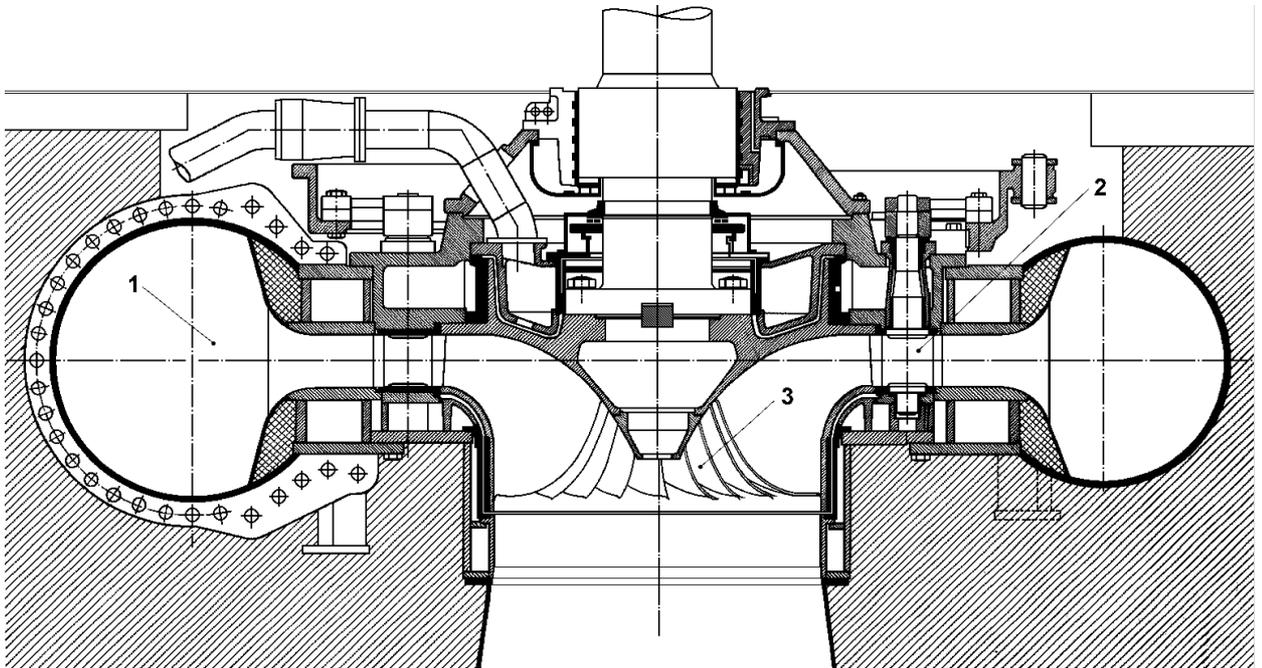


Figura 6.2 b) Schema di una turbina Francis

Nella figura 6.2 b) sono evidenziati il distributore a chiocciola (1) che distribuisce l'acqua su tutta la periferia, il distributore palettato (2) che indirizza il fluido alla girante con un'appropriata componente radiale e la girante (3) nei cui canali la corrente passa, nelle condizioni di massimo rendimento, da una direzione prevalentemente radiale all'ingresso ad una praticamente assiale allo scarico.

Nella fig. 6.3 è mostrata la vista della girante di una turbina Francis in cui è visibile la curvatura delle pale.



Figura 6.3 Girante di una turbina Francis

Le pale del distributore possono essere ruotate, mediante un sistema di leveraggi servocomandati, attorno ad un asse uscente dalla cassa della macchina, in modo da variare l'inclinazione delle pale stesse al variare della portata fluente (figura 6.4).

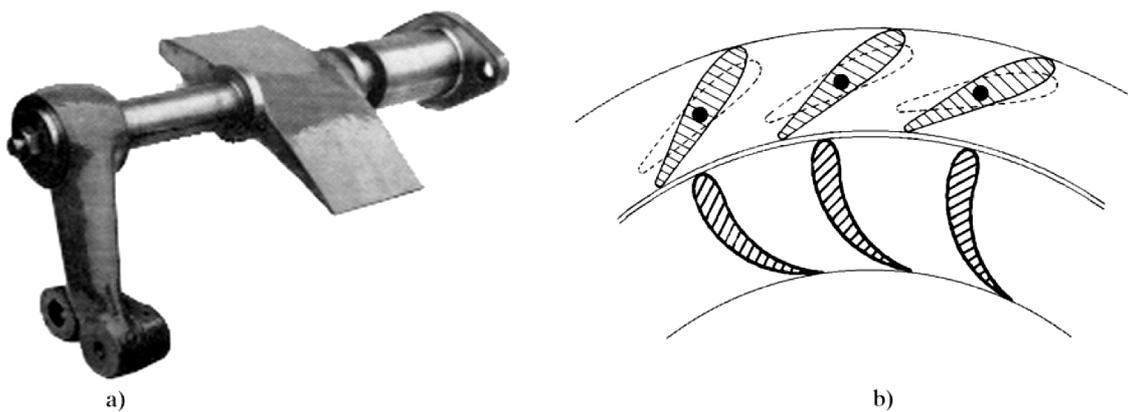


Figura 6.4 Distributore

6.1.3 Turbine Kaplan e turbine a elica

Sono macchine assiali a reazione con un limitato numero di pale (fino a 6) disposte assialmente sul mozzo che interagiscono con un flusso il cui moto elicoidale, senza componente radiale della velocità, è imposto dal distributore; sia il distributore che la girante possono essere a pale fisse (turbine a elica) o orientabili in modo da avere un buon rendimento anche ai carichi parziali.

Il campo di utilizzo di queste macchine è quello dei modesti salti motori e delle grandi portate con conseguente elevato numero di giri caratteristico che supera di norma quello delle Francis.

Come si può osservare dalla figura 6.5, l'acqua arriva da un distributore a chiocciola (a) a uno palettato con pale orientabili (b) alla cui uscita il moto è centripeto con una forte componente tangenziale; l'acqua poi passa attraverso un canale toroidale non palettato (c) in cui viene annullata la componente radiale del flusso. L'acqua colpirà poi le pale della girante (d) dove la componente tangenziale della velocità è annullata e dalle quali il flusso è scaricato assialmente nel diffusore (e).

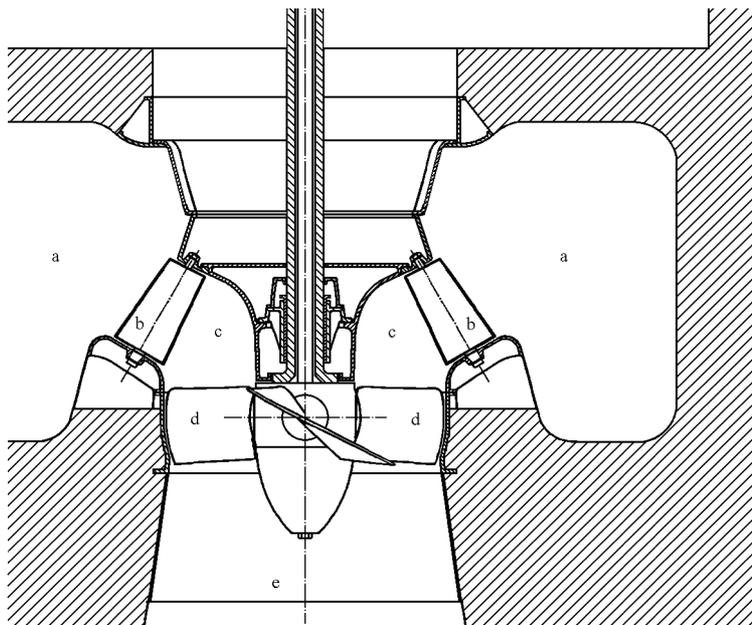


Figura 6.5 schema Kaplan

Sulle pale s'instaurerà un moto a vortice libero caratterizzato dalla costanza del momento della quantità di moto ed esprimibile mediante la relazione $v\omega R = cost$; appare evidente dalla relazione scritta che quanto più ci si avvicina all'asse di rotazione tanto più si hanno elevate velocità con conseguenti basse pressioni e pericolo di cavitazione. Per risolvere il problema potrà essere necessario porre la macchina sotto battente.

In figura 6.6 a) e b) sono mostrate rispettivamente la girante di una turbina ad elica a pale fisse e quella di una Kaplan con le pale orientabili in posizione di chiusura completa.

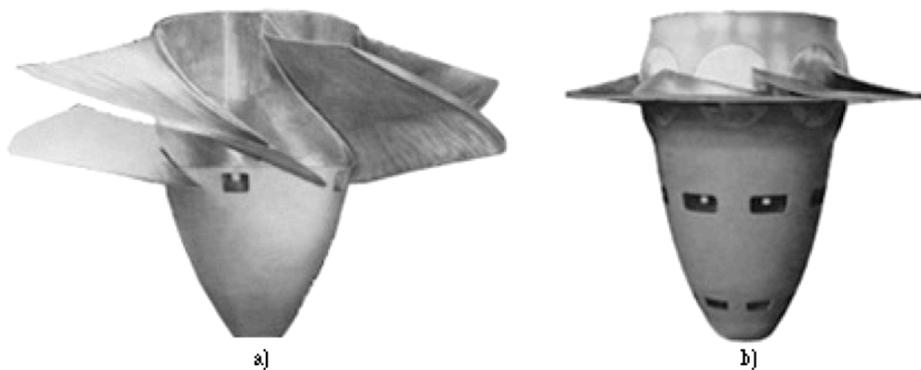


Figura 6.6

6.2 La turbina Banki-Michell

6.2.1 Caratteristiche principali

All' inizio del secolo scorso un ingegnere australiano, A.G.M. Michell, inventò un tipo di turbina idraulica che poco dopo fu anche sviluppata in modo del tutto indipendente dal docente Donat Banki presso l'università di Budapest. Questo è il motivo per cui questa turbina viene chiamata "Michell-Banki", ma è divenuta nota come "Ossberger" dal nome dell'ingegnere tedesco che la perfezionò e la iniziò a produrre agli inizi degli anni '30.

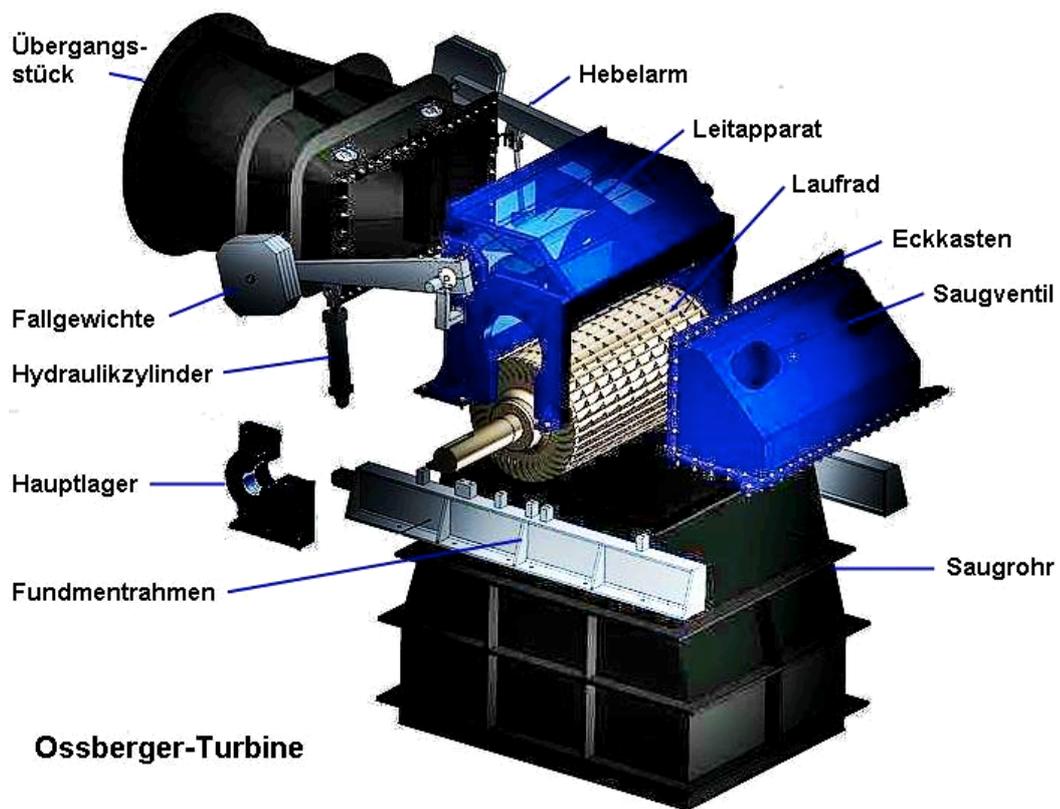


Figura 6.7 Schema turbina Ossberger

La figura 6.7 mostra uno spaccato della turbina Ossberger, ma il principio di funzionamento è rappresentato in maniera più chiara nella figura 6.8.

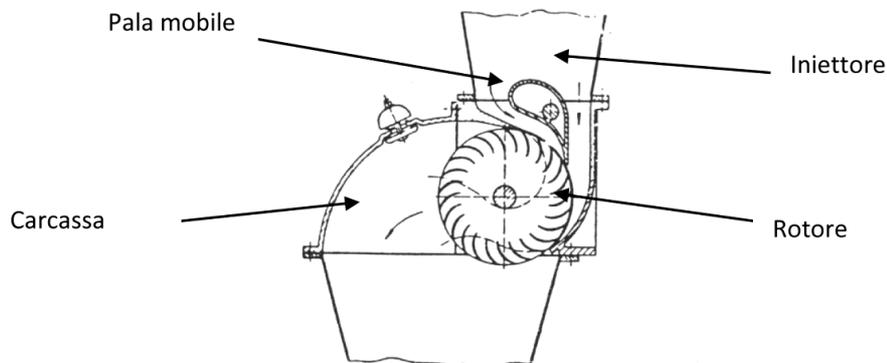


Figura 6.8

L'acqua guidata dall'iniettore, entra fra le pale investendo un angolo di 120° ; percorre in maniera trasversale l'interno del rotore e quindi si scarica attraversando di nuovo le pale dalla parte opposta. Questo ci spiega perché questa turbina viene anche denominata "Cross-flow turbine", ovvero "turbina a flusso trasversale".

Da una prima visualizzazione dello schema di funzionamento, potrebbe sembrare che la cessione di energia idraulica al rotore sia suddivisa equamente nei due passaggi; ma non è così, in quanto la maggior parte di essa è ceduta al primo passaggio, mentre dal secondo si ricava una piccola parte aggiuntiva (circa $1/5$ del primo); quest'ultimo stadio può essere visto come un sistema per scaricare l'acqua senza creare perdite, recuperando, anzi, una parte di energia.

Questo percorso dell'acqua presenta inoltre un altro vantaggio: la turbina tende in maniera autonoma a espellere gli eventuali corpi estranei (foglie, piccoli pezzi di legno, ecc.) trasportati dall'acqua e bloccatisi tra le pale. Questo punto di forza è dovuto in parte al fatto che l'acqua passa tra le pale prima in un senso e, dopo mezzo giro, nel senso opposto, in parte dalla forza centrifuga.

La turbina Michell-Banki è classificata tra le turbine 'ad azione': questo perché la spinta sulle pale è dovuta alla forza centrifuga esercitata dal flusso costretto ad incurvarsi lungo il profilo delle pale, e perché non c'è differenza di pressione nell'acqua tra la sezione di ingresso e quella di uscita.

In verità non è propriamente vero, in quanto l'acqua tra le pale subisce una piccola caduta, quindi la pressione di uscita risulta lievemente minore rispetto a quella di imbocco. Per questo motivo solo il secondo stadio è ad azione pura.

La caratteristica più interessante della Michell-Banki risiede nel fatto che essa offre un'incredibile semplicità costruttiva e di funzionamento tipica delle turbine ad azione e nello stesso tempo è in grado di smaltire grandi portate d'acqua grazie alla forma del rotore che può essere anche di lunghezza importante rispetto al diametro.

Per questo motivo la Michell-Banki funziona bene anche con piccole cadute, nei posti dove sarebbero necessarie complesse turbine ad elica, che lavorano con alte portate.

Con queste condizioni una turbina come la Pelton darebbe potenze troppo piccole e ruoterebbe a basse velocità, questo perché per la sua architettura essa non riesce a smaltire grandi portate. Lo svantaggio della velocità di rotazione è presente anche nelle Michell-Banki in quanto essa è strettamente collegata alla caduta che si ha a disposizione; in questi casi si può utilizzare un moltiplicatore di giri o si può agire a monte accelerando il flusso d'acqua.

La Michell-Banki ha un rendimento elevato (circa 0.8; in rapporto con il rendimento superiore allo 0.9 delle altre turbine) che viene poco influenzato dal funzionamento a portata ridotta rispetto al pieno carico.

La curva rendimento/portata è molto piatta come avviene per le Kaplan, invece le Francis hanno un calo di rendimento al diminuire della portata.

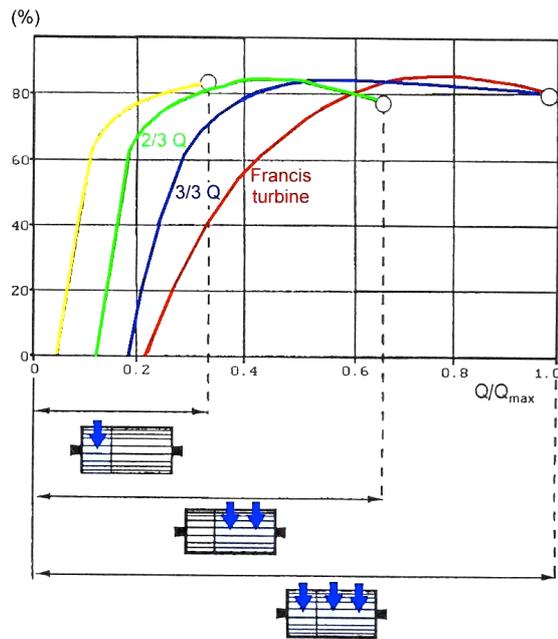


Figura.6.9

Curve d'efficienza di una turbina Crossflow (OSSBERGER) con ugello a due celle.

Le tre curve d'efficienza relative alla parzializzazione del flusso in ingresso sono messe a confronto con quella di una turbina Francis (linea rossa).

La Ossberger ha creato un sistema di regolazione di portata che riesce a mantenere il rendimento a livelli alti. Per farlo si suddivide l'iniettore in due settori(uno 1/3 e l'altro 2/3 della lunghezza totale) (vedi figura 6.9).

In entrambi i settori si trova una pala direttrice mobile, che è in grado di ruotare attorno al proprio asse.

Per parzializzare la portata si procede in questo modo:

- Nella prima fase si chiude in maniera graduale il settore più corto;
- Nella seconda si riapre il settore corto e si chiude il lungo;
- Nell'ultima fase si tiene chiuso il settore lungo e si chiude gradualmente il corto, finché non è tutto chiuso.

Con questo modo di operare la turbina ha buoni rendimenti anche con la portata d'acqua con valori al di sotto di quello nominale a regime.

Un servomeccanismo automatico collegato alla pala direttrice regola la portata e quindi il numero di giri del generatore elettrico in base al carico. Tutti i componenti della turbina, fatta eccezione della pala direttrice, protagonista della regolazione, sono molto semplici; quindi questa macchina idraulica può essere costruita facilmente con le attrezzature e le capacità di qualsiasi officina meccanica.

