



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica

TESI DI LAUREA

Studio e analisi delle problematiche su una turbina Kaplan a basso salto mediante CFD

Relatore

Prof. Giorgio Pavesi

Laureanda

Sara Borghini

Matricola: 2027555

Anno Accademico 2022/2023

Indice

1	Introduzione agli impianti idroelettrici	7
1.0.1	Come funziona	10
1.0.2	Tipologie	11
1.0.3	Configurazione del sito	12
1.0.4	Turbine idrauliche	14
1.0.5	Potenza della turbina	17
1.0.6	Rendimento della turbina	18
1.0.7	Coppia della turbina	19
1.0.8	Energia della turbina	20
1.0.9	Regolazione della turbina	21
1.0.10	Cavitazione	22
1.1	Tipologie di turbine idroelettriche	22
1.1.1	Turbina Pelton	22
1.1.2	Turbina Turgo	23
1.1.3	Turbina cross-flow	24
1.1.4	Turbina Francis	25
1.1.5	Turbina Kaplan	27
2	Configurazione dell'impianto	31
2.0.1	Componenti dell'impianto	34
3	Analisi CFD dell'impianto	41
3.0.1	Dati di progetto	42

3.1	Analisi computazionale fluidodinamica	42
3.2	Costruzione della mesh	47
3.2.1	Fiume	48
3.2.2	Opera di presa	50
3.2.3	Solido poroso	51
3.2.4	Diffusore	53
3.2.5	Scarico	54
3.3	Mesh schiere palari	55
3.3.1	Pre-distributore	56
3.3.2	Distributore	58
3.3.3	Girante	60
3.4	CFX-Pre 14.5	62
3.4.1	Creazione dei domini	63
3.4.2	Condizioni a contorno	65
3.4.3	L'inserimento delle Expressions	70
3.4.4	Output Control	71
3.4.5	Condizioni di convergenza	74
4	Risultati	77
4.1	Simulazione CFD Semplificata	78
4.1.1	Visualizzazione dei risultati	80
4.1.2	Velocità all'ingresso del solido poroso	83
4.1.3	Velocità in uscita dal solido poroso	85
4.1.4	Velocità all'ingresso dello scarico	86
4.1.5	Andamento della pressione	89
4.2	Simulazione CFD Complessa	91
4.2.1	Conclusione	94

Sommario

La seguente tesi prevede la ricerca bibliografica e l'analisi delle criticità delle turbine Kaplan introdotte su bassi e bassissimi salti ($< 3m$). Questa tipologia di turbine risente in maniera particolare di perdite di potenza e rendimento dovute alla configurazione del layout civile ed alle perdite di pressione localizzate che, percentualmente, diventano significative su questi campi di applicazione. Una cattiva progettazione delle prese della turbina a bassa prevalenza può portare a un flusso non uniforme in ingresso all'ingresso della macchina. Nella maggior parte dei casi, i test di accettazione della turbina vengono eseguiti con condizioni di aspirazione ideali senza considerare le effettive condizioni di flusso a monte. Questa situazione può comportare un comportamento diverso tra il modello e il prototipo, quindi è consigliabile modellare il flusso in avvicinamento alla sezione di ingresso. Il lavoro verrà tarato su un impianto esistente che ha evidenziato le problematiche sopra descritte. In concomitanza all'azienda, Zeco situata a Fara Vicentino (VI), che produce diversi tipi di turbine per centrali idroelettriche, è stata analizzata una turbina Kaplan a bordo del fiume Lambro in Lombardia. Si è concluso che il processo di progettazione e ottimizzazione mediante la modellazione numerica CFX di una presa di una centrale idroelettrica a bassa prevalenza è risultato essere uno strumento molto utile perché consente al progettista di testare rapidamente la propria proposta, oggettivamente e con un grado di sensibilità sufficiente a rilevare i cambiamenti su ogni progetto proposto.

Capitolo 1

Introduzione agli impianti idroelettrici



Figura 1.1: Esempio di impianto idroelettrico ([2]).

L'energia idroelettrica ha una lunga tradizione in Italia ed è considerata una fonte di energia rinnovabile. Alla fine del 2018, sono stati registrati 4.331 impianti idroelettrici in base ai dati del Gestore dei servizi energetici (GSE) e 4.337 secondo Terna. Nel 2019, sono stati aggiunti 64 nuovi impianti, portando il totale a 4.401. In base ai

dati del GSE del 2018, l'Italia ha una potenza installata totale di 18,94 gigawatt per l'energia idroelettrica, che rappresenta circa il 35% della potenza nazionale da fonti green. Nel 2008, la potenza installata era di 17,6 gigawatt, con un incremento medio annuo di poco più di 0,1 gigawatt. Nel 2019, l'incremento della potenza installata è stato di soli 0,04 gigawatt, leggermente al di sotto della media.

A fine 2018, la produzione annua di energia idroelettrica ha raggiunto i 48,8 terawattora, corrispondenti a poco più del 15% del fabbisogno energetico nazionale e al 43% della produzione da fonti rinnovabili. Interessante è il fatto che i 308 impianti di grandi dimensioni in Italia (con potenza superiore a 10 megawatt) producono il 75% dell'energia totale, mentre i più di 3.000 impianti di piccole dimensioni (con potenza inferiore al megawatt) contribuiscono meno dell'6%.

Nonostante l'aumento del numero di impianti, la potenza generata non ha registrato un incremento proporzionale, poiché la taglia media degli impianti è diminuita nel tempo. La crescita media annuale della potenza totale è stata dello 0,7%. L'installazione di impianti di piccole dimensioni, noti come mini-idroelettrici, è iniziata negli anni 2000, riducendo la taglia media complessiva degli impianti da 8,4 megawatt all'inizio del secolo a circa 4,4 megawatt nel 2018. La potenza media dei nuovi impianti installati è stata molto bassa, con 1,2 megawatt nel 2018 e addirittura 0,3 megawatt nel 2010 e nel 2014. Mentre l'idroelettrico convenzionale ha problemi ambientali e sociali legati all'allagamento di vaste aree, i piccoli impianti idroelettrici ben progettati si integrano facilmente negli ecosistemi locali.

L'energia idroelettrica rappresenta il 13% dell'elettricità totale generata nell'Unione Europea, riducendo le emissioni di CO_2 di oltre 67 milioni di tonnellate all'anno. L'Italia ha una potenzialità idroelettrica annua di circa 65 TWh, con una presenza significativa di impianti idroelettrici soprattutto nel nord del paese, come vediamo in Figura 1.2. Tuttavia, è importante sottolineare che l'idroelettrico è diffuso anche in altre parti del paese, seppur in misura inferiore rispetto al nord. Le grandi centrali hanno quasi sfruttato tutti i siti convenienti, ma rimane un potenziale di circa 15 TWh per i piccoli impianti. Le grandi centrali possono causare impatti negativi negli ecosistemi, ma la definizione di "piccolo" e "grande" idroelettrico, varia tra i paesi

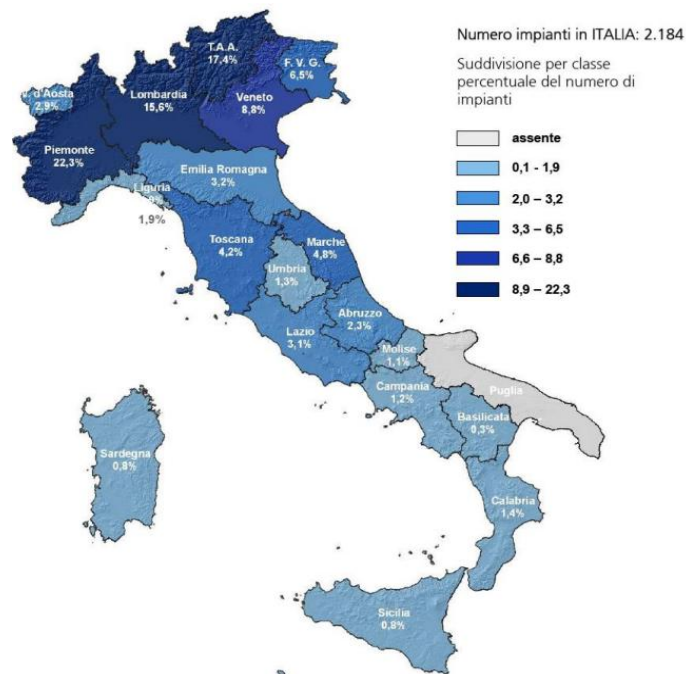


Figura 1.2: Distribuzione degli impianti idroelettrici in Italia ([4]).

membri dell'UE. Alcuni paesi hanno fissato il limite tra piccoli e grandi impianti a potenze installate di 10 MW (Portogallo, Spagna, Irlanda, Grecia e Belgio), 3 MW in Italia, 8 MW in Francia e 5 MW nel Regno Unito.

Gli impianti micro-hydro rappresentano quindi una forma di energia pregiata, perché con un bassissimo impatto ambientale, sfruttano una fonte energetica rinnovabile, che altrimenti andrebbe dispersa. In rapida sintesi, pertanto i **vantaggi** del mini Hydro sono:

- **Elevata efficienza:** i mini impianti idroelettrici possono raggiungere un'efficienza che si situa tra il 70 e il 90%, un valore significativamente superiore rispetto ad altre tecnologie energetiche.
- **Elevato fattore di carico:** i mini impianti idroelettrici presentano un fattore di carico elevato, di solito superiore al $> 50\%$, a differenza dell'energia solare che ha un fattore di carico intorno al 10% e l'eolico che si attesta intorno al 30%.

- Prevedibilità della potenza erogabile: l'energia idroelettrica offre un alto grado di prevedibilità nella produzione di potenza, con variazioni lente su base stagionale anziché giornaliera.
- Correlazione tra domanda e offerta: i mini impianti idroelettrici mostrano una buona correlazione tra domanda e offerta, con una produzione massima durante il periodo invernale.
- Tecnologia consolidata e durevole: i sistemi di mini idroelettrico sono basati su una tecnologia consolidata che può durare oltre 50 anni, senza deperire nel tempo.
- Minimo impatto ecologico: grazie alla sua bassa intrusività, l'energia idroelettrica a scala ridotta ha un impatto ecologico minimo sull'ambiente circostante.

In conclusione, i mini impianti idroelettrici offrono numerosi vantaggi, tra cui un'elevata efficienza, un elevato fattore di carico, una produzione prevedibile e una tecnologia consolidata, il tutto con un minimo impatto sull'ambiente.

1.0.1 Come funziona

In generale, il funzionamento di un impianto idroelettrico prevede diverse fasi. Innanzitutto, viene realizzata un'opera di sbarramento come una diga o una traversa, che intercetta il corso d'acqua e crea un invaso, come un serbatoio o un bacino idroelettrico. Attraverso canali e gallerie di derivazione, l'acqua viene convogliata in vasche di carico e successivamente indirizzata verso le turbine idroelettriche tramite condotte forzate. Durante questo processo, vengono utilizzate valvole di immissione per garantire la sicurezza e distributori per regolare il flusso dell'acqua in base alla domanda di energia.

Le turbine vengono messe in movimento dall'acqua, generando energia meccanica, mentre l'acqua stessa fuoriesce dall'impianto attraverso un canale di scarico che la restituisce al corso d'acqua. Il generatore elettrico rotante, chiamato alternatore, è

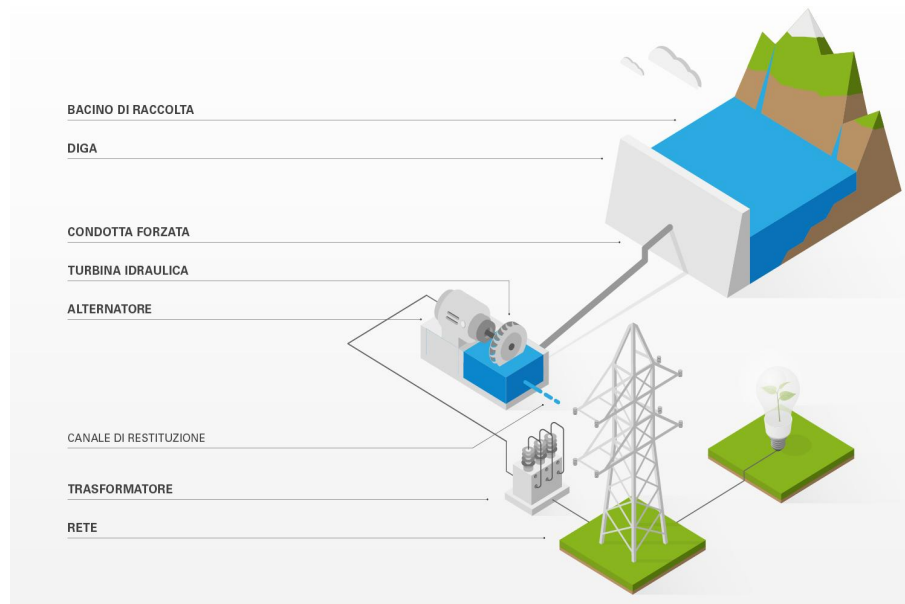


Figura 1.3: Configurazione impianto idroelettrico ([2]).

collegato direttamente alle turbine e converte l'energia meccanica ricevuta in energia elettrica. Questa energia elettrica deve essere adattata per la trasmissione a lunga distanza, quindi passa attraverso un trasformatore che riduce l'intensità della corrente prodotta dall'alternatore, ma aumenta la tensione.

Una volta che l'energia elettrica arriva al punto di utilizzo, attraversa un altro trasformatore che aumenta l'intensità della corrente e abbassa la tensione, rendendola adatta per gli utilizzi industriali, commerciali o domestici. In questo modo, l'energia idroelettrica prodotta dall'impianto viene trasformata e adattata in modo da essere utilizzata in vari contesti.

1.0.2 Tipologie

Le centrali idroelettriche si dividono in tre macro categorie, a seconda della tipologia di impianto utilizzato: *centrali ad acqua fluente*, *centrali a bacino* e *centrali ad accumulazione*.

Nelle centrali ad acqua fluente viene utilizzata la portata naturale di un corso d'acqua, situato su due livelli differenti. L'acqua viene convogliata attraverso un canale di derivazione senza l'ausilio di condotte forzate e raggiunge le turbine. La potenza della centrale dipende principalmente, quindi, dalla velocità dell'acqua nel passaggio da un livello all'altro, il cosiddetto salto, e dalla portata del corso d'acqua.

Nelle centrali a bacino viene invece utilizzato un serbatoio a monte, il bacino di carico, che può essere naturale - come nel caso di un lago - o realizzato tramite la creazione di una diga. L'acqua viene convogliata da condotte forzate dalla diga verso le turbine idrauliche, che ruotando generano energia meccanica, convertita poi in energia elettrica dal generatore elettrico rotante.

A valle è situato un bacino di calma, dove le acque turbolente che hanno appena attraversato le turbine vengono fatte placare, prima di essere reimmesse nel normale flusso del corso d'acqua. L'esistenza del bacino di monte, a differenza dei sistemi ad acqua fluente, permette di avere controllo sui flussi d'acqua e quindi sulla relativa produzione elettrica rinnovabile.

Le centrali ad accumulazione prevedono due serbatoi a quote differenti, uno a monte e uno a valle, il secondo dei quali funge da riserva energetica. Durante le ore o i momenti di minore richiesta energetica, l'acqua viene fatta risalire dal bacino a valle al bacino di monte tramite una stazione di pompaggio, permettendo così di far fronte in sicurezza ai momenti di maggiore richiesta energetica.

1.0.3 Configurazione del sito

Esistono diversi tipi di impianti idroelettrici che possono essere classificati in base alla potenza, alla caduta o allo sfruttamento della risorsa idrica. Secondo l'Organizzazione delle Nazioni Unite per lo Sviluppo Industriale (UNIDO), le tipologie di impianti idroelettrici possono essere distinte in base alla potenza:

- Pico centrali ($P < 5 \text{ kW}$)
- Micro centrali ($P < 100 \text{ kW}$)
- Mini centrali ($P < 1 \text{ MW}$)

- Piccole centrali ($P < 10 \text{ MW}$)

L'Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas, invece, le distingue in base alla caduta idrica disponibile:

- Impianti ad alta caduta ($h > 100 \text{ m}$)
- Impianti a media caduta ($h = 30 - 100 \text{ m}$)
- Impianti a bassa caduta ($h = 2 - 30 \text{ m}$)

Lo schema definitivo è il risultato di un processo complesso e iterativo, in cui si prende in considerazione l'impatto ambientale e le diverse opzioni tecnologiche. Questi vengono poi valutati e viene effettuata una valutazione economica. Non è facile fornire una guida dettagliata su come valutare uno schema, ma è possibile descrivere i passi da seguire prima di decidere se si dovrebbe procedere a uno studio di fattibilità più dettagliato. Elenco degli studi da intraprendere:

- Analisi della topografia e della geomorfologia del sito;
- Valutazione della risorsa idrica disponibile e del suo potenziale di generazione;
- Selezione del sito e definizione di un layout preliminare;
- Turbine e generatori idraulici e del loro controllo;
- Valutazione dell'impatto ambientale e identificazione delle misure di mitigazione necessarie;
- Valutazione economica del progetto e analisi del potenziale di finanziamento;
- Esame del quadro istituzionale e delle procedure amministrative necessarie per ottenere le autorizzazioni necessarie.

L'acqua che scorre lungo i canali naturali e artificiali, condotta da tubi a bassa e alta pressione, che si riversa sulle creste di stramazzo e che muove le turbine, comporta l'applicazione di principi ingegneristici fondamentali nella meccanica dei fluidi che descriveremo in seguito.

1.0.4 Turbine idrauliche

Le turbine idrauliche sono macchine motrici progettate per convertire l'energia potenziale e cinetica dell'acqua, un fluido incomprimibile, in energia meccanica di rotazione da fornire all'albero motore. Nella scelta del tipo di turbina e delle sue dimensioni, vengono presi in considerazione diversi criteri. Questi includono il grado di trasformazione dell'energia, il salto netto, la portata, la velocità di rotazione, i problemi di cavitazione, la velocità di fuga e il costo. È inoltre importante definire due parametri relativi alla turbina idraulica: la coppia e l'energia cinetica.

La prima classificazione delle turbine si basa sul grado di trasformazione dell'energia potenziale in energia cinetica. Se questa trasformazione avviene completamente nel distributore, la turbina viene definita ad azione. Al contrario, se la trasformazione non è completa, la turbina viene definita a reazione. Per le turbine ad azione, la velocità V_0 d'uscita dal distributore è la velocità torricelliana ([1]):

$$V_0 = \sqrt{2 \cdot g \cdot H_u} \quad (1.1)$$

dove:

g : rappresenta l'accelerazione di gravità ($9,81 \text{ m/s}^2$). Questo valore rappresenta l'accelerazione con cui gli oggetti cadono a causa della forza di gravità.

H_u : Rappresenta l'altezza netta di caduta dell'acqua attraverso la turbina. Questo valore è la differenza di altezza tra il livello dell'acqua in ingresso e il livello dell'acqua in uscita dalla turbina.

La formula utilizza la relazione tra l'energia potenziale gravitazionale dell'acqua (associata all'altezza di caduta) e l'energia cinetica (associata alla velocità). L'acqua acquisisce energia cinetica mentre cade dall'altezza H_u , e questa energia cinetica è correlata alla velocità d'uscita V_0 tramite la formula fornita.

Per le turbine a reazione, la velocità V_0 d'uscita dal distributore è inferiore a quella precedente e dipende da un fattore di riduzione della velocità K_{v0} .

$$V_0 = K_{v0} \sqrt{2 \cdot g \cdot H_u} \quad (1.2)$$

dove K_{v0} è un valore compreso tra 0 e 1 e viene utilizzato per tener conto delle perdite di velocità che si verificano durante il processo all'interno della turbina a reazione. Un valore $k_{v0} < 1$ indica una riduzione della velocità rispetto alla velocità torricelliana.

All'ingresso della girante, l'acqua conserva una pressione di ϵH_u , dove $\epsilon > 0$. Trascurando le perdite di carico nel distributore, possiamo affermare che il carico effettivo rimane costante tra la sezione precedente e successiva al distributore. L'equazione che esprime questa costanza è la seguente:

$$H_u = \frac{v_0^2}{2g} + \epsilon \cdot H_u \quad (1.3)$$

Da questa equazione possiamo ricavare la velocità d'uscita v_0 :

$$v_0 = \sqrt{2g \cdot (1 - \epsilon) \cdot H_0} \quad (1.4)$$

Inoltre, possiamo definire il coefficiente di velocità come segue:

$$K_{v0} = \sqrt{1 - \epsilon} \quad (1.5)$$

Il coefficiente di velocità K_{v0} rappresenta la radice quadrata di $1 - \epsilon$ e fornisce una misura della riduzione della velocità rispetto alla velocità torricelliana. Estrapolando dall'equazione il valore di ϵ otteniamo il grado di reazione della macchina:

$$\epsilon = 1 - K_{v0}^2 \quad (1.6)$$

con le seguenti distinzioni:

- turbine ad azione $\epsilon = 0$ $K_{v0} = 1$
- turbine a reazione
 - a basso grado $\epsilon = 0,30$ $K_{v0} = 0,85$
 - a medio grado $\epsilon = 0,50$ $K_{v0} = 0,70$

- ad alto grado $\epsilon = 0,70$ $K_{v0} = 0,55$

Riguardo al salto netto, che rappresenta l'energia effettivamente disponibile per far funzionare la turbina, è calcolato sottraendo al salto geodetico tutte le perdite di carico. Nella tabella [1.1](#), vengono riportati i range di valori del salto netto in cui operano diverse tipologie di turbine.

Tipo di turbina	Campo dei salti (m)
Kaplan ed elica	$2 < H < 20$
Francis	$10 < H < 350$
Pelton	$50 < H < 1300$
Michell-Banki	$3 < H < 200$
Turgo	$50 < H < 250$

Tabella 1.1: Tabella campo dei salti.

inoltre, è importante considerare il regime di portata del flusso, preferibilmente rappresentato dalla curva delle durate delle portate (FDC - Flow Duration Curve), come illustrato nel diagramma nella Figura [1.4](#). La FDC rappresenta la distribuzione delle portate nel corso del tempo e fornisce informazioni preziose sulla disponibilità e sulla variabilità della portata nel corso d'acqua. Tuttavia, non tutta la portata disponibile rappresentata dalla curva delle durate può essere utilizzata per la produzione di energia elettrica. In primo luogo, è necessario considerare il Deflusso Minimo Vitale (DMV), che rappresenta la quantità minima di acqua necessaria per mantenere un corso d'acqua "vivo" e sostenere la flora e la fauna presenti. In secondo luogo, ogni tipo di turbina ha un range di portata operativa che va dalla portata nominale alla portata minima tecnica. Al di sotto della portata minima tecnica, la turbina potrebbe non funzionare in modo stabile. La portata e il salto di progetto determinano un punto nel piano di funzionamento per ciascun tipo di turbina. La scelta finale della turbina sarà il risultato di un processo iterativo che tiene conto della produzione annuale di energia, dei costi di investimento e manutenzione e dell'affidabilità del macchinario.

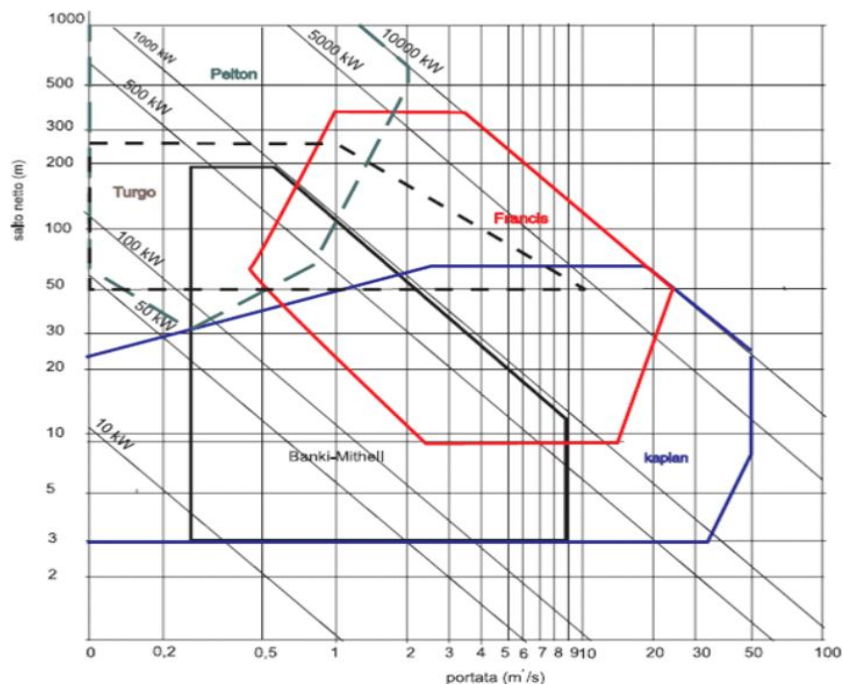


Figura 1.4: Diagramma portata-salto idrico per i vari tipi di turbina(6).

