



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA ENERGETICA

*TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA ENERGETICA*

PROGETTO PRELIMINARE DI UNA MINI TURBINA KAPLAN

Micro Kaplan Turbine Preliminary Design

RELATORE: *Prof. Giorgio Pavesi*

LAUREANDO: *Daniele Baggio*

MATRICOLA: *1041034*

ANNO ACCADEMICO: 2014/2015

Indice

Simboli	7
Prefazione	9
Introduzione	11
Capitolo 1: La Progettazione della Macchina	17
1.1 . PREDIMENSIONAMENTO DELLA MACCHINA	17
1.1.1 . Dati di partenza	17
1.1.2 . Dimensionamento del condotto meridiano	18
1.1.3 . Analisi della corrente	20
1.1.4 . Metodo delle Equivelocità	25
1.2 . DIMENSIONAMENTO DELLA GIRANTE	28
1.2.1 . Calcolo dei triangoli delle velocità	28
1.2.2 . Calcolo dei profili palari	30
1.2.3 . Rappresentazione delle linee medie dei profili	37
1.3 . DIMENSIONAMENTO DELLO STATORE	42
1.3.1 . Caratteristiche principali del distributore	42
1.3.2 . Lunghezza nominale e spessore della pala direttrice	42
1.3.3 . La forma della pala direttrice	44
1.3.4 . Dimensioni principali del predistributore	47
Capitolo 2: La Modellizzazione della Macchina	49
2.1 . LA STRUTTURA DEL PACCHETTO SOFTWARE CFX 14.5	49
2.1.1 . TurboGrid 14.5	50
2.1.2 . CFX-Pre 14.5	50
2.1.3 . CFX-Solver Manager 14.5	51
2.1.4 . CFX-Post 14.5	52
2.2 . LA COSTRUZIONE DELLE MESH	52
2.2.1 . Predistributore	53
2.2.2 . Distributore	55

2.2.3 . Raccordo tra distributore e girante	57
2.2.4 . Girante	59
2.2.5 . Tubo di scarico	65
2.3 . L'ASSEMBLAGGIO DEI COMPONENTI	67
2.3.1 . L'analisi del flusso	67
2.3.2 . I parametri di simulazione	71
2.4 . L'ANALISI DEI RISULTATI	73
2.4.1 . La visualizzazione dei risultati	74
2.4.2 . Il confronto con i valori di progetto	76
Capitolo 3: La Riprogettazione	83
3.1 . LA RIPROGETTAZIONE DELLA GIRANTE	83
3.1.1 . La girante progettata al 110% della portata massima ($Q_{1.1}$)	84
3.1.2 . Le simulazioni con la girante progettata al 110% della portata massima($Q_{1.1}$)	85
3.1.3 . La girante progettata alla $Q_{1.1}$ e apertura dell'angolo di calettamento a 5°	91
3.2 . LA RIPROGETTAZIONE DEL CONDOTTO MERIDIANO	95
3.2.1 . Il condotto meridiano intermedio	95
3.2.2 . Il condotto meridiano definitivo	100
3.3 . CONSIDERAZIONI SULLA RIPROGETTAZIONE	104
3.3.1 . L'analisi complessiva	104
3.3.2 . Considerazioni sull'analisi svolta	106
Conclusioni	109
Appendici	111
APPENDICE A:	
Procedimento per la meshatura di un dominio fluido con il modellatore e meshatore TurboGrid 14.5	111
A.1 . Operazioni preliminari	111
A.2.1 . La geometria del modello	112
A.2.2 . La geometria del modello (BladeGen 14.5)	116
A.3 . La Topology	118

A.4 . La mesh	119
---------------	-----

APPENDICE B:

Procedimento per la meshatura di un dominio fluido con il modellatore e meshatore ICEM CFD 14.5	123
B.1 . Operazioni preliminari	123
B.2 . La geometria	124
B.3 . Il Blocking	125
B.4 . La Mesh	127
B.5 . La rivoluzione della mesh	128
B.6 . L'analisi della qualità della mesh	130
B.7 . L'esportazione della mesh	131

APPENDICE C:

Procedimento per la costruzione di un dominio fluido con il pre-processore CFX-Pre 14.5 e l'avvio della relativa simulazione fluidodinamica con il solutore CFX-Solver Manager 14.5	133
C.1 . Operazioni preliminari	133
C.2 . L'importazione delle mesh	134
C.3 . La creazione dei domini	135
C.4 . L'impostazione delle condizioni al contorno	136
C.5 . L'inserimento delle Expressions	139
C.6 . Le impostazioni di corredo e definizione delle condizioni di convergenza	141
C.7 . L'avvio della simulazione fluidodinamica con il CFX-Solver Manager 14.5	141

APPENDICE D:

Nozioni per la visualizzazione dei risultati mediante post-processore CFD-Post 14.5	143
D.1 . Considerazioni preliminari	143
D.2 . Apertura del file *.res e generazione degli oggetti	143
D.3 . Rappresentazione delle variabili computate dal programma	145

Simboli

A = area, [m²]
B = larghezza condotto, [m]
C = velocità assoluta, [m/s]
C_D = coefficiente di resistenza, [-]
C_L = coefficiente di portanza, [-]
C_S = coefficiente di sostentamento, [-]
C_m = componente meridiana della velocità assoluta, [m/s]
C_u = componente tangenziale della velocità assoluta, [m/s]
d = diametro, [m]
dt = tempo infinitesimo, [s]
ds = spostamento infinitesimo, [m]
g = costante gravitazionale, [m/s²]
gh = variazione dell'energia totale, [J/kg]
F = forza, [N]
H = caduta idrica, [m]
K = numero tipico di macchina, [-]
i = angolo di incidenza, [°]
l = lunghezza corda, [m]
M = momento, [Nm]
 \dot{m} = portata di massa, [m³/s]
n = numero di giri, [rpm]
P = potenza, [W]
p = pressione assoluta, [N/m²]
Q = portata volumetrica, [m³/s]
r = raggio, [m]
R = resistenza, [N/m]
S = portanza, [N/m]
s = spessore della pala, [mm]
S_c = spessore circonferenziale della pala, [mm]
t = passo palare, [m]
U = velocità tangenziale, [m/s]
w = velocità relativa, [m/s]

W_u = componente tangenziale della velocità relativa, [m/s]

Z = numero di pale, [-]

z = quota geodetica, [m]

ζ = coefficiente di ostruzione, [-]

α = angolo di flusso della corrente assoluta, [°]

β = angolo di flusso della corrente relativa, [°]

γ = angolo di calettamento della pala, [°]

δ = deviazione angolare tra angolo effettivo e angolo costruttivo all'uscita della pala, [°]

ε = deviazione angolare tra ingresso e uscita della pala, [°]

Γ = circuitazione

η = rendimento [-]

θ_c = deviazione costruttiva del profilo palare, [°]

λ = distanza tra le pale distributrici e l'asse della girante, [m]

ρ = densità, [kg/m³]

ω = velocità angolare, [rad/s]

ψ = coefficiente di pressione, [-]

Ψ = funzione di corrente

ϕ = coefficiente di flusso, [-]

Φ = funzione potenziale del fronte di avanzamento della corrente

Ω = vorticità della corrente

Prefazione

Nel seguente lavoro di tesi, vengono esaminate le problematiche fondamentali riguardanti la progettazione di una test-model di una turbina idraulica a flusso assiale, Kaplan biregolante. Inizialmente sono state descritte le linee guida del metodo utilizzato per il dimensionamento della macchina. Successivamente sono state effettuate delle verifiche fluidodinamiche tramite il software per l'analisi fluidodinamica computazionale CFX 14.5, necessarie per prendere visione dell'effettivo comportamento idraulico della girante, per ottimizzarne infine le prestazioni.

Il motivo principale per cui mi sono interessato a svolgere questa tesi deriva sicuramente dall'interesse per le fonti alternative e rinnovabili. Questo interesse, che in primis mi ha spinto ad iscrivermi alla facoltà di Ingegneria Energetica, è stato coltivato e rinvigorito durante gli studi per conseguire questa laurea magistrale, tramite alcuni corsi come "Macchine per l'utilizzo di fonti rinnovabili", "Energie Rinnovabili" e "Apparati per la conversione elettrica di fonti rinnovabili".

I ringraziamenti vanno al Prof. Giorgio Pavesi che mi ha dato l'opportunità di eseguire questo tipo di esperienza e studio su questo lavoro di tesi, e all'Ingegnere progettista Filippo Costaganna che con pazienza mi ha aiutato a completare il lavoro di progettazione e analisi della turbina.

Un ringraziamento va, inoltre, all'Università di Padova, la quale offre notevoli spunti di confronto e di conoscenza grazie alla competenza di ogni insegnante e alla disponibilità di tutti i miei colleghi studenti, sapendo che questa Prova Finale non è di certo un punto di arrivo ma un nuovo inizio verso il mondo del lavoro.

Infine un ringraziamento speciale ai miei genitori, a tutti i familiari, e a Francesca per il supporto e la pazienza portata in questi anni.

Introduzione

L'Energia Idroelettrica è la più importante fonte di energia rinnovabile utilizzata in Europa. In Italia una buona parte del fabbisogno energetico è soddisfatto dalla produzione idroelettrica, come si vede dal riepilogo storico della produzione di energia in Italia dal 1950 al 2012 (Elaborazione da dati pubblicati da Terna).

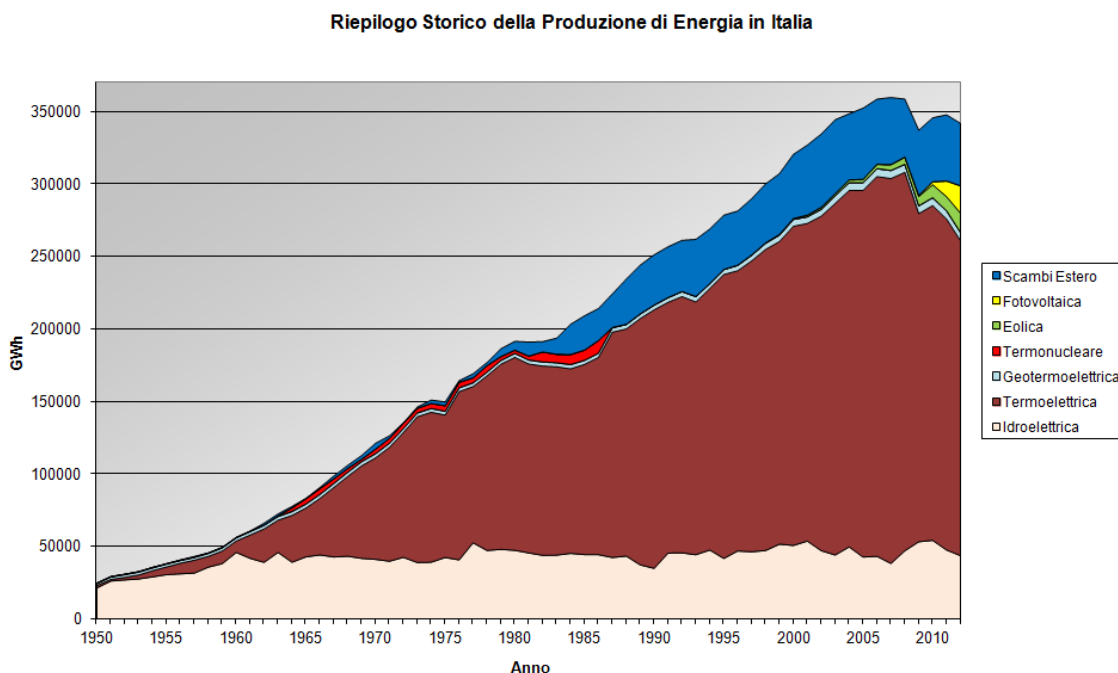


Fig.1: Riepilogo storico della produzione di energia in Italia dal 1950 al 2012

Proprio dal 1960 lo sviluppo di questa risorsa è rimasto praticamente immutato poiché sono stati sfruttati tutti i più importanti salti idrici disponibili per la produzione di energia idroelettrica. Quindi si potrebbe affermare che si sia giunti al limite di sfruttamento delle grandi centrali idroelettriche, dato che dal punto di vista tecnologico ed economico, sono già stati realizzati impianti nei siti più convenienti.

Tuttavia, la potenzialità idroelettrica annua è stata stimata da alcuni esperti essere di circa 65 TWh, e nel 2012 la produzione energetica annua lorda da idroelettrico di circa 41.9 TWh, significa che la quota di potenzialità restante disponibile è di circa 15 TWh. Nel rispetto dell'impatto ambientale, si è stimato che questo residuo di circa 15 TWh possa essere utilizzato da centrali idroelettriche di piccola taglia, cioè al di sotto dei 100 kW di potenza.

Questo tipo di impianti, che dall'European Small Hydro Association (ESHA) viene chiamato mini idroelettrico, purtroppo riesce a contribuire al fabbisogno elettrico nazionale solamente con un modesto contributo energetico. Diventa però molto importante per l'utilizzo della risorsa idrica a livello locale, poiché sfrutta una fonte energetica rinnovabile che andrebbe altrimenti dispersa. Inoltre si può definire una forma di energia pregiata per i numerosi vantaggi che presenta, quali l'elevata efficienza ($70 \div 80 \%$), l'elevato fattore di carico ($\geq 50 \%$), un elevato livello di prevedibilità della potenza erogabile, delle lente variazioni di potenza erogata su base stagionale, una tecnologia consolidata e non deperibile, con un minimo impatto ecologico.

Un impianto idroelettrico si può distinguere in vari tipi, a seconda che lo si voglia differenziare per potenza, caduta o sfruttamento della risorsa idrica. Secondo l'Organizzazione delle Nazioni Unite per lo Sviluppo Industriale (UNIDO), le diverse tipologie sono classificate per potenza come:

- 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 al salto idrico disponibile:

- impianti ad alta caduta $h > 100 \text{ m}$
- impianti a media caduta $h = 30 \div 100 \text{ m}$
- impianti a bassa caduta $h = 2 \div 30 \text{ m}$

Infine, gli impianti si differenziano per il sistema di sfruttamento dell'acqua, e si distinguono in "impianto ad acqua fluente", i quali possono avere degli sbarramenti per innalzare il salto idrico e una condotta forzata, oppure semplicemente a pelo libero; "impianto con centrale a piede di diga", i quali sfruttano la presenza di serbatoi o piccole dighe; "impianto inserito in canali irrigui".

Per ogni tipo di impianto ci possono essere differenti tipi di turbine, che sfruttano l'energia cinetica dell'acqua come le turbine ad azione o anche l'energia statica dell'acqua, come le turbine a reazione. La turbina Pelton, essendo una turbina ad azione, sfrutta dei

particolari ugelli che trasformano totalmente la pressione dell'acqua in energia cinetica. Quindi un forte getto d'acqua investe una pala alla volta, facendo girare la turbina, ed infine quest'acqua se ne esce dalla pala a velocità quasi nulla. I rendimenti sono molto elevati, attorno al 93%. Viene usata per sia per grandi che per mini impianti idroelettrici, sfruttando salti compresi tra i 50 e 1300 metri e portate che variano tra i 0.5 e i 100 litri al secondo.



Fig. 2: Turbina Pelton

La turbina Turgo è una turbina ad azione, la quale di solito viene impiegata per salti compresi tra i 15 e i 300 metri. E' molto simile alla Pelton, però a differenza di quest'ultima il getto colpisce simultaneamente più pale, e inoltre può essere utilizzata con acque torbide.



Fig. 3: Turbina Turgo

La turbina a flusso incrociato (cross-flow), chiamata anche Banki-Michell, è una turbina ad azione per ampie portate, fino ai 800 litri al secondo, e salti compresi tra i 5 e i 200 metri. Essa ha un rendimento piuttosto basso, attorno all' 87%, il quale però si mantiene abbastanza costante anche durante la regolazione del carico, quando la portata raggiunge il 16% della portata di progetto. Questa turbina è detta anche "autopulente",

poiché il getto d'acqua che attraversa il primo stadio, cambia direzione al centro della ruota ed entra nel secondo stadio, in modo che eventuali impurità infiltratisi nel primo stadio, vengano spazzate via nel secondo. Questa turbina è molto economica e semplice da costruire, essendo costituita da semplici lamiere piegate.



Fig. 3: Turbina Cross-Flow

La turbina Francis è una turbina a reazione, con distributore a pale a calettamento regolabile. Vengono utilizzate per medi salti ($10 \div 350$ m), e sono caratterizzate da rendimenti molto alti. Esse sono caratterizzate da un flusso radiale all'alimentazione, e da un flusso assiale allo scarico.

Hanno alcuni svantaggi legati alla complessità della costruzione, problemi di cavitazione, attrito ed usura a causa dell'alta velocità dell'acqua contro le pale.



Fig. 4: Turbina Francis

Infine la turbina Kaplan è una turbina a reazione a flusso assiale, che sfrutta cadute limitate, tra i 2 e i 40 metri, e portate elevate, tra i 10 e i 100 metri cubi al secondo. La Kaplan può essere suddivisa in tre topologie, a seconda del tipo di portata che deve elaborare. Quando la portata è praticamente costante, questa turbina viene chiamata "Elica", poiché ha distributore e rotore a pale fisse. Quando invece la portata è abbastanza

variabile, la Kaplan può disporre di un distributore ad angolo di calettamento variabile, e in questo caso viene definita “Monoregolante”. Nel caso in cui si abbia un ampio campo di portate, e si voglia mantenere il rendimento più costante possibile, di solito si impiega la Kaplan Biregolante, la quale possiede sia il distributore che la girante con le pale regolabili.



Fig. 5: Turbina Kaplan

Quindi la turbina idraulica ha lo scopo di trasformare l'energia potenziale e cinetica dell'acqua in energia meccanica. La scelta di utilizzare un tipo di turbina rispetto ad un'altra, in un determinato impianto, viene decisa in base alla caduta, alla portata ed al rendimento. La caduta è definita come il dislivello tra la quota a cui è disponibile la risorsa idrica a monte, e il livello a cui la stessa viene restituita a valle dell'impianto. In base ad essa, si può già scegliere una tipologia di turbina da impiegare nell'impianto.

Kaplan	$2 < H < 20$ [m]
Michell-Banki	$3 < H < 200$ [m]
Francis	$10 < H < 350$ [m]
Turgo	$50 < H < 250$ [m]
Pelton	$50 < H < 1300$ [m]

La portata, definita come la massa d'acqua che fluisce attraverso l'impianto nel tempo, in genere non ha significato come unico valore ma è necessario conoscere l'intero regime di portate. Dunque per la portata si va ad ottenere una curva di durata da dati di tipo idrometrici, per verificare le portate minima e massima e quindi la portata di progetto della turbina. Per la portata di progetto, di solito si va prendere la portata che sia garantita in almeno 90 giorni all'anno, e corrisponde all'incirca all'80% della portata massima. Infine

la portata di progetto ed il salto idrico individuano un campo di funzionamento per ogni tipo di turbina.

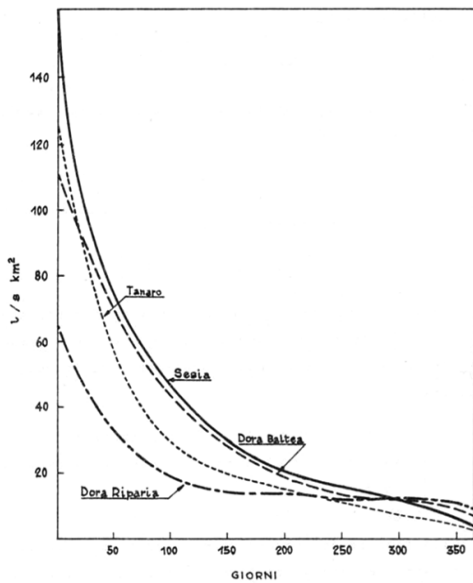


Fig. 6: Curve di durata.

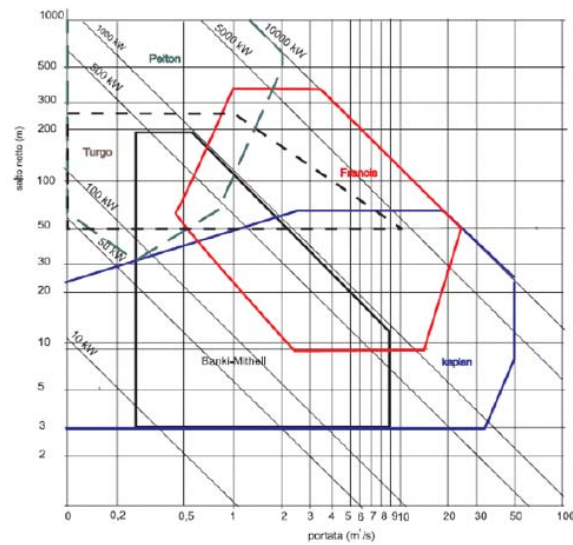


Fig. 7: Salto idrico su Portata.

Il rendimento è definito come il rapporto tra la potenza meccanica trasmessa all'albero della turbina, e la potenza idraulica nelle condizioni di salto e portata nominali. Il rendimento massimo deve essere ottenuto nell'intorno della portata di progetto.

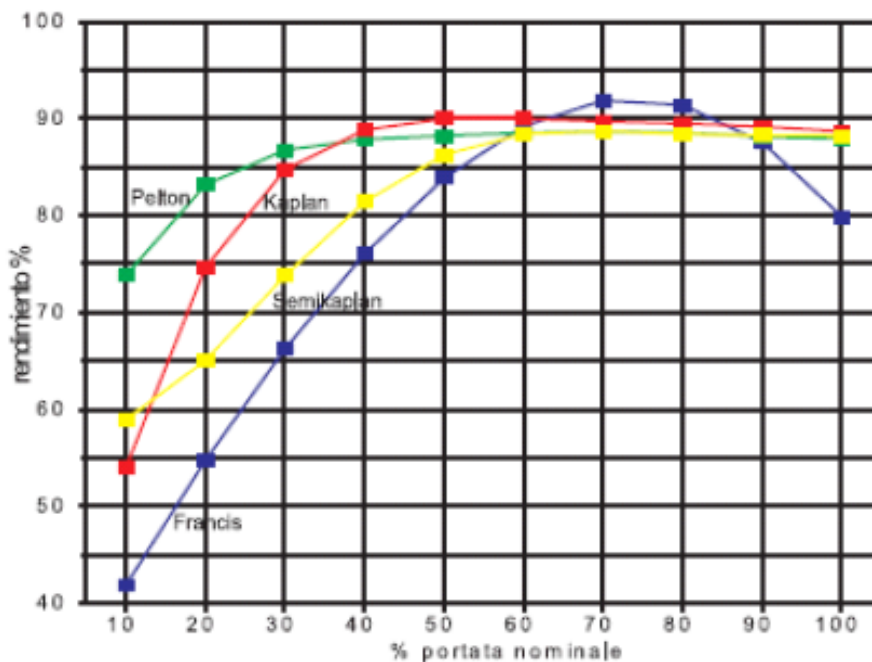


Fig. 8: Rendimento in funzione della portata.

Capitolo 1

La Progettazione della Macchina

La turbina idraulica che verrà trattata nel seguente lavoro di tesi è una Test-Model di una Kaplan biregolante. Si tratta di una prima progettazione di un modello di turbina Kaplan con pale statoriche e rotoriche regolabili, che verrà in seguito costruita in collaborazione con l'Azienda di impianti idroelettrici Tamanini Hydro, e infine testata nei laboratori del Polo Meccanico dell'Università di Padova.

Nel seguente lavoro di tesi, con l'aiuto dell'ingegnere progettista, sono stati considerati dei criteri di progettazione standard, con i quali è stato dimensionato un primo modello di turbina, ed in seguito, mediante l'utilizzo del software CFX 14.5, sono state effettuate delle verifiche fluidodinamiche necessarie per prendere visione dell'effettivo comportamento idraulico della girante, e quindi sono state ultimate delle modifiche alla progettazione per una ottimizzazione delle prestazioni della macchina.

1.1 . PREDIMENSIONAMENTO DELLA MACCHINA

1.1.1 . Dati di partenza

I dati di partenza per il progetto, per quanto riguarda caduta idrica H e portata massima Q_{\max} , sono i seguenti:

$$H = 4 \text{ m}$$

$$Q_{\max} = 280 \text{ l/s}$$

In seguito sono stati stimati il regime di rotazione a $n = 1000$ rpm in linea con il numero di coppie polari del generatore elettrico, e verificando che tale valore non superi la relazione

$$n_{\max} = \frac{3000 \cdot H^{2/3}}{1.166 \cdot P_{Q_{\max}}^{1/2}} .$$

La velocità di rotazione è stata calcolata secondo la formula

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60} ,$$

ottenendo il valore di $\omega = 104.72$ rad/s

Il rendimento massimo è riferito alla portata di progetto, che risulta essere $Q_{\text{prog}} = 224$ l/s, dato che

$$Q_{\text{prog}} = 0.8 \cdot Q_{\max} ,$$

quindi per la portata massima dell'installazione, il rendimento è stimato come

$$\eta = \eta_{\max} - \frac{1}{25} \cdot \left(\frac{Q_{\max} - Q_{\text{prog}}}{Q_{\max}} \right),$$

e risulta essere uguale a $\eta = 0.88$.

Dunque la potenza massima calcolata, $P_{\max} = 9.65$ kW, viene determinata usando la classica formula della potenza

$$P_{\max} = \rho \cdot Q_{\max} \cdot g \cdot H \cdot \eta,$$

noti la densità dell'acqua $\rho = 998.2$ kg/m³ e l'accelerazione di gravità $g = 9.81$ m/s².

Infine è stato calcolato il numero tipico di macchina $K = 3.53$, essendo

$$K = \omega \cdot \frac{Q_{\max}^{0.5}}{(gh)^{0.75}}.$$

1.1.2 . Dimensionamento del condotto meridiano

Macchine che hanno condizioni di funzionamento simili e sono geometricamente simili, hanno anche lo stesso numero tipico K , e quindi anche uguali valori del coefficiente di pressione ψ e del coefficiente di flusso ϕ :

$$\psi = \frac{gh}{U^2}; \quad \phi = \frac{C_m}{U};$$

con (gh) scambio di energia, $U = \omega r$ velocità periferica, r raggio, c_m componente meridiana della velocità assoluta.

L'intento di una Test-Model è di sfruttare la teoria della Similitudine delle Macchine per calcolare punto per punto le caratteristiche di altre macchine geometricamente simili ad essa, senza dover ripetere ogni volta le prove. Infatti macchine in condizioni ottimali, aventi uguali ψ e ϕ , sono funzionalmente simili solo se sono geometricamente simili, come dimostra la formula

$$K = 2\sqrt{\pi} \cdot \left(\frac{B}{d} \right)^{0.5} \cdot \frac{\phi^{0.5}}{\psi^{0.75}},$$

che mette in relazione K , ψ , ϕ , e $\left(\frac{B}{d} \right)$, che è il rapporto tra larghezza e diametro.

Quindi ad una turbomacchina classificata in termini di numero tipico K , si associano i coefficienti ψ e ϕ definiti in condizioni di massimo rendimento, ed altri parametri

adimensionali come il numero di pale Z e il rapporto tra larghezza e diametro $\left(\frac{B}{d}\right)$. Così si può determinare la geometria del condotto meridiano, come schematizzato in figura 1.1 .

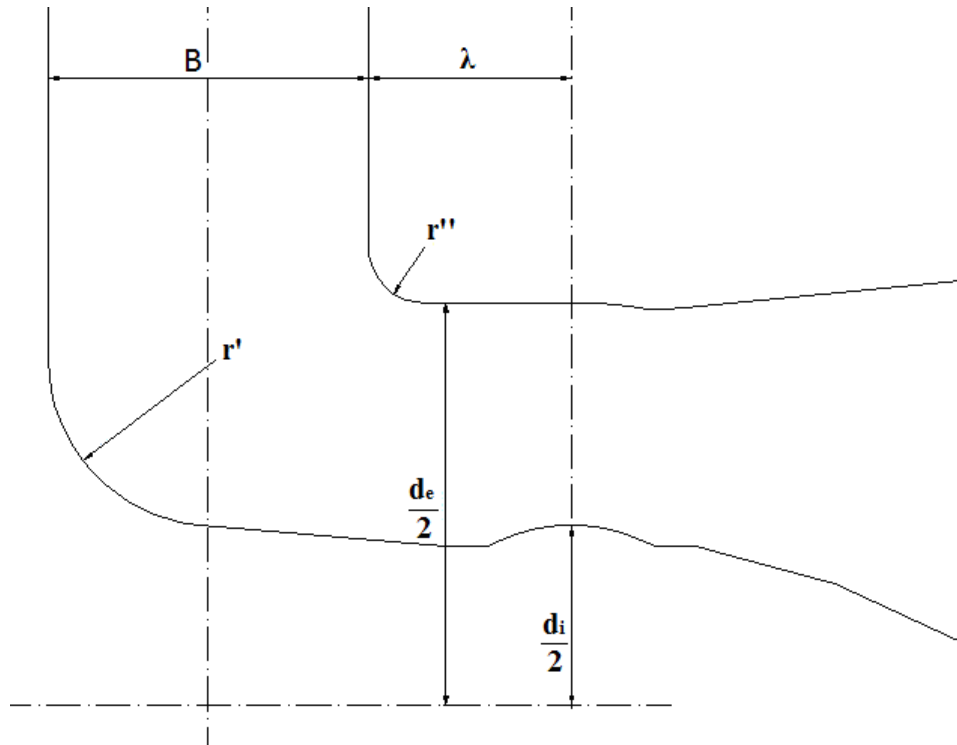


Fig. 1.1: Schematizzazione della geometria del condotto meridiano

Dalla letteratura, sono stati presi come riferimento i dati da alcuni tra gli autori più famosi, tra cui Ardizzon, Martegani, Vivier e Nechleba, per fare una media e ricavare i parametri per il dimensionamento del condotto meridiano. Quindi a partire dal numero tipico di macchina $K = 3.53$, sono stati ricavati i valori dei coefficienti di pressione e di flusso $\psi = 0.169$ e $\phi = 0.346$, nel rispetto della tabella 1.1, riferita alle turbine idrauliche assiali.

K	ψ	φ
2.5 ÷ 6	0.3 ÷ 0.11	0.25 ÷ 0.4

Tab 1.1

Di conseguenza sono stati ricavati il diametro esterno d_e ,

$$d_e = (4 \div 5) \cdot \sqrt[3]{\frac{Q_{\max}}{n}},$$

il diametro del mozzo d_i ,

$$d_i = d_e \cdot (0.718 - 0.073513K),$$

la larghezza del condotto B,

$$B \approx 0.4 \cdot d_e,$$

la distanza tra le pale distributrici e l'asse della girante λ

$$\lambda \approx 0.25 \cdot d_e.$$

I raggi di curvatura r' e r'' sono stati scelti in base a delle considerazioni di tipo strutturale.

$$B = 115 \text{ mm}$$

$$d_e = 291 \text{ mm}$$

$$d_i = 130 \text{ mm}$$

$$\lambda = 73 \text{ mm}$$

1.1.3 . Analisi della corrente

Il numero di pale per una macchina assiale con numero tipico $K = 3.53$ è di $Z = 5$. In corrispondenza della girante, la geometria del condotto sulla corona è cilindrica; sul mozzo la geometria è sferica. Nella pratica, sul mozzo risulta che la pala sul naso e sulla coda tende a sfiorare dalla geometria sferica a quella cilindrica, cosicché esiste un inevitabile gioco variabile con la posizione della pala, che necessariamente crea un peggioramento del rendimento volumetrico.

Il compito della pala è quello di operare la giusta variazione del momento della quantità di moto della portata che attraversa la girante affinché si renda disponibile all'asse il momento M

$$M = \rho \cdot Q \cdot \eta_v \cdot (r_1 C u_1 - r_2 C u_2)$$

e il salto idrico H

$$H = \frac{U_1 C u_1 - U_2 C u_2}{g \cdot \eta_{id}},$$

noti la componente tangenziale della velocità assoluta Cu , il rendimento volumetrico η_v e il rendimento idraulico η_{id} .

Tenendo in considerazione il fatto che la velocità periferica varia lungo il bordo della pala, dato che $U = \omega R$ è in funzione del raggio, l'intero triangolo della velocità varia lungo i bordi della pala e quindi ciascuna sezione palare dovrà essere sagomata diversamente dalle altre.

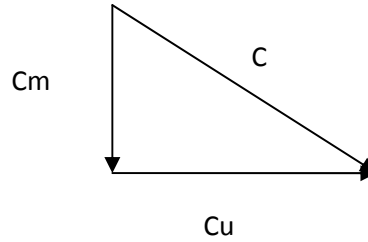


Fig. 1.2: Triangolo della velocità assoluta C.

Per dimensionare ciascuna sezione palare, è necessario conoscere la C_m , ovvero la componente meridiana della velocità assoluta, all'ingresso e all'uscita della pala. Per ogni sezione si può assumere che la C_m sia costante dato che il deflusso della corrente avviene in regime di moto turbolento. La condizione di moto turbolento fa rispettare pure le ipotesi di fluido aviscoso, poiché lo strato limite a ridosso delle pareti è dell'ordine del millimetro, ed è come se non fosse soggetto agli attriti interni, e quindi il valore della velocità diminuisce molto rapidamente annullandosi in corrispondenza della parete.

Per ottenere le linee di corrente ed il posizionamento dei bordi di ingresso e uscita delle pale di distributore e girante, è necessario condurre l'analisi del moto a potenziale, il quale permette di descrivere il campo delle velocità come gradiente di una funzione scalare, detta per l'appunto funzione potenziale. In pratica si immagina di dividere la macchina in "n" macchine elementari che lavorano in parallelo con lo stesso scambio di energia e stessa frazione di portata. Quindi il condotto meridiano viene diviso in "n" condotti meridiani rappresentativi di una frazione di portata e con lo stesso scambio di energia.

Questa analisi è regolata da equazioni differenziali alle derivate parziali che descrivono il comportamento del fluido al livello macroscopico. Per capire appieno l'argomento di questo lavoro di tesi, è necessario citarle brevemente, senza entrare nei minimi particolari.

L'equazione del moto del fluido viscoso, riferito all'osservatore inerziale, che regola l'equilibrio della corrente assoluta, assume la forma

$$\vec{C} \times \vec{\Omega} = \nabla \left(\frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} + gz \right)$$

(\vec{C} è il vettore della velocità assoluta, $\vec{\Omega} = \text{rot } \vec{C}$ è un operatore vettoriale chiamato vorticità, il quale descrive la rotazione infinitesima della corrente assoluta) ed è uguale al gradiente dell'energia totale dell'unità di massa ∇E . Se si moltiplica entrambi i membri dell'equazione per uno spostamento elementare $d\vec{s} = \vec{c} dt$, risulta che $(\vec{C} \times \vec{\Omega}) \cdot \vec{c} dt = 0$

perché vettori perpendicolari tra loro, e di conseguenza $\nabla E \cdot \vec{c} dt = 0$, ovvero l'energia totale $(\frac{p}{\rho} + \frac{c^2}{2} + gz)$ si conserva lungo una linea di corrente. Inoltre l'equazione del moto

si riduce a $\vec{C} \times \vec{\Omega} = 0$, che ha come soluzione il moto irrotazionale $\vec{\Omega} = 0$. Questa ultima soluzione implica l'esistenza di una funzione potenziale Φ , che rappresentata in coordinate cartesiane diventa

$$C_x = -\frac{\partial \Phi}{\partial x}; \quad C_y = -\frac{\partial \Phi}{\partial y}; \quad C_z = -\frac{\partial \Phi}{\partial z}.$$

Le superfici a Φ costante, sono superfici equipotenziale, e sono ortogonali al vettore velocità \vec{C} , e quindi rappresentano il fronte di avanzamento della corrente.

Per un fluido incomprimibile (ρ costante), l'equazione della portata è data dall'equazione di continuità

$$\text{div}(\vec{C}) = \left(\frac{\partial C_x}{\partial x} + \frac{\partial C_y}{\partial y} + \frac{\partial C_z}{\partial z} \right) = 0.$$

Se considero un volume V delimitato da una superficie chiusa A , posso calcolare la portata che passa nel volume usando una integrazione

$$\int_V \text{div}(\vec{C}) dV = 0.$$

Attraverso il teorema di Gauss-Green, si può passare da un integrale di volume ad un integrale di superficie

$$\int_S (C_x \cdot n_x + C_y \cdot n_y + C_z \cdot n_z) dA = 0$$

con (n_x, n_y, n_z) versore normale esterno alla superficie A .

Questo risultato implica che la portata volumetrica che entra nel volume V , a regime stazionario, è uguale a quella uscente dal volume stesso. Sul piano meridiano, qualsiasi sia il segmento da un punto A ad un punto B , attraverso il quale calcolare l'integrale (con la dovuta rotazione attraverso l'asse di rotazione), la portata passante sarà sempre la stessa. Quindi si considerano delle funzioni passanti per questi due punti A e B , tali da avere una differenza tra loro per cui ci sia una certa proporzionalità con la portata volumetrica stessa. Queste funzioni Ψ sono dette funzioni di corrente, e rappresentano la traiettoria della particella. Se si considera un portata infinitesima $dQ = 2\pi \cdot d\Psi$ (vedi figura 1.3), considerando il segmento che congiunge i punti da A a B , allora $\overline{AB} = (-dz, dr)$ e di conseguenza $d\Psi = \nabla \Psi \cdot \overline{AB}$.

Quindi effettuando le opportune sostituzioni, risulta

$$2\pi \cdot d\Psi = 2\pi \cdot \left[\frac{\partial\Psi}{\partial z}(-dz) + \frac{\partial\Psi}{\partial r}(dr) \right]$$

e

$$d\Psi = [r \cdot dz \cdot C_r + r \cdot dr \cdot C_z]$$

da cui si ricava infine

$$C_z = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial\Psi}{\partial r}; \quad C_r = -\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial\Psi}{\partial z}.$$

Quest'ultimo risultato rappresenta il legame tra le componenti della velocità C_r e C_z , e le derivate parziali di Ψ . Le linee di corrente, che sono tangenti al vettore velocità \vec{C} , risultano anche linee a Ψ costante, dato che

$$d\Psi = \frac{\partial\Psi}{\partial z} dz + \frac{\partial\Psi}{\partial r} dr$$

e

$$r \cdot dz \cdot C_r + r \cdot dr \cdot C_z = 0.$$

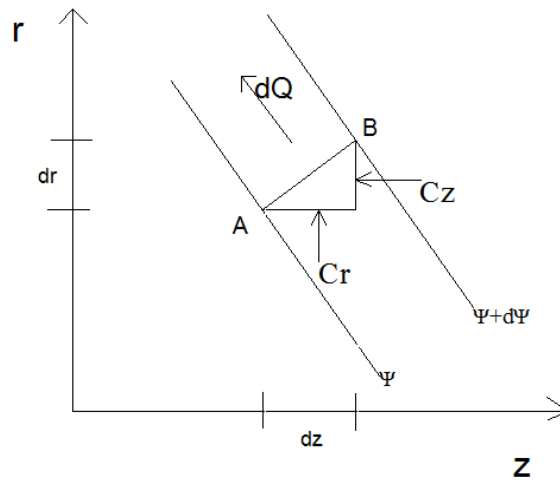


Fig. 1.3: tubo di flusso infinitesimo delimitato dalle funzioni Ψ e $\Psi+d\Psi$, con la rappresentazione delle componenti della velocità C_r e C_z

Per determinare le equazioni del moto in funzione di Ψ , occorre imporre la condizione di irrotazionalità $\vec{\Omega} = \text{rot } \vec{C}$. In coordinate cilindriche, il vettore vorticità $\vec{\Omega}$ si esprime come

$$\vec{\Omega} = \begin{vmatrix} \vec{i}_1 & \vec{i}_2 & \vec{i}_3 \\ \frac{\partial}{\partial \theta} & \frac{r}{\partial z} & \frac{r}{\partial r} \\ rC_u & C_z & C_r \end{vmatrix}$$

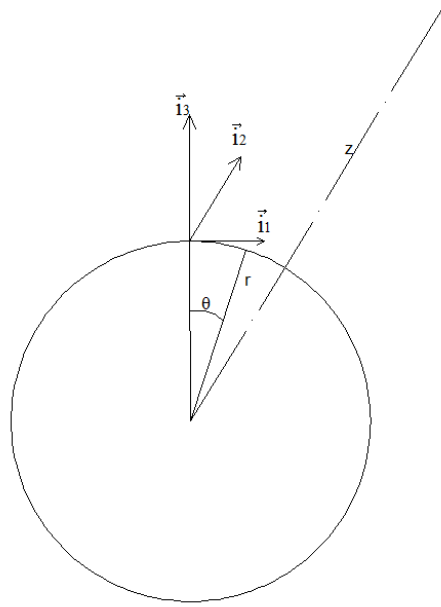


Fig 1.4: componenti cilindriche del vettore vorticità $\vec{\Omega}$

L'equilibrio della corrente meridiana $\vec{C}m = (C_z; C_r)$ è regolato dalla componente del vettore vorticità $\vec{\Omega}$ lungo la direzione \vec{i}_1

$$\Omega_u = \frac{\partial C_r}{\partial z} - \frac{\partial C_z}{\partial r}.$$

Sostituendo i valori di C_r e C_z , l'equazione del moto diventa

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(-\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right) = 0,$$

con il risultato finale di equazione differenziale di secondo ordine

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = 0.$$

L'integrazione di questa funzione serve a determinare il tracciato delle linee meridiane di corrente.

Analogamente si ottiene per la funzione potenziale Φ , l'equazione differenziale di secondo ordine che governa il moto della corrente meridiana

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0.$$

L'integrazione di quest'altra funzione serve invece a determinare il posizionamento dei bordi di ingresso e di uscita delle pale.

Per l'integrazione delle precedenti equazioni differenziali di secondo ordine, vengono di solito adottati metodi numerici come "agli elementi finiti" e "alle differenze finite". Essi servono a sovrapporre al condotto meridiano, un reticolo di maglie quadrate.

Un altro metodo per ottenere un andamento delle linee di corrente, ricavando i raggi per ogni sezione di linea di corrente, è il "metodo delle equivelocità".

1.1.4 . Metodo delle Equivelocità

Nell'ipotesi di monodimensionalità del deflusso, il tracciato di equivelocità del canale meridiano suppone che la distribuzione delle velocità meridiane sia rettangolare. In questo modo si determina un addensamento delle linee di corrente verso il centro di curvatura della corona, tenendo conto che a parità di area, due corone circolari con raggi diversi, richiedono una estensione radiale differente.

Il metodo delle equivelocità permette di determinare i tubi di flusso della macchina. Come dati di partenza ci sono il raggio esterno $r_e = 145.5$ mm, il raggio interno $r_i = 65$ mm, ed il numero di tubi di flusso che si vogliono ottenere. In questo caso ci sono $n_t = 15$ tubi di flusso. Si calcola la superficie attraversata dal fluido in corrispondenza dell'asse della pala della girante, quindi

$$A = \pi(r_e^2 - r_i^2),$$

e di conseguenza l'area di ciascuno tubo di flusso, $A_t = \frac{A}{15}$. A questo punto si calcola il raggio di ogni linea di corrente che delimita il tubo di flusso, a partire dal raggio esterno r_e .

$$r' = \sqrt{-\frac{A_t}{\pi} + r_e^2}$$

Questo valore del raggio trovato, corrisponde ovviamente alla distanza dalla linea di corrente all'asse di rotazione.

$r_e = 145.5 \text{ mm}$	$r_8 = 110.1 \text{ mm}$
$r_1 = 141.6 \text{ mm}$	$r_9 = 104.9 \text{ mm}$
$r_2 = 137.5 \text{ mm}$	$r_{10} = 99.4 \text{ mm}$
$r_3 = 133.3 \text{ mm}$	$r_{11} = 93.5 \text{ mm}$
$r_4 = 129.0 \text{ mm}$	$r_{12} = 87.3 \text{ mm}$
$r_5 = 124.6 \text{ mm}$	$r_{13} = 80.5 \text{ mm}$
$r_6 = 120.0 \text{ mm}$	$r_{14} = 73.2 \text{ mm}$
$r_7 = 115.2 \text{ mm}$	$r_i = 65 \text{ mm}$

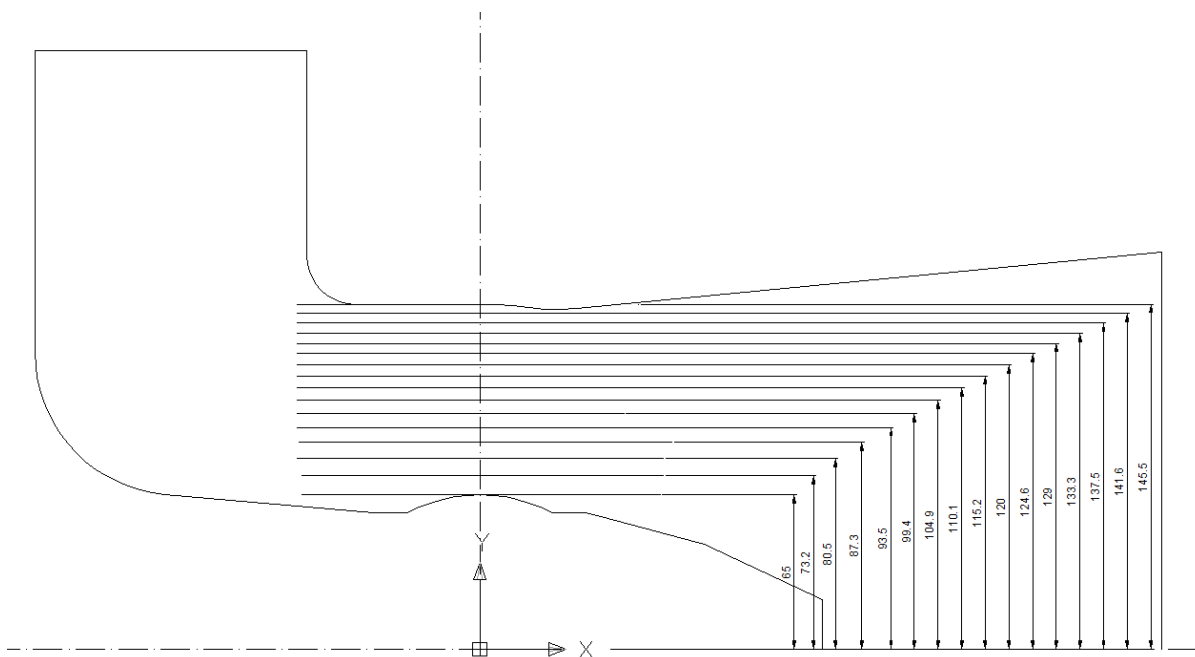


Fig. 1.6: Metodo delle equivocità applicato al condotto meridiano.

Attraverso l'utilizzo di software come MatLab, è possibile calcolare e ricavare le linee meridiane di un condotto (vedi Figura 1.7) attraverso l'utilizzo di algoritmi che non saranno specificati in questo lavoro di tesi.

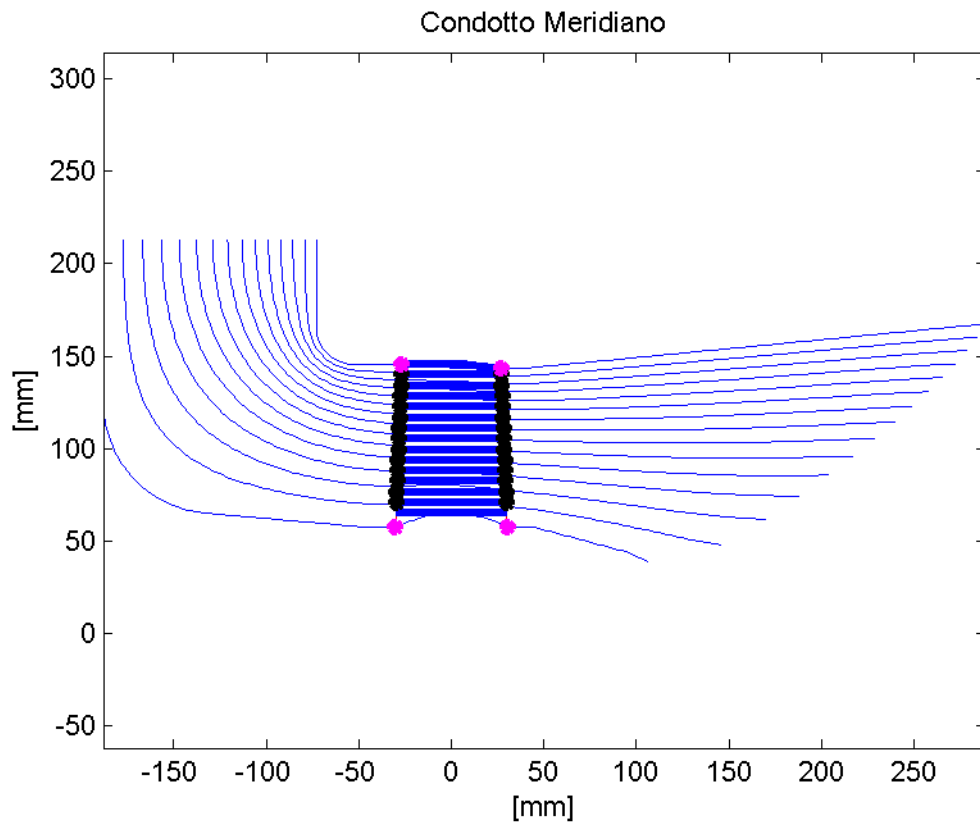


Fig. 1.7: Linee di flusso del condotto meridiano, con evidenziate le sezioni in corrispondenza della girante.