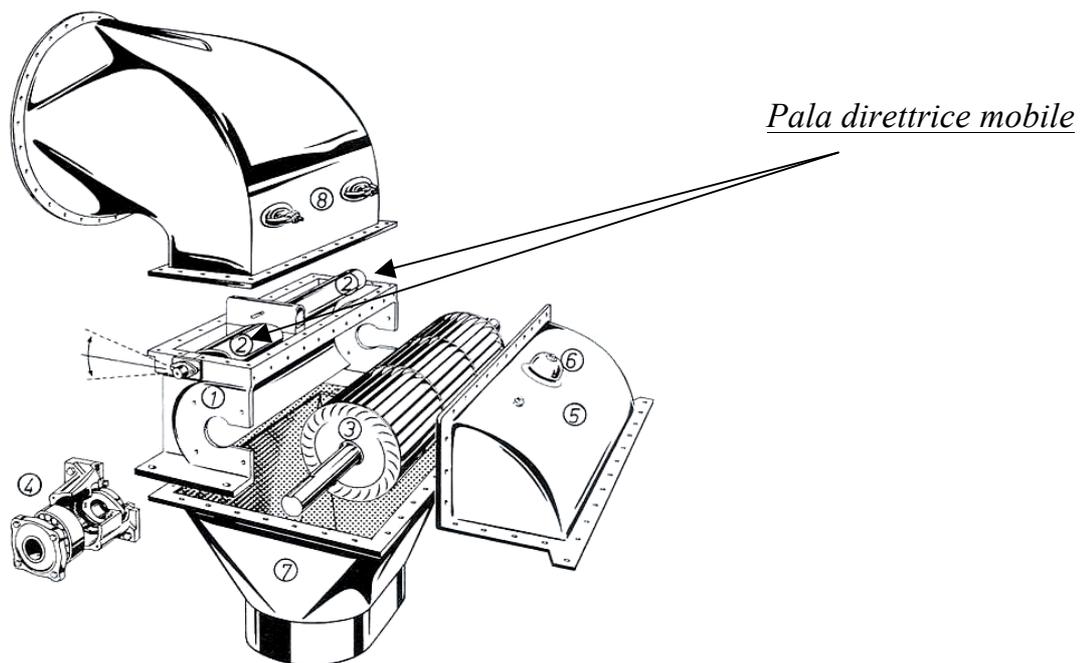


Figura 6.10 Turbina Ossberger

6.2.2 Energia prodotta

Le grandezze principali utilizzate per la definizione del funzionamento della turbina sono grandezze legate al fluido:

- La portata in volume $\rightarrow Q$ [m^3/s]
- La caduta utile o netta $\rightarrow H_U$ [m]

Quest'ultima è il salto che può effettivamente sfruttare la turbina.

Alla caduta disponibile H_D (si faccia riferimento alla figura 6.11) bisogna sottrarre la perdita di carico Y relativa alla condotta e a tutte le discontinuità presenti a monte della turbina:

$$H_U = H_D - Y = H_D - (Y_{\text{Condotta}}) + \sum Y_{\text{Discontinuità}} \quad (6.2)$$

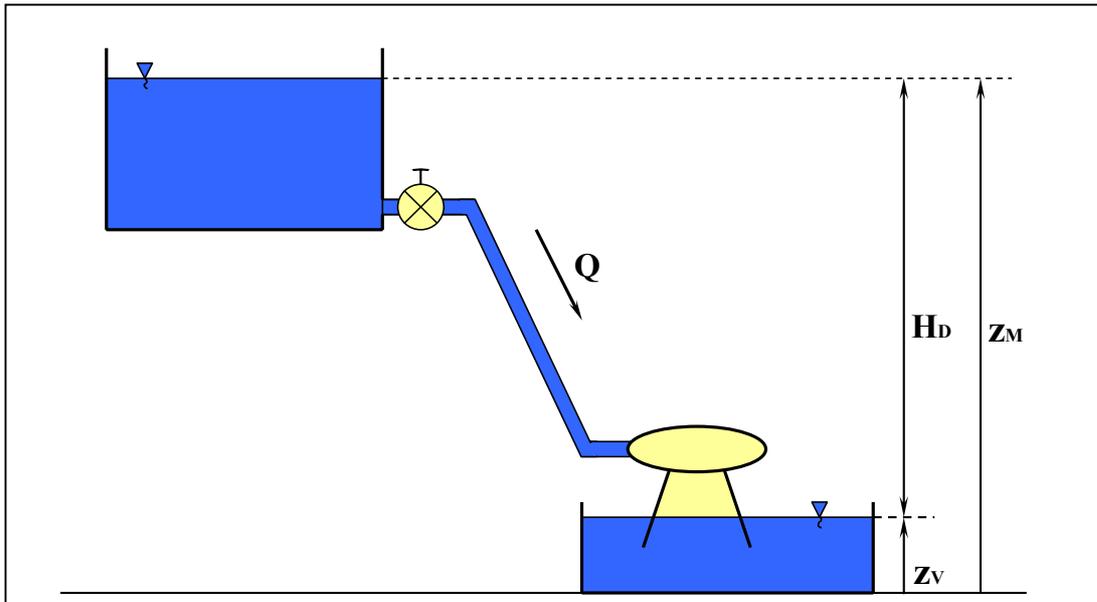


Figura 6.11

Altre grandezze sono più direttamente collegate alle caratteristiche meccaniche della turbina:

- La velocità di rotazione dell'albero $\rightarrow n$ [giri/min]
- Le dimensioni caratteristiche $\rightarrow \omega_s$ e D_s (velocità specifica e diametro specifico)

Nella Figura 6.12 sono raffigurati i campi di utilizzo delle diverse tipologie di macchine, definiti in funzione della velocità specifica e del salto.

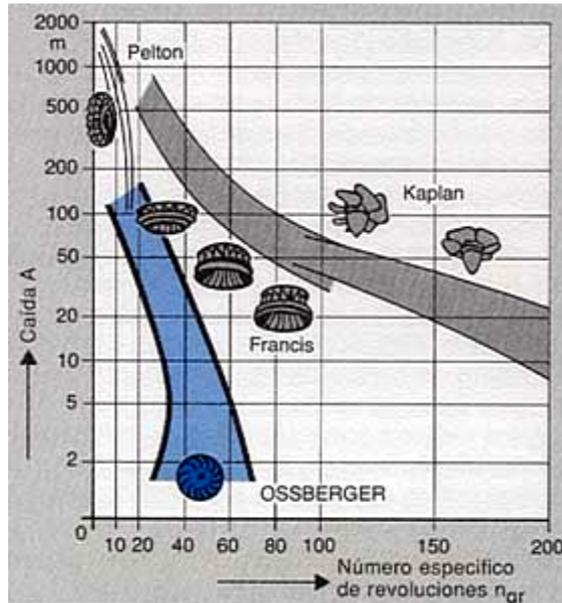


Figura 6.12: Campo d'azione delle turbine Michell-Banki

In Figura 6.13, è invece rappresentato il diagramma di Balje sul quale sono riportate le curve ad uguale rendimento idraulico dei diversi tipi di turbine. Ad ogni coppia di valori ω_s - D_s corrisponde un determinato valore del rendimento idraulico conseguibile con il tipo di turbina che risulta il più adatto per soddisfare i vincoli posti dalla caduta utile H_U e dalla portata Q trattate dalla turbina.

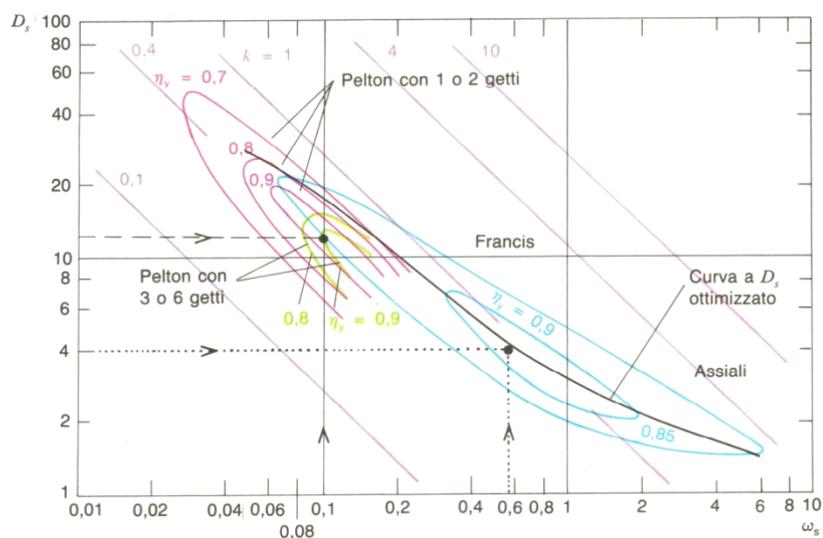


Figura 6.13: curve di iso-rendimento idraulico

Il rendimento totale della turbina $\eta_{T \rightarrow \eta_T} = \eta_{Fluid} \cdot \eta_{Vol} \cdot \eta_{Org}$

tiene conto delle perdite volumetriche, fluidodinamiche e organiche in turbina.

7 Ideazione della prima turbina

7.1 Idea iniziale

L'Italia è un paese ricco di fiumi e ruscelli che sfruttano un salto geodetico dovuto al dislivello da monte a valle e, in alcuni casi dovuto a sbarramenti creati dall'uomo: piccole 'dighe' che creano tanti stramazzi, ovvero delle cadute d'acqua a pelo libero. Questi sono luoghi che potenzialmente possiedono energia che non viene utilizzata. L'idea è quella di cercare di sfruttare questi stramazzi tramite l'installazione di un pico o micro impianto idroelettrico con un basso costo di investimento. L'energia elettrica verrà poi trasmessa da un generatore alla rete.

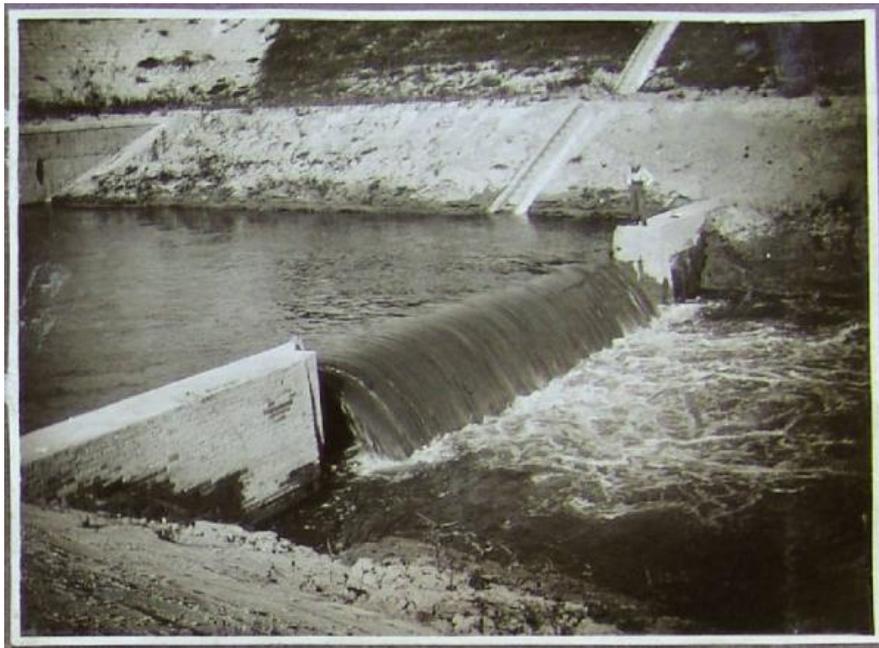


Figura 7.1 Stramazzo

7.2 Dimensionamento dell'impianto

La potenza ottenibile da una centrale idroelettrica dipende essenzialmente da due parametri: la portata e la caduta. Si può calcolare così:

$$P = 9,81 Q H_n \eta \quad (\text{kW}) \quad (7.1)$$

Dove:

Q = portata (m^3/s)

H_n = salto netto (diminuito delle perdite di carico nei condotti).

η = rendimento totale che tiene conto del rendimento dell'alternatore, della turbina, ecc.).

Per le micro centrali si può usare la formula semplificata:

$$P = \frac{Q \cdot H}{200} \quad (\text{kW}) \quad (7.2)$$

Dove :

Q = portata (litri/secondo)

H = salto totale

Nella 7.2 si assume il rendimento globale pari a $\eta = 0,51$.

E' di importanza rilevante la scelta del luogo di installazione.

Per ridurre la lunghezza delle tubazioni e quindi le perdite di carico è opportuno che la caduta dell'acqua avvenga in un tratto breve e molto ripido. Per ottenere una determinata potenza conviene avere una buona caduta o accelerare in qualche modo il flusso, così sarà necessaria una portata minore. In questa maniera si riduce il volume dell'impianto e si abbassano i costi.

7.3 La turbina

7.3.1 L'idea di partenza

Come idea iniziale per la turbina si è puntato sulla semplicità costruttiva e quindi ci si è ispirati alla girante di una ventola di un impianto di condizionamento per automobili. (Vedi Figura 7.2)



Figura 7.2 Ventola per condizionamento nelle automobili

Quindi si è creato un prototipo (Figura 7.3) con SolidWorks per poter valutare il tipo di girante e per vedere come si comportava nelle condizioni prese in esame.

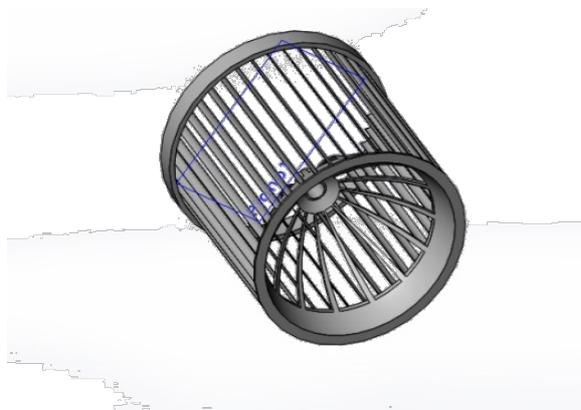


Figura 7.3

Partendo da questa geometria si è sviluppato il disegno in modo tale che le pale potessero essere saldate su due dischi opportunamente intagliati (Figura 7.4 a) con la forma della sezione delle pale dritte o opportunamente sagomate a ‘cucchiaio’ (Vedi Figura 7.4 b).

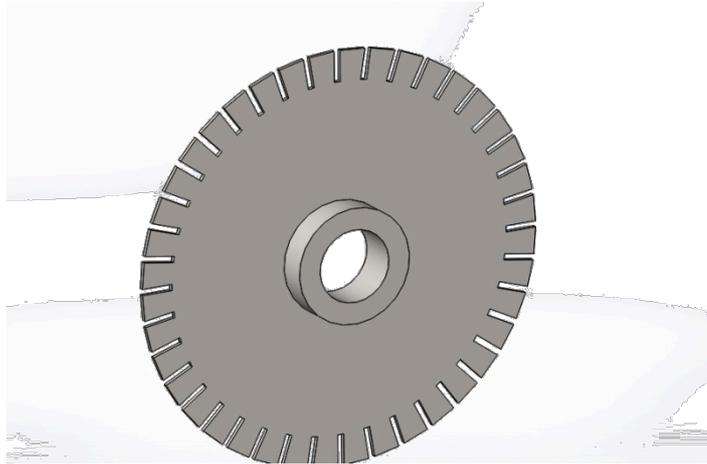


Figura 7.4 a

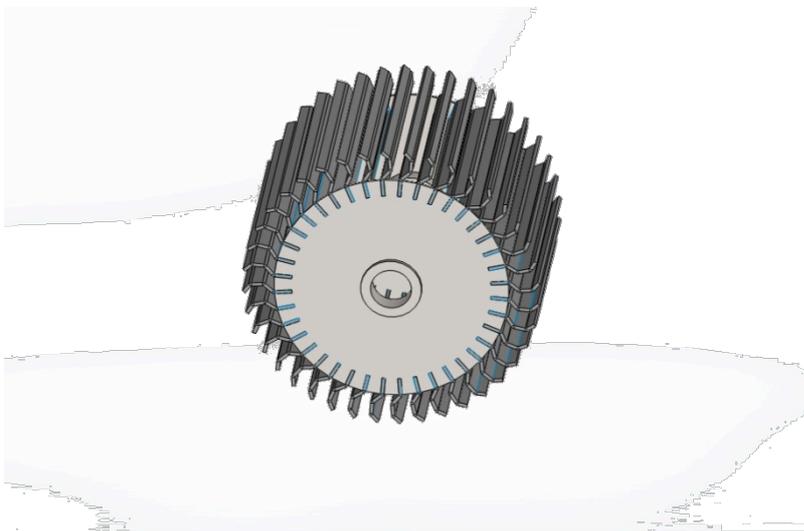


Figura 7.4 b

In seguito abbiamo realizzato un carter che potesse contenere la girante e facesse in modo che soltanto una parte della turbina fosse immersa nel fluido, per questo si è pensato a una forma che ricordasse un ‘fischietto’ (Vedi Figura 7.5 e 7.6).

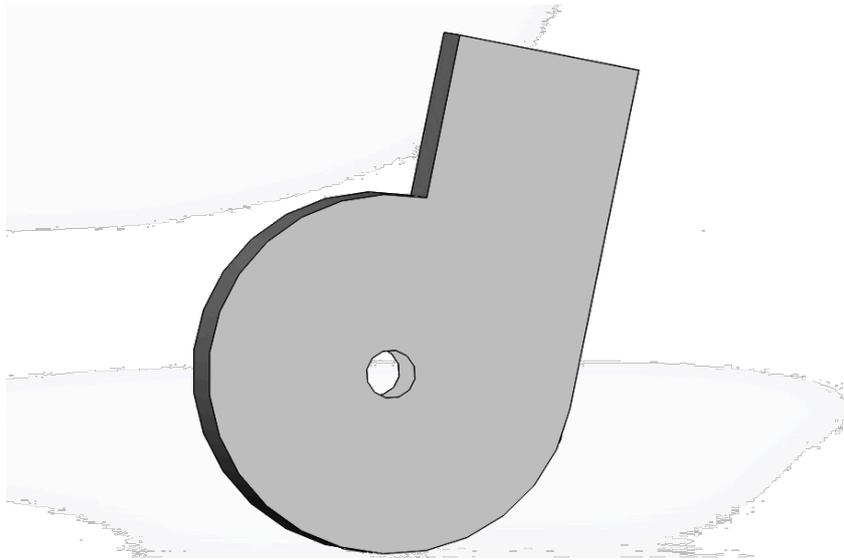


Figura 7.5

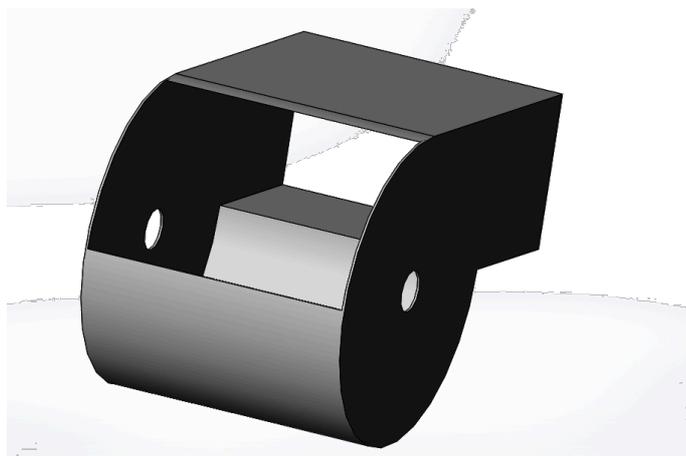


Figura 7.6

A questo punto mancava un elemento che facesse da imbocco e una sorta di griglia per evitare che oggetti esterni entrassero nella girante e fermassero la rotazione delle pale. Una volta create le varie parti le ho unite in un assieme per iniziare a tirare le prime considerazioni.