1.0.5 Potenza della turbina

La curva delle durate fornisce un mezzo per selezionare la portata di progetto corretta e per tenere conto del DMV e della portata minima compatibile con il funzionamento della turbina, oltre che consentire la stima della potenza e dell'energia producibile dall'impianto. In prima istanza si è soliti assumere quale portata di progetto la differenza tra la portata media annua ed il DMV. In pratica è opportuno valutare l'effetto sull'impianto di diverse portate di progetto, in modo da scegliere quella che consente di conseguire i migliori risultati tecnico-economici. Una volta che si sia definita la portata di progetto e si sia stimato il salto netto, deve essere identificato il tipo di turbina più adatto. Ogni turbina è caratterizzata da una portata minima ed il suo rendimento è funzione della portata di esercizio. L'output di un impianto idroelettrico può essere espresso in termini di potenza (kW) e di produzione di elettricità (kWh). La potenza della turbina idraulica è definita dalla seguente formula:

$$P = \gamma \cdot Q_m \cdot H_n \cdot \eta_{tot} \quad (1.7)$$

dve:

P = Potenza elettrica (kW)

$\gamma = \rho \cdot g$ = peso specifico del liquido (N/m^3)

Q_m = portata (m^3/s)

H_n = salto netto con $Q_m(m)$

η_{tot} = rendimento totale

Conseguentemente, l'energia elettrica (E) prodotta da un impianto è determinata dalla relazione:

$$E = P \cdot n \quad (1.8)$$

dove:

P = potenza netta a portata data [kW]

n = numero di ore di lavoro [h]

1.0.6 Rendimento della turbina

Il rendimento delle turbine idrauliche è una misura dell'efficienza con cui convertono l'energia idraulica in energia meccanica. È definito come il rapporto tra la potenza meccanica trasmessa all'asse della turbina e la potenza idraulica assorbita nelle condizioni di salto e di portata nominali.

Inoltre, il rendimento totale di un impianto idroelettrico può essere calcolato come il prodotto dei rendimenti individuali dei componenti principali, ossia la turbina, il moltiplicatore di giri (se presente) e il generatore elettrico. Questo viene espresso

dalla seguente formula:

$$\eta_{tot} = \eta_{tur} \cdot \eta_{mol} \cdot \eta_{gen} \quad (1.9)$$

dove:

η_{tur} = rendimento della turbina, funzione della Q_m dell'acqua.

η_{mol} = rendimento del moltiplicatore di giri se presente.

η_{gen} = rendimento del generatore elettrico.

Idealmente, le turbine sono progettate per operare al punto di massimo rendimento, in genere all'80% della portata massima. Tuttavia, quando la portata si allontana da questo punto ottimale, il rendimento della turbina diminuisce. Man mano che la portata diminuisce o aumenta oltre i limiti specificati, il rendimento della turbina cala, fino a raggiungere un minimo tecnico in cui la turbina non può più funzionare in modo efficiente. Pertanto, è fondamentale considerare la corretta selezione del punto di funzionamento e il controllo della portata per ottimizzare il rendimento delle turbine idrauliche. Vediamo in Figura [1.5](#) l'andamento del rendimento in funzione della portata per le diverse tipologie di turbine idrauliche.

L'utilizzo di analisi CFD e modellazione avanzata può contribuire a valutare e migliorare il rendimento delle turbine, consentendo una progettazione e un funzionamento ottimizzati. Inoltre, la manutenzione regolare e l'adozione di misure preventive adeguate possono contribuire a mantenere il rendimento delle turbine a livelli ottimali nel corso del tempo.

1.0.7 Coppia della turbina

La coppia della turbina è una grandezza fondamentale nel campo dell'ingegneria idroelettrica. Rappresenta il momento torcente generato dalla girante della turbina e viene utilizzata per valutare la capacità di generazione di energia dell'impianto idroelettrico. La coppia della turbina dipende da diversi fattori, tra cui la portata d'acqua (Q), la velocità dell'acqua (V), la geometria della girante e la densità dell'acqua (ρ). Maggiore è la portata d'acqua e la velocità dell'acqua, maggiore sarà la

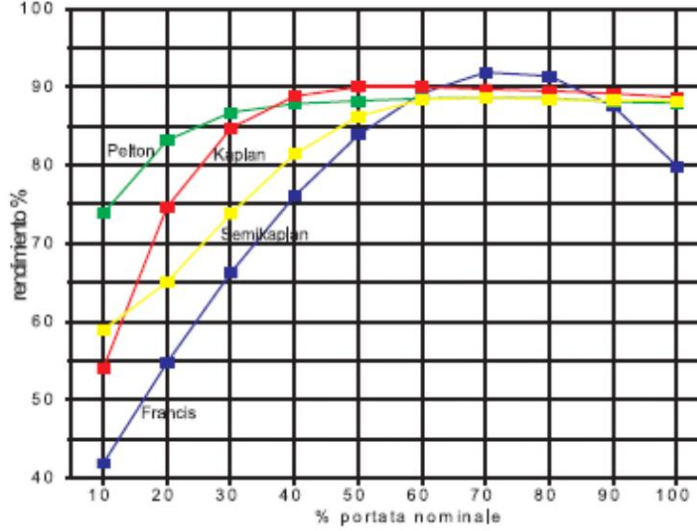


Figura 1.5: Diagramma portata-rendimento per le diverse turbine idrauliche

coppia generata dalla turbina. La formula per calcolare la coppia (C) della turbina Kaplan è:

$$C = \rho \cdot Q \cdot U \cdot R \quad (1.10)$$

dove ρ rappresenta la densità dell'acqua, Q è la portata d'acqua, U è la velocità circonferenziale media della girante e R è il raggio medio della girante.

La coppia influisce sull'efficienza e sulla capacità di generazione di energia della turbina.

1.0.8 Energia della turbina

L'energia totale in una turbina può essere calcolata considerando sia l'energia cinetica che l'energia potenziale dell'acqua. La formula generale per calcolare l'energia totale (E_{tot}) in turbina è:

$$E_{tot} = \frac{1}{2} \rho Q (V^2 - V_{out}^2) + \rho g H \quad (1.11)$$

dove:

ρ rappresenta la densità dell'acqua.

Q è la portata d'acqua che attraversa la turbina.

V è la velocità dell'acqua all'ingresso della turbina.

V_{out} è la velocità dell'acqua all'uscita della turbina.

g è l'accelerazione di gravità.

H è la differenza di altezza tra il livello dell'acqua all'ingresso e all'uscita della turbina.

La prima parte dell'equazione rappresenta l'energia cinetica dell'acqua, che tiene conto della differenza di velocità tra l'ingresso e l'uscita della turbina. La seconda parte dell'equazione rappresenta l'energia potenziale dell'acqua, che tiene conto della differenza di altezza tra l'ingresso e l'uscita della turbina. Calcolare l'energia totale in turbina è importante per valutare l'efficienza della turbina e la quantità di energia convertita durante il processo di generazione.

1.0.9 Regolazione della turbina

Le turbine sono progettate per un salto ed una portata predeterminata. Qualunque variazione di questi parametri deve essere compensata aprendo o chiudendo i dispositivi di regolazione della portata, come le pale direttrici, valvole o paratoie, al fine di mantenere costante, qualsiasi sia la potenza d'uscita sulla rete, il livello dell'acqua nel bacino di carico o la portata che attraversa la turbina.

In generale esistono due metodi per regolare la velocità in queste situazioni:

- variare la portata d'ingresso nella turbina tramite regolatore di velocità;
- dissipare l'eccesso di potenza prodotta in banchi di resistenze.

Il regolatore di velocità consiste essenzialmente in un sensore che rileva le deviazioni della velocità rispetto ad un valore predefinito ed in un dispositivo amplificatore del segnale trasmesso dal sensore, che comanda il servomotore d'azionamento dei meccanismi di controllo della portata turbinata, mantenendo costante la velocità di

rotazione e quindi la frequenza di generazione.

Nel secondo metodo di regolazione della velocità il gruppo funziona a portata costante e genera quindi una potenza costante. Se il sistema richiede meno energia, la turbina tende ad accelerare; un sensore elettronico rileva un aumento di frequenza ed un dispositivo, conosciuto come regolatore di carico, provvede a dissipare l'eccesso di energia in un banco di resistenze, mantenendo così costante la richiesta di potenza al generatore.

1.0.10 Cavitazione

La cavitazione nelle turbine idrauliche è un fenomeno importante da considerare per garantire un funzionamento efficiente e affidabile. Le turbine spesso operano a regimi di funzionamento lontani dal punto di massima efficienza, il che aumenta il rischio di cavitazione. Inoltre, la riduzione delle dimensioni delle turbine e l'aumento della velocità di rotazione possono influire sul fenomeno di cavitazione, misurato dal coefficiente di cavitazione chiamato σ di Thoma. La previsione accurata della cavitazione è fondamentale per mitigare i suoi effetti negativi. L'analisi CFD e l'utilizzo di software come ANSYS possono aiutare nella simulazione e nella comprensione del flusso d'acqua, consentendo la progettazione ottimizzata e l'implementazione di misure preventive per affrontare la cavitazione e garantire prestazioni efficienti e durature delle turbine idrauliche.

1.1 Tipologie di turbine idroelettriche

Esistono diverse tipologie di turbine idrauliche adatte sia ad impianti idroelettrici di grossa taglia, sia per piccoli impianti dove la turbina da utilizzare ha rendimenti più bassi e costi minori. Vediamo le diverse tipologie di turbine esistenti.

1.1.1 Turbina Pelton

La turbina Pelton è intitolata all'inventore Lester Allan Pelton, che la sviluppò nel tardo XIX secolo. Queste turbine offrono un'ampia versatilità nell'utilizzo, essen-

do adatte sia per impianti di grandi dimensioni che per impianti mini idroelettrici. Possono essere installate sia in posizione verticale che orizzontale. Le turbine Pelton appartengono alla categoria delle turbine ad azione, in cui l'energia cinetica dell'acqua viene generata completamente dalla trasformazione della pressione iniziale dell'acqua in energia cinetica.

Ogni turbina Pelton è dotata di uno o più ugelli che convertono la pressione dell'acqua in un getto ad alta velocità. La portata di ciascun getto è regolata tramite una valvola a spillo. In caso di brusca variazione del carico, le turbine Pelton sono solitamente equipaggiate con un tegolo deflettore, che serve a deviare il flusso d'acqua lontano dalle pale. Questo dispositivo è utile per evitare la perdita di carico dalla turbina senza dover chiudere rapidamente la valvola di controllo, poiché una chiusura veloce potrebbe causare fenomeni di colpo d'ariete indesiderati nella condotta. Di seguito vediamo un esempio di turbina Pelton, Figura 1.6.



Figura 1.6: Turbina Pelton ([2]).

1.1.2 Turbina Turgo

La turbina Turgo (Figura 1.7) è un altro tipo di turbina ad azione che presenta alcune caratteristiche distintive. A differenza della turbina Pelton, nella turbina Turgo il



Figura 1.7: Turbina Turgo.

getto d'acqua colpisce contemporaneamente più pale, senza interferire con i getti degli ugelli adiacenti. Questo design consente di ottenere un flusso d'acqua più efficiente e una migliore distribuzione dell'energia cinetica lungo le pale della turbina. Un vantaggio significativo della turbina Turgo è il suo minor diametro richiesto rispetto ad altre turbine ad azione. Grazie a ciò, a parità di velocità periferica della girante, la turbina Turgo può operare ad una maggiore velocità angolare. Questa caratteristica consente di accoppiare direttamente la turbina al generatore senza la necessità di un moltiplicatore di velocità. Questo non solo riduce i costi di installazione, ma aumenta anche l'affidabilità complessiva del sistema. La turbina Turgo è particolarmente adatta per applicazioni in cui è richiesta una potenza moderata e una caduta d'acqua media. Grazie alla sua efficienza e alle dimensioni compatte, la turbina Turgo può essere utilizzata sia in grandi impianti che in impianti di piccole dimensioni, come quelli mini idroelettrici.

1.1.3 Turbina cross-flow

La turbina a flusso incrociato, conosciuta anche come turbina Banki-Michell, è una turbina ad azione che presenta un rendimento massimo inferiore al 87%. Tuttavia,

la sua efficienza rimane relativamente costante anche a bassi livelli di portata, raggiungendo una portata minima teorica inferiore al 10% della portata di progetto. L'acqua entra nella turbina attraverso un distributore e fluisce attraverso i due stadi della ruota. La ruota è costituita da dischi paralleli con pale montate vicino ai bordi, realizzate con semplici lamiere piegate. Questa configurazione consente alla turbina a flusso incrociato di adattarsi facilmente alle variazioni di portata, rendendola ampiamente utilizzata in impianti idroelettrici di piccola e media scala. La turbina a flusso incrociato è una scelta popolare per progetti idroelettrici in canali o con flusso costante. Nonostante alcuni limiti, come la necessità di velocità angolari elevate e la sensibilità alle variazioni di portata, offre vantaggi come un basso costo di produzione, una costruzione semplice e una buona affidabilità. Nella figura seguente è mostrato un esempio di turbina a flusso incrociato (Figura 1.8).

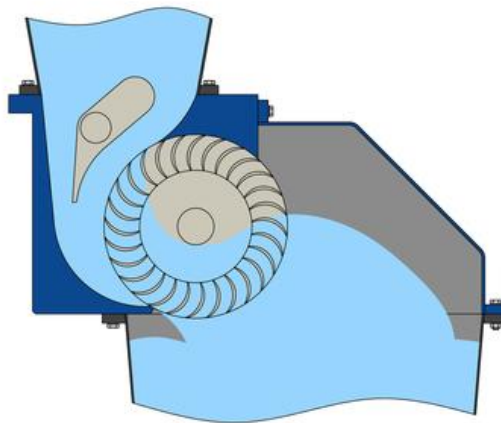


Figura 1.8: Turbina Cross-flow.

1.1.4 Turbina Francis

Le turbine Francis, rappresentate nella Figura 1.9, sono le turbine idrauliche più ampiamente utilizzate, con oltre il 60 % dell'energia idroelettrica installata generata da questo tipo di turbine. Le turbine Francis sono turbine a reazione a flusso radiale, dotate di un distributore con pale regolabili e una girante con pale fisse. Sono



Figura 1.9: Turbina Francis.

particolarmente adatte per medi salti. Nelle turbine Francis ad alta velocità, l'acqua viene alimentata radialmente, mentre lo scarico avviene solitamente in modo assiale. In queste turbine, l'acqua fluisce all'interno come in una condotta pressurizzata: passa attraverso il distributore (parte fissa) e raggiunge la girante (parte mobile), trasferendo la sua energia senza entrare in contatto con l'atmosfera. Le turbine Francis offrono diversi vantaggi rispetto ad altri tipi di turbine:

- Sfruttamento completo del salto disponibile fino al canale di scarico.
- Elevata velocità di rotazione, adatta per salti medio-piccoli, che non dipende direttamente dall'entità del salto, ma varia in base al grado di reazione.
- Possibilità di utilizzo in impianti a flusso libero per salti molto piccoli.

Tuttavia, le turbine Francis presentano anche alcuni svantaggi:

- Costruzione complessa.
- Problemi di tenuta a causa della differenza di pressione tra il lato monte e il lato valle della girante.

- Possibilità di cavitazione dovuta alla depressione nel diffusore.
- Attrito e usura.

Nonostante questi svantaggi, le turbine Francis rimangono una scelta comune per sfruttare l'energia idroelettrica grazie alla loro versatilità e alla capacità di adattarsi a una vasta gamma di condizioni di funzionamento.

1.1.5 Turbina Kaplan

Tali turbine si sono sviluppate dall'esigenza di sfruttare salti idrici di modesta entità avendo a disposizione elevati volumi d'acqua. Infatti, a parità di diametro esterno, una girante assiale elabora una portata maggiore di quella di una turbina Francis, con cadute idriche minori. Le giranti delle turbine ad elica hanno le pale non orientabili, montate su mozzo cilindrico mentre le turbine Kaplan dispongono di giranti con pale orientabili in funzione del carico. Le pale della ruota si muovono girando intorno ad un perno solidale con un sistema di bielle-manovelle collegate ad un tirante verticale posto all'interno dell'albero cavo della turbina che è da un servomotore idraulico.

Le Kaplan, si possono suddividere in due categorie:

- Kaplan mono-regolanti: caratterizzate dalla sola regolazione delle pale della girante.
- Kaplan bi-regolanti: caratterizzate dalla regolazione delle pale della girante e del distributore.

Potendo regolare l'inclinazione delle pale della girante si riescono a limitare le perdite per incidenza del flusso e quindi, si riesce a mantenere un valore del rendimento elevato in un intervallo molto ampio del carico. Andiamo inoltre a fare un'ulteriore distinzione riguardante le turbine Kaplan, ovvero:

- Turbine ad elica.
- Turbine a bulbo.

Le turbine ad elica, come vediamo di seguito in Figura [1.10](#), non avendo possibilità di regolare le pale della girante, sono caratterizzate da perdite per incidenza che ne fanno decadere il rendimento non appena ci si allontana dalla condizione di progetto, infatti vengono utilizzate quando il salto e la portata sono praticamente costanti.

La turbina a bulbo rappresentata in Figura [1.11](#) è una turbina a reazione che deriva dalla Kaplan, con il generatore ed il moltiplicatore (se esiste) contenuti in una cassa impermeabile, a forma di bulbo, immersa nell'acqua.



Figura 1.10: Turbina Kaplan ad elica.

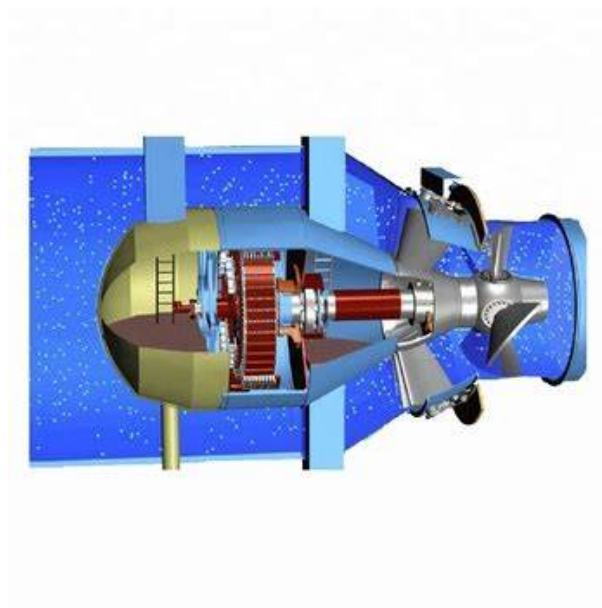


Figura 1.11: Turbina Kaplan a bulbo.

Capitolo 2

Configurazione dell'impianto

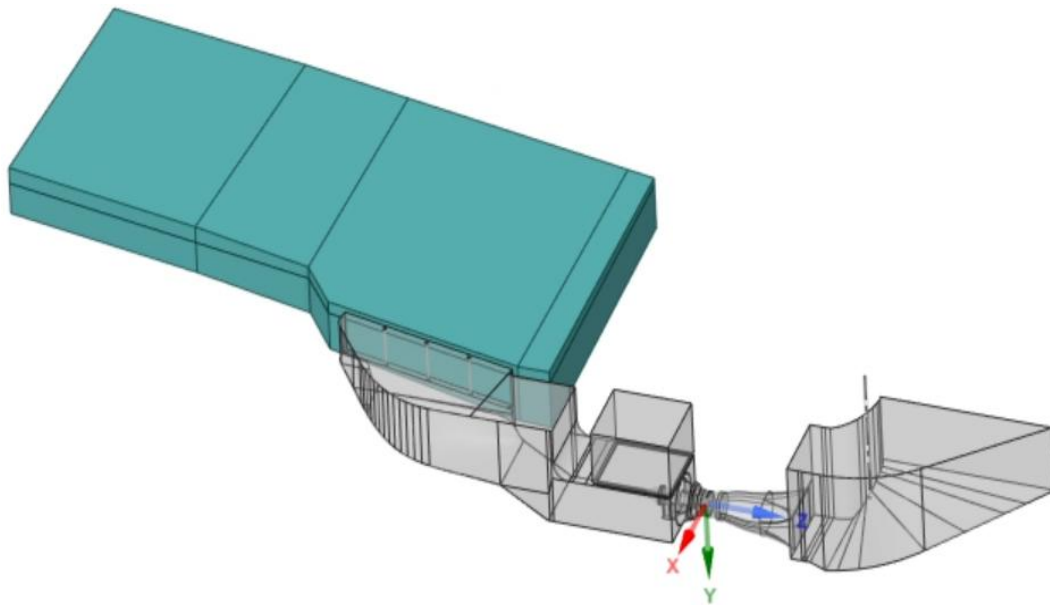


Figura 2.1: Impianto idroelettrico sul fiume Lambro.

La tesi si focalizza sull'analisi di un impianto idroelettrico, rappresentato nella Figura [2.1](#), che è dotato di una turbina Kaplan ad asse orizzontale. Questo tipo di turbina è ampiamente utilizzata negli impianti idroelettrici grazie alla sua capacità di adattarsi a una vasta gamma di flussi d'acqua e di garantire un alto rendimento energetico.

Prima di entrare nella turbina, il fluido idrico proveniente dal fiume viene sottoposto a un'operazione di filtraggio attraverso una griglia. Questo sistema di protezione previene l'ingresso di corpi solidi indesiderati che potrebbero danneggiare la turbina e compromettere il suo funzionamento ottimale.

Una volta superata la fase di filtraggio, l'acqua fluisce attraverso l'opera di presa, che funge da punto di ingresso dell'impianto. Qui, la regolazione del flusso viene gestita attraverso l'uso di un pre-distributore e un distributore. Questi elementi consentono di modulare e controllare la quantità di acqua che entra nella turbina, in base alle esigenze di produzione di energia elettrica. Quando l'acqua raggiunge la turbina Kaplan, avviene la trasformazione dell'energia potenziale dell'acqua in energia meccanica, dopodiché l'acqua esce dallo statore e viene indirizzata verso la sezione divergente dell'impianto, nota come diffusore. Lo scarico avviene nella direzione assiale, garantendo un'efficace gestione del flusso e una corretta restituzione dell'acqua al fiume.

Questo tipo di impianto idroelettrico, con la sua turbina Kaplan ad asse orizzontale, rappresenta un sistema efficiente per la conversione dell'energia cinetica dell'acqua in energia elettrica. La presenza di sistemi di filtraggio e di regolazione del flusso garantisce il corretto funzionamento dell'impianto, preservando la sua sicurezza e la durata delle componenti. Inoltre, l'adattabilità della turbina Kaplan alle variazioni di flusso permette di sfruttare in modo ottimale le risorse idriche disponibili, contribuendo alla produzione sostenibile di energia rinnovabile.

Per avere una prospettiva visiva dell'area in cui è posizionato l'impianto, possiamo osservare le immagini satellitari [2.2](#) e [2.3](#) che mostrano l'impianto idroelettrico situato sul fiume Lambro. Queste immagini possono aiutare a comprendere meglio l'ambiente circostante e la configurazione dell'impianto stesso.



Figura 2.2: Immagine satellitare dell'impianto (vista frontale).



Figura 2.3: Immagine satellitare del sito (vista laterale).

2.0.1 Componenti dell'impianto

Di seguito è riportata una descrizione più dettagliata dei componenti principali dell'impianto idroelettrico:

- **Fiume**

Il fiume svolge un ruolo cruciale nell'impianto idroelettrico, fornendo l'energia idraulica necessaria per generare elettricità. Il flusso d'acqua del fiume è un elemento chiave per il funzionamento dell'impianto idroelettrico. La quantità di acqua disponibile e la sua portata influenzano direttamente la capacità di produzione di energia dell'impianto. Pertanto, è importante monitorare e gestire attentamente le risorse idriche per garantire un utilizzo sostenibile ed efficiente dell'energia idroelettrica. (Figura 2.4)

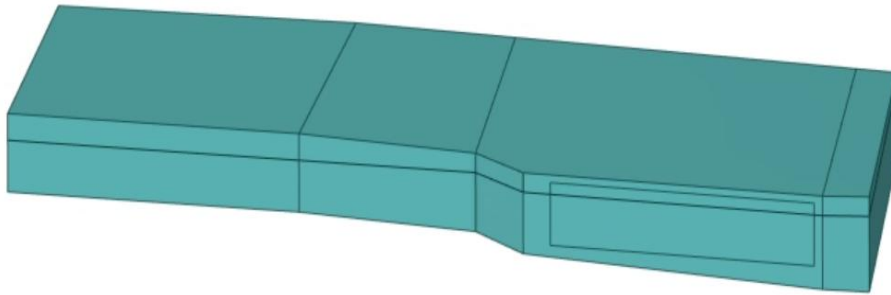


Figura 2.4: Geometria del fiume in Space claim.