Solo a questo punto, nota la geometria del condotto meridiano e le sezioni di ingresso e uscita della girante, si può passare a posizionare i bordi di ingresso delle pale e utilizzare i tubi di flusso per calcolare i triangoli delle velocità.

1.2 . DIMENSIONAMENTO DELLA GIRANTE

1.2.1 . Calcolo dei triangoli delle velocità

Una volta definita la geometria del condotto meridiano e trovato il posizionamento per i bordi d'ingresso e di uscita delle pale della girante e del distributore, è possibile procedere per il corretto dimensionamento di ambedue i sistemi palettati. Per soddisfare i dati di progetto di salto idrico H e portata volumetrica Q alla massima efficienza, è necessario accoppiare fluidodinamicamente la girante ed il distributore.

Si parte col considerare il tubo di flusso più vicino alla corona, e sulla linea di corrente imporre nulla la componente tangenziale della velocità assoluta all'uscita dalla girante, ovvero $Cu_2 = 0$, così da ottenere un effetto ideale di minima perdita di energia cinetica allo scarico della turbina. In fase di progetto si procede con la Cu_2 nulla per semplificare i conti, mentre nella pratica sarà sempre presente un modesto valore della componente tangenziale. Questo comunque è positivo poiché così viene favorita la diffusione dell'acqua nel tubo di scarico. Infatti le forze centrifughe che derivano dalla Cu_2 non nulla, vanno ad ostacolare un eventuale separazione dello strato limite sullo scarico, in maniera da poter addirittura impiegare angoli di divergenza più elevati, per garantire più stabilità e un miglior recupero di energia cinetica.

Scelto come criterio di ottimizzazione il metodo della $Cu_2 = 0$, si procede con il calcolo della componente tangenziale della velocità assoluta all'ingresso della girante Cu_1 , ricavandola dall'equazione dell'energia

$$gH_t = u_1 \cdot Cu_1 - u_2 \cdot Cu_2;$$

Le velocità meridiane all'ingresso e all'uscita della girante Cm_1 e Cm_2 , si ricavano dal tracciato delle linee meridiane di corrente come

$$Cm_1 = \frac{\frac{Q}{x}}{2\pi \cdot R_1 \cdot \Delta B_1 \cdot \zeta_1}; \quad Cm_2 = \frac{\frac{Q}{x}}{2\pi \cdot R_2 \cdot \Delta B_2 \cdot \zeta_2},$$

dove $\frac{Q}{x}$ è la portata volumetrica passante per l' x -esimo tubo di flusso, ΔB è la larghezza del tubo di flusso in corrispondenza dei raggi R , mentre ζ è il coefficiente di ostruzione. Quest'ultimo si ricava dalle relazioni

$$\zeta_1 = 1 - \frac{Z \cdot Sc_1}{2\pi \cdot R_1}; \quad \zeta_2 = 1 - \frac{Z \cdot Sc_2}{2\pi \cdot R_2},$$

dove Z è il numero di pale, e Sc è lo spessore circonferenziale della pala in corrispondenza del raggio R .

Indicativamente, lo spessore della pala si ricava in funzione della larghezza B all'ingresso della girante, della caduta idrica H e del numero di pale Z , come $Sc \approx \cos t \cdot B \cdot \sqrt{\frac{H}{Z}}$.

Spesso, come in questo caso, il coefficiente di ostruzione viene preso uguale a 1, imponendo lo spessore circonferenziale della pala Sc uguale a zero.

Essendo la C_m e la C_u le componenti della velocità assoluta C , a questo punto comincia a definirsi il triangolo delle velocità. Se si considera la velocità tangenziale U , si possono ricavare anche i triangoli della velocità relativa w , dai quali estrapolare gli angoli di flusso β_1 all'ingresso e β_2 all'uscita dalla girante.

$$\operatorname{tg} \beta_1 = \frac{C_{m1}}{U_1 - C_{u1}}; \quad \operatorname{tg} \beta_2 = \frac{C_{m2}}{U_2 - C_{u2}}$$

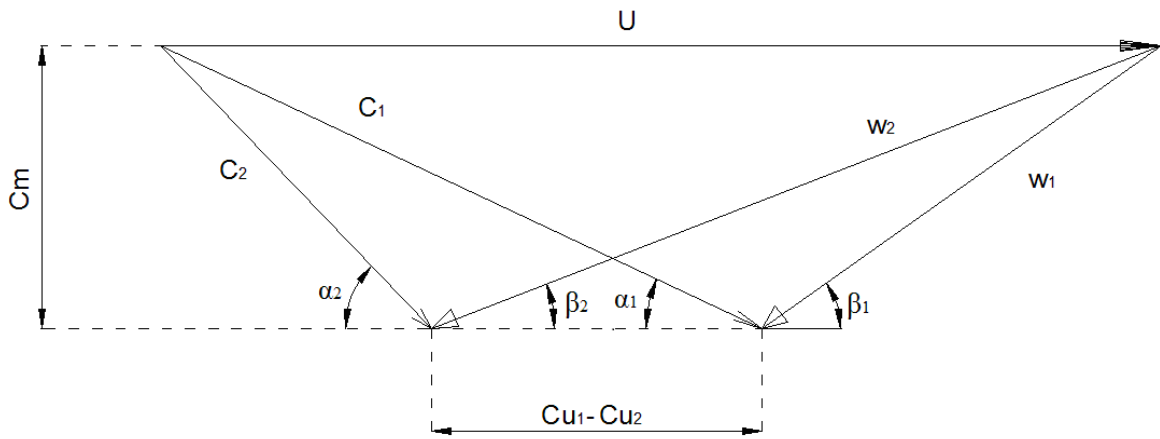


Fig. 1.8: Triangoli delle velocità.

Nota il triangolo delle velocità all'ingresso della girante, risalendo lungo la linea di corrente, si dovrebbe trovare la direzione del flusso all'uscita del distributore, dato che nello spazio tra distributore e girante, a meno delle perdite continue, si conserva il momento della quantità di moto. Quindi si ha che $R_1 C_{u1} = R_0 C_{u0}$ (il pedice "0" si riferisce al distributore) dalla quale ricavare la componente tangenziale della velocità assoluta al distributore, C_{u0} . Si ricava inoltre la componente meridiana della velocità assoluta C_{m0}

$$C_{m0} = \frac{\frac{Q}{x}}{2\pi \cdot R_0 \cdot \Delta B_0 \cdot \zeta_0}; \quad \zeta_0 = 1 - \frac{Z_d \cdot Sc_0}{2\pi \cdot R_0},$$

con Z_d che sta ad indicare il numero di pale del distributore, scelte pari a 16 per quanto riguarda questa Test-Model. La geometria delle pale distributrici è a curvatura semplice, per assicurare un efficiente grado di tenuta nella condizione di totale chiusura.

Si ottiene infine l'angolo assoluto α_0 dalla formula

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{Cm_0}{Cu_0}$$

A questo punto si può ripartire dal secondo tubo di flusso con lo stesso α_0 e procedere ricavando il nuovo triangolo delle velocità sul distributore, passare alla girante tramite la formula $R_0Cu_0 = R_1Cu_1$ e ricavare il triangolo delle velocità sulla girante. Questo metodo iterativo si ripete per x volte, ovvero per il numero dei tubi di flusso, per ottenere i triangoli delle velocità in tutte le sezioni d'ingresso e uscita della girante, con l'obiettivo di disegnare la pala.

Attraverso il software Matlab, è stato implementato un algoritmo per ricavare gli angoli β e le velocità meridiane Cm all'ingresso e all'uscita della girante. Nella figura 1.9 vengono visualizzate le $Cm_{1,2}$ e i $\beta_{1,2}$ in funzione delle sezioni.

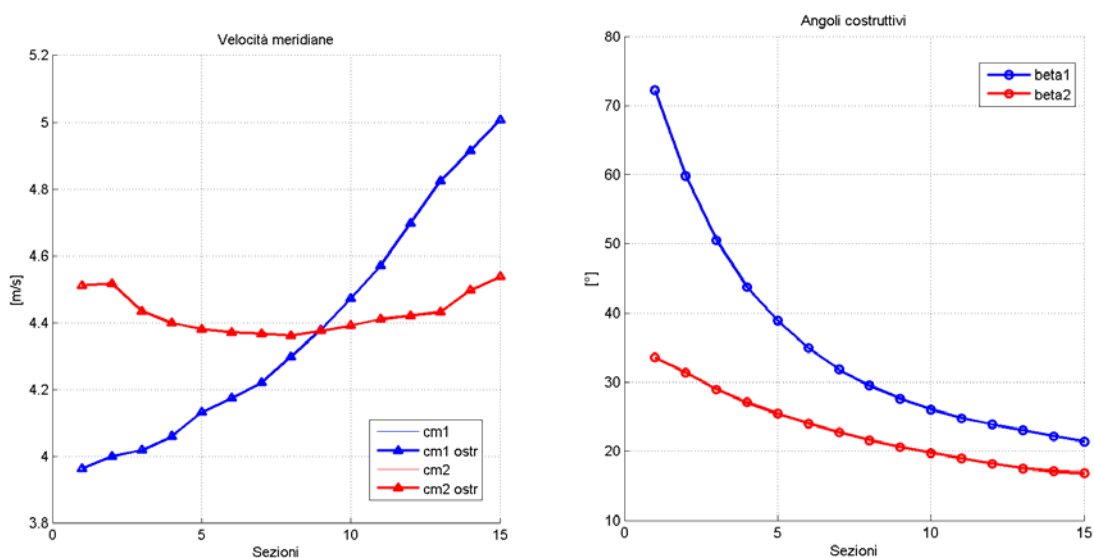


Fig. 1.9: Velocità meridiane e angoli di ingresso e uscita della girante

1.2.2 . Calcolo dei profili palari

Dal punto di vista aerodinamico, la girante è costituita da più pale che, in uno sviluppo di sezione cilindrica, è assimilabile ad una schiera piana con un numero infinito di profili separati da un passo palare t . La schiera di pale possiede una certa geometria assiale che consente alla corrente di riprodurre le stesse condizioni di moto all'interno di ciascun condotto interpale. Inoltre essa è in grado di modificare le proprietà del campo di moto, facendo sentire un cosiddetto "effetto schiera": la velocità w_1 e la pressione p_1 a monte della schiera vengono modificate in w_2 e p_2 a valle della schiera. Il fluido risente di questa

interazione di più pale maggiormente rispetto all'influenza della singola pala. Questo si dimostra attraverso l'analisi di un profilo palare generico, isolato con una superficie di controllo "abcd" come in figura 1.10, al quale si applica il principio della variazione della quantità di moto.

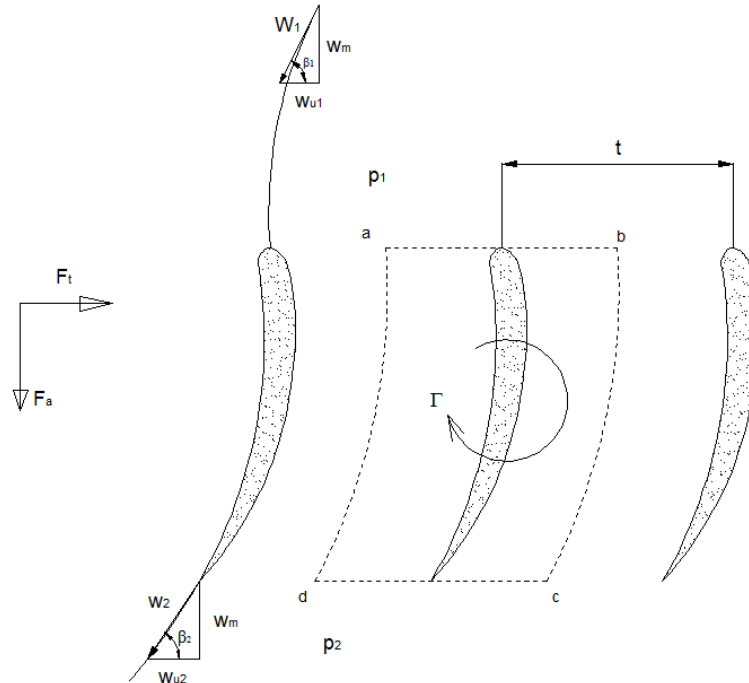


Fig. 1.10: Modello ideale di schiera di pale

La simmetria del campo di moto impone che lungo i contorni "ad" e "bc", ci siano gli stessi valori di pressione e velocità. Considerando invece i lati rimanenti "ab" e "dc", si ricava dalla variazione della quantità di moto in condizioni ideali, la componente tangenziale della forza F_t con l'espressione

$$F_t = \dot{m} \cdot (w_{u2} - w_{u1}).$$

Essendo la portata di massa $\dot{m} = \rho \cdot w_m \cdot S$, con $A = B \cdot t$, e la larghezza B unitaria, la F_t diventa

$$F_t = \rho \cdot w_m \cdot t(w_{u2} - w_{u1}).$$

Questa forza tangenziale rappresenta l'azione che la pala impone al fluido. La componente assiale della forza F_a , invece, rappresenta l'azione del fluido sulla pala, e in condizioni ideali si può quindi ricavare dalla relazione

$$F_a = A(p_1 - p_2).$$

La differenza di pressione $\Delta p = (p_1 - p_2)$ può essere ricavata dalla conservazione della rotazione $\frac{p}{\rho} + \frac{w^2}{2} - \frac{U^2}{2} = \text{cost}$, come $\Delta p = \rho \cdot \frac{w_2^2 - w_1^2}{2}$, che sostituita alla relazione della forza assiale dà

$$F_a = t \cdot \rho \left(\frac{w_2^2 - w_1^2}{2} \right).$$

Per l'equazione di continuità, il fluido è incomprimibile e quindi le componenti meridiane sono uguali $w_{m1} = w_{m2} = w_m$, quindi la formula si semplifica come

$$F_a = t \cdot \rho \frac{(w_{u2} - w_{u1})(w_{u2} + w_{u1})}{2}.$$

La circuitazione attorno al profilo, lungo la superficie di controllo "abcd", è

$$\Gamma = \oint_l v \cdot dl = t(w_{u2} - w_{u1}),$$

la quale sostituita alle componenti della forza, dà i seguenti risultati:

$$F_t = -\rho \cdot w_m \cdot \Gamma; \quad F_a = \rho \frac{(w_{u2} + w_{u1})}{2} \Gamma.$$

Considerando un deflusso ideale, la forza complessiva $F = \sqrt{F_t^2 + F_a^2}$ risulta quindi

$$F = \rho \cdot \Gamma \cdot \sqrt{w_m^2 + \left(\frac{w_{u2} + w_{u1}}{2} \right)^2}.$$

Se si osserva il termine sotto la radice della formula della forza complessiva F, si nota che è la somma dei quadrati di una componente vettoriale media tra le velocità relative in ingresso e in uscita. Questa velocità, nel modello ideale, viene chiamata "velocità indisturbata"

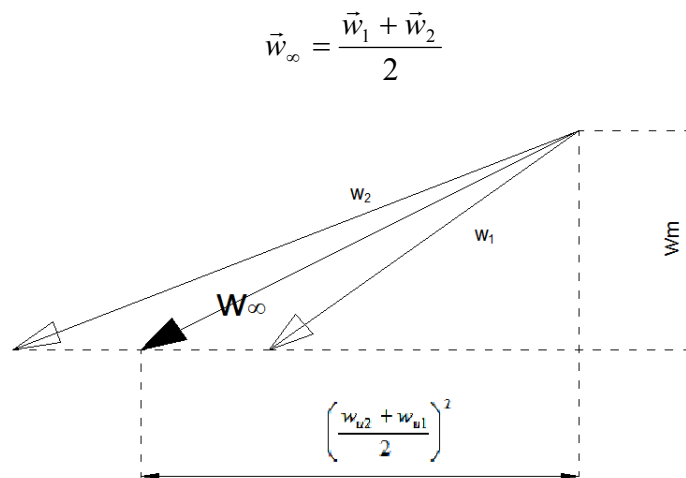


Fig. 1.11: Modello ideale della velocità indisturbata

Inoltre il prodotto scalare tra i vettori $\vec{F} \cdot \vec{w}_\infty$ è nullo, quindi \vec{w}_∞ è perpendicolare alla forza \vec{F} . Infine si ottiene la generalizzazione della relazione ottenuta da Kutta-Joukowski, per un profilo isolato investito da una corrente con velocità indisturbata

$$\vec{F} = \rho \cdot \Gamma \cdot \vec{w}_\infty.$$

La forza F può essere scomposta in una componente ortogonale a w_∞ , detta portanza S, e in una parallela a w_∞ , detta resistenza R.

$$S = \frac{1}{2} \rho \cdot l \cdot C_S \cdot w_\infty^2; \quad R = \frac{1}{2} \rho \cdot l \cdot C_R \cdot w_\infty^2,$$

nota la densità ρ , la lunghezza della corda l del profilo aerodinamico, e i coefficienti di sostentamento (portanza) C_S e di resistenza C_R .

Il coefficiente di sostentamento C_S si può considerare in relazione con il coefficiente di portanza, del tipo $C_S = \cos t \cdot C_L$, con C_L coefficiente di portanza del profilo isolato. Per riassumere in maniera efficace e completa il comportamento fluidodinamico di una schiera di pale, è necessario usare la seguente formula per il coefficiente di sostentamento:

$$C_S = 2 \cdot \frac{t}{l} \cdot \frac{Cu_1 - Cu_2}{w_\infty}.$$

Proprio grazie a questa equazione del coefficiente di sostentamento, i triangoli delle velocità a monte e a valle della schiera, e il rapporto passo palare su lunghezza della corda $\frac{t}{l}$, è possibile ottenere la geometria dei profili palari. Secondo autori quali Vivier e Nechleba, la geometria dei profili aerodinamici è correlata alla costante che lega i coefficienti di sostentamento e di portanza. Questa costante a sua volta è legata al rapporto $\frac{t}{l}$ e all'angolo β .

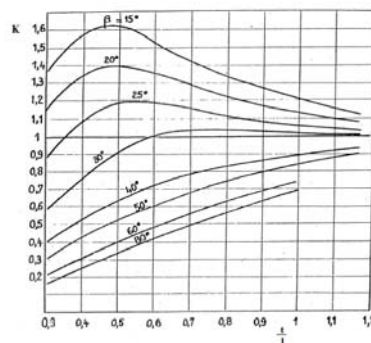


Fig. 1.12: Andamento di $\frac{C_S}{C_L}$ in funzione di $\frac{t}{l}$.

Tuttavia la procedura più semplice e più rapida è quella di usare dei metodi semi-empirici, che fanno uso di dati sperimentali, ottenendo gli stessi risultati del metodo di Vivier e Nechleba. Secondo gli autori Carter, Howell e Constant, la velocità relativa w_2 in uscita dalla pala, subisce una deviazione angolare δ

$$\delta = m \cdot \theta_c \cdot \frac{t}{l} = \beta_2 - \beta_{2b}$$

che è in funzione del rapporto $\frac{t}{l}$, la deviazione costruttiva della pala θ_c , e di un coefficiente m che tiene conto della geometria del profilo tramite l'ascissa dell'alzata massima della linea media del profilo $\frac{x_a}{l}$,

$$m = 0.23 \cdot 2 \frac{x_a}{l} + \frac{90 - \beta_2}{500}.$$

Oppure il fattore m viene stimato in funzione dell'angolo di calettamento γ (o comunque in funzione di $\gamma' = 90 - \gamma$) con una approssimazione, presa a riferimento la curva per le linee medie ad arco di parabola di figura 1.13.

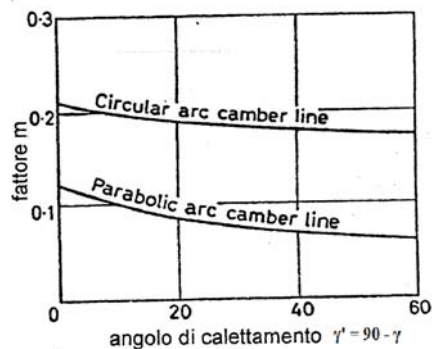


Fig. 1.13: Fattore m in funzione dell'angolo di calettamento γ

Statisticamente due schiere con linee medie diverse, ma con stessa alzata massima, hanno la capacità di deviare il fluido dello stesso angolo.

Analogamente la velocità relativa w_1 all'entrata della pala, subisce una deviazione angolare i , definita angolo di incidenza, che molto spesso viene assunta con un valore nullo.

La deviazione costruttiva della pala θ_c può essere ottenuta come la differenza tra gli angoli costruttivi

$$\theta_c = \beta_{1b} - \beta_{2b}.$$

La deviazione angolare ε tra ingresso e uscita della pala, è invece pari a

$$\varepsilon = \beta_1 - \beta_2 .$$

Essendo che $\beta_1 = (\beta_{1b} + i)$, e $\beta_2 = (\beta_{2b} + \delta)$, allora con le dovute sostituzioni, si ricava che

$$\varepsilon = (\beta_{1b} - \beta_{2b}) + i - \delta$$

e

$$\varepsilon = \theta_c + i - m \cdot \theta_c \cdot \frac{t}{l} .$$

Solitamente la massima differenza di deviazione tra ingresso e uscita ε_{\max} , si verifica nelle condizioni di stallo del profilo alare. Quindi sperimentalmente, la deviazione angolare ε viene presa all'80% della ε_{\max} , così da avere un margine del 20% dallo stallo.

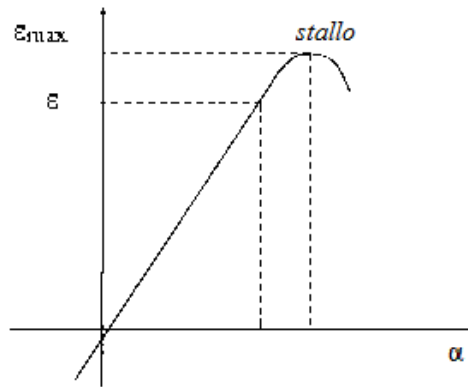


Fig. 1.14: Andamento della deviazione ε in funzione dell'angolo di attacco.

Assunto l'angolo d'incidenza $i = 0$, l'unica incognita che resta da calcolare è la deviazione costruttiva della pala θ_c , che si ottiene come

$$\theta_c = \frac{\varepsilon}{1 - m \cdot \frac{t}{l}} .$$

Una volta stabilita l'ascissa $\frac{x_a}{l}$, dalla θ_c si ricava anche l'ordinata $\frac{y_a}{l}$, e quindi la geometria della linea media.



Fig. 1.15: Caratteristiche geometriche del profilo.

Sovrapponendo una distribuzione simmetrica di spessori alla linea media, si ottiene il disegno del profilo aerodinamico (vedi Figura 1.16).

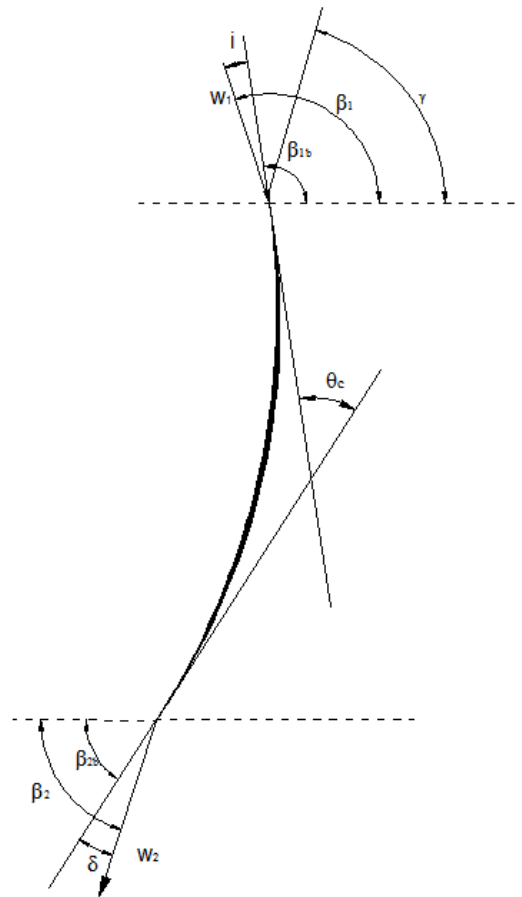


Fig. 1.16: Schema riassuntivo con le deviazioni del profilo alare.

Lo spessore massimo di ogni profilo è sufficiente che sia stimato rispettando delle semplici relazioni che lo mettono in funzione della corda l :

sezione al mozzo $s = (0.12 \div 0.10) \cdot l$;

sezione alla corona $s = (0.06 \div 0.03) \cdot l$.

1.2.3 . Rappresentazione delle linee medie dei profili

La girante è stata suddivisa in un numero discreto di elementi disposti in parallelo che elaborano la stessa energia e un'uguale frazione di portata totale. Gli angoli di ingresso e uscita delle sezioni palari di ciascuna girante elementare sono stati calcolati secondo la teoria monodimensionale appena esposta. In corrispondenza dell'asse della girante, la forma cilindrica della corona e la forma sferica del mozzo (necessaria per garantire la rotazione della pala durante la variazione dell'angolo di calettamento) hanno reso necessario l'utilizzo di numerosi archi di cerchio per sagomare realisticamente le linee medie in ogni sezione della pala. Quindi le sezioni ricavate su piano, sono state successivamente avvolte sulla sfera sulla quale realmente scorre il fluido.

Scelto un sistema di riferimento centrato sul naso del profilo ed assi aventi direzione parallela e perpendicolare alla direzione della corda, sono state trovate le coordinate (x' , y') delle linee medie per ogni sezione, utilizzando un software di interpolazione dati. Successivamente sono state ottenute le coordinate (x , y , z) effettuando l'avvolgimento sul piano sferico delle linee medie. Brevemente, per non entrare troppo in dettaglio, le formule utilizzate sono:

$$\begin{aligned} \vartheta &= \frac{y'}{R}; \\ z &= x'; \\ y &= R \cdot \cos(\vartheta); \\ x &= R \cdot \sin(\vartheta). \end{aligned}$$

Con il passaggio in coordinate cilindriche (z , R , ϑ), si è potuto ottenere la trasformazione conforme delle coordinate (ξ , η), e associando ogni punto al relativo spessore, si è arrivati così ad ottenere i profili della pala per ogni sezione da mozzo a corona¹.

Nelle pagine seguenti, vengono riportate le coordinate ottenute per disegnare le linee medie e i profili per ogni sezione della pala. Affinchè la trattazione non diventi troppo ripetitiva, si è scelto di riportare solamente le coordinate delle prime due sezioni a partire dal mozzo (Layer 1 e Layer 2), e delle ultime due sezioni sulla corona (Layer 15 e Layer 16).

¹ Il passaggio da coordinate cilindriche a conformi, e l'associazione di esse ai relativi spessori, è stato effettuato tramite il software BladeGen 14.5. Per ulteriori informazioni riguardo alcune note di base sull'utilizzo di BladeGen 14.5, vedi Appendice A, paragrafo A.2.2

Tab. 1.2:

Layer 1			Layer 2 [...]			Layer 15			Layer 16		
x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z
14.445	55.656	-32.92	21.071	61.49	-32.456	66.198	123.08	-29.929	68.792	128.21	-30.16
14.444	55.656	-32.857	21.057	61.495	-32.396	66.116	123.12	-29.880	68.706	128.26	-30.11
14.442	55.657	-32.67	21.015	61.509	-32.218	65.87	123.25	-29.732	68.449	128.39	-29.963
14.438	55.658	-32.36	20.944	61.533	-31.923	65.462	123.47	-29.489	68.024	128.62	-29.719
14.429	55.66	-31.934	20.843	61.567	-31.517	64.895	123.77	-29.154	67.433	128.93	-29.382
14.413	55.664	-31.398	20.713	61.611	-31.007	64.175	124.14	-28.730	66.683	129.32	-28.958
14.407	55.689	-30.76	20.552	61.665	-30.398	63.307	124.59	-28.224	65.779	129.78	-28.45
14.583	55.917	-30.019	20.36	61.729	-29.702	62.3	125.1	-27.643	64.729	130.31	-27.867
14.754	56.176	-29.199	20.136	61.802	-28.928	61.161	125.66	-26.993	63.543	130.89	-27.215
14.962	56.522	-28.31	19.879	61.885	-28.086	59.903	126.26	-26.284	62.232	131.52	-26.503
15.177	56.936	-27.367	19.591	61.977	-27.19	58.537	126.9	-25.524	60.809	132.18	-25.74
15.337	57.357	-26.386	19.271	62.078	-26.25	57.075	127.56	-24.723	59.287	132.87	-24.935
15.439	57.783	-25.38	18.92	62.185	-25.281	55.533	128.24	-23.890	57.682	133.58	-24.099
15.482	58.214	-24.361	18.541	62.299	-24.293	53.927	128.93	-23.036	56.01	134.29	-23.241
15.47	58.651	-23.342	18.137	62.418	-23.3	52.273	129.61	-22.171	54.288	134.99	-22.371
15.368	59.035	-22.335	17.71	62.541	-22.312	50.589	130.27	-21.304	52.536	135.68	-21.499
15.06	59.68	-20.615	16.917	62.76	-20.618	47.603	131.39	-19.801	49.429	136.85	-19.987
14.628	60.33	-18.959	16.068	62.983	-18.977	44.583	132.45	-18.322	46.288	137.94	-18.499
14.079	60.982	-17.363	15.164	63.206	-17.388	41.531	133.44	-16.868	43.114	138.97	-17.035
13.384	61.556	-15.825	14.203	63.429	-15.851	38.448	134.36	-15.440	39.909	139.92	-15.595
12.574	62.083	-14.343	13.185	63.649	-14.367	35.335	135.21	-14.036	36.674	140.8	-14.18
11.663	62.573	-12.915	12.11	63.862	-12.935	32.193	135.99	-12.658	33.411	141.61	-12.789
10.663	63.04	-11.541	10.978	64.066	-11.555	29.026	136.7	-11.304	30.122	142.35	-11.422
9.5673	63.442	-10.219	9.7888	64.259	-10.229	25.833	137.34	-9.9758	26.807	143.01	-10.079
8.4018	63.771	-8.9314	8.5586	64.434	-8.9379	22.617	137.91	-8.6723	23.469	143.59	-8.7609
7.2159	64.078	-7.6496	7.3186	64.587	-7.6537	19.379	138.4	-7.3938	20.11	144.1	-7.4669
6.0095	64.357	-6.3732	6.0699	64.716	-6.3754	16.122	138.82	-6.1393	16.73	144.53	-6.1969
4.781	64.585	-5.1019	4.8128	64.822	-5.1029	12.852	139.16	-4.8942	13.337	144.89	-4.9392
3.5323	64.751	-3.8359	3.5478	64.903	-3.8362	9.5733	139.42	-3.6536	9.9354	145.16	-3.686
2.2684	64.858	-2.5753	2.2755	64.96	-2.5753	6.2875	139.61	-2.4174	6.5263	145.35	-2.4373
0.9942	64.94	-1.3204	0.9961	64.992	-1.3203	2.9966	139.72	-1.1857	3.112	145.47	-1.193
-0.2896	64.982	-0.0712	-0.2895	64.999	-0.0711	-0.2976	139.75	0.0416	-0.3057	145.5	0.0468
-1.58	64.933	1.1719	-1.5813	64.981	1.1722	-3.5934	139.7	1.2645	-3.7248	145.45	1.2822
-2.8735	64.852	2.409	-2.8784	64.936	2.4098	-6.8889	139.58	2.4829	-7.1427	145.3	2.513
-4.1691	64.738	3.6399	-4.1804	64.865	3.6415	-10.182	139.38	3.6969	-10.557	145.06	3.7392
-5.4609	64.552	4.8641	-5.4868	64.768	4.8674	-13.472	139.1	4.9064	-13.964	144.73	4.9607
-6.7488	64.324	6.0817	-6.797	64.644	6.0874	-16.755	138.74	6.1115	-17.362	144.31	6.1774
-8.0293	64.046	7.2923	-8.1105	64.492	7.3017	-20.031	138.31	7.3122	-20.75	143.8	7.3894
-9.3019	63.729	8.4959	-9.4265	64.313	8.5101	-23.297	137.79	8.5084	-24.124	143.21	8.5966
-10.56	63.353	9.6918	-10.745	64.106	9.7126	-26.552	137.2	9.7002	-27.482	142.53	9.7988
-11.803	62.924	10.88	-12.064	63.871	10.909	-29.794	136.54	10.8880	-30.821	141.76	10.996
-13.027	62.448	12.06	-13.385	63.607	12.1	-33.02	135.79	12.0700	-34.14	140.9	12.188
-14.24	61.948	13.232	-14.705	63.315	13.285	-36.23	134.97	13.2490	-37.434	139.95	13.375
-15.44	61.425	14.397	-16.025	62.994	14.465	-39.421	134.07	14.4230	-40.702	138.92	14.557
-16.613	60.843	15.553	-17.344	62.643	15.638	-42.591	133.1	15.5930	-43.942	137.8	15.734
-17.766	60.229	16.7	-18.661	62.264	16.806	-45.739	132.05	16.7580	-47.153	136.6	16.906
-18.887	59.557	17.837	-19.976	61.854	17.967	-48.863	130.93	17.9180	-50.328	135.31	18.072
-19.983	58.852	18.965	-21.287	61.416	19.123	-51.96	129.73	19.0750	-53.469	133.94	19.233
-21.052	58.11	20.082	-22.594	60.947	20.274	-55.03	128.46	20.2270	-56.573	132.49	20.388
-22.087	57.328	21.19	-23.897	60.448	21.418	-58.071	127.11	21.3740	-59.644	130.98	21.539
-23.094	56.516	22.287	-25.194	59.919	22.556	-61.08	125.7	22.5170	-62.679	129.39	22.685
-24.058	55.654	23.372	-26.485	59.359	23.689	-64.056	124.21	23.6550	-65.683	127.76	23.827
-24.995	54.771	24.446	-27.769	58.77	24.816	-66.997	122.64	24.7890	-68.65	126.06	24.964
-25.897	53.86	25.509	-29.046	58.149	25.937	-69.901	121.01	25.9190	-71.587	124.31	26.097
-26.771	52.929	26.561	-30.314	57.498	27.052	-72.767	119.31	27.0440	-74.483	122.5	27.226
-27.585	51.942	27.597	-31.573	56.817	28.161	-75.594	117.54	28.1650	-77.349	120.64	28.351
-28.375	50.948	28.623	-32.821	56.105	29.265	-78.378	115.7	29.2810	-80.172	118.72	29.472
-29.142	49.946	29.638	-34.059	55.362	30.362	-81.119	113.8	30.3930	-82.963	116.76	30.59
-30.021	49.079	30.662	-35.285	54.589	31.454	-83.816	111.83	31.5010	-85.712	114.73	31.704
-31.079	48.391	31.707	-36.499	53.785	32.54	-86.466	109.79	32.6040	-88.423	112.65	32.814
-32.134	47.683	32.747	-37.699	52.951	33.62	-89.067	107.69	33.7020	-91.091	110.52	33.92
-33.188	46.955	33.78	-38.885	52.086	34.695	-91.619	105.53	34.7960	-93.719	108.33	35.023
-34.233	46.199	34.808	-40.056	51.191	35.763	-94.12	103.3	35.8860	-96.305	106.1	36.123
-35.266	45.416	35.829	-41.211	50.266	36.826	-96.568	101.02	36.9710	-98.852	103.81	37.22
-36.287	44.604	36.843	-42.349	49.311	37.883	-98.961	98.675	38.0520	-101.35	101.47	38.313

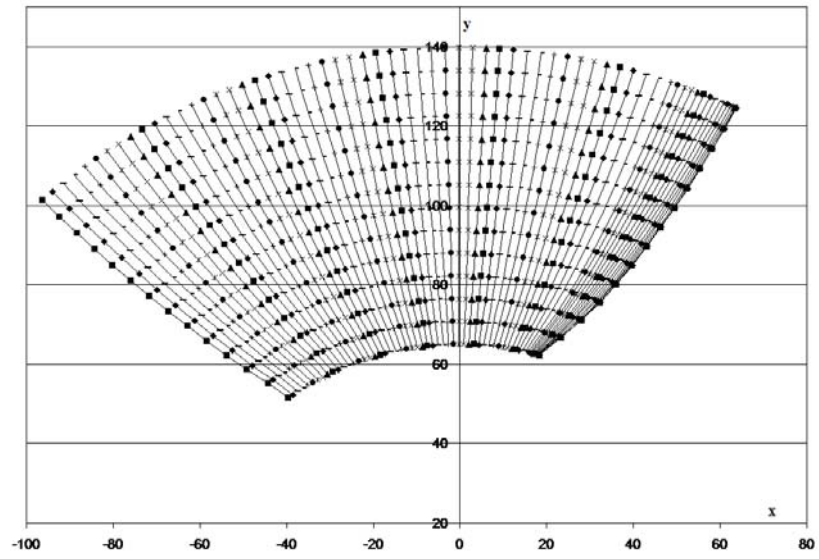


Fig. 1.17: Linee medie, piano (y,x)

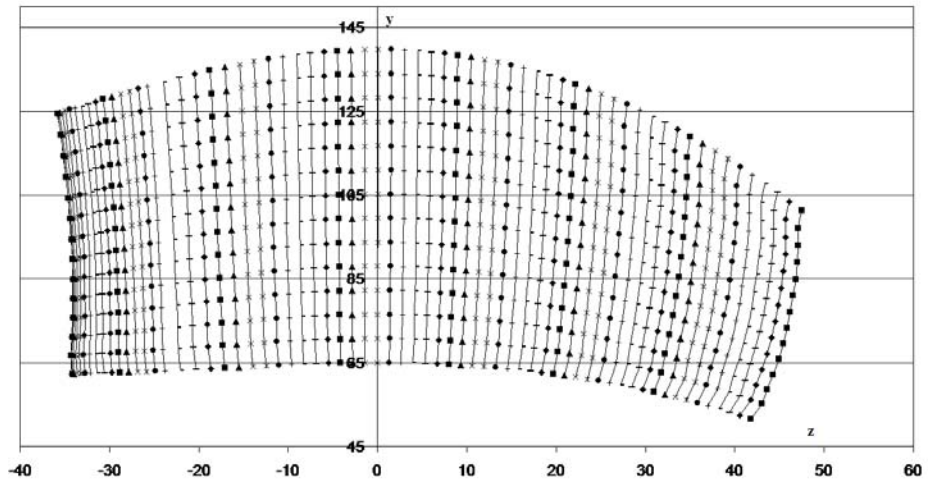


Fig. 1.18: Linee medie, piano (y,z)

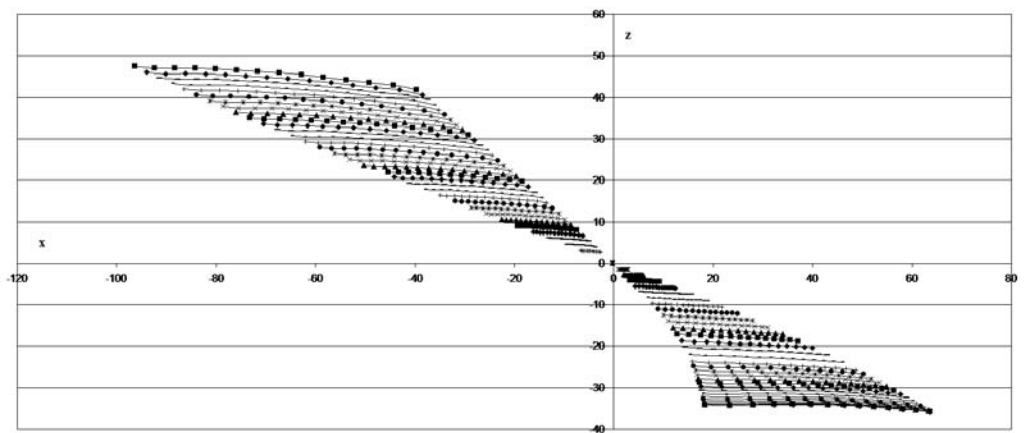


Fig. 1.19: Linee medie, piano (z,x)

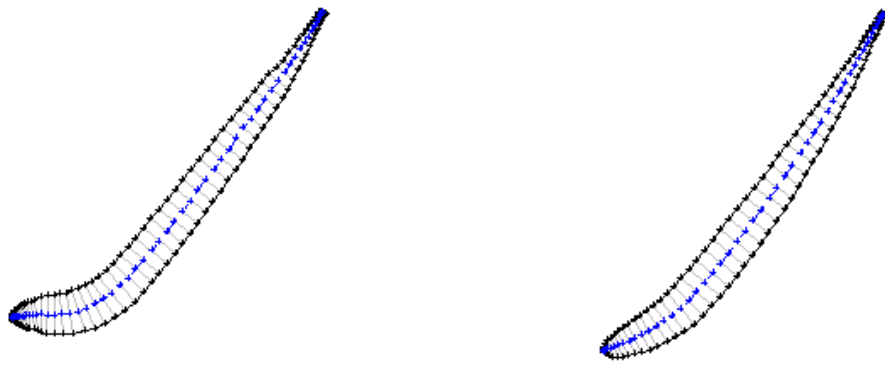


Fig. 1.20: Profilo dei Layer 1 e Layer 2

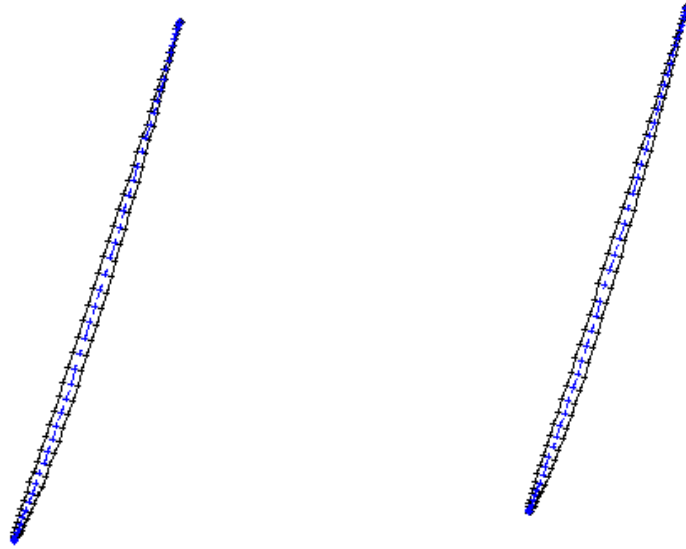


Fig. 1.21: Profilo dei Layer 15 e Layer 16

1.3 . DIMENSIONAMENTO DELLO STATORE

1.3.1 . Caratteristiche principali del distributore

I compiti delle pale distributrici è quello di regolare la portata attraverso la variazione dell'angolo di calettamento, e di imporre la direzione della velocità assoluta all'ingresso della girante.

Solitamente la geometria della pala del distributore viene presa a semplice curvatura, per assicurare la tenuta, e con una lunghezza tale da garantire il mutuo ricoprimento per poter interrompere il flusso d'acqua alla girante, quando necessario.

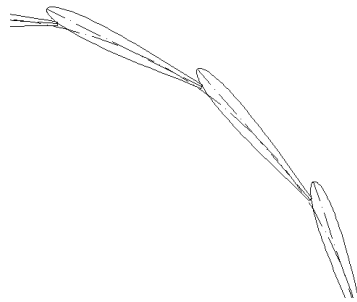


Fig. 1.22: Esempio di chiusura del distributore

Il diametro D_0 del perno della pala distributrice viene stimato tramite dei diagrammi statistici.

$$D_d = 360 \text{ mm.}$$

Il numero di pale del distributore Z_d è legato al diametro D_d , con delle relazioni empiriche. Inoltre Z_d deve differire dal numero di pale della girante Z , per aumentare la frequenza di risonanza del sistema quando le pale rotoriche passano simultaneamente sotto quelle statoriche, così da evitare fluttuazioni periodiche della portata. Essendo $Z = 5$ nella girante, il numero di pale distributrici viene assunto pari a

$$Z_d = 16,$$

rispettando la relazione empirica che suggerisce una certa proporzionalità di Z_d con il raggio del distributore, $Z_d \approx \text{cost} \cdot \sqrt[3]{R_d}$.

1.3.2 . Lunghezza nominale e spessore della pala direttrice

Per calcolare la lunghezza della pala direttrice, vengono impiegate delle relazioni di origine empirica. La lunghezza nominale teoria L_{th} , viene calcolata secondo la formula

$$L_{th} = \frac{R_d}{Z_d} \cdot \frac{\pi}{0.42} \cdot \left(1 + \frac{2}{k_e} \right)$$

dove k_e è un coefficiente di natura empirica ($k_e \approx 15$).

La lunghezza effettiva della pala L_d , risulta invece essere

$$L_d = 0.84 \cdot L_{th}$$

Lo spessore minimo s_{min} si ottiene da una analisi strutturale della pala, supponendola appoggiata a dei punti di contatto, i perni, e applicando relazioni e osservazioni sperimentali.

$$\left(\frac{s}{L_{th}}\right)_{min} = \sqrt{\left(\frac{\rho \cdot g \cdot h}{\sigma_{adm}}\right) \cdot \left[l_1 \cdot \left(\frac{B_d}{L_{th}}\right)^2 \cdot \frac{B}{B_d} + l_2\right]},$$

con

$$\frac{B}{B_d} = \frac{B_p}{B_d} - 0.1931 \cdot \frac{B_t}{B_d} \cdot \frac{T_d}{L_{th}} \cdot \frac{\cos(\lambda)}{\sin(\beta)} - 0.5.$$

Va precisato il significato delle grandezze sopra utilizzate:

ρ = massa volumica (1000 kg/m³);

g = pressione accelerazione di gravità (9.8 m/s²);

h = salto idrico (4 m)

σ_{adm} = tensione ammissibile dell'acciaio inossidabile ($\cong 10^8$ N/m²);

l_1, l_2 = coefficienti di laboratorio (uguali rispettivamente a 1.435 e 0.4132);

B_d = larghezza distributore (115 mm);

B_p = stima della distanza tra i supporti (135 mm);

B_t = stima della lunghezza, media perni (20 mm)

T_d = passo circonferenziale delle pale sul diametro D_d ($T_d = \frac{\pi \cdot D_d}{12} = 94.25$);

λ = angolo tra la componente normale della sollecitazione e l'asse della pala (0°);

β = angolo leva bielletta (90°);

Dai calcoli, risulta

$$L_{th} = 92.86 \text{ mm}$$

$$L_d = 78 \text{ mm}$$

$$s_{min} = 3 \text{ mm}$$

Lo spessore minimo risulta di 3 millimetri, ma per operare in sicurezza, in una macchina di piccole dimensioni, è meglio portarlo ad un valore leggermente più elevato.

$$s = 4.5 \text{ mm}$$

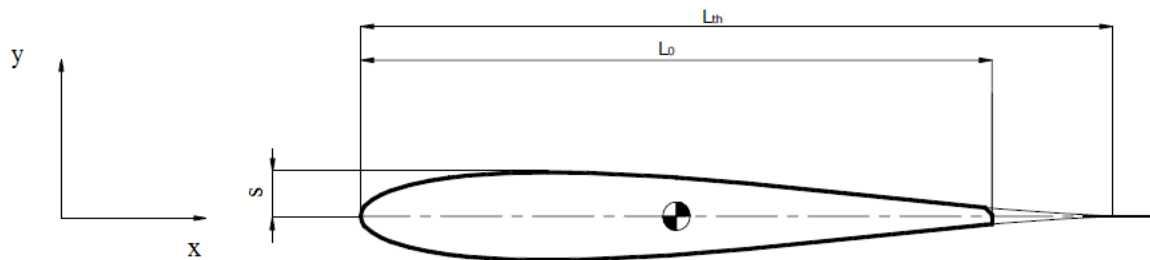


Fig. 1.23: Esempio di pala distributrice

1.3.3 . Forma della pala direttrice

La forma della pala direttrice è ricavabile analiticamente dalla relazione

$$\frac{2y}{s} = 4 \cdot \left(1 - \frac{x}{L_{th}}\right) \cdot \sqrt{\frac{x}{L_{th}} \cdot \left(1 - \frac{x}{L_{th}}\right)}$$

dove

y = semispessore della pala [mm];

L_{th} = lunghezza nominale della pala [92.86 mm];

x = coordinata lungo l'asse della pala [mm].