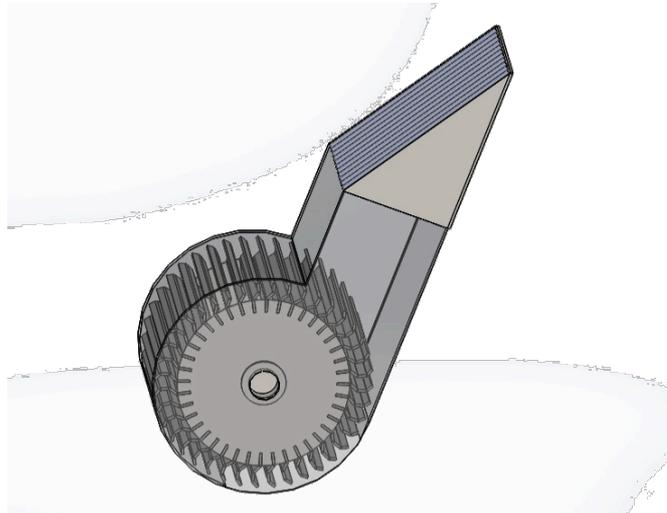


Figura 7.7 Assieme prototipo

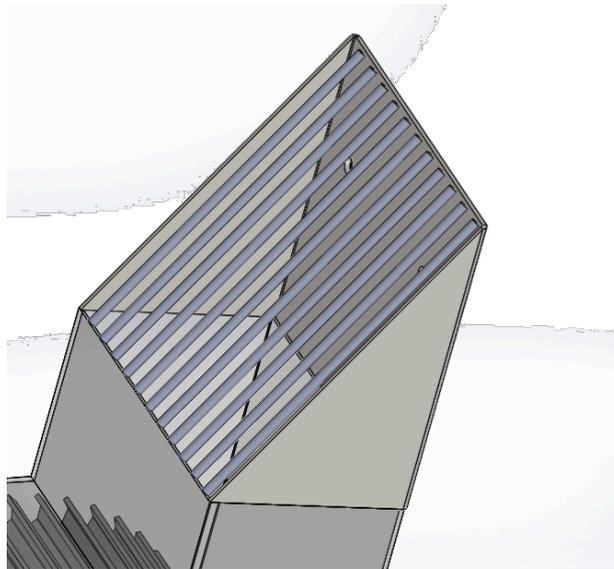


Figura 7.8 Particolare della griglia

Una volta fatto lo schizzo della macchina si è capito che poteva assomigliare ad una Banki-Michell (o Cross-flow).

7.4 Dimensionamento della turbina

7.4.1 Velocità e angoli delle pale

La velocità con cui l'acqua esce dall'iniettore ed entra nel rotore della turbina è determinata dal salto netto H_n .

Essa può essere calcolata con la formula:

$$V_{11} = 0,98 \sqrt{2 \cdot g \cdot H_n} = 4,34 \sqrt{H_n} \quad (7.3)$$

Poiché l'iniettore fascia il rotore per un certo angolo, riferiremo i calcoli delle velocità al punto medio dell'iniettore (vedi Figura 7.9) supposto sull'asse.

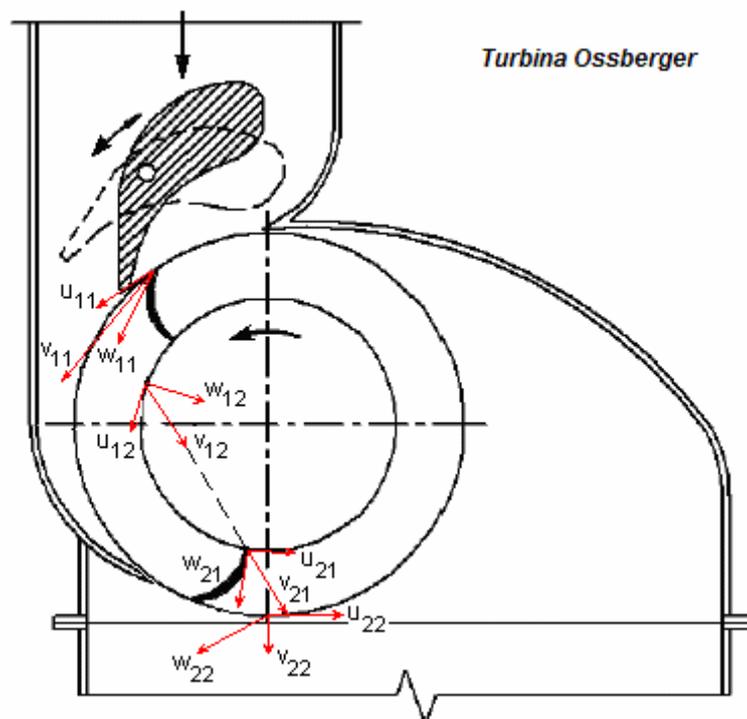


Figura 7.9 Triangoli della velocità

Misuro la caduta tra il pelo libero della vasca di carico o dello stramazzo e il punto medio della sezione di efflusso dell'iniettore.

La velocità V_1 si chiamerà “velocità assoluta di ingresso” (assoluto perché vista da un osservatore fermo con i piedi a terra). La velocità con cui l'acqua viene inviata al rotore è determinata quindi dalla forma dell'iniettore.

Normalmente nelle turbine Banki-Michell l'angolo α_1 , compreso tra la direzione della velocità assoluta d'ingresso dell'acqua e la tangente al rotore, valga 15° - 25° . Io ho assunto $\alpha_1=16^\circ$. Il rotore, spinto dall'acqua sulle pale, ruota a una velocità periferica U_1 .

Nelle turbine a reazione e quindi nelle Banki si ottiene il miglior rendimento quando la velocità periferica vale:

$$U_1 = 0,51 \cdot V_1 \cdot \cos\alpha_1 \text{ (m/s)} \quad (7.4)$$

Dove:

α_1 = angolo compreso tra U_1 e V_1

U_1 = velocità periferica del rotore

V_1 = velocità assoluta d'ingresso

(cioè U_1 deve essere uguale alla metà della proiezione di V_1 sulla direzione di U_1).

Sostituendo il valore di α_1 ottengo:

$$U_1 = 0,48 \cdot V_1 = 2,09 \cdot \sqrt{H_n} \quad (7.5)$$

Ovviamente è il carico applicato sull'asse della turbina (momento resistente) che deve assumere la giusta intensità per fare in modo che la velocità periferica si mantenga vicina al valore ottimale calcolato.

Nei triangoli di velocità è raffigurata anche la velocità relativa W , cioè la velocità dell'acqua vista da un osservatore che ruota insieme con il rotore.

$$\text{Risulta } \overline{W} = \overline{V} - \overline{U}.$$

Serve avere le pale in modo che all'ingresso dell'acqua il loro profilo sia tangente alla velocità W_1 per evitare urti contro le stesse. Questo è il motivo per cui si fissano le pale con un certo angolo. Con la misura di α_1 risulta che $\beta_1=150^\circ$ (con β_1 inclinazione di W_1 rispetto a U_1). Quindi il profilo delle pale in corrispondenza del diametro esterno del rotore deve essere inclinato di 60° rispetto al raggio. Per la simmetria del tutto risulta che W_2 di uscita al primo stadio deve essere radiale, cioè il profilo delle pale in corrispondenza al diametro interno del rotore deve essere diretto come il raggio.

7.4.2 Numero di giri

Nota la U_1 il numero di giri è determinato dal suo diametro.

A parità di U_1 e a parità di H_n il numero di giri della turbina risulta tanto più alto quanto più piccolo è il diametro del rotore.

Si può calcolare con la formula seguente:

$$n = \frac{60 \cdot U_1}{\pi \cdot D_1} = 19,1 \cdot \frac{U_1}{D_1} \quad (\text{giri/min}) \quad (7.6)$$

con D_1 = diametro esterno del rotore (m).

Se sostituisco la (7.5) nella (7.6) ricavo il numero di giri ottimale:

$$n = 39,9 \cdot \frac{\sqrt{H_n}}{D_1} \quad (\text{giri/min}) \quad (7.7)$$

7.4.3 Diametro del rotore

Siccome un generatore elettrico deve ruotare molto velocemente, di solito si deve moltiplicare il numero di giri della turbina con un sistema ad ingranaggi. Solo nel caso di grossi salti è possibile lavorare in presa diretta. In questi casi posso calcolare il diametro partendo dalla formula (7.7) in base al numero di giri del generatore elettrico, che è noto:

$$D_1 = 39,9 \cdot \frac{\sqrt{H_n}}{n_g} \quad (\text{m}) \quad (7.8)$$

con n_g = numero di giri del generatore.

In tutti gli altri casi si determina un diametro approssimativo e si calcola il numero di giri con la (7.7) poi si dimensiona il moltiplicatore.

Conviene sempre avere un rotore con diametro piccolo, così potrà ruotare ad un numero di giri superiore e la coppia sull'albero risulterà minore. Facendo così dovremo avere il rotore più lungo per smaltire la portata richiesta.

Lunghezze eccessive del rotore posso portare problemi di resistenza delle pale e stabilità del rotore, per questa ragione bisogna che il diametro non sia troppo piccolo.

Nella maggior parte dei casi il diametro oscilla tra i 200 e i 400 mm.

Una volta fissato il diametro D_1 si può calcolare il diametro interno D_2 con la formula:

$$D_2 = \frac{2}{3} \cdot D_1 = 0,67 \cdot D_1 \quad (7.9)$$

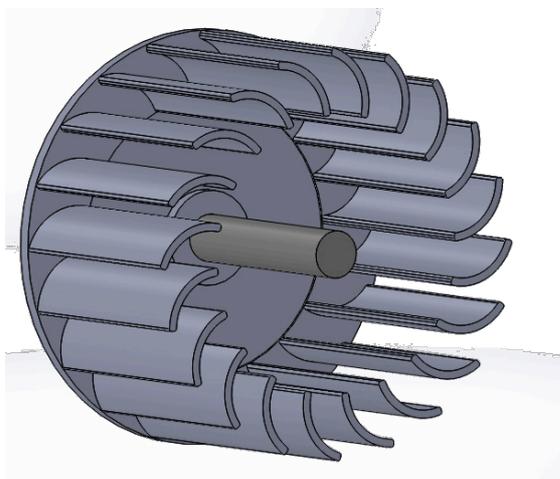


Figura 7.10 Sezione del Rotore

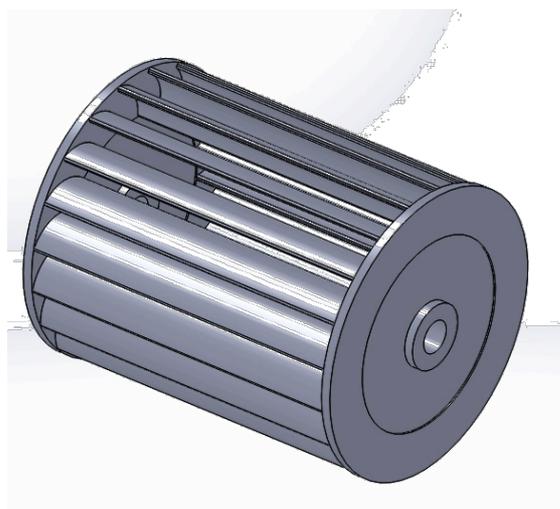


Figura 7.11 Rotore

7.4.4 Geometria e numero di pale

Anche se esistono metodi molto precisi per il calcolo del numero di pale, dipendenti dal rapporto D_2/D_1 , ho semplificato le cose basandomi su alcune considerazioni che cito qui di seguito. E' conveniente avere il numero di pale più elevato possibile in modo da distribuire meglio la spinta sulla periferia del rotore e per ridurre la spinta su ciascuna di esse; di contro non ne voglio nemmeno troppe perché mi aumentano le perdite e la costruzione diventa più complessa. Il numero di pale ideale deve essere un multiplo di 4 così è più facile distribuirle in maniera esatta lungo la circonferenza. Nel maggiorananza dei casi si applica un numero di pale comprese tra 20 a 32 (20, 24, 28, 32).

Una volta fissato il numero di pale posso calcolare l'angolo compreso tra una pala e la successiva:

$$\theta = \frac{360^\circ}{z} \quad (7.10)$$

Dove z è il numero di pale.

Le pale hanno un profilo ad arco di cerchio, quindi il raggio di curvatura interno della pala è:

$$r = 0,16 \cdot D_1 \quad (7.11)$$

Si può vedere facilmente che i centri di curvatura delle pale si trovano tutti su una circonferenza di diametro:

$$D_c = 0,74 \cdot D_1 \quad (7.12)$$

7.4.5 Geometria dell'iniettore

Nella turbina Banki l'acqua entra nel rotore attraverso una porzione più o meno grande dell'intera circonferenza. L'arco di ammissione massimo è 120° (un terzo della circonferenza).

Per le turbine di grossa taglia si può utilizzare l'arco massimo ma per le piccole turbine, a causa della difficoltà nel realizzare poi l'iniettore che riesca a guidare in modo corretto il fluido tra le pale, si usano angoli più piccoli, pari a $1/6$ di circonferenza per cui si è ottenuto un fattore di immissione $f = 0,166$ (l'acqua entra nel rotore con un arco che corrisponde al 16,6% della circonferenza totale). Dato che l'angolo è piccolo, si è disposto l'arco sull'asse orizzontale del rotore. Questa decisione è molto semplice dal punto di vista costruttivo e permette di usare un salto piccolo.

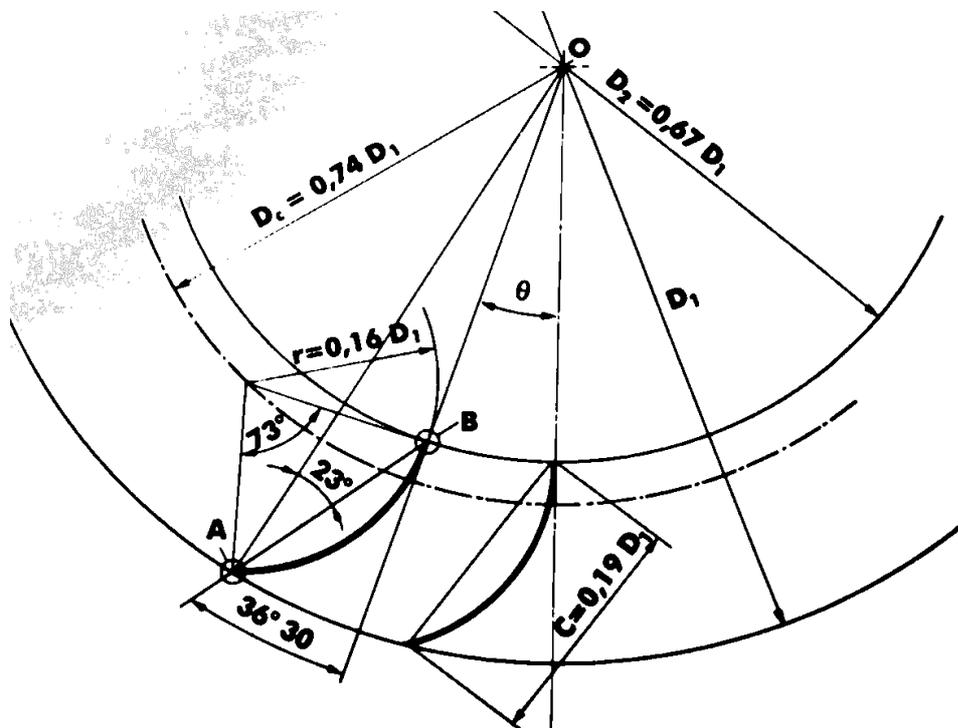


Figura 7.12 – Geometria delle pale

A questo punto si può disegnare la parte terminale dell'iniettore, la quale dovrà avere una forma curva per garantire ai filetti fluidi un'inclinazione di entrata nelle pale pari ad $\alpha_1 = 16^\circ$ rispetto alla tangente del rotore.

La costruzione grafica è raffigurata in Figura 7.13.

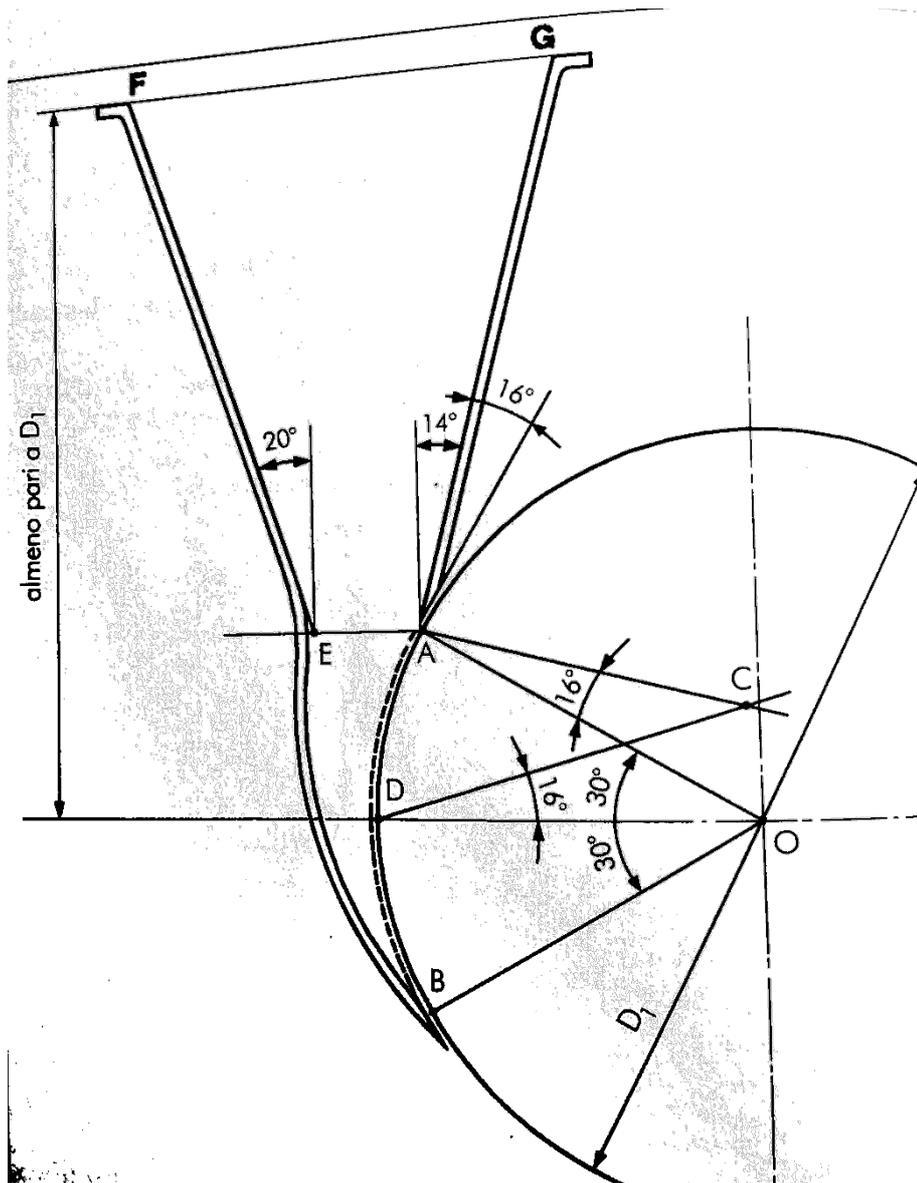


Figura 7.13- Geometria dell'iniettore

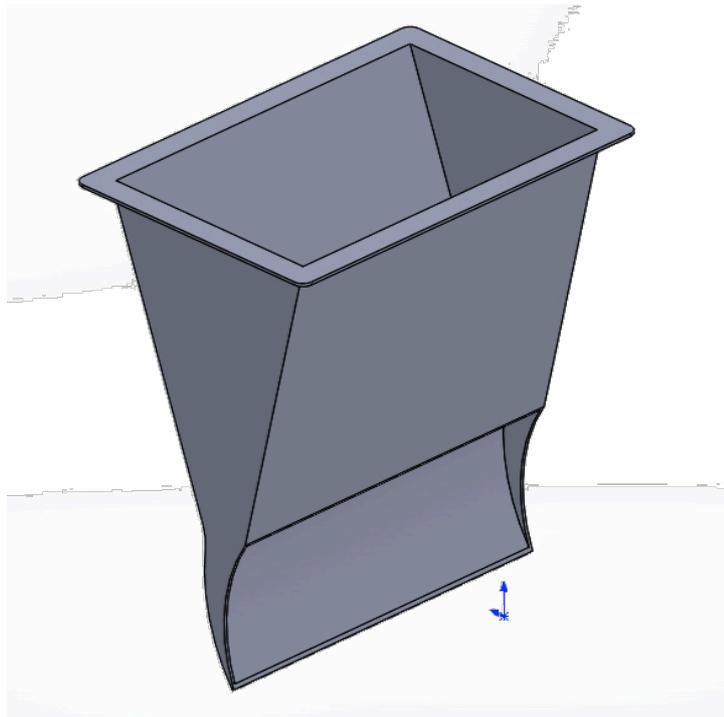


Figura 7.14 – Iniettore in 3D

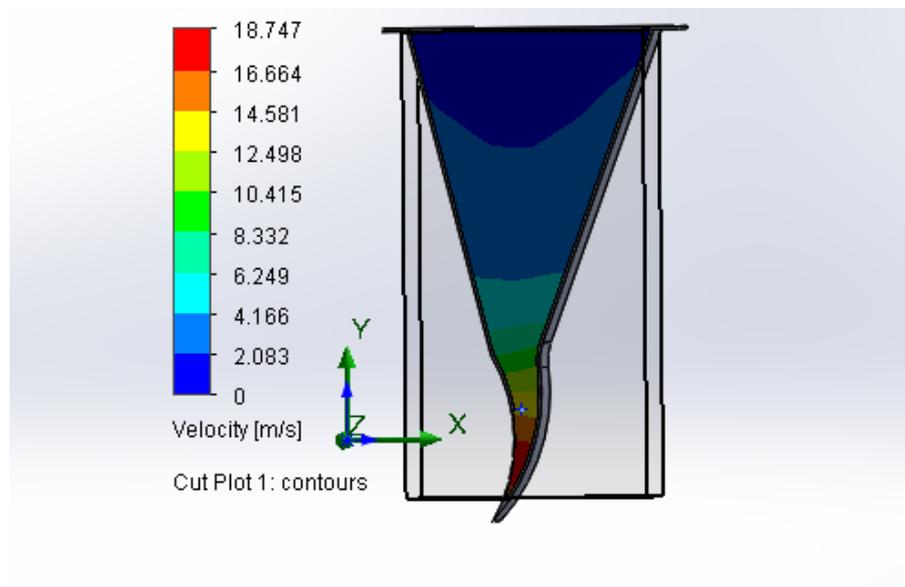


Figura 7.15 – Andamento della velocità nell'iniettore

7.4.6 Carcassa

La carcassa può essere realizzata in lamiera sottile in quanto non c'è alcuna pressione interna. Più che altro serve come protezione e per evitare che l'acqua spruzzi attorno, bagnando i cuscinetti e il generatore elettrico. In una versione ho previsto degli alloggiamenti nei quali ruotano i dischi che fanno da tenuta idraulica.