- **Opera di presa**

L'opera di presa è responsabile del prelievo controllato dell'acqua dal fiume e del suo indirizzamento verso gli organi rotativi dell'impianto. Una progettazione accurata dell'opera di presa è essenziale per garantire un flusso ottimale e prevenire l'ingresso di detriti indesiderati. L'opera di presa può comprendere diversi componenti, come griglie di protezione e sistemi di regolazione del flusso, al fine di garantire un funzionamento affidabile dell'impianto. La geometria dell'opera di presa viene studiata in dettaglio per massimizzare l'efficienza del prelievo e minimizzare le perdite di carico. (Figura 2.5)

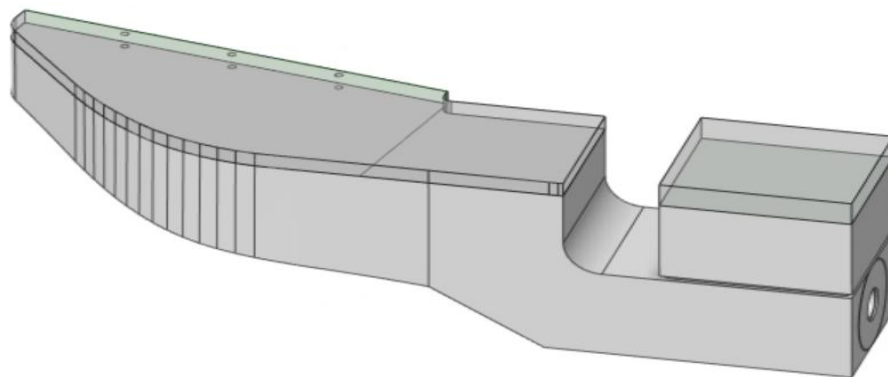


Figura 2.5: Geometria dell'opera di presa in Space claim.

- **Solido poroso**

Il modello di solido poroso viene utilizzato per semplificare la geometria complessa del pre-distributore, del distributore e della girante delle turbine. Questa semplificazione riduce i requisiti computazionali nella simulazione CFD dell'impianto. Il solido poroso rappresenta una superficie permeabile al flusso d'acqua e viene utilizzato per approssimare il comportamento idraulico di queste componenti. Tuttavia, è importante considerare che questa semplificazione potrebbe non catturare tutti i fenomeni fluidodinamici complessi che si verificano all'interno delle componenti stesse. Pertanto, è necessario valutare attentamente l'accuratezza del modello di solido poroso rispetto ai risultati desiderati. (Figura [2.6](#))

- **Diffusore**

Il diffusore è un componente che si trova all'uscita della girante delle turbine. La sua funzione principale è quella di rallentare il flusso d'acqua e convertire l'energia cinetica residua in energia di pressione. Questo viene ottenuto grazie all'angolo divergente presente nel diffusore, che causa un'espansione del condotto e una diminuzione della velocità del fluido. Il diffusore svolge quindi un ruolo fondamentale nel processo di conversione dell'energia cinetica dell'acqua in energia meccanica all'interno delle turbine idroelettriche. (Figura [2.7](#))

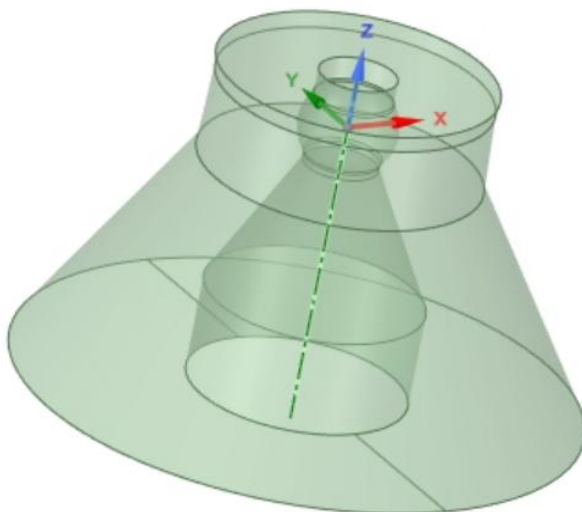


Figura 2.6: Geometria del solido poroso in Space claim.

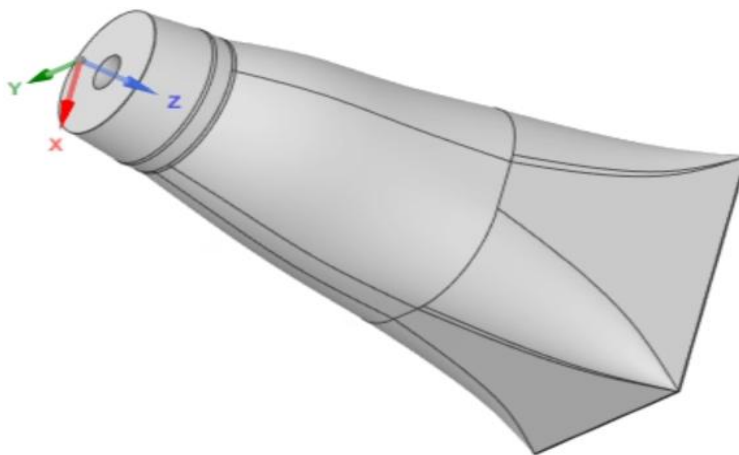


Figura 2.7: Geometria del diffusore in Space claim.

- **Scarico**

Lo scarico è responsabile dello smaltimento controllato dell'acqua dopo il passaggio attraverso le turbine. Consiste in un canale o un condotto che permette il deflusso controllato dell'acqua verso il fiume o il corpo idrico di destinazione. Lo scarico può includere strutture di dissipazione dell'energia, come gradini o vasche di dissipazione, al fine di ridurre la velocità dell'acqua e mi-

nimizzare l'impatto ambientale. L'obiettivo principale dello scarico è quello di riconsegnare l'acqua al corso d'acqua naturale in modo sicuro ed ecologicamente sostenibile, considerando aspetti idraulici, ambientali e di sicurezza. La geometria dello scarico viene progettata e dimensionata in base alle esigenze specifiche dell'impianto e dell'ambiente circostante. (Figura 2.8)

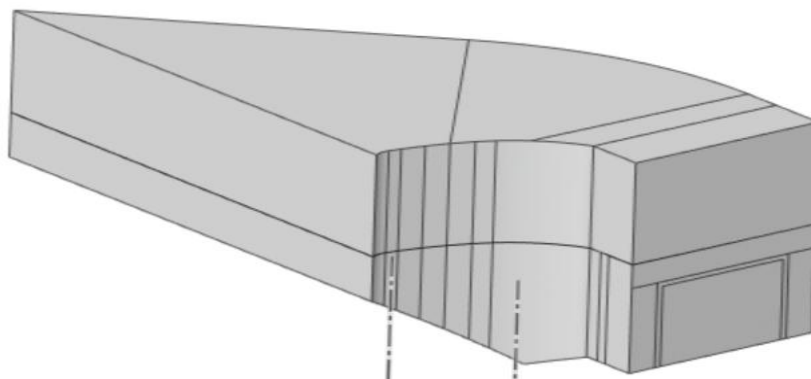


Figura 2.8: Geometria dello scarico in Space claim.

Schiere palari

- **Pre-distributore**

Il predistributore è un componente fondamentale della turbina Kaplan in un impianto idroelettrico. Si trova all'ingresso della girante e ha il compito di dirigere il flusso d'acqua verso le pale in modo uniforme ed efficiente. È costituito da guide statoriche o pale fisse che regolano il flusso e l'angolo di incidenza dell'acqua. La sua progettazione richiede l'ottimizzazione delle prestazioni idrauliche tramite l'utilizzo di software di simulazione CFD. (Figura 2.9)

- **Distributore**

Il distributore si trova tra il predistributore e la girante e ha la funzione di indirizzare il flusso d'acqua proveniente dal predistributore in modo che raggiunga la girante in modo efficiente. Il suo compito principale è regolare la portata d'acqua in base alla potenza richiesta dalla macchina e trasformare l'energia

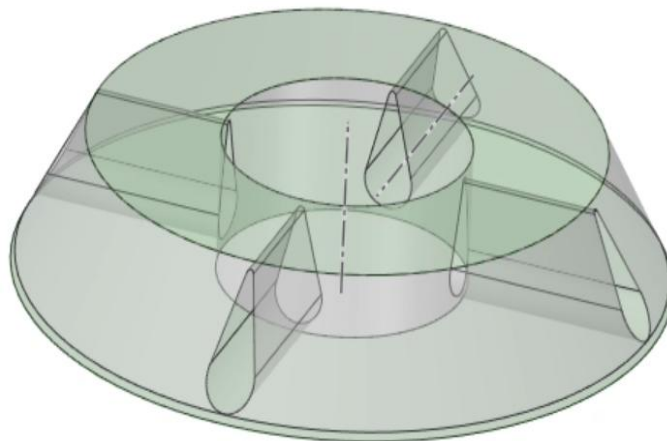


Figura 2.9: Geometria del Pre-distributore in Space claim.

cinetica dell'acqua in energia potenziale. Il flusso all'interno del distributore è caratterizzato da un movimento centripeto con una componente tangenziale significativa. (Figura 2.10)

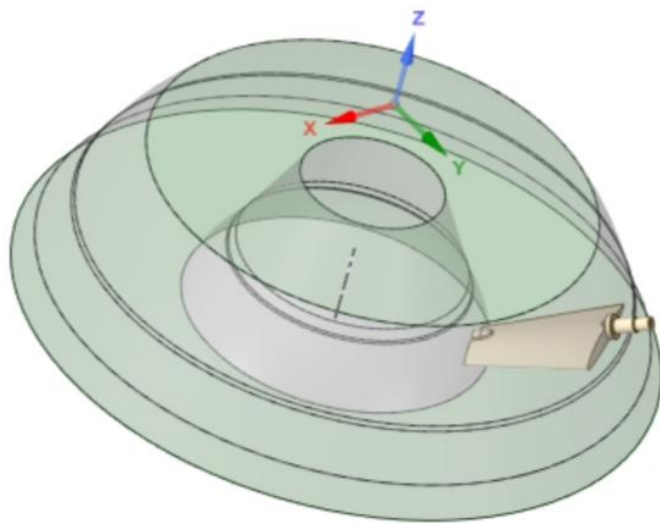


Figura 2.10: Geometria del distributore in Space claim.

- **Girante**

La girante si occupa della conversione dell'energia idroelettrica in potenza mec-

canica. È responsabile di trasformare la potenza della portata di fluido in potenza "utile" che può essere trasmessa all'albero motore. Durante il suo funzionamento, il fluido cede la propria energia meccanica alla girante stessa, generando una rotazione che sarà poi utilizzata per produrre energia elettrica. (Figura 2.11)

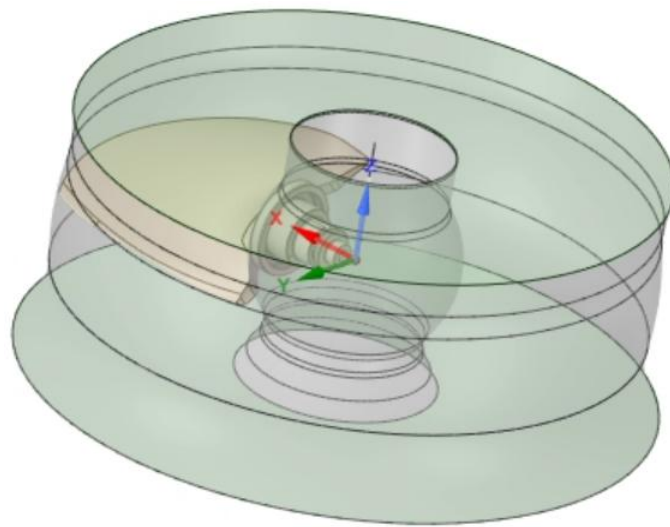


Figura 2.11: Geometria della girante in Space claim.

La progettazione e l'ottimizzazione di ogni componente dell'impianto idroelettrico sono fondamentali per massimizzare l'efficienza energetica e garantire un impatto ambientale ridotto. Ogni geometria viene studiata attentamente utilizzando metodi di simulazione e analisi avanzati al fine di ottimizzare il flusso d'acqua, ridurre le perdite di carico e migliorare l'efficienza complessiva dell'impianto.

Capitolo 3

Analisi CFD dell'impianto

Prima di avviare la simulazione CFD, è necessario definire i dati di progetto forniti dall'azienda, analizzarli e strutturare il problema. Questo processo è fondamentale per garantire risultati accurati e significativi. Una volta acquisiti i dati di progetto, vengono esaminati attentamente per comprendere le specifiche dell'impianto idroelettrico. Si considerano parametri come le dimensioni geometriche, le condizioni operative, i materiali utilizzati e le caratteristiche del fluido. Successivamente, si procede con la creazione della mesh dei vari componenti dell'impianto. La mesh è una rappresentazione discretizzata della geometria tridimensionale e permette di suddividere il dominio di simulazione in elementi più piccoli, facilitando così il calcolo delle equazioni di fluidodinamica. Una volta completata la mesh, questa viene importata nel software CFX-Pre. CFX-Pre è l'interfaccia pre-processore che consente di preparare la simulazione CFD. Qui vengono impostate le condizioni al contorno, come la velocità in ingresso, la pressione atmosferica, i coefficienti di attrito e altri parametri pertinenti. L'obiettivo finale è creare una configurazione solida e accurata nel software CFX-Pre, che funga da base per l'avvio della simulazione. Questo include anche la definizione delle equazioni di bilancio, dei modelli di turbolenza e delle altre impostazioni necessarie per ottenere i risultati desiderati. Una volta completate queste fasi preliminari, si è pronti per avviare la simulazione e ottenere i risultati della dinamica dei fluidi all'interno dell'impianto idroelettrico.

3.0.1 Dati di progetto

I dati di progetto dell'impianto idroelettrico forniscono informazioni fondamentali sulla sua configurazione e sulle sue prestazioni. Tuttavia, è importante considerare ulteriori aspetti idraulici che possono influenzare il funzionamento dell'impianto e l'efficienza della turbina. Uno dei fattori da tenere in considerazione è il problema del pelo libero dell'acqua e l'ingresso trasversale del fluido. Questo può influire sulla distribuzione del flusso e sulle condizioni che si generano all'ingresso della turbina. Inoltre, la presenza di una battente a monte può causare il fenomeno del tiraggio, che deve essere adeguatamente valutato e gestito. Aumentando la portata dell'acqua, è possibile che si verifichino vortici nella macchina, generando un campo di moto non uniforme. Pertanto, è necessario esaminare attentamente il campo di moto e valutare gli effetti che esso può avere sulla turbina. Inoltre, se l'imbocco della condotta a monte della macchina non è corretto, potrebbero verificarsi depressioni di livello che devono essere presi in considerazione.

Analizzando i dati riportati nella tabella [3.1](#), è evidente che la turbina presenta un salto molto basso di circa 2 m e una portata di 15 m³/s .

Salto	Portata	Velocità	Potenza	Diametro	N pale	N direttrici
[m]	[m ³ /s]	[rpm]	[kW]	[mm]	[-]	[-]
2,16	15	230	286	1450	3	16

Tabella 3.1: Tabella dei dati di progetto dell'impianto.

Per quanto riguarda l'inclinazione delle pale della girante e del distributore, i dati forniti sono: Questi parametri sono di fondamentale importanza per garantire un corretto deflusso dell'acqua attraverso la turbina e per ottimizzare le prestazioni dell'impianto.

3.1 Analisi computazionale fluidodinamica

L'analisi computazionale fluidodinamica (CFD - Computational Fluid Dynamics) consiste nella soluzione numerica delle equazioni che descrivono il comportamento

Portata	Apertura distributore	Apertura girante
$[m^3/s]$	$[^\circ]$	$[^\circ]$
15	83,6	38,6
13,5	80,8	35,3
12	77,9	31,7
10,5	75,2	27,7
9	72,3	23,4
7,5	68,3	18,7
6	62,6	13,5
4,5	55,1	8
3	46,4	2,2
1,5	38,7	0

Tabella 3.2: Tabella angoli schiere palari.

dei fluidi, sia liquidi che gassosi. Utilizzando valori di velocità, temperatura, pressione, densità e viscosità, la fluidodinamica consente di descrivere in modo accurato fenomeni comuni come l'interazione dei fluidi con strutture solide, la trasmissione di calore, il cambio di fase e i fenomeni reattivi come la combustione, attraverso le equazioni di Navier-Stokes. Le equazioni di Navier-Stokes sono un insieme di equazioni differenziali alle derivate parziali di secondo ordine che governano il moto turbolento dei fluidi. Poiché sono equazioni molto complesse, non esiste una soluzione analitica generale, ma solo soluzioni per casi particolari ed estremamente semplificati.

Le equazioni di Navier-Stokes sono le seguenti:

Equazione di continuità:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (3.1)$$

Questa equazione esprime la conservazione della massa e afferma che la variazione di densità (ρ) nel tempo, sommata al flusso di massa che attraversa una superficie chiusa, è uguale a zero.

Equazione del momento:

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v v) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu(\nabla v + (\nabla v)^T)) + \rho g \quad (3.2)$$

Questa equazione esprime la conservazione del momento e descrive come la quantità di moto (ρv) varia nel tempo a causa di forze esterne come la pressione ($-\nabla P$), la viscosità ($\nabla \cdot (\mu(\nabla v + (\nabla v)^T))$) e la forza di gravità (ρg).

Equazione dell'energia (se il flusso è termico):

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v E) = -\nabla \cdot (Pv) + \nabla \cdot (k\nabla T) + Q \quad (3.3)$$

Questa equazione descrive la conservazione dell'energia e tiene conto delle variazioni di energia interna, del flusso di energia attraverso la superficie di controllo, della conduzione termica ($\nabla \cdot (k\nabla T)$) e delle sorgenti di calore (Q).

Nelle equazioni sopra, ρ rappresenta la densità del fluido, t è il tempo, v è il vettore velocità del fluido, P è la pressione, μ è la viscosità dinamica, g è l'accelerazione di gravità, E è l'energia totale per unità di massa del fluido, k è la conducibilità termica e T è la temperatura.

Per risolvere le equazioni di Navier-Stokes, è necessario discretizzare il dominio di flusso in una griglia tridimensionale (mesh), applicare condizioni al contorno e condizioni iniziali, e utilizzare algoritmi numerici, come il metodo delle differenze finite o delle differenze finite volume, per approssimare le derivate spaziali e temporali. Le equazioni discrete risultanti vengono quindi risolte iterativamente per ottenere una soluzione numerica approssimata del flusso del fluido.

Con la simulazione di flusso numerico andremo a discretizzare, approssimando il problema matematico continuo con uno algebrico, la regione di interesse in cui verranno risolte le equazioni. Nel processo di discretizzazione del dominio la regione di interesse viene suddivisa in piccoli elementi. Nei nodi degli elementi vengono calcolati i valori delle componenti di velocità e di pressione durante il calcolo numerico. Questa

tipologia di analisi viene utilizzata nel campo dell'industria e della ricerca per tutte le problematiche che coinvolgono l'azione di fluidi (forze aerodinamiche, motori, pompe, impianti chimici, comfort ambientale, ecc.).

Il CFD garantisce una riduzione dei tempi di progettazione, essendo un'ottima alternativa alle prove di modelli in scala effettuate in laboratorio. Inoltre, tramite le verifiche fluidodinamiche, facilita l'ottimizzazione delle prestazioni di una macchina.

Il processo generale per eseguire un'analisi CFD include:

- Definizione degli obiettivi di modellazione
- Modellare la geometria
- Definizione e creazione di mesh
- Stabilire le condizioni al contorno e iniziali
- Definizione dei parametri di flusso e solutore
- Eseguire la simulazione e monitorare per il completamento
- Post-elaborazione della simulazione per ottenere i risultati
- Confronta i risultati
- Ripetere il processo per esaminare le sensibilità
- Revisione del Modello

Il corpo attorno al quale deve essere analizzato il flusso richiede la modellazione della geometria. Potrebbero essere necessarie approssimazioni della geometria e semplificazioni per consentire un'analisi con un minor sforzo computazionale. Infatti l'analisi fluidodinamica CFD dell'impianto idroelettrico con turbina Kaplan sarà svolta in due modalità: **semplificata** e **complessa**, come verrà poi descritto in seguito.

La definizione del dominio di flusso comporta la considerazione delle superfici del corpo che costituiscono il confine del dominio. Alcune di queste superfici coincidono con

la geometria del corpo stesso, mentre altre rappresentano i confini liberi attraverso i quali il flusso entra o esce. Durante la modellazione, si tiene conto della struttura e della topologia per generare la griglia necessaria. La discretizzazione del dominio di flusso avviene attraverso la definizione di una griglia, che richiede la struttura e la topologia appropriate. Ogni geometria deve essere associata a un dominio specifico e alle relative condizioni al contorno. Per creare una griglia strutturata, è necessario racchiudere il dominio all'interno di un blocco che rappresenta logicamente il dominio stesso e che verrà adattato alla geometria effettiva. È importante considerare il numero di nodi nella griglia, poiché influisce sulla soluzione finale e sul tempo richiesto per ottenere la risoluzione desiderata. Pertanto, è necessario trovare un compromesso adeguato tra il tempo di calcolo e la precisione dei risultati. Il CFD utilizzato in questo lavoro di tesi è il software CFX 14.5 della ANSYS Inc, specializzato nelle simulazioni computazionali nel campo dell'ingegneria.

I componenti contenuti nel pacchetto CFX 14.5 sono:

- modellatore e meshatore (ICEM CFD e TurboGrid 14.5);
- pre-processore (CFX-Pre 14.5);
- solutore (CFX-Solver Manager 14.5);
- post-processore (CFD-Post 14.5).

ANSYS ICEM CFX ha lo scopo di creare la griglia e generare i nodi in cui le equazioni del flusso saranno risolte durante le fasi successive dell'analisi. Dopo che la griglia geometrica è stata generata da ANSYS ICEM CFX, il passaggio successivo è affidato a CFX Setup. Questo modulo si occupa di preparare la configurazione necessaria per la soluzione del problema. Inoltre, consente di definire i parametri e le quantità fisiche che devono essere monitorate e analizzate durante la simulazione. Ciò include la scelta delle grandezze di interesse, come la pressione, la velocità, la temperatura e altre variabili rilevanti per il fenomeno in studio. Una volta configurato il problema, il compito di risolvere le equazioni del flusso è affidato a CFX Solver. Questo modulo definisce le opzioni relative al processo risolutivo, come il tipo di solutore

da utilizzare, la precisione richiesta, le condizioni iniziali e altre impostazioni che influenzano la risoluzione del problema. Infine, il modulo Post CFX è responsabile dell'analisi e della visualizzazione dei risultati ottenuti dalla simulazione. Esso elabora i dati di output prodotti dal risolutore e genera report dettagliati, grafici e altre rappresentazioni visive dei risultati.

3.2 Costruzione della mesh

Per condurre un'analisi fluidodinamica dell'impianto, è necessario suddividerlo in diverse parti geometriche da ricostruire e discretizzare in volumi fluidi da simulare. Le principali divisioni effettuate comprendono il fiume, l'opera di presa, il pre-distributore, il distributore, la girante, il diffusore e il condotto di scarico.

Durante la creazione della mesh, è importante prestare attenzione alla qualità della griglia. Se la griglia risulta troppo grossolana, potrebbero verificarsi problemi nel prevedere fenomeni come la turbolenza o il distacco del flusso. D'altra parte, se la griglia è troppo fine, l'onere computazionale richiesto per il calcolo delle equazioni differenziali aumenta notevolmente. Pertanto, è necessario trovare un compromesso tra la qualità della mesh e il grado di precisione richiesto.

La generazione della mesh per geometrie semplici può essere effettuata utilizzando algoritmi automatizzati forniti da software come ANSYS CFX o ICEM. Nel contesto di questa tesi, il software ICED CFD 14.5 viene utilizzato solo per la costruzione di alcuni condotti privi di palettature, poiché risulta essere più laborioso per la creazione della mesh.