Nella seguente tabella (Tab. 1.4) sono stati generati dei punti di coordinata x , per generare i semispessori y attraverso delle semplificazioni della formula della forma della pala direttrice, scritta in precedenza. Le coordinate x sono più numerose sul naso del profilo, per infittire i punti e rendere migliore l'andamento della curvatura del profilo, evitando la comparsa di spigoli vivi nel modello, i quali potrebbero interferire con le condizioni di incidenza reali della corrente.

Tab. 1.4

x [1]	x/L_{th} [2]	$1-(x/L_{th})$ [3]	[2]*[3] [4]	radice[4] [5]	[3]*[5] [6]	y $2s=9$
0	0	1	0	0	0	0
0.25	0.002692	0.997308	0.00269	0.051818	0.051678	0.465104
0.5	0.005385	0.994615	0.00536	0.073182	0.072788	0.655095
0.75	0.008077	0.991923	0.00801	0.089508	0.088785	0.799069
1	0.010769	0.989231	0.01065	0.103215	0.102103	0.918931
1.25	0.013462	0.986538	0.01328	0.115241	0.113689	1.023204
1.5	0.016154	0.983846	0.01589	0.126067	0.124031	1.116279
1.75	0.018846	0.981154	0.01849	0.135982	0.133419	1.200773
2	0.021539	0.978461	0.02107	0.145171	0.142045	1.278401
2.25	0.024231	0.975769	0.02364	0.153765	0.15004	1.350356
2.5	0.026923	0.973077	0.0262	0.161859	0.157501	1.417513

2.75	0.029616	0.970384	0.02874	0.169524	0.164504	1.480534
3	0.032308	0.967692	0.03126	0.176817	0.171104	1.539937
3.25	0.035	0.965	0.03378	0.18378	0.177348	1.596132
3.5	0.037693	0.962307	0.03627	0.190452	0.183273	1.649458
3.75	0.040385	0.959615	0.03875	0.19686	0.18891	1.700191
4	0.043077	0.956923	0.04122	0.203031	0.194285	1.748565
4.25	0.04577	0.95423	0.04367	0.208985	0.19942	1.794778
4.5	0.048462	0.951538	0.04611	0.21474	0.204333	1.839001
4.75	0.051154	0.948846	0.04854	0.220312	0.209042	1.881381
5	0.053847	0.946153	0.05095	0.225715	0.213561	1.922046
5.33	0.0574	0.9426	0.05411	0.232606	0.219254	1.97329
5.66	0.060954	0.939046	0.05724	0.239246	0.224663	2.02197
6	0.064616	0.935384	0.06044	0.245847	0.229961	2.069651
6.33	0.06817	0.93183	0.06352	0.252037	0.234856	2.113701
6.66	0.071724	0.928276	0.06658	0.25803	0.239523	2.155706
7	0.075385	0.924615	0.0697	0.264012	0.244109	2.196983
7.33	0.078939	0.921061	0.07271	0.269644	0.248358	2.235224
7.66	0.082493	0.917507	0.07569	0.275114	0.252419	2.271773
8	0.086154	0.913846	0.07873	0.280592	0.256418	2.30776
8.33	0.089708	0.910292	0.08166	0.285763	0.260128	2.341153
8.66	0.093262	0.906738	0.08456	0.2908	0.263679	2.37311
9	0.096924	0.903076	0.08753	0.295854	0.267179	2.404608
9.33	0.100478	0.899522	0.09038	0.300636	0.270429	2.433858
9.66	0.104032	0.895968	0.09321	0.305301	0.27354	2.461864
10	0.107693	0.892307	0.0961	0.309992	0.276608	2.489475
10.5	0.113078	0.886922	0.10029	0.316688	0.280877	2.527897
11	0.118462	0.881538	0.10443	0.323155	0.284873	2.563858
11.5	0.123847	0.876153	0.10851	0.329407	0.288611	2.597498
12	0.129232	0.870768	0.11253	0.335456	0.292105	2.628942
12.5	0.134616	0.865384	0.11649	0.341313	0.295367	2.658303
13	0.140001	0.859999	0.1204	0.346988	0.298409	2.685685
13.5	0.145386	0.854614	0.12425	0.352489	0.301242	2.711181
14	0.15077	0.84923	0.12804	0.357825	0.303876	2.73488
14.5	0.156155	0.843845	0.13177	0.363002	0.306318	2.756858
15	0.16154	0.83846	0.13544	0.368028	0.308577	2.777192
15.5	0.166924	0.833076	0.13906	0.372908	0.310661	2.795947
16	0.172309	0.827691	0.14262	0.377649	0.312576	2.813188
16.5	0.177694	0.822306	0.14612	0.382255	0.31433	2.828974
17	0.183078	0.816922	0.14956	0.386731	0.315929	2.843358
17.5	0.188463	0.811537	0.15294	0.391081	0.317377	2.856393
18	0.193848	0.806152	0.15627	0.395311	0.318681	2.868127
18.5	0.199232	0.800768	0.15954	0.399423	0.319845	2.878606
19	0.204617	0.795383	0.16275	0.403421	0.320875	2.887871
19.5	0.210002	0.789998	0.1659	0.407309	0.321774	2.895964
20	0.215386	0.784614	0.16899	0.41109	0.322547	2.902922
21	0.226156	0.773844	0.17501	0.418341	0.323731	2.913578
22	0.236925	0.763075	0.18079	0.425196	0.324456	2.920107
23	0.247694	0.752306	0.18634	0.431673	0.32475	2.922753
24	0.258463	0.741537	0.19166	0.43779	0.324637	2.921736
25	0.269233	0.730767	0.19675	0.443561	0.32414	2.91726

26	0.280002	0.719998	0.2016	0.449	0.323279	2.909511
27	0.290771	0.709229	0.20622	0.454118	0.322074	2.898663
28	0.301541	0.698459	0.21061	0.458927	0.320542	2.884876
29	0.31231	0.68769	0.21477	0.463435	0.3187	2.8683
30	0.323079	0.676921	0.2187	0.467653	0.316564	2.849074
31	0.333849	0.666151	0.22239	0.471586	0.314148	2.827331
32	0.344618	0.655382	0.22586	0.475244	0.311466	2.803195
33	0.355387	0.644613	0.22909	0.47863	0.308531	2.776782
34	0.366157	0.633843	0.23209	0.481753	0.305356	2.748204
35	0.376926	0.623074	0.23485	0.484616	0.301952	2.717566
36	0.387695	0.612305	0.23739	0.487224	0.29833	2.684969
37	0.398464	0.601536	0.23969	0.489582	0.294501	2.650509
38	0.409234	0.590766	0.24176	0.491692	0.290475	2.614278
39	0.420003	0.579997	0.2436	0.493559	0.286263	2.576364
40	0.430772	0.569228	0.24521	0.495184	0.281873	2.536853
42	0.452311	0.547689	0.24773	0.497721	0.272596	2.453365
44	0.47385	0.52615	0.24932	0.499316	0.262715	2.364436
46	0.495388	0.504612	0.24998	0.499979	0.252295	2.270656
48	0.516927	0.483073	0.24971	0.499713	0.241398	2.172583
50	0.538465	0.461535	0.24852	0.498518	0.230083	2.07075
52	0.560004	0.439996	0.2464	0.496386	0.218408	1.965672
54	0.581543	0.418457	0.24335	0.493306	0.206427	1.857847
56	0.603081	0.396919	0.23937	0.489259	0.194196	1.747764
58	0.62462	0.37538	0.23447	0.484221	0.181767	1.635902
60	0.646159	0.353841	0.22864	0.478161	0.169193	1.522738
62	0.667697	0.332303	0.22188	0.471039	0.156528	1.408748
64	0.689236	0.310764	0.21419	0.462806	0.143824	1.294413
66	0.710774	0.289226	0.20557	0.453403	0.131136	1.180221
68	0.732313	0.267687	0.19603	0.442753	0.118519	1.066674
70	0.753852	0.246148	0.18556	0.430766	0.106032	0.954291
72	0.77539	0.22461	0.17416	0.417325	0.093735	0.843617
74	0.796929	0.203071	0.16183	0.402285	0.081692	0.735232
76	0.818468	0.181532	0.14858	0.385459	0.069973	0.629759
78	0.840006	0.159994	0.1344	0.3666	0.058654	0.527884

L'andamento che se ne ricava è quello mostrato in figura 1.24.

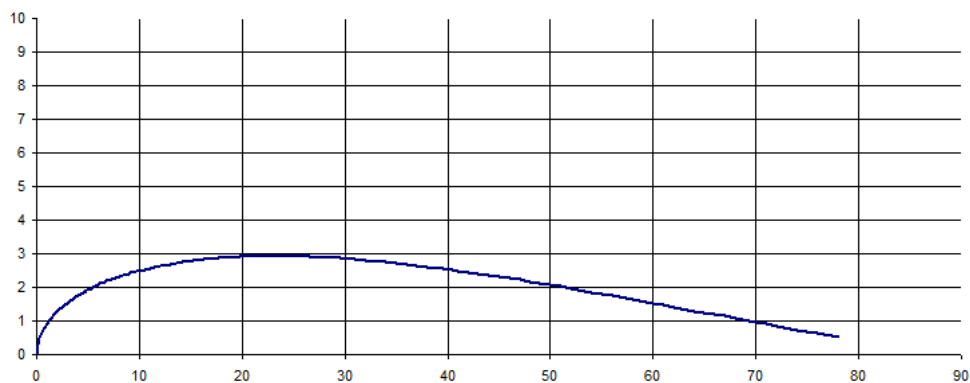


Fig. 1.24

1.3.4 Dimensioni principali del predistributore

Nello spazio compreso tra distributore e voluta, si deve introdurre un'ulteriore schiera di pale statoriche. La scelta della lunghezza della pala è direttamente proporzionale con l'ingombro radiale del predistributore, che è $D_0 = 235$ mm. Quindi la lunghezza della pala viene presa come $L_0 = 54$ mm. L'inclinazione infine viene determinata per via grafica. Il numero di pale del predistributore viene composta da barre di irrigidimento strutturale, la quale oltre a garantire un rinforzo alla voluta, regolarizzano la corrente e deviano il vettore velocità conferendogli già una componente tangenziale in ingresso al distributore. Poiché l'introduzione di un ulteriore organo palettato in genere incide sul costo della macchina, di solito il predistributore è progettato col massimo della semplicità. Infatti le pale fisse sono a spessore costante a 6 mm, mentre la scelta della lunghezza imposto a 8.

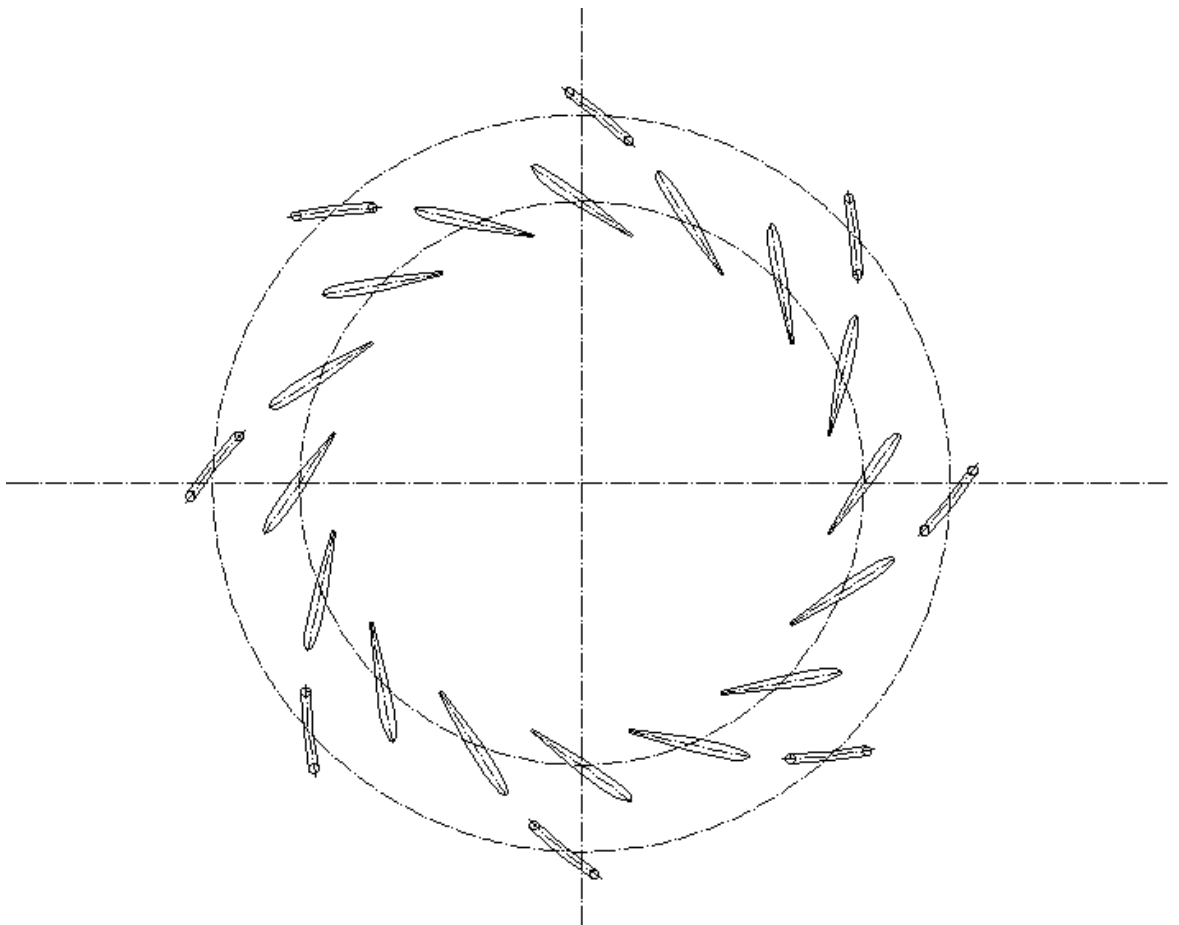


Fig. 1.25: distributore e predistributore

Il dimensionamento della voluta non è stato effettuato in questo lavoro di tesi, ma la sua presenza è stata opportunamente presa in considerazione attraverso alcuni accorgimenti che verranno esposti nel capitolo successivo.

Capitolo 2

La Modellizzazione della Macchina

Lo studio scientifico della realtà avviene molto spesso con una semplificazione, che è l'adozione di un modello teorico più adatto a rappresentarla. Questo processo di astrazione, permette di ignorare gli aspetti secondari del problema, che di solito è complesso, per mettere in risalto gli aspetti salienti che si vogliono analizzare. Durante il processo di modellizzazione però, è necessario porre molta attenzione a non semplificare troppo il problema, per evitare di svincolarsi dalla realtà e venire meno all'attendibilità dei risultati. Ovviamente l'attendibilità dei risultati resta comunque relativa alla sua rappresentazione astratta, e non alla realtà, e quindi va presa come riferimento e punto di confronto, non come dato assoluto.

2.1 . LA STRUTTURA DEL PACCHETTO SOFTWARE CFX 14.5

Si ritiene utile introdurre brevemente le principali caratteristiche dell'insieme di programmi utilizzati per effettuare le verifiche fluidodinamiche.

Il Computational Fluid Dynamics (CFD) è uno strumento informatico che permette di effettuare simulazioni del comportamento dei domini fluidi tenendo conto delle condizioni di deflusso, col fine di prendere visione dell'effettivo comportamento di una macchina. Si tratta di un utile ed importante strumento d'ausilio per la progettazione. 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.

In particolare, il CFD utilizzato in questo lavoro di tesi, è il software CFX 14.5 della ANSYS Inc, specializzato appunto nelle simulazioni computazionali nel campo dell'ingegneria.

La struttura base in cui operano le principali "software houses", è da considerarsi del tutto generale. In particolare, i componenti contenuti nel pacchetto CFX 14.5 sono:

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

2.1.1 . TurboGrid 14.5

Mediante questo programma vengono geometricamente costruiti in 3D i volumi fluidi da simulare. Questa geometria viene prima studiata in tutta la sua topologia, e poi viene riprodotta come mesh, ovvero viene ricreata come un insieme di griglie che occupando il volume della geometria di partenza, formano un insieme di nodi che fanno da base per applicare le formule di simulazione per il CFD.

A partire da delle coordinate 2D, TurboGrid 14.5 è in grado di costruire la geometria del volume fluido che si vuole analizzare, ma solo nel momento in cui all'interno di esso sia presente un profilo palare. Oppure, come per la girante, è possibile importare direttamente la geometria costruita con altri programmi appositi per la costruzione di pale, come BladeGen 14.5, da cui poter poi partire con lo studio della topology e infine con la meshatura. Nelle parti della macchina, in cui non erano presenti corpi palettati, si è utilizzato un modellatore e meshatore più generico, chiamato ICEM CFD 14.5, che fa comunque parte del pacchetto ANSYS Inc.

Le potenzialità di TurboGrid 14.5 come meshatore di corpi alettati, sono notevoli, dato che in automatico consente di creare delle mesh esaedriche di elevata qualità, agendo prima sui parametri di controllo della sua topologia, e poi manualmente sul posizionamento dei nodi della mesh. Il software ICED CFD 14.5 risulta invece molto più complicato e laborioso per la creazione della mesh, e in questo lavoro di tesi viene impiegato solamente per la costruzioni di alcuni condotti privi di palettature².

Una volta costruita la mesh di ogni componente, ovvero predistributore, distributore e girante con TurboGrid 14.5, mentre raccordo e scarico con ICEM CFD 14.5, ogni file viene salvato in formato mesh, per essere importato del programma successivo, ovvero il CFX-Pre 14.5 .

2.1.2 . CFX-Pre 14.5

Le mesh dei volumi fluidi generate precedentemente con il software meshatore, possono essere assemblate con il pre-processore CFX-Pre 14.5 . Per garantire che ogni interfaccia combaci l'una con l'altra, il programma permette di effettuare moti rigidi di rotazione e traslazione dei volumi fluidi.

² Per informazioni più dettagliate riguardo la costruzione di una mesh tramite i programmi TurboGrid e ICEM CFD 14.5, vedi "Appendice A".

Il volume interno di ogni mesh viene nominato affinché sia possibile poi definirne il ruolo (regime stazionario o transiente, moto rotatorio o statico, tipo di fluido, pressione di riferimento, perdite ecc.). Lo stesso viene fatto per le superfici esterne delle mesh, per definire se siano semplicemente di contorno, o di interfaccia con un'altra superficie, con fluido uscente o entrante, o se siano un punto di collegamento per la ripetizione periodica del componente stesso.

Attraverso l'uso di espressioni, è possibile definire il tipo di analisi che si vuole effettuare ed eventualmente ricavarne delle equazioni, o monitorare determinati parametri³.

Infine è possibile stabilire i criteri di convergenza per decretare l'arresto della simulazione, attraverso il numero massimo di iterazioni, o attraverso il valore del residuo massimo. Quindi viene salvato un file che può essere letto dal programma successivo, per effettuare la simulazione.

2.1.3 . CFX-Solver Manager 14.5

Le equazioni di Navier-Stokes sono delle equazioni differenziali di secondo ordine che reggono il moto turbolento dei fluidi. In quanto equazioni differenziali alle derivate parziali, sono molto complesse e non esiste alcuna soluzione analitica generale, ma solo soluzioni in casi particolari ed estremamente semplificati. Grazie agli sviluppi dell'informatica e dell'elettronica, a queste equazioni è possibile fornire una soluzione numerica ben approssimata, e il CFX-Solver Manager 14.5 ne è un esempio concreto. Infatti questo programma risolve le citate equazioni, assegnando delle determinate condizioni al contorno, nei volumi specificati.

L'argomento risulta molto complesso, ma risulta comunque utile accennare brevemente il modo di lavorare del CFX-Solver Manager 14.5 .

Ciò che compie questo programma, è una integrazione numerica, secondo la tecnica dei volumi finiti, delle equazioni di Navier-Stokes scritte in forma conservativa. Per tecnica dei volumi finiti si intende quando si suddivide una superficie in tante piccole aree, chiamate volumi di controllo, in cui poi le equazioni vengono risolte. Quindi il motivo per cui si costruiscono le mesh sulle geometrie in esame, è per semplificare con forme più semplici possibili, quei componenti con delle forme inizialmente più complesse. Un'ulteriore semplificazione si ottiene applicando il teorema della divergenza di Gauss alle equazioni di Navier-Stokes: così facendo si passa infatti da integrali di volume a integrali

³ Per informazioni più dettagliate riguardo l'utilizzo del pre-processore CFX-Pre 14.5, vedi "Appendice B".

di superficie. Quindi l'integrazione numerica è il metodo di risoluzione di queste equazioni, rese così semplificate. Queste infatti sono risolte in un numero finito di punti, che giacciono sulle superfici che compongono il volume preso in considerazione, ovvero la mesh. Ogni valore numerico delle variabili risultanti dall'integrazione viene memorizzato ai nodi, è tutto ciò è fattibile grazie all'ausilio di un potente calcolatore che è il programma stesso.

Una volta che il programma ha finito l'esecuzione, si ottiene un valore approssimato di ogni grandezza, computata per tutti i nodi del dominio fluido. Il risultato di questo lavoro, può essere visualizzato poi nel post-processor CFX-Post 14.5 .

2.1.4 . CFD-Post 14.5

Questo programma, come già anticipato, consente di visualizzare i risultati ottenuti. In particolare si possono ottenere delle superfici all'interno dei componenti in analisi, per plottare su di esse i valori di parametri dai quali si desidera ottenere informazioni utili per la descrizione del campo di moto. Il CFD-Post 14.5 consente inoltre di ottenere delle medie dei valori dei parametri da cui si vuole ottenere informazioni, direttamente in grafici cartesiani in funzione della posizione del componente nel quale si vuole condurre l'analisi. Infine è possibile costruire delle tabelle con i valori numerici di variabili o di espressioni da monitorare⁴.

Tutto ciò rende CFD-Post 14.5 un programma estremamente completo, che va ben al di là di un semplice visualizzatore di risultati.

2.2 . LA COSTRUZIONE DELLE MESH

Per effettuare l'analisi, la macchina viene prima suddivisa in parti da ricostruire geometricamente e discretizzare nei volumi fluidi da simulare. Le parti prese in esame sono il predistributore, il distributore, il condotto di raccordo tra distributore e girante, la girante, ed infine il condotto di scarico.

Il sistema di riferimento è una terna cartesiana ad assi ortogonali (x, y, z) levogira, nella quale l'asse "z" risulta parallelo all'asse di rotazione della macchina.

Per eventuali approfondimenti riguardo la costruzione delle mesh di ogni componente, consultare le Appendici A e B.

⁴ Per informazioni più dettagliate riguardo l'utilizzo del post-processor CFX-Post 14.5, vedi "Appendice C".

2.2.1 . Predistributore

Il software per la costruzione di mesh, TurboGrid 14.5 permette di costruire modelli mediante importazione delle coordinate geometriche bidimensionali delle primitive delle superfici di pala e contorni, ovvero di mozzo e corona. La costruzione dei tre files (“profile.curve”, “hub.curve”, “shroud.curve”) da importare nel programma, devono rispettare due principali regole: nei files “hub.curve” del mozzo e “shroud.curve” della corona si devono elencare i punti della sezione meridiana nella stessa direzione di deflusso dell’acqua; nel file “profile.curve” della pala devono essere presenti le coordinate del profilo sia in corrispondenza del mozzo (#hub), sia in corrispondenza della corona (#shr). Le coordinate sono state importate dal condotto meridiano disegnato appositamente in formato CAD.

La pala viene generata come superficie mediante interpolazione dei due profili riportati su mozzo e corona. Le superfici di contorno attorno la pala vengono generate mediante rivoluzione delle coordinate di mozzo e corona.

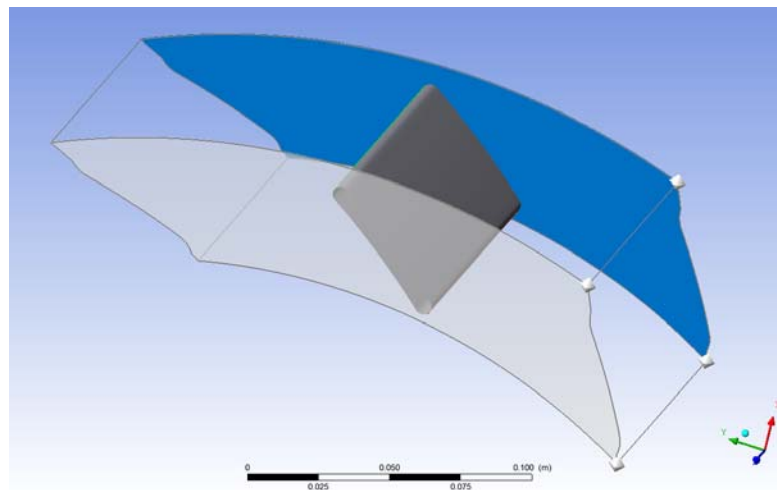


Fig. 2.1: Geometria del predistributore in TurboGrid 14.5

Essendo il numero di pale del predistributore imposto a 8, la rivoluzione risultante è di 45° . Una volta impostato il numero di pale ad 8 in TurboGrid 14.5, il meshatore automatico prevede l’esistenza di tutte e 8 le pale, nei 360° , anche se per praticità il lavoro viene eseguito solo su una.

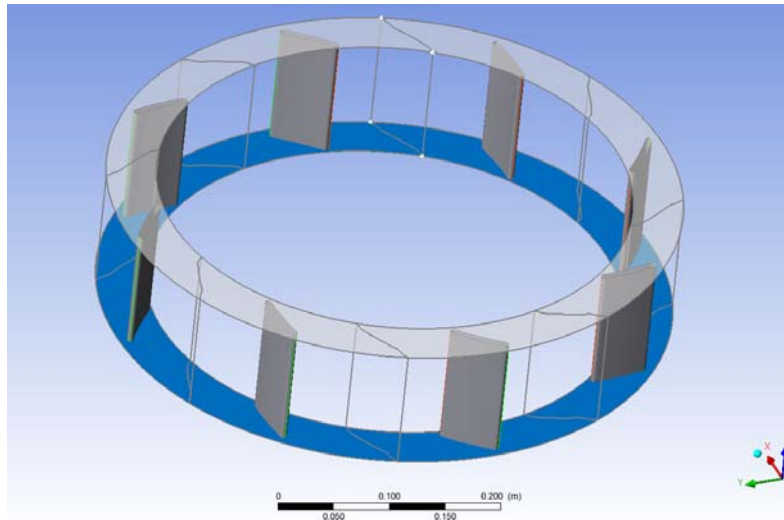


Fig. 2.1: Geometria dell'intero predistributore in TurboGrid 14.5

TurboGrid 14.5 è un software per la costruzione di mesh, specializzato nei profili palari. Per questo motivo automaticamente esso rileva, oltre che pala, mozzo e corona, anche le altre superfici di contorno come ingresso dell'acqua (Inlet), uscita dell'acqua (Outlet), e le due periodicità. La periodicità del componente è molto importante, poiché permette di sfruttare l'ipotesi di assialsimmetria della corrente, effettuando la simulazione di singolo condotto e ottenere gli stessi risultati di una simulazione sull'intero organo.

La scelta della Topology, ovvero lo "studio dei luoghi", serve a definire il metodo con cui il programma va a costruire la mesh del componente. Nel caso del predistributore, si è impiegata come Topology quella tradizionale con controllo sui punti, per poter modificare manualmente la griglia dove siano presenti volumi negativi. Il metodo H/J/C/L-Grid permette infine al software di scegliere e combinare assieme vari modi per costruire la mesh, includendo il metodo O-Grid per incrementare ortogonalmente la griglia nella regione attorno alla pala, con uno spessore che sia proporzionale allo spessore della pala stessa.

Per incrementare la densità della mesh, si è scelto di specificare il numero di nodi a 10'000. Questo dato è poco elevato rispetto a quello che verrà scelto per il distributore, ma ciò è dovuto principalmente alla geometria semplice del profilo alare del predistributore, che permette una scelta di questo genere, ottenendo così una riduzione dei tempi e una semplificazione della simulazione⁵. Così facendo, il risultato della mesh è soddisfacente,

⁵ La memoria necessaria per il calcolo della simulazione, dipende principalmente dal numero di nodi e dal numero di elementi presenti nella mesh, quindi tanto più aumentano questi ultimi, tanto più cresce la memoria che deve essere allocata per completare la simulazione.

dato che si ottiene facilmente degli angoli minimi tra gli spigoli maggiori di 20°, e degli angoli massimi tra gli spigoli minori di 160°.

La mesh ottenuta viene salvata pronta per essere importata successivamente nel CFX-Pre assieme agli altri componenti.

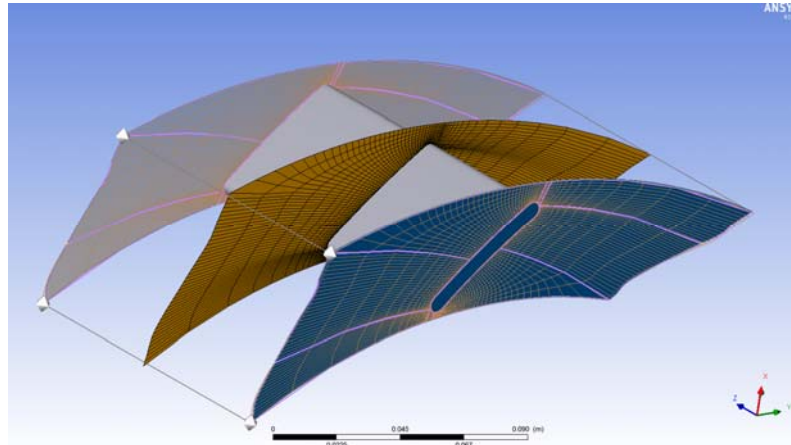


Fig. 2.2: TurboMesh del Predistributore

2.2.2 . Distributore

Analogamente al procedimento seguito per il predistributore, anche nel distributore si usa TurboGrid 14.5 per costruire i modelli mediante importazione delle coordinate geometriche bidimensionali delle primitive delle superfici di pala e contorni, ovvero di mozzo e corona. La costruzione dei tre files (“profile.curve”, “hub.curve”, “shroud.curve”) da importare nel programma, devono rispettare le medesime regole elencate precedentemente.

A differenza del predistributore però, il distributore merita una grande attenzione per la definizione del contorno della pala direttrice, la quale pur essendo a sezione costante, preserva comunque una forma a profilo aerodinamico molto più complessa. Inoltre il distributore da progetto è regolabile, ovvero ha l’angolo di calettamento variabile. Quindi per ogni simulazione, il distributore deve avere la mesh con il giusto angolo di calettamento.

Per ottenere i files “profile.curve” dei distributori con il giusto angolo di calettamento, sono state ruotate le coordinate (x, y) ⁶ dell’angolo α desiderato, mediante una semplice matrice di rotazione, ottenendo le nuove coordinate (x', y') dei profili ruotati.

$$x' = x \cdot \cos(\alpha) - y \cdot \sin(\alpha)$$

$$y' = x \cdot \sin(\alpha) + y \cdot \cos(\alpha)$$

⁶ Per le coordinate del profilo palare del distributore, vedi Capitolo 1, paragrafo 1.3 .

Per avere un ampio campo di simulazioni, le mesh del distributore sono state fatte con calettamento dai 22° fino ai 56° , ruotando 2° per volta, per un totale di 19 elementi da simulare.

Quindi per ogni distributore, la pala viene generata come superficie mediante interpolazione dei due profili riportati su mozzo e corona. Le superfici di contorno attorno la pala vengono generate mediante rivoluzione delle coordinate di mozzo e corona.

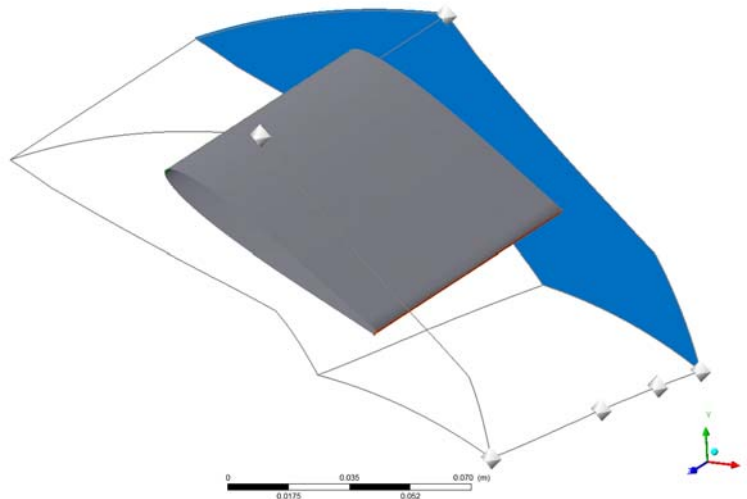


Fig. 2.1: Geometria del distributore a 32° in TurboGrid 14.5

Essendo il numero di pale del distributore uguale a 16, la rivoluzione risultante è di 22.5° . Una volta impostato il numero di pale a 16 in TurboGrid 14.5, il meshatore in automatico prevede l'esistenza di tutte e 16 le pale nei 360° e, come per il predistributore, per praticità il lavoro viene eseguito solo su una.

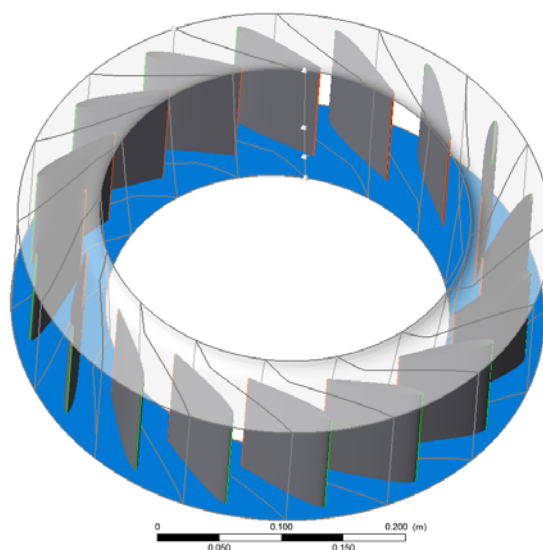


Fig. 2.1: Geometria dell'intero distributore (32°) in TurboGrid 14.5

Come in precedenza, automaticamente sono rilevati oltre a pala, mozzo e corona, anche le altre superfici di contorno come ingresso dell'acqua (Inlet), uscita dell'acqua (Outlet), e le due periodicità.

Nel distributore, si è impiegata nuovamente come Topology quella tradizionale con controllo sui punti, per poter modificare manualmente la griglia dove siano presenti volumi negativi. Il metodo H/J/C/L-Grid permette infine al software di scegliere e combinare assieme vari modi per costruire la mesh, includendo il metodo O-Grid. A causa della complessa geometria del profilo aerodinamico, e inclinazione dovuta all'angolo di calettamento, spesso si è dovuto intervenire manualmente sulla correzione dei punti dei layer Hub e Shroud, per ottenere degli angoli minimi agli spigoli attorno ai 25° , ed angoli massimi agli spigoli attorno ai 150° . Solo in seguito a svariate prove e correzioni, si è potuto ottenere dei volumi non negativi e quindi passare alla creazione della mesh.

Per incrementare la densità della mesh, si è scelto di specificare il numero di nodi a 150'000. Questo numero elevato scelto per il distributore, è dovuto principalmente alla richiesta di precisione dei calcoli della simulazione.

La mesh ottenuta viene salvata pronta per essere importata successivamente nel CFX-Pre assieme agli altri componenti.

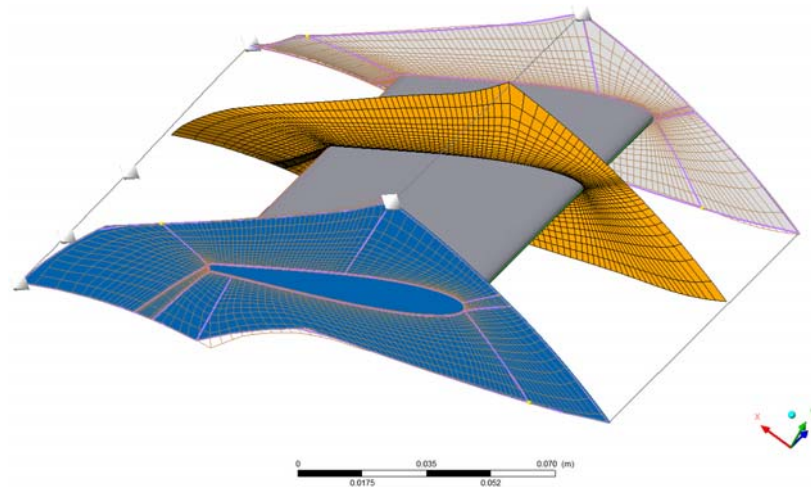


Fig. 2.2: TurboMesh del distributore

2.2.3 . Raccordo tra distributore e girante

Il raccordo tra distributore e girante è una parte di condotto privo di palettatura, e per questo motivo la creazione della mesh non può essere effettuata in TurboGrid 14.5 in quanto software specializzato in componenti alettati. Per costruire la mesh del raccordo, è stato utilizzato l'ICEM CDF 14.5, il quale è un software meshatore generico, in grado di creare mesh a partire da una qualsiasi geometria.

Dal condotto meridiano disegnato in formato CAD, è stata estrapolata la geometria del condotto come in figura 2.3, da importare nel software ICEM CDF 14.5 .

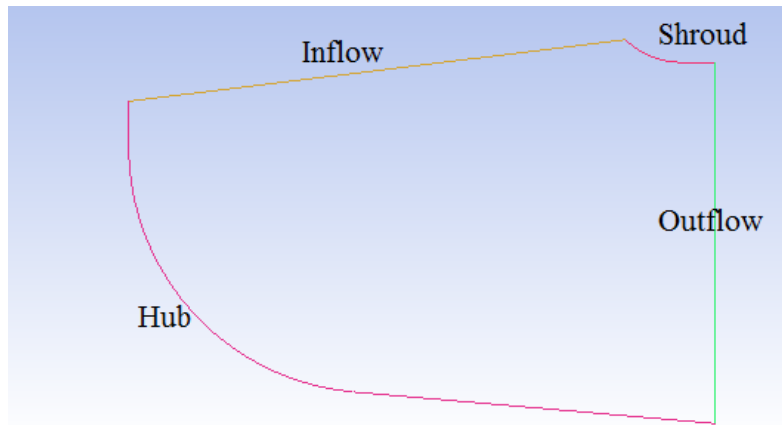


Fig. 2.3: Geometria del raccordo tra distributore e girante.

Una volta importata la geometria in ICEM CFD 14.5 e nominate correttamente le parti come Inflow ed Outflow per le linee di ingresso ed uscita dell'acqua, Hub e Shroud per le linee di mozzo e corona, la creazione della mesh necessita in primo luogo una suddivisione in blocchi. Sostanzialmente si disegna una geometria di base, in questo caso un rettangolo, al quale sia possibile associare in maniera semplice ed efficace la geometria da meshare. Solo allora si può passare alla pre-mesh, nella quale è possibile definire il numero di nodi e lo spacing, ovvero di quanto aumentare il numero di nodi localmente nei punti in cui la curvatura della geometria lo necessita per ottenere una mesh di buona qualità. Infine si passa alla conversione in mesh non-strutturata. Essendo ancora sul piano bidimensionale, la creazione della mesh vera e propria del raccordo, da importare successivamente in CFX-Pre, avviene tramite una estrusione con rotazione, rispetto all'asse z, di 22.5° , che è la stessa estensione del distributore. Infine resta da nominare le superfici laterali, come superfici periodiche.

Il totale di nodi della mesh è intorno ai 66'000. Sono state eseguite correttamente le verifiche sulla qualità e sull'angolo minimo degli spigoli, per confermare la buona qualità della mesh.

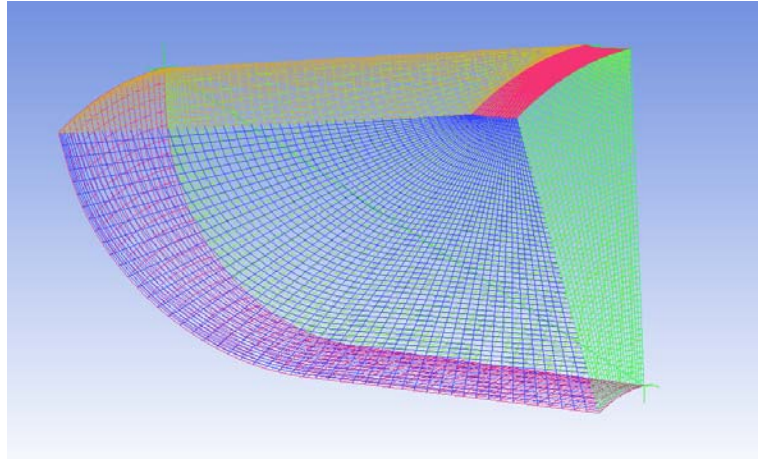


Fig. 2.4: Mesh del raccordo distributore-girante.

2.2.4 . Girante

La geometria della girante è stata costruita con l'ausilio del software BladeGen 14.5, il quale è specializzato della costruzioni di organi palettati rotanti.

A partire dalle coordinate (x, y, z) ricavate nel Capitolo 1, sono stati calcolati una serie di parametri necessari a BladeGen per la costruzione della geometria da importare poi in TurboGrid. Questi parametri sono stati raccolti in un file di comando (*.bgi), il quale attraverso un file batch⁷ viene trasformato nel file con la geometria modellabile in BladeGen (*.bgd).

I parametri che sono stati inseriti nel file di comando sono principalmente il numero di pale della girante Z , le coordinate bidimensionali di mozzo e corona, gli spessori della pala "s", il raggio R , la coordinata "z" del sistema cartesiano, il leading edge "Le" ed il trailing edge "Te", la coordinata ϑ del sistema di cilindrico, la coordinata dm/R del piano conforme.

Ovviamente il numero di pale Z è stato imposto a 5. Per quanto riguarda le coordinate di mozzo e corona, va specificato che debbano essere inserite nella direzione del fluido, e che lascino spazio sufficiente per lo sviluppo della pala. Per facilitare successivamente il lavoro di assemblaggio del pre-processore, le coordinate di mozzo e corona nei punti iniziali di inlet e finali di outlet, oltre a coincidere tra loro, devono essere anche gli stessi di fine componente raccordo e inizio componente scarico.

Infine per ogni layer, ovvero per ogni sezione di girante, vanno inserite come coppie di valori le coordinate $(dm/R, \vartheta)$, (z, R) e $(dm/R, s)$. Come già visto nel Capitolo 1, il raggio

⁷ Questo file batch di Windows sfrutta la variabile di sistema "PATH" per trasformare il file .bgi in .bgd

R si ricava dal calcolo del moto a potenziale; la coordinata “z” si ottiene dalle coordinate (x, y, z) delle linee medie dei vari layer; lo spessore “s” si ricava dalle relazioni empiriche in funzione della corda “l”; la coordinata ϑ si calcola come $\vartheta = \arctan\left(\frac{x}{y}\right)$. Il leading edge “Le” è la prima coppia di coordinata z e raggio R per ogni layer, ed il trailing edge “Te” è invece l’ultima coppia di coordinata z e raggio R per ogni layer. Per quanto riguarda il dm/R , va introdotta brevemente la trasformazione conforme delle coordinate.

Nella superficie di corrente in figura 2.5, le curve “m” e “u” sono tra loro mutuamente ortogonali. Esse rappresentano le curve dei layer di ogni sezioni della pala in questione. Le rette agli assi di riferimento cartesiano (η , ξ), rappresentati sempre in figura 2.5, sono anch’esse parallele.

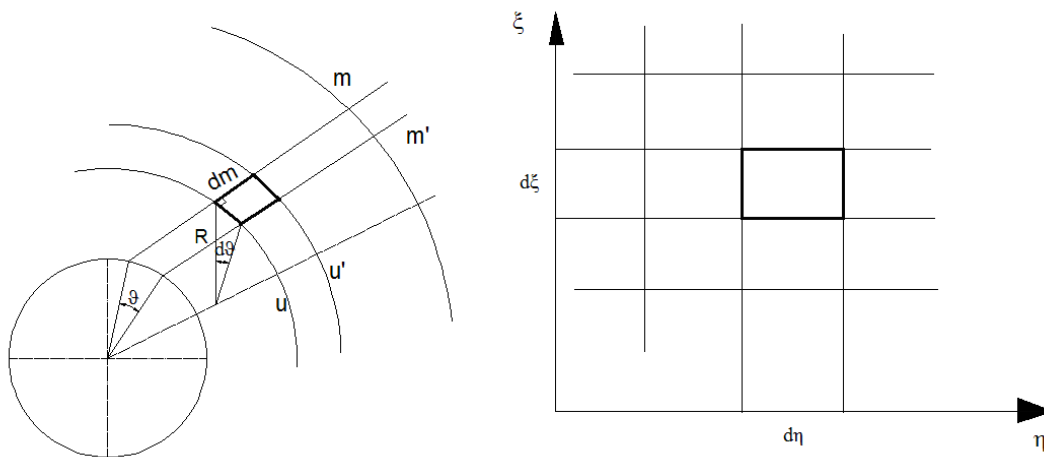


Fig. 2.5: Rappresentazione del Piano conforme.

La relazione che lega i due sistemi (m, u) e (η , ξ) si trova nella seguente formula:

$$\frac{dm}{r \cdot d\vartheta} = \frac{d\xi}{d\eta}$$

Lungo un arco di circonferenza, la variabile corrente è ϑ , quindi in generale si può scrivere

$$d\eta = L_0 \cdot d\vartheta$$

e quindi anche

$$d\xi = L_0 \cdot \frac{dm}{R}$$

BladeGen 14.5, in base a queste relazioni del piano conforme, riesce a ricostruire la pala a partire da coordinate cilindriche, e riportarle sul piano. È necessario importare nel

programma i parametri giusti affinché esso in automatico esegua il passaggio di coordinate. In questo caso, è sufficiente calcolare il dm/R . Calcolando opportunamente l'integrale, si ricava

$$\frac{dm}{R} = \frac{L_m - L_{m0}}{R},$$

con L_m costante arbitraria, con le dimensioni di una lunghezza, che sta ad indicare la progressione geometrica nella direzione del moto, e si calcola come

$$L_m = \sqrt{(z_i - z_{i-1})^2 - (R_i - R_{i-1})^2},$$

con il pedice "i" che assuma i valori in ordine dalla prima all'ultima coordinata.

Vengono riportati in tabella 2.1 come esempio, i valori di L_m e di dm/R dei layer 1 e 2. 15 e 16.