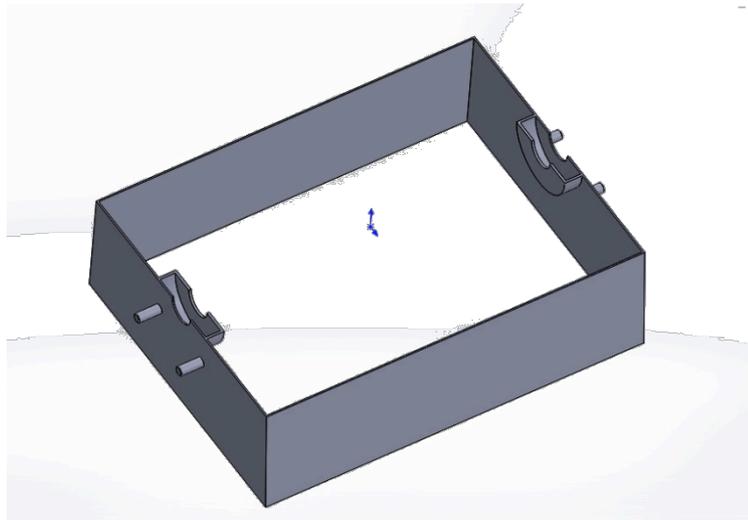


Figura 7.16 – Carcassa inferiore

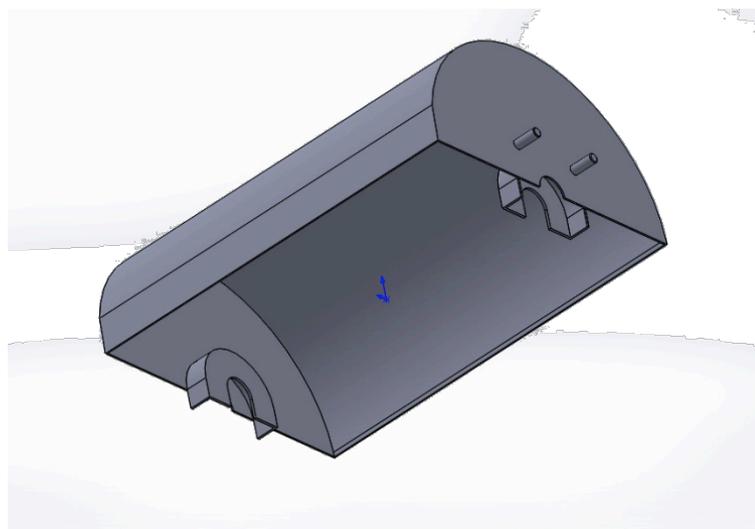


Figura 7.17 – Carcassa superiore

7.4.7 Assemblaggio

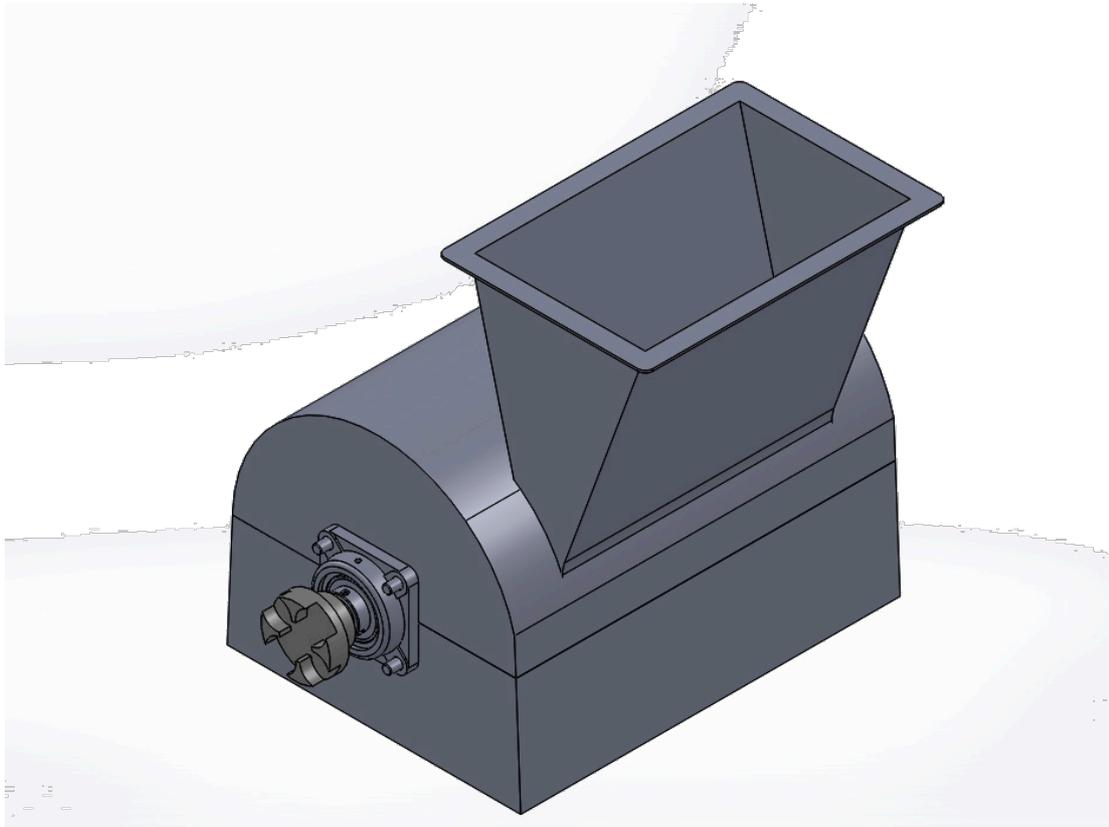


Figura 7.18 – Assieme finale

Arrivati a questo punto ci si è accorti che tale turbina non era adatta al nostro scopo; questo perché per avere rendimenti accettabili era necessario creare un bacino di accumulo a monte della macchina tale che potesse controllare la portata e la mantenesse a livelli costanti nel periodo di funzionamento. Dovendo soddisfare richieste di semplicità costruttiva e minimo impatto sull'ambiente si è accantonata l'idea per passare a una turbina diversa.

8.La Seconda Turbina

8.1 Introduzione

Il limite della precedente turbina era collegato al fatto che, avendo quel tipo di geometria, doveva lavorare necessariamente con colonna di fluido forzata e con parte della rotante in aria in modo da permettere la risalita delle pale. Per cercare di risolvere questo problema si è pensato a una girante del tutto diversa; infatti, si è pensato di poter utilizzare un rotore con le caratteristiche simili a una turbina eolica Darrieus. Essa, diversamente dalla precedente, può lavorare completamente immersa nel fluido in quanto le pale sono disposte in maniera tale da non ostacolare la rotazione della girante. Per aumentare i rendimenti abbiamo inserito un meccanismo che cambia la posizione delle pale a seconda della geometria; questo riesce a scavalcare il problema delle configurazioni che generano componenti di spinta in senso opposto alla rotazione .

8.2 Turbina Darrieus

Le Turbine Darrieus sono turbine ad asse verticale basate sul principio della portanza, brevettate da George Darrieus nel 1931, sono in grado di produrre potenza al pari e anche maggiore delle migliori turbine ad asse orizzontale attualmente in grandissima diffusione. Il nome Darrieus si riferisce a tre classi di turbine ad asse verticale: le “eggbeater”, “H-type”, e la Darrieus elicoidale che si differenziano tra di loro solo per la forma delle pale, ma tutte funzionano sfruttando la portanza creata dal profilo palare (Figura 8.1).

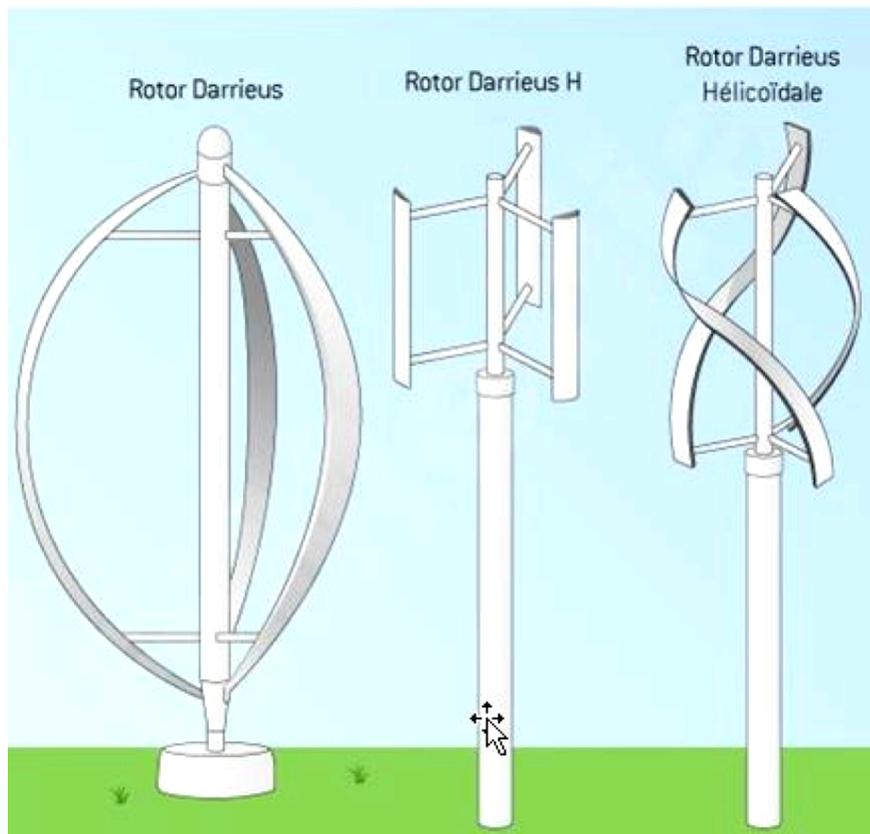


Figura 8.1 Tre tipologie di turbine Darrieus

Le forze trainanti delle turbine Darrieus possono essere descritte in dettaglio con l'aiuto della Figura 8.2. Ci sono due componenti di velocità importanti: la velocità del profilo alare rispetto all'albero, che è sempre parallela alla corda, di modulo pari alla velocità angolare moltiplicata per il raggio e la velocità del vento, approssimata con una velocità costante in direzione, modulo e verso. La risultante di questi due vettori è la velocità dell'aria rispetto al profilo alare, cioè la velocità apparente del vento, detta anche velocità relativa. L'angolo tra questa risultante e la corda del profilo alare si chiama l'angolo di attacco α .

Le pale che fendono l'acqua sotto un certo angolo di attacco sono soggette ad una differenza di pressione, origine della forza chiamata portanza che spinge in avanti la pala.

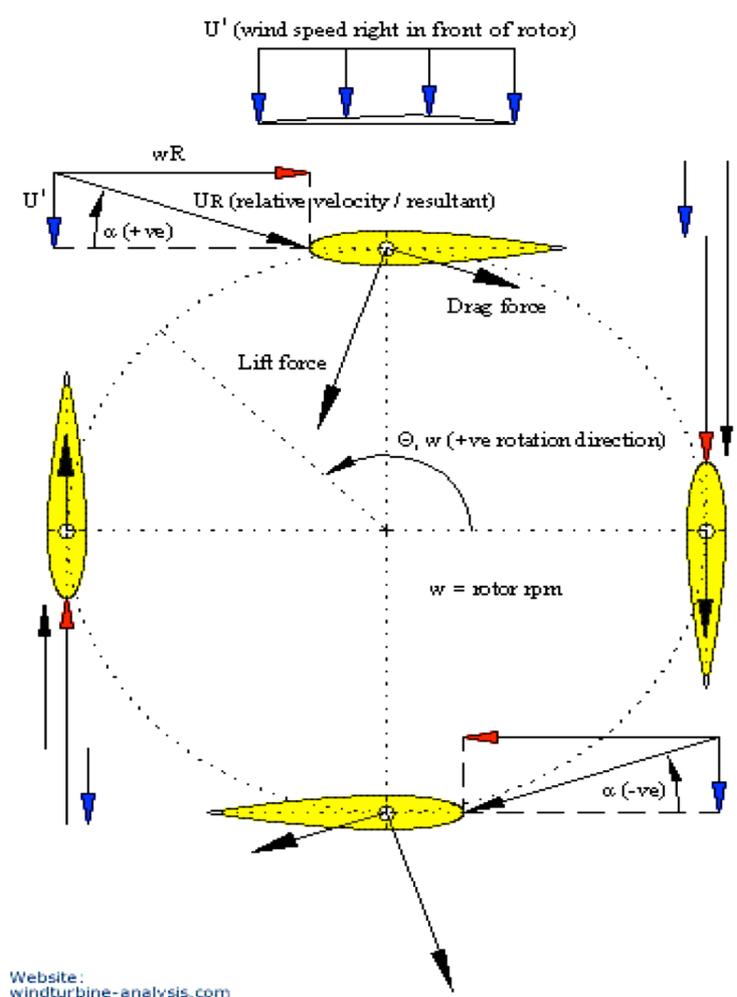


Figura 8.2 Componenti forze agenti su una turbina Darrieus

- freccia blu: velocità dell'aria rispetto al terreno (velocità assoluta)
- freccia rossa: velocità dell'aria che incide sul profilo, dovuta alla sola rotazione del rotore (l'opposto della velocità di trascinamento)
- freccia nera: velocità dell'aria risultante delle due sopra (velocità dell'aria relativa o apparente)
- freccia grigia: forza di resistenza
- freccia verde: forza di portanza

Sempre osservando la Figura 8.2, in cui sono rappresentate quattro pale con un profilo alare simmetrico, nella posizione $\theta=0^\circ$ e in quella $\theta=180^\circ$ si ha $\alpha=0^\circ$ ed esiste solo una forza di resistenza; per poter generare una spinta di portanza è necessario un angolo di attacco diverso da zero, altrimenti causa della simmetria tra dorso e ventre della pala non si genera nessuna differenza di pressione e quindi nessuna forza motrice positiva (mentre se il profilo è asimmetrico l'angolo di attacco per il quale si ha portanza nulla varia da profilo a profilo, cosicché anche con un angolo di attacco nullo si potrebbe ottenere generazione di portanza).

Non appena le pale si allontanano dall'angolo appena descritto nasce la portanza, dall'inglese "lift force", cioè una forza perpendicolare alla velocità relativa che possiede una componente in grado di spingere in avanti le pale; naturalmente la forza di resistenza, dall'inglese "drag force", diretta come la velocità relativa rimane e tende a rallentare le pale.

La coppia generata dalle forze di portanza deve essere maggiore della coppia generata da quelle di resistenza per poter essere in grado di produrre energia utile.

8.3 Limite di Betz

La potenza effettivamente captabile da un rotore eolico, anche considerando perdite nulle, si discosta comunque da quella teoricamente disponibile nella vena fluida, in quanto non è possibile "fermare" completamente la corrente. In tal caso, infatti, si registrerebbe un accumulo infinito di massa a valle del rotore, impedendo l'afflusso di altra acqua e quindi il funzionamento della turbina. La potenza utilmente sfruttabile risulta limitata superiormente dal Limite di Betz. Tale valore rappresenta la massima potenza estraibile dalla

vena fluida per fini energetici, senza considerare perdite meccaniche e fluidodinamiche, e rappresenta quindi un riferimento puramente teorico.

Per il calcolo del limite, si ipotizza che il tubo di flusso della vena acquosa non interagisca con il fluido circostante, che le sezioni infinitamente a monte e a valle del rotore siano fluidodinamicamente indisturbate, che l'acqua risulti di intensità costante con la quota, che sussistano condizioni stazionarie, che il rallentamento sia uniformemente distribuito sulla sezione del rotore, che la distribuzione di velocità sia monodimensionale lungo l'asse di avanzamento della vena fluida, che il flusso sia indisturbato oltre il rotore, che l'acqua abbia densità costante e che non ci siano vortici.

Il ragionamento teorico verrà opportunamente semplificato, per risultare più comprensibile, eliminando le considerazioni ritenute superflue o ridondanti. L'andamento del tubo di flusso in prossimità ed in corrispondenza del rotore viene schematizzato in figura 8.3.