Gli algoritmi di mesh utilizzati dai programmi di meshing si basano sull'uso di diversi tipi di griglie o sulla loro combinazione. Le mesh strutturate, che consistono in celle a tetraedro o esaedro distribuite in modo ordinato nello spazio (come mostrato nella Figura [3.1](#)), offrono in generale una qualità della mesh elevata, ma sono difficili da generare, soprattutto per geometrie complesse come una turbina idraulica. Un'alternativa sono le mesh non strutturate, come illustrato nelle Figure [3.2](#), che utilizzano principalmente celle a tetraedro, ma possono includere anche celle di forma quadrata. Questo metodo consente una rapida generazione di mesh su geometrie complesse, ma

a scapito di una qualità della mesh inferiore rispetto alle mesh strutturate. Inoltre, l'utilizzo di mesh non strutturate comporta un sovraccarico di memoria e CPU a causa dei riferimenti non strutturati.

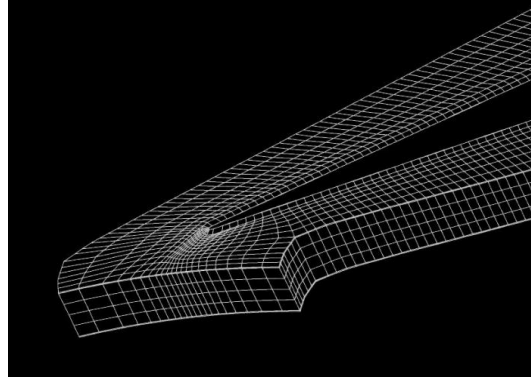


Figura 3.1: Esempio di mesh strutturata.

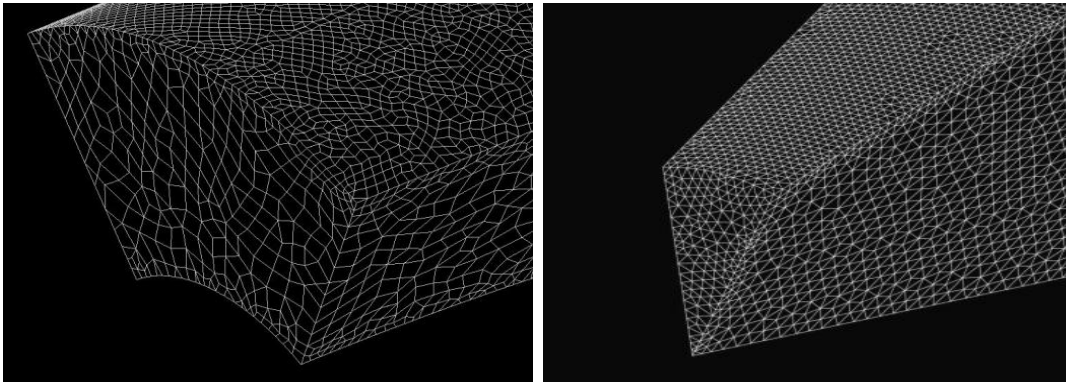


Figura 3.2: Esempio di mesh non strutturata tetraedrica ed esaedrica.

3.2.1 Fiume

Per garantire una rappresentazione accurata della geometria del fiume, è stata adottata una suddivisione in due strati considerando la presenza di aria sopra il pelo libero dell'acqua. La separazione tra l'acqua e l'aria è stata definita al livello di portata nominale $Q = 15 \text{ m}^3/\text{s}$, che corrisponde a un'altezza di 1,99 m sopra il livello

dell'acqua. Per creare la mesh del fiume, è stato utilizzato il software di meshing ICEM CFD 14.5, in grado di generare mesh a partire da una qualsiasi geometria. Inizialmente, la geometria complessiva dell'impianto è stata suddivisa e la parte del fiume è stata importata nell'ambiente di ICEM CFD.

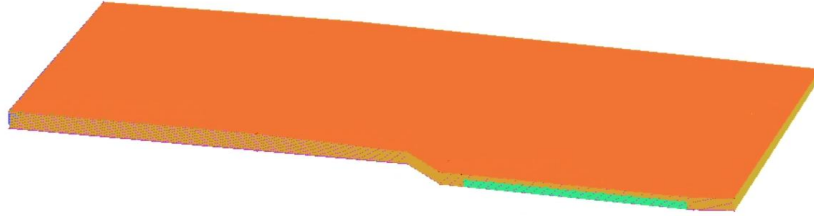


Figura 3.3: Mesh strutturata del fiume (lato aria) costruita in ICEM CFD 14.5.

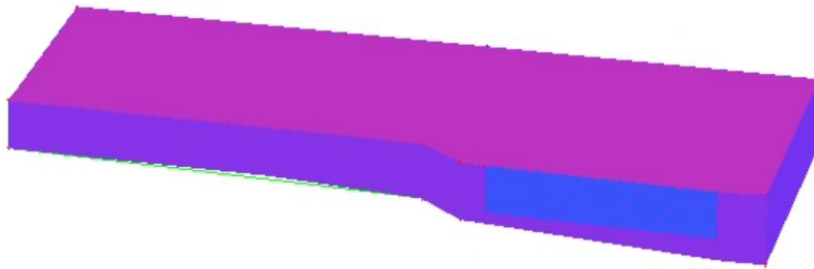


Figura 3.4: Mesh strutturata del fiume (lato acqua) costruita in ICEM CFD 14.5.

Successivamente, sono state definite le diverse parti del fiume all'interno dell'ambiente di ICEM CFD. Queste includono "Inflow FiumeAria" e "Inflow FiumeAcqua", che rappresentano rispettivamente la zona di ingresso dell'aria e dell'acqua nel fiume, con l'acqua nella parte inferiore e l'aria nella parte superiore. "Outflow FiumeAcqua" e "Outflow FiumeAria" rappresentano le zone di uscita dell'acqua e dell'aria dal fiume, corrispondenti all'ingresso nell'opera di presa dell'impianto. "Sky FiumeAria" rappresenta la faccia del fiume rivolta verso il cielo, "Wall FiumeAria" e "Wall FiumeAcqua" indicano il resto delle pareti della geometria e "Outflow FiumeAcqua" rappresenta l'acqua che continua il suo corso naturale senza entrare nell'impianto. La zona di interfaccia tra l'aria e l'acqua è rappresentata da una superficie specifica che separa i due fluidi.

Il processo di meshing inizia con la generazione di un blocco tridimensionale di forma rettangolare che racchiude il fiume. Successivamente, il rettangolo viene suddiviso in blocchi e associato ai vari lati e spigoli del fiume per adattarsi alla geometria da meshare. A questo punto, è possibile procedere con la generazione della pre-mesh, in cui vengono definiti il numero di nodi e lo spacing, ossia il numero di nodi locali che consentono di ottenere una migliore qualità della mesh. Vengono effettuati controlli sulla pre-mesh e sulla mesh per verificare l'assenza di elementi non omogenei con il resto della griglia. In figura vediamo l'istogramma che indica l'alta qualità della mesh del fiume. Successivamente viene fatta la conversione in formato Ansys CFX,

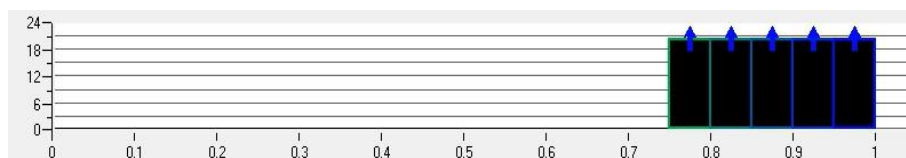


Figura 3.5: Check mesh del fiume.

e poi importata in CFX Pre 14.5.

3.2.2 Opera di presa

Per analizzare l'opera di presa, viene eseguita una mesh non strutturata esagonale/tetraedrica sulla geometria complessa dell'opera stessa (Figura 3.7, Figura 3.6). Questo approccio di meshing permette di rappresentare in modo accurato la geometria complessa dell'opera di presa. Anche in questo caso andiamo a suddividere l'opera di presa nella porzione di aria e acqua in corrispondenza del pelo libero dell'acqua. Nella creazione della mesh, vengono definite varie parti sulla geometria dell'opera di presa. Queste parti includono "Inflow ODP Acqua", che rappresenta la zona di ingresso dell'acqua, "Outflow ODP Acqua", che rappresenta la zona di uscita, "Sky ODP Aria", che rappresenta la faccia esposta all'aria, e "Wall ODP Aria" e "Wall ODP Acqua", che rappresenta le pareti rimanenti dell'opera di presa. Dopo aver impostato la configurazione della mesh, viene eseguito il calcolo da parte del simulatore per ottenere una mesh non strutturata. Questa mesh fornisce una

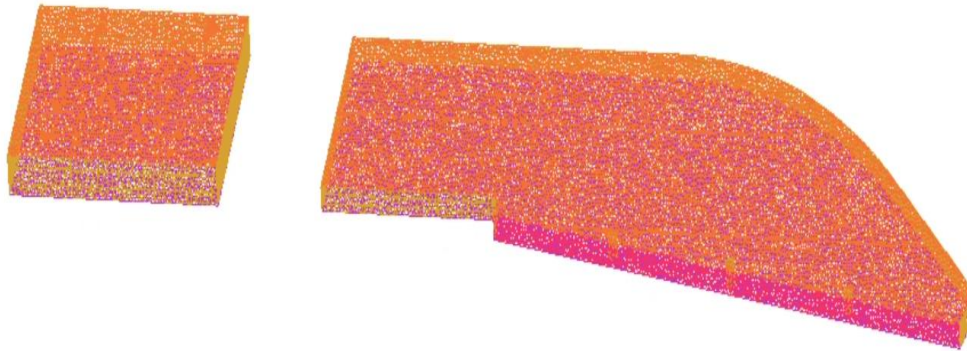


Figura 3.6: Mesh non strutturata dell'opera di presa (lato aria) costruita in ICEM CFD 14.5.

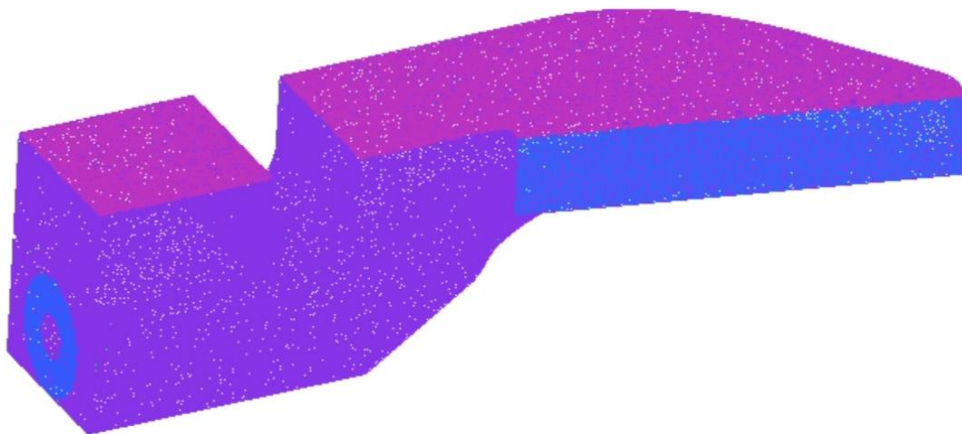


Figura 3.7: Mesh non strutturata dell'opera di presa (lato acqua) costruita in ICEM CFD 14.5.

rappresentazione dettagliata dell'opera di presa, consentendo una simulazione accurata delle caratteristiche idrauliche e del flusso dell'acqua all'interno dell'opera di presa.

3.2.3 Solido poroso

Per la creazione della mesh del solido poroso nell'impianto idroelettrico, abbiamo seguito diversi passaggi. Inizialmente, abbiamo rinominato le diverse superfici del

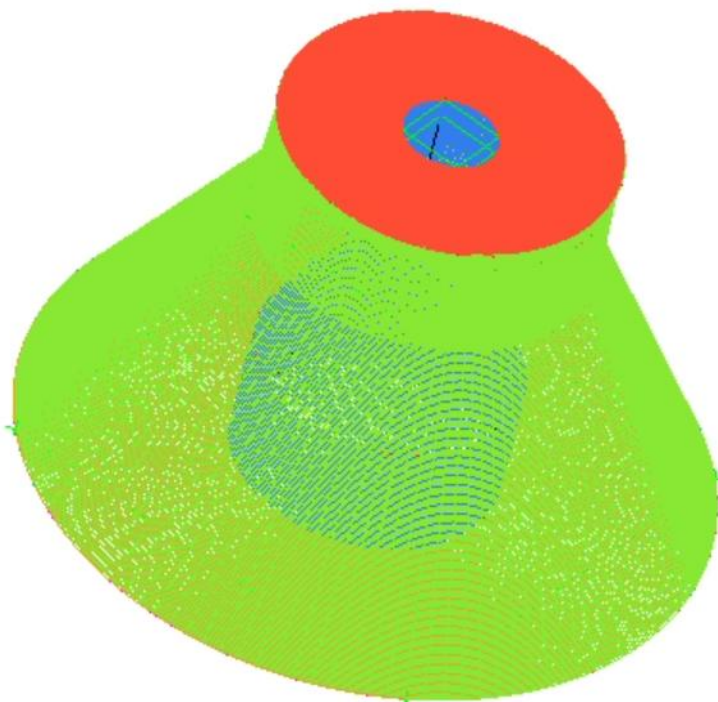


Figura 3.8: Mesh strutturata del solido poroso costruita in ICEM CFD 14.5.

solido poroso per identificarle correttamente. "Inflow Porous" rappresenta la superficie di ingresso del fluido, "Outflow Porous" indica la superficie di uscita dell'acqua, "Hub Porous" corrisponde all'albero e "Shroud Porous" rappresenta la cassa circostante.

Successivamente, per generare la mesh su questa geometria, abbiamo creato un blocco 2D planare adattato alle pareti dell'albero e della corona ed effettuato una trasformazione del blocco 2D in un blocco 3D tramite una rivoluzione di 360 gradi. Dopodichè abbiamo proceduto alla generazione della mesh e abbiamo eseguito un controllo della qualità della mesh per assicurarci che fosse adeguata, e successivamente abbiamo salvato il file nel formato Ansys CFX. Infine, abbiamo importato la mesh creata in CFX Pre per le successive fasi della simulazione.

Questo processo di meshing è stato eseguito con attenzione per garantire che la geometria del solido poroso fosse rappresentata in modo accurato e che la mesh generata fosse di buona qualità per ottenere risultati affidabili nella simulazione CFD.

3.2.4 Diffusore

Durante la generazione della mesh per il diffusore nell'impianto idroelettrico, abbiamo seguito un processo specifico. Abbiamo rinominato le diverse parti della geometria per una migliore identificazione, come "Inflow Diffusore" per l'ingresso dell'acqua, "Outflow Diffusore" per l'uscita dell'acqua e "Wall Diffusore" per le altre superfici. Successivamente, abbiamo creato un blocco 3D che racchiudeva la geometria del diffusore e generato due griglie O-grid, una per la superficie di ingresso e l'altra per il mozzo della girante. Questo ci ha permesso di ottenere una mesh strutturata e adattata alle caratteristiche del diffusore, come vediamo in Figura [3.9](#). Una volta impostato il setup della mesh, abbiamo generato la mesh effettiva del diffusore. Questo passo è fondamentale per garantire una simulazione CFD accurata, poiché una mesh di alta qualità rappresenta correttamente la geometria e permette una discretizzazione adeguata. In sintesi, abbiamo seguito una procedura dettagliata per generare una mesh di buona qualità per il diffusore, assicurandoci di rappresentare accuratamente la geometria e ottenere risultati affidabili durante la simulazione.

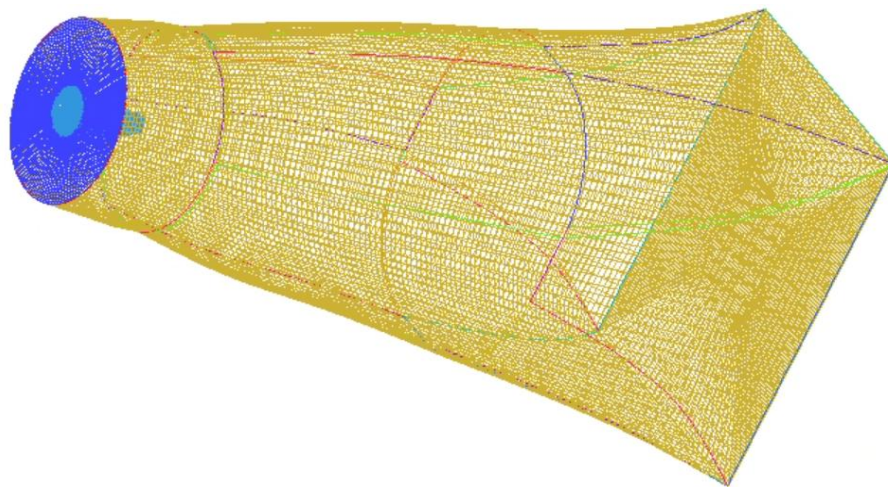


Figura 3.9: Mesh strutturata del diffusore costruita in ICEM CFD 14.5.

3.2.5 Scarico

Per generare la mesh sullo scarico nell'impianto idroelettrico, abbiamo seguito un processo simile a quello del diffusore. Abbiamo inizialmente rinominato correttamente le diverse parti della geometria, come "Inflow ScaricoAcqua" per l'ingresso dell'acqua, "Outflow ScaricoAcqua" per l'uscita dell'acqua e "Wall ScaricoAria", "Wall ScaricoAcqua" per le altre superfici.

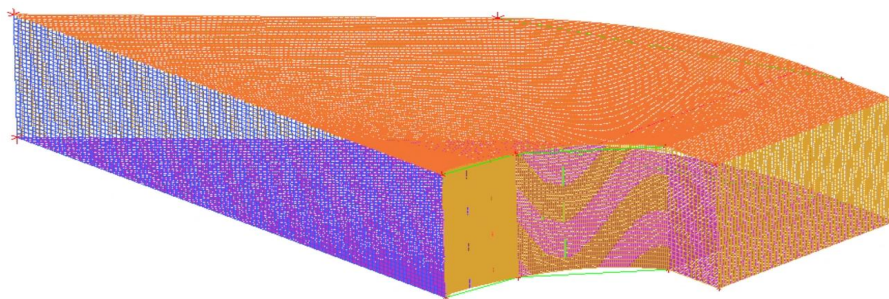


Figura 3.10: Mesh strutturata dello scarico (lato aria) costruita in ICEM CFD 14.5.

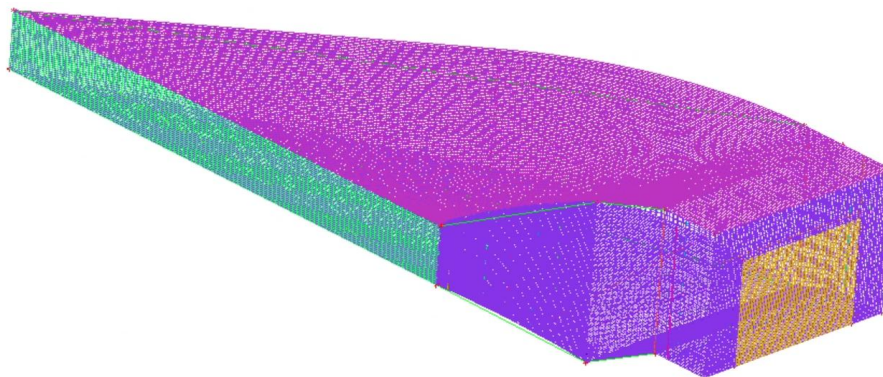


Figura 3.11: Mesh strutturata dello scarico (lato acqua) costruita in ICEM CFD 14.5.

Successivamente, abbiamo effettuato la suddivisione della geometria dello scarico in blocchi per associarla a una geometria più semplice, come un rettangolo. Questo ci ha permesso di creare un blocking adeguato per la mesh. Una volta completato il blocking, si passa alla pre-mesh, per inserire il numero corretto di nodi e di spacing.

All'interno di setup mesh è stato impostato un fattore di scala degli elementi globali di 0,07 e un valore della massima dimensione degli elementi di 1. La conferma della buona qualità della mesh viene data dalla verifica dell'angolo minimo degli spigoli, che sia maggiore di 20°. La mesh è pronta per essere importata nel pre-processore CFX-Pre 14.5, per l'assemblaggio con tutti gli altri componenti.

3.3 Mesh schiere palari

Per quanto riguarda le schiere palari, per la creazione della mesh viene utilizzato il software TurboGrid 14.5. Questo software è specificamente progettato per creare mesh esaedriche all'interno di volumi contenenti componenti palettati, offrendo un alto grado di automatizzazione nel processo. È possibile generare automaticamente tipologie di mesh personalizzate per la geometria oggetto dello studio, garantendo un'elevata precisione per condurre simulazioni efficaci nel solver.

La qualità della mesh riveste un'importanza fondamentale per ottenere risultati affidabili nella simulazione, nel minor tempo possibile. Utilizzando TurboGrid, vengono costruiti geometricamente i volumi fluidi tridimensionali da simulare. La geometria viene prima analizzata nella sua intera topologia e successivamente riprodotta come una mesh, ovvero una griglia che occupa il volume della geometria di partenza e forma un insieme di nodi che servono come base per l'applicazione delle formule di simulazione del CFD.

TurboGrid è in grado di costruire la geometria del volume fluido desiderato a partire da coordinate bidimensionali. Tuttavia, questa costruzione è possibile solo quando all'interno del volume è presente un profilo palettato. In alternativa, per componenti come la girante, è possibile importare direttamente la geometria costruita con appositi programmi per la costruzione delle pale, come BladeGen 14.5. Da qui, si può procedere con lo studio della topologia e infine con la meshatura.

TurboGrid consente di creare automaticamente mesh esaedriche di alta qualità, agendo sui parametri di controllo della topologia e successivamente intervenendo manualmente sul posizionamento dei nodi della mesh. Una volta creata la mesh per ogni componente, come il pre-distributore, il distributore e la girante, tramite TurboGrid

14.5, i file vengono salvati nel formato mesh per essere successivamente importati nel programma successivo, il CFX-Pre 14.5, per ulteriori fasi dell'analisi.

3.3.1 Pre-distributore

Per creare la mesh su questo organo, innanzitutto viene fatto un lavoro di semplificazione delle pale all'interno dell'ambiente di Space Claim, per avere una geometria più semplice da simulare e importata come solido in Geometry.

Per poter creare la mesh, in Space Claim è stato creato un asse di rotazione lungo l'asse z ed un piano meridiano, andando a ricalcare la forma dell'hub e dello shroud. Di seguito all'interno di Design Modeler viene creato un nuovo piano ZX e inserito un nuovo sketch, dove viene selezionata la faccia del condotto meridiano creato. Vengono poi generati 4 sketch dove si selezionano le linee di Inlet, Outlet, Hub e Shroud nel piano meridiano.

A questo punto viene creato il Flowpath, in cui si selezionano gli sketch nome per nome richiesti ed si inseriscono gli eventuali punti di taglio per seguire meglio lo span della pala. Nel caso del pre-distributore non sarà necessario ruotare le pale.

Come ultimo passaggio si genera Export Points, dove si seleziona il flow path creato precedentemente, si impone il numero pale pari a 4, blade row = 1 e blade surfaces dove si seleziona la superficie della pala. Dopodichè avviene l'esportazione in TurboGrid, verifico che le geometrie siano fully extended e cliccando su Mesh data cambio il numero di elementi. Per impostare il numero di elementi della mesh viene selezionato Target Passage Mesh Size, come vediamo in Figura [3.12](#) dove si imposta un milione di nodi per pala, in modo da ottenere circa 4 milioni di elementi globali.

Di seguito vediamo, in Figura [3.13](#) la raffigurazione del pre-distributore in turbo-grid e in Figura [3.14](#) la mesh generata su una delle pale :

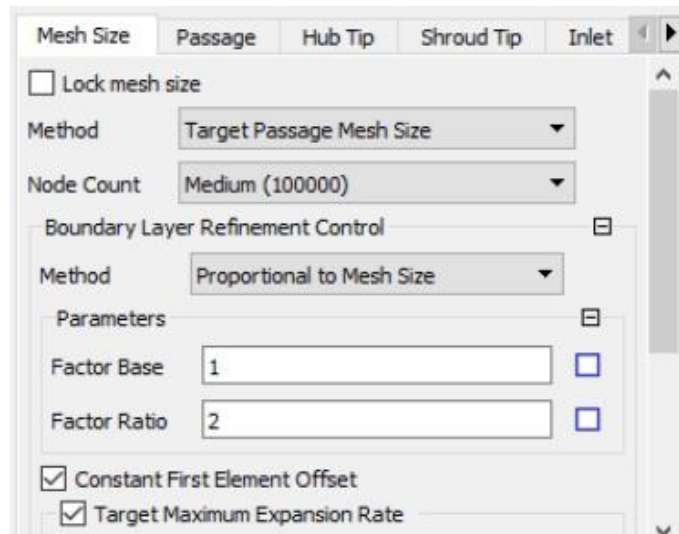


Figura 3.12: Parametri per dimensionare la mesh del pre-distributore.