Tab 2.1

Layer 1		Layer 2		[...]	Layer 15		Layer 16	
L_m	dm/R	L_m	dm/R	L_m	dm/R	L_m	dm/R	
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.062845	0.001093	0.061067	0.0009	0.056759	0.0004	0.058475	0.00040	
0.249324	0.004336	0.242248	0.0037	0.228446	0.0016	0.230011	0.00158	
0.558503	0.009713	0.542658	0.0083	0.51092	0.0037	0.515199	0.00354	
0.983685	0.017108	0.956401	0.0147	0.900553	0.0064	0.909081	0.00625	
1.519083	0.026419	1.476422	0.0227	1.393492	0.0100	1.405144	0.00966	
2.155222	0.037482	2.097905	0.0323	1.982779	0.0142	1.999614	0.01374	
2.877682	0.050047	2.808896	0.0432	2.659945	0.0190	2.682907	0.01844	
3.6793	0.063988	3.600484	0.0554	3.418088	0.0245	3.447491	0.02369	
4.443554	0.077185	4.462818	0.0687	4.245862	0.0304	4.283552	0.02944	
5.240591	0.09084	5.381759	0.0828	5.134444	0.0367	5.180364	0.03560	
6.085566	0.105203	6.347428	0.0977	6.072201	0.0435	6.127951	0.04212	
6.967678	0.120081	7.344722	0.1130	7.048916	0.0504	7.113731	0.04889	
7.876347	0.135294	8.363457	0.1287	8.052009	0.0576	8.126784	0.05585	
8.799212	0.150634	9.389385	0.1445	9.069577	0.0649	9.155482	0.06292	
9.727432	0.165961	10.41235	0.1602	10.09092	0.0722	10.18828	0.07002	
11.34295	0.192353	12.17161	0.1873	11.86616	0.0849	11.98389	0.08236	
12.92997	0.218037	13.88287	0.2136	13.61849	0.0974	13.756	0.09454	
14.48746	0.243036	15.54698	0.2392	15.3466	0.1098	15.50527	0.10657	
16.01632	0.267399	17.16411	0.2641	17.04957	0.1220	17.23114	0.11843	
17.51297	0.291098	18.73324	0.2882	18.72948	0.1340	18.93296	0.13012	
18.97576	0.314134	20.2553	0.3116	20.38439	0.1459	20.61169	0.14166	
20.40161	0.336483	21.7303	0.3343	22.01612	0.1575	22.26732	0.15304	
21.79134	0.358178	23.15626	0.3563	23.6231	0.1690	23.8998	0.16426	
23.1586	0.379447	24.55075	0.3777	25.20631	0.1804	25.50818	0.17531	
24.52628	0.40066	25.93895	0.3991	26.76537	0.1915	27.09339	0.18621	
25.89405	0.421821	27.3218	0.4203	28.30131	0.2025	28.65553	0.19695	
27.26166	0.442937	28.69941	0.4415	29.82821	0.2134	30.20583	0.20760	

28.62812	0.464002	30.07177	0.4626	31.35075	0.2243	31.75167	0.21822
29.99226	0.485008	31.43888	0.4837	32.8691	0.2352	33.29321	0.22882
31.35278	0.505944	32.80064	0.5046	34.3831	0.2460	34.83054	0.23939
32.70904	0.526809	34.15712	0.5255	35.89285	0.2568	36.32454	0.24963
34.05982	0.547595	35.50831	0.5463	37.39839	0.2676	37.8475	0.26008
35.40439	0.568298	36.85432	0.5670	38.89957	0.2784	39.36607	0.27051
36.74194	0.588914	38.19498	0.5876	40.3965	0.2891	40.88009	0.28092
38.07094	0.609429	39.53039	0.6082	41.88918	0.2997	42.38924	0.29131
39.39099	0.629845	40.86045	0.6286	43.37755	0.3104	43.89359	0.30167
40.70087	0.65015	42.18538	0.6490	44.86165	0.3210	45.39324	0.31201
42.00003	0.670344	43.50494	0.6693	46.34154	0.3316	46.88793	0.32232
43.28675	0.690407	44.81918	0.6895	47.81714	0.3422	48.37728	0.33260
44.56043	0.710337	46.1278	0.7097	49.28878	0.3527	49.86151	0.34286
45.81976	0.730121	47.43168	0.7297	50.75495	0.3632	51.34038	0.35310
47.06514	0.749771	48.73	0.7497	52.21822	0.3737	52.81362	0.36330
48.29684	0.769299	50.02391	0.7696	53.67673	0.3841	54.28149	0.37347
49.51116	0.788651	51.31141	0.7894	55.13122	0.3945	55.74403	0.38362
50.70817	0.807835	52.59441	0.8091	56.58102	0.4049	57.20105	0.39373
51.88539	0.826814	53.87104	0.8288	58.02586	0.4152	58.65142	0.40381
53.04374	0.845611	55.14312	0.8484	59.46794	0.4255	60.09617	0.41386
54.18064	0.864185	56.41076	0.8679	60.90512	0.4358	61.53423	0.42387
55.29672	0.882552	57.67202	0.8873	62.33775	0.4461	62.96841	0.43386
56.39002	0.900683	58.92777	0.9066	63.76602	0.4563	64.3973	0.44382
57.45772	0.918533	60.17911	0.9258	65.18975	0.4665	65.82248	0.45377
58.5014	0.936131	61.42494	0.9450	66.61	0.4766	67.24303	0.46369
59.51964	0.953453	62.66544	0.9641	68.02596	0.4868	68.66028	0.47360
60.51228	0.9705	63.90043	0.9831	69.43711	0.4969	70.07617	0.48350
61.47162	0.987136	65.12996	1.0020	70.84455	0.5069	71.48515	0.49335
62.40482	1.003485	66.35499	1.0208	72.24716	0.5170	72.89034	0.50316
63.41045	1.020975	67.57366	1.0396	73.64561	0.5270	74.2932	0.51295
64.52133	1.040294	68.78783	1.0583	75.04048	0.5370	75.69318	0.52270
65.6713	1.060294	69.9966	1.0769	76.43075	0.5469	77.09026	0.53243
66.81747	1.080227	71.19986	1.0954	77.81593	0.5568	78.4837	0.54212
67.95819	1.100066	72.39871	1.1138	79.19717	0.5667	79.87601	0.55180
69.09469	1.119831	73.59111	1.1322	80.57507	0.5766	81.26548	0.56144
70.22478	1.139485	74.77903	1.1504	81.94751	0.5864	82.65423	0.57108
71.34862	1.15903	75.96149	1.1686	83.31641	0.5962	84.03961	0.58068

Quindi in BlageGen 14.5 si ottengono i punti dei vari layer, modificati sul piano conforme, come mostrato in figura 2.6. In questa vista meridiana conformizzata, si notano le linee di ingresso ed uscita (la freccia indica la direzione della corrente), i 16 layer che costituiscono la pala, i punti che delimitano mozzo e corona.

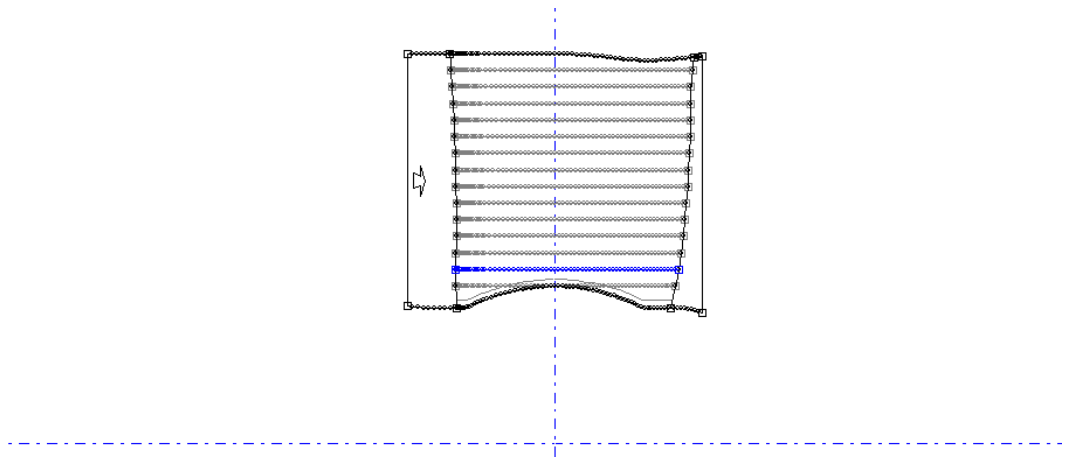


Fig. 2.6: Pala rappresentata nel piano conforme.

La geometria che si ricava è quella mostrata in figura 2.7: a questo punto basta salvare il file in formato *.inf e importarlo nel programma TurboGrid 14.5 per completare la costruzione della mesh della girante.

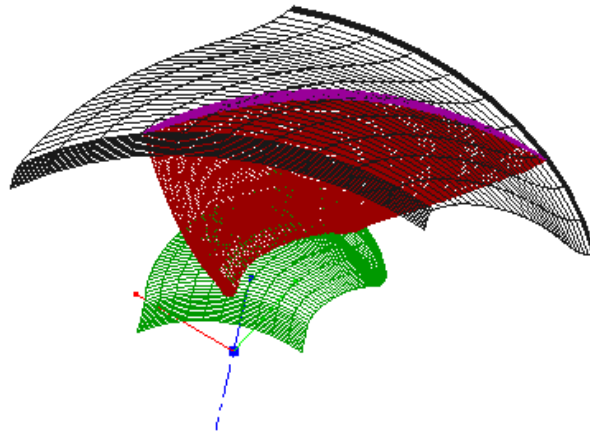


Fig. 2.7: Geometria della pala ricavata in BladeGen 14.5

Una volta importata tale geometria nel software BladeGen 14.5, è stata effettuata la correzione dello Shroud Tip di 0.2 mm, ovvero è stata imposta la distanza di 0.2 mm tra la pala e la corona, per assicurare la presenza del giuoco tra pala e corona, necessario per la rotazione della girante.

Come per il predistributore ed il distributore, è stato imposto il numero di pale da progetto, ma per comodità il lavoro viene eseguito solamente su una.

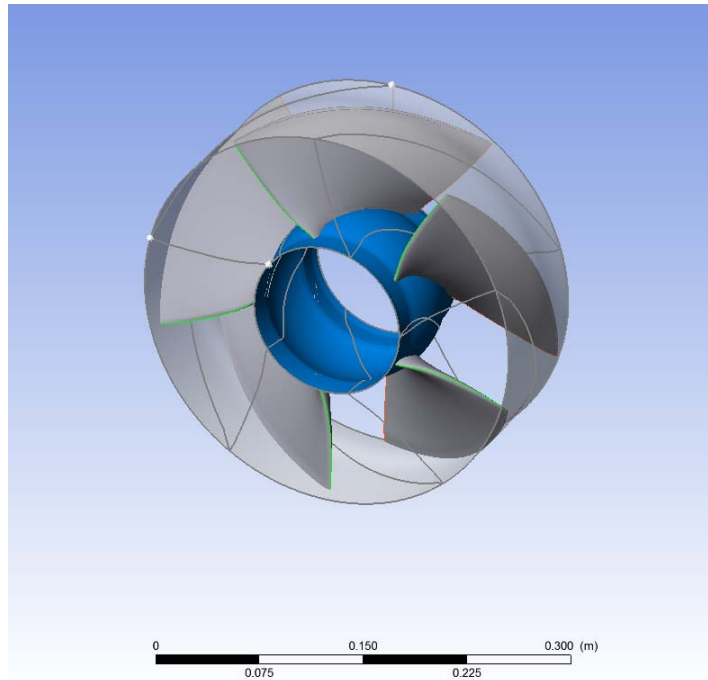


Fig. 2.8: Rappresentazione della girante completa di 5 pale, in TurboGrid 14.5

La topology è stata definita come “ATM Optimized”, con il metodo del “Single Round Round Symmetric”, per ottenere in automatico la generazione dei layer sulla pala, dai quali il software imposta i propri calcoli per la costruzione della mesh. In pratica accade che il software in automatico crei delle superfici di pre-mesh in “n” sezioni della pala, per avere la giusta precisione sullo svergolamento della pala.

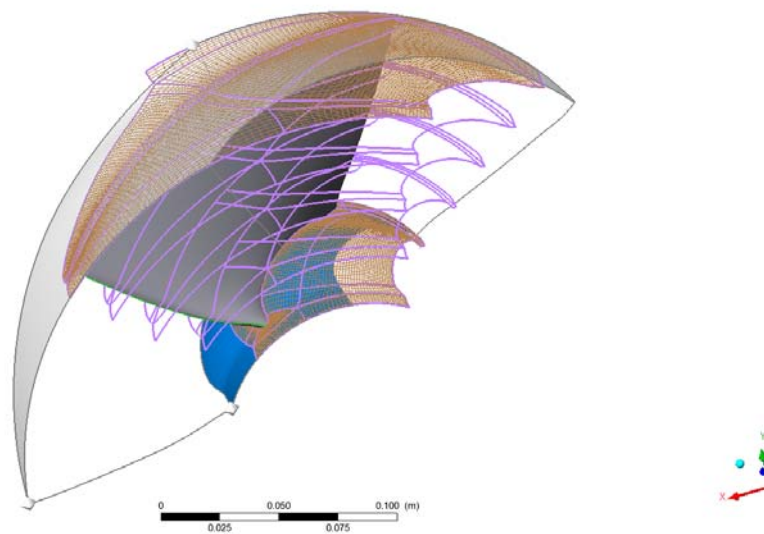


Fig. 2.9: Topology della pala della Girante in TurboGrid 14.5

Infine è stato scelto come metodo per la costruzione della mesh, quello del “Target Passage Mesh Size”, con un numero di nodi uguale a 250'000, per assicurarsi che la mesh fosse qualitativamente accettabile, con angoli minimi agli spigoli superiori ai 20° e angoli massimi agli spigoli minori di 120°, e ovviamente priva di volumi negativi.

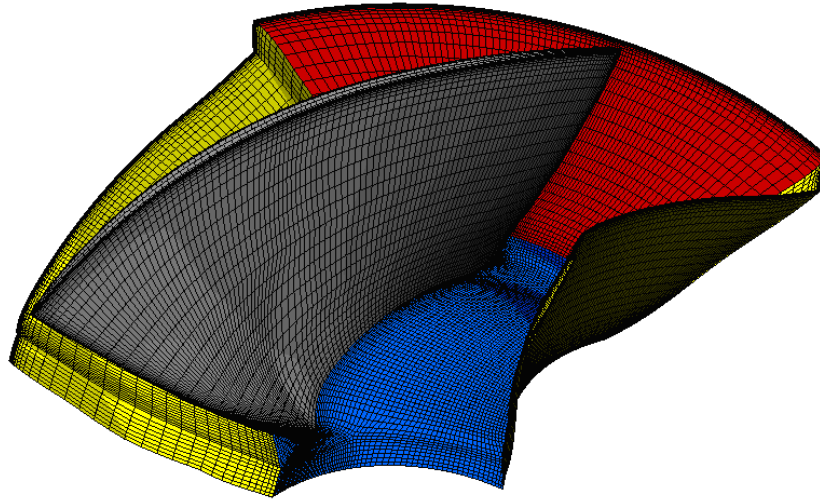


Fig. 2.10: Rappresentazione della mesh della pala in TurboGrid 14.5

2.2.5 . Tubo di scarico

Lo scarico è una parte di condotto priva di palettatura, all’uscita dalla girante, costituito dalla parte rotante del mozzo della girante, e dalla parte fissa di corona divergente. L’angolo divergente serve a rallentare il fluido all’uscita, in modo tale da recuperare energia cinetica.

In quanto componente non alettata, si è utilizzato come per il raccordo tra distributore e girante, il meshatore ICEM CFD 14.5.

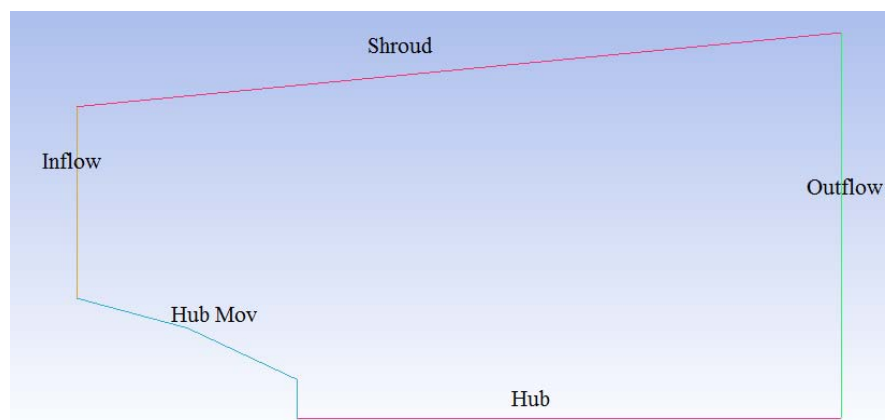


Fig. 2.11: Geometria dello scarico.

A partire dalla geometria CAD di figura 2.11, sono state nominate correttamente le parti di Inflow ed Outflow per le linee di ingresso ed uscita dell'acqua, Hub e Shroud per le linee di mozzo e corona, Hub Mov per l'ogiva della girante. La parte nominata Hub, non è la superficie del mozzo vera e propria, poiché in quel punto non c'è la parete del condotto: si tratta di un accorgimento da prendere per far sì che il software riconosca tutte le superfici della mesh. Successivamente nel pre-processor saranno presi i giusti accorgimenti riguardo il dominio di tale superficie.

Come per il raccordo, viene effettuata la suddivisione in blocchi per associare ad una geometria semplice come un rettangolo, la geometria dello scarico. Una volta creato il corretto blocking, si passa alla pre-mesh, per inserire il numero corretto di nodi e di spacing. Infine dopo aver creato la mesh non-strutturata, la mesh tridimensionale viene ottenuta tramite una estrusione con rotazione, rispetto all'asse z , di 72° , che è la stessa estensione di una pala della girante ($\frac{360^\circ}{5}$). Le superfici laterali così ottenute vengono nominate come superfici periodiche.

La conferma della buona qualità della mesh viene data dalla verifica dell'angolo minimo degli spigoli, che sia maggiore di 20° . Il numero di nodi è attorno ai 212'000.

La mesh è pronta per essere importata nel pre-processor CFX-Pre 14.5, per l'assemblaggio con tutti gli altri componenti.

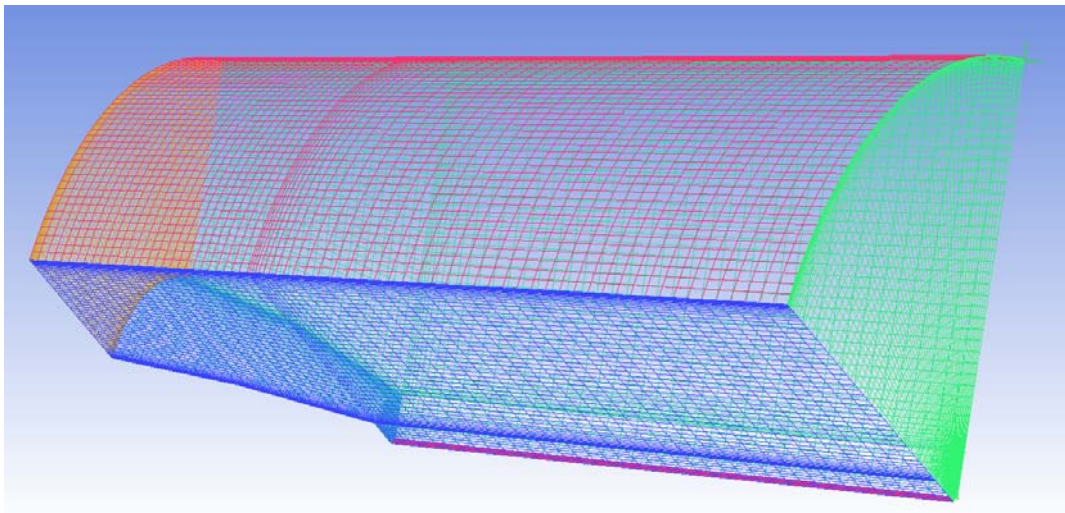


Fig. 2.12: Mesh non-strutturata dello scarico costruita in ICEM CFD 14.5

2.3 . L'ASSEMBLAGGIO DEI COMPONENTI

Dopo aver creato separatamente le mesh di tutti gli organi della turbina, si procede con l'assemblaggio della macchina nella sua interezza. Lo scopo, in questo passaggio, è quello di creare le giuste condizioni al contorno per ottenere una simulazione che sia più vicina possibile alla realtà.

Per l'assemblaggio, viene sfruttata l'assialsimmetria del moto e la peculiarità del programma, che permette di effettuare le simulazioni in singolo condotto, ovvero assemblando i componenti non nei 360° di sviluppo, ma solamente nella parte di campo minima ed indispensabile, che si ripeta in maniera simmetria e periodica.

Inoltre, in questa simulazione, non è stata considerata la presenza della voluta, in quanto essa può essere imposta all'ingresso del predistributore come direzione e con la portata volumetrica del fluido.

Per avere un'ampia analisi sulle prestazioni della macchina, le simulazioni sono state eseguite per tutte le mesh del distributore, che sono state fatte con calettamento dai 22° fino ai 56°, ruotando 2° per volta, per un totale di 19 componenti da simulare.

Per eventuali approfondimenti riguardo l'assemblaggio dei componenti, consultare l'Appendice C.

2.3.1 . L'analisi del flusso

Sono state importate le mesh di ogni componente: predistributore, distributore, raccordo, girante e scarico. Qualora non fosse già automatico⁸, le mesh sono state rese adiacenti l'una all'altra, per assicurare la presenza di interfacce, ovvero dei domini di connessione, attraverso delle opportune rotazioni e traslazioni, che si attengano comunque alla posizione reale del componente rispetto al resto della macchina.

Se la mesh è stata creata in maniera opportuna, automaticamente il pre-processore associa ad ogni superficie i relativi nominativi, quali "Hub" per il mozzo, "Shroud" per la corona, "Inflow" ed "Outflow" per le superfici di ingresso e uscita dal componente, "Per" per le superfici periodiche, e "Blade" per i profili palari, qualora siano presenti nella mesh. Ogni mesh nel suo volume totale, viene nominata come "Passage", affinché possa venir considerata successivamente nel suo complessivo e definita opportunamente nel suo dominio. Per quanto riguarda distributore e raccordo, si parla di "Assembly", poiché per la

⁸ Le mesh sono state costruite a partire da coordinate prese dallo stesso file CAD. Tuttavia non tutti i programmi lavorano con lo stesso ordine di coordinate (x, y, z).

simulazione di questo singolo condotto, essi sono stati presi in considerazione come due componenti alla volta.

Il risultato grafico è quello di figura 2.13.

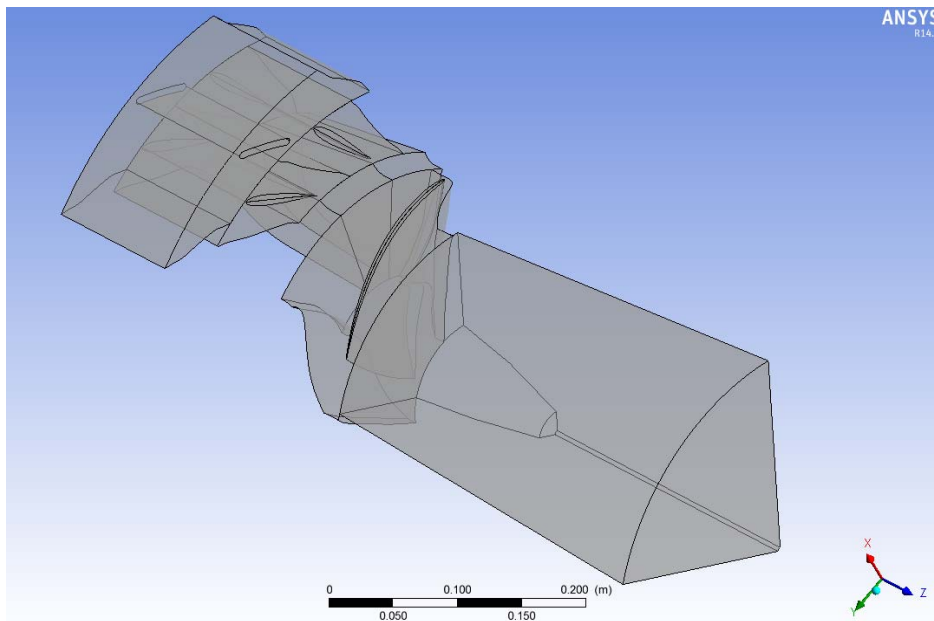


Fig. 2.13: Assemblaggio componenti in CFX-Pre 14.5

Il fluido inserito nel dominio è ovviamente l'acqua, presa a pressione ambiente (1 atm).

Il moto del dominio è stato imposto per tutti i componenti come stazionario, tranne ovviamente per la girante il quale è stato impostato come rotatorio, con una velocità angolare da progetto di 1000 rpm.

Il modello fluido utilizzato è stato quello dello "Shear Stress Transport Turbulence Model", il quale è il modello più comune in CFD per la descrizione del moto turbolento di un fluido. L'SST combina i metodi "k-omega" e il "K-epsilon", i quali raccolgono delle complesse equazioni semi-empiriche che descrivono il moto turbolento di un fluido.

Per tutti i componenti, le superfici di "Blade", "Hub" e "Shroud" sono state considerate nella Boundary, ovvero come dominio di contorno, come dei Wall, che tradotto significa muro, o comunque parete. Per la simulazione, queste superfici sono realmente delle ostruzioni al fluido.

Per quanto riguarda l' "Inflow" ed l' "Outflow", è importante definire la superficie di ingresso al predistributore, e la superficie di uscita dal tubo di scarico. Le altre superfici di ingresso e uscita dei rimanenti componenti, vengo definite successivamente durante lo studio delle interfacce.

Per semplicità in questa simulazione non è stata considerata la presenza della voluta. Tuttavia il progetto di questa Test-Model ovviamente prevede la presenza della voluta, la quale è raffigurata in figura 2.14.

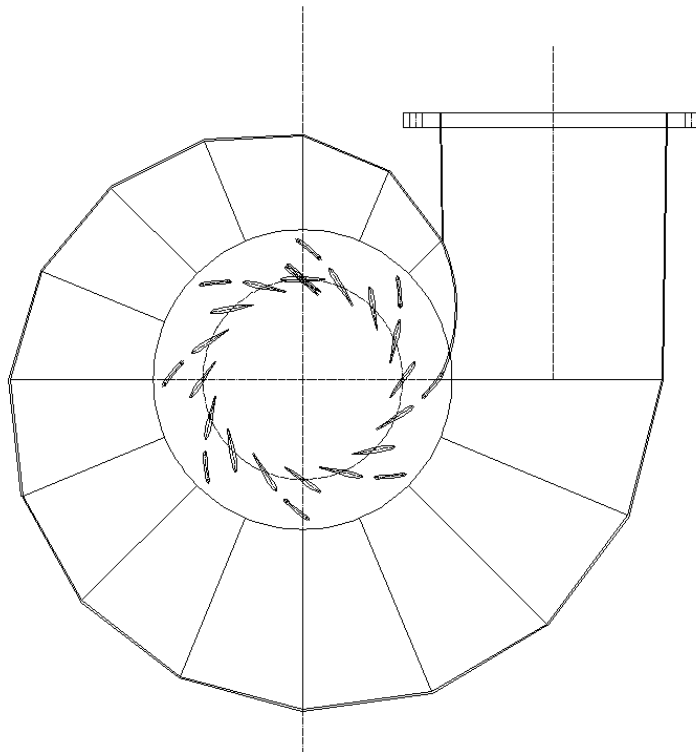


Fig. 2.14: rappresentazione schematica della voluta.

L'assenza della voluta in questa simulazione, determina una imposizione dell'angolo di ingresso del fluido nel predistributore, della stessa direzione che realmente dovrebbe imporre la voluta. Questa direzione del fluido è stata imposta in coordinate cilindriche:

$$z = 0$$

$$R = -\sin(36.11^\circ)$$

$$\vartheta = -\cos(36.11^\circ).$$

Inoltre è stato utilizzato un algoritmo⁹ per imporre la portata in ingresso come incognita, e determinarla in seguito a delle iterazioni, assieme al valore di pressione, mantenendo nel frattempo la caduta costante. A partire dal valore imposto di caduta $H_{ref} = 4$ [m] e come valore iniziale per l'iterazione la portata massima $Q_{init} = 0.28[\text{m}^3/\text{s}] * 997[\text{kg}/\text{m}^3]$, attraverso la funzione di smorzamento descritta in figura 2.14, si determina la portata Q .

⁹ Tale algoritmo è stato implementato da alcuni dottorandi del Polo Meccanico dell'Università di Padova.

Expressions	
ErrHPerc	$\max(\text{abs}(((H-H \text{ ref})/H \text{ ref}))-0.1, 0) * (\text{step}((H-H \text{ ref})/H \text{ ref}) * 2 - 1)$
H	$(\text{massFlowAve}(\text{Total Pressure in Stn Frame})@Inflow - \text{massFlowAve}(\text{Total Pressure in Stn Frame})@Outflow) / 997 [\text{kg m}^{-3}] / \text{g}$
H ref	4 [m]
IO	$\max(-\text{atan}(\log(Q \text{ inbalance})), 90 [\text{deg}], 0)$
Q	$((\text{abs}(Q \text{ ref}) + dQ) * \text{step}(\text{aitern} - \text{Trn iter}) + Q \text{ init} * \text{step}(-\text{aitern} + \text{Trn iter})) / 8$
Q inbalance	$\text{abs}((\text{massFlow}()@Outflow * 5 + \text{massFlow}()@Inflow * 8) / (\max(\text{massFlow}()@Inflow * 8, 1E-4 [\text{kg s}^{-1}]))) * 100 + 1e-4$
Q init	0.28 [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$] * 997 [kg m^{-3}]
Q ref	$\text{massFlow}()@Inflow * 8$
Trn iter	15
dQ	$-0.02 * \text{ErrHPerc} * \text{abs}(Q \text{ ref}) * IO$

Fig. 2.14: Algoritmo utilizzato nelle simulazioni

Dunque all'entrata del predistributore, la portata imposta all'ingresso è il valore della portata Q risultante dall'algoritmo.

All'uscita dalla girante invece, si deve tener presente dei moti vorticosi nella corrente dovuti all'interazione del fluido con la palettatura, i quali provocano una inversione locale del verso di deflusso dell'acqua. Questo fenomeno, del tutto normale in una turbomacchina reale, deve venire ben interpretato dal software nel caso di una simulazione. La scelta di impostare l' "Outflow" del tubo di scarico come Opening, è dovuta al fatto che così facendo la presenza di ricircoli non impedisca al programma il rientro del fluido, rendendo altrimenti la simulazione non realistica. Inoltre l'opzione al contorno di "Entrainment" a 0 Pa serve a definire in maniera ancor più precisa la condizione di trascinamento del fluido.

Un'ulteriore accorgimento particolare va alla superficie "Hub Mov" presente della mesh del tubo di scarico: essa fa parte della girante, e quindi va imposta come parte rotante. Nei dettagli di contorno, essa va settata come "rotating wall", ad una velocità angolare ovviamente pari a quella imposta alla girante (1000 rpm). Questo accorgimento è molto importante per quanto riguarda l'attendibilità della simulazione, poichè l'ogiva va a contribuire sulla coppia frenante della girante, e quindi ad abbassare il rendimento della girante.

Sempre all'interno del dominio del tubo di scarico, va specificato che la superficie "Hub", non essendo una superficie vera e propria ma solo un accorgimento da prendere nella creazione della mesh, va impostata come "Free Slip Wall", permettendo così al fluido di scorrere in maniera aviscosa in quel punto.

Infine vanno definite le interfacce, ovvero vanno specificate le relazioni che sussistono tra le superfici adiacenti di ciascuna mesh, e le periodicità.

Le superfici periodiche sono quelle che permettono al componente di ripetersi nei 360° sfruttando l'assialsimmetria del moto. In ogni mesh viene quindi sfruttato il modello di interfaccia "Rotational Periodicity".

La connessione tra le superfici adiacenti ad ogni mesh, in questa simulazione, è stata effettuata sfruttando il modello del "frozen rotor": questa scelta è determinata dal fatto che le interfacce "Raccordo-Girante" e "Girante-Scarico" non sono sempre costanti durante la simulazione, poiché la girante è in rotazione. Quindi il "frozen rotor" è un metodo che permette di calcolare delle medie tra ingresso ed uscita dei domini, al variare della mesh in ogni istante di rotazione.

Inoltre va specificata la presenza dei tipi delle pale di distributore e girante, che vanno impostati come collegamento generico di interfaccia.

Il risultato finale dopo il lavoro di analisi del flusso, è quello mostrato in figura 2.15.

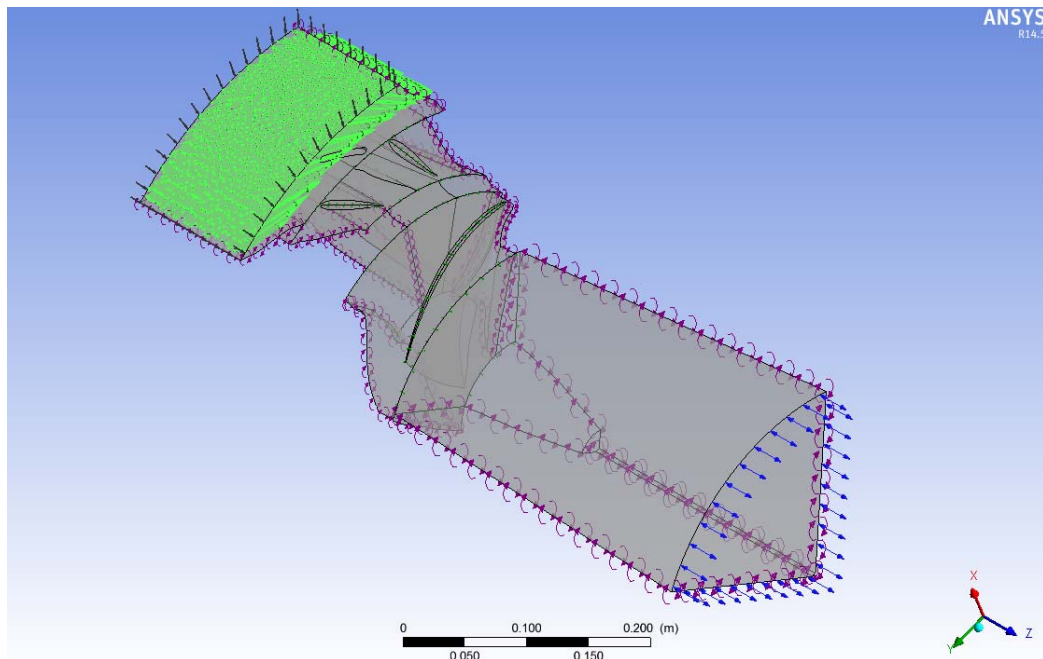


Fig. 2.15: Assemblaggio componenti in CFX-Pre 14.5, con i relativi domini.

2.3.2 . I parametri di simulazione

Per semplicità, il tipo di analisi è stata scelta in "Steady State", per indicare la condizione di equilibrio dinamico: il deflusso è stazionario e quindi indipendente dal tempo.

Per effettuare la giusta simulazione numerica, è necessario definire le condizioni di convergenza della soluzione. Vengono quindi assegnati un numero massimo di iterazioni a 600, e un valore minimo per i residui massimi di 10^{-4} . Inoltre è stato imposto un "Physical

Timescale” con un valore $\frac{1}{\omega} \cong 0.01$. Il timescale sta ad indicare la durata di ogni iterazione: imporre un timescale che sia in funzione della velocità di rotazione della macchina, serve ad ottenere una simulazione più stabile, che anche se non soddisfa i criteri di convergenza, almeno dopo le 600 iterazioni abbia raggiunto dei valori costanti e quindi attendibili.

Infine è stato scelto di monitorare i valori di caduta, portata e rendimento idraulico della macchina. La caduta si ricava dalla Expression “H” citata precedentemente nell’algoritmo. La portata si ricava in [m³/s] moltiplicando per otto (otto è il numero di pale del predistributore) la portata Q ottenuta nell’algoritmo.

$$Q_{tot} = \frac{8 \cdot Q}{997}.$$

Il rendimento analogamente si ottiene creando delle Expression nel pre-processore:

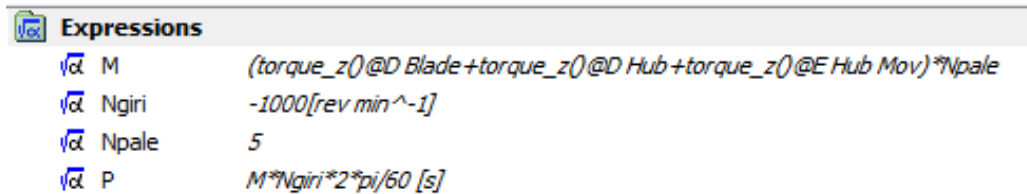


Fig. 2.16: Expressions per ottenere il monitoraggio sul rendimento.

Da esse quindi si ricava il rendimento idraulico della macchina come

$$\eta_{id} = \frac{100 \cdot P}{8 \cdot Q \cdot gH}.$$

A questo punto è possibile salvare il file .def per far eseguire la simulazione vera e propria utilizzando il software CFX-Solver Manager 14.5 .

2.4 . L'ANALISI DEI RISULTATI

Il file .def viene fatto eseguire attraverso il programma solutore. La verifica che i dati siano attendibili deriva da un consulto al grafico del “Momentum and Mass”, dal quale si può verificare se siano stati rispettati i criteri di convergenza, o se semplicemente la simulazione si sia completata tramite tutte le 600 iterazioni. In generale un andamento costante dei valori verso il completamento di tutte le iterazioni, fa ipotizzare che la simulazione si sia stabilizzata e che i risultati siano dunque attendibili. Se invece gli andamenti dei residui si dimostrassero non costanti, allora è probabile che anche i parametri da monitorare, come la portata, la caduta e il rendimento, non siano attendibili, ma che richiedano un numero più elevato di iterazioni per raggiungere un valore più o meno stabile.

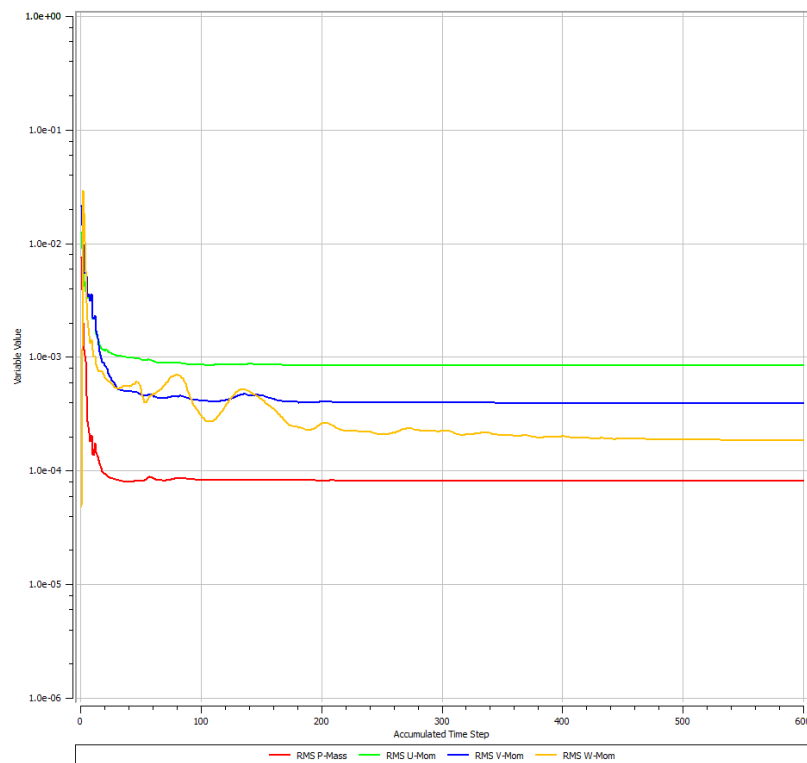


Fig. 2.17: Esempio di andamento dei residui di simulazione

Il file .res che viene automaticamente creato dal solutore al termine della simulazione, può essere aperto e utilizzato nella maniera più appropriata dal post-processor CFX-Post 14.5 .

Per eventuali approfondimenti riguardo l'extrapolazione dei risultati, consultare l'Appendice D.

2.4.1 . La visualizzazione dei risultati

Una volta aperto il file .res con il software CFD-Post 14.5, il singolo condotto appare in wireframe, pronto per l'estrapolazione dei risultati.

Per una chiara visualizzazione dei dati, ogni componente viene moltiplicato per il numero previsto da progetto, così da ottenere lo sviluppo completo della macchina sui 360°.

Affinchè il programma possa estrapolare tutti i valori dei parametri che si vogliono calcolare, ogni componente deve essere inizializzato, ovvero viene creata una mesh su tutto lo sviluppo della macchina, in maniera da avere un risultato medio comune per tutti i componenti. Il risultato è quello mostrato in figura 2.18.

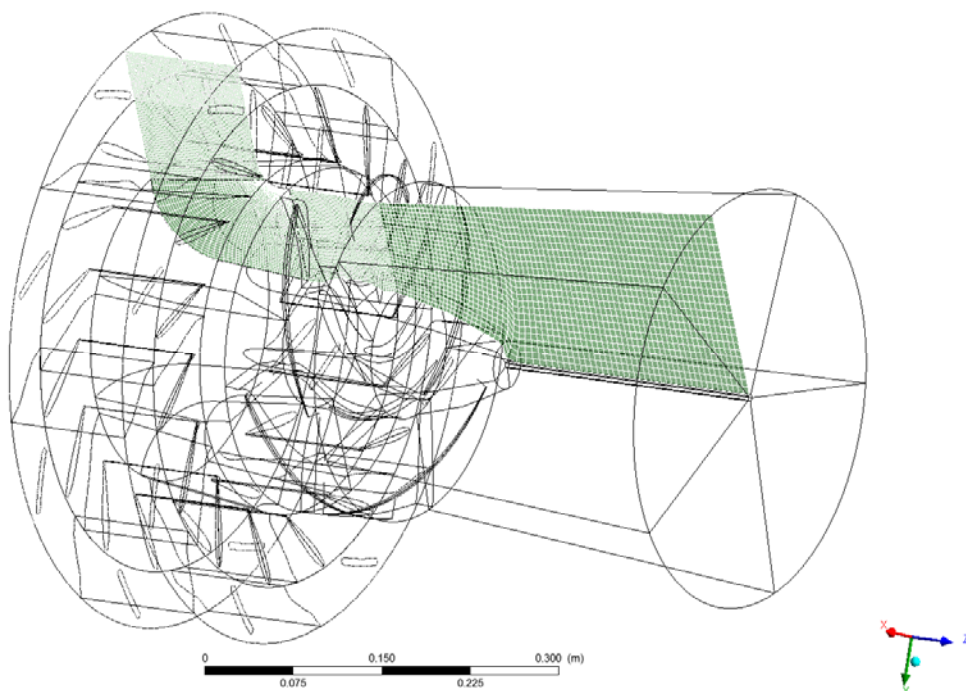


Fig. 2.18: Wireframe della macchina con tutti i componenti inizializzati.

Solo a questo punto è possibile ricavare e plottare tutti i parametri desiderati, come la distribuzione della pressione e della velocità nella parte statorica e rotorica della macchina.

Per una considerazione preliminare sull'andamento complessivo del fluido, è stata presa la macchina nella sua interezza, rappresentando i vari componenti in rendering e ottenendo le linee di flusso in funzione della velocità attraverso il comando "Stream".

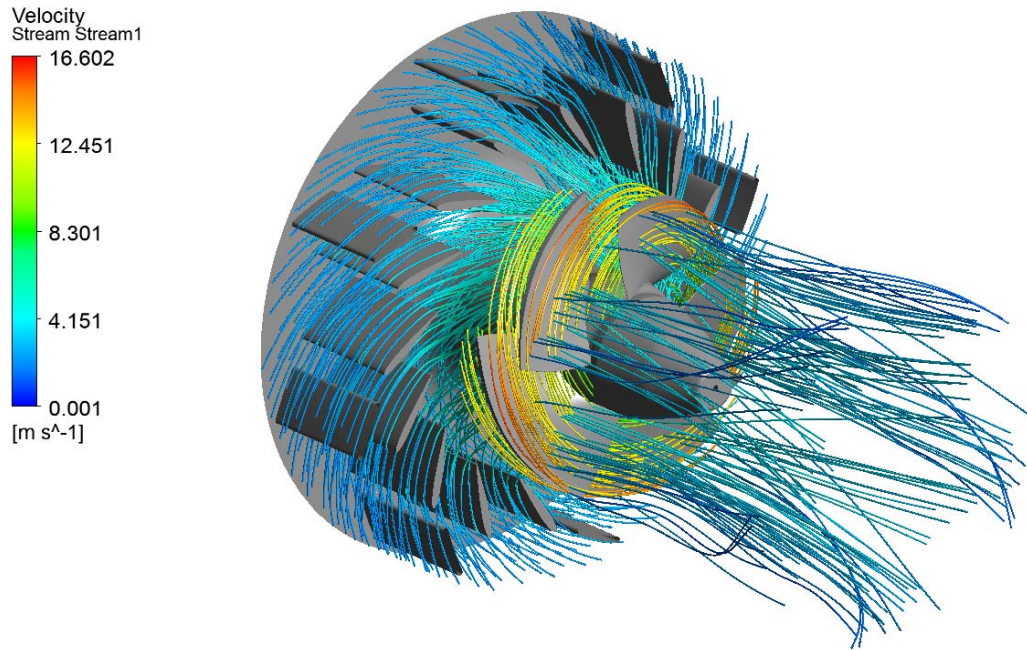


Fig. 2.19: Rendering della macchina con rappresentazione delle linee di flusso.

Per ogni apertura del distributore, è stato osservato l'andamento della velocità e la distribuzione della pressione allo statore e nella girante.

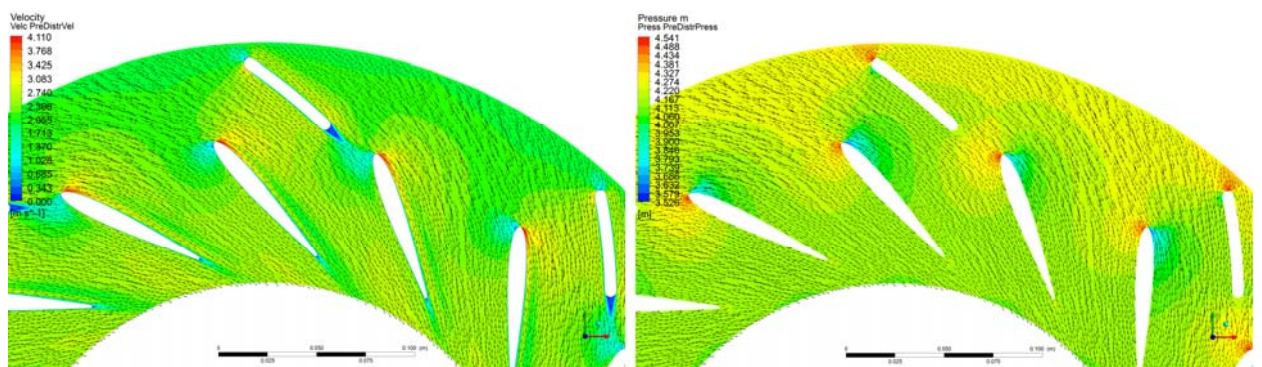


Fig. 2.20: Mappa a fasce colorate di velocità e pressione allo statore.

In seguito alle diverse prove al variare dell'angolo di calettamento del distributore, si è potuto constatare che le simulazioni più attendibili fossero quello con angolo di calettamento compreso tra ($30^\circ \div 48^\circ$), per evitare di avere problemi di portata insufficiente e quindi bassi rendimenti, e per non avere lo stallo a portate troppo elevate.

Per la girante, l'analisi si è concentrata a span¹⁰ 0.1, 0.5 e 0.9.

¹⁰ Lo span è una misura relativa che va da 0 a 1, e indica la distanza radiale tra mozzo (0) e corona (1).