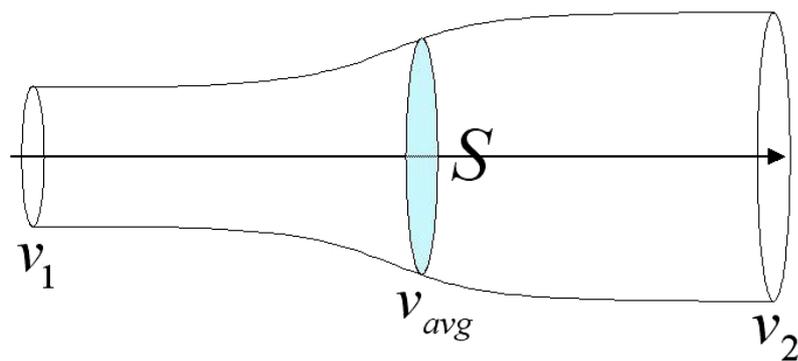


Figura 8.3 Schema di flusso di fluido attraverso un attuatore

Si consideri la velocità del fluido a valle del rotore come una frazione di quella a monte, come espresso nella formula seguente:

$$v_2 = a \cdot v_1 \quad (8.1)$$

Il parametro “ a ” prende il nome di *fattore di interferenza del rotore*. Risulta possibile esprimere la potenza captata dall’ aerogeneratore attraverso due formule. Nella prima, il valore della potenza si ottiene moltiplicando la portata in massa per la differenza tra l’ energia cinetica posseduta del fluido rispettivamente a monte e a valle del rotore. Tale formula viene riportata di seguito:

$$P = \rho \cdot S \cdot v \cdot \left(\frac{v_1^2}{2} - \frac{(a \cdot v_1)^2}{2} \right) \quad (8.2)$$

Nella seconda, il valore della potenza si ottiene moltiplicando la velocità dell’acqua in corrispondenza del rotore per la forza agente sulla girante stessa, ottenibile a sua volta come prodotto tra la portata in massa del fluido e la differenza tra la velocità del vento rispettivamente a monte e a valle dell’ aerogeneratore

Tale forma della forza è conseguenza dell’ imposizione della quantità di moto:

$$F = \rho \cdot S \cdot v \cdot (v_1 - a \cdot v_1) \quad (8.3)$$

La seconda espressione relativa alla potenza captata è espressa dunque dalla formula riportata di seguito:

$$P = \rho \cdot S \cdot v^2 \cdot (v_1 - a \cdot v_1) \quad (8.4)$$

Eguagliando le due espressioni della potenza captata, si ricava la velocità dell'acqua in corrispondenza del rotore, ottenibile come media aritmetica tra le velocità a monte e a valle. Tale legame emerge dalla relazione seguente:

$$v = \frac{v_1 + a \cdot v_1}{2} \quad (8.5)$$

Sostituendo il valore sopra determinato nella prima espressione della potenza captata, si ottiene la relazione espressa nella formula riportata di seguito:

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v_1^3 \cdot \left[\frac{1}{2} (1 + a) \cdot (1 - a^2) \right] \quad (8.6)$$

La grandezza tra parentesi quadre prende il nome di coefficiente di potenza teorico. Derivando l'espressione di tale coefficiente rispetto alla costante a e ponendo la derivata ottenuta uguale a zero, si ottiene il valore di a in corrispondenza del quale il coefficiente di potenza teorico, e di conseguenza la potenza captata, risulta massimo. Il valore in questione del parametro a è pari ad $1/3$, come è possibile accertare dal grafico riportato in figura 8.4.

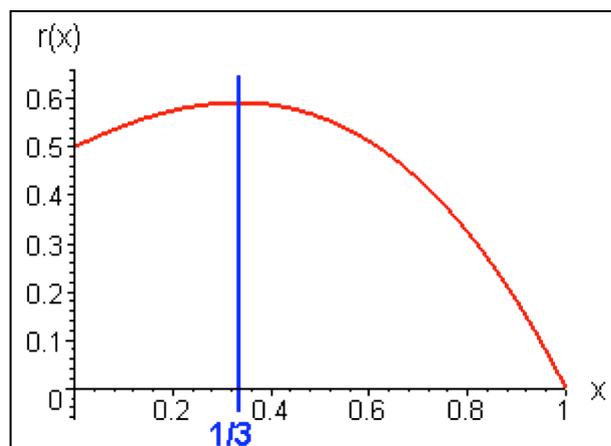


Figura 8.4 Andamento del coefficiente di potenza teorico in funzione di 'a'

Sostituendo il risultato sopra ottenuto nell' espressione del coefficiente di potenza teorico si ottiene il valore massimo di quest' ultimo:

$$P_{Max} = \frac{16}{54} \cdot \rho \cdot S \cdot v_1^3 \quad (8.7)$$

8.4 Principio di funzionamento

L'elica è composta da una coppia di rotori ai quali sono incernierati uno o più profili alari che, per la loro specifica funzione, in questa sede saranno chiamate pale. Esse sono libere di ruotare attorno a un proprio asse grazie a due coppie rotoidali, ognuna delle quali è composta da un perno accoppiato a una boccia o cuscinetto. Questa rotazione non è però libera ma viene comandata, con sistemi spiegati dettagliatamente in seguito, per garantire il corretto funzionamento del sistema. I rotori sono accoppiati mediante flange ad un albero di trasmissione il quale è collegato, direttamente o indirettamente a scelta del progettista, al generatore(o motore).

Il principio di funzionamento dell'elica è rappresentato in figura 8.5, dove sono rappresentate le forze agenti sul sistema.

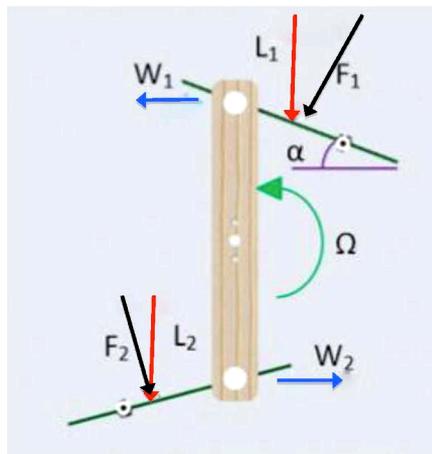


Figura 8.5 Forze protagoniste del meccanismo a due pale

Tali forze sono dipendenti dall'angolo d'incidenza della pala (in Figura 8.5 rappresentato dall'angolo α , in viola).

La principale differenza rispetto ad un'elica tradizionale risiede nel moto delle pale rispetto all'avanzamento fluido. Mentre nelle eliche tradizionali le pale ruotano perpendicolarmente rispetto al moto dell'acqua, in questo specifico sistema la pala ruota parallelamente. Questo determina una velocità costante su tutta la pala e non dipendente dal raggio della stessa, a tutto vantaggio di un'ottimizzazione del rendimento unita ad una maggior semplicità costruttiva (figura 8.6).

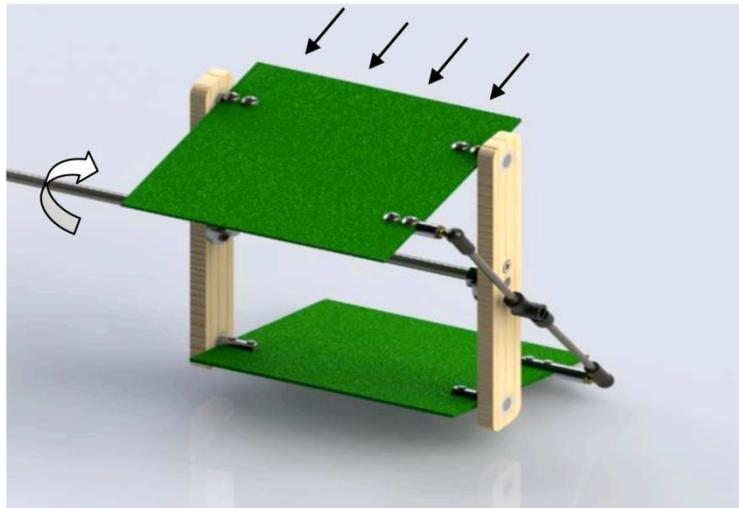


Figura 8.6 Andamento della velocità in funzione della rotazione

Come è possibile notare, è sufficiente utilizzare un profilo costante lungo il bordo della pala e non variarne la curvatura come nelle eliche tradizionali.

Per quanto riguarda la spinta prodotta dall'elica essa, a parità di profilo, è dipendente dalla velocità con cui l'acqua lambisce il profilo e dall'angolo di incidenza con cui colpisce la pala. Serve un sistema di controllo che regoli l'intensità del vettore di spinta.

Il sistema per modificare l'intensità del vettore di spinta si basa sul controllo dell'angolo di incidenza. Questo sistema, denominato pitch control, deve permettere la possibilità di ottenere ogni valore di incidenza compreso tra zero gradi fino a un valore massimo in funzione del profilo (massimo è 12°).

Infatti, a incidenza nulla otteniamo portanza pari a zero, mentre aumentandola si genera portanza. Naturalmente la configurazione a portanza nulla è utilizzata solamente all'avvio del motore per diminuire al minimo la coppia di spunto e permettere quindi il non utilizzo di una frizione, evitandone la sua manutenzione e, soprattutto, ottenendo un risparmio di peso.

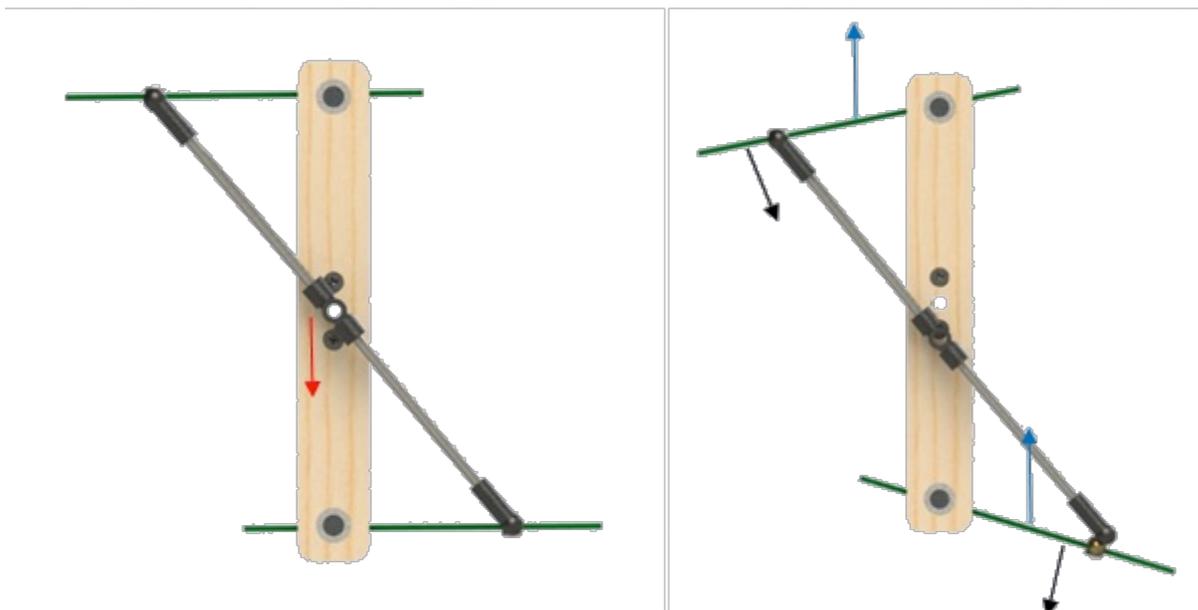


Figura 8.7

Dalla Figura 8.7 si nota come spostando in basso il pitch control (freccia rossa) si ottiene una incidenza α (creata dal movimento delle pale, frecce nere) che genera portanza verso l'alto (frecce blu).

A questo punto occorre fare una considerazione: si è detto che sono due punti, opposti fra loro, a determinare la direzione del vettore di spinta e pertanto, in questi due punti, l'angolo di incidenza delle pale è quello desiderato. Questi due angoli di incidenza devono risultare uguali in modulo ma di segno opposto, questo perché la velocità tangenziale delle due pale è la stessa in modulo (la velocità dipende dal raggio che è il medesimo per tutte le pale e lungo tutto il profilo delle stesse) ma di verso opposto. Rendendo i due angoli di incidenza opposti, si ottiene una portanza che è somma vettoriale delle portanza delle singole pale, come si evince dalla figura 8.7. Utilizzando i vettori indicati in figura si ottiene la portanza totale L_{tot} :

$$\vec{L}_{tot} = \vec{L}_1 + \vec{L}_2 \quad (8.8)$$

Valore naturalmente non costante durante la rotazione, ma è compreso da un minimo di $L_{totale}=0$ ad un massimo in funzione dell'angolo d'incidenza.

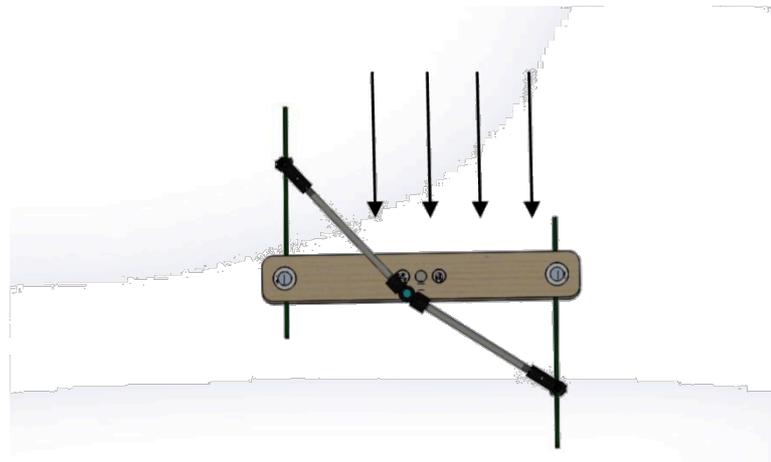


Figura 8.8 Posizione pale parallele

Per qualsiasi disasso, tra l'albero principale e quello delle due aste, abbiamo un angolo in cui le due pale sono parallele.

Questo è un ulteriore vantaggio del meccanismo a geometria variabile; infatti, si può usare tale posizione quando le pale sono con il fulcro in mezzzeria evitando che diano spinta negativa, cosa che sarebbe successa con la rotante a geometria fissa.

8.5 Specifiche di progetto

Per iniziare, la progettazione si è concentrata nella determinazione delle forze e delle coppie necessarie per adottare tale sistema ad una turbina idraulica. Si è fatta una stima di un ingombro di circa 1 m e di peso intorno ai 25/30 kg; questo per favorire al massimo l'installazione da parte di un operatore.

Si è scelto di adottare un sistema multi rotore composto da due o quattro eliche, tale scelta è motivata da una maggiore stabilità e una maggiore potenza della turbina.

Per il calcolo dell'intensità di spinta generata sull'elica è necessario conoscerne il suo profilo. Si è scelto di realizzare il profilo delle pale prima nella forma più semplice possibile, ovvero la piana, poi con profilo alare simmetrico.

Le caratteristiche aerodinamiche di una lastra piana (o lastra sottile) non sono ovviamente le più performanti rispetto ad altri profili ma, soprattutto nel settore modellistico, rappresentano una scelta sensata per la sua facile costruzione e conseguente basso costo. Inoltre possono essere costruite con qualsiasi tipo di materiale senza ricorrere a fusioni o ad altre lavorazioni costose.

Si prende come dato di velocità del fiume una media di 2.4 m/s; questa può essere aumentata con sistemi per accelerare il moto di un fluido che possiamo inserire senza problemi nella struttura di imbocco subito dopo ad una griglia necessaria per evitare blocchi o rotture causati da oggetti (legnetti, rami, ecc.) che il corso d'acqua si trascina dietro.

Con questi accorgimenti arriviamo facilmente a una velocità di ingresso di circa 4.2 m/s.

$$v_{Fluid} = \frac{2.4}{1.6} \cdot 2.8 = 4.2 \text{ m/s} \quad (8.9)$$

Il diametro del rotore [DiametroRotore] è di 440 mm, si può quindi determinare la velocità angolare di fuga [OmegaFuga]:

$$\Omega_{Fuga} = \frac{v_{Fluid}}{DiametroRotore} = 9.54 \text{ rad/s} \quad (8.10)$$

Che equivale a numero di giri [RpmMax]:

$$RpmMax = (\Omega_{Fuga} \cdot 30) / \pi = 91.10 \text{ giri/min} \quad (8.11)$$

8.6 Il profilo delle pale NACA

(NORTHERN ADVISORY COMMITTEE FOR AERONAUTICS)

8.6.1 Caratteri generali

Esistono un' estesa schiera di profili alari già disegnati e di prestazioni certe tra cui scegliere. Certamente i profili alari più “famosi”, indicati per i moti subsonici, sono contenuti nelle cosiddette famiglie di profili NACA “low speed”:

- NACA A 4 CIFRE
- NACA A 5 CIFRE
- SESTA SERIE NACA LAMINARE

Il progetto di queste famiglie di profili è anteriore 1940 ma ancora oggi, quando si avvia il progetto di una nuova macchina che lavora in campo subsonico per la scelta del profilo di riferimento ci si rivolge ad un profilo NACA.

Come mostrato nella figura 8.9, un profilo alare può essere considerato come composto da una distribuzione di spessore simmetrica, adagiata su una linea media di forma opportuna. La linea media, infatti, è quella linea curva che è in ogni punto equidistante dal dorso e dal ventre del profilo. La distanza misurata perpendicolarmente alla linea media, fra il dorso e il ventre del profilo è detta spessore.

I punti in cui la linea media incontra il profilo nella zona anteriore e nella zona posteriore si chiamano rispettivamente bordo d'attacco e bordo d'uscita. Il segmento che unisce questi due punti si chiama invece corda del profilo. E' facile vedere geometricamente che in un profilo simmetrico la corda del profilo coincide con la linea media, cioè in un profilo simmetrico la linea media è un segmento che congiunge il bordo d'attacco con il bordo d'uscita.

NACA 0012

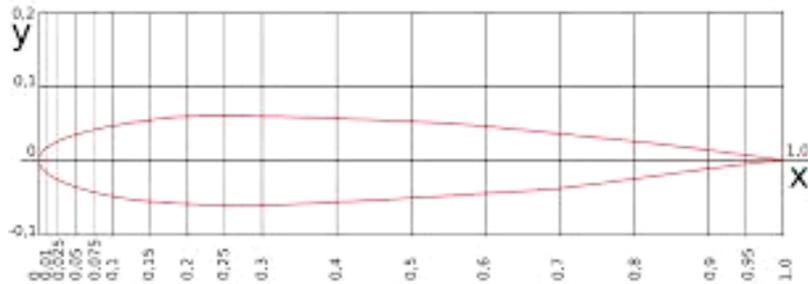


Figura 8.9 Curva Profilo Naca 0012

Per quanto riguarda la distribuzione di spessori, il rapporto fra lo spessore massimo del profilo e la lunghezza della corda, espresso in percentuale, è un parametro geometrico spesso utilizzato nella definizione dei profili e viene denominato spessore percentuale. Per definire la linea media si utilizza invece la massima ordinata, espressa in percentuale o in millesimi di corda, e la posizione lungo la corda per la quale si ha il massimo.

Si consideri ora un profilo alare immerso in una corrente uniforme, con velocità a grande distanza dal profilo pari a U diretta come l'asse x , che in questo caso non coincide necessariamente con la corda del profilo. Si chiami incidenza del profilo l'angolo compreso fra la direzione della velocità U e la corda del profilo, positivo in senso orario. Si definisce poi portanza, e la indichiamo con ℓ , la componente della forza, in questo caso per unità di apertura, che la corrente esercita sul profilo in direzione normale alla velocità U .

Si chiama resistenza la componente della stessa forza, per unità di apertura, in direzione parallela alla velocità U e momento aerodinamico di beccheggio il momento delle forze esercitate dal fluido sul profilo nel piano del profilo stesso, rispetto a un polo posto a $1/4$ della corda a partire dal bordo d'attacco.

8.6.2 Scelta del profilo

Si è scelto di utilizzare i grafici relativi al profilo NACA 0012 motivati dal fatto che la specifica geometria dello stesso fosse molto simile alla lastra piana.

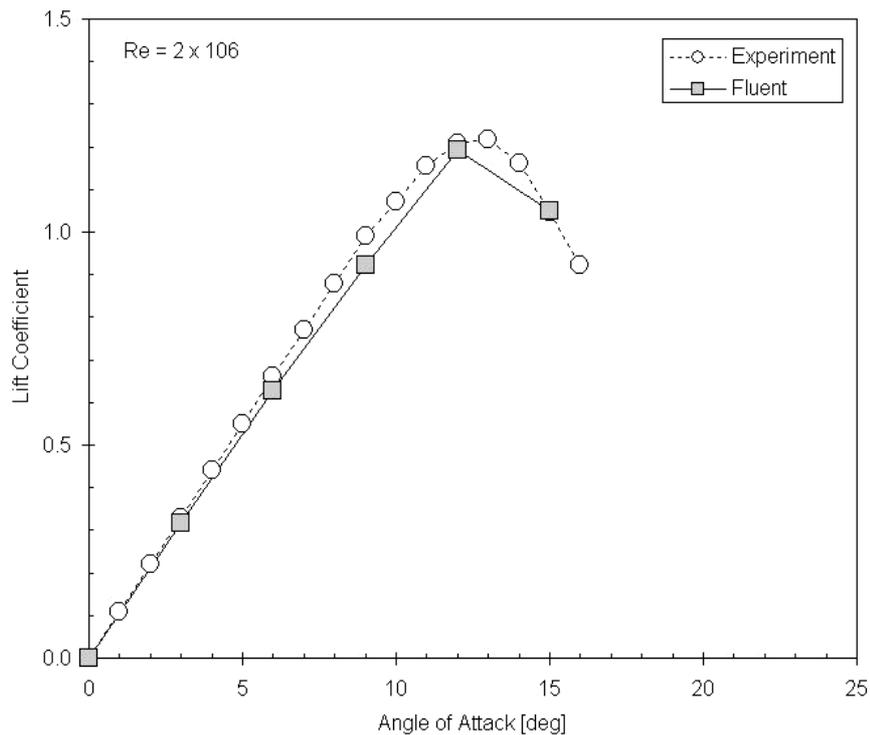


Figura 8.10 Curva di Lift

Questo profilo, come si vede in Figura 8.10, ha come valore massimo dell'angolo di apertura circa 12° .