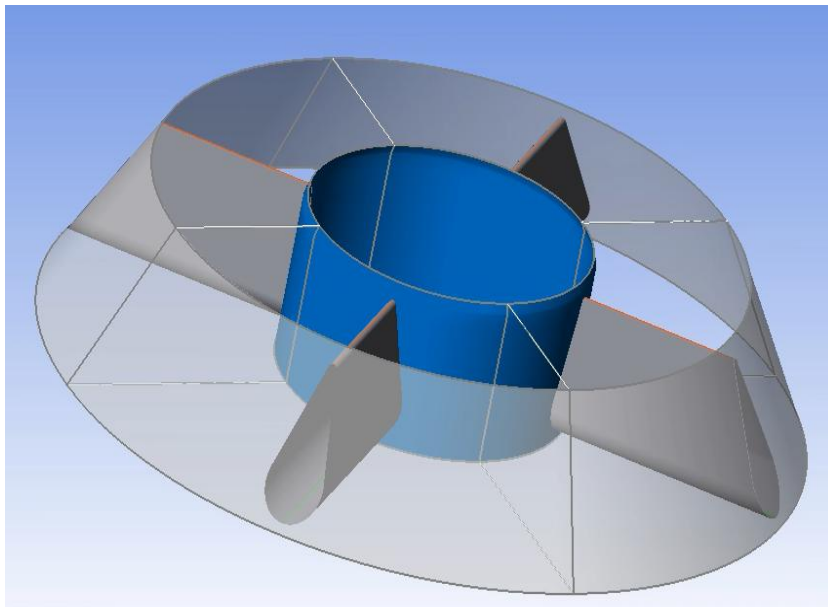


Figura 3.13: Geometria del pre-distributore completa di 4 pale in Turbogrid 14.5.

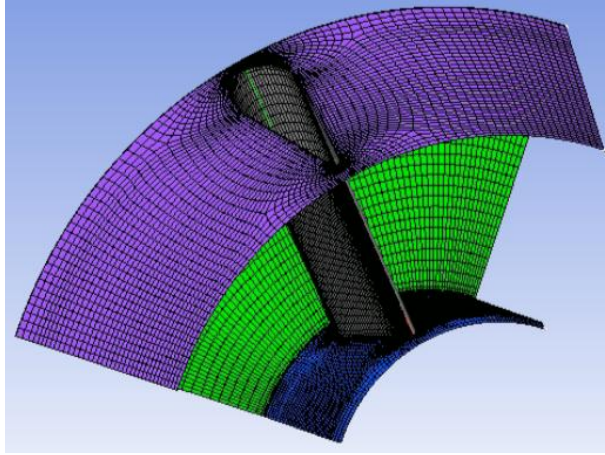


Figura 3.14: Predistributore meshato in Turbogrid 14.5.

3.3.2 Distributore

Per creare la mesh sul distributore, viene importata la geometria nel software di simulazione CFD e viene eseguito un procedimento simile a quello utilizzato per il predistributore. Tuttavia, in questo caso, le pale del distributore devono essere ruotate in base all'angolo di rotazione specificato, che nel nostro caso è $90,21^\circ$. Ciò viene fatto tramite una trasformazione di rotazione che coinvolge la pala e l'asse di rotazione. Successivamente, vengono generati i punti di esportazione con un numero di pale pari a 16 per rappresentare correttamente la geometria del distributore. Anche in questo caso per dimensionare il numero di elementi della mesh viene usato Target Passage Mesh Size, con un valore di 20.000 nodi per pala, il quale essendo riferito alla mesh di una sola pala andrà moltiplicato per le 16 pale del distributore, ottenendo circa un numero complessivo di elementi di 320.000.

La Figura [3.16](#) mostra una rappresentazione del distributore in TurboGrid, insieme a un esempio (Figura [3.17](#)) della mesh creata su una delle pale del distributore. Questo processo di meshatura consente di ottenere una rappresentazione accurata del distributore e delle sue caratteristiche geometriche, che sono cruciali per una simulazione CFD efficace e affidabile.

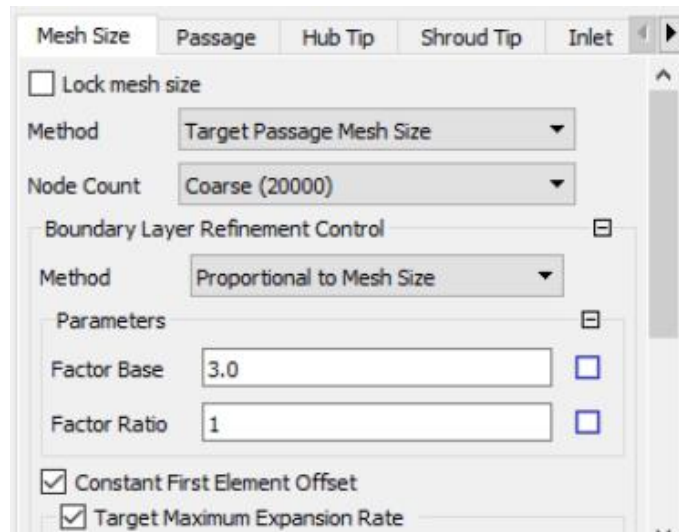


Figura 3.15: Parametri per dimensionare la mesh del distributore.

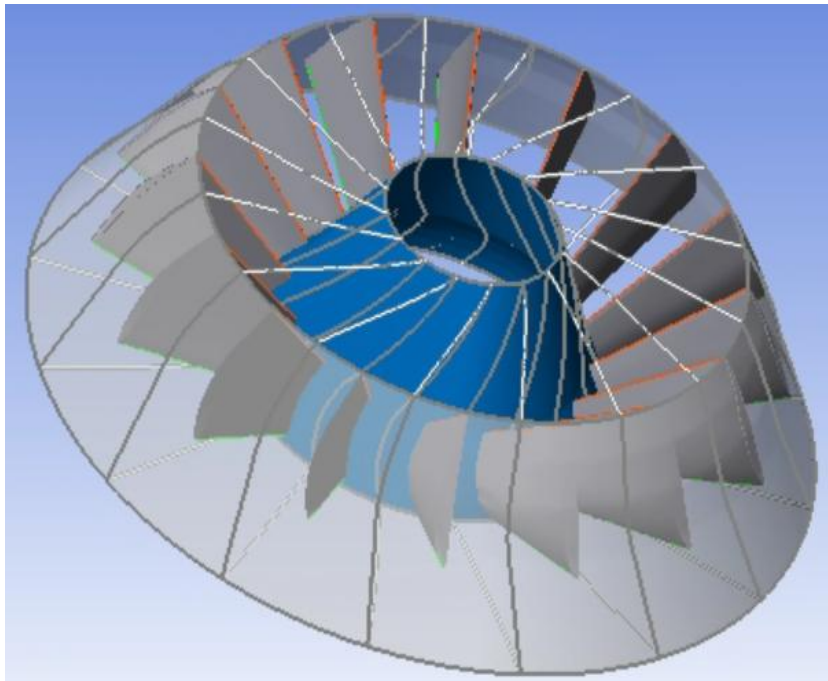


Figura 3.16: Geometria del distributore completa di 16 pale ($90,21^\circ$) in Turbogrid 14.5.

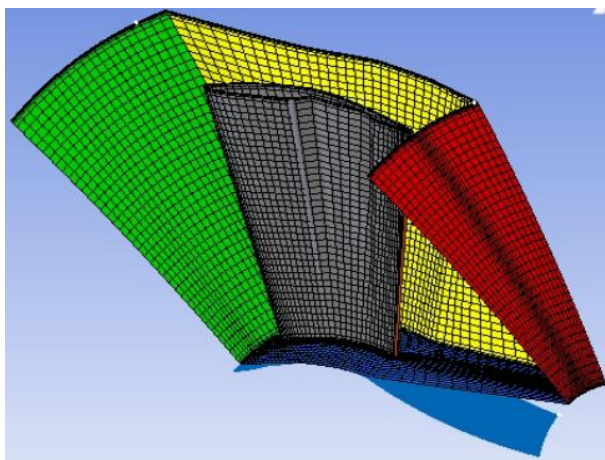


Figura 3.17: Distributore meshato in TurboGrid 14.5.

3.3.3 Girante

Nel processo di creazione della mesh per la girante, anche in questo caso si importa la geometria della girante e viene effettuata l'elaborazione in Design Modeler. In questo caso la pala verrà ruotata di un angolo di $38,61^\circ$ con il comando Transform Mesh Rotation. Successivamente, la geometria viene importata in TurboGrid, dove è possibile modificare il numero di elementi e generare la mesh. È importante impostare il valore dello "Shroud Tip" con Normal Distance di 0,15 cm. Tale valore consente di definire la distanza tra il bordo dello shroud e la superficie delle pale della turbina. Questa impostazione può essere importante per il corretto funzionamento della turbina e per evitare fenomeni di interazione tra le pale e lo shroud. All'interno di TurboGrid andiamo a settare il valore del Target Passage Mesh Size con il valore di 150.000 elementi, come vediamo nella descrizione [3.18](#).

Nella Figura [3.19](#), è possibile osservare una rappresentazione della girante completa in TurboGrid. Di seguito viene mostrata la mesh creata su una delle pale (Figura [3.20](#)). Inoltre, è importante considerare il passaggio relativo alla visualizzazione delle schiere palari. Quando si importano le schiere palari in CFX-Pre, verrà visualizzata solo una singola pala. Per visualizzare le pale complete, è necessario utilizzare il comando "Transform Mesh" (Figura [3.21](#)) e selezionare l'asse di rotazione intorno al quale verranno moltiplicate le pale e specificare il numero di copie desiderate.

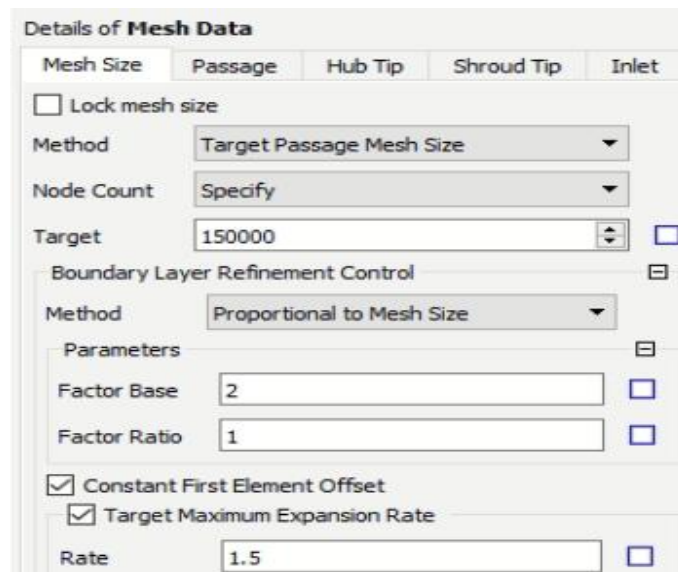


Figura 3.18: Parametri per dimensionare la mesh della girante.

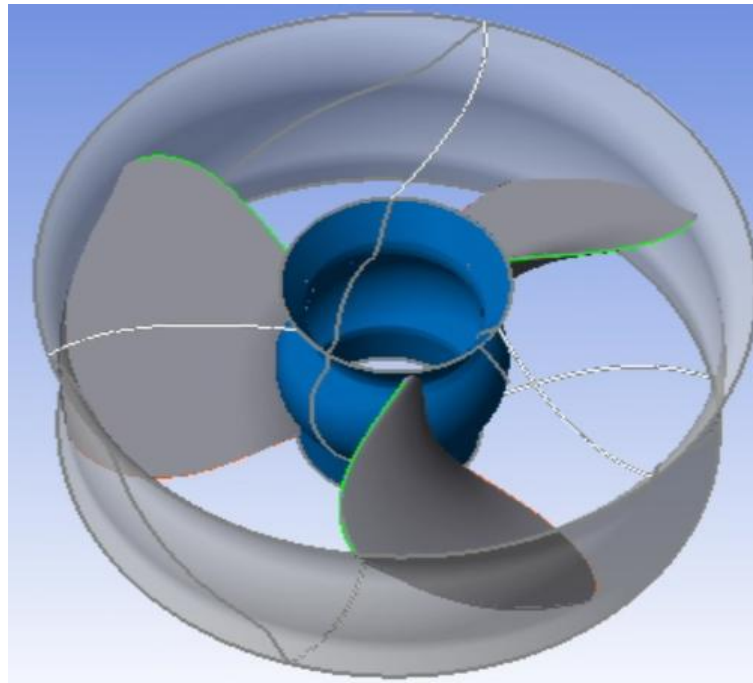


Figura 3.19: Geometria della girante completa di 3 pale ($38,61^\circ$) in Turbogrid 14.5.

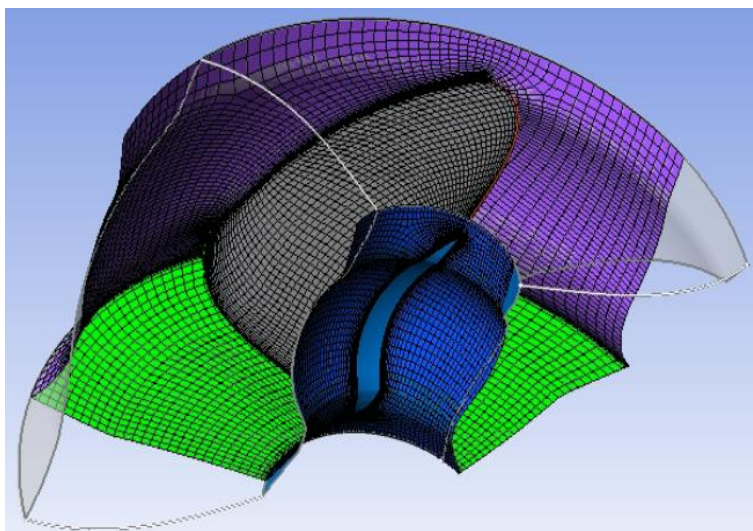


Figura 3.20: Girante meshata in Turbogrid 14.5.

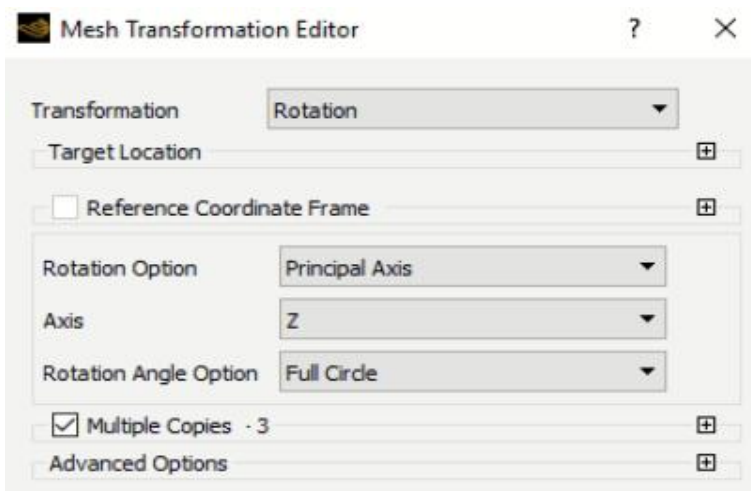


Figura 3.21: Transform mesh in CFX-Pre.

3.4 CFX-Pre 14.5

Durante questo passaggio, l'obiettivo è creare le condizioni al contorno appropriate per ottenere una simulazione che si avvicini il più possibile alla realtà. Le mesh dei volumi fluidi generate in precedenza utilizzando il software di meshing ICEM CFD vengono assemblate utilizzando il pre-processor CFX-Pre 14.5, al fine di ricostrui-

re l'impianto idroelettrico nella sua interezza. A ciascuna mesh viene assegnato un dominio e rinominato con il nome della geometria che stiamo analizzando, al fine di impostare le varie condizioni di flusso del fluido (regime stazionario o transitorio, moto rotatorio o statico, tipo di fluido, pressione di riferimento, perdite, ecc.). Lo stesso processo viene eseguito per le superfici esterne delle mesh, specificando se si tratta di semplici contorni o di interfacce con altre superfici, e se il fluido è in ingresso o in uscita. Attraverso l'uso di espressioni, è possibile definire il tipo di analisi che si desidera effettuare e, se necessario, derivare le equazioni corrispondenti o monitorare determinati parametri. Inoltre, è possibile stabilire i criteri di convergenza per determinare quando interrompere la simulazione, ad esempio impostando un numero massimo di iterazioni o un valore massimo di residuo. Infine, viene creato un file che può essere letto dal software successivo per eseguire la simulazione. Questo file conterrà tutte le informazioni necessarie sulle condizioni al contorno, le geometrie e i parametri di simulazione.

Questo processo di pre-processing è cruciale per preparare correttamente la simulazione CFD dell'impianto idroelettrico, garantendo che siano considerate le giuste condizioni al contorno e che siano definite in modo accurato le caratteristiche del flusso fluido all'interno del sistema.

3.4.1 Creazione dei domini

Dopo aver creato correttamente la mesh, il pre-processore associa automaticamente i nominativi alle superfici corrispondenti. Le mesh dei vari componenti vengono quindi importate e posizionate adiacenti l'una all'altra per garantire la presenza di interfacce che rispecchino la configurazione reale dei componenti all'interno dell'impianto. La prima operazione da eseguire è la specifica del tipo di deflusso che si desidera considerare, che può essere stazionario o tempo-variante. Facendo clic sul pulsante corrispondente (Analysis Type), si apre una finestra in cui è possibile impostare la condizione desiderata. Nel nostro caso è stato selezionato il moto transitorio (Transient), che è un'analisi che considera la variazione del flusso nel tempo. A differenza del moto stazionario, in cui il flusso è costante nel tempo, il moto transitorio

tiene conto dei cambiamenti dinamici nel flusso del fluido. Durante l'analisi, il sistema viene solitamente suddiviso in piccoli intervalli di tempo, chiamati Timesteps. Questo parametro indica la durata approssimativa di ogni iterazione nel processo di simulazione. Vediamo l'impostazione di questi parametri nell'immagine in allegato:

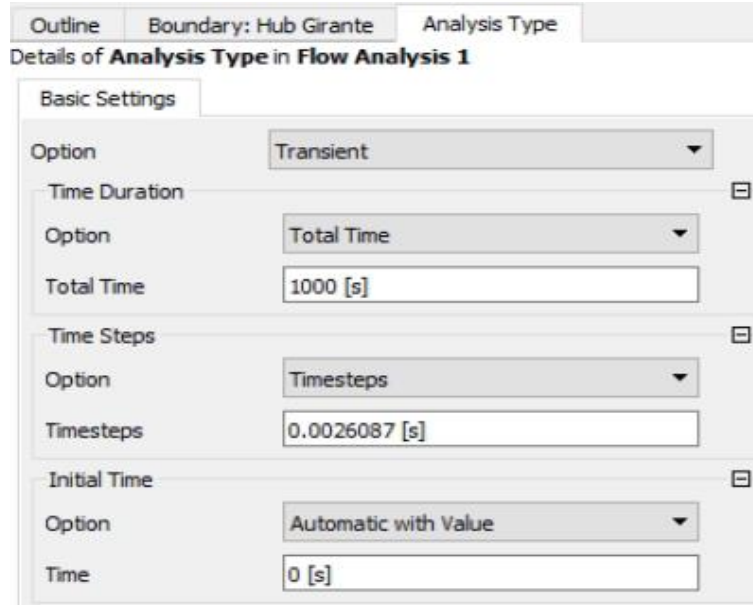


Figura 3.22: Impostazioni dell'Analysis type.

Nel caso di simulazione semplificata viene impostato un Timesteps di 0,5 s, mentre nel caso di simulazione complessa il valore del "Timesteps" di rotazione è pari a 0,0026087 s e viene calcolato con la seguente formula:

$$Timesteps = \frac{60 \cdot (2\pi \cdot N)}{N_{giri}} \quad (3.4)$$

Dove:

- 2π rappresenta un ciclo completo (360 gradi) di rotazione.
- N_{giri} indica il numero di giri al minuto (rpm) della girante di una turbina.
- N è il numero di intervalli temporali desiderati per una rotazione completa.

Cliccando poi su Domain è possibile creare i vari domini e assegnarli alle mesh esistenti. Premendo due volte su ogni dominio, compare la finestra di comando in cui devono essere specificati il tipo di fluido, lo stato di quiete o di moto del dominio ed il modello di viscosità che si intende utilizzare durante la simulazione. Nel caso in esame tutti i domini generati avevano un fluido multifase (acqua e aria). Per la descrizione del moto turbolento di un fluido è stato utilizzato il modello standard $k - \epsilon$, il quale è il modello matematico più comunemente usato in fluidodinamica computazionale per simulare le caratteristiche medie del flusso in condizioni turbolente. Fa parte dei modelli a due equazioni, e dà una descrizione generale della turbolenza utilizzando due equazioni alle derivate parziali per il trasporto di k (l'energia cinetica turbolenta) ed ϵ (la velocità di dissipazione dell'energia cinetica turbolenta).

Si sono poi dovute assegnare diverse impostazioni per il moto del dominio (Domain Motion):

- per la girante un moto rotativo (Rotating), in cui è stato specificato che si tratta di un movimento di rotazione attorno all'asse "z" con una velocità angolare di 230 rpm (N giri);
- il moto stazionario (Stationary) per tutti i restanti componenti.

3.4.2 Condizioni a contorno

Nell'analisi delle condizioni al contorno dei componenti, le superfici di "Wall" (parete), "Hub" (albero) e "Shroud" (cassa) vengono trattate come pareti solide attraverso le quali il fluido non può passare. Viene impostata la condizione di nessun slittamento sulle pareti, noto come "No slip wall condition", che implica che il fluido aderisce completamente alla superficie delle pareti e non scivola lungo di esse e la rugosità delle pareti come "Smooth Wall", che indica che la superficie delle pareti è liscia e non presenta asperità o irregolarità significative. Questa scelta è basata sull'assunzione che le pareti siano ben levigate e non influenzino in modo significativo il flusso. Nell'analisi delle condizioni al contorno, alle superfici chiamate "Inflow FiumeAria" (flusso in ingresso) del fiume, "Outflow ScaricoAria" (flusso in uscita), "Sky ScaricoAria" e "Sky ODP Aria" (cielo), verrà assegnata la condizione di "Opening"

(apertura). Questo implica che queste superfici sono aperte verso l'ambiente circostante, consentendo al fluido di fluire liberamente attraverso di esse. In particolare, alle superfici "Inflow Aria" verrà assegnata una condizione di flusso in ingresso, che può rappresentare il flusso d'acqua che entra nell'impianto idroelettrico. Alle superfici "Outflow Aria" verrà assegnata una condizione di flusso in uscita, che può rappresentare il flusso d'acqua che esce dall'impianto. Queste condizioni permettono al fluido di fluire liberamente attraverso queste superfici. Le superfici chiamate "Sky" rappresentano le superfici esposte al cielo, ad esempio la superficie superiore dell'impianto idroelettrico. Queste superfici avranno una condizione di apertura verso l'ambiente esterno e verrà assegnata loro una pressione atmosferica, poiché sono esposte all'atmosfera. Per le superfici di interesse, l'opzione "Entrainment" verrà impostata a 0 [Pa]. Questa impostazione consente al flusso di defluire in qualsiasi direzione senza restrizioni specifiche. Il flusso non sarà obbligato ad essere normale alla superficie o a fluire in una direzione specifica. Ciò fornisce una maggiore flessibilità nel modellare il comportamento del flusso attorno a queste superfici.

Riguardo l' "Inflow" ed l' "Outflow", è importante definire le superfici di ingresso al fiume e le superfici di uscita dello scarico, lato aria e lato acqua. Nel dominio del fiume lato acqua, il valore di portata imposta all' "Inflow FiumeAcqua" è pari alla portata nominale di $15 \text{ m}^3/\text{s}$ elaborata dalla turbina (Figura 3.23). Nella superficie di "Outflow FiumeAcqua" del fiume, il valore di portata di acqua è pari al solo valore del deflusso minimo vitale di $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$. (Figura 3.24). Nella superficie di "Outflow ScaricoAcqua" dello scarico, il valore della portata dell'acqua è determinato utilizzando la pressione statica, che viene calcolata mediante un'espressione algebrica. Questa espressione è rappresentata nella Figura 3.25 e tiene conto di diversi fattori.