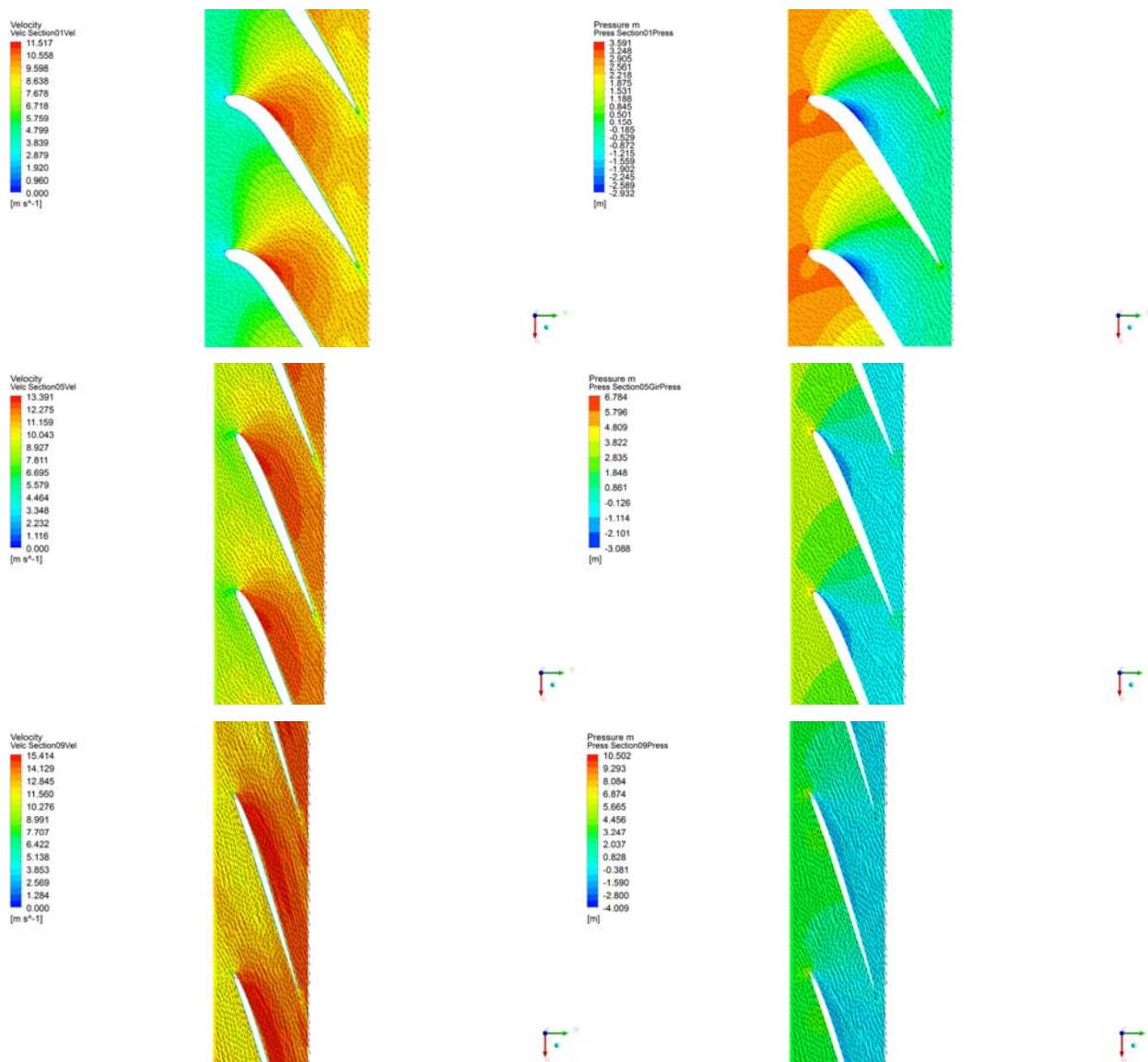


Fig. 2.21: Mappa a fasce colorate di velocità e pressione nella girante, a span diverse.

Dalle immagini della girante è possibile intuire se l'andamento del flusso di corrente è coerente con la linea media della pala. Inoltre è possibile capire il rendimento di schiera sia abbastanza alto nel momento in cui si crea il punto di massima pressione sul naso del profilo palare.

Queste immagini sembrano essere abbastanza esaurienti per intuire il comportamento della macchina, tuttavia non sono sufficienti per effettuare un confronto con i dati di progetto.

2.4.2 . Il confronto con i valori di progetto

A tal proposito, è opportuno esportare i dati necessari per riproporre i triangoli delle velocità all'ingresso e all'uscita della girante.

Una volta effettuata l’inizializzazione, è possibile calcolare automaticamente tutte le componenti della velocità. In questo caso torna utile la visualizzazione del piano meridiano, con la rappresentazione grafica delle pale, sia statoriche che rotoriche, mostrata in figura 2.22 .

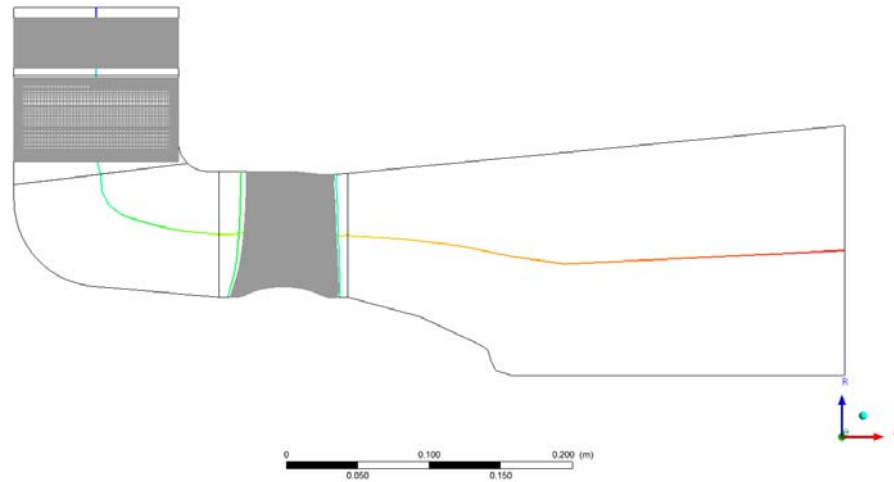


Fig. 2.22: Piano meridiano con posizione della pale statoriche e rotoriche in CFD-Post 14.5

È interessante sapere la posizione delle pale della girante, per poter posizionare una “Turbo Chart” all’ingresso e all’uscita della girante, da corona a mozzo. In pratica il post-processore permette di posizionare idelamente sul piano meridiano una linea parallela alla pala, all’ingresso e all’uscita della girante, lungo la quale ottenere un campione di punti della variabile che si vuole misurare. La variabile che si ottiene viene successivamente raccolta in un grafico in dei valori medi, in funzione dello span, ovvero alla lunghezza radiale tra mozzo e corona. In questo lavoro di tesi sono state rilevate le misure delle componenti della velocità all’ingresso e all’uscita della pala della girante: le componenti meridiane della velocità assoluta $C_{m1,2}$; le componenti tangenziali della velocità assoluta $C_{u1,2}$; le componenti tangenziali della velocità relativa $W_{u1,2}$. Da esse è facile ottenere anche gli angoli assoluti e relativi all’ingresso e all’uscita dalla girante $\alpha_{1,2}$ e $\beta_{1,2}$.

$$\alpha = \arctan \frac{C_m}{C_u} ; \quad \beta = \arctan \frac{C_m}{W_u} .$$

L’andamento delle velocità rilevate nella simulazione, e i relativi angoli, devono essere confrontati con l’andamento delle velocità e gli angoli da progetto, per capire se l’effettivo comportamento idraulico della girante sia coerente con ciò che è stato stimato durante la progettazione. Nei grafici che seguono, viene mostrato il confronto tra le misure rilevate, e i valori di progetto.

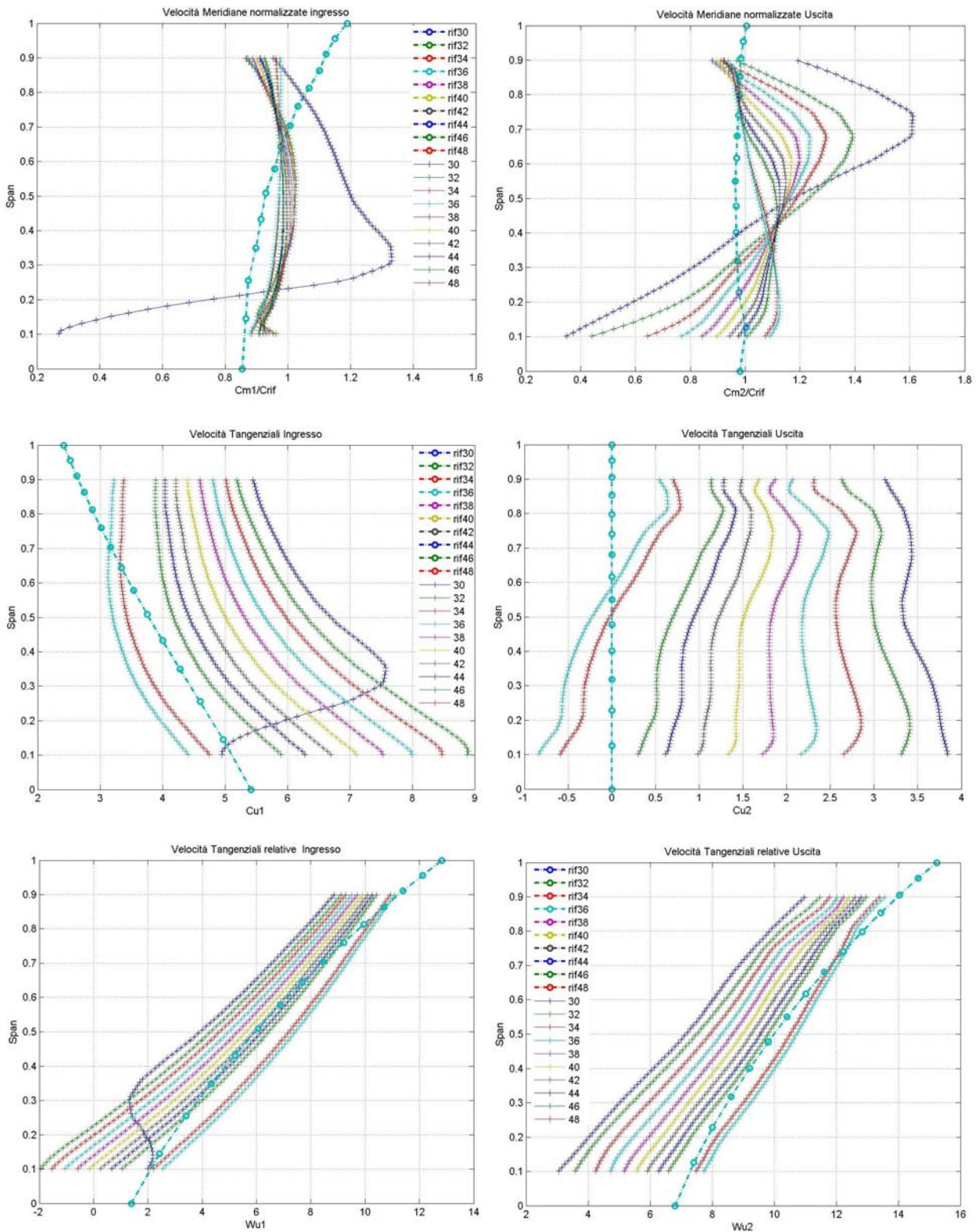


Fig. 2.23: Andamento delle $C_{m1,2}$, $C_{u1,2}$, $W_{u1,2}$ rilevate dalla simulazione, in tutte le aperture del distributore, in funzione dello span, a confronto con l'andamento da progetto.

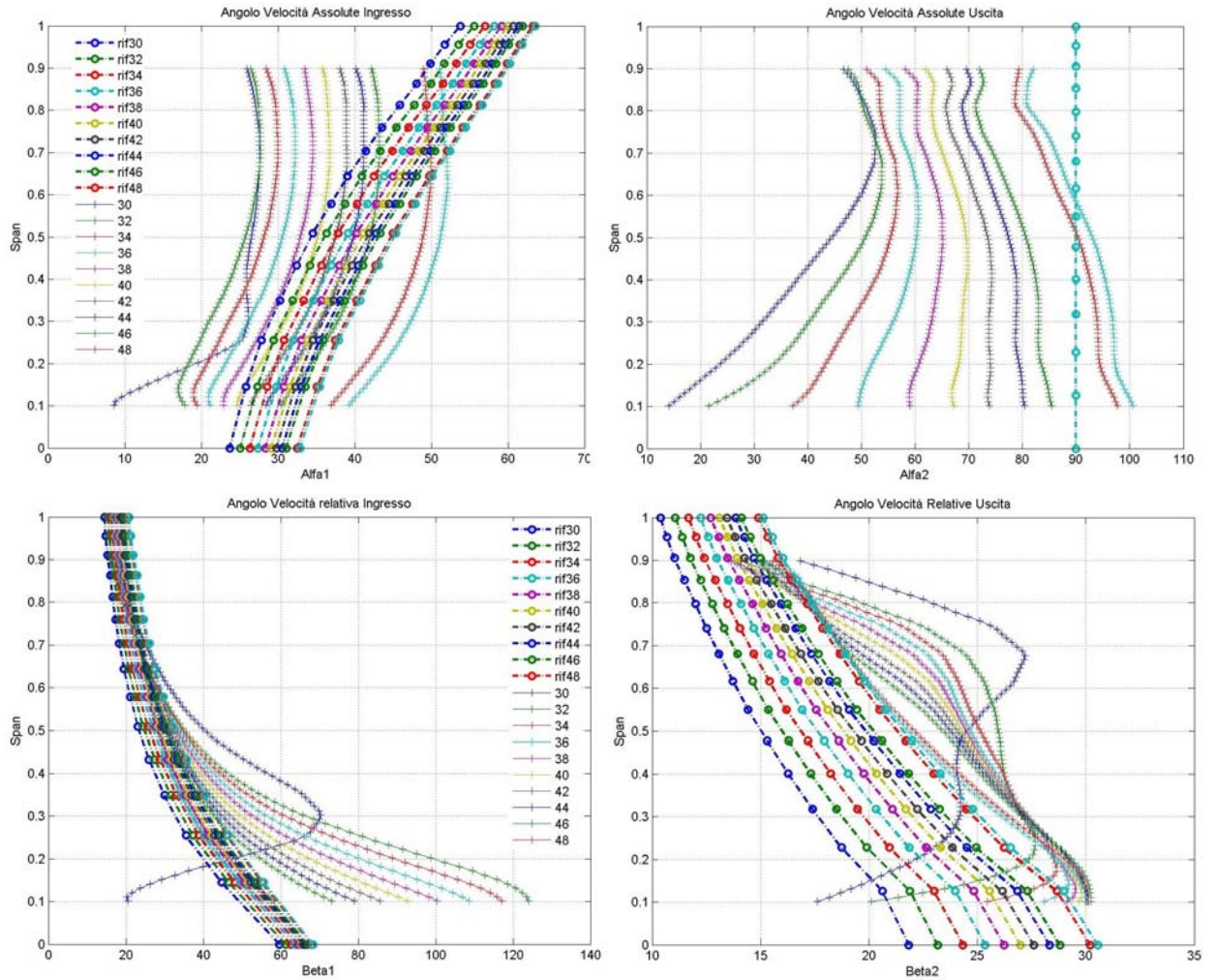


Fig. 2.23: Andamento degli angoli assoluti $\alpha_{1,2}$ e relativi $\beta_{1,2}$ rilevate dalla simulazione, in tutte le aperture del distributore, in funzione dello span, a confronto con l'andamento da progetto.

Si nota facilmente dai grafici l'ampio discostamento dei risultati delle simulazioni dai valori di progetto. In particolare, il confronto tra l'angolo di ingresso β_1 rilevato e quello di progetto, per basse aperture del distributore, mostra un discostamento addirittura del doppio dei gradi nella zona vicina al mozzo (span = 0.1).

La C_m è stata normalizzata, dividendo tutti i valori ricavati dalla simulazione per una

velocità meridiana di riferimento ottenuta come
$$C_{rif,i} = \frac{Q_i}{\pi(d_e^2 - d_i^2)} \cdot 4$$

Con Q_i si intendono le portate calcolate ad ogni simulazione effettuata modificando l'angolo di calettamento del distributore. Come viene riportato in tabella 2.2, oltre alle portate, sono state ricavate dalle "expression" del post-processor, anche i valori dei

rendimenti della macchina, della girante, del distributore e dello scarico, con le annesse perdite.

Tab. 2.2

Apertura	[°]	30	32	34	36	38	40	46	48
Q	[m ³ s ⁻¹]	0.175	0.182	0.188	0.193	0.199	0.203	0.215	0.218
H	[m]	4.016	4.032	4.037	4.014	4.032	4.03	4.033	4.038
Ht	[m]	3.54	3.62	3.66	3.67	3.71	3.71	3.68	3.67
P	[W]	6067	6440	6732	6946	7196	7350	7741	7842
eta idr tot		0.882	0.897	0.907	0.915	0.919	0.92	0.913	0.909
Perdita Pre	[m]	0.005	0.005	0.006	0.004	0.003	0.004	0.006	0.008
Perdita Distr	[m]	0.039	0.033	0.032	0.034	0.032	0.034	0.038	0.042
Perdita Gir	[m]	0.221	0.221	0.222	0.222	0.226	0.23	0.246	0.252
Perdita Scr	[m]	0.154	0.113	0.081	0.056	0.044	0.042	0.051	0.057
eta Pre		0.999	0.999	0.998	0.999	0.999	0.999	0.999	0.998
eta Distr		0.99	0.992	0.992	0.992	0.992	0.991	0.991	0.99
eta Gir		0.945	0.945	0.945	0.945	0.944	0.943	0.939	0.938
eta Scr		0.962	0.972	0.98	0.986	0.989	0.99	0.987	0.986
Cu1	[m s ⁻¹]	-1.277	-1.328	-1.37	-1.41	-1.45	-1.48	-1.57	-1.59
Cr1	[m s ⁻¹]	-0.933	-0.97	-1	-1.03	-1.06	-1.08	-1.15	-1.16
Cu2	[m s ⁻¹]	-1.574	-1.627	-1.69	-1.745	-1.79	-1.83	-1.96	-2
Cr2	[m s ⁻¹]	-1.142	-1.189	-1.23	-1.265	-1.3	-1.33	-1.42	-1.44
Cu3	[m s ⁻¹]	-4.006	-3.782	-3.57	-3.364	-3.18	-3.01	-2.49	-2.34
Cr3	[m s ⁻¹]	-1.482	-1.54	-1.59	-1.633	-1.68	-1.71	-1.81	-1.84
Cu4	[m s ⁻¹]	-5.598	-5.296	-5.01	-4.734	-4.48	-4.24	-3.53	-3.32
Cm4	[m s ⁻¹]	3.128	3.253	3.361	3.457	3.552	3.627	3.847	3.91
Cu5	[m s ⁻¹]	-2.208	-1.882	-1.59	-1.326	-1.06	-0.84	-0.19	0.007
Cm5	[m s ⁻¹]	3.234	3.361	3.471	3.568	3.663	3.739	3.953	4.013
Cu6	[m s ⁻¹]	-0.894	-0.61	-0.4	-0.39	-0.49	-0.59	-0.18	0.007
Cm6	[m s ⁻¹]	2.176	2.123	2.125	2.152	2.118	2.096	2.206	2.269
C6	[m]	0.794	0.683	0.613	0.548	0.443	0.36	0.409	0.425

Da notare la differenza tra la caduta H che resta più o meno costante grazie al lavoro dell'algoritmo, e la pressione totale Ht calcolata ad ogni simulazione. Queste due grandezze messe a rapporto danno il rendimento idrico totale.

Le perdite in ogni componente, sono state calcolate mediante differenza di pressione totale tra ingresso ed uscita del componente stesso. Il relativo rendimento invece è stato ricavato come

$$eta = \frac{1 - perdita}{H}$$

Infine sono state calcolate alcune componenti della velocità assoluta, tenendo presente che i numeri assegnati alle grandezze vanno da 1 a 6 come il numero di superfici di ingresso fluido e uscita fluido di ogni componente.

Sono stati ricavati infine dei grafici delle grandezze principali, da mettere in evidenza in funzione della portata.

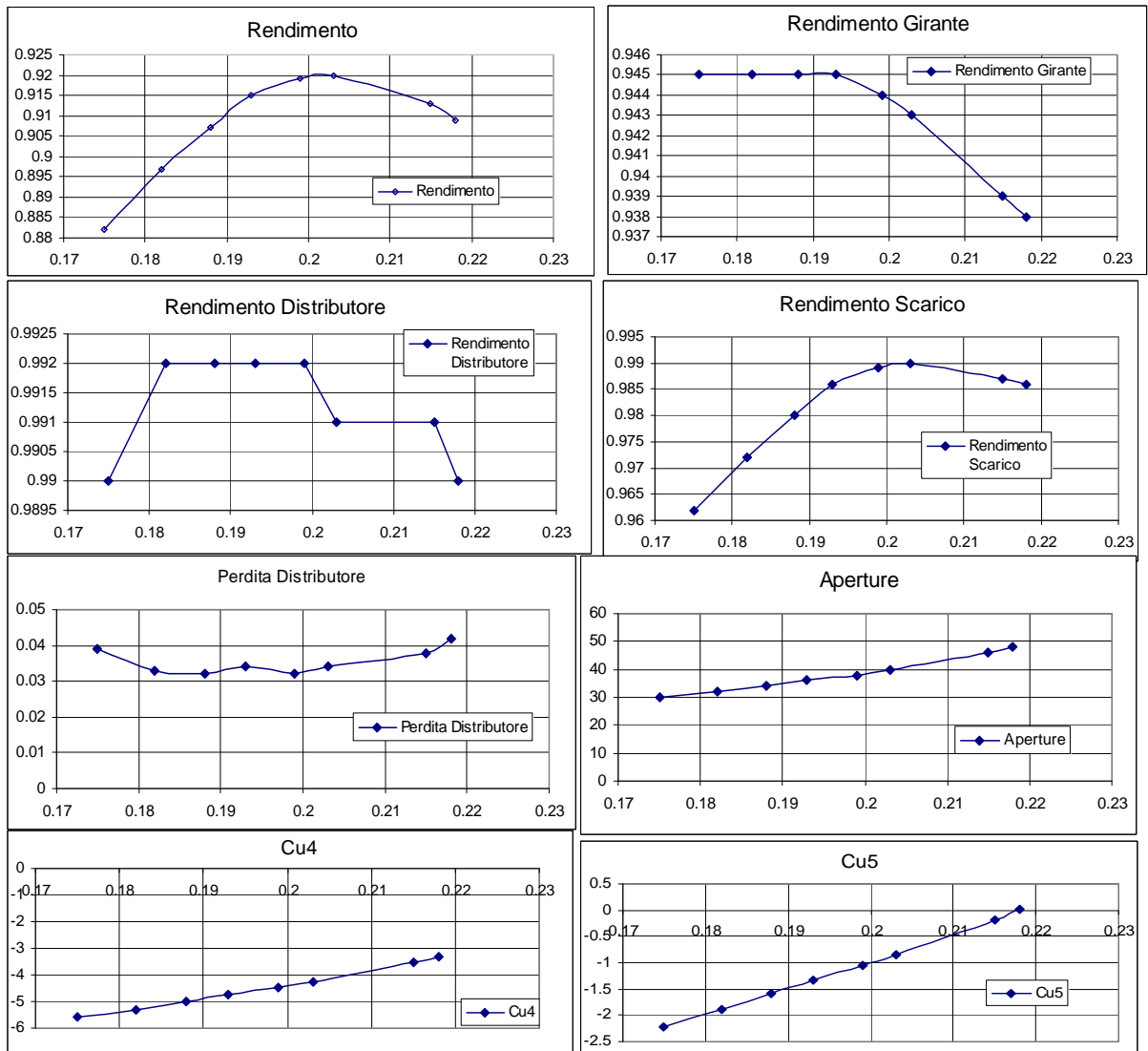


Fig. 2.24: Grafici dei risultati in funzione della portata.

Da far notare il rendimento che arriva ad un valore vicino al 92%, per una apertura del distributore di 38° di calettamento. Essendo la macchina di piccole dimensioni, i rendimenti difficilmente possono raggiungere valori più elevati. Inoltre le simulazioni si sono concentrate sulla regolazione del distributore, mentre il calettamento della girante resta ancora fisso. Quindi il rendimento ha un picco per un valore di portata, mentre l'obiettivo della Kaplan Biregolante è di avere un rendimento elevato in un campo abbastanza ampio di portate.

Infine va fatto notare che non è stata raggiunta la portata di progetto: anche alla massima apertura stimata a 48° , la portata si ferma ad un valore di $Q = 0.218 \text{ [m}^3/\text{s]}$, mentre la portata massima del progetto è di $Q_{\max} = 0.280 \text{ [m}^3/\text{s]}$.

A partire da questi risultati, iniziano quindi i tentativi di riprogettazione e ottimizzazione della macchina.

Capitolo 3

La Riprogettazione

Le simulazioni svolte hanno rivelato un comportamento non eccellente della macchina in esame. In particolare l'accoppiamento distributore-girante da progetto non garantisce il raggiungimento della portata massima, né quella di progetto, in nessuna condizione di apertura del distributore. Inoltre non sono state raggiunte delle ottimali condizioni di incidenza tra la pala ed il fluido nella girante.

L'analisi CFD mette in evidenza il divario tra le condizioni di progetto e l'effettivo comportamento della macchina. Tuttavia sta al progettista capire dove vadano effettuate le giuste modifiche, per ottenere dei risultati più soddisfacenti. Le considerazioni che sono state fatte sono le seguenti:

- riprogettare la girante per una portata di progetto diversa dall'80% della portata massima, per verificare il raggiungimento della portata di progetto, mantenendo lo stesso distributore;
- aumentare l'angolo di calettamento della girante, per raggiungere le condizioni di portata massima;
- modificare il condotto meridiano andando ad aumentare i diametri di mozzo e corona, per correggere gli angoli del fluido all'ingresso e all'uscita della girante, per avvicinarsi alle corrette condizioni di incidenza con la pala della girante.

Nei paragrafi successivi, verranno descritti i metodi con cui la macchina è stata riprogettata.

3.1 . LA RIPROGETTAZIONE DELLA GIRANTE

La scelta della girante come punto di intervento per il miglioramento delle prestazioni della macchina è in primo luogo da porre in relazione al fatto che, attraverso questa, si manifestano le maggiori perdite fluidodinamiche. A ciò va aggiunto che la parte statorica optata per questa macchina, è un distributore standard, con dei buoni rendimenti, e perdite che ovviamente sono direttamente proporzionali con l'aumento della portata, e che quindi può essere mantenuto tale e quale.

3.1.1 . La girante progettata al 110% della portata massima ($Q_{1.1}$)

Mantenendo invariata la geometria del condotto meridiano, è stata ripercorsa la stessa linea di progettazione vista nel Capitolo 1, al paragrafo 1.2, per il calcolo dei triangoli delle velocità a partire dall'equazione dell'energia gH_t , l'ottenimento degli angoli costruttivi, il calcolo dei profili palari nel rispetto della teoria secondo gli autori Carter, Howell e Constant. La differenza è stata semplicemente usare nelle formule viste, come portata Q , la portata $Q_{1.1} = 1.1 \cdot Q_{prog}$ anziché $Q_{0.8} = 0.8 \cdot Q_{prog}$. Quindi

$$Q_{1.1} = 280 \cdot 1.1 = 308 \text{ [l/s]}.$$

Gli angoli costruttivi ottenuti al termine dei calcoli con la nuova portata, sono riassunti nel grafico di figura 3.1, dove sono in funzione delle varie sezioni della girante.

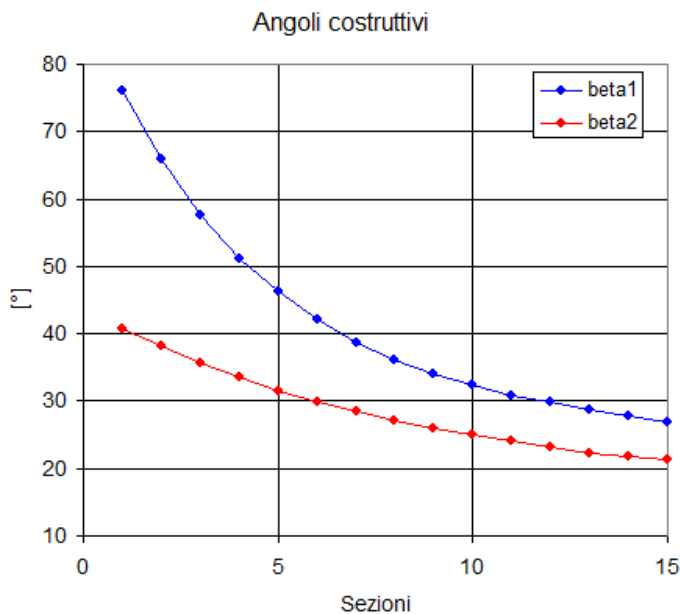


Fig. 3.1: Angoli costruttivi di ingresso e uscita della Girante $Q_{1.1}$.

Sono state poi calcolate le nuove coordinate delle linee medie e i relativi spessori, per ottenere nuovamente i 16 layers per la costruzione della pala.

La geometria della pala è stata ottenuta sempre mediante l'ausilio del software BladeGen 14.5. È stata poi importata in TurboGrid 14.5 per la costruzione della mesh, come già visto nel Capitolo 2, al paragrafo 2.2.4.

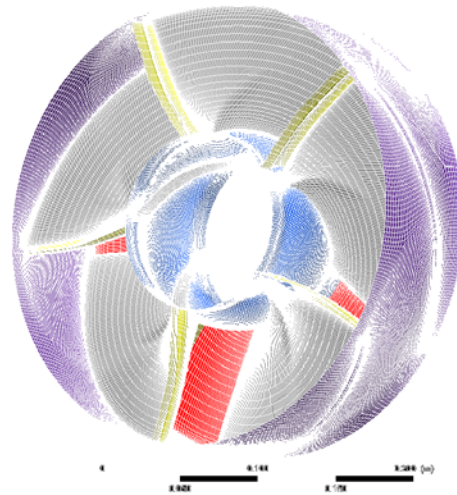


Fig. 3.2: Mesh della nuova girante progettata al 110% della portata massima

3.1.2 . Le simulazioni con la girante al 110% della portata massima ($Q_{1.1}$)

Per ricavare le simulazioni con la nuova girante, sono state prese tutte le simulazioni precedenti con le 19 aperture e, tramite il pre-processor CFX-Pre 14.5, è stata semplicemente sostituita la mesh della girante, mantenendo tutti gli altri componenti e i parametri inalterati.

Dopo aver verificato che le simulazioni fossero attendibili, sono stati analizzati i risultati, in maniera analoga a come già descritto nel paragrafo 2.4 del Capitolo 2.

Per una considerazione preliminare sull'andamento complessivo del fluido, è stata presa la macchina nella sua interezza, rappresentando i vari componenti in rendering e ottenendo le linee di flusso in funzione della velocità attraverso il comando "Stream".

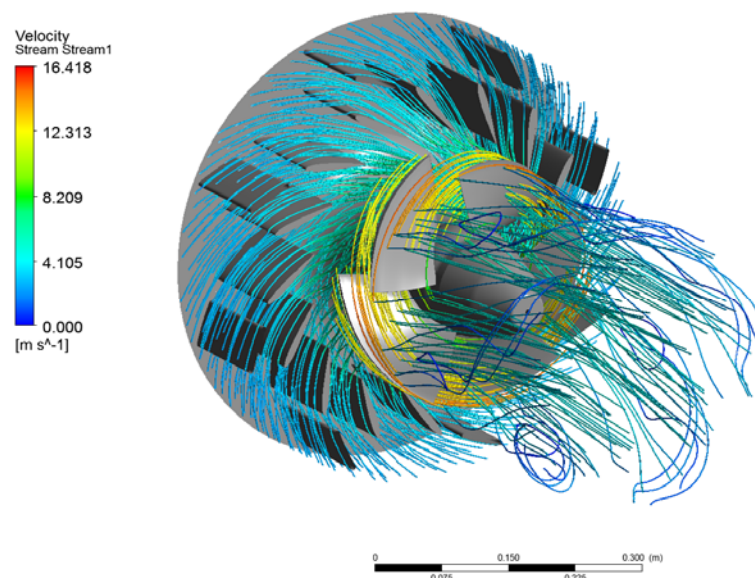


Fig. 3.3: Rendering della macchina con rappresentazione delle linee di flusso.

Per ogni apertura del distributore, è stato osservato l'andamento della velocità e la distribuzione della pressione allo statore e nella girante.

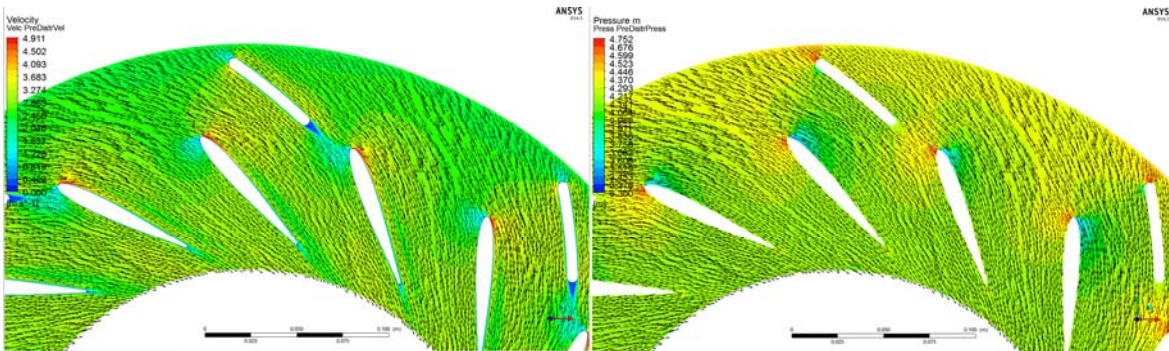
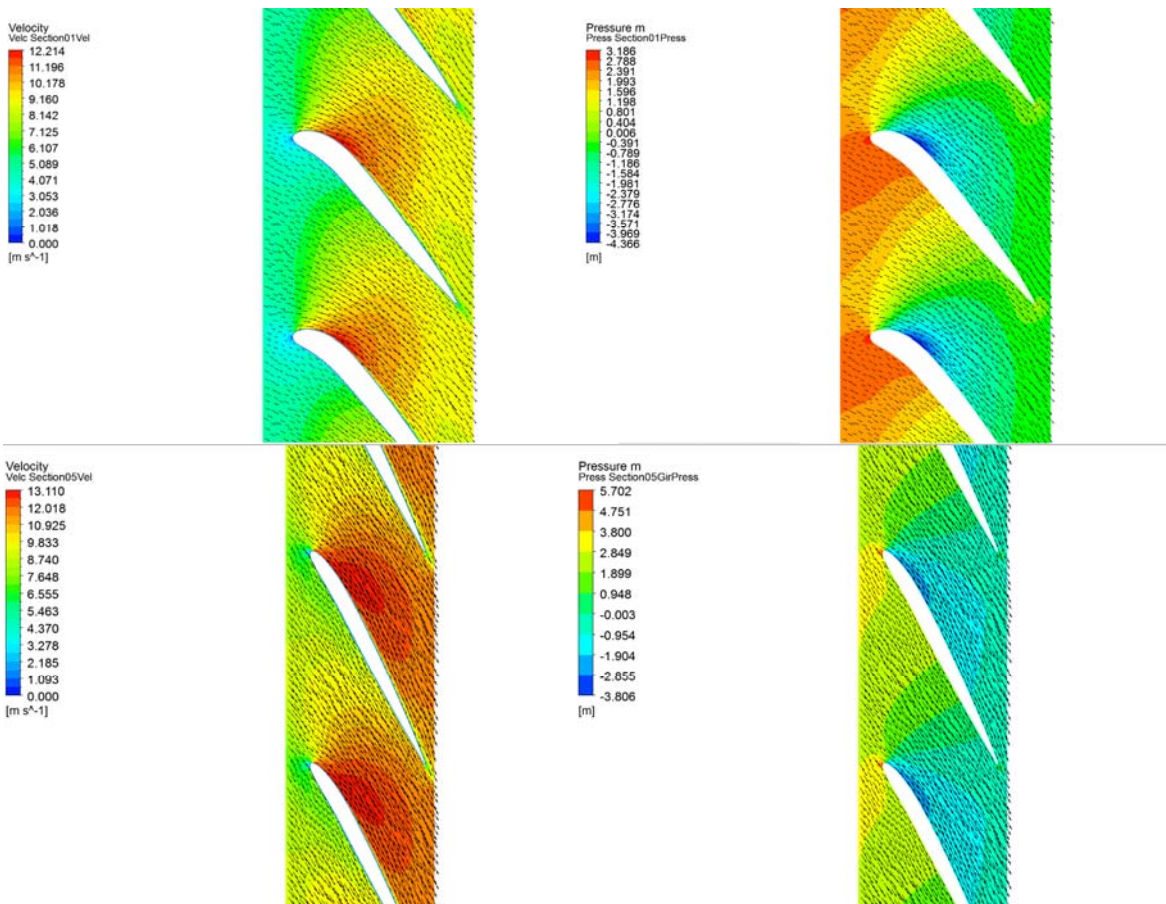


Fig. 3.4: Mappa a fasce colorate di velocità e pressione allo statore.

In seguito alle diverse prove al variare dell'angolo di calettamento del distributore, si è potuto constatare anche in queste simulazioni che il distributore ha mantenuto lo stesso comportamento delle precedenti, in ambito di velocità e pressione.

Per la girante, l'analisi si è concentrata a span¹¹ 0.1, 0.5 e 0.9.



¹¹ Lo span è una misura relativa che va da 0 a 1, e indica la distanza radiale tra mozzo (0) e corona (1).

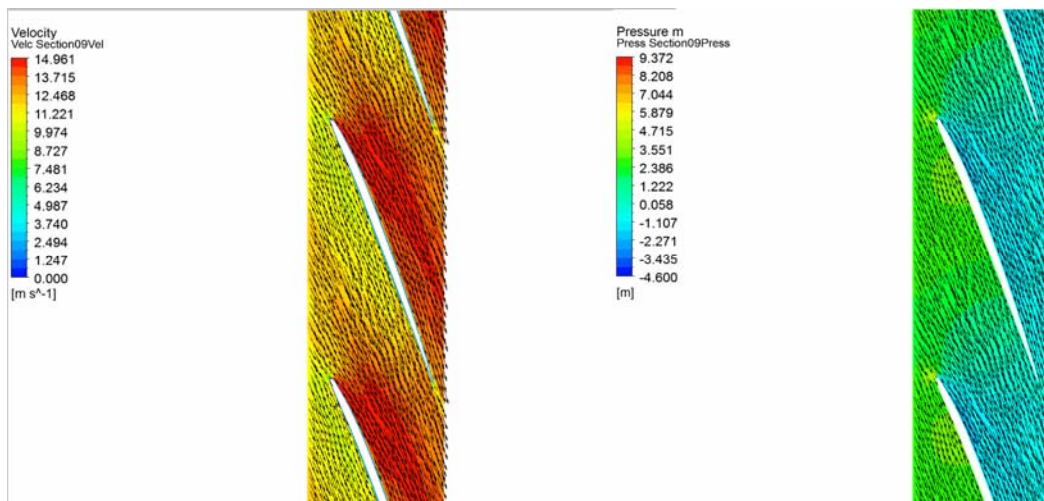
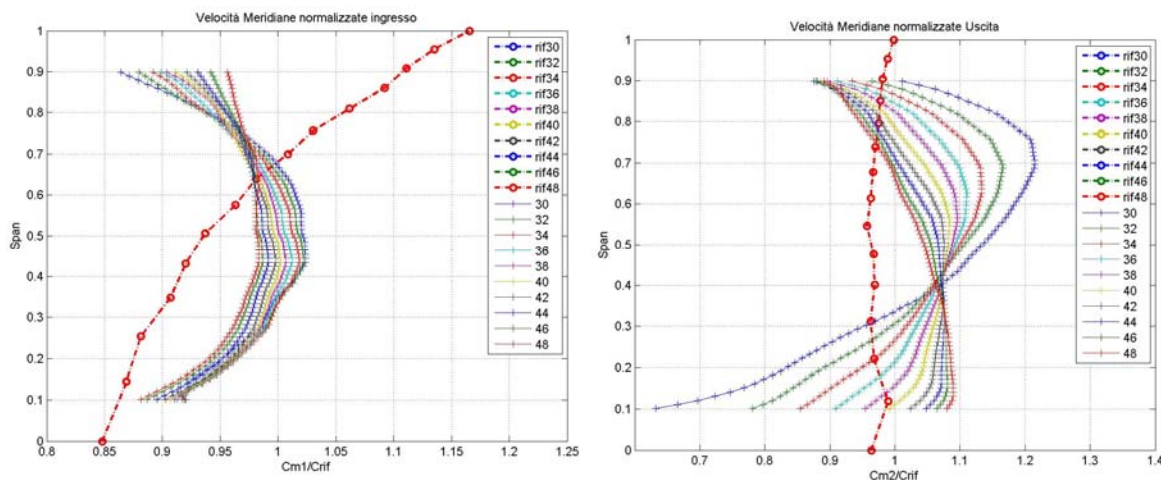


Fig. 3.5: Mappe a fasce colorate di velocità e pressione nella girante, a span diverse.

Dalle immagini della girante è possibile intuire se l'andamento del flusso di corrente è coerente con la linea media della pala. Inoltre è possibile capire il rendimento di schiera sia attorno al suo massimo, qualora si crei il punto di massima pressione in corrispondenza del naso del profilo palare.

Per effettuare un confronto esauriente con i dati di progetto, è stato necessario, come già visto nel precedente capitolo, estrarre i dati necessari per riproporre i triangoli delle velocità in ingresso ed uscita dalla girante. L'andamento delle velocità rilevate nella simulazione, e i relativi angoli, devono essere confrontati con l'andamento delle velocità e gli angoli da progetto, per capire se l'effettivo comportamento idraulico della girante sia coerente con ciò che è stato stimato durante la progettazione. Nei grafici che seguono, viene mostrato il confronto tra le misure rilevate, e i valori di progetto.



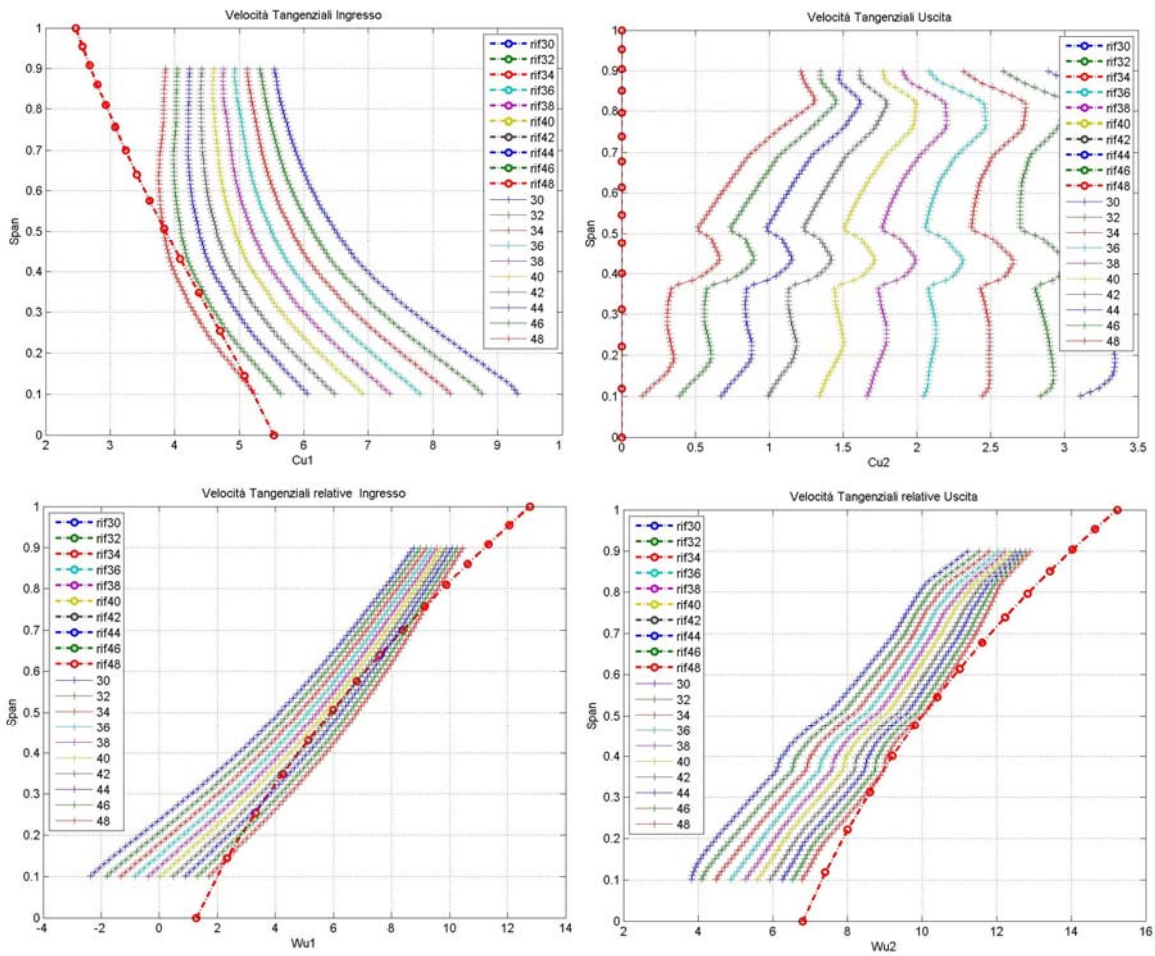
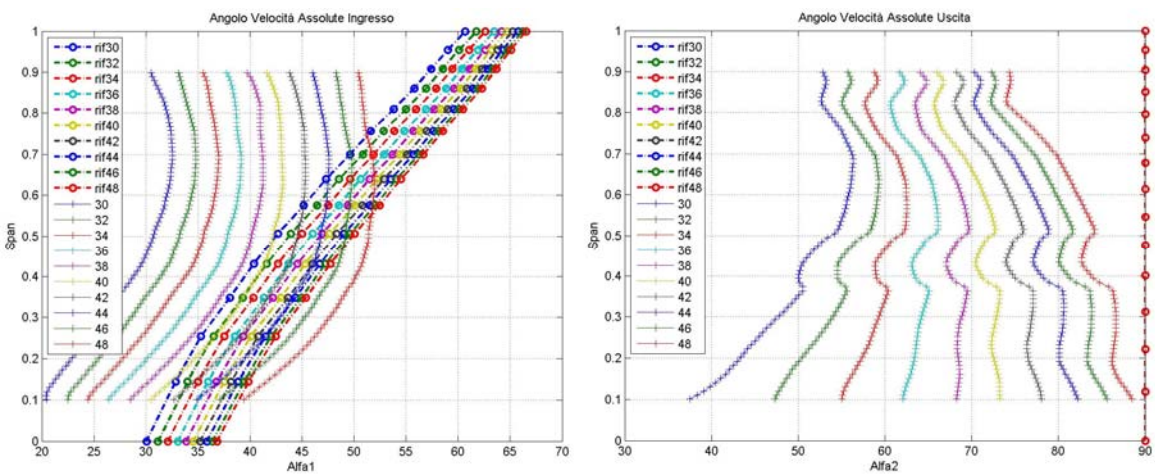


Fig. 3.6: Andamento delle $Cm_{1,2}$, $Cu_{1,2}$, $Wu_{1,2}$ rilevate dalla simulazione, in tutte le aperture del distributore, in funzione dello span, a confronto con l'andamento da progetto, per la Girante Q_1.1 .



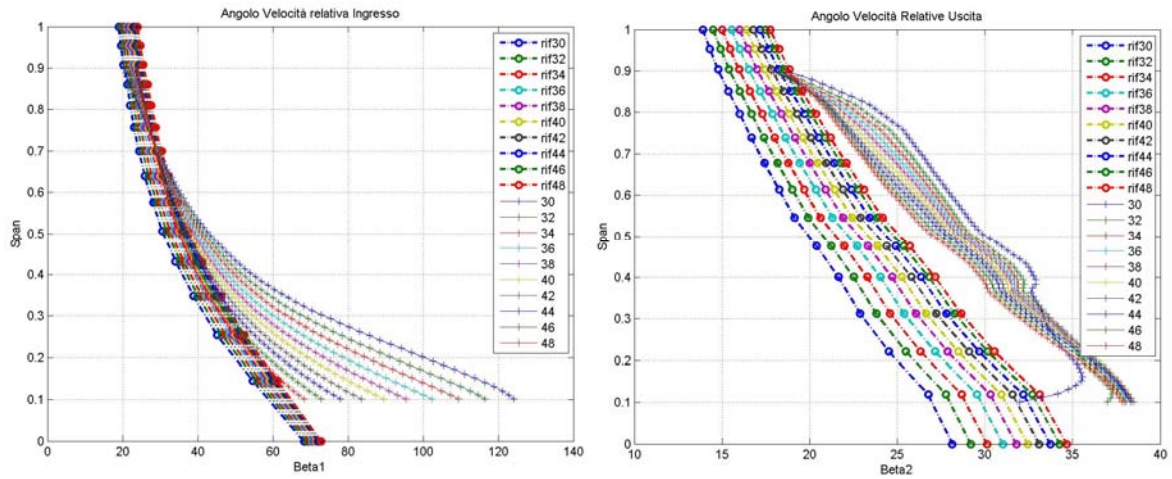


Fig. 3.7: Andamento degli angoli assoluti $\alpha_{1,2}$ e relativi $\beta_{1,2}$ rilevate dalla simulazione, in tutte le aperture del distributore, in funzione dello span, a confronto con l'andamento da progetto, per la Girante Q_1.1 .