L'utilizzo di un profilo simmetrico non è casuale, infatti la pala deve funzionare continuamente nell'arco di una rivoluzione completa, con un angolo di attacco che da positivo diventa negativo; la simmetria garantisce un ugual comportamento del profilo in una posizione θ e in quella corrispondente nella metà opposta ($2\theta - \theta$).

Ottenute le coordinate del dorso e del ventre palare è possibile convertirle in un file di testo in formato .txt. in questo modo si passa l'informazione al software di modellazione 3D, e con la funzione “inserisci curva” è possibile tracciare il profilo passante per i punti desiderati.

8.7 Simulazione con FluidSimulation

Per poter costruire la curva di coppia e potenza si è creato un modello semplificato della girante e fatto delle simulazioni per capire il comportamento turbina nelle condizioni prese in esame.

In primo luogo abbiamo calcolato il limite di Betz con la formula 8.7:

$$P_{Max} = \frac{16}{54} \cdot \rho \cdot S \cdot v_1^3 = 19317 W \quad (8.12)$$

Dove :

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3;$$

$$S = 2 \cdot \text{DiametroRotore} \cdot \text{LunghezzaPala} = 0.88 \text{ m}^2 ;$$

$$\text{LunghezzaPala} = 1 \text{ m.}$$

In seguito, presa in esame la configurazione a **2 pale**, ho fatto delle simulazioni per riuscire a vedere con quale angolo si riusciva ad ottenere la coppia massima.

Per avere un'idea di come andavano le cose inizialmente si è calcolata la coppia solo con l'omega di calcolo (circa 5 rad/s) (vedi Tabella 8.1)

$$\Omega_{Calcolo} = \frac{\Omega_{Fuga}}{2} = 4,77 \frac{rad}{s} \quad (8.13)$$

| Apertura pala: α [°] | C[Nm] |
|-----------------------------|-------|
| 3° | 50 |
| 6° | 1400 |
| 8° | 1890 |
| 12° | 3015 |

Tabella 8.1 Coppia con omega di calcolo

Dalla Tabella si vede l'andamento della coppia nelle varie aperture delle pale; partendo da esso l'efficienza si può calcolare rapportando la potenza ideale (senza considerare le perdite meccaniche) ottenuta con la potenza massima di Betz.

Di seguito si riportano le potenze calcolate alla velocità di calcolo e le relative efficienze (sempre ricordando che sono calcoli del tutto ideali).

$$P_{3^\circ} = C \cdot \text{OmegaCalcolo} = 238,5 \text{ W} \quad (8.16)$$

$$\text{Efficienza} = \frac{P_{3^\circ}}{P_{Max}} = 0,012 \quad (8.17)$$

$$P_{6^\circ} = C \cdot \text{OmegaCalcolo} = 6678 \text{ W} \quad (8.18)$$

$$\text{Efficienza} = \frac{P_{6^\circ}}{P_{Max}} = 0,34 \quad (8.19)$$

$$P_{8^\circ} = C \cdot \text{OmegaCalcolo} = 9015,3 \text{ W} \quad (8.20)$$

$$\text{Efficienza} = \frac{P_{8^\circ}}{P_{Max}} = 0,46 \quad (8.21)$$

$$P_{12^\circ} = C \cdot \text{OmegaCalcolo} = 14381,55 \text{ W} \quad (8.22)$$

$$\text{Efficienza} = \frac{P_{12^\circ}}{P_{Max}} = 0,74 \quad (8.23)$$

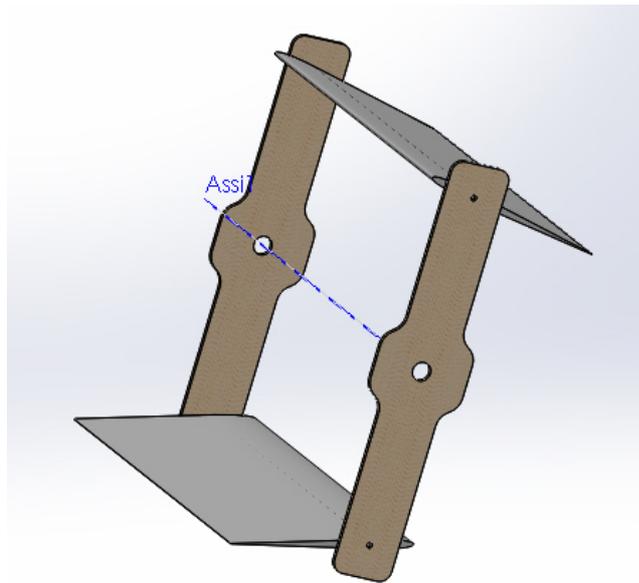


Figura 8.11 Modello utilizzato per le simulazioni

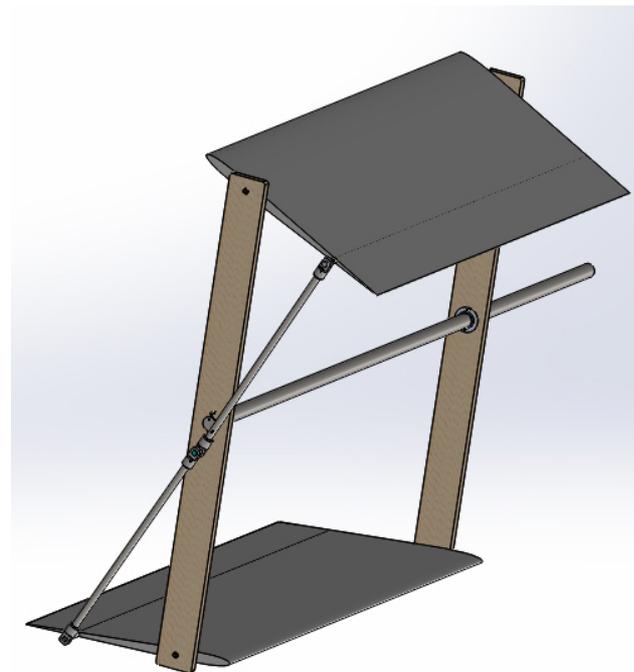


Figura 8.12 Assieme con pale NACA 0012

Di seguito sono mostrate le tabelle delle curve di coppia e di potenza dei casi presi in esame.