Per calcolare la pressione statica, si parte dalla pressione atmosferica di riferimento di 1 [bar], a cui viene aggiunta la quota di 2,03 m lungo l'asse Y, che rappresenta la coordinata del pelo libero dell'acqua. Questo valore viene moltiplicato per g, che rappresenta l'accelerazione di gravità che agisce lungo l'asse Y. Infine, si considera la densità dell'acqua, che è pari a $997 \text{ kg}/\text{m}^3$.

Utilizzando questa espressione, è possibile determinare il valore della pressione statica, che a sua volta permette di definire la portata dell'acqua nella superficie di

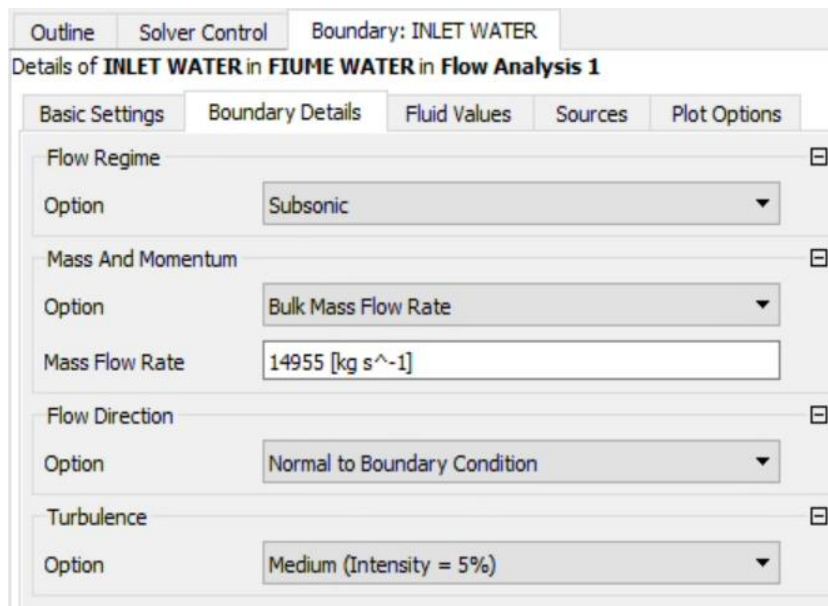


Figura 3.23: Boundary conditions all'ingresso del fiume.

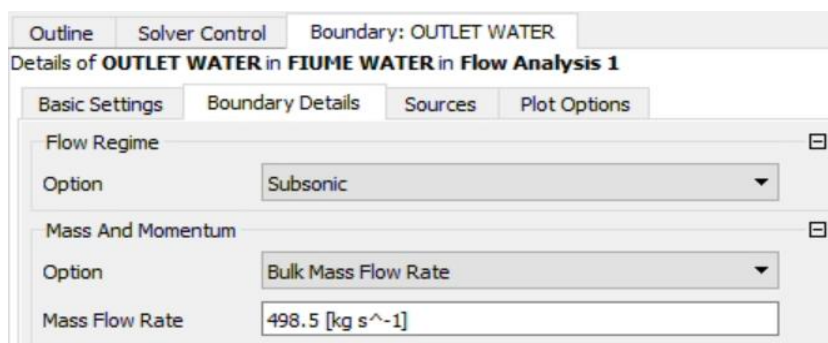


Figura 3.24: Boundary conditions all'uscita del fiume.

”Outflow ScaricoAcqua” dello scarico.

Nel contesto dell'analisi del sistema, le superfici che fungono da ingresso e uscita per i componenti dell'impianto vengono definite come interfacce (Domain Interface). Queste interfacce collegano le diverse parti dell'impianto consentendo al fluido di attraversare le superfici che si affacciano su due domini differenti.

Esistono diversi tipi di interfacce:

- le interfacce Fluid-Fluid permettono al fluido di attraversare le superfici affac-

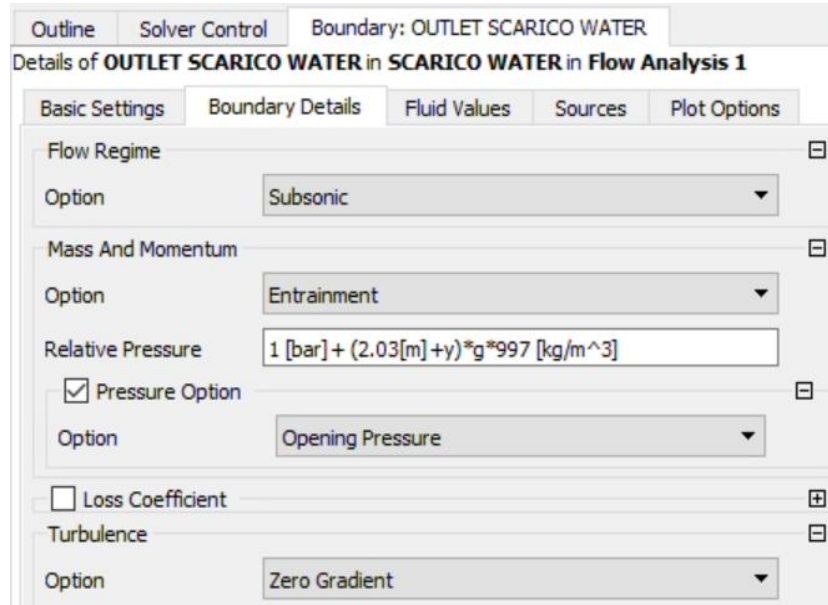


Figura 3.25: Boundary conditions all'uscita dello scarico dell'impianto.

ciate di due domini diversi. Nel caso in esame sono state utilizzate per collegare tra loro il raccordo tra il fiume e l'opera di pesa, l'interfaccia tra la porzione di fiume lato aria e lato acqua, l'interfaccia tra la porzione di opera di presa lato aria e lato acqua, il raccordo tra diffusore e scarico e l'interfaccia tra la porzione di scarico lato aria e lato acqua.

Per le interfacce tra le componenti statoriche e rotoriche, ovvero tra distributore e girante, tra girante e diffusore, trattandosi di domini in moto relativo tra di loro è stato necessario assegnare in Frame Change l'opzione Transient Rotor Blade;

- le interfacce Fluid-Porous vengono utilizzate per collegare il solido poroso con dominio Porous, all'opera di presa e al diffusore, entrambi con dominio di tipo Fluid;
- le interfacce "Tip" sono semplicemente un General Connection per definire la presenza della superficie di tip nelle mesh palettate.

All'uscita dalla girante, è importante considerare i moti vorticosi nella corrente causati dall'interazione del fluido con la geometria della palettatura, che causano un'inversione locale del flusso dell'acqua. Questo fenomeno, che è del tutto normale in una turbomacchina reale, deve essere correttamente interpretato dal software durante la simulazione. La decisione di impostare l'uscita del tubo di scarico come un'apertura ("Opening") è stata presa per consentire al fluido di rientrare nel dominio senza impedimenti a causa della presenza di ricircoli, altrimenti la simulazione risulterebbe poco realistica. Vediamo dunque la rappresentazione delle boundary conditions dell'impianto appena descritte:

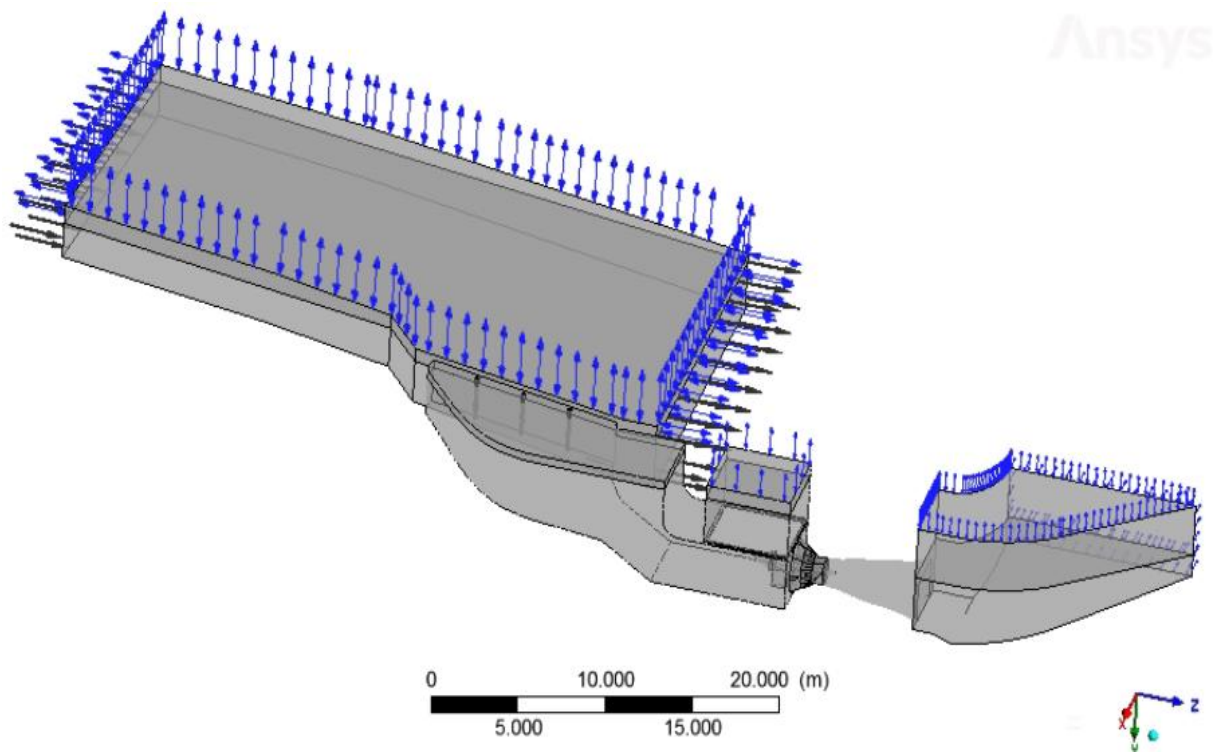


Figura 3.26: Vista prospettica dei domini in CFX-Pre.

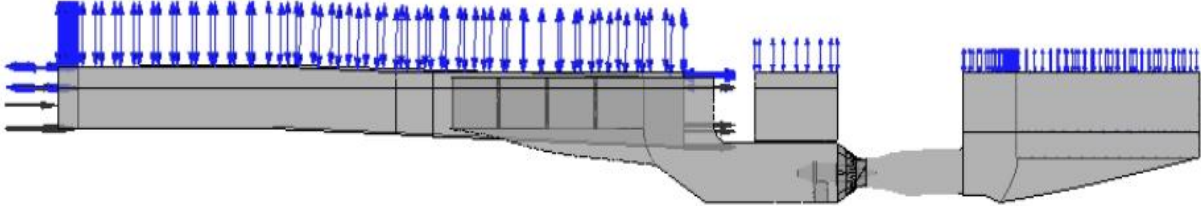


Figura 3.27: Vista laterale domini in CFX-Pre.

3.4.3 L'inserimento delle Expressions

La funzione "Expressions" nella simulazione consente di definire espressioni personalizzate che possono essere utilizzate per calcolare valori o condizioni specifiche all'interno del modello. Le espressioni possono coinvolgere variabili, costanti, funzioni matematiche e operatori per eseguire calcoli complessi. Le espressioni possono essere utilizzate per definire condizioni di inizializzazione, impostare condizioni al contorno, definire profili di velocità o temperatura, calcolare grandezze derivate e molto altro. Consentono di personalizzare il comportamento del modello in base alle specifiche esigenze di simulazione. Nella simulazione sono state definite e utilizzate le seguenti espressioni:

- "Ngiri": $230 [rev\ min^{-1}]$
rappresenta la velocità angolare di rotazione attorno all'asse "z" della girante.
- "Npale": 3
indica il numero di pale della girante.
- "OverAllTorque": $torque\ z()@REGION: Girante\ 3 + torque\ z()@REGION: Girante\ 3\ 2 + torque\ z()@REGION: Girante\ 3\ 3 + torque\ z()@REGION: HUB\ Girante\ 3 + torque\ z()@REGION: HUB\ Girante\ 3\ 2 + torque\ z()@REGION: HUB\ Girante\ 3\ 3$ rappresenta la coppia complessiva generata dalla girante.
- "P": $M * Ngiri * 2 * pi / 60 [s]$
indica la potenza generata dalla turbina.

Queste espressioni sono state definite per calcolare e monitorare valori chiave come velocità di rotazione, coppia e potenza all'interno del modello di simulazione.

3.4.4 Output Control

Nel software ANSYS CFX-Pre, l'Output Control consente di definire espressioni per monitorare e analizzare specifiche grandezze durante la simulazione. Le seguenti espressioni sono utilizzate per il monitoraggio di diverse quantità relative al flusso dell'acqua attraverso regioni e interfacce specifiche nel dominio di simulazione. Il CFX Expression Language (CEL) è il linguaggio utilizzato per definire tali espressioni e algoritmi all'interno del software CFX. Con l'uso di CEL, è possibile creare espressioni personalizzate per ottenere informazioni dettagliate sul flusso. Ecco una descrizione delle espressioni utilizzate nella simulazione:

- **Head** `Acqua.massFlowAve(Total Pressure in Stn Frame)@REGION: Outflow ODP Acqua - Acqua.massFlowAve(Total Pressure in Stn Frame)@REGION: Inflow Diffusore`
 Questa espressione calcola la differenza tra il flusso massico medio dell'acqua all'uscita dell'opera di presa (REGION: Outflow ODP Acqua) e il flusso massico medio all'ingresso del diffusore (REGION: Inflow Diffusore) nel sistema, entrambi valutati rispetto alla pressione totale nel sistema di riferimento stazionario (Stn Frame).
- **MassFlow InletFiume** `abs(Acqua.massFlow())@REGION: Inflow FiumeAcqua)`
 Questa espressione restituisce il valore assoluto del flusso massico dell'acqua all'ingresso del fiume (REGION: Inflow FiumeAcqua).
- **MassFlow InflowTurbine** `abs(Acqua.massFlow())@REGION: Outflow ODP Acqua`
 Questa espressione restituisce il valore assoluto del flusso massico dell'acqua all'uscita dall'opera di presa (REGIONE: Outflow ODP Acqua).

- **MassFlow OutflowFiume** `abs(Acqua.massFlow()@REGION: Outflow FiumeAcqua2)`:
 Questa espressione restituisce il valore assoluto del flusso massico dell'acqua che prosegue il naturale corso del fiume (REGION: Outflow FiumeAcqua2).
- **MassFlow OutflowTurbina** `abs(Acqua.massFlow()@REGION: Inflow Diffusore)`
 Questa espressione restituisce il valore assoluto del flusso massico dell'acqua all'ingresso del diffusore (REGION: Inflow Diffusore).
- **MassFlow Scarico** `abs(Acqua.massFlow()@REGION: Outflow ScaricoAcqua)`
 Questa espressione restituisce il valore assoluto del flusso massico dell'acqua all'uscita dello scarico (REGION:"Outflow ScaricoAcqua").
- **Pressure Presa** `areaAve(Pressure)@REGION: Interfaccia ODP Acqua`
 Questa espressione calcola la media dell'area ponderata della pressione sull'interfaccia dell'opera di presa lato acqua (REGION: Interfaccia ODP Acqua).
- **Pressure River** `areaAve(Pressure)@REGION: Interfaccia FiumeAcqua`
 Questa espressione calcola la media dell'area ponderata della pressione sull'interfaccia della regione del fiume lato acqua (REGION: Interfaccia FiumeAcqua).
- **Pressure Scarico** `areaAve(Pressure)@REGION: Interfaccia ScaricoAcqua`
 Questa espressione calcola la media dell'area ponderata della pressione sull'interfaccia della regione dello scarico lato acqua (REGION: Interfaccia ScaricoAcqua).
- **TotalEnergy InletTurbina** `Acqua.massFlowAve(Total Pressure in Stn Frame)@REGION: Outflow ODP Acqua`
 Questa espressione restituisce il flusso massico medio dell'acqua all'uscita dall'opera di presa (REGION: Outflow ODP Acqua), valutato rispetto alla pressione totale nel sistema di riferimento stazionario (Stn Frame).

- **TotalEnergy OutletTurbina** `Acqua.massFlowAve(Total Pressure in Stn Frame)@REGION: Inflow Diffusore`

Questa espressione restituisce il flusso massico medio dell'acqua all'ingresso del diffusore (REGION: Inflow Diffusore), valutato rispetto alla pressione totale nel sistema di riferimento stazionario (Stn Frame).

Nella simulazione complessa, oltre alle espressioni appena definite è necessario monitorare la coppia generata dalla turbina attraverso le seguenti espressioni:

- **Torque OverAllTorque**
Questa espressione ti fornisce la coppia totale generata dal sistema nel suo complesso.
- **Torque Blade 01** `torque z()@REGION: BLADE 3`
Questa espressione ti restituisce la componente della coppia generata dalla singola pala numero 1.
- **Torque Blade 02** `torque z()@REGION:BLADE 3 2`
Questa espressione ti restituisce la componente della coppia generata dalla singola pala numero 2.
- **Torque Blade 03** `torque z()@REGION:BLADE 3 3`
Questa espressione ti restituisce la componente della coppia generata dalla singola pala numero 3.

Le espressioni menzionate ti offrono la possibilità di esaminare il comportamento del flusso all'interno del dominio simulato nel corso del tempo. Queste espressioni consentono di ottenere informazioni dettagliate sul flusso di massa, la pressione e altre grandezze rilevanti nelle regioni e interfacce specificate durante la simulazione. Monitorare l'andamento della coppia nel tempo ti permette di valutare l'efficienza e le prestazioni del sistema.

Per comprendere meglio le espressioni utilizzate nella simulazione è stata creata una legenda del CFX Expression Language (CEL):

- "massFlow()@"Location": restituisce la portata di massa attraverso una determinata boundary, valutata in una posizione specifica indicata come "Location".
- "abs("Expression")": restituisce il valore assoluto di un'espressione, che può essere una variabile o una combinazione di variabili.
- "massFlowAve("var")@"Location": restituisce il valore medio di una variabile o espressione considerando la portata di massa durante la simulazione. La valutazione avviene in una posizione specificata come "Location".
- "Total Pressure in Stn Frame": rappresenta il valore della pressione totale nel sistema di riferimento stazionario. Questo valore tiene conto della pressione statica e della pressione dinamica.
- "torque z()@"Location": rappresenta la componente "z" del vettore Coppia lungo una determinata boundary. Viene valutata in una posizione specificata come "Location".

Queste espressioni sono utilizzate per calcolare valori specifici durante la simulazione e consentono di ottenere informazioni dettagliate sul flusso, sulla pressione e su altre grandezze di interesse. Inoltre, l'analisi delle grandezze associate al flusso, come il flusso di massa e la pressione, può fornire una visione dettagliata del comportamento del fluido all'interno dell'impianto. La legenda può aiutare a capire il significato delle espressioni utilizzate durante l'analisi dei risultati.

3.4.5 Condizioni di convergenza

Per garantire una soluzione convergente e affidabile, sono stati definiti criteri di convergenza nel processo di simulazione. Questi criteri includono un limite massimo di iterazioni di 100, e un valore minimo per i residui massimi, pari a 10^{-5} . L'obiettivo di tali criteri è di raggiungere una soluzione stabile e precisa, in modo che i risultati della simulazione siano accurati e rappresentativi del comportamento del sistema reale. Per accelerare il processo di simulazione, viene utilizzato il parallelismo, ovvero l'esecuzione simultanea del calcolo su più processori. È possibile settarlo

attraverso il sottomenù "Parallel Environment" e selezionando la modalità di esecuzione desiderata ("Run Mode"). Inoltre, viene impostato il numero di partizioni pari a 25, parametro scelto in base al numero di nodi complessivi delle diverse mesh dell'impianto. Questo valore contribuisce a una suddivisione efficiente del calcolo tra i processori. Inoltre, viene tarato il "maximum loops coefficient" (coefficiente dei cicli massimi), che è un parametro utilizzato per controllare il numero massimo di iterazioni consentite durante il processo di convergenza del solver nel software di simulazione CFD, con una variazione da 1 a 5. La scelta dipende dalla complessità del sistema e dalle specifiche dell'applicazione. Una volta che tutti i parametri necessari sono stati impostati, viene avviato il solutore, noto anche come Solver Manager.

Capitolo 4

Risultati

Il post-processore CFX-Post 14.5 permette di visualizzare i risultati della simulazione, offrendo la possibilità di creare grafici e tabelle con parametri di interesse. Questo programma va oltre la semplice visualizzazione dei risultati, consentendo di ottenere informazioni utili sulla distribuzione dei valori dei parametri all'interno dei componenti in analisi.

Il solutore CFX utilizza la tecnica dei volumi finiti per risolvere le equazioni di Navier-Stokes in forma conservativa. La geometria del dominio viene discretizzata in una mesh, semplificando i componenti complessi in forme più semplici. L'integrazione numerica delle equazioni avviene sui volumi di controllo definiti dalla mesh. L'applicazione del teorema della divergenza di Gauss permette di convertire gli integrali di volume in integrali di superficie, semplificando ulteriormente le equazioni. Durante l'integrazione numerica, i valori delle variabili vengono calcolati e memorizzati ai nodi della mesh. Questo processo viene eseguito dal solutore CFX utilizzando un potente calcolatore. Al termine dell'esecuzione, vengono ottenuti valori approssimati per ogni grandezza di interesse, calcolati per tutti i nodi del dominio fluido. In aggiunta alle informazioni fornite, come abbiamo già introdotto negli altri capitoli, è importante menzionare che verranno eseguite due simulazioni sull'impianto idroelettrico: *una simulazione semplificata e una complessa*.

4.1 Simulazione CFD Semplificata

La simulazione semplificata è una versione ridotta e approssimata della simulazione complessa dell'impianto idroelettrico, con semplificazioni e approssimazioni per ridurre la complessità computazionale. Utilizza modelli matematici semplificati e ipotesi riduttive per valutare l'efficienza globale, la potenza generata o le perdite di carico. È utile per una valutazione preliminare dell'impianto idroelettrico, consentendo di ottenere risultati in tempi più brevi, ma potrebbe non fornire risultati altamente accurati o dettagliati.

Dal grafico dei residui in Figura 4.1, abbiamo che i valori si siano mantenuti costanti durante l'evoluzione delle iterazioni, ciò suggerisce che la simulazione si sia stabilizzata e i risultati ottenuti siano attendibili. Questo indica che le equazioni di bilancio

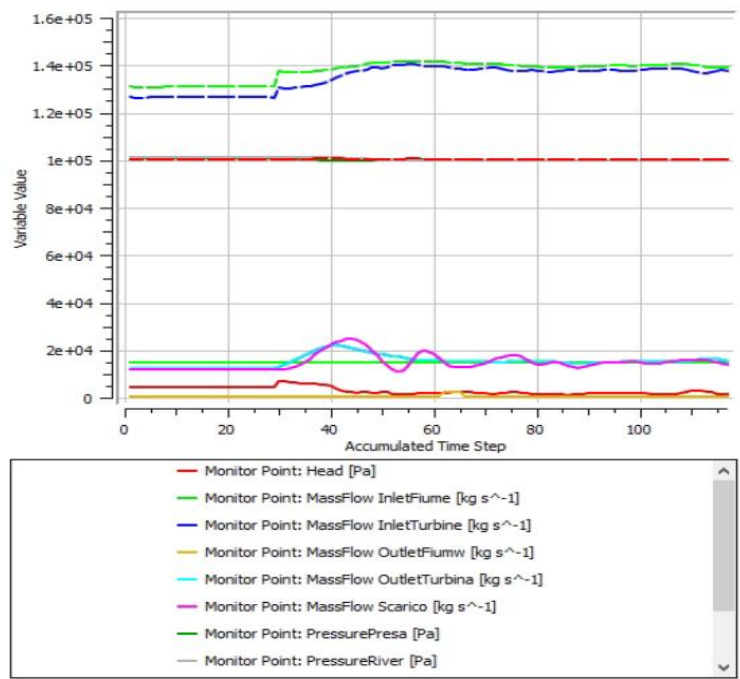


Figura 4.1: Andamento dei residui nella simulazione.

sono state risolte in modo accurato e i parametri di interesse, come la portata, la caduta e il rendimento, possono essere considerati affidabili. Mentre la verifica che i dati siano attendibili deriva da un consulto al grafico del “Momentum and Mass”

presente in Solver Manager 14.5, dal quale si può verificare se siano stati rispettati i criteri di convergenza, o se semplicemente la simulazione si sia completata tramite tutte le 100 iterazioni.