I precedenti grafici mettono nuovamente in rilievo l'eccessivo discostamento dei risultati delle simulazioni dai valori di progetto. In particolare anche in queste simulazioni, come in quelle precedenti, viene osservato un ampio distacco tra l'angolo di ingresso β_1 rilevato e quello di progetto, nella zona vicina al mozzo (span = 0.1). Come verrà trattato in seguito, si proverà a risolvere questo problema con la modifica del condotto meridiano.

Infine in tabella 3.1 sono stati ricavati i valori della caduta totale, dei rendimenti di macchina, girante, distributore e scarico, con le annesse perdite, oltre che i valori delle portate e della potenza ad ogni apertura del distributore.

Tab 3.1

Apertura	[°]	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48
Q	[m ³ /s]	0.201	0.21	0.218	0.226	0.233	0.239	0.245	0.251	0.256	0.26
H	[m]	4.07	4.04	4.04	4.04	4.04	4.04	4.04	4.039	4.029	4.005
Ht	[m]	3.5	3.57	3.62	3.66	3.69	3.7	3.72	3.71	3.69	3.66
P	[W]	6862	7336	7729	8089	8401	8651	8911	9109	9234	9318
eta idr tot		0.86	0.884	0.896	0.906	0.913	0.917	0.92	0.919	0.916	0.914
Perdita Pre	[m]	0.003	0.006	0.006	0.006	0.006	0.005	0.005	0.004	0.01	0.014
Perdita Distr	[m]	0.042	0.045	0.044	0.043	0.042	0.047	0.049	0.051	0.051	0.055
Perdita Gir	[m]	0.173	0.174	0.174	0.174	0.175	0.176	0.179	0.181	0.186	0.19
Perdita Scr	[m]	0.306	0.196	0.156	0.124	0.102	0.088	0.073	0.075	0.08	0.077
eta Pre		0.999	0.999	0.998	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.998	0.997
eta Distr		0.99	0.989	0.989	0.989	0.99	0.988	0.988	0.987	0.987	0.986
eta Gir		0.958	0.957	0.957	0.957	0.957	0.956	0.956	0.955	0.954	0.953
eta Scr		0.925	0.952	0.961	0.969	0.975	0.978	0.982	0.981	0.98	0.981

I valori di tabella 3.1 sono stati quindi raccolti in dei grafici in funzione della portata, e messi a confronto con i valori trovati precedentemente per la turbina progettata all'80% della Q_{max} . (vedi Fig. 3.8).

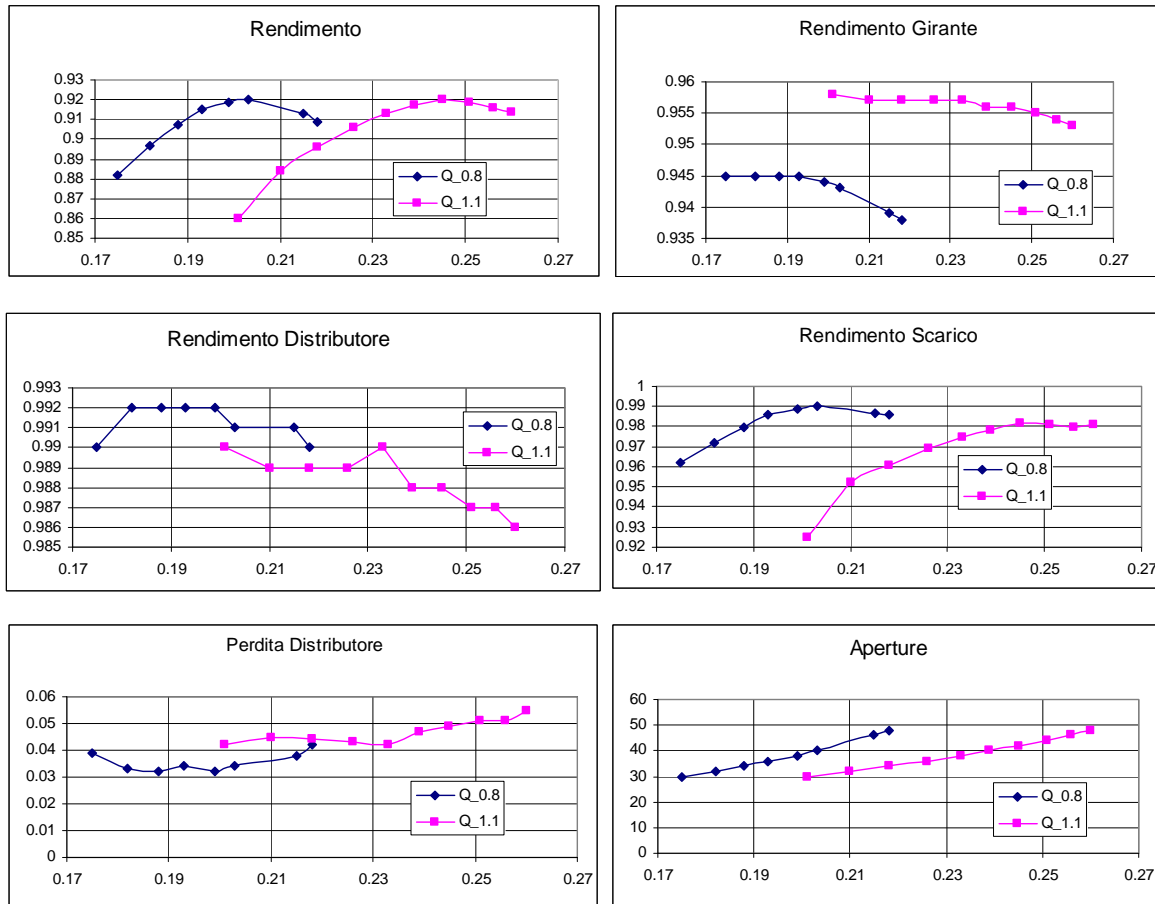


Fig. 3.8: Grafici dei risultati in funzione della portata.

Il rendimento totale si conferma attorno ad un valore di 0.92, ovviamente per apertura e portata maggiori rispetto alla precedente simulazione. Questo è probabilmente compensato dal fatto che il rendimento della girante risulta leggermente più elevato, mentre diminuisce il rendimento del distributore probabilmente a causa dell'aumento della portata e quindi delle perdite continue.

Infine va fatto notare che nemmeno con la girante progettata al 110% della portata massima, è stata raggiunta la portata di progetto: anche alla massima apertura stimata a 48°, la portata si ferma ad un valore di $Q = 0.260 \text{ [m}^3/\text{s]}$, mentre la portata massima di progetto è di $Q_{max} = 0.280 \text{ [m}^3/\text{s]}$. Questo fatto però non è da considerarsi del tutto negativo, poiché il progetto riguarda una turbina Kablan Biregolante, e finora sono stati cambiati solamente gli angoli di calettamento del distributore. Effettuando una apertura dell'angolo di calettamento della girante, sicuramente la portata di progetto verrebbe

raggiunta e superata. Da questa ultima considerazione inizia lo sviluppo delle successive simulazioni.

3.1.3 . La girante progettata alla $Q_{1,1}$ e apertura dell'angolo di calettamento a 5°

L'apertura di 5° dell'angolo di calettamento della girante determina ovviamente la costruzione di una nuova mesh della girante e quindi delle nuove simulazioni da far girare per ogni grado di apertura del distributore.

Per effettuare la dovuta rotazione, le coordinate (x, y, z) di ogni layer della pala, per la girante riprogettata al 110% della portata massima¹², sono state riportate su piano, ruotate e nuovamente adagiate sulla sfera. Quindi a partire dalle coordinate (x, y, z) , si è passati a coordinate cilindriche (Z, R, ϑ)

$$R = \sqrt{x^2 + y^2} ,$$

$$\vartheta = \arctg\left(\frac{x}{y}\right)$$

$$Z = z$$

per poi ottenere le coordinate su piano (Y_{piano}, X_{piano})

$$Y_{piano} = \vartheta \cdot R ,$$

$$X_{piano} = Z .$$

La rotazione delle coordinate si ottiene semplicemente moltiplicandole per la matrice di rotazione

$$X'_{piano} = X_{piano} \cdot \cos(\alpha) - Y_{piano} \cdot \sin(\alpha)$$

$$Y'_{piano} = X_{piano} \cdot \sin(\alpha) + Y_{piano} \cdot \cos(\alpha)$$

con $\alpha = 5^\circ$. Ovviamente per riottenere le nuove coordinate ruotate (x', y', z') , riportate su sfera, si procede con la trasformazione sempre con l'ausilio delle coordinate cilindriche:

$$\vartheta' = \frac{Y'_{piano}}{R} ,$$

$$z' = X'_{piano}$$

$$y' = R \cdot \cos(\vartheta') .$$

$$x' = R \cdot \sin(\vartheta')$$

Viene inserito come esempio il Layer 2 (vedi Tab. 3.2):

¹² Il metodo con cui sono state ricavate, è già stato descritto nel Capitolo 1 al paragrafo 1.2.3 per la precedente girante.

Tab.3.2

x	y	z	R	theta	ypiano	xpiano	ypiano'	xpiano'	theta'	x'	y'	z'
21.07	61.49	-32.46	65	0.33	21.46	-32.46	18.55	-34.20	0.29	18.30	62.37	-34.20
21.06	61.50	-32.40	65	0.33	21.44	-32.40	18.54	-34.14	0.29	18.29	62.37	-34.14
21.02	61.51	-32.22	65	0.33	21.40	-32.22	18.51	-33.96	0.28	18.26	62.38	-33.96
20.94	61.53	-31.92	65	0.33	21.32	-31.92	18.46	-33.66	0.28	18.21	62.40	-33.66
20.84	61.57	-31.52	65	0.33	21.22	-31.52	18.39	-33.25	0.28	18.15	62.42	-33.25
20.71	61.61	-31.01	65	0.32	21.08	-31.01	18.30	-32.73	0.28	18.06	62.44	-32.73
20.55	61.67	-30.40	65	0.32	20.91	-30.40	18.18	-32.10	0.28	17.95	62.47	-32.10
20.36	61.73	-29.70	65	0.32	20.71	-29.70	18.04	-31.39	0.28	17.81	62.51	-31.39
20.14	61.80	-28.93	65	0.31	20.47	-28.93	17.87	-30.60	0.27	17.65	62.56	-30.60
19.88	61.89	-28.09	65	0.31	20.20	-28.09	17.68	-29.74	0.27	17.46	62.61	-29.74
19.59	61.98	-27.19	65	0.31	19.90	-27.19	17.46	-28.82	0.27	17.25	62.67	-28.82
19.27	62.08	-26.25	65	0.30	19.56	-26.25	17.20	-27.86	0.26	17.00	62.74	-27.86
18.92	62.19	-25.28	65	0.30	19.20	-25.28	16.92	-26.86	0.26	16.73	62.81	-26.86
18.54	62.30	-24.29	65	0.29	18.80	-24.29	16.61	-25.84	0.26	16.43	62.89	-25.84
18.14	62.42	-23.30	65	0.28	18.38	-23.30	16.28	-24.81	0.25	16.11	62.97	-24.81
17.71	62.54	-22.31	65	0.28	17.94	-22.31	15.92	-23.79	0.24	15.77	63.06	-23.79
16.92	62.76	-20.62	65	0.26	17.11	-20.62	15.25	-22.03	0.23	15.11	63.22	-22.03
16.07	62.98	-18.98	65	0.25	16.24	-18.98	14.52	-20.32	0.22	14.40	63.38	-20.32
15.16	63.21	-17.39	65	0.24	15.31	-17.39	13.73	-18.66	0.21	13.63	63.55	-18.66
14.20	63.43	-15.85	65	0.22	14.32	-15.85	12.88	-17.04	0.20	12.80	63.73	-17.04
13.19	63.65	-14.37	65	0.20	13.28	-14.37	11.97	-15.47	0.18	11.91	63.90	-15.47
12.11	63.86	-12.94	65	0.19	12.18	-12.94	11.01	-13.95	0.17	10.95	64.07	-13.95
10.98	64.07	-11.56	65	0.17	11.03	-11.56	9.98	-12.47	0.15	9.94	64.24	-12.47
9.79	64.26	-10.23	65	0.15	9.83	-10.23	8.90	-11.05	0.14	8.87	64.39	-11.05
8.56	64.43	-8.94	65	0.13	8.58	-8.94	7.77	-9.65	0.12	7.75	64.54	-9.65
7.32	64.59	-7.65	65	0.11	7.33	-7.65	6.64	-8.26	0.10	6.63	64.66	-8.26
6.07	64.72	-6.38	65	0.09	6.08	-6.38	5.50	-6.88	0.08	5.49	64.77	-6.88
4.81	64.82	-5.10	65	0.07	4.82	-5.10	4.35	-5.50	0.07	4.35	64.85	-5.50
3.55	64.90	-3.84	65	0.05	3.55	-3.84	3.20	-4.13	0.05	3.20	64.92	-4.13
2.28	64.96	-2.58	65	0.04	2.28	-2.58	2.04	-2.76	0.03	2.04	64.97	-2.76
1.00	64.99	-1.32	65	0.02	1.00	-1.32	0.88	-1.40	0.01	0.88	64.99	-1.40
-0.29	65.00	-0.07	65	0.00	-0.29	-0.07	-0.29	-0.05	0.00	-0.29	65.00	-0.05
-1.58	64.98	1.17	65	-0.02	-1.58	1.17	-1.47	1.31	-0.02	-1.47	64.98	1.31
-2.88	64.94	2.41	65	-0.04	-2.88	2.41	-2.66	2.65	-0.04	-2.66	64.95	2.65
-4.18	64.87	3.64	65	-0.06	-4.18	3.64	-3.85	3.99	-0.06	-3.85	64.89	3.99
-5.49	64.77	4.87	65	-0.08	-5.49	4.87	-5.05	5.33	-0.08	-5.04	64.80	5.33
-6.80	64.64	6.09	65	-0.10	-6.81	6.09	-6.25	6.66	-0.10	-6.24	64.70	6.66
-8.11	64.49	7.30	65	-0.13	-8.13	7.30	-7.46	7.98	-0.11	-7.45	64.57	7.98
-9.43	64.31	8.51	65	-0.15	-9.46	8.51	-8.68	9.30	-0.13	-8.66	64.42	9.30
-10.75	64.11	9.71	65	-0.17	-10.79	9.71	-9.91	10.62	-0.15	-9.87	64.25	10.62
-12.06	63.87	10.91	65	-0.19	-12.13	10.91	-11.14	11.93	-0.17	-11.08	64.05	11.93
-13.39	63.61	12.10	65	-0.21	-13.48	12.10	-12.38	13.23	-0.19	-12.30	63.83	13.23
-14.71	63.32	13.29	65	-0.23	-14.83	13.29	-13.62	14.53	-0.21	-13.52	63.58	14.53
-16.03	62.99	14.47	65	-0.25	-16.19	14.47	-14.87	15.82	-0.23	-14.74	63.31	15.82
-17.34	62.64	15.64	65	-0.27	-17.56	15.64	-16.13	17.11	-0.25	-15.96	63.01	17.11
-18.66	62.26	16.81	65	-0.29	-18.93	16.81	-17.39	18.39	-0.27	-17.18	62.69	18.39
-19.98	61.85	17.97	65	-0.31	-20.30	17.97	-18.66	19.67	-0.29	-18.41	62.34	19.67
-21.29	61.42	19.12	65	-0.33	-21.69	19.12	-19.94	20.94	-0.31	-19.63	61.97	20.94
-22.59	60.95	20.27	65	-0.36	-23.08	20.27	-21.22	22.21	-0.33	-20.85	61.57	22.21
-23.90	60.45	21.42	65	-0.38	-24.47	21.42	-22.51	23.47	-0.35	-22.06	61.14	23.47
-25.19	59.92	22.56	65	-0.40	-25.87	22.56	-23.81	24.73	-0.37	-23.28	60.69	24.73
-26.49	59.36	23.69	65	-0.42	-27.28	23.69	-25.11	25.98	-0.39	-24.49	60.21	25.98
-27.77	58.77	24.82	65	-0.44	-28.69	24.82	-26.42	27.22	-0.41	-25.70	59.70	27.22
-29.05	58.15	25.94	65	-0.46	-30.11	25.94	-27.74	28.46	-0.43	-26.90	59.17	28.46
-30.31	57.50	27.05	65	-0.49	-31.54	27.05	-29.06	29.70	-0.45	-28.10	58.61	29.70
-31.57	56.82	28.16	65	-0.51	-32.97	28.16	-30.39	30.93	-0.47	-29.29	58.02	30.93
-32.82	56.11	29.27	65	-0.53	-34.41	29.27	-31.72	32.15	-0.49	-30.48	57.41	32.15
-34.06	55.36	30.36	65	-0.55	-35.85	30.36	-33.07	33.37	-0.51	-31.66	56.77	33.37
-35.29	54.59	31.45	65	-0.57	-37.30	31.45	-34.42	34.59	-0.53	-32.83	56.10	34.59
-36.50	53.79	32.54	65	-0.60	-38.75	32.54	-35.77	35.79	-0.55	-33.99	55.40	35.79
-37.70	52.95	33.62	65	-0.62	-40.22	33.62	-37.13	37.00	-0.57	-35.15	54.68	37.00
-38.89	52.09	34.70	65	-0.64	-41.68	34.70	-38.50	38.20	-0.59	-36.29	53.93	38.20
-40.06	51.19	35.76	65	-0.66	-43.16	35.76	-39.88	39.39	-0.61	-37.42	53.15	39.39
-41.21	50.27	36.83	65	-0.69	-44.64	36.83	-41.26	40.58	-0.63	-38.54	52.34	40.58
-42.35	49.31	37.88	65	-0.71	-46.12	37.88	-42.65	41.76	-0.66	-39.65	51.50	41.76

Tali coordinate sono state ricavate per i Layers che vanno da 2 a 15. Per il Layer 1 e il Layer 16, ovvero per quelli in corrispondenza rispettivamente di mozzo e corona, è necessario effettuare una interpolazione tra la linea della pala formata dai Layers, e la linea di mozzo e corona. Tale lavoro risulta notevolmente complicato, se si considera che si devono interpolare tante linee quante sono i valori (x, y, z) dei Layers, con una superficie sferica incastonata in un cilindro, per il mozzo, e con una superficie cilindrica e conica per la corona.

Una maniera più semplice è quella di importare la geometria iniziale, non ruotata, in un software di modellazione 3D, e ruotare la pala rispetto al proprio asse, per poi reimportare la nuova geometria con la sola pala ruotata, nel programma meshatore, facendo attenzione che la pala ruotata non sia troppo a ridosso delle superfici di ingresso e uscita della mesh.

Oppure, diversamente è possibile ruotare tutte le coordinate dei Layers 1-16, e aprire la nuova geometria della girante con l'angolo di calettamento modificato, in BladeGen 14.5¹³. I Layer 1 e 16 ovviamente non combaciano con le linee di mozzo e corona, e il software può dare errore nel momento in cui la geometria abbia dei volumi vuoti o negativi. Tuttavia BladeGen 14.5 permette di andare a modificare la posizione dei punti di ogni Layer con un comando di controllo direzionale, così da far combaciare le superfici ed evitare di generare errori durante la costruzione della mesh in TurboGrid 14.5¹⁴.

Dopo aver completato la nuova mesh, e sostituito quest'ultima in tutte le simulazioni con le varie aperture, si sono eseguite le simulazioni per poter così analizzare i nuovi risultati.

La visualizzazione dei risultati della girante progettata al 110% della portata di progetto, con una apertura di $+5^\circ$ di angolo di calettamento, non si discosta di molto dai risultati precedenti in cui la girante non era ancora stata aperta. Quindi per evitare che la trattazione diventi troppo ripetitiva, si evita di esporre i risultati grafici di queste simulazioni. Tuttavia si deve far notare il confronto con la precedente, per quanto riguarda i valori dei rendimenti in funzione delle portate per ogni apertura del distributore. Infatti con la girante aperta di 5° dell'angolo di calettamento, si riesce finalmente a raggiungere e superare la portata di progetto $Q_{\text{prog}} = 0.224 \text{ m}^3/\text{s}$.

Nella tabella seguente (vedi Tab. 3.3), vengono riportati i dati dell'ultima simulazione.

¹³ Per ulteriori informazioni su come costruire la geometria di una pala in BladeGen 14.5, vedi Capitolo 2 paragrafo 2.2.4

¹⁴ Per ulteriori informazioni riguardo alcune note di base sull'utilizzo di BladeGen 14.5, vedi Appendice A, paragrafo A.2.2

Tab. 3.3

Apertura	[°]	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48
Q	[m ³ s ⁻¹]	0.227	0.238	0.249	0.26	0.269	0.277	0.286	0.293	0.301	0.308
H	[m]	4.04	4.04	4.039	4.039	4.016	3.966	3.96	3.96	3.96	3.965
Ht	[m]	3.37	3.47	3.54	3.6	3.61	3.59	3.6	3.62	3.63	3.63
P	[W]	7464	8092	8626	9138	9510	9740	10067	10367	10656	10912
eta idr tot		0.834	0.859	0.876	0.89	0.899	0.905	0.91	0.914	0.916	0.915
Perdita Pre	[m]	0.006	0.01	0.001	0.017	0.019	0.022	0.026	0.027	0.032	0.037
Perdita Distr	[m]	0.077	0.074	0.083	0.067	0.065	0.063	0.056	0.077	0.076	0.077
Perdita Gir	[m]	0.169	0.16	0.158	0.156	0.158	0.159	0.162	0.167	0.169	0.175
Perdita Scr	[m]	0.362	0.282	0.227	0.181	0.147	0.122	0.101	0.085	0.073	0.071
eta Pre		0.998	0.998	1	0.996	0.995	0.995	0.993	0.993	0.992	0.991
eta Distr		0.981	0.982	0.98	0.983	0.984	0.984	0.986	0.981	0.981	0.981
eta Gir		0.958	0.96	0.961	0.961	0.961	0.96	0.959	0.958	0.957	0.956
eta Scr		0.91	0.93	0.944	0.955	0.963	0.969	0.974	0.978	0.982	0.982

Questi dati sono stati messi a confronto con i dati delle precedenti simulazioni, per aver un rapido confronto riguardo i rendimenti e le perdite in funzione della portata.

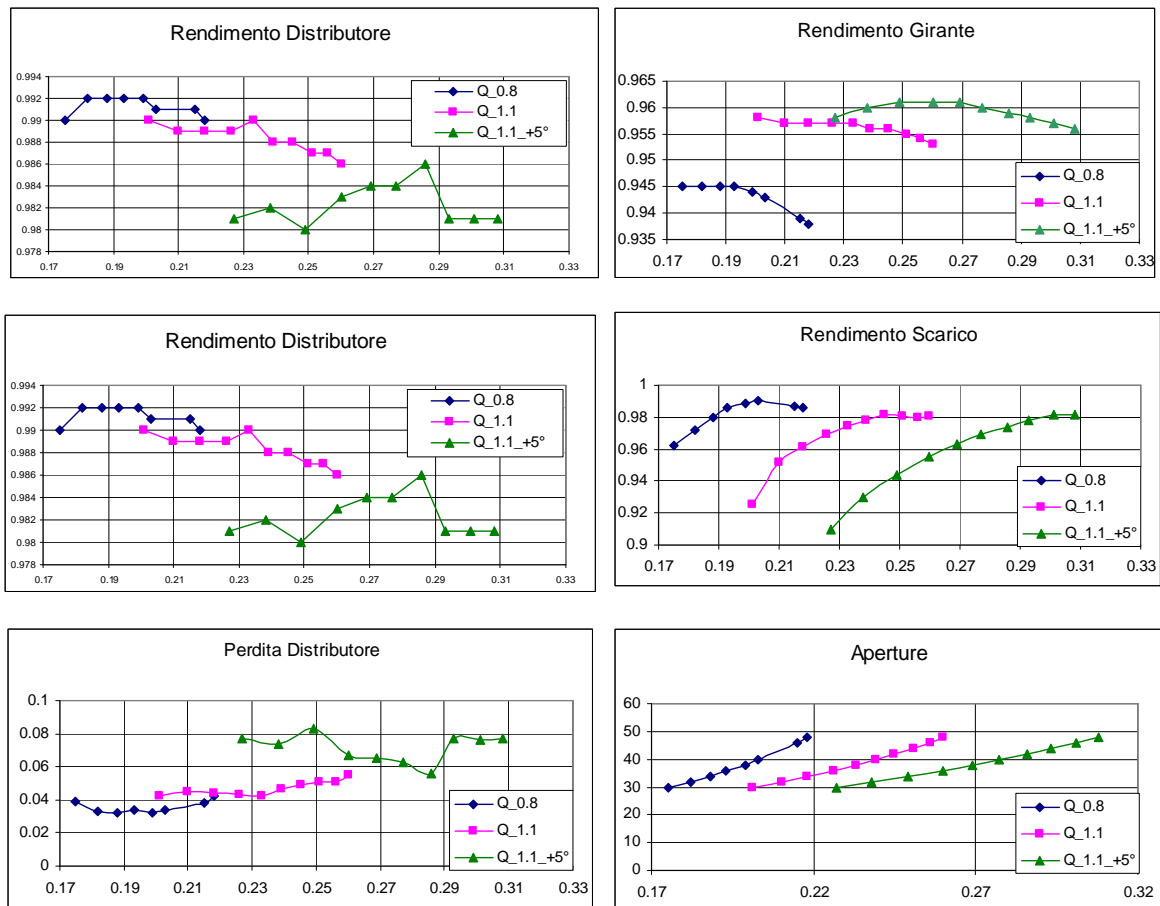


Fig. 3.9: Grafici dei risultati in funzione della portata.

Dalla tabella e dai grafici precedenti si osserva che è stata raggiunta la portata di progetto e addirittura è stata superata quella massima ($Q_{\max} = 0.280 \text{ m}^3/\text{s}$).

Questa osservazione fa notare che per coprire tutto il campo di portate in maniera ottimale, con dei rendimenti sempre abbastanza elevati, e in tutte le aperture del distributore ($30^\circ \div 48^\circ$), bisogna per forza sfruttare l'angolo di calettamento variabile della girante. Quindi aver ottenuto delle prime simulazioni con delle basse portate, e queste ultime con le portate ben superiori, serve comunque a farsi una prima idea delle portate e dei rendimenti che si possono ottenere con i vari gradi di apertura imposti, sia nel distributore che nella girante.

Risolto almeno in parte il problema delle portate, è utile concentrarsi sull'altro fondamentale problema, riguardante l'angolo di incidenza del fluido in ingresso della girante.

3.2 . LA RIPROGETTAZIONE DEL CONDOTTO MERIDIANO

Nei paragrafi precedenti è stato messo in evidenza come i risultati delle simulazioni si discostassero eccessivamente dai valori di progetto: in particolare viene osservato un ampio distacco tra l'angolo di ingresso β_1 rilevato e quello di progetto, nella zona vicina al mozzo ($\text{span} = 0.1$).

Per correggere gli angoli del fluido all'ingresso e all'uscita della girante, per avvicinarsi alle corrette condizioni di incidenza con le pale della girante, è stato necessario apportare alcune modifiche al condotto meridiano, andando ad aumentare i diametri in corrispondenza di mozzo e corona.

3.2.1 . Il condotto meridiano intermedio

Per modificare il condotto meridiano adeguatamente, mantenendo i dati relativi alle velocità e alle portate ottenuti nelle precedenti simulazioni, si è dovuto effettuare un semplice calcolo per mantenere inalterata l'area di passaggio del fluido in corrispondenza delle pale: $(A_e - A_i)_{old} = (A_e - A_i)_{new}$ con $A = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$, cioè l'area della corona circolare del nuovo condotto, delimitata da mozzo e corona, deve rimanere all'incirca la stessa del condotto precedente.

Quindi noti i diametri iniziali, rispettivamente di corona e mozzo,

$$(d_e)_{old} = 291 \text{ mm}$$

$$(d_i)_{old} = 130 \text{ mm}$$

$$(A_e - A_i)_{old} = \frac{\pi \cdot 291^2}{4} - \frac{\pi \cdot 130^2}{4} = 53208;$$

$$(A_e - A_i)_{new} = \frac{\pi \cdot 295^2}{4} - \frac{\pi \cdot 138^2}{4} = 53365.$$

si sono così ricavati i nuovi diametri:

$$(d_e)_{new} = 295 \text{ mm}$$

$$(d_i)_{new} = 138 \text{ mm}$$

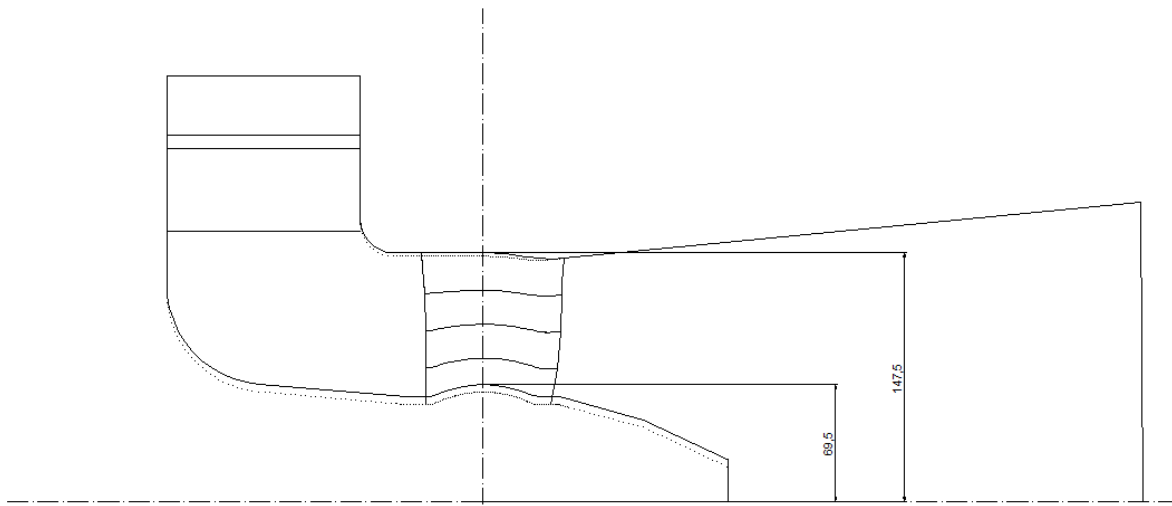


Fig. 3.10: Condotto meridiano modificato.

Una volta ottenuto il nuovo condotto meridiano (vedi Fig. 3.10) sono state ricostruite tutte le nuove mesh con le nuove coordinate modificate. Le nuove mesh sono state riassemblate per far partire nuovamente le simulazioni.

Prima di effettuare le simulazioni con girante, per alleggerire la simulazione e verificare rapidamente che con la modifica al condotto meridiano si procedesse nella giusta direzione (deviare correttamente il fluido verso le condizioni di progetto), sono state effettuate delle simulazioni in “Opening” prive di girante, per verificare l’effettiva differenza tra vecchio e nuovo condotto.

Sono state eseguite due simulazioni, entrambe con una apertura del distributore a 32° , e una portata imposta a $Q = 0.238 \text{ m}^3/\text{s}$ (la portata è la stessa rilevata nella simulazione con la stessa apertura del distributore, e girante progettata a $Q_{1.1}$ e $+5^\circ$ di calettamento). La prima ovviamente è stata effettuata con il condotto iniziale, la seconda con il nuovo condotto meridiano.

Per l'assemblaggio dei componenti e la lettura dei risultati, sono state usate sempre le stesse modalità viste in precedenza. Ovviamente, trattandosi di simulazioni prive di girante, con solo organi statorici e condotti aperti, i risultati non sono direttamente confrontabili con i risultati precedenti. Tuttavia è stato preso come dato oggettivo la differenza di angoli nelle simulazioni "Opening" tra il vecchio ed il nuovo condotto.

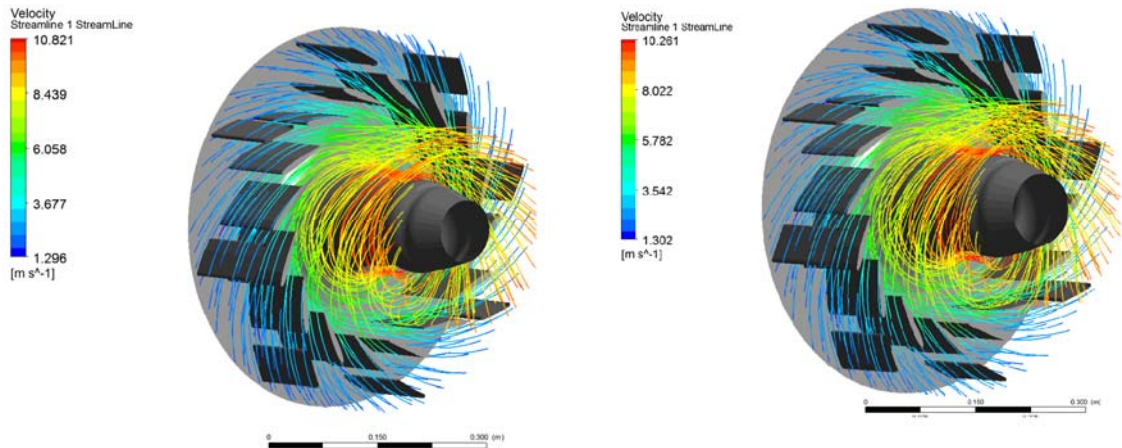


Fig. 3.11: Rappresentazione delle linee di flusso nel condotto della macchina priva di girante, nella simulazione "aperta", rispettivamente per vecchio e nuovo condotto.

L'analisi delle velocità e degli angoli assoluti è stata rilevata all'uscita dalla parte statorica, in corrispondenza dell'ingresso fittizio della girante.

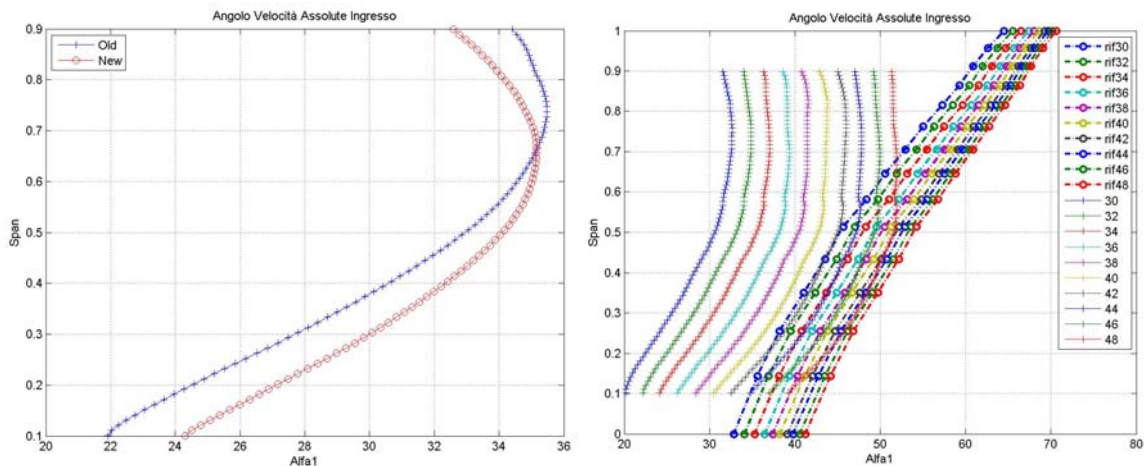


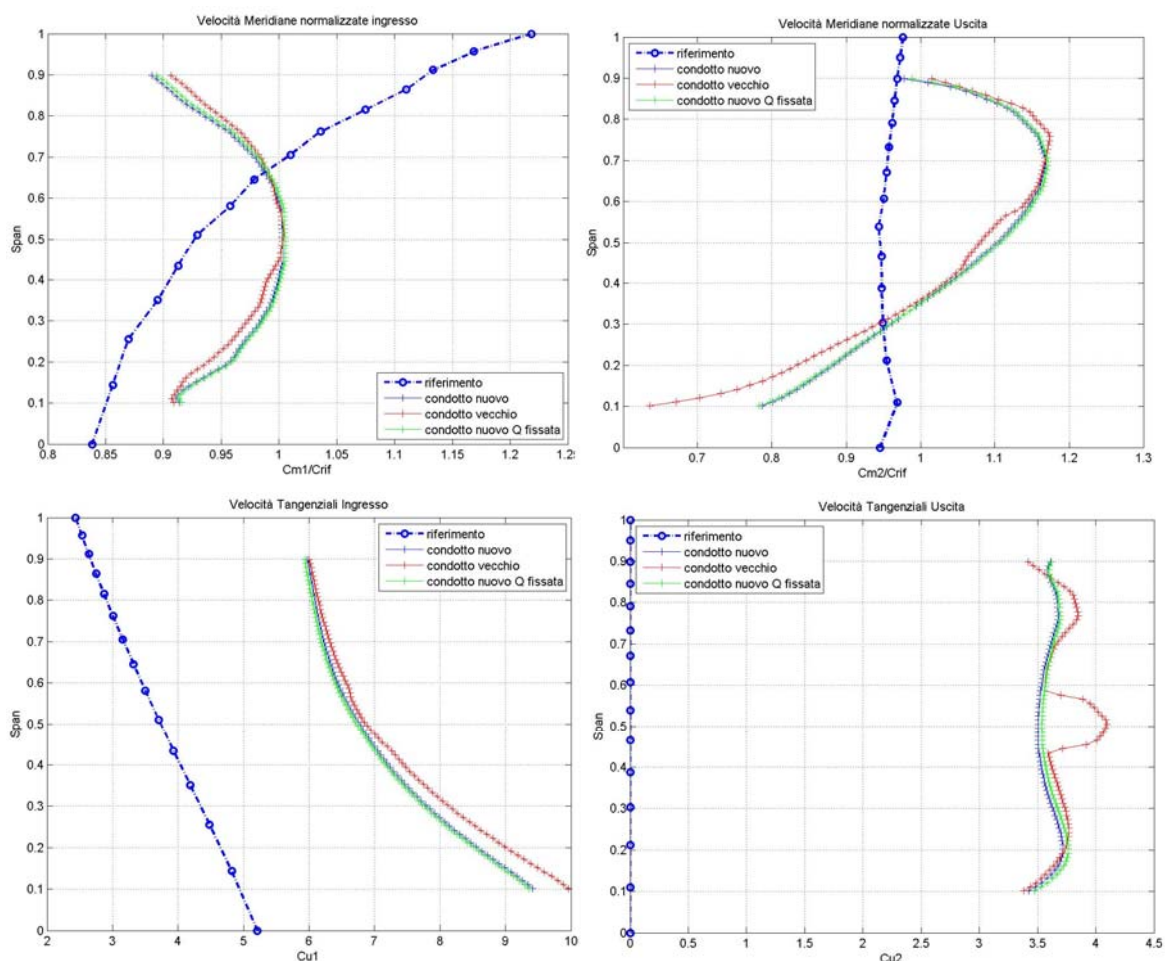
Fig. 3.12: Angolo assoluto α all'uscita dallo statore: a sinistra nella simulazione di "Opening", a destra nella simulazione a $Q_{1.1}$ e $+5^\circ$.

Come si può osservare dalla figura 3.12, la differenza tra il vecchio ed il nuovo condotto sta nell'aver guadagnato alcuni gradi dell'angolo assoluto α nella zona vicino al mozzo

(span 0.1). Questo dato è sicuramente positivo, se si osserva che nel grafico di destra, riguardante la simulazione $Q_{1.1} + 5^\circ$ (vedi Fig. 3.12), la distanza che si ha tra il dato della simulazione e il valore da progetto, richieda un aumento dell'angolo assoluto α .

Per confermare il buon risultato ottenuto, è stata effettuata una simulazione con girante (girante progettata a $Q_{1.1} + 5^\circ$, apertura del distributore a 32°), con il nuovo condotto meridiano. Per verificare che i risultati della simulazione col nuovo condotto meridiano, fossero attendibili rispetto a quelle con condotto meridiano precedente, sono state fatte due simulazioni: nella prima è stata imposta la portata $Q = 0.238 \text{ m}^3/\text{s}$ (la portata è la stessa rilevata nella simulazione con la stessa apertura del distributore, e girante progettata a $Q_{1.1} + 5^\circ$); nella seconda la portata è stata lasciata libera di variare.

Sono state rilevate le componenti delle velocità relative ed assolute, e sono stati calcolati gli angoli relativi ed assoluti, all'ingresso e all'uscita della girante. I risultati sono poi stati messi a confronto con la stessa simulazione del condotto meridiano precedente.



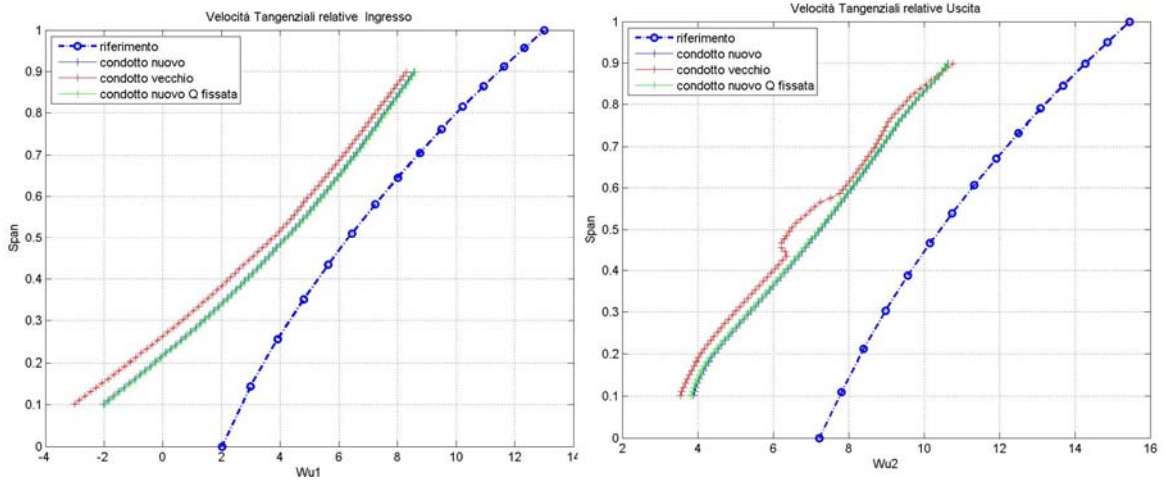


Fig. 3.13: Andamento delle $Cm_{1,2}$, $Cu_{1,2}$, $Wu_{1,2}$ rilevate dalle simulazioni, in funzione dello span. A confronto ci sono i risultati del vecchio e nuovo condotto meridiano.

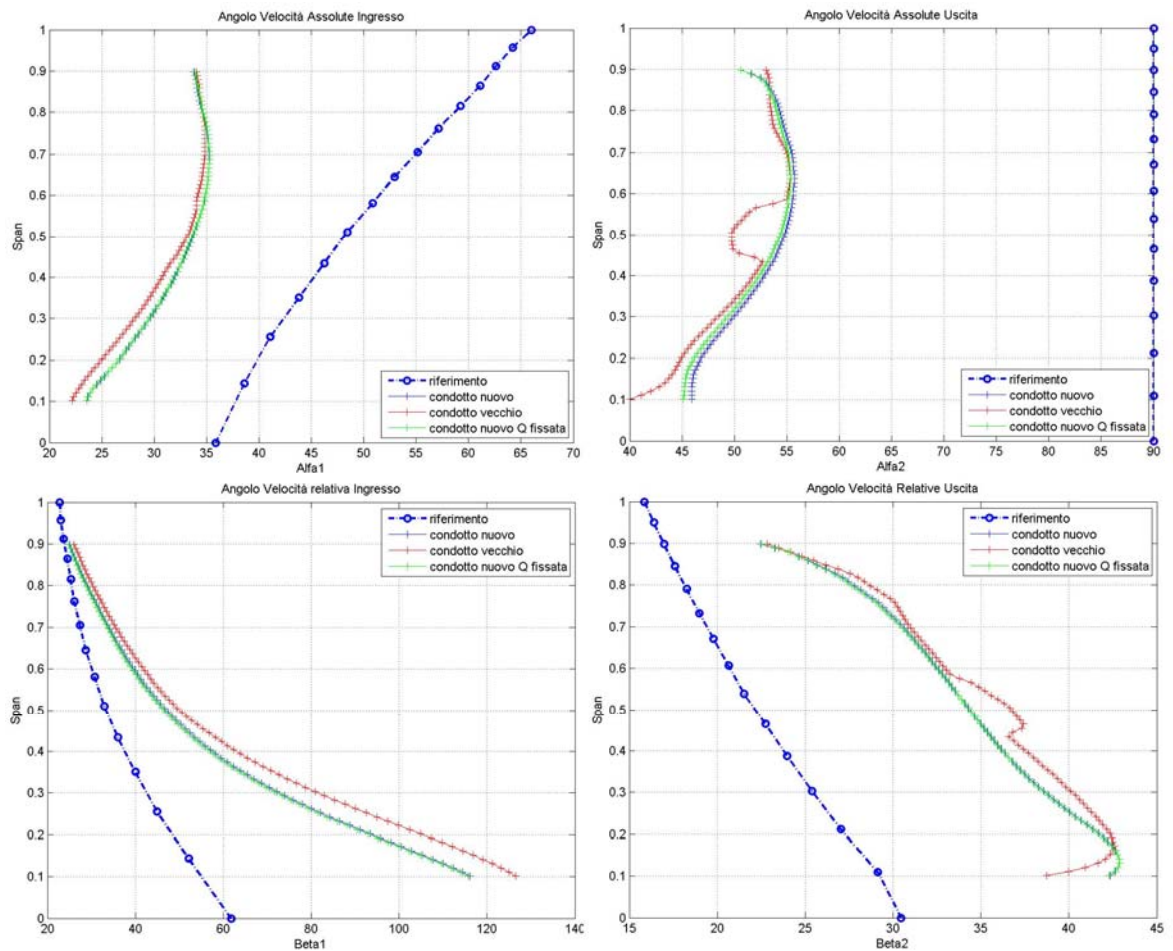


Fig. 3.14: Andamento degli angoli assoluti $\alpha_{1,2}$ e relativi $\beta_{1,2}$ rilevate dalle simulazioni, in funzione dello span. A confronto ci sono i risultati del vecchio e nuovo condotto meridiano.

Le osservazioni che derivano dalla lettura dei grafici di figure 3.13 e 3.14, sono le seguenti:

- viene riscontrato un miglioramento dei dati di simulazione, i quali grazie alla modifica del condotto meridiano, tendono a spostarsi verso i valori di riferimento;
- la portata rilevata nella simulazione con Q non imposta, risulta coincidere con la portata della simulazione a Q imposta, confermando la validità del metodo utilizzato per determinare i nuovi diametri del condotto meridiano;
- nel rispetto della letteratura usata nel Capitolo 1 per il dimensionamento del condotto meridiano, è possibile modificare nuovamente i diametri di mozzo e corona per ottenere un ulteriore miglioramento dei risultati.

3.2.2 . Il condotto meridiano definitivo

Per modificare nuovamente il condotto meridiano in maniera adeguata, mantenendo i dati relativi alle velocità e alle portate ottenuti nelle precedenti simulazioni, si è effettuato il precedente calcolo per mantenere inalterata l'area di passaggio del fluido in corrispondenza della girante: $(A_e - A_i)_{old} = (A_e - A_i)_{new}$ con $A = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$, cioè l'area della corona circolare del nuovo condotto, delimitata da mozzo e corona, deve rimanere all'incirca la stessa del condotto precedente.