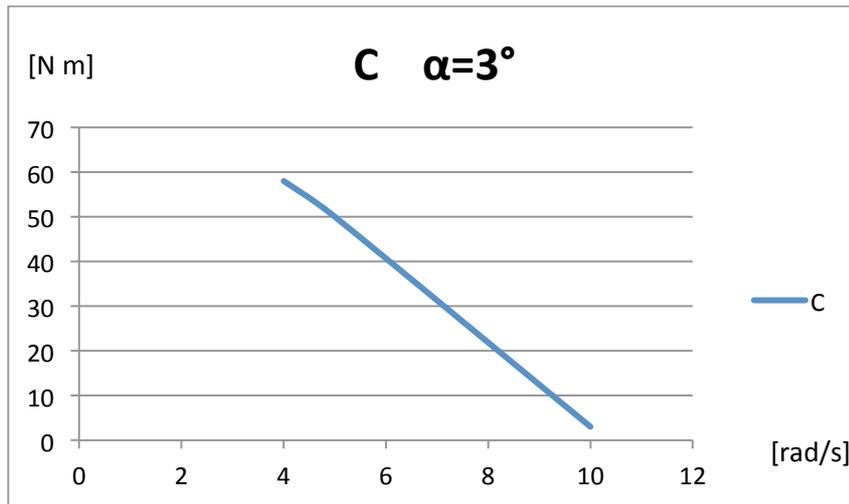


Tabella 8.2 Curva di Coppia con $\alpha=3^\circ$

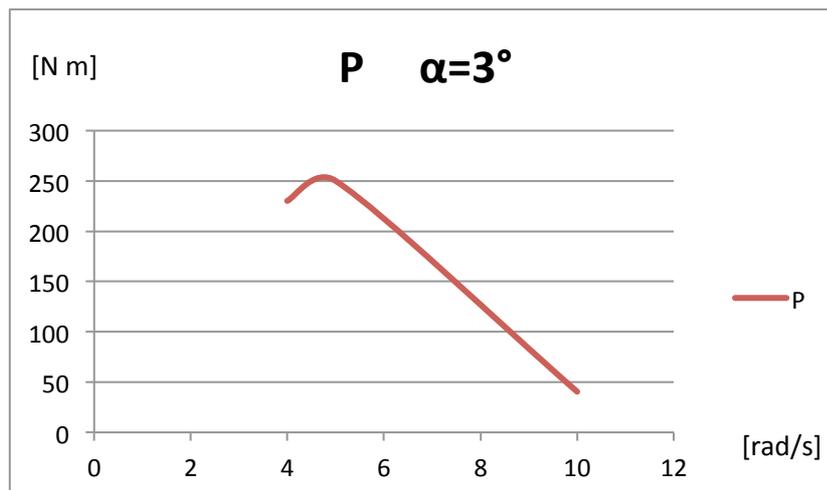


Tabella 8.3 Curva di Potenza con $\alpha=3^\circ$

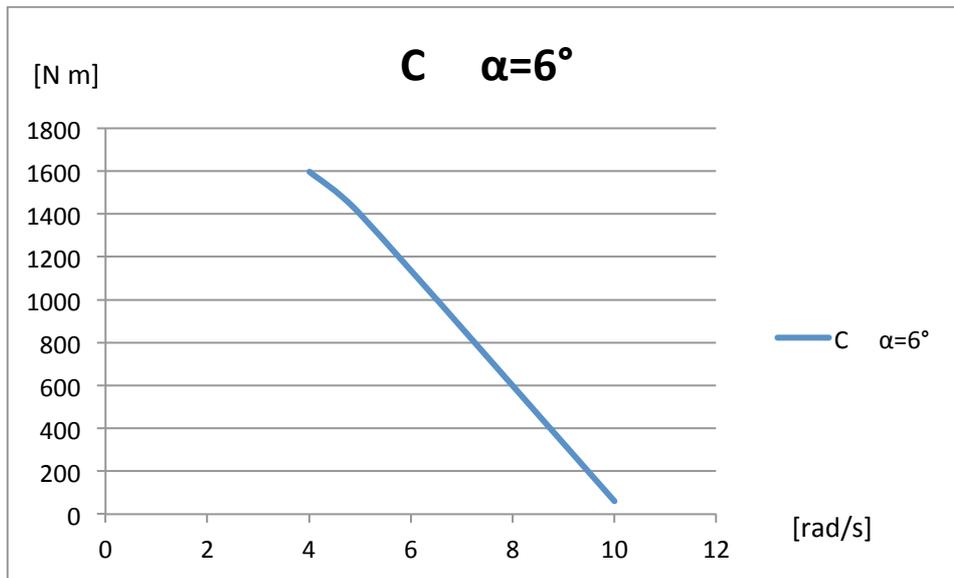


Tabella 8.4 Curva di Coppia con $\alpha=6^\circ$

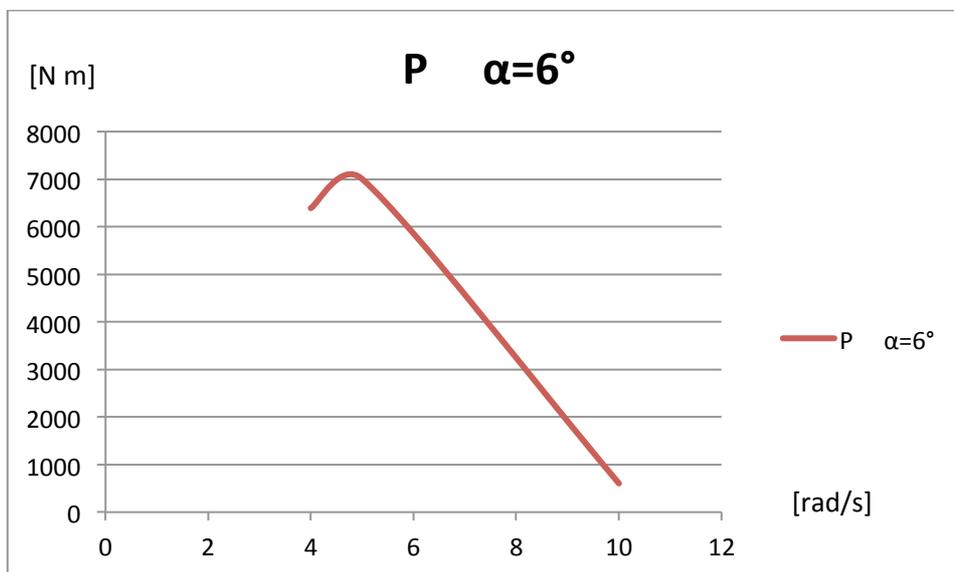


Tabella 8.5 Curva di Potenza con $\alpha=6^\circ$

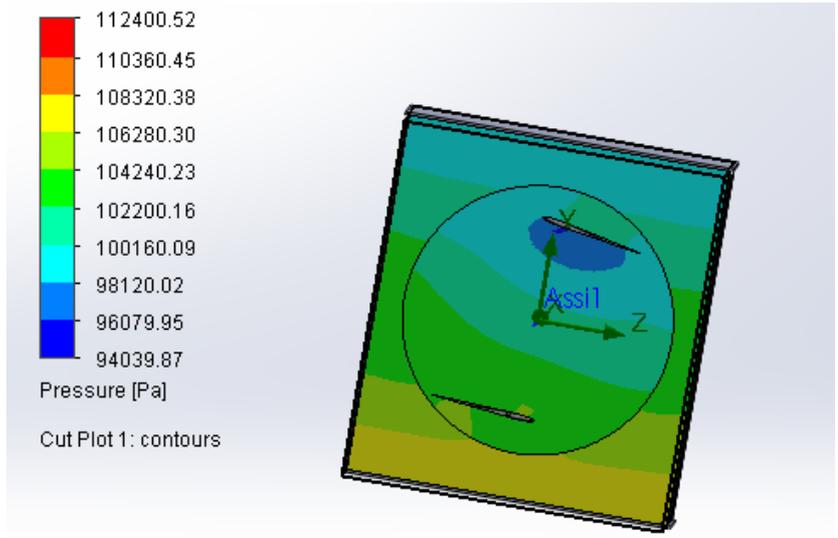


Figura 8.13 a) Andamento delle Pressioni con $\alpha = 6^\circ$

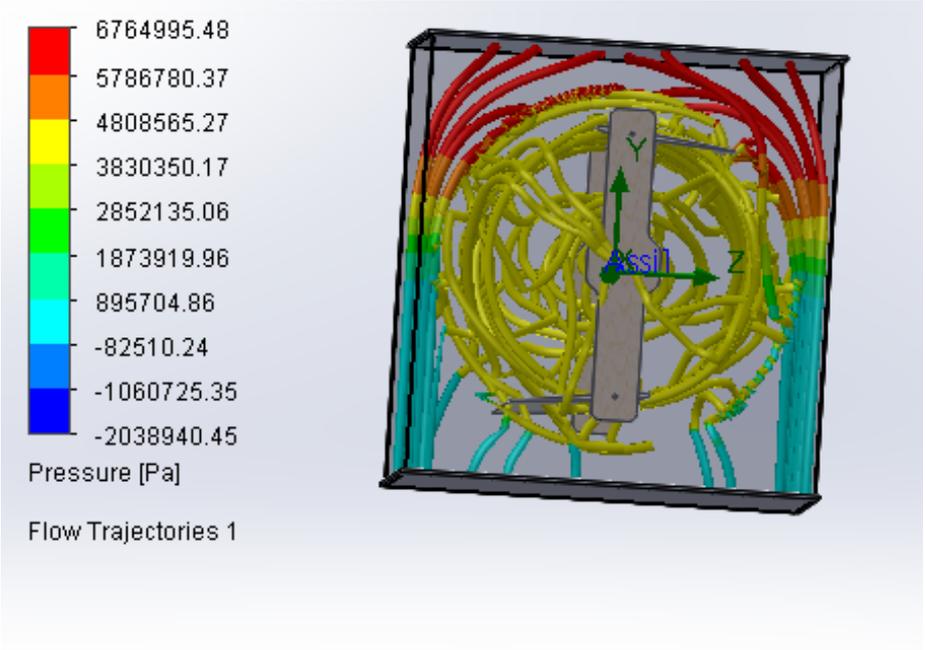


Figura 8.13 b) Andamento delle pressioni con $\alpha = 6^\circ$

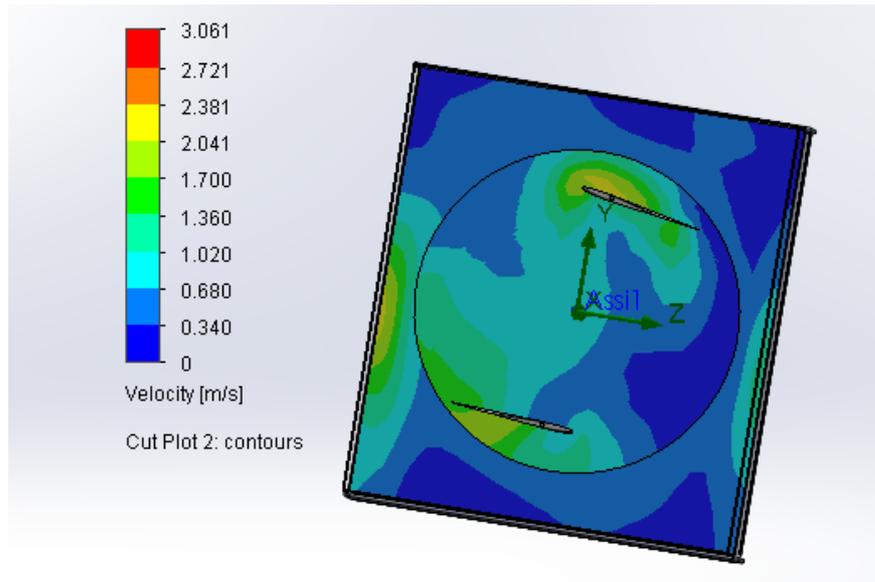


Figura 8.14 a) Andamento delle Velocità con $\alpha = 6^\circ$

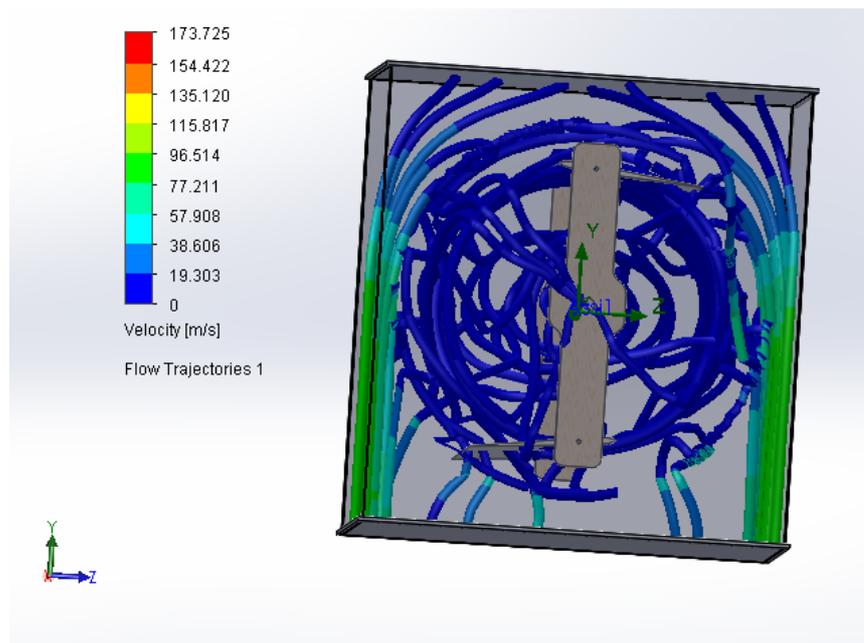


Figura 8.14 b) Andamento delle Velocità con $\alpha = 6^\circ$

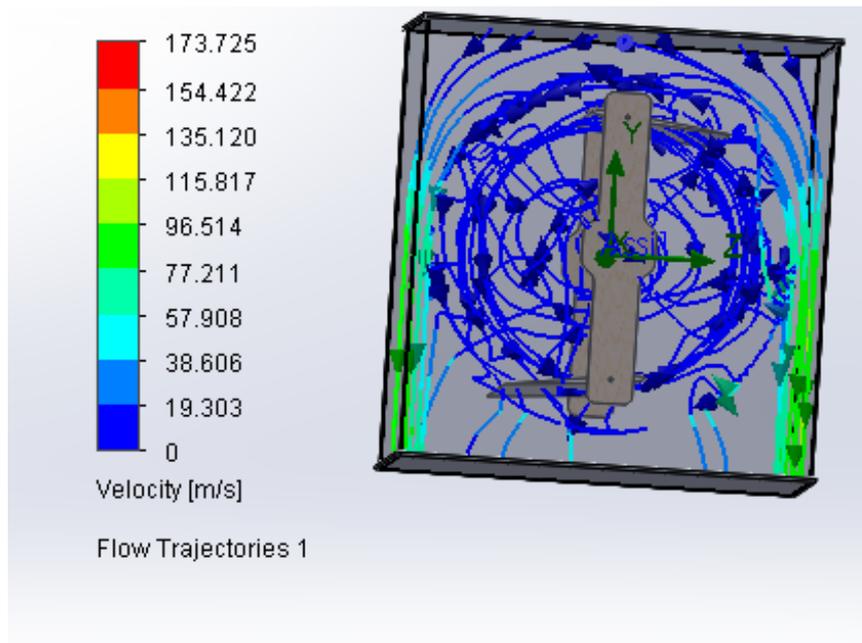


Figura 8.14 c) Andamento delle Velocità con $\alpha = 6^\circ$

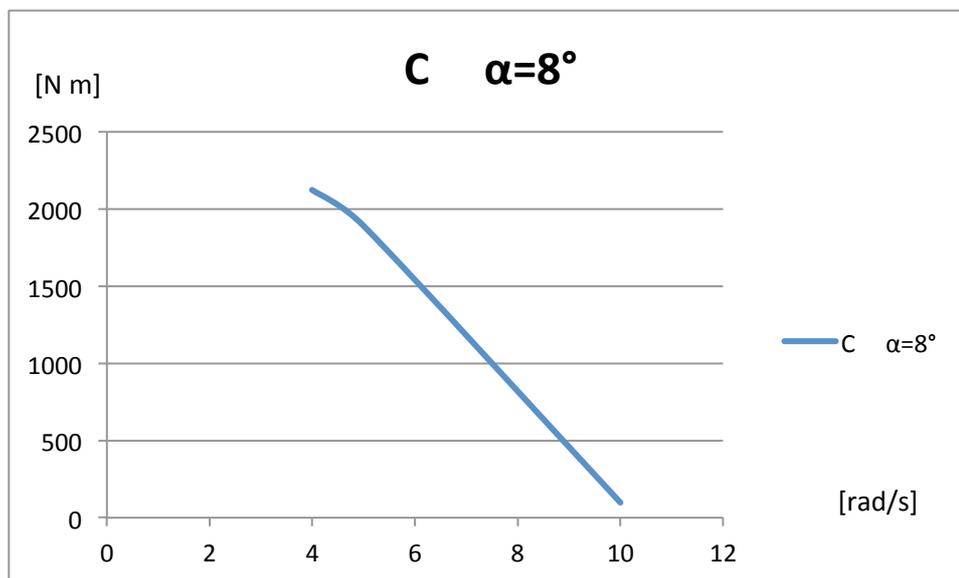


Tabella 8.6 Curva di Coppia con $\alpha=8^\circ$

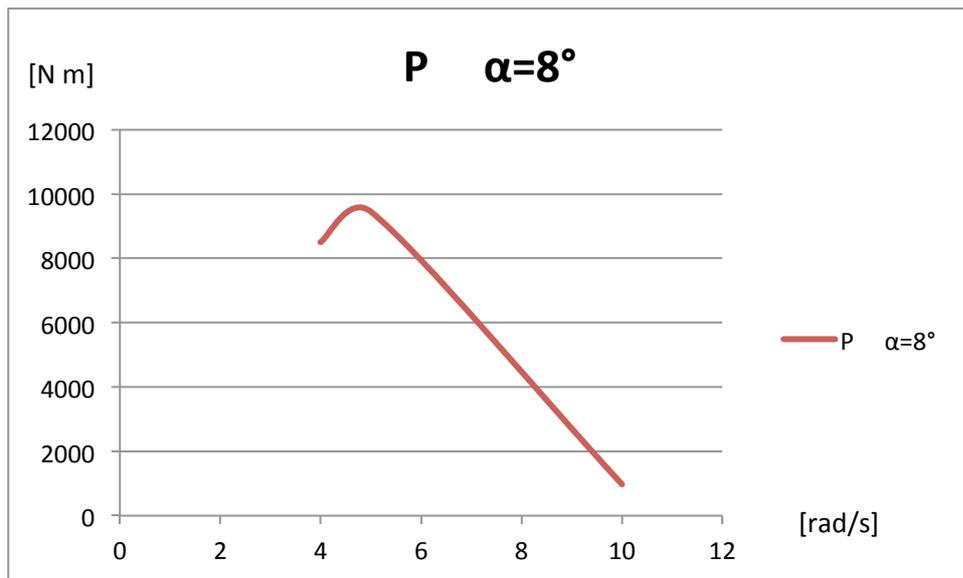


Tabella 8.7 Curva di Potenza con $\alpha=8^\circ$

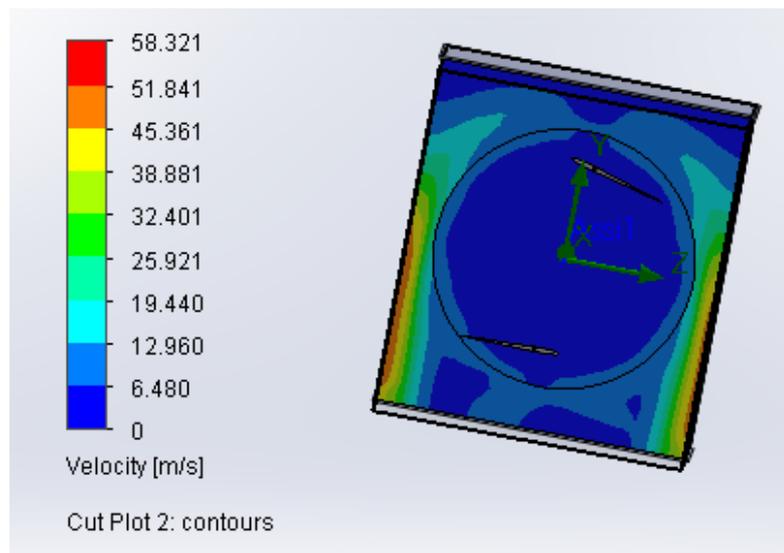


Figura 8.15 Andamento della velocità con $\alpha = 8^\circ$



Figura 8.16 Andamento delle Pressioni con $\alpha = 8^\circ$

Per concludere abbiamo fatto alcune prove con la configurazione a **4 pale** per vedere come si comportava la turbina.

Prendendo sempre come riferimento la OmegaCalcolo, ho calcolato la coppia prodotta.

| Apertura pala: $\alpha[^\circ]$ | C[Nm] |
|---------------------------------|-------|
| 3° | 95 |
| 6° | 2104 |
| 8° | 2980 |
| 12° | 3450 |