Alla fine della simulazione CFD, vengono generati due file con estensioni rispettivamente *.out e *.res. Il file *.out può essere aperto con un editor di testo e contiene il listato dell'esecuzione della simulazione e fornisce informazioni sul numero di iterazioni e i valori dei residui raggiunti. Il file *.res è il file che contiene i risultati completi della simulazione CFD. Per visualizzare i risultati, è possibile utilizzare la funzione "Load Results" e specificare il nome del file *.res che si desidera aprire. Una volta caricato il file, si accede all'ambiente di lavoro di CFD-Post 14.5, dove è possibile analizzare, visualizzare i risultati della simulazione.

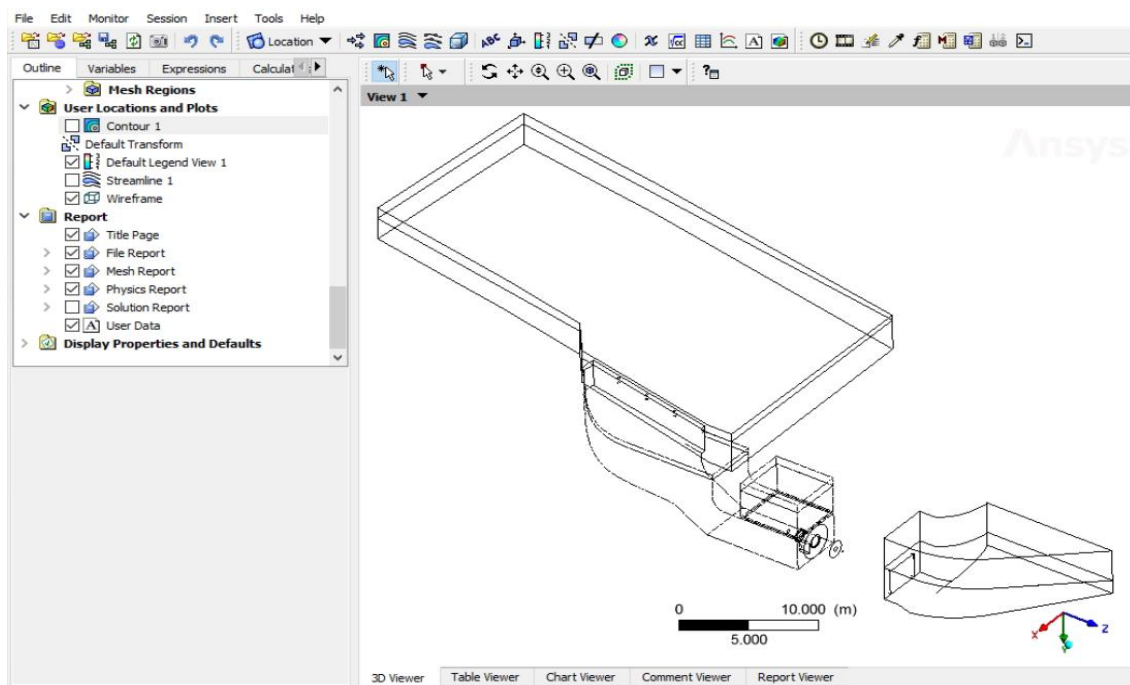


Figura 4.2: Schermata dei risultati in CFX-Post.

4.1.1 Visualizzazione dei risultati

All'interno di CFD-Post, il comando "Stream" consente di visualizzare le streamline, ovvero le linee che tracciano il percorso seguito dalle particelle di fluido nel loro moto attraverso l'impianto. Questo strumento è utile per analizzare l'interazione delle streamline con i diversi componenti dell'impianto e ottenere informazioni sulla distribuzione di grandezze come la pressione e la velocità lungo il percorso.

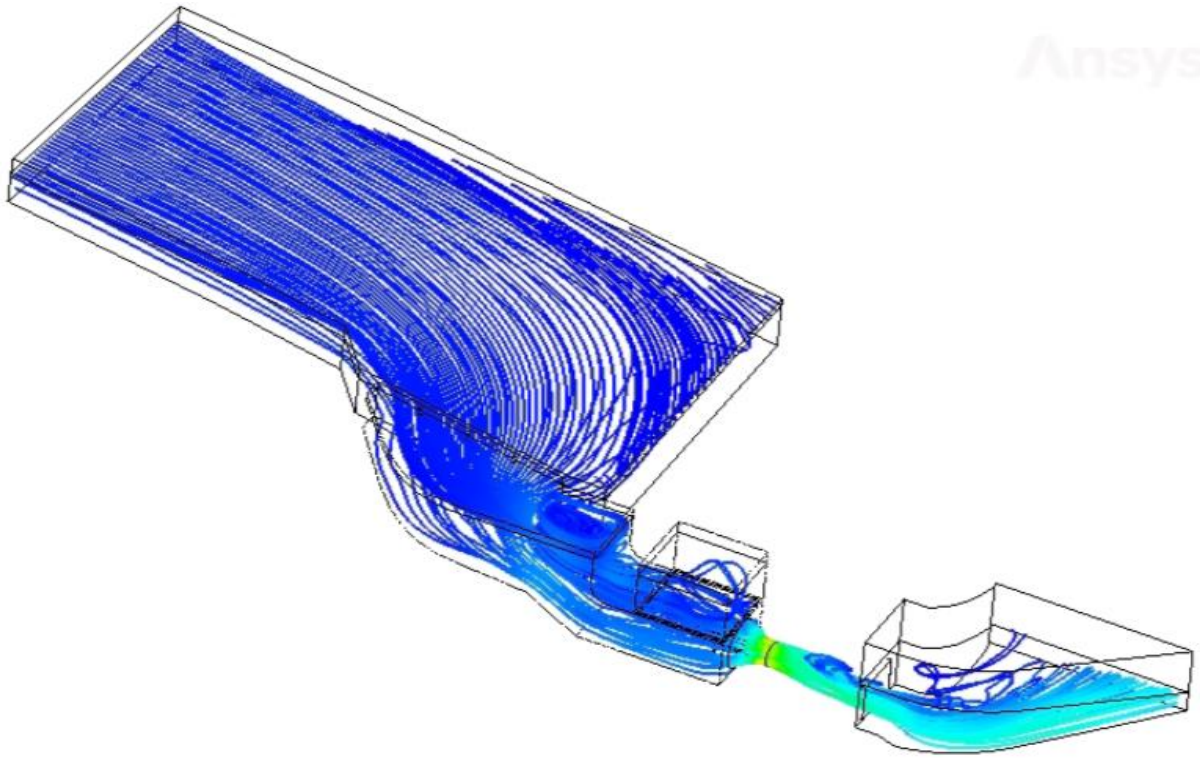


Figura 4.3: Andamento delle Streamline nell'impianto idroelettrico.

Dalla Figura [4.3](#) si può osservare l'andamento delle streamline lungo tutto il percorso dell'impianto idroelettrico. Le streamline entrano nell'opera di presa provenendo dal fiume. L'ingresso laterale dell'opera di presa crea un cambiamento brusco di direzione e delle deviazioni nette nel flusso. La presenza di un ingresso con un angolo di circa 90° genera un moto centripeto che influisce sul campo di moto del flusso. Probabilmente la presenza di paratoie, ovvero di elementi che hanno la funzione di

controllare, regolare o deviare il flusso di un fluido, lungo tutta la sponda del fiume influisce negativamente sull'ingresso dell'acqua nel fiume. Dalla Figura 4.4 vediamo chiaramente la presenza di vortici nell'opera di presa.

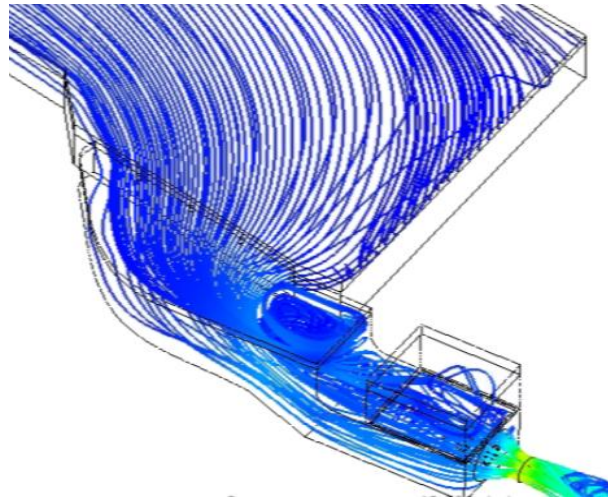


Figura 4.4: Flusso in ingresso all'opera di presa.

Nel percorso dell'impianto idroelettrico, dopo il passaggio attraverso il solido poroso, il flusso viene accelerato grazie alla presenza del condotto convergente. Successivamente, il flusso attraversa il diffusore, dove viene rapidamente decelerato e raggiunge lo scarico. Questo cambiamento repentino di velocità e direzione del flusso fa sì che l'acqua tenda a fluire dalle zone ad alta pressione verso l'area a bassa pressione dello scarico. Questo movimento circolare dell'acqua all'esterno dello scarico determina la formazione dei moti di ricircolo, che sono visibili nella Figura 4.5. I moti di ricircolo sono causati dalla geometria del sistema, in particolare dalla curva a gomito che non permette al flusso di uscire in maniera simmetrica.

Oltre all'analisi delle streamline, è possibile utilizzare la variabile "Aria Eddy Viscosity" (viscosità turbolenta dell'aria) in CFX-Post per ottenere ulteriori informazioni sulla turbolenza presente lungo il percorso dell'impianto idroelettrico. La viscosità turbolenta è una misura della diffusività del flusso turbolento e riflette l'intensità dei vortici presenti nel dominio di simulazione. Selezionando la variabile "Aria Eddy Viscosity" e visualizzandola nella Figura 4.6, è possibile osservare chiaramente l'alta

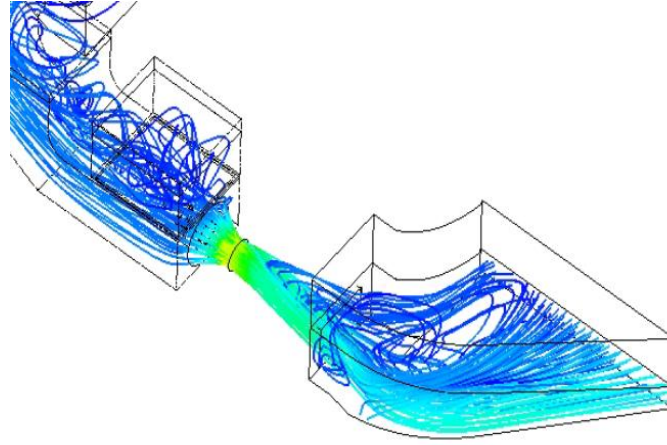


Figura 4.5: Flusso in ingresso allo scarico.

intensità dei vortici lungo tutto il percorso dell'impianto. Questa visualizzazione fornisce una rappresentazione grafica della distribuzione e dell'andamento della turbolenza all'interno del flusso. La comprensione di tali effetti è fondamentale per ottimizzare il design e il funzionamento dell'impianto idroelettrico al fine di massimizzare le prestazioni e ridurre le inefficienze.

Nella simulazione CFD dell'impianto idroelettrico, è possibile analizzare l'andamento di parametri, come la pressione e la velocità delle streamline utilizzando la funzione "Contour", con la quale è possibile visualizzare i gradienti della grandezza selezionata, in quanto viene automaticamente assegnato un colore per ogni banda di valori che questa assume. Questa rappresentazione grafica fornisce una chiara visualizzazione di come queste grandezze variano all'interno del dominio di simulazione, consentendo di identificare zone di alta o bassa velocità e individuare eventuali fluttuazioni o anomalie.

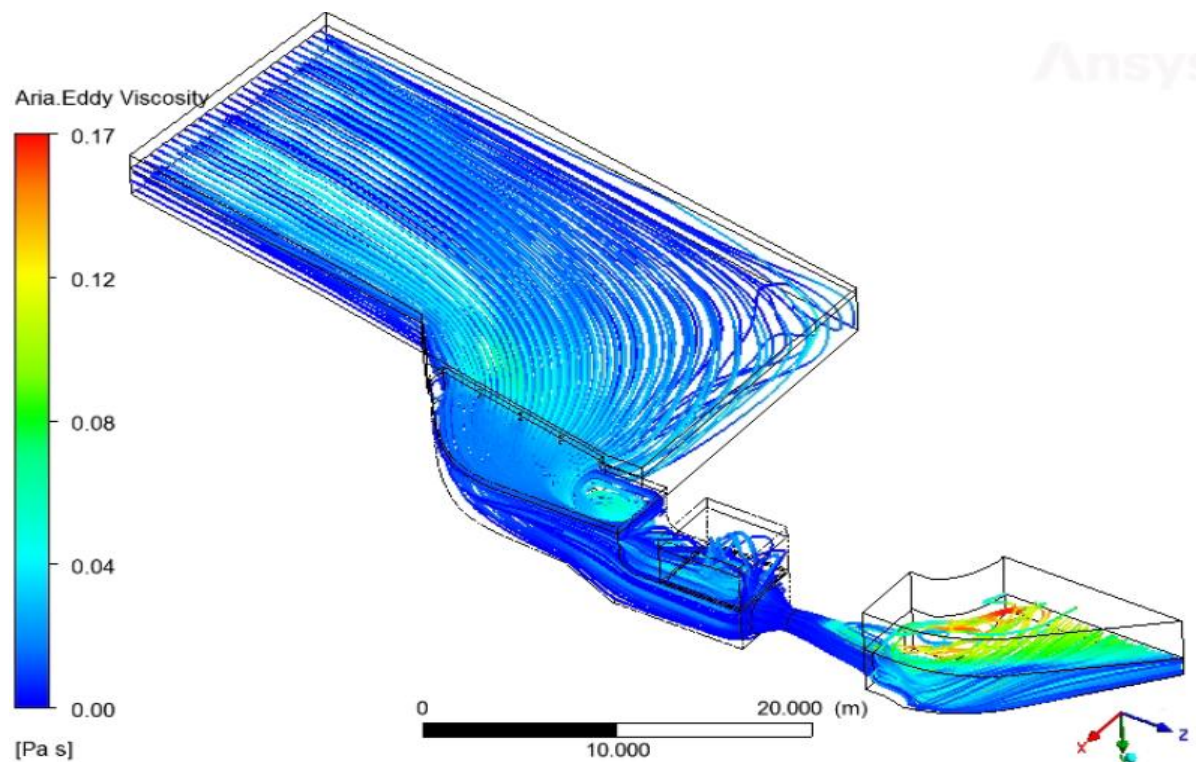


Figura 4.6: Moto turbolento presente nell'impianto.

4.1.2 Velocità all'ingresso del solido poroso

Tramite la funzione "Variable" si possono definire tutte le grandezze necessarie allo studio della macchina. Tramite il parametro acqua superficial velocity, che rappresenta la velocità media del flusso di acqua, andiamo ad analizzare le caratteristiche del flusso in due posizioni cruciali dell'impianto, ovvero all'ingresso e all'uscita del solido poroso. All'ingresso del solido poroso abbiamo una distribuzione non uniforme della velocità media del flusso d'acqua prima che interagisca con il solido poroso. Vediamo dalla Figura 4.8 e dalla Figura 4.9 la distribuzione non uniforme delle componenti di velocità del flusso sia in maniera radiale (asse x), che tangenziale (asse y). La componente radiale indica il flusso del fluido in direzione perpendicolare all'asse di rotazione della turbina, mentre quella tangenziale indica il flusso del fluido lungo la circonferenza della turbina.

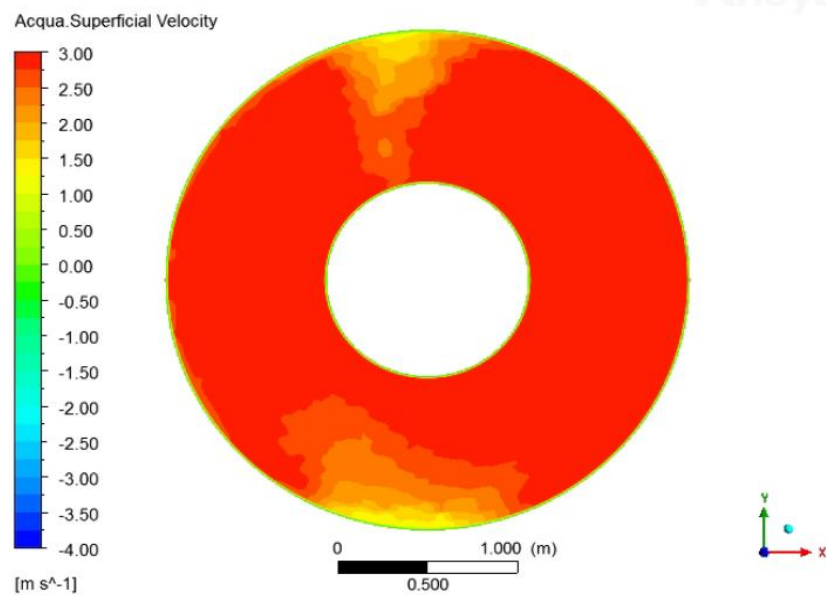


Figura 4.7: Acqua superficial velocity all'ingresso del solido poroso.

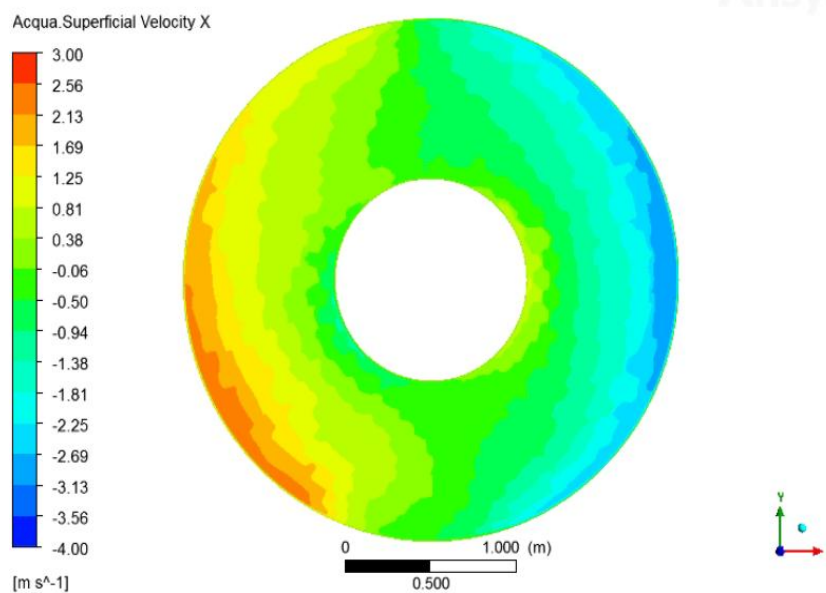


Figura 4.8: Acqua superficial velocity nella componente x, all'ingresso del solido poroso.

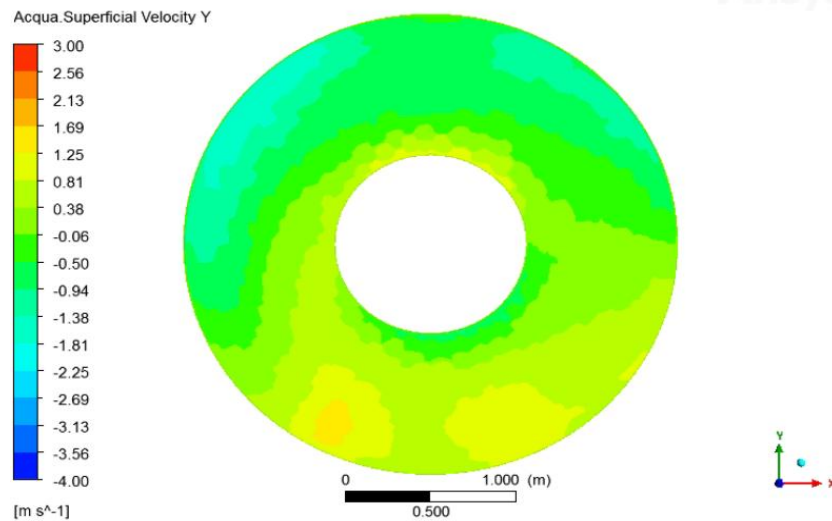


Figura 4.9: Acqua superficial velocity nella componente y, all'ingresso del solido poroso.

4.1.3 Velocità in uscita dal solido poroso

Misurare l' "acqua superficial velocity" in questa posizione consente di valutare l'effetto del solido poroso sul flusso e di analizzare la distribuzione della velocità dopo l'attraversamento del materiale poroso. Anche da queste immagini [4.10](#), [4.11](#) possiamo dedurre una distribuzione non simmetrica e assiale del flusso. Questo indica che la turbina non sta operando in condizioni di flusso costante.

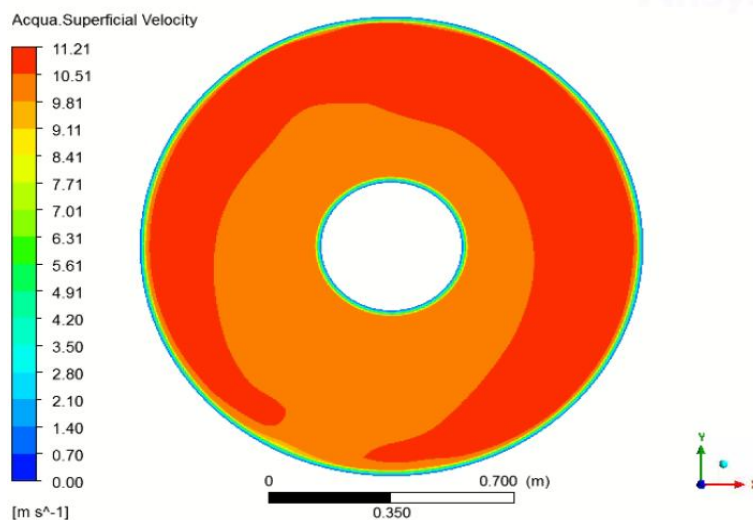


Figura 4.10: Acqua superficial velocity nella componente all'uscita del solido poroso.

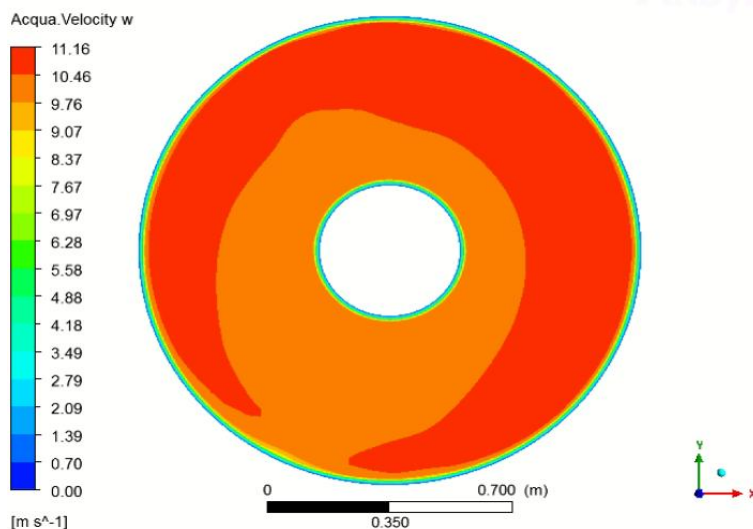


Figura 4.11: Acqua superficial velocity nella componente x all'uscita del solido poroso.

4.1.4 Velocità all'ingresso dello scarico

Proseguendo nella zona di ingresso dello scarico, abbiamo che l'andamento della velocità all'ingresso dello scarico è caratterizzata da un campo di moto non uniforme.

La zona di uscita è fortemente influenzata dai limiti di spazio imposti dalla progettazione. Il campo di moto del diffusore ha solo una zona in cui scarica. Infatti, le streamline hanno un getto che impatta soprattutto la zona esterna della curva dello scarico.

Analizzando l'andamento della velocità dell'acqua all'uscita dal diffusore, sia in termini assoluti (Figura 4.12) che relativi (Figura 4.12), si nota come il campo di moto sposti il getto verso l'esterno, influenzando i valori di velocità dell'acqua. Nella zona destra dell'immagine, corrispondente al lato esterno della curva dello scarico, si registrano valori elevati di velocità, mentre nella zona interna si osservano velocità praticamente nulle.