Quindi noti i diametri iniziali, rispettivamente di corona e mozzo,

$$(d_e)_{old} = 295 \text{ mm}$$

$$(d_i)_{old} = 138 \text{ mm}$$

$$(A_e - A_i)_{old} = \frac{\pi \cdot 295^2}{4} - \frac{\pi \cdot 138^2}{4} = 53365$$

$$(A_e - A_i)_{new} = \frac{\pi \cdot 297^2}{4} - \frac{\pi \cdot 143^2}{4} = 53192$$

si sono così ricavati i nuovi diametri:

$$(d_e)_{new} = 297 \text{ mm}$$

$$(d_i)_{new} = 143 \text{ mm}$$

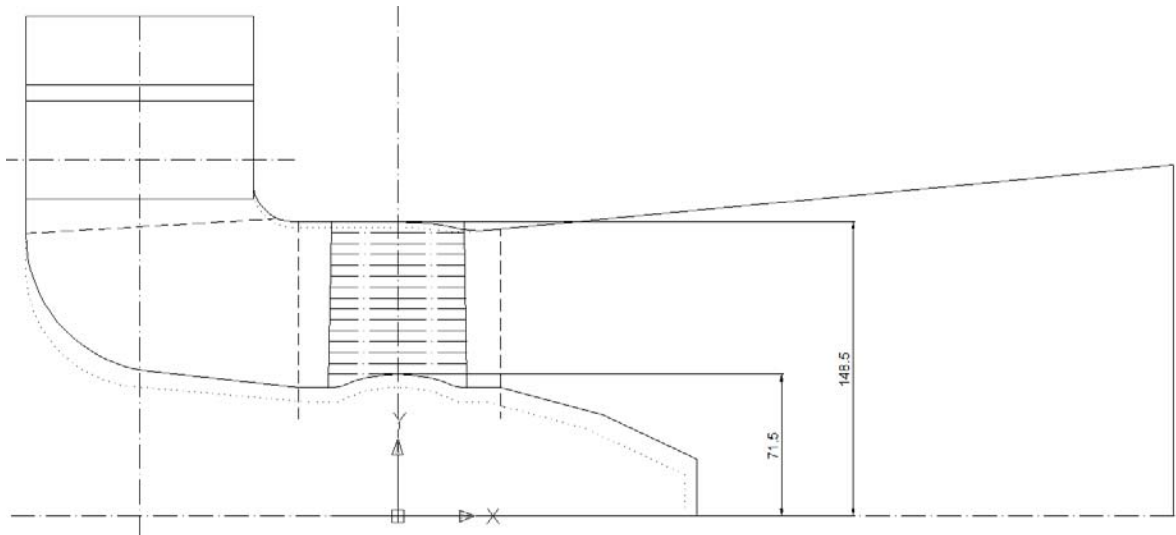


Fig. 3.15: Condotto meridiano definitivo.

Una volta ottenuto il nuovo condotto meridiano (vedi Fig. 3.15) sono state ricostruite nuovamente tutte le mesh dalle rispettive coordinate modificate. Le nuove mesh sono state riassemblate per ottenere le nuove simulazioni.

Per testare il nuovo condotto meridiano, è stata provata una nuova girante, costruita sempre seguendo la stessa linea di progettazione vista nel Capitolo 1, al paragrafo 1.2, per il calcolo dei triangoli delle velocità a partire dall'equazione dell'energia gH_t , l'ottenimento degli angoli costruttivi, il calcolo dei profili palari nel rispetto della teoria secondo gli autori Carter, Howell e Constant. In questo caso, la differenza è stata semplicemente usare nelle formule viste, come portata Q , la portata $Q_{0,9} = 0.9 \cdot Q_{prog}$. Quindi $Q_{0,9} = 280 \cdot 0.9 = 252$ [l/s].

Gli angoli costruttivi ottenuti al termine dei calcoli con la nuova portata, sono riassunti nel grafico di figura 3.16, dove sono in funzione delle varie sezioni della girante.

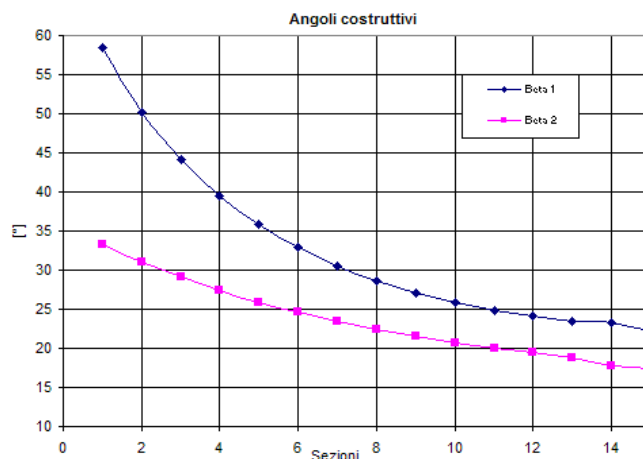


Fig. 3.16: Angoli costruttivi di ingresso e uscita della girante $Q_{0,9}$.

Nei grafici che seguono, viene mostrato il confronto tra le misure rilevate dalle simulazioni, e i valori di progetto.

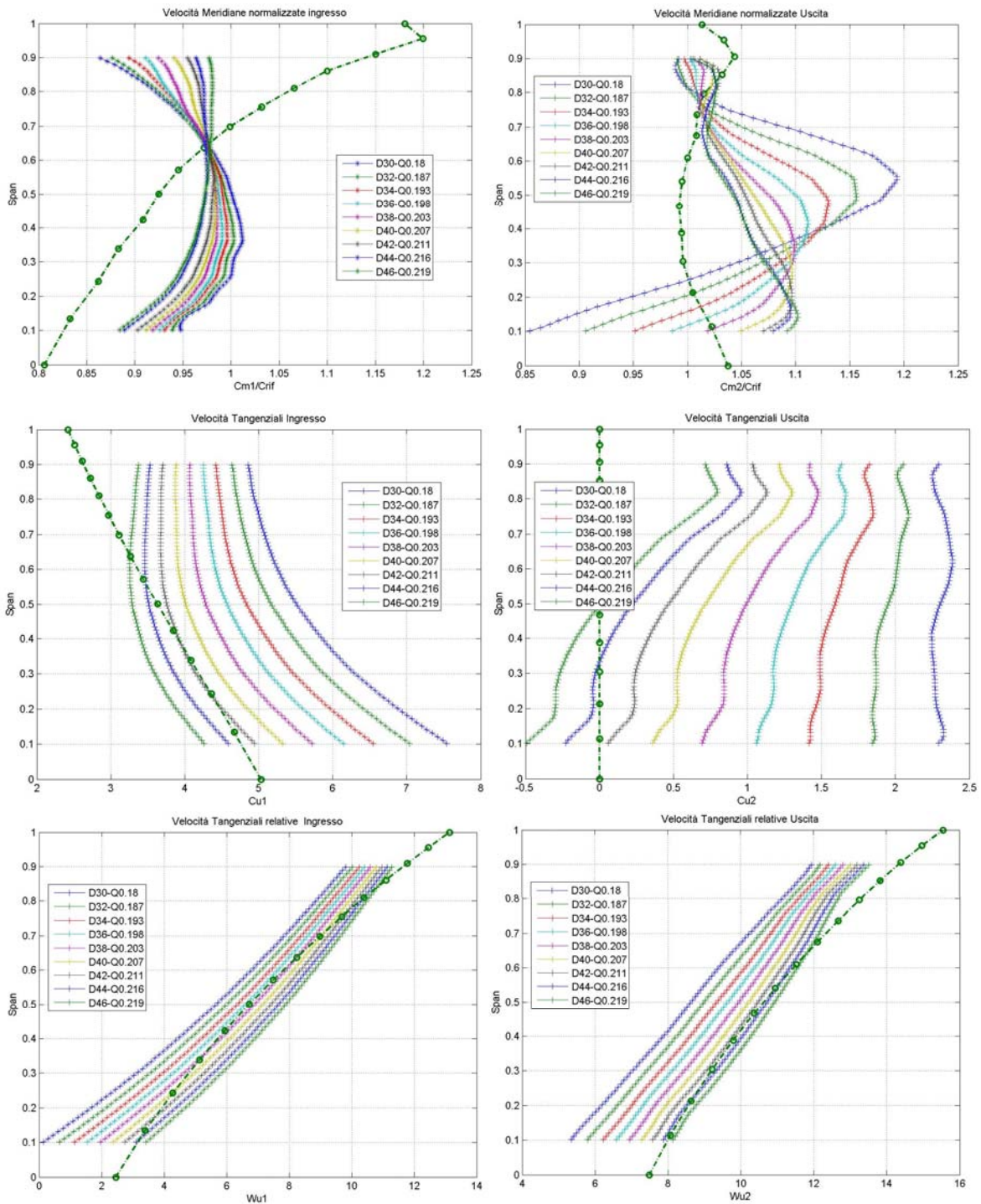


Fig. 3.17: Andamento delle $Cm_{1,2}$, $Cu_{1,2}$, $Wu_{1,2}$ rilevate dalla simulazione, in tutte le aperture del distributore, in funzione dello span, a confronto con l'andamento da progetto, per la Girante Q_0.9.

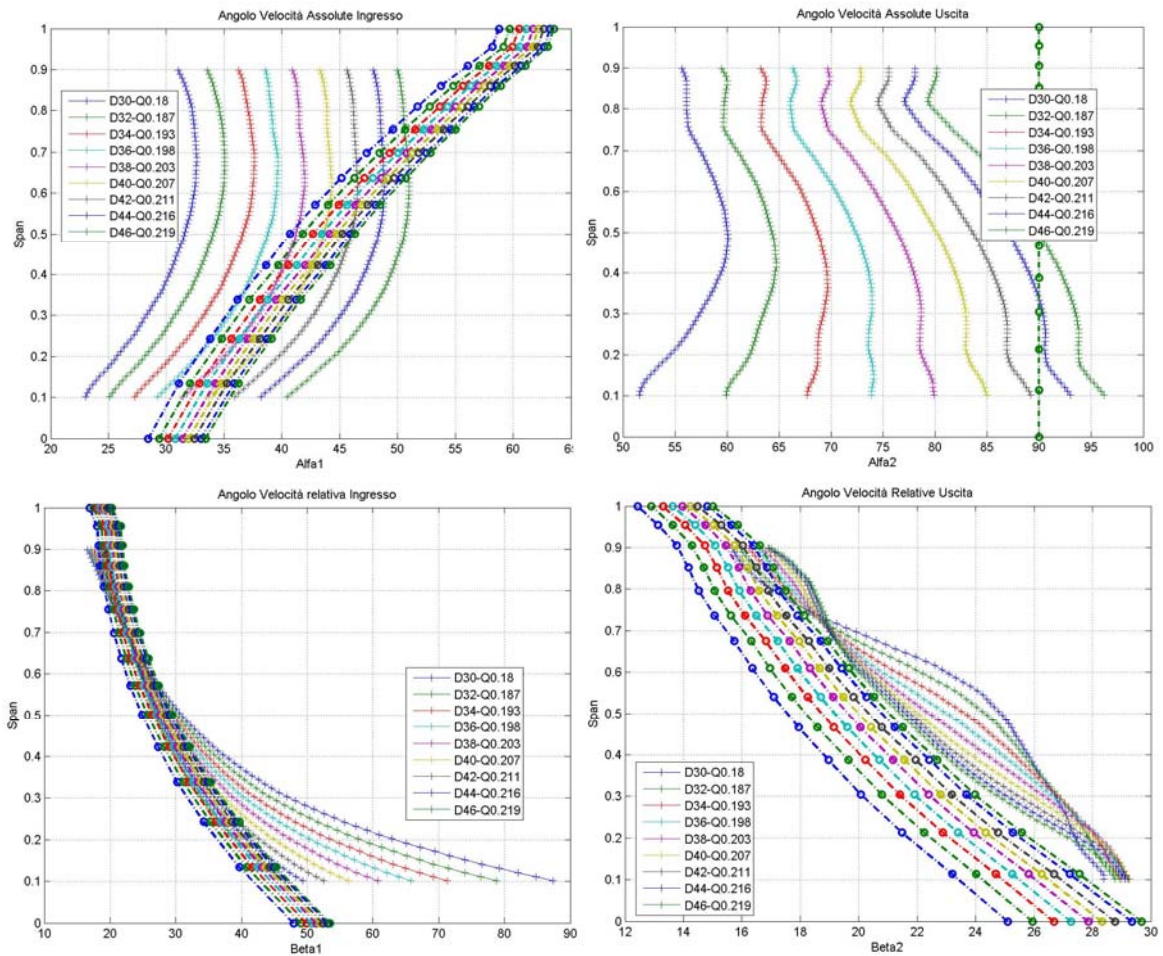


Fig. 3.18: Andamento degli angoli assoluti $\alpha_{1,2}$ e relativi $\beta_{1,2}$ rilevate dalla simulazione, in tutte le aperture del distributore, in funzione dello span, a confronto con l'andamento da progetto, per la Girante Q_0.9.

Sono state rilevate le componenti delle velocità relative ed assolute, e sono stati calcolati gli angoli relativi ed assoluti, all'ingresso e all'uscita della girante (vedi Fig. 3.17 e 3.18) per confermare il miglioramento dei dati di simulazione a confronto con i dati di progetto. Oltre a notare rapidamente un avvicinamento delle curve dei dati presi dalla simulazioni, ai dati di progetto, va fatto notare come l'angolo relativo all'ingresso β_1 abbia subito un notevole miglioramento. Tale miglioramento è dovuto alla modifica effettuata sul condotto meridiano. Infatti nella zona vicina al mozzo (span 0.1) soprattutto per le aperture del distributore attorno ai 30° , si verificava un discostamento di 50° tra dati CFD e dati da progetto, mentre con il nuovo condotto la differenza è stata ridotta a 40° , recuperando con ottimi risultati all'incirca 10° di discostamento.

Quindi la modifica al condotto ha senza dubbio migliorato i risultati delle simulazioni. Tuttavia modificare ulteriormente il condotto meridiano non porterebbe che a

miglioramenti minimi a discapito di grossi interventi sulla linea di curvatura e sui diametri. Dunque per questi motivi, il condotto meridiano trattato nel presente paragrafo viene scelto come definitivo.

3.3 . CONSIDERAZIONI SULLA RIPROGETTAZIONE

Come paragrafo conclusivo di questo Capitolo sulla Riprogettazione, vengono inseriti i risultati delle simulazioni che comprendono assieme tutti i punti trattati, come verifica di quanto è stato detto: la girante riprogettata al 90% della portata di progetto, con aperture a 3° e a 5° di angolo di calettamento, inserita nel condotto meridiano definitivo.

3.3.1 . L'analisi complessiva

Tutte le nozioni e i miglioramenti appurati durante le varie simulazioni, sono state raccolte e considerate assieme in queste nuove simulazioni che verranno descritte nel seguente paragrafo.

Queste simulazioni sono state effettuate con la Girante Q_0.9, con la differenza che è stata aperta di 3° e 5° dell'angolo di calettamento.

Nella tabella seguente (vedi Tab. 3.4 e Tab. 3.5), vengono riportati i dati, con i valori della caduta totale, dei rendimenti di macchina, girante, distributore e scarico, con le annesse perdite, oltre che i valori delle portate e della potenza ad ogni apertura del distributore.

Tab 3.4

Q_0.9	Apertura	[°]	30	32	34	36	38	40	42	44	46
Q	[m ³ s ⁻¹]		0.18	0.187	0.193	0.198	0.203	0.207	0.211	0.216	0.219
H	[m]		4.04	4.04	4.039	4.04	4.04	4.04	4.037	4.037	4.035
Ht	[m]		3.62	3.65	3.68	3.69	3.71	3.71	3.7	3.69	3.68
P	[W]		6375	6668	6930	7136	7349	7518	7646	7780	7895
eta idr tot			0.896	0.905	0.911	0.915	0.918	0.918	0.916	0.915	0.913
Perdita Pre	[m]		0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.006
Perdita Distr	[m]		0.046	0.043	0.042	0.048	0.046	0.046	0.046	0.048	0.049
Perdita Gir	[m]		0.212	0.215	0.22	0.224	0.23	0.236	0.242	0.249	0.255
Perdita Scr	[m]		0.126	0.099	0.078	0.062	0.045	0.042	0.045	0.045	0.043
eta Pre			0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999
eta Distr			0.989	0.989	0.99	0.988	0.989	0.989	0.989	0.988	0.988
eta Gir			0.948	0.947	0.946	0.945	0.943	0.942	0.94	0.938	0.937
eta Scr			0.969	0.976	0.981	0.985	0.989	0.99	0.989	0.989	0.989

Tab. 3.5

Q_0.9 +3°	Apertura	[°]	30	32	34	36	38	40	42	44	46
	Q	[m ³ s ⁻¹]	0.198	0.206	0.214	0.22	0.226	0.232	0.237	0.242	0.246
	H	[m]	4.04	4.04	4.04	4.039	4.04	4.04	4.04	4.04	4.04
	Ht	[m]	3.58	3.63	3.66	3.68	3.7	3.7	3.7	3.68	3.68
	P	[W]	6935	7311	7650	7902	8159	8385	8563	8712	8863
	eta idr tot		0.886	0.898	0.906	0.911	0.915	0.917	0.915	0.912	0.911
	Perdita Pre	[m]	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.008	0.002	0.01	0.001
	Perdita Distr	[m]	0.055	0.052	0.051	0.058	0.057	0.055	0.06	0.055	0.067
	Perdita Gir	[m]	0.186	0.188	0.191	0.193	0.197	0.202	0.206	0.213	0.216
	Perdita Scr	[m]	0.178	0.14	0.111	0.093	0.078	0.071	0.074	0.08	0.079
	eta Pre		0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.998	0.999	0.998	1
	eta Distr		0.986	0.987	0.987	0.986	0.986	0.986	0.985	0.986	0.983
	eta Gir		0.954	0.953	0.953	0.952	0.951	0.95	0.949	0.947	0.946
	eta Scr		0.956	0.965	0.973	0.977	0.981	0.982	0.982	0.98	0.981
	Q_0.9 +5°	Apertura	[°]	30	32	34	36	38	40	42	44
Q		[m ³ s ⁻¹]	0.21	0.219	0.228	0.235	0.242	0.249	0.255	0.261	0.266
H		[m]	4.04	4.04	4.04	4.04	4.04	4.04	4.037	4.031	4.034
Ht		[m]	3.54	3.6	3.64	3.67	3.69	3.7	3.69	3.68	3.67
P		[W]	7277	7717	8117	8414	8718	8986	9206	9365	9541
eta idr tot			0.876	0.891	0.901	0.908	0.913	0.915	0.915	0.912	0.911
Perdita Pre		[m]	0.006	0.005	0.005	0.003	0.002	0.011	0.006	0.014	-0.003
Perdita Distr		[m]	0.061	0.059	0.059	0.068	0.068	0.06	0.067	0.06	0.081
Perdita Gir		[m]	0.175	0.176	0.177	0.179	0.182	0.188	0.191	0.197	0.198
Perdita Scr		[m]	0.218	0.171	0.135	0.113	0.095	0.083	0.079	0.087	0.088
eta Pre			0.999	0.999	0.999	0.999	1	0.997	0.999	0.996	1.001
eta Distr			0.985	0.985	0.985	0.983	0.983	0.985	0.983	0.985	0.98
eta Gir			0.957	0.957	0.956	0.956	0.955	0.954	0.953	0.951	0.951
eta Scr			0.946	0.958	0.966	0.972	0.976	0.98	0.98	0.978	0.978

Viene confermata l'osservazione che la portata aumenta man mano che si apre l'angolo di calettamento della girante. Il rendimento della macchina non sembra salire sopra il valore massimo di $\eta = 0.918$. Per le tre simulazioni va fatto notare che all'aumentare dell'angolo di calettamento della girante, il picco di rendimento si ottiene in corrispondenza di aperture del distributore crescenti (Q_0.9 a 38°, Q_0.9 +3° a 40°, Q_0.9 +5° a 42°). Questa osservazione può tornare utile nel momento in cui si dovrà effettuare il giusto accoppiamento tra aperture del distributore e aperture della girante per avere il massimo rendimento in tutto il campo di portata.

Infine questi dati sono stati messi a confronto con i dati delle precedenti simulazioni, per aver un rapido confronto riguardo i rendimenti e le perdite in funzione della portata (vedi Fig. 3.19).

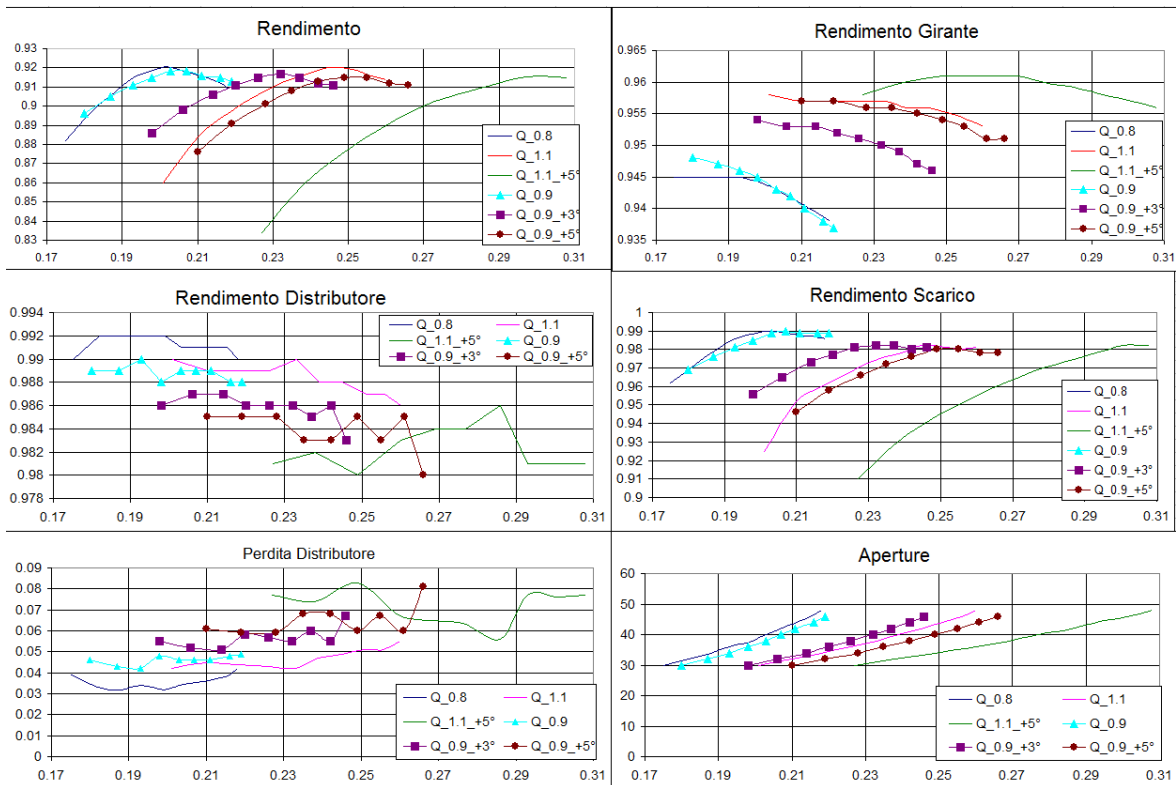


Fig. 3.19: Grafici dei risultati in funzione della portata, con tutte le simulazioni effettuate.

Il grafico con il rendimento in funzione della portata (vedi Fig. 3.19) fa notare visivamente quanto detto in precedenza, ovvero come il picco di rendimento sia in funzione di apertura girante e apertura distributore, formando quasi una zona di plateau in corrispondenza del massimo rendimento, per vari valori di portata.

3.3.2 . Considerazioni sull'analisi svolta

L'analisi CFD mette sicuramente in risalto i limiti della teoria e delle assunzioni nei confronti della pratica e dei risultati empirici. Grazie a questo utile strumento, si sono potute fare notevoli modifiche e miglioramenti sulla macchina, prima che questa venga costruita fisicamente, con un risparmio notevole sul tempo e sugli investimenti economici.

Le considerazioni a seguito dei risultati ricavati dalle simulazioni sono le seguenti:

- i valori di portata richiesti sono stati raggiunti, grazie alle modifiche sulla girante e grazie alla variazione degli angoli di calettamento;
- gli angoli del fluido all'ingresso e all'uscita della girante sono stati corretti, per avvicinarsi ad accettabili condizioni di incidenza con la pala della girante, grazie alla modifica dei diametri di mozzo e corona del condotto meridiano;

- in base ai risultati estrapolati dalle simulazioni, è possibile continuare ad effettuare delle modifiche alla girante in maniera da verificare se sia possibile alzare di mezzo punto il rendimento;
- infine è possibile determinare la corretta curva di rendimento in funzione delle portate, andando ad ottimizzare ogni apertura di distributore con la relativa apertura della girante, per ottenere il massimo del rendimento in tutto il campo di portata.

Quindi in base a quanto detto in questi ultimi due punti, solo una volta determinata la girante definitiva, che riesca a raggiungere i massimi rendimenti, è possibile ottenere una ottimizzazione dell'accoppiamento delle aperture distributore-girante, per determinare l'intero campo delle portate.

Conclusioni

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. Dai risultati delle simulazioni è emerso che il metodo di progettazione standardizzata utilizzato non consente di ottenere una buona stima dello scambio di energia attraverso la girante.

I punti critici di questo procedimento sono risultati essere la non corretta condizione di deflusso attraverso la girante con delle condizioni di incidenza sulla pala non ottimali, e dei valori di portata di progetto richiesti non raggiunti. Le soluzioni proposte in questa tesi sono state la modifica del condotto meridiano per avvicinarsi alle corrette condizioni di incidenza, e la modifica dell'angolo di calettamento della girante per raggiungere i valori di portata richiesti. Tuttavia al fine di migliorare le prestazioni della macchina, in seguito ai problemi presentati, la fase di riprogettazione continua al di fuori del lavoro di tesi, con dei tentativi di modifica al distributore e alla girante stessa.

Il tentativo di impiegare un distributore non simmetrico, con profilo palare curvo, serve ad ottenere a parità di apertura, una componente tangenziale della velocità assoluta C_u inferiore, così da avere a parità di componente meridiana della velocità assoluta C_m , una maggiore portata. Una C_u più bassa impone all'ingresso della girante un angolo di flusso della corrente relativa β inferiore, con un conseguente peggioramento delle condizioni di incidenza in girante. Quindi la modifica all'angolo di calettamento per risolvere il problema riduce di conseguenza la portata in ingresso alla girante, andando contro ai risultati voluti. Si potrebbe così confermare che con distributore simmetrico, per aumentare la portata, sia sufficiente aumentare l'angolo di calettamento della girante, rispetto alle condizioni imposte dalla teoria, come già visto nei capitoli precedenti.

Modificare ulteriormente il condotto meridiano per raggiungere le corrette condizioni di incidenza sulla pala, potrebbe essere una soluzione interessante se non fosse che si rischia di stravolgere l'intero progetto. Dunque mantenendo inalterato il condotto meridiano definitivo presentato in questo lavoro di tesi, potrebbe essere sufficiente al fine di ottenere le corrette condizioni di deflusso attraverso la girante, delle modifiche al coefficiente di sostentamento C_s , con dei valori che si discostano lievemente rispetto ai valori imposti dalla teoria (1.1 sul mozzo e 0.3 sulla corona), rispettando le condizioni di non cavitazione.

Concludendo, ogni modifica, tentativo di miglioramento e ottimizzazione della macchina, portano comunque a dei miglioramenti del rendimento che non vanno oltre il già ottimo valore di $\eta = (92 \div 93)\%$, come ci si può aspettare da una macchina di piccola taglia come la mini turbina Kaplan presentata in questa tesi.

Quindi il miglior risultato che si possa ottenere in un lavoro del genere, è di integrare il più possibile il patrimonio cognitivo ed empirico di esperti del settore con i moderni strumenti computazionali di simulazione e verifiche di progettazione.

Appendici

APPENDICE A

Procedimento per la meshatura di un dominio fluido con il modellatore e meshatore TurboGrid 14.5

In questa appendice verranno riportate le linee guida necessarie per la preparazione di una *Mesh* con il programma *TurboGrid 14.5*. In particolare verrà fatto esplicito riferimento alla discretizzazione di distributore e girante della turbina oggetto del presente lavoro.

A.1 . Operazioni preliminari

Prima di avviare *TurboGrid 14.5* è consigliabile creare una directory di lavoro denominandola come il componente che sarà discretizzato. All'interno di questa cartella saranno automaticamente memorizzati tutti i files che verranno a crearsi durante la sessione di lavoro.

Si ricorda che questo programma è stato concepito come un modulo specifico per le turbomacchine, quindi è in grado di lavorare solamente con componenti dotati di mozzo, corona e parti alettate. La descrizione di un programma più generico per la meshatura dei volumi fluidi sarà oggetto dell'Appendice B.

Per cominciare la sessione di lavoro si avvia il programma (doppio clic sull'icona se presente sul *Desktop* o dal *Launcher* di *CFX 14.5*). Sul menù a tendina, presente nella barra principale, si seleziona la directory appena creata e successivamente si lancia *TurboGrid 14.5*.

L'ambiente di lavoro di *TurboGrid 14.5* è caratterizzato dalla presenza di due finestre: una a sinistra, in cui viene schematizzata la procedura per l'ottenimento della Mesh ed una a destra in cui è visualizzato il volume fluido da discretizzare.

Le operazioni da svolgere possono essere schematizzate in tre punti fondamentali:

- la costruzione della geometria;
- la costruzione della Topology;
- la meshatura del componente.

A.2.1 . La geometria del modello

La prima operazione che è necessario effettuare è la costruzione geometrica delle superfici delimitanti il dominio fluido da simulare. Si anticipa subito che non esiste un unico metodo per costruire il modello, tuttavia verrà di seguito presentato quello utilizzato per il distributore in esame. Per questo componente si sono costruite le primitive di mozzo, corona e della pala per punti; il programma poi ha provveduto a generare, a partire dalle linee fornite, le superfici corrispondenti.

Per il mozzo e la corona si devono fornire le coordinate (cartesiane) dei punti del tratto di condotto meridiano che delimita il volume fluido da simulare. La formattazione è di questo tipo:

Hub			Shr		
0	212.5	-57.5	0	212.5	57.5
0	206.3518	-57.5	0	207.0731	57.5
0	200.8765	-57.5	0	200.5503	57.5
0	195.857	-57.5	0	193.4731	57.5
0	189.9898	-57.5	0	184.5674	57.5
0	186.212	-57.5	0	180	57.5
0	180	-57.5	0	174.9625	57.5
0	176.51	-57.5	0	168.5	57.5
0	170.8579	-57.5	0	165.3713	57.7462
0	168.6264	-57.5	0	162.3197	58.4789
0	166.8874	-57.5	0	159.4202	59.6799
0	163.518	-57.5	0	156.7443	61.3197
0	160.2612	-57.5	0	154.3579	63.3579
0	157.0224	-57.5	0	152.3197	65.7443
0	150.5948	-57.5	0	150.6799	68.4202
0	142.5327	-57.5	0	150	69.9007

Fig. A1: Coordinate (x, y, z) di mozzo e corona.

Per la pala è necessario fornire le coordinate cartesiane dei punti che costituiscono i profili elementari. Tali coordinate sono state ricavate come si è visto nel Capitolo 1. Nella scrittura delle coordinate il primo e l'ultimo punto di ogni profilo elementare devono coincidere. Si ricorda inoltre che il separatore decimale è il punto, e non la virgola, e che, qualora si volesse creare uno spigolo vivo, il punto va ripetuto per due volte consecutive. Le coordinate vanno ripetute due volte, una per il mozzo con titolo #hub, e una per la corona a titolo #shr: questo accorgimento serve a generare la pala come superficie mediante interpolazione dei due profili riportati appunto su mozzo e corona. Infine le coordinate sono state ruotate di 2° per volta, come indicato nel Capitolo 2, con degli angoli di calettamento dai 22° ai 56° per avere tutte le geometrie da meshare. Di seguito viene riportata come esempio una piccola parte delle coordinate necessarie per la definizione della palettatura.

#Hub		
-31.551662781	202.923624839	-57.500000000
-31.250543567	203.205378355	-57.500000000
-31.089274570	203.294644560	-57.500000000
-30.951134916	203.352075957	-57.500000000
-30.825014714	203.392963997	-57.500000000
-30.706604711	203.423239858	-57.500000000
-30.593691943	203.445949424	-57.500000000
-30.484960101	203.462904440	-57.500000000
-30.379550430	203.475286879	-57.500000000
-30.276865674	203.483918794	-57.500000000
-30.176470416	203.489399486	-57.500000000
	[...]	
-31.752393712	201.851133259	-57.500000000
-31.765687595	201.965537324	-57.500000000
-31.773484243	202.087507685	-57.500000000
-31.773570692	202.220090224	-57.500000000
-31.761637689	202.369216120	-57.500000000
-31.726575343	202.550176824	-57.500000000
-31.551662781	202.923624839	-57.500000000
#Shr		
-31.551662781	202.923624839	57.400000000
-31.250543567	203.205378355	57.400000000
-31.089274570	203.294644560	57.400000000
-30.951134916	203.352075957	57.400000000
-30.825014714	203.392963997	57.400000000
-30.706604711	203.423239858	57.400000000
-30.593691943	203.445949424	57.400000000
-30.484960101	203.462904440	57.400000000
-30.379550430	203.475286879	57.400000000
	[...]	
-31.664788634	201.440905199	57.400000000
-31.690600027	201.538080390	57.400000000
-31.714121922	201.638406805	57.400000000
-31.734918903	201.742483743	57.400000000
-31.752393712	201.851133259	57.400000000
-31.765687595	201.965537324	57.400000000
-31.773484243	202.087507685	57.400000000
-31.773570692	202.220090224	57.400000000
-31.761637689	202.369216120	57.400000000
-31.726575343	202.550176824	57.400000000
-31.551662781	202.923624839	57.400000000

Fig. A2: Coordinate (x, y, z) del profilo palare.

Una regola importante è quella di assegnare lo stesso numero di cifre decimali alle coordinate dei punti utilizzati.

Le coordinate che daranno luogo alle tre superfici vanno memorizzate in tre distinti files che devono essere salvati nella cartella di lavoro con estensione *. *curve*. Una volta compiute tutte queste operazioni è possibile costruire il modello al calcolatore.

Dal menù principale selezionare *New Case* e, una volta aperta la finestra *Objects*, sarà possibile cominciare il lavoro.

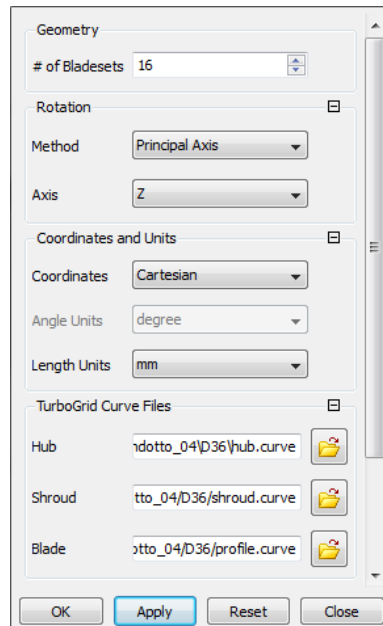


Fig. A3: *Load TurboGrid Curves* in TurboGrid 14.5

A questo punto, sempre dal menù principale, selezionare *Load Curves* per iniziare a definire la geometria del distributore: apparirà la finestra di figura A3, nella quale è possibile inserire il numero di pale, l'asse di rotazione e il tipo di coordinate che si andranno ad introdurre. Inoltre è possibile indicare la collocazione del file *.curve contenente le coordinate di mozzo, corona e pala, oltre che l'unità di misura di queste.

Premere *Apply* per confermare ed ottenere la geometria.

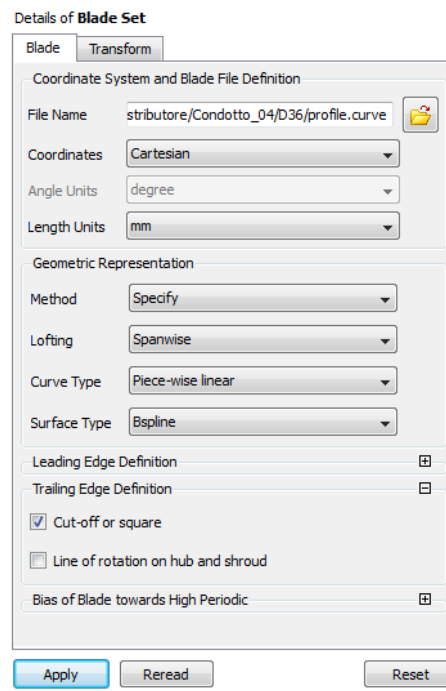


Fig. A4: *Blade Set* in TurboGrid 14.5

Cliccare due volte su *Blade Set* per ottenere la figura mostrata in figura A4, per impostare l'opzione di *Curve Type* in "Piece-wise linear", per linearizzare la forma della pala, ed evidenziare l'opzione *Cut-off or square* nel menù di "Trailing Edge Definition", per squadrare la pala in maniera più realistica sulla coda.

Infine per ottenere il reale distacco della pala dalla superficie curva della corona, dalla finestra di *Shroud Tip* è possibile impostare come *Tip Option* un "Profile Numer", che in automatico assume un valore attorno all'unità.

La geometria che si ottiene nella finestra di destra del programma, è quella mostrata in figura A5¹⁵.

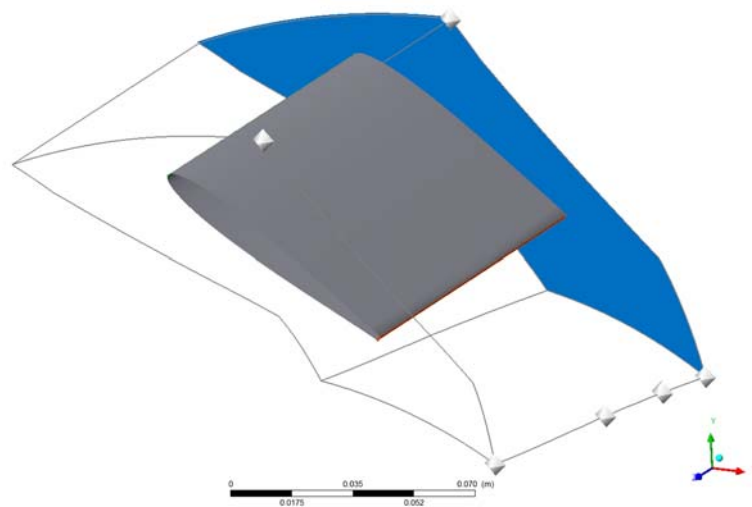


Fig. A5: Geometria di una pala del distributore

La geometria della girante invece, come anticipato nel Capitolo 2, viene importata come file *.inf di *BlageGen 14.5* dal menù principale, cliccando su *Load BladeGen*.

Analogamente al distributore, si imposta sullo *Shroud Tip* come *Tip Option* un "Normal Distance" a 0.2 [mm], per rendere nella geometria il reale distacco della pala dalla corona.

Essendo tutto il resto della geometria ricavato dal *BladeGen 14.5*, la geometria che si ricava nella finestra di destra è quella mostrata in figura A5.

Si ricorda che il lavoro che verrà descritto successivamente riguardo la meshatura, viene eseguito per semplicità su una pala soltanto.

¹⁵ Qualora lo spazio tra la pala e le superfici di *Inlet* ed *Outlet* non fosse abbastanza esteso, il programma può creare dei problemi durante la generazione della *Topology*. In questo caso si consiglia di allontanare le superfici citate dalla pala, aumentando l'estensione di mozzo e corona.

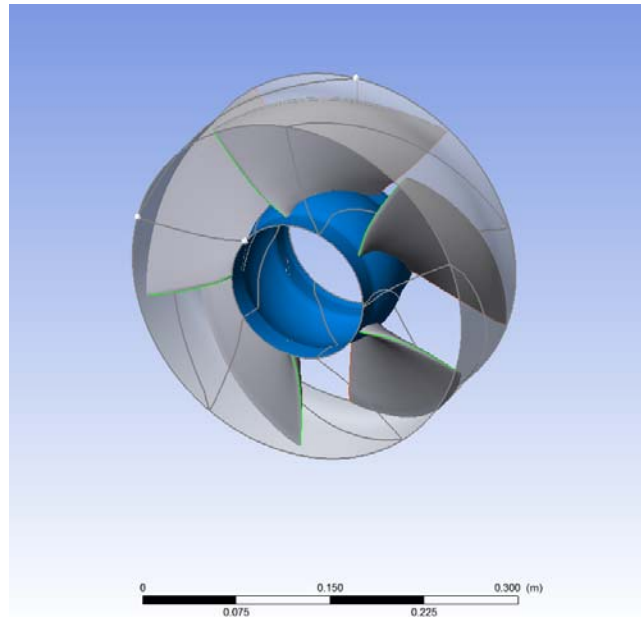


Fig. A6: Geometria della girante.

A.2.2 . La geometria del modello (BladeGen 14.5)

Si apre una parentesi per introdurre brevemente il software modellatore di geometrie palari, BladeGen 14.5 .

Dal menù principale, si importa il file *.bgd tramite il comando *File, Open...* e automaticamente nella finestra di lavoro compare la pala della girante, come illustrato in figura A7.

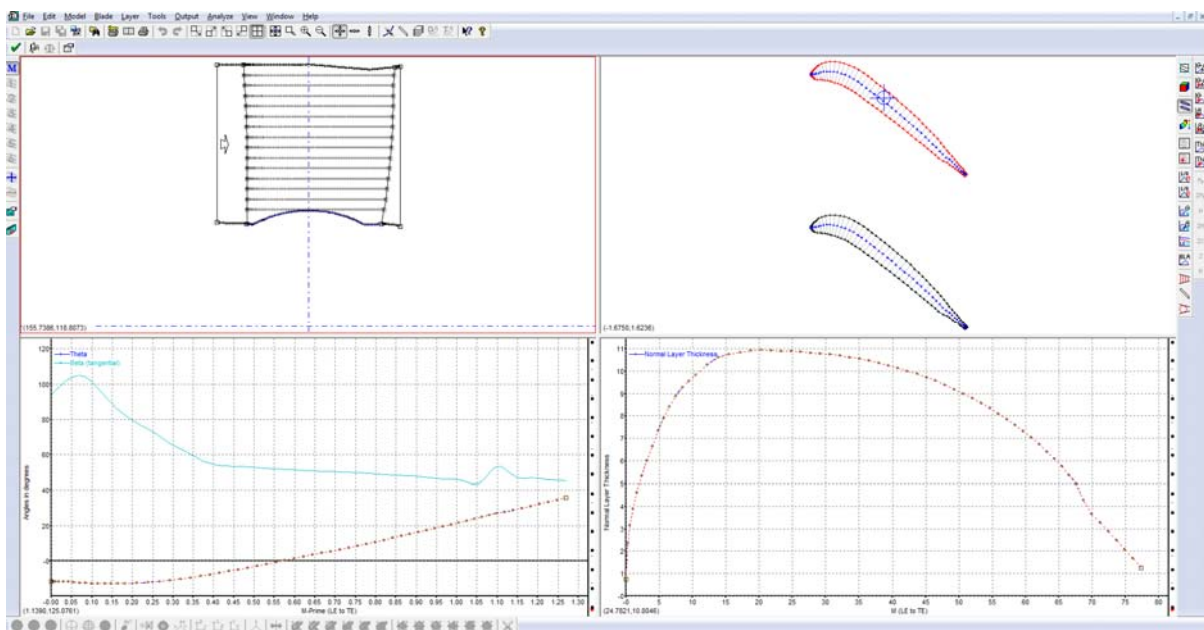


Fig. A7: Finestra di lavoro di BladeGen 14.5

Dal menù di destra, è possibile modificare a piacere la finestra in alto a destra rappresentata in figura A7, scegliendo tra *3D View*, *Blade-to-Blade View*, *Meridional Contour View*, ecc.

Dalla finestra in alto a sinistra è possibile effettuare delle piccole modifiche prima di completare del tutto la costruzione della geometria. Ad esempio, cliccando col tasto destro su di essa, e poi su *Point Drag Control*, si può andare a modificare la posizione (*Any Direction*, *Horizontal Only*, *Vertical Only*) dei singoli punti o di tutta la curva che va a formare ogni Layer della pala. Questo comando può tornare utile qualora il primo e l'ultimo Layer non combacino perfettamente con i punti di mozzo e corona.

Qualora la direzione del fluido non sia già stato inserito automaticamente nel verso corretto, dal menù principale, *Tools*, è possibile impostarlo correttamente attraverso il tasto *Reverse Flow Direction*.

Per modificare la curvatura di naso e coda della pala, qualora non sia adeguatamente arrotondato, è conveniente utilizzare dal menù principale *Blade* l'opzione *Properties...* per modificare in maniera più realistica la *LE/TE Ellipse*.

Al fine di ottenere una pala con gli spessori ben linearizzati tra loro in ogni Layer, è possibile andare sulla finestra in basso a destra (vedi Fig. A7) e cliccando col tasto destro sulla finestra, selezionare *Layer Control...* per uniformare tra loro tutti i profili cliccando su *Uniform* (deselezionando il Layer sul mozzo "Span:0.0000" è possibile avere una pala meglio uniformata, poiché spesso la forma di questo Layer non risulta perfetta nel suo spessore dal momento in cui non cade esattamente sulla sfera del mozzo).

Analogamente si può uniformare tra loro gli angoli *Theta* e *Beta* per tutti i profili, cliccando col tasto destro sulla finestra in basso a sinistra e quindi su *Layer Control*, e confermando con il tasto *Uniform* (stessa osservazione fatta precedentemente riguardo il Layer sul mozzo).

Infine per evitare problemi con la Topology o errori nel software meshtore, è possibile eliminare eventuali punti di intersezione tra Layer 1 e Layer 2. Sempre dal comando *Layer Control*, è possibile modificare lo span del Layer 2 (inserendolo a 0.05 anziché 0.00). In pratica il programma in automatico elimina il Layer 2 per crearne uno nuovo da una interpolazione con i Layers precedente e successivo in funzione dello span assegnato.

Per importare la geometria ottenuta in TurboGrid, è sufficiente salvare il file in formato *.inf oppure dalla finestra del Workbench di ANSYS 14.5, cliccare col tasto destro sulla voce del presente file, "Blade Design", e selezionare *Transfer Data To New* e quindi su *TurboGrid*.

A.3 . La Topology

Dopo aver importato la geometria si procede con la definizione della *Topology*, cioè della maschera di ausilio per la costruzione della mesh. In *TurboGrid* ne esistono diversi tipi, da scegliere in relazione al tipo di pala presente sulla macchina. Nel caso del distributore, è stata scelta una *Topology* di tipo *Traditional with Control Points*, poiché la geometria semplice del distributore permette l'uso del metodo H/J/C/L-Grid (incluso O-Grid). Per la girante invece è stata utilizzata la definizione automatica *ATM Optimized* con metodo *Single Round Round Symetric* in quanto è quella che meglio si adatta alla complessità della forma della palettatura.

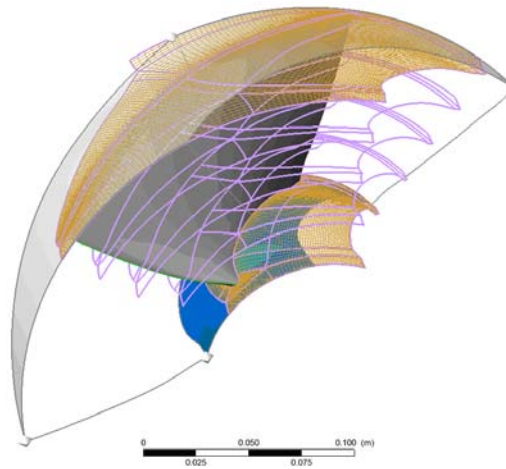


Fig. A8: Topology della girante.

Prima di costruire la mesh, bisogna assicurarsi che tutti i layers abbiano dei *Minimum Face Angle* e *Maximum Face Angle* accettabili, affinché non si creino volumi negativi.

Per quanto riguarda la girante, bisogna assicurarsi che la geometria sia stata ben elaborata precedentemente in BlageGen.

Il distributore invece può essere modificato a mano, grazie appunto al metodo di Topology utilizzato (*Traditional with Control Points*).

Details of **Hub**

Data Control Points Smoothing

Master Topology Visibility
 Topology Visibility
 Refined Mesh Visibility

Mesh Measure	Value	% Bad
Minimum Face Angle	4.70133 [deg]	0.578871
Maximum Face Angle	178.511 [deg]	0.506512
Maximum Aspect Ratio	527.171	8.53835

Fig. A9: Errori nella Topology del distributore.

Come mostrato in figura A10, si va a spostare a mano i *Control Points* per ottenere nei layer di Hub e Shroud un *Minimum Face Angle* $\approx 25^\circ$ e un *Maximum Face Angle* $\approx 150^\circ$.