Tabella 8.8

$$P_{3^\circ} = C \cdot \text{OmegaCalcolo} = 453,15 \text{ W} \quad (8.24)$$

$$\text{Efficienza} = \frac{P_{3^\circ}}{P_{Max}} = 0,023 \quad (8.25)$$

$$P_{6^\circ} = C \cdot \text{OmegaCalcolo} = 10036,08 \text{ W} \quad (8.26)$$

$$\text{Efficienza} = \frac{P_{6^\circ}}{P_{Max}} = 0,52 \quad (8.27)$$

$$P_{8^\circ} = C \cdot \text{OmegaCalcolo} = 14214,6 \text{ W} \quad (8.28)$$

$$\text{Efficienza} = \frac{P_{8^\circ}}{P_{Max}} = 0,73 \quad (8.29)$$

$$P_{12^\circ} = C \cdot \text{OmegaCalcolo} = 16456,5 \text{ W} \quad (8.30)$$

$$\text{Efficienza} = \frac{P_{12^\circ}}{P_{Max}} = 0,85 \quad (8.31)$$

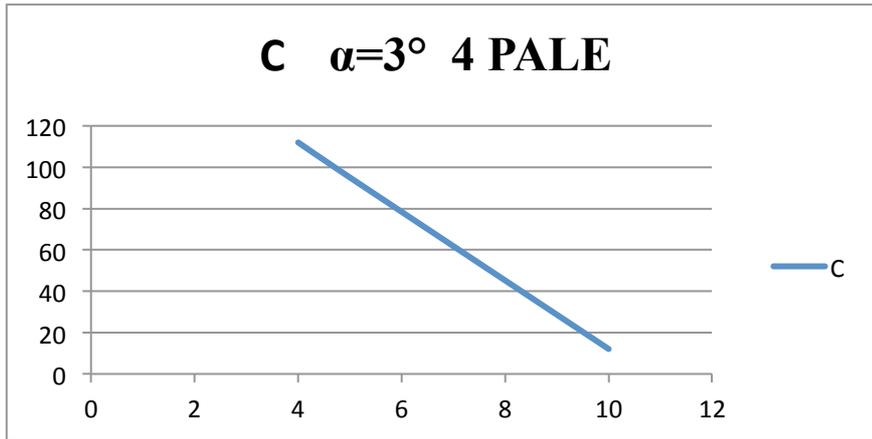


Tabella 8.9 Curva di Coppia con $\alpha=3^\circ$

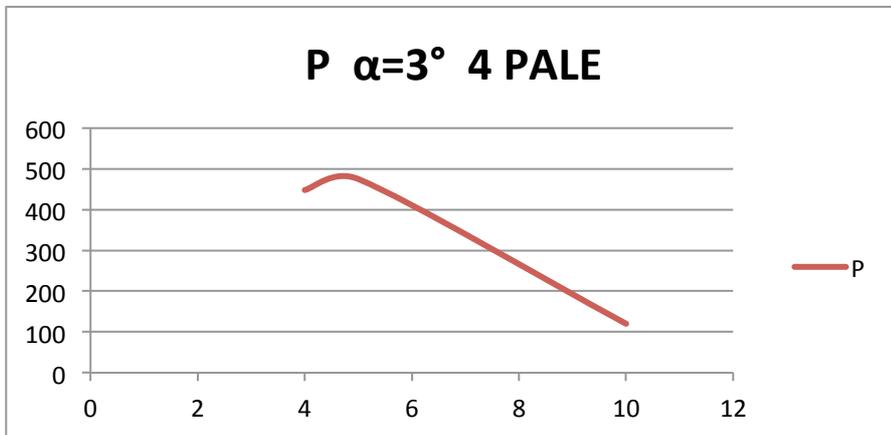


Tabella 8.10 Curva di Potenza con $\alpha=3^\circ$

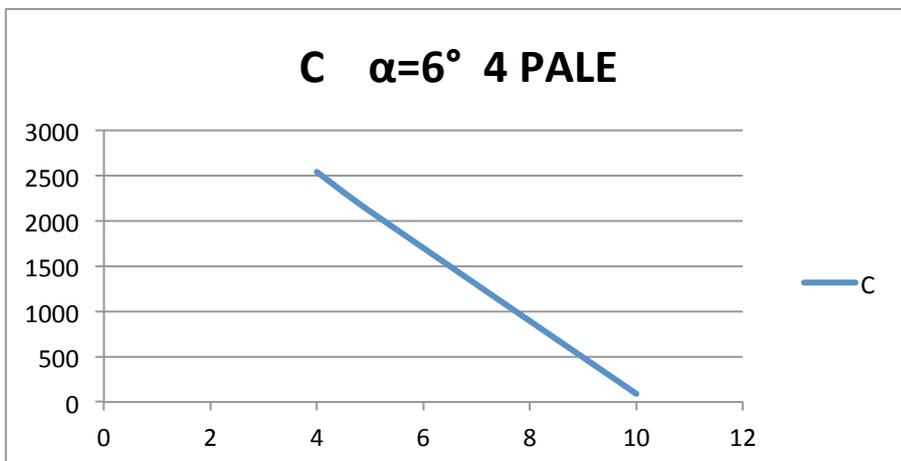


Tabella 8.11 Curva di Coppia con $\alpha=6^\circ$

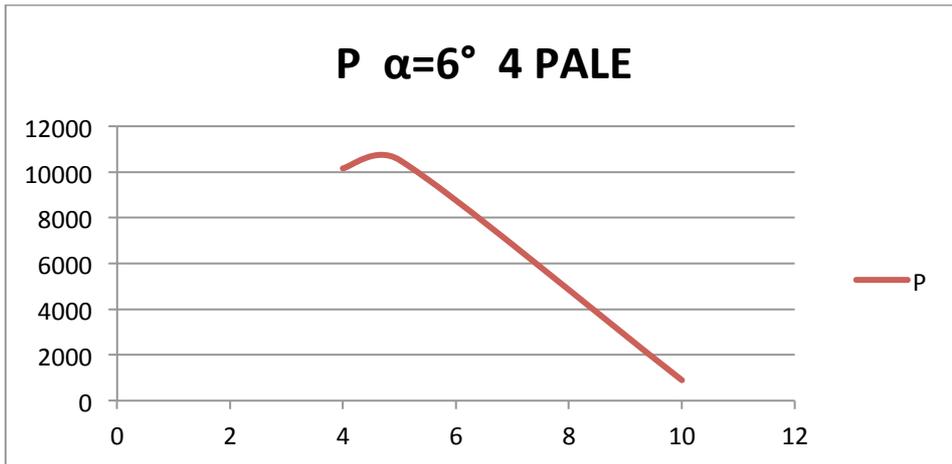


Tabella 8.12 Curva di Potenza con $\alpha=6^\circ$

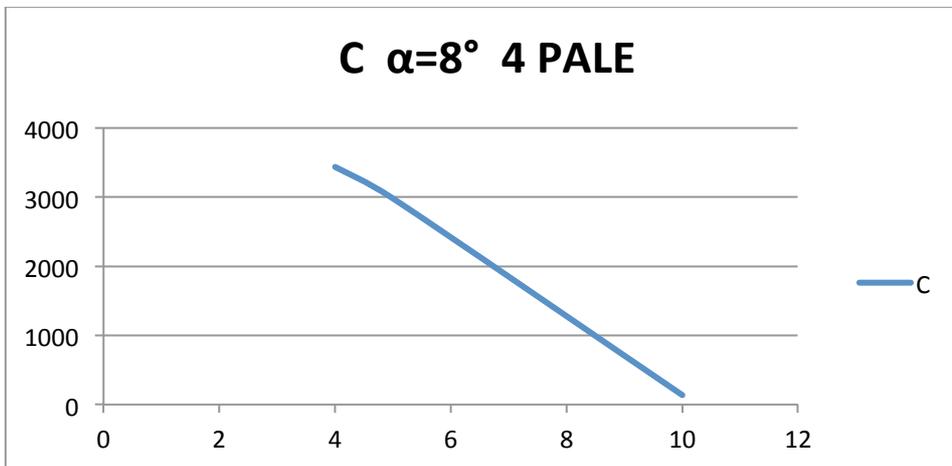


Tabella 8.13 Curva di Coppia con $\alpha=8^\circ$

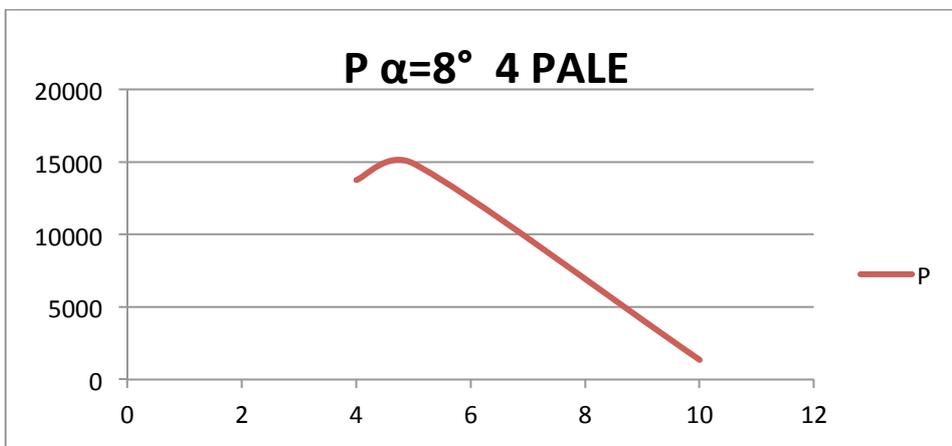


Tabella 8.14 Curva di Potenza con $\alpha=8^\circ$

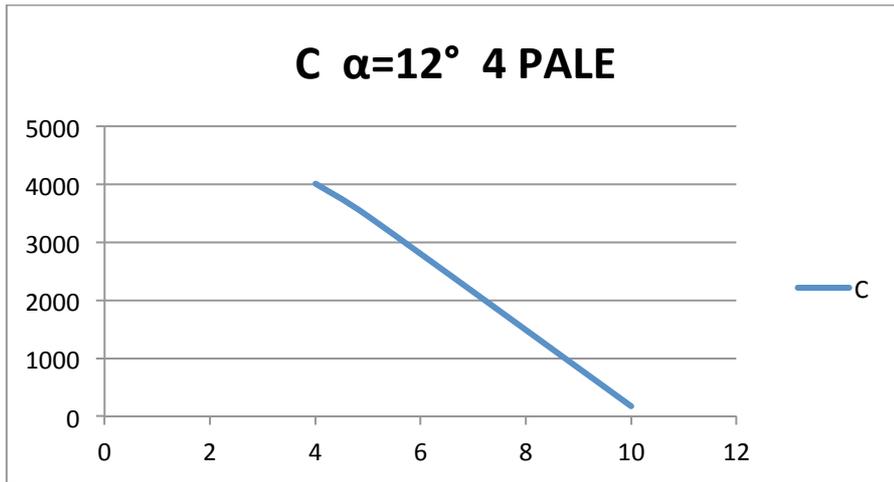


Tabella 8.15 Curva di Potenza con $\alpha=12^\circ$

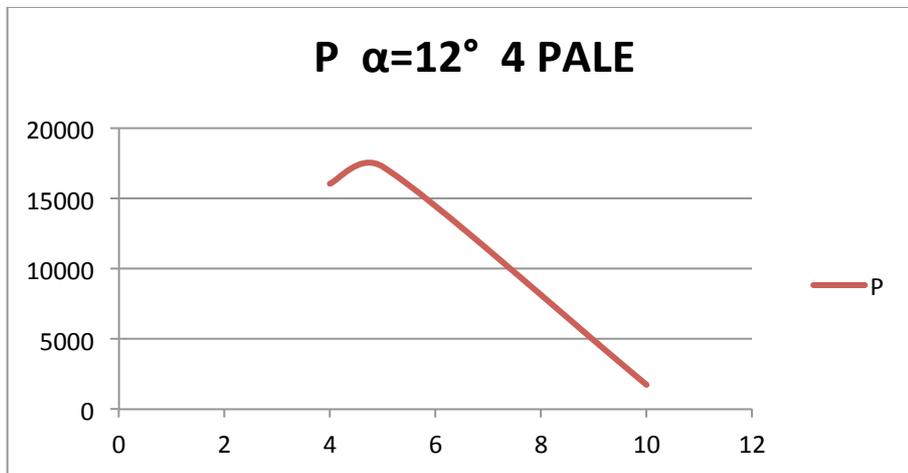


Tabella 8.16 Curva di Potenza con $\alpha=12^\circ$

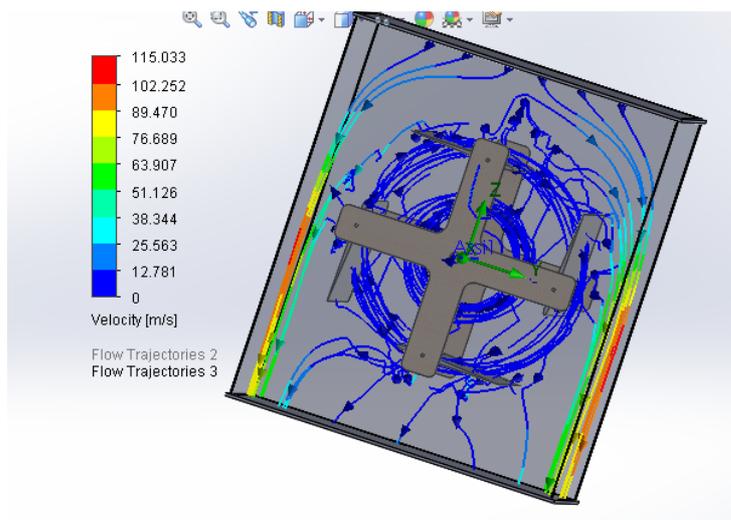


Figura 8.17 a) Traiettorie della velocità con $\alpha = 6^\circ$

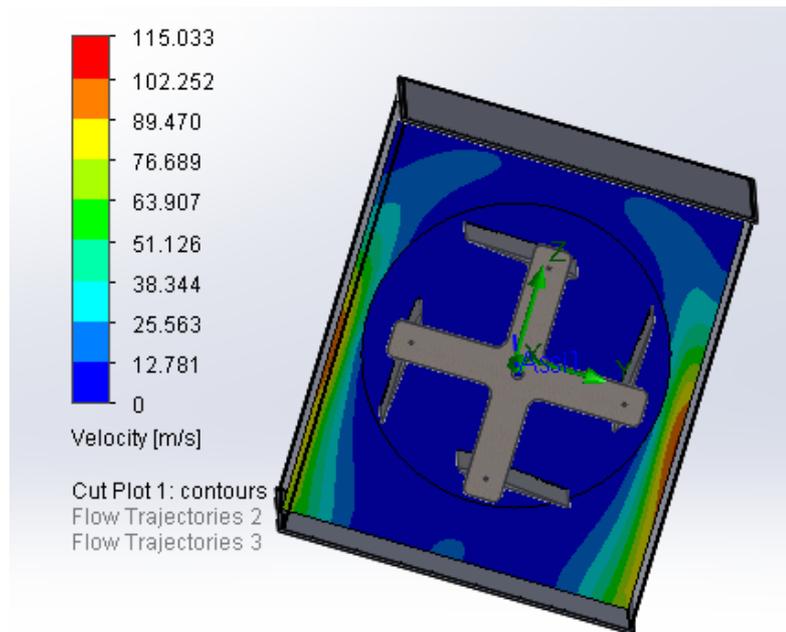


Figura 8.17 b) Andamento delle velocità con $\alpha = 6^\circ$

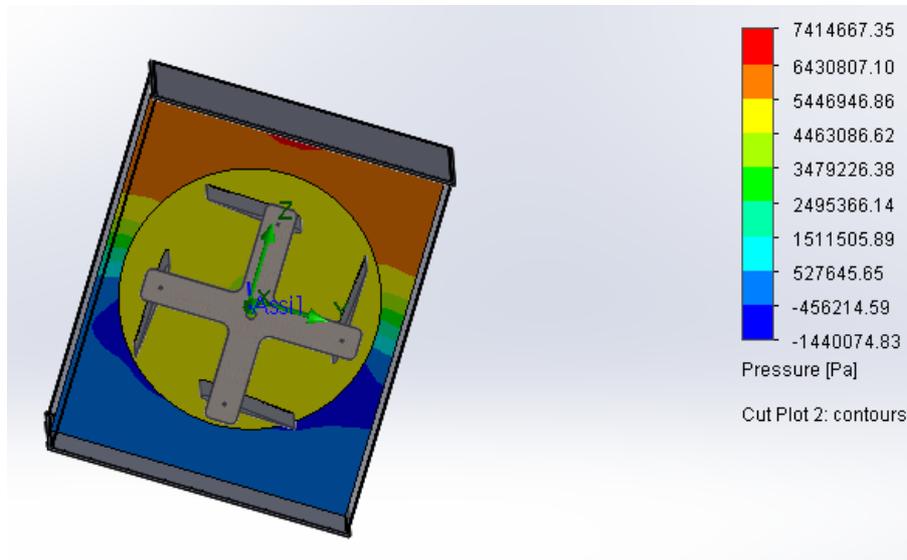


Figura 8.17 c) Andamento delle pressioni con $\alpha = 6^\circ$

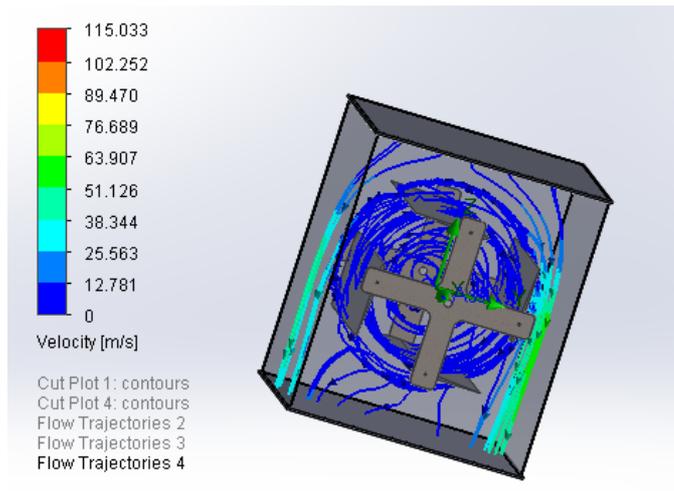


Figura 8.18 a) Traiettorie della velocità con $\alpha = 8^\circ$

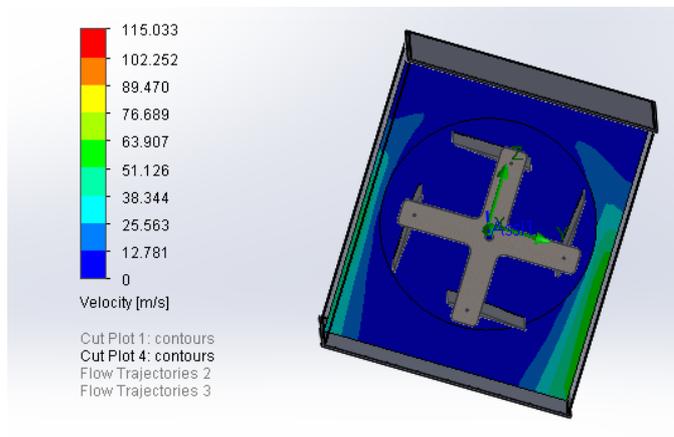


Figura 8.18 b) Andamento delle velocità con $\alpha = 8^\circ$

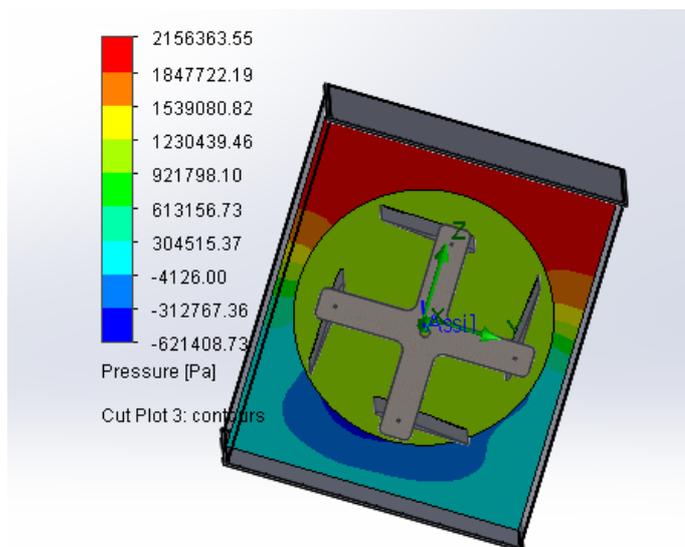


Figura 8.18 c) Andamento delle pressioni con $\alpha = 8^\circ$

8.8 Configurazioni

8.8.1. Tiranti

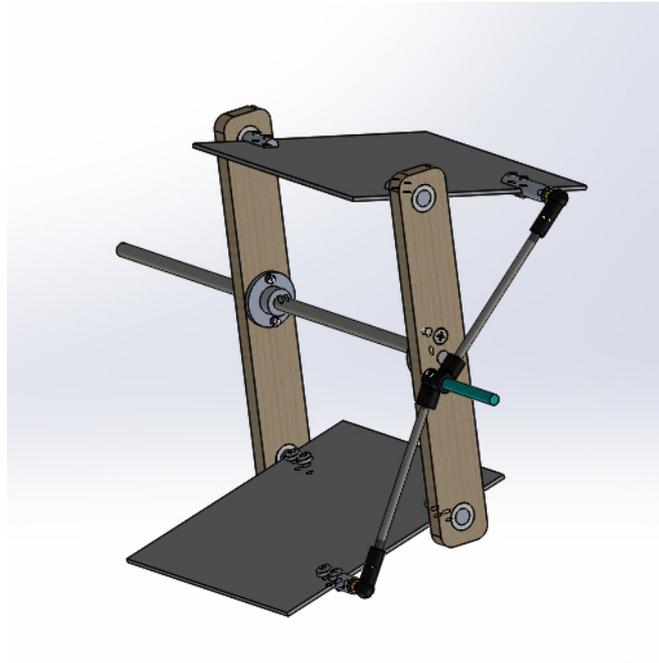


Figura 8.19 Configurazione a tiranti

La prima configurazione che è stata sviluppata presenta come sistema di controllo dell'angolo di incidenza l'utilizzo di tiranti collegati tramite un perno eccentrico rispetto all'asse di rotazione dei rotori. Se l'eccentricità è nulla (figura 8.20), le pale risultano con angolo di attacco pari a zero compiendo una rotazione circolare attorno all'asse di rotazione. Spostando il perno (figura 8.21), si crea una eccentricità tra l'asse di rotazione delle pale e l'asse di rotazione dei rotori. Si genera quindi un angolo di attacco con valore massimo e minimo uguale in valore assoluto ma di segno opposto.

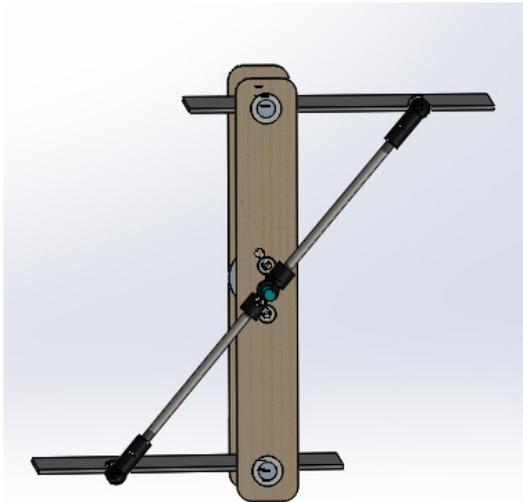


Figura 8.20 Eccentricità nulla



Figura 8.21 Eccentricità presente

8.8.2. A doppio appoggio con cuscinetto

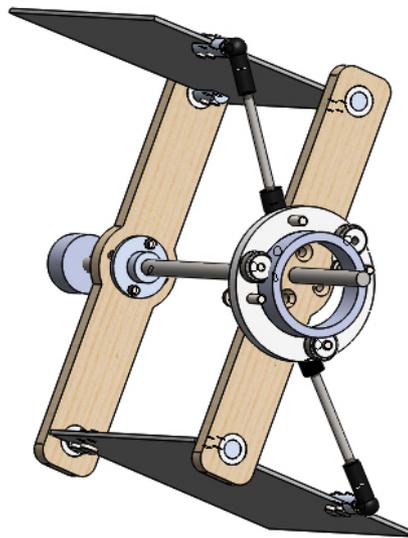


Figura 8.22 a) Configurazione a doppio appoggio

La seconda configurazione sviluppata riprende il concetto studiato nella prima ma consente l'uscita dell'albero di potenza da entrambe le parti. In questo modo è possibile passare da una configurazione di *trave a sbalzo* ad una configurazione a *trave su doppio appoggio*.

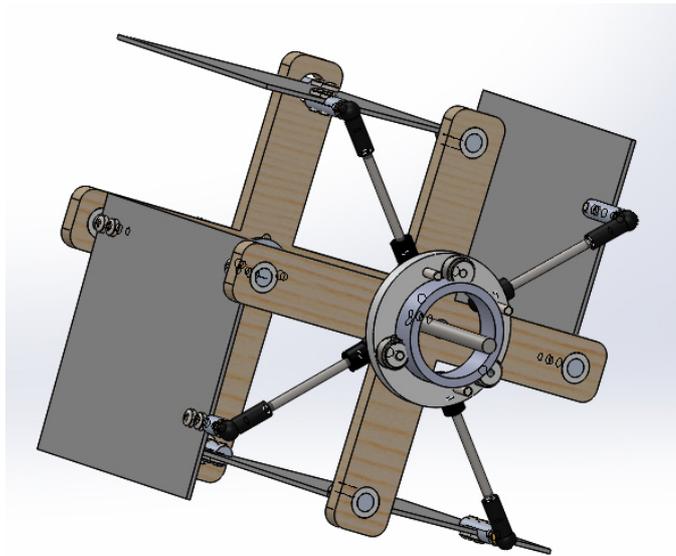


Figura 8.22 b) Configurazione a doppio appoggio a 4 pale

Questo determina una notevole diminuzione delle vibrazioni a vantaggio di una maggior fluidità di rotazione del sistema.

L'eccentricità, a differenza della prima versione, è riferita a un supporto circolare (cuscinetto). Questa versione è stata applicata anche al 4 pale in quanto, entrando in gioco forze maggiori, era necessario utilizzare una soluzione più robusta rispetto alla configurazione a sbalzo.

Il principio di funzionamento è il medesimo della prima soluzione studiata con la differenza che il supporto circolare ruota trascinato dalle pale.

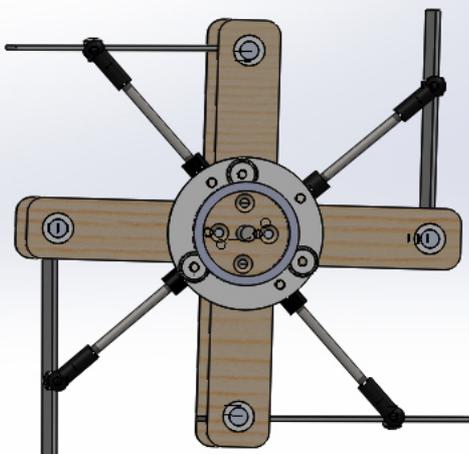


Figura 8.23 Eccentricità nulla

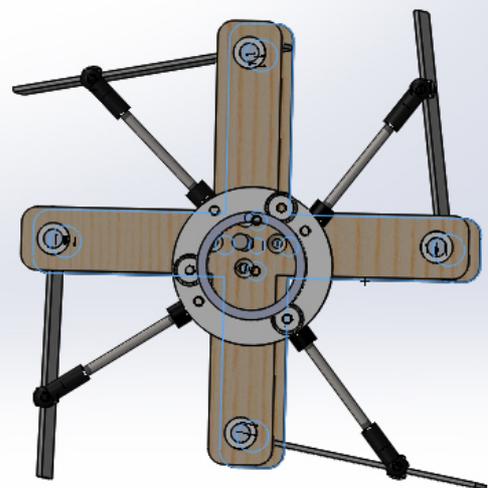


Figura 8.24 Eccentricità presente

Conclusioni

Questo lavoro di tesi tratta di impianti micro-idroelettrici, in grado di generare potenza a partire da flussi d'acqua contenenti piccoli stramazzi e non, senza dover stravolgere in maniera importante l'ambiente e il luogo di installazione. L'obiettivo principale è stato lo studio di un sistema innovativo che potesse dare dei buoni risultati e che fosse di facile costruzione. Nelle varie simulazioni la turbina finale dava dei buoni risultati in un campo ideale; sicuramente per avere dati più accurati servirà fare dei prototipi e delle simulazioni con dati reali in modo tale da riuscire a ricavare i rendimenti effettivi di tale macchina. Nel caso reale avremo una non uniformità del flusso dell'acqua che sarà da tenere in considerazione nelle prove sperimentali.

La diffusione di impianti di questo tipo porterebbe a un maggior sfruttamento della rete idrica del paese e dell'energia posseduta dall'acqua dei fiumi che, specialmente in Italia, è presente in grande quantità.

In più, questo tipo di impianto ha un impatto ambientale davvero limitato e ad emissione zero; le uniche parti che lo compongono sono la turbina, il generatore, i cavi elettrici e la carcassa eventualmente munita di acceleratore di flusso.

Se impianti come questo fossero diffusi a livello nazionale aumenterebbero la quantità di energia prodotta da fonti rinnovabili; facendo ciò potremmo avvicinarci agli obiettivi imposti dall'Europa per il 2020: soddisfare il 20% del fabbisogno energetico europeo tramite l'utilizzo di energie rinnovabili.

In conclusione, si potrebbe investire sul micro-idroelettrico in tutti i casi in cui vi è un fabbisogno energetico e una disponibilità di portata d'acqua presente in un fiume o ruscello.

Bibliografia e sitografia:

- G. Manfè , R. Pozza , G. Scarato , Disegno Meccanico – Corso completo in tre volumi – Vol. 1-2-3 , Principato Editore;
- Giorgio Minelli , Macchine idrauliche , Pitagora Editrice Bologna;
- Marco Gentilini , Impianti meccanici , Pitagora Editrice Bologna;
- Renato Giovannozzi , Costruzione di macchine vol. 2 , Pàtron Editore;
- Dario Croccolo, Nicolò Vincenzi , Lezioni di fondamenti e tecnica della progettazione meccanica, Esculapio editrice;
- Gino Morandi, Macchine ed apparecchiature a vapore e frigorifere, Pitagora Editore;
- Manuale Cremonese di Meccanica – Parte Specialistica – Vol. IV, Edizioni Cremonese;
- Luciano Paoli, Giorgio Rodolfi, Costruzione di una turbina Michell-Banki, Il Rostro Editrice;
- Fabio Andreolli, Impianti micro-Idroelettrici,Dario Flaccovio Editore.

Siti web visitati:

-Europa 2020-20: http://ec.europa.eu/europe2020/europe-2020-in-a-nutshell/targets/index_it.htm

-Turbine : <http://www-3.unipv.it/webidra/materialeDidattico/sala/012.pdf>

-Aerodinamica delle lastre sottili: <http://www.baronerosso.it/modellismo-articoli/show/546/aerodinamica-delle-lastre-sottili.html>

-JAMES A., WEIBERG and ROBERT E., DANNENBERG. Section characteristics of an NACA 0006 airfoil with area suction near the leading edge. 1954

:<http://naca.central.cranfield.ac.uk/reports/1954/naca-tn-3285.pdf>