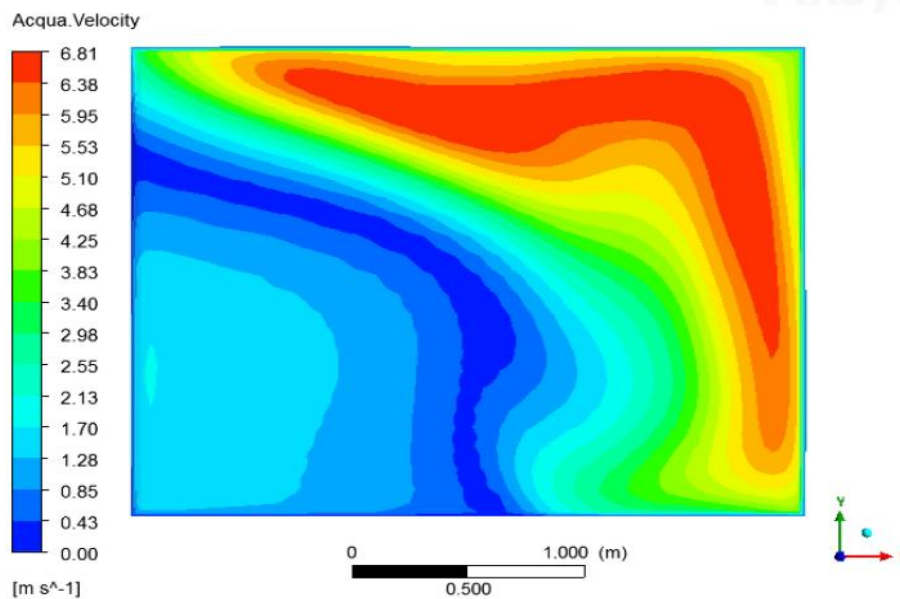


Figura 4.12: Velocità assoluta dell'acqua all'uscita del diffusore.

Nella zona a valle del solido poroso, ci si aspetterebbe di avere un campo di moto uniforme che annulla la componente radiale. Tuttavia, osservando la Figura 4.14, possiamo notare la presenza di componenti di velocità lungo l'asse x, sia con segno negativo che positivo. Questo indica la presenza di vortici, soprattutto in corrispondenza dell'opera di presa, che alterano la distribuzione uniforme del flusso. Per analizzare questa distribuzione, è stato utilizzato il comando "Location" presente

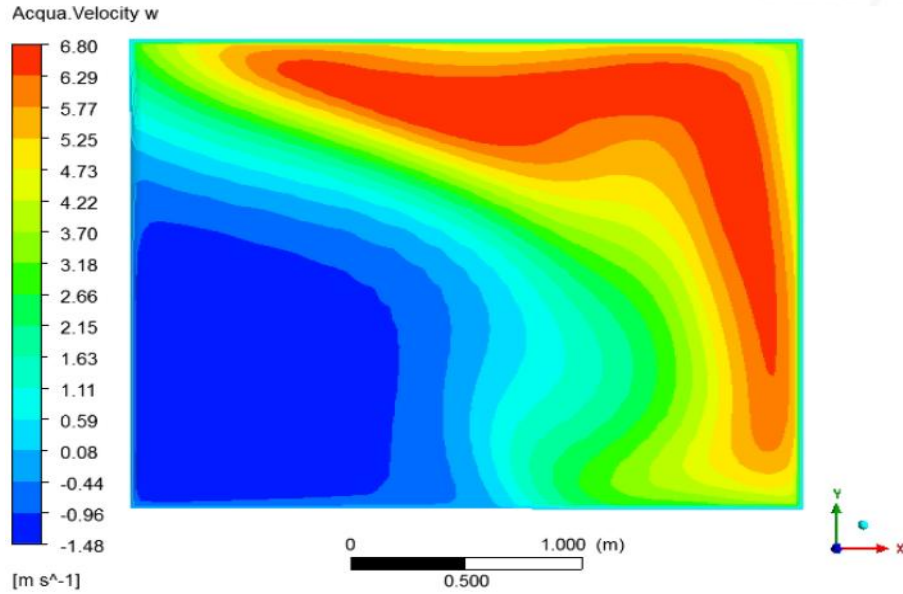


Figura 4.13: Velocità assiale (w) dell'acqua all'uscita del diffusore.

nel menu principale della barra di comando, che consente di creare nuove superfici su cui rappresentare i risultati estratti dalla simulazione. All'ingresso della turbina, ci si aspetterebbe di avere solo la componente assiale del flusso, in modo da ottenere un moto uniforme e simmetrico. Tuttavia, nel nostro caso, si osserva dalla Figura 4.14, come la presenza della componente radiale influenzi il flusso. Questa non uniformità del flusso può compromettere il corretto funzionamento della turbina poichè la presenza di componenti radiali indica che la turbina non sta lavorando in modo ottimale e potrebbe avere difficoltà nel gestire il flusso non uniforme, causando inefficienze nell'elaborazione del flusso.

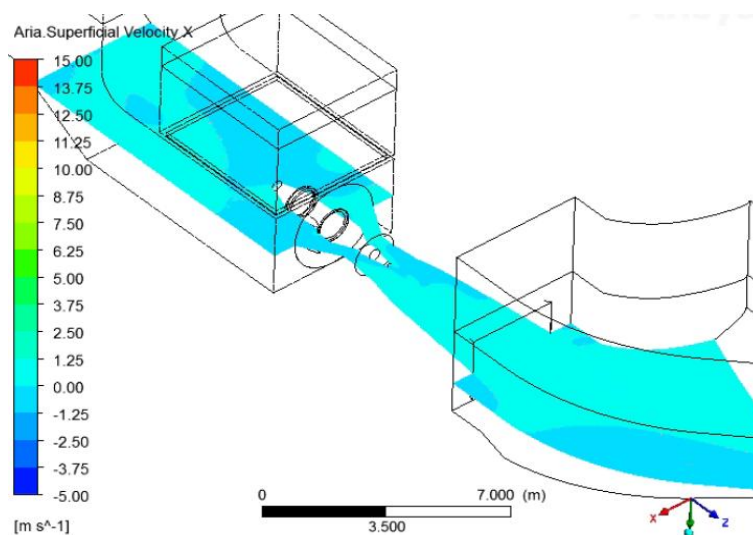


Figura 4.14: Andamento della velocità radiale dell'acqua lungo l'impianto.

4.1.5 Andamento della pressione

Analizzando l'andamento della pressione all'ingresso del solido poroso, possiamo osservare come i vortici e la turbolenza influenzino la distribuzione di pressione, creando una distribuzione non uniforme lungo la superficie di ingresso. Questo fenomeno è evidenziato nelle figure [4.15](#) e [4.18](#). La pressione all'ingresso del solido poroso presenta valori più elevati nella parte superiore della superficie e valori minori nella parte inferiore. Questa distribuzione non uniforme è attribuita alla complessa interazione tra il flusso d'acqua e la geometria dell'opera di presa, che crea una zona di alta pressione nella parte superiore e una zona di bassa pressione nella parte inferiore. Utilizzando i valori di pressione totale, è possibile calcolare l'energia totale nel sistema turbina. L'energia totale può essere definita come la somma dell'energia cinetica del fluido, dell'energia potenziale gravitazionale e dell'energia dovuta alla pressione statica.

È importante analizzare anche la pressione assoluta, la quale tiene conto solo della pressione del fluido, senza considerare la pressione atmosferica.

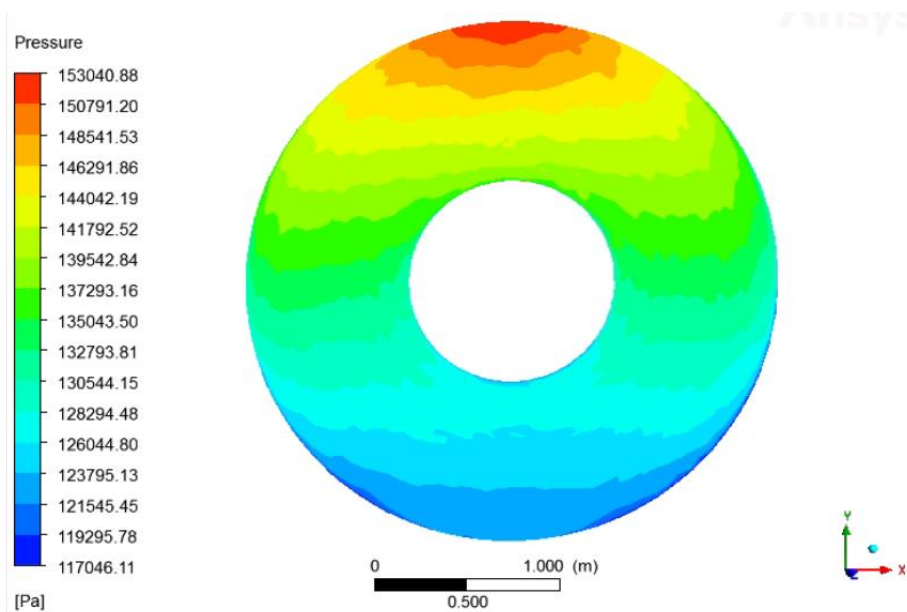


Figura 4.15: Pressione totale all'ingresso del solido poroso.

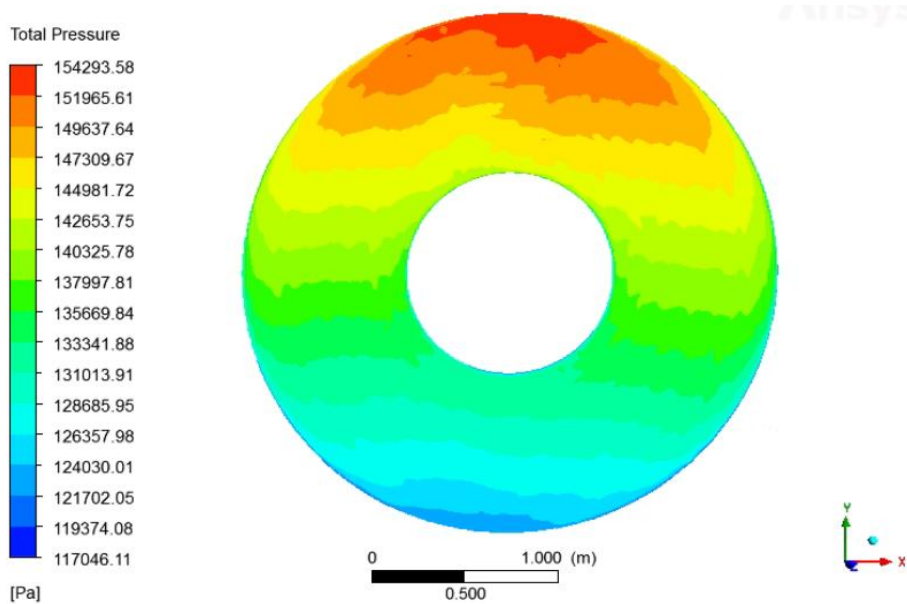


Figura 4.16: Pressione assoluta locale all'ingresso del solido poroso.

4.2 Simulazione CFD Complessa

L'indagine effettuata mediante l'utilizzo del codice CFX 14.5 ha consentito di avere un quadro completo del campo di moto all'interno della turbina. Nella simulazione complessa vengono impiegati modelli più dettagliati e risoluzioni spaziali più elevate. Saranno considerati aspetti come la geometria, la mesh e modelli di turbolenza avanzati, oltre ad impostare condizioni al contorno realistiche. Viene adottata una geometria precisa dell'impianto e condizioni operative realistiche. Infatti, al posto del solido poroso verranno inserite le geometrie del predistributore, distributore e girante. Dunque questo tipo di analisi richiederà maggiori risorse computazionali e tempo, ma fornirà una valutazione più accurata del flusso, delle prestazioni e dell'efficienza della turbina. Solo in questa simulazione è possibile ricavare e plottare tutti i parametri riguardanti le schiere palari, come la distribuzione della pressione e della velocità nella parte statorica e rotorica della macchina. Analizzando i risultati ottenuti in questa simulazione, possiamo riconfermare quanto già analizzato nell'analisi semplificata.

Analizzando il grafico della coppia (4.17) all'interno di CFX-Solver Manager, possiamo notare come i valori registrati mostrano una variazione sia positiva che negativa nel tempo. In condizioni ideali, una macchina che funziona correttamente dovrebbe presentare un andamento più costante e uniforme della coppia.

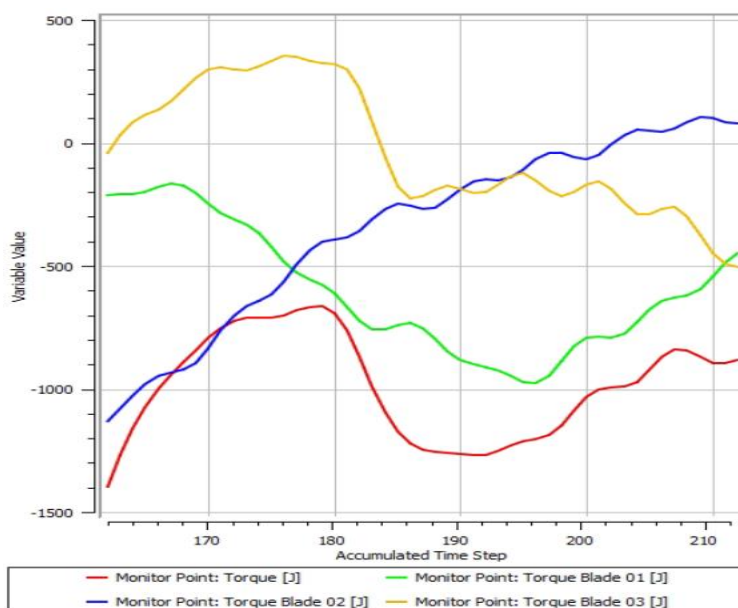


Figura 4.17: Andamento della coppia nella simulazione complessa.

Inoltre, analizzando il grafico dell'energia prodotta dalla turbina, è stato calcolato un valore del salto di pressione di circa 2883,5 Pa, corrispondente a 0,3 m di altezza. Questo valore è significativamente inferiore al valore di progetto, che era di 2,12 m.

Apprendo poi i risultati ottenuti in CFX-Post 14.5, è possibile utilizzare la funzionalità "Turbosurface" e il comando "Vector" per creare la proiezione dei vettori del flusso tangenziale lungo le schiere palari, come mostrato nella figura [4.18](#). Questa analisi fornisce informazioni dettagliate sull'avvolgimento delle pale della macchina e sulla distribuzione del flusso attorno ad esse. La "Turbosurface" è una superficie virtuale definita per seguire la geometria delle pale della turbina. Essa consente una visualizzazione chiara e dettagliata della disposizione e dell'orientamento delle schiere palari, offrendo una rappresentazione visiva del flusso tangenziale. Attraverso il comando "Vector", è possibile rappresentare i vettori del flusso tangenziale lungo la superficie della turbina. Questi vettori mostrano la direzione e l'intensità del flusso in ogni punto, consentendo di valutare l'avvolgimento del flusso attorno alle pale della macchina. Questa visualizzazione fornisce un'indicazione visiva della

distribuzione del flusso, consentendo un'analisi più approfondita delle prestazioni e del comportamento della turbina.

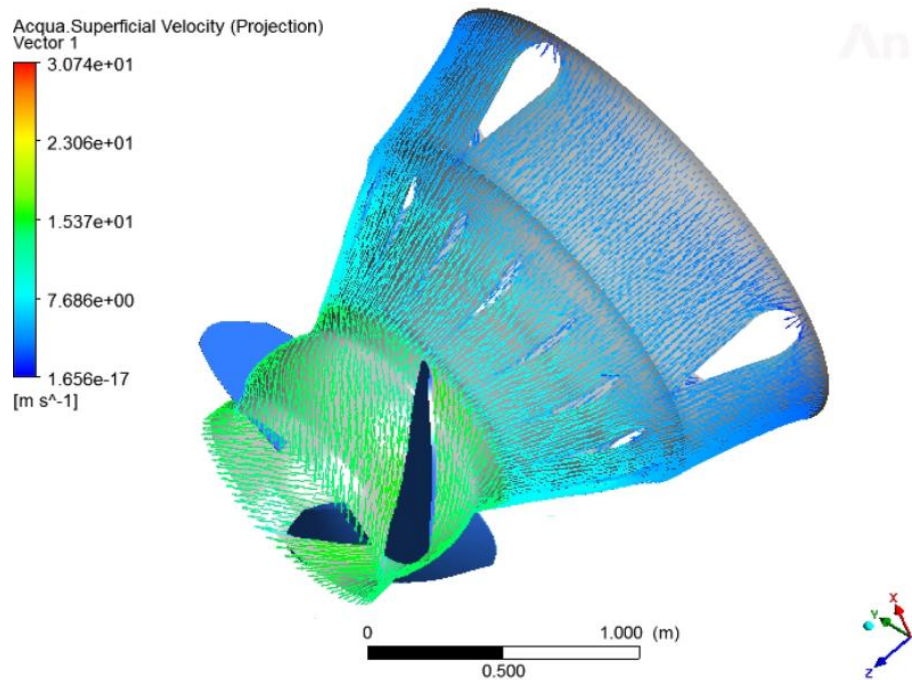


Figura 4.18: Proiezione dei vettori del flusso sulle schiere palari.

Inoltre, analizzando la Figura [4.19](#), possiamo osservare che la componente tangenziale della velocità all'ingresso della girante presenta un valore minimo. Questo fenomeno è attribuito all'irregolarità del flusso che influisce sulla distribuzione delle velocità. La presenza di fluttuazioni e turbolenze nel flusso d'acqua porta a una ridotta componente tangenziale, indicando una non uniformità nella direzione del flusso.

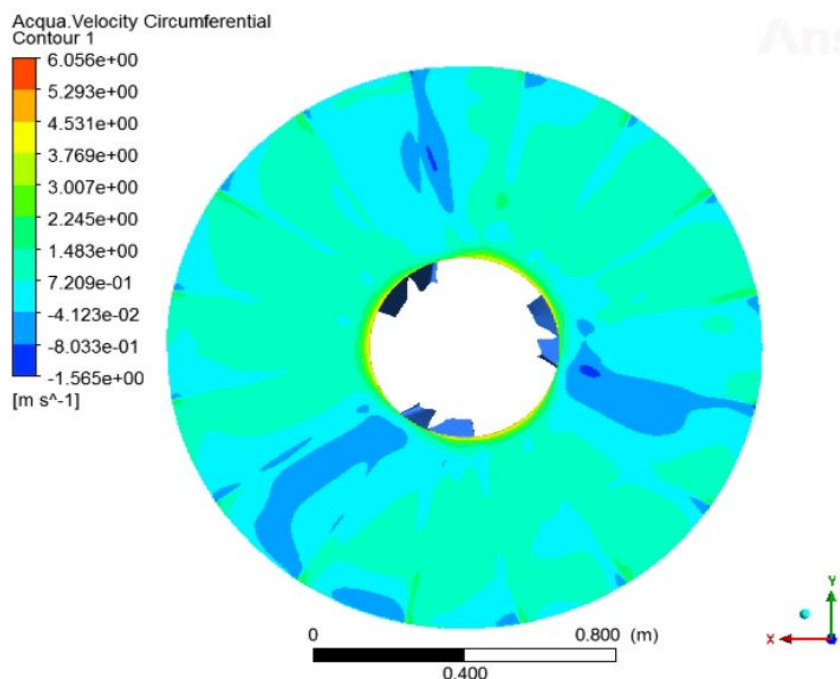


Figura 4.19: Andamento della velocità tangenziale all'ingresso della girante.

4.2.1 Conclusione

Dalle simulazioni svolte, abbiamo appurato che la turbina sta operando a una portata inferiore rispetto a quella di progetto. Questa condizione comporta una diminuzione dell'efficienza dell'impianto, poiché le prestazioni ottimali sono progettate per una portata specifica. Le perdite e il campo di moto non uniforme influiscono negativamente sul corretto funzionamento della macchina. Nonostante siano stati imposti valori di resistenza ridotti nel solido poroso, non si riesce a raggiungere la portata desiderata di 15 m^3 come indicato nei dati forniti dall'azienda, poiché la turbina non riesce ad elaborare il salto per cui è stata progettata.

Dunque, per ottimizzare l'impianto, sono stati suggeriti i seguenti interventi:

1. **Apertura delle paratoie nella zona più esterna del fiume:** Questo intervento mira a favorire un migliore ingresso dell'acqua proveniente dal fiume nell'opera di presa. L'apertura delle paratoie in questa posizione può contri-

buire a migliorare la presenza di un campo di moto più regolare e uniforme, riducendo l'effetto delle turbolenze e delle variazioni di velocità.

2. **Inserimento di setti deviatori nello scarico:** Per migliorare la curvatura regolare del flusso nello scarico, si potrebbe considerare l'installazione di uno o più setti deviatori in cemento. Questi setti possono aiutare a guidare il flusso in modo uniforme lungo la curva dello scarico, riducendo o eliminando la formazione di zone di separazione o turbolenze indesiderate. Di solito, l'inserimento di setti deviatori viene previsto nelle opere civili già all'entrata di grandi curve per ottimizzare il flusso.

L'implementazione di queste soluzioni proposte potrebbe contribuire a migliorare le prestazioni e l'efficienza dell'impianto, consentendo di sfruttare al meglio le risorse idriche disponibili e riducendo le inefficienze causate da flussi non uniformi o turbolenti.

Ringraziamenti

Sono passati cinque anni, anzi, sei, da quando sono entrata all'università e ho ricevuto il mio primo badge universitario. E oggi è il fatidico giorno in cui scrivo l'ultima pagina di questa tesi. Concludere questa laurea per me è stata la realizzazione di un progetto di vita che finalmente si è realizzato. Non nego i tanti momenti di sconforto che ho avuto, soprattutto quando mi sentivo dire che non ce l'avrei fatta o quando non mi sentivo all'altezza dei professori, degli esami o dell'università stessa. Quello che conta davvero è che ci ho messo tanta passione e tanta voglia di imparare che ora che sono arrivata alla fine.

Ci sono molte persone a cui desidero dire grazie e sono felice di condividere questo giorno con le persone che amo. Voglio ringraziare i miei compagni di viaggio e tutte le persone care a me, che hanno contribuito in qualche modo possibile al raggiungimento di questo obiettivo. Che sia stato attraverso un sorriso, una carezza o un abbraccio, ognuno di voi ha avuto un ruolo fondamentale e vi sono grata di cuore.

Desidero ringraziare innanzitutto la mia famiglia, che ha sempre creduto in me. A mia mamma Daniela, che mi sostiene costantemente e che è al mio fianco ogni singolo giorno della mia vita. A mio babbo Alessandro, che mi ha permesso di intraprendere questa avventura. Ai miei meravigliosi fratelli, che rappresentano una parte fondamentale della mia esistenza. Ai miei zii e ai miei nonni, che mi hanno sempre incoraggiato a non arrendermi e a perseguire i miei obiettivi. Ai miei cugini, che sono vicini a me e che considero come fratelli. Un ringraziamento particolare va alla mia compagna di studi Arianna, con la quale sono riuscita a completare questo percorso grazie alla nostra preziosa complicità perchè insieme, ogni sfida è diventata meno difficile. Desidero esprimere un grazie speciale a Sharon, che è stata sempre

al mio fianco e con la quale ho affrontato i momenti belli e brutti di tutto questo percorso. Ringrazio di cuore anche Marlene, Karmen e Mirabella, che sono state amiche sincere sin dall'inizio. Un grazie di cuore va alla Bea e all'Elisa, che sono state sempre presenti nei momenti di bisogno. Ho anche una lunga serie di gruppi a cui dire grazie: il gruppo di Ospedaletto, il gruppo di Alcolisti Anonimi, il gruppo delle Coppiette, il gruppo dei Limoni e il gruppo dei Daltonici. Arrivare a questo giorno e avere una lista così lunga di persone a cui dire grazie mi fa sentire piena di amore. Quindi, grazie per tutto!

Bibliografia

- [1] . 2014. URL: http://www.idrologia.polito.it/didattica/Idrologia/2014/6.Ultime_Lezioni/Impianti_Idroelettrici_FM.pdf.
- [2] . 2023. URL: <https://www.enelgreenpower.com/it/learning-hub/energie-rinnovabili/energia-idroelettrica>.
- [3] *01 - Mini Hydro*. 2013. URL: <https://stem.elearning.unipd.it/mod/folder/view.php?id=148281>.
- [4] *05 - Mini Hydro - Kaplan*. 2013. URL: <https://stem.elearning.unipd.it/mod/folder/view.php?id=148281>.
- [5] *ANSYS ICEM CFD Tutorial Manual*. 2012. URL: <file:///C:/Users/Sara/Desktop/Tutorial%20ICEM%20CFD.pdf>.
- [6] *Notes MiniHydro*. 2013. URL: <https://stem.elearning.unipd.it/mod/folder/view.php?id=148281>.