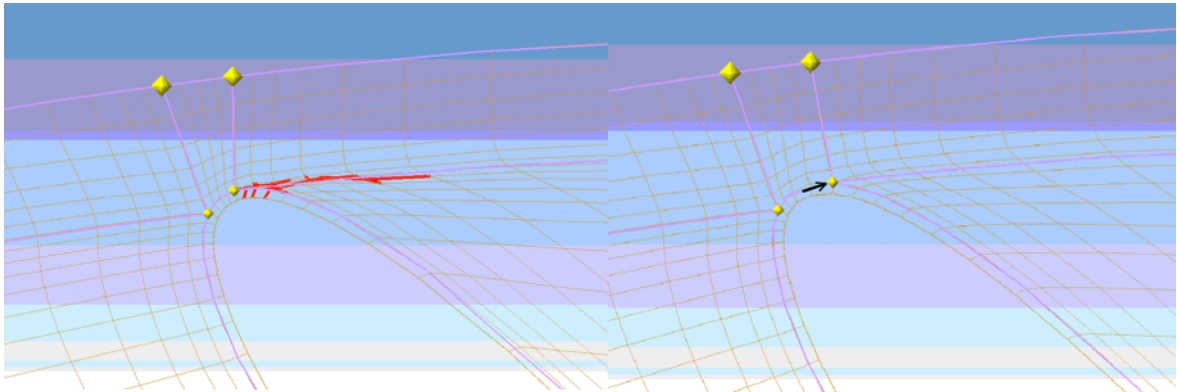


Fig. A10: A sinistra, volumi negativi nella topology. A destra la topology è accettabile, grazie allo spostamento dei *Control Points*.

A.4 . La mesh

Cliccare due volte su *Mesh Data* aprendo così la finestra di comando. Tramite questa funzione è possibile definire il limite massimo dei nodi che avrà la mesh. Nel caso del distributore, si è imposto un metodo *Target Passage Mesh Size*, con specificato il numero di nodi a 150000. Sempre su dettagli di *Mesh Data*, nella finestra *Passage* sono stati specificati altri parametri come la definizione del metodo O-Grid a 4 elementi, dato che serve ad incrementare ortogonalmente la griglia nella regione attorno alla pala, con uno spessore che sia proporzionale allo spessore della pala stessa.

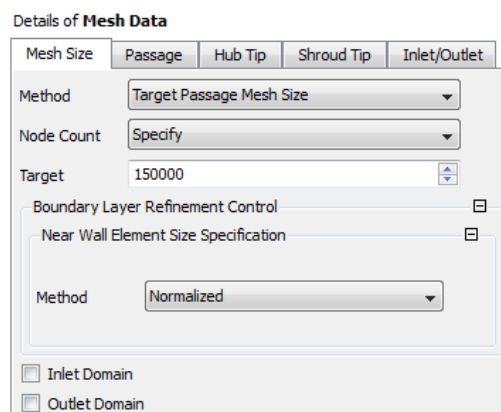


Fig. A11: *Mesh Data* del distributore.

Per la girante invece, si è imposto come *Target Passage Mesh Size* l'opzione *Fine(250000)* in quanto l'analisi della girante ha richiesto un'elevata risoluzione.

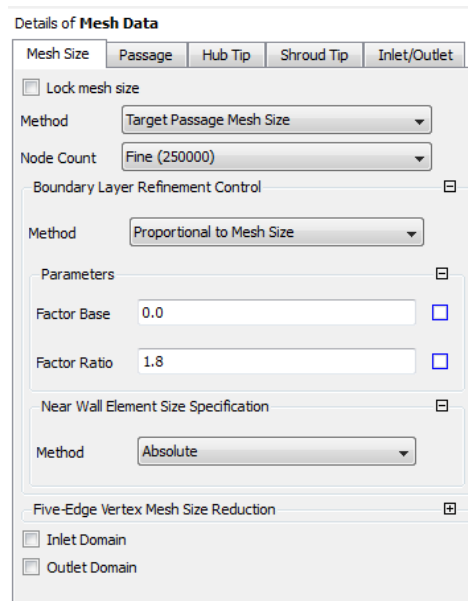


Fig. A12: *Mesh Data* della girante.

Infine cliccando sul tasto *Create Mesh* presente nella finestra di comando della funzione *3D Mesh* è possibile generare la mesh sulla base della *Topology* imposta.

Oltre alla generazione della mesh, il programma fornisce delle importanti informazioni sulla sua qualità. Come già anticipato, le due condizioni principali che una mesh deve soddisfare sono l'assenza di volumi negativi e *Minimum Face Angle* e *Maximum Face Angle* accettabili.

Tramite la funzione *Mesh Analysis (Error)* è possibile visualizzare le zone (cliccando su *Display* appaiono colorate di rosso) in cui un determinato parametro non viene soddisfatto.

I requisiti che la mesh deve soddisfare vengono definiti in *Mesh Limits*. In particolare è necessario aumentare il valore dell'angolo minimo da 15° (imposti di default) a 20°. Solamente quando la mesh verificherà le condizioni imposte sui volumi e gli angoli sarà possibile considerarla qualitativamente accettabile.

The image shows a "Mesh Statistics" dialog box with a table of mesh quality metrics. The table has columns for "Mesh Measure", "Value", and "% Bad". There are also checkmarks or exclamation marks in the rightmost column indicating the status of each metric.

Mesh Measure	Value	% Bad	Status
Minimum Face An...	27.0339 [degree]	0.0000	✓
Maximum Face A...	156.684 [degree]	0.0000	✓
Maximum Elemen...	68.2953	17.1257	!
Minimum Volume	4.8656e-15 [m^3]	0.0000	✓
Maximum Edge L...	5926.21	6.7775	!
Maximum Connec...	10	0.0000	✓

Buttons: Display, Close

Fig. A13: *Mesh Statistics* del distributore.

Il processo di miglioramento della *Mesh* è spesso lungo e ripetitivo e solamente dopo una lunga esperienza è possibile individuare rapidamente i metodi di intervento più efficaci. Nel caso non si ottenga una mesh con delle statistiche simili a quelle mostrate in figura A12, è possibile osservare alcune osservazioni da seguire per ottenere il soddisfacimento delle condizioni volute:

- agire sulla *Topology*. Il tipo di modello scelto potrebbe essere in contrasto con la complessità geometrica dell'elemento. In particolare è importante che mozzo e corona abbiano uno sviluppo circa uguale. Qualora ciò non si verifichi si consiglia di suddividere il dominio fluido in più sottodomini e meshare la parte priva di palettaggi con *ICEM*. Qualora la pala abbia una geometria complessa (doppia curvatura) spesso risulta impossibile utilizzare l'*H-Grid* o la *J-Grid* (che sono i modelli più raffinati). In questi casi si è costretti ad utilizzare l'*Automatic*. Inoltre non sempre è possibile introdurre l'*O-Grid*: anche questo elemento va mantenuto solamente per geometrie semplici.
- Agire sul numero di nodi. Infatti, più il loro numero cresce e più piccoli questi sono. Questo comporta una riduzione degli elementi e spesso anche degli angoli tra i lati.
- Agire manualmente sulla posizione *Topology*. E' infatti possibile costruire dei punti di controllo (*Control Points*) in corrispondenza dei nodi di questa (CTRL + SHIFT + tasto destro del mouse in corrispondenza del nodo) modificandone la posizione (CTRL + SHIFT + tasto sinistro del mouse spostandosi con lo stesso). Quando si cambia la posizione di un punto di controllo è necessario rigenerare la mesh per conoscere i parametri qualitativi corrispondenti alle nuove modifiche.

Quando si è ottenuta una mesh con un livello qualitativo accettabile è necessario salvare dal menù principale sia lo stato (*Save State*), per la geometria, sia la mesh stessa (*Save Mesh as*).

APPENDICE B

Procedimento per la meshatura di un dominio fluido con il modellatore e meshatore ICEM CFD 14.5

In questa appendice verranno presentate le linee guida necessarie per la preparazione di una mesh con il programma *ICEM CFD 14.5*. In particolare verrà fatto esplicito riferimento alla discretizzazione del condotto di raccordo tra distributore e girante della turbina oggetto del presente lavoro, poiché la costruzione del tubo di scarico segue lo stesso identico procedimento.

B.1 . Operazioni preliminari

Prima di avviare *ICEM CFD 14.5* è consigliabile creare una directory di lavoro denominandola come il componente che sarà discretizzato. All'interno di questa cartella verranno memorizzati tutti i files che si creano durante la sessione di lavoro.

Avviare il programma cliccando due volte sull'icona presente sul *Desktop*. L'ambiente di lavoro di *ICEM CFD 14.5* è caratterizzato dalla presenza di due finestre: una a sinistra, in cui compaiono di volta in volta le opzioni della funzionalità selezionata, ed una a destra, in cui verrà rappresentato il dominio fluido che deve essere meshato.

Il software consiglia di salvare subito il file nella cartella appena creata, non appena si utilizza il comando *New Project* presente nel menù *File*. E' bene specificare che per ogni componente il programma genera più files aventi diverse estensioni. I più importanti sono: **.tin* per la geometria, **.blk* per il *Blocking*, **.uns* per la mesh, **.prj* per l'intero progetto. Se viene caricato il file avente quest'ultima estensione automaticamente lo sono anche tutti gli altri.

Tutte le funzionalità del programma sono contenute nel menù principale (vedi Fig. B1):

- *Geometry* permette di definire il modello geometrico;
- *Mesh* consente di meshare il componente;
- *Blocking* serve ad associare una geometria semplice alla geometria da meshare;
- *Edit Mesh* consente di verificare la qualità della mesh prodotta;
- *Output* permette di salvare il file nel formato corretto **.cfx5* da importare nel preprocessore.

Queste funzionalità rappresentano i passi fondamentali da compiere per la discretizzazione dell'organo in esame.

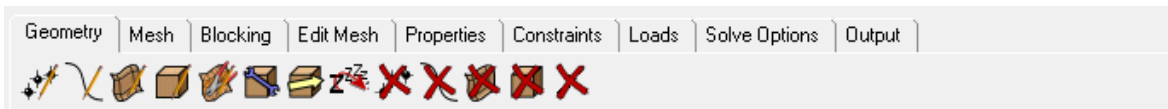


Fig. B1: Menù principale di ICEM CFD 14.5

B.2 . La geometria

Esistono varie possibilità per la costruzione geometrica del modello dell'organo. Queste possono essere schematicamente raggruppate nel seguente modo:

- l'utilizzo del modellatore interno di *ICEM 14.5*;
- l'importazione di un file di geometria da un programma interfacciato. In particolare in questo lavoro di tesi è stato usato *AutoCAD* per creare la geometria da importare (estensione del file da importare **.dwg*).

Il componente oggetto di questa appendice è stato importato tramite il comando *Import Geometry*.

Il passo successivo è la denominazione delle linee dell'elemento. Questo passaggio è molto utile per un loro rapido rintracciamento durante l'assegnazione delle condizioni al contorno con il preprocessore.

- Dal menù ad albero (in basso a sinistra) espandere la voce *Parts*. Cliccando con il tasto destro del mouse su questa voce appare un menù in cui scegliere l'opzione *Create Parts*.
- Scrivere il nome che si vuole assegnare alla superficie e scegliere *Create Part by Selection*. Selezionare le linee a cui si vuole assegnare con il tasto sinistro e confermare la scelta con il tasto centrale del mouse. Premere *Apply*.
- Ripetere l'operazione per tutte le superfici. In fig. B2 viene riportato il listato delle parti create (INFLOW, OUTFLOW, HUB, SHR).

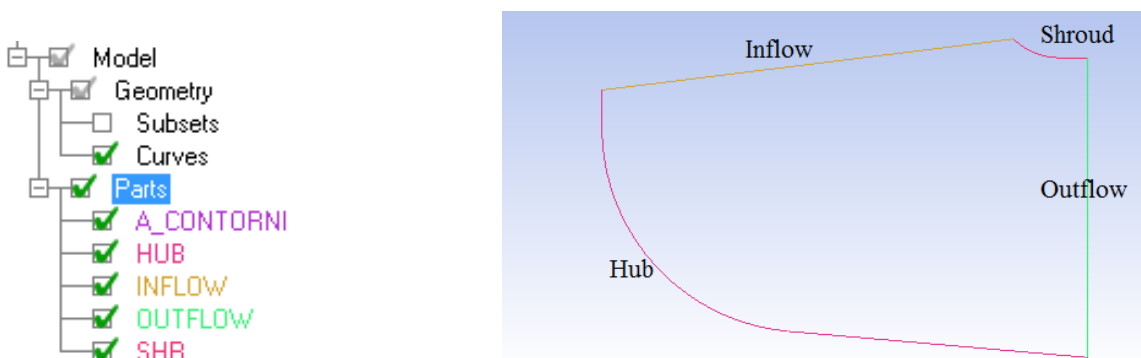


Fig. B2: *Parts* assegnate alla geometria del condotto

Quando tutte le operazioni sono state svolte la creazione della geometria del componente è terminata. Il passo successivo è la creazione del *Blocking*.

B.3 . Il Blocking

La creazione automatica del *Blocking* avviene cliccando sul relativo menù, e su *Create Block*. Impostare *Part* come SOLID (o FLUID), ed inizializzare il blocco come *2D Planar*. Una volta premuto *Apply*, a sinistra comparirà il *Blocking*, come in figura B3.

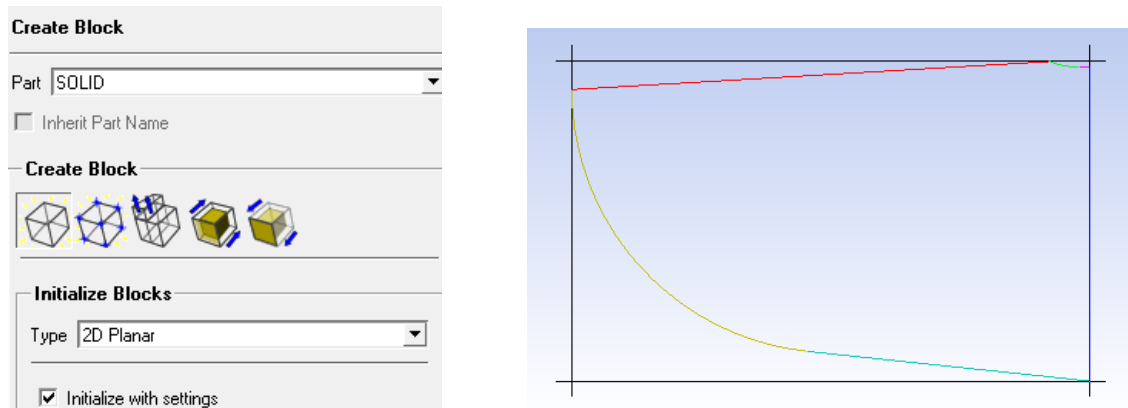


Fig. B3: A sinistra il menù, a destra la raffigurazione del *Blocking*.

A questo punto è necessario associare le parti del *Blocking* alla geometria del condotto. Questa associazione consiste sia nel mettere in relazione geometria e blocco, sia a muovere i vertici del blocco in corrispondenza della geometria.

Dal menù di *Blocking* cliccare su *Associate Edge to Curve* come mostrato in figura B4, per associare ogni *Parts* della geometria ad una parte del blocco.

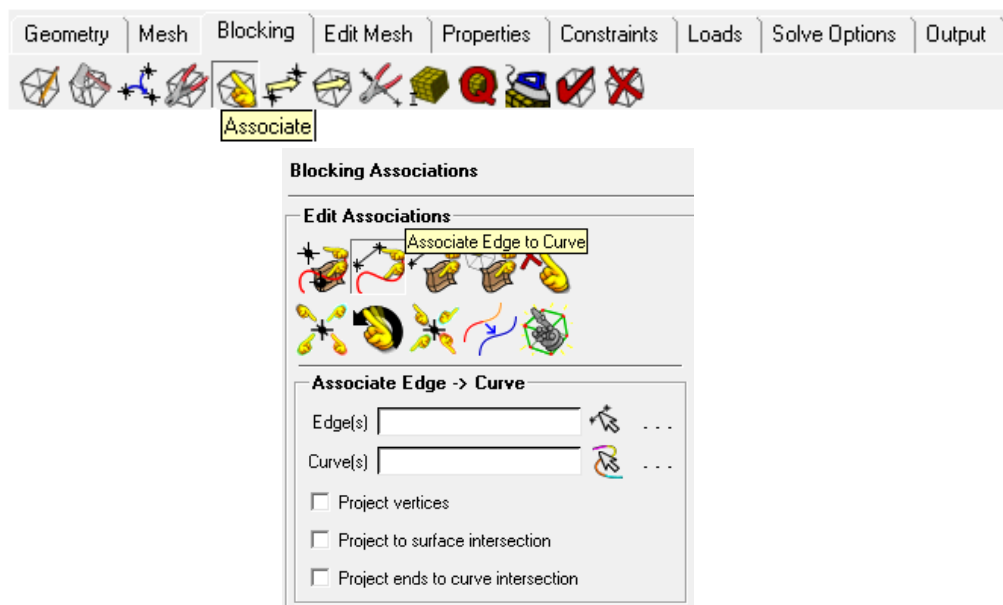


Fig. B4

A questo punto, in riferimento alla figura B4, si procede nella seguente maniera:

- Selezionare *Edge(s)*, e nella figura di destra cliccare col tasto sinistro la porzione di *Blocking* da associare, e confermare col tasto centrale del mouse.
- Selezionare *Curve(s)*, e nella figura di destra cliccare col tasto sinistro la linea della geometria da associare alla parte del blocco nominata nel punto precedente, e confermare col tasto centrale del mouse.
- Ripetere queste due operazioni per ogni parte della geometria.

Per terminare la costruzione del blocco, a questo punto è sufficiente selezionare dal menù *Blocking* il comando *Move Vertex* (vedi Fig. B5), e selezionando *Vertex* dalla relativa finestra, è possibile lavorare direttamente sulla geometria raffigurata a destra, e spostare a piacimento i vertici del blocco per sovaporarli alla geometria del condotto.



Fig. B5

Dalla finestra di sinistra è ora possibile evidenziare i vertici con dei numeri, e verificare l'associazione di ogni parte del *Blocking* alla relativa parte delle geometria. Nel menù a tendina di sinistra, è possibile visualizzare i vertici cliccando su *Vertices* col tasto sinistro, e vedere le associazioni cliccando su *Edges* col tasto destro e successivamente su *Show Associations*. Il risultato è quello mostrato in figura B6.

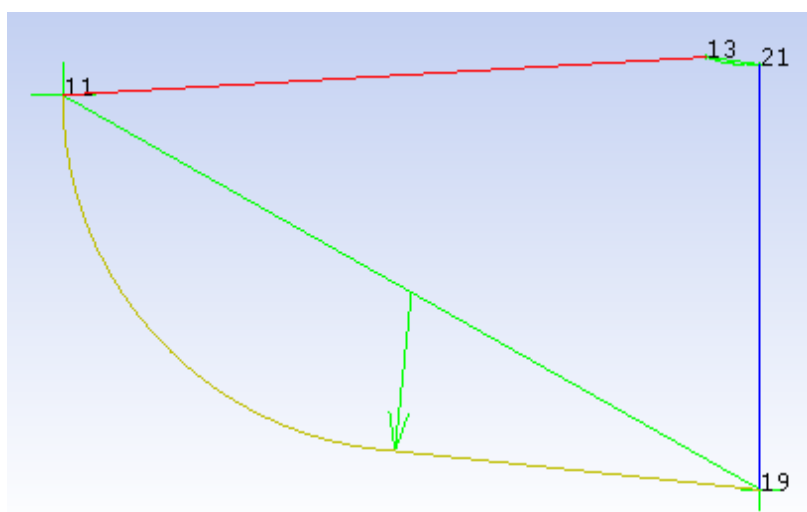


Fig. B6: Associazione del *Blocking* alla geometria del condotto.

B.4 . La Mesh

Dopo aver costruito la geometria e il *Blocking* dell'elemento in esame, si procede con la sua discretizzazione. Vengono schematicamente riportate di seguito le operazioni che è necessario svolgere per l'ottenimento della mesh non-strutturata.

- Attivare il sottomenù *Pre-Mesh* dal menù a tendina presente a sinistra, sotto *Blocking*. Il software chiederà di computare la mesh, e rispondendo *Yes*, il programma crea in automatico una prima forma di mesh, da poter regolare e sistemare secondo le proprie esigenze.
- Dal menù di *Blocking*, *Pre-Mesh Params*, cliccando su *Update Sizes* è possibile determinare in maniera automatica il numero di nodi stimato dal software e verificare che la mesh non abbia problemi, e dove possibile ripararla.
- Per la definizione e perfezionamento delle dimensioni degli elementi della pre-mesh, dal menù *Blocking*, cliccare su *Pre-Mesh Params* per impostare il numero di nodi per ogni lato e i relativi "Spacing", ovvero di quanto si separa ogni nodo l'uno dall'altro a seconda della posizione rispetto il componente: ad esempio nei punti di curvatura del componente è necessario infittire la mesh affinché sia di qualità accettabile per il buon svolgimento della simulazione. Cliccando su *Edge Params*, sono stati impostati il numero di nodi per le due direzioni principali della geometria (60 per l'altezza e 52 per la base). Per gli "Spacing" dell'altezza, sono stati impostati i valori di figura B8 per ottenere un corretto infittimento dei nodi nelle zone di curvatura in corrispondenza della corona e del mozzo.



Fig. B8

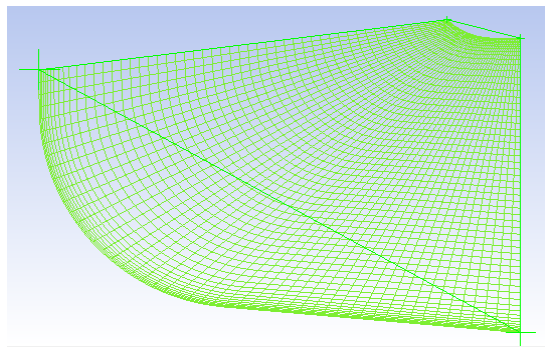


Fig. B9: Pre-mesh.

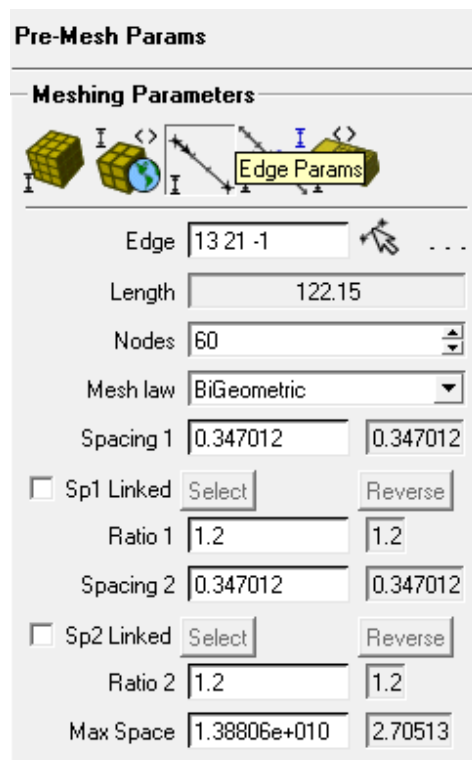


Fig. B10: parametri della pre-mesh.

Dopo aver fornito tutte le impostazioni sopra riportate è infine possibile generare la mesh. Selezionando col tasto destro *Pre-Mesh*, nel menù a tendina di sinistra, il comando *Convert to Unstruct Mesh*, il programma automaticamente provvede alla discretizzazione della superficie secondo le specifiche assegnate.

B.5 . La rivoluzione della Mesh

Per ottenere la mesh tridimensionale, è necessario completare il lavoro di costruzione del componente effettuando una rivoluzione della mesh bidimensionale ottenuta.

Dal menù principale di ICEM CFD 14.5, cliccare su *Edit Mesh*, quindi su *Extrude Mesh*. A questo punto si procede nella seguente maniera:

- Il software chiede di inserire gli elementi da estrarre. Cliccare su *Select all appropriate objects* (o digitare dalla tastiera il tasto rapido “A”) per selezionare “tutti gli oggetti visibili e non”, affinché venga compresa la mesh in tutte le sue *Parts*.
- Inserire come metodo *Extrude by rotation*, per ottenere una rivoluzione della mesh tramite rotazione, facendo attenzione a selezionare l’asse corretto. In questo caso,

il condotto è stato ruotato rispetto l'asse x^{16} . Il centro della rotazione è ovviamente l'origine degli assi.

- Infine sono richiesti gli *Angle per layer* ed il *Number of layer*. Nel caso del raccordo tra distributore e girante, è stata effettuata una rotazione di un angolo coerente con la grandezza del distributore (22.5°). Come mostrato in figura B10, sono stati creati 20 layer ogni 1.125° per ottenere 22.5° di rotazione.

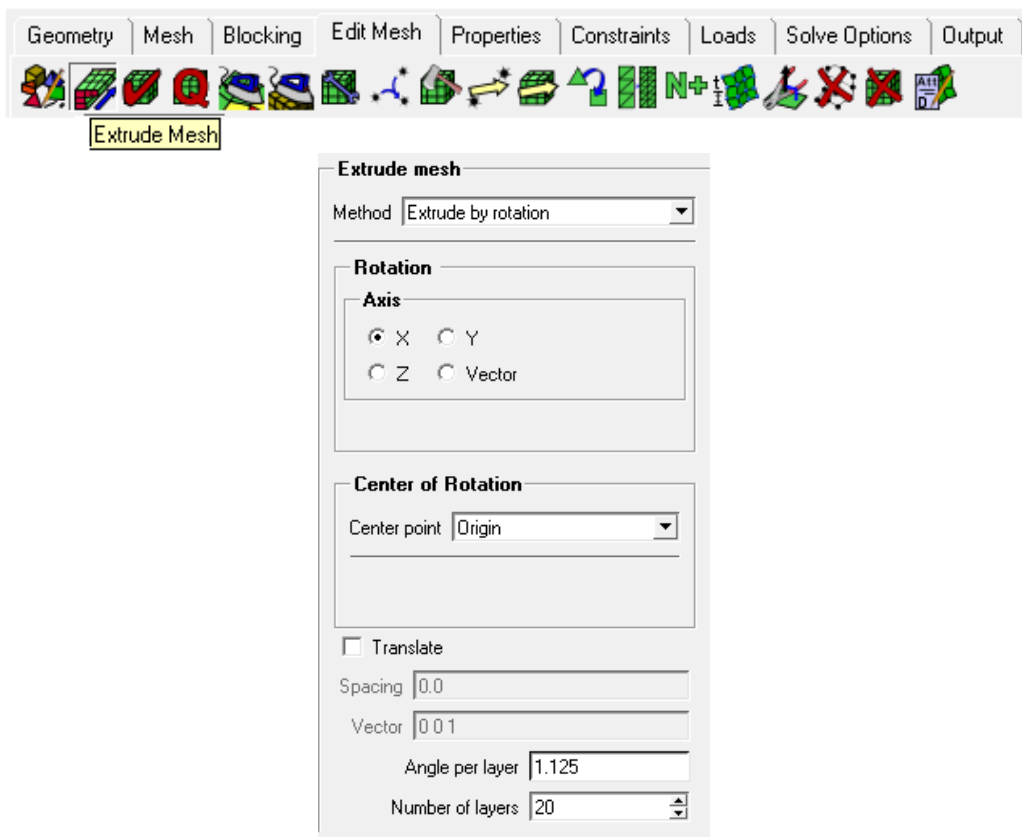


Fig. B10

Una volta ottenuta la mesh tridimensionale, le *Parts* delle linee nominate in precedenza, sono diventate automaticamente le superfici del componente. Le due superfici laterali mancanti, derivate dalla rotazione della mesh, sono state nominate successivamente tramite l'apposito comando, come "PER_1" e "PER_2", essendo appunto le parti periodiche del raccordo.

Il risultato è mostrato in figura B11.

¹⁶ ICEM CFD 14.5 e TurboGrid 14.5 lavorano su terne di assi cartesiani diverse. In ICEM si usa come asse di rotazione l'asse "x", mentre in TurboGrid l'asse "z". I componenti vengono poi assemblati correttamente nel pre-processore, come si vedrà nell'Appendice C.

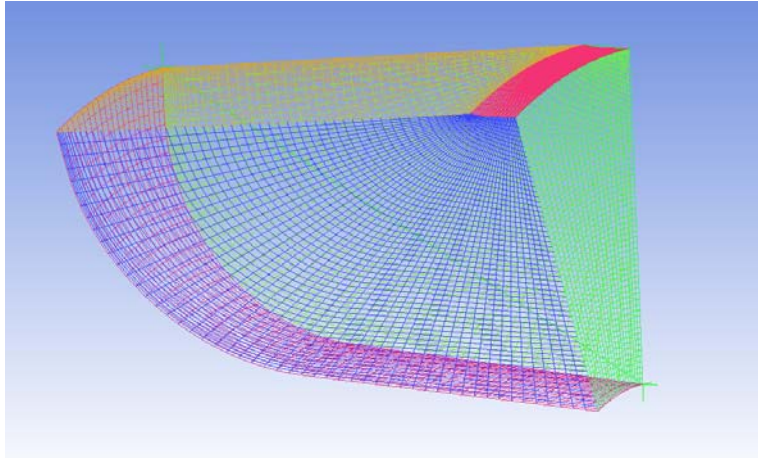


Fig. B11

B.6 . L'analisi della qualità della mesh

Tramite le funzioni contenute nel menù *Edit Mesh* della barra principale (vedi Fig. B12) è possibile analizzare il livello qualitativo della mesh generata da *ICEM CFD 14.5* .



Fig. B12

Aprendo il menù a tendina *Quality type* della funzione *Display Mesh Quality* è possibile visualizzare tutti i parametri inerenti alle caratteristiche della mesh generata. I più importanti sono *Quality* e *Min angle*. La mesh si considera accettabile se i valori che queste due grandezze assumono superano rispettivamente 0,5 e 25°. Un istogramma in basso a destra evidenzia la distribuzione del parametro selezionato. Cliccando con il tasto sinistro del mouse su una delle sue barre è possibile visualizzare sul modello i tetraedri aventi l'indice di qualità all'interno dell'intervallo corrispondente.

Il programma possiede degli utili strumenti che automaticamente agiscono sulla mesh per aumentare il parametro selezionato. Tramite la funzione *Smooth Mesh Globally*, si accede al pannello di comando per l'aumento della qualità. Qualora non si ottenga subito una mesh in linea con le caratteristiche volute, è possibile agire selezionando il parametro su cui si intende agire dalla lista alla voce *Criterion*. Prima di premere *Apply* si consiglia, per esperienza, di aumentare il valore di *Up to value* portandolo a 0,6 (lasciare inalterato il numero di iterazioni). Qualora non si ottenessero dei benefici riapplicare la funzione aumentando ulteriormente il parametro *Up to value* (per es. 0,65 o 0,7).

Fortunatamente, come si nota in figura B13, sia del raccordo tra distributore e girante, sia del tubo di scarico, non ci sono stati problemi di qualità, dato che le forme dei condotti sono relativamente semplici.

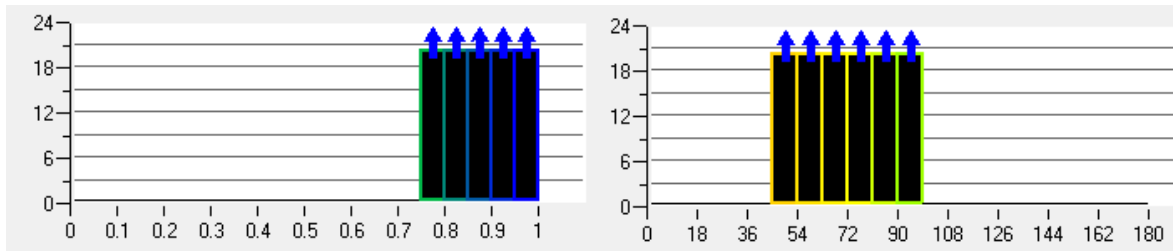


Fig. B13: Istogrammi dei principali indici qualitativi della mesh.

Quando la mesh ottenuta soddisfa le condizioni precedentemente presentate si salva il file *.prj e la mesh in formato *.uns .

B.7 . L'esportazione della mesh

Per salvare la mesh costruita si devono utilizzare le funzioni contenute nel menù *Output* della barra principale (vedi Fig. B14).

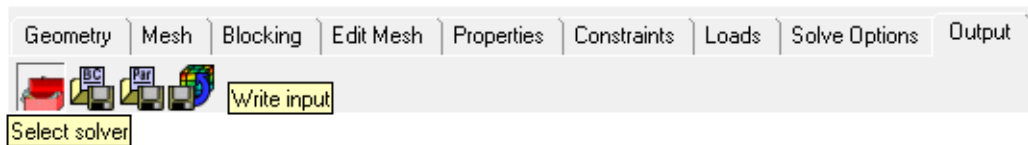


Fig. B14

Tramite il tasto *Select solver* è possibile selezionare da un elenco una serie di *Output Solver* i quali funzionano da convertitore per trasformare la mesh dal formato *.uns, al formato compatibile col programma nel quale si vuole esportare la mesh.

Nel presente lavoro, è stato selezionato come *Output Solver* dall'elenco la voce "ANSYS CFX", per ottenere una mesh *.cfx5, formato che possa essere importato dal pre-processore CFX-Pre 14.5 e che sia compatibile con le altre mesh create tramite software TurboGrid 14.5 .

Per salvare il file all'interno della cartella di lavoro generata all'inizio della sessione, è sufficiente cliccare il tasto *Write input*.

APPENDICE C

Procedimento per la costruzione di un dominio fluido con il pre-processore CFX-Pre 14.5 e l'avvio della relativa simulazione fluidodinamica con il solutore CFX-Solver Manager 14.5

In questa appendice verranno riportate le linee guida necessarie per la preparazione e l'avvio di una simulazione fluidodinamica.

C.1 . Operazioni preliminari

Prima di attivare *CFX-Pre 14.5* si consiglia di creare una cartella di lavoro a cui assegnare il nome del dominio fluido che si intende analizzare. All'interno di questa directory verranno immagazzinati tutti i files generati durante la sessione di lavoro. All'interno della presente cartella, in particolare sono state create delle sottocartelle per ogni simulazione con i diversi angoli di calettamento.

Da ambiente Windows lanciare *CFX 14.5* (vedi Fig. C1).

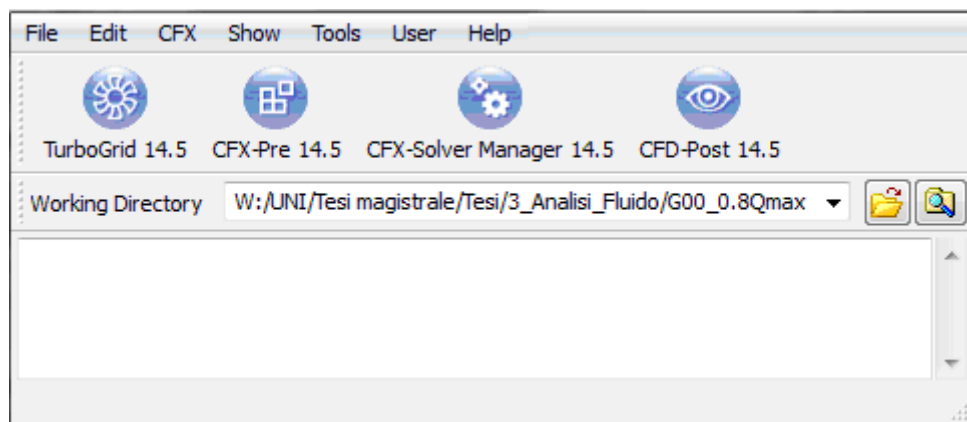


Fig. C1

Sul menù a tendina, presente nella barra principale, si seleziona la directory appena creata e successivamente si avvia *CFX-Pre 14.5* cliccando sull'icona corrispondente.

Si si seleziona il comando *New Case* dal menù principale e, come prima cosa, è necessario scegliere il tipo di file che si intende generare (*General*). A questo punto comparirà sul monitor la pagina del programma dalla quale è possibile svolgere tutte le operazioni di impostazione: l'ambiente di lavoro è caratterizzato da due finestre, una a

sinistra dove è presente un menù dal quale immettere tutte le informazioni necessarie per la simulazione; a destra invece è possibile visualizzare il dominio fluido dei vari componenti.

C.2 . L'importazione delle mesh

Visto che il solutore opera computando le variabili sui nodi, la prima operazione da compiere è l'importazione delle mesh da cui il dominio fluido è costituito. Nel caso in esame, questo è composto da cinque parti: il predistributore, il distributore, il raccordo, la girante e il tubo di scarico. Si procede quindi cliccando sul tasto *Mesh* collocato alla sommità della finestra di sinistra e successivamente sull'icona *Import Mesh*. Assegnando la corretta estensione è possibile importare le *Mesh* da numerosi programmi interfacciati con *CFX-Pre 14.5* . Per la simulazione oggetto di questa stesura, devono essere importate due tipi di mesh:

- *.*cfx5* per raccordo e tubo di scarico (si specifica scegliendo la voce *ICEM CFD*);
- *.*gtm* per predistributore, distributore e girante (si tratta dell'estensione tipica del meshatore *TurboGrid*, e si specifica scegliendo semplicemente *CFX Mesh*).

Poiché i vari componenti devono essere accostati in modo tale da sovrapporre la massima area delle superfici in comune, è possibile posizionarli in modo corretto assegnando loro dei moti rigidi di rotazione e traslazione. Per far ciò, si clicca col tasto destro sopra la mesh che si desidera spostare, e si seleziona *Trasform Mesh*. Così facendo, è possibile ruotare o traslare le mesh fornendo asse e numero di gradi per le rotazioni, asse ed entità dello spostamento per le traslazioni.

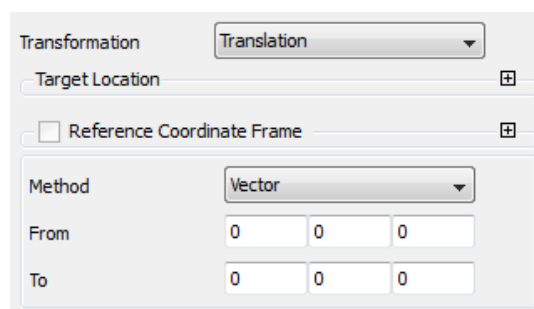


Fig. C2: Esempio di *Trasform Mesh*: traslazione.

Nel caso di distributore e raccordo, per ottenere due componenti da considerare come un unico assemblato, è necessario utilizzare il comando *Multiple Copies*, assieme al comando *Glue Adjacent Meshes*, per ottenere l'*Assembly* delle mesh dello stesso componente.

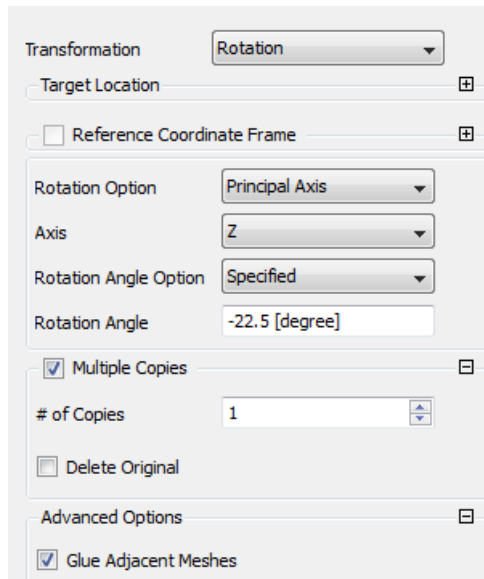


Fig. C3: Esempio di *Trasform Mesh*: rotazione.

L'*Assembly* è indispensabile per considerare in un unico blocco, più mesh adiacenti l'una all'altra.

Una volta importate e sistemate adeguatamente tutte le mesh, il risultato è quello di figura C4.

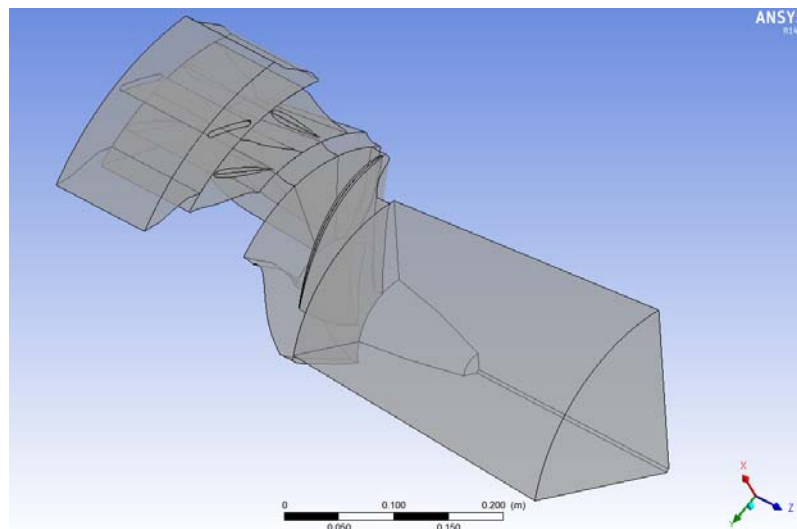


Fig. C4: Singolo condotto.

C.3 . La creazione dei domini

Comincia ora la descrizione delle operazioni necessarie per avviare il solutore sull'organo da analizzare. Queste operazioni sono riconducibili ai tasti presenti nel menù principale del programma (vedi fig. C5), i quali rappresentano i passi fondamentali per la realizzazione del file **.def* finale.

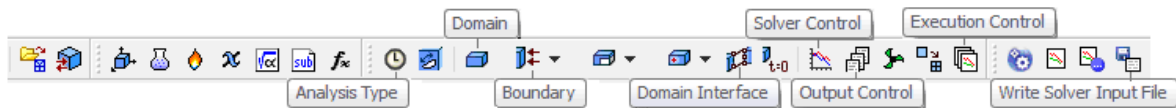


Fig. C5: Menù di CFX-Pre 14.5

La prima operazione da compiere è specificare il tipo di deflusso che si intende considerare (stazionario o tempo variante). Cliccando sul primo di questi tasti (*Analysis Type*), compare una finestra dalla quale è possibile imporre la condizione voluta (nel caso in esame *Steady State* cioè deflusso stazionario, indipendente cioè dal tempo).

Dopo questa operazione si procede con la generazione dei domini, ossia sono i volumi fluidi sui cui si vuole che la simulazione sia svolta. Cliccando sul secondo tasto evidenziato in figura C5 del menù *Domain* è possibile assegnare il nome del dominio che si intende creare. Di default, il software riconosce i domini delle mesh importate, quindi è sufficiente nominarle adeguatamente. (A Predistributore; B Distributore; C raccordo; D Girante; E Scarico). 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 si sono generati i domini tutti aventi come fluido acqua (*Water*) e come modello di viscosità *Shear Stress Transport*. Si sono poi dovute assegnare delle particolari impostazioni per ogni componente:

- Per la *girante* si è specificato il moto rotante attorno all'asse "z" (*Rotating*) alla velocità angolare di "N giri"¹⁷, ovvero 1000 rpm;
- Per i rimanenti componenti è stato specificato il moto stazionario (*Stationary*).

C.4 . L'imposizione delle condizioni al contorno

Visto che durante la simulazione vengono integrate le equazioni di Navier-Stokes è necessario assegnare le condizioni al contorno alle superfici delimitanti il volume fluido analizzato. In figura C6 vengono schematicamente riassunti i tipi di condizioni utilizzate durante la preparazione della simulazione in esame. In blu sono riportati i nomi delle due funzioni (collocate su due tasti del menù di figura C5) con le quali si effettuano le impostazioni. In verde sono stati scritti i tipi di condizioni al contorno che sono state utilizzate per le varie superfici presenti.

¹⁷ "N giri" è una espressione inserita appositamente nel comando *Expressions* del software.

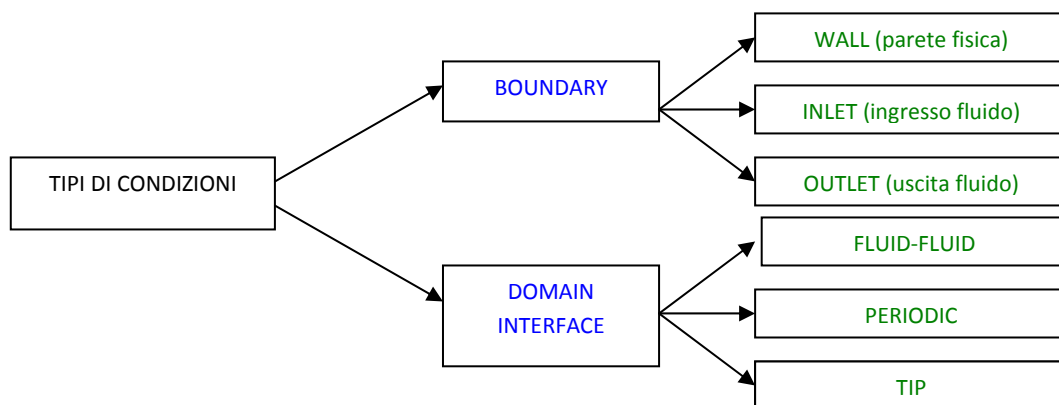


Fig C6: Schema della condizioni al contorno utilizzate.

Si comincia con la descrizione della funzione *Boundary*, ovvero delle condizioni al contorno. Cliccando sul tasto corrispondente si apre una prima finestra in cui assegnare il nome del dominio (a cui si vuole imporre la condizione) e quello della superficie da definire. Oppure semplicemente cliccando con il tasto destro in corrispondenza del dominio al quale si vuole aggiungere una condizione di contorno, selezionare *Insert* e quindi *Boundary*. Confermando le impostazioni introdotte è possibile accedere alla finestra di comando generale in cui si deve specificare il tipo di condizione (scegliendo tra *Wall*, *Inlet* e *Outlet*), la collocazione (cioè la superficie su cui si vuole imporre la condizione) ed altri parametri a seconda delle scelte effettuate precedentemente:

- se si è scelto *Wall* si deve specificare la finitura superficiale della parete (*Free Slip* per parete liscia, *No Slip* per parete ben finita);
- se si è scelto *Inlet* deve essere precisata la portata di massa in ingresso e la direzione del fluido in ingresso;
- infine se è stato scelto *Outlet* si deve imporre la condizione di riferimento all'uscita.

Le superfici “Hub”, “Shroud” e “Blade” sono state definite come *Wall* in tutti i componenti. In particolare nel dominio “E Scarico” si è dovuto precisare la condizione al contorno della superficie costituente il mozzo: essendo “Hub Mov” l’ogiva della girante, si è specificato in *Boundary Details* la *Wall Velocity* con una velocità angolare “Ngiri”, ovvero la stessa della girante; la superficie “Hub” invece è stata specificata come *Free Slip Wall*. Alla superficie di “Inflow” del predistributore, è stata impostata la condizione di *Inlet* con una portata di massa in ingresso Q e una direzione del flusso in coordinate

cilindriche¹⁸. Alla superficie “Outflow” del tubo di scarico, è stata impostata la condizione di *Opening*, con una opzione di *Mass And Momentum* “Entrainment” a 0 Pa.

Si ricorda che nello svolgimento di queste operazioni si è comunque aiutati dalla grafica di *CFX-Pre 14.5*, in quanto ogni superficie selezionata compare colorata in verde nella finestra di rappresentazione 3D di destra.

Si continua ora con la descrizione della funzione *Domain Interface*. Le interfacce sono quelle superfici attraverso le quali si vuole che il fluido scorra. Una interfaccia è sempre costituita da due superfici, in quanto è sempre necessario specificare la collocazione per entrambi i domini che si vogliono collegare. Cliccando sul tasto *Domain Interface* compare una finestra in cui assegnare il nome. Confermando la scelta è possibile accedere alla finestra di comando nella quale devono essere specificate il tipo (vedi Fig. C6), la collocazione (per entrambi i domini adiacenti), le *Interface Models* e i *Frame Change*. Entrando nel merito del problema si specifica che:

- le interfacce *Fluid-Fluid* permettono al fluido di attraversare le superfici affacciate di due domini diversi. Nel caso in esame sono state utilizzate per collegare tra loro predistributore e distributore, distributore e raccordo, raccordo e girante, girante e scarico. Trattandosi di domini in moto relativo tra di loro è stato necessario assegnare il tipo di *Frame Change* come *Frozen Rotor*¹⁹;
- le interfacce *Periodic* permettono di collegare le due superfici di periodicità che delimitano circonferenzialmente il dominio. Pur trattandosi dello stesso componente anche in questo caso è necessario specificare i nomi delle superfici e del dominio, ed il tipo di collegamento che si intende effettuare (nel caso in esame *Rotational Periodicity*);
- le interfacce “Tip” sono semplicemente un *General Connection* per definire la presenza della superficie di tip nelle mesh palettate.

A questo punto, nella finestra di destra dovrebbe apparire l’immagine del dominio fluido con le relative rappresentazioni delle condizioni a contorno (vedi Fig. C7).

¹⁸ Per la definizione della Expression Q e per la direzione del flusso, vedi Capitolo 2, paragrafo 2.3.1 .

¹⁹ Per la definizione di *Frozen Rotor*, vedi Capitolo 2, paragrafo 2.3.1 .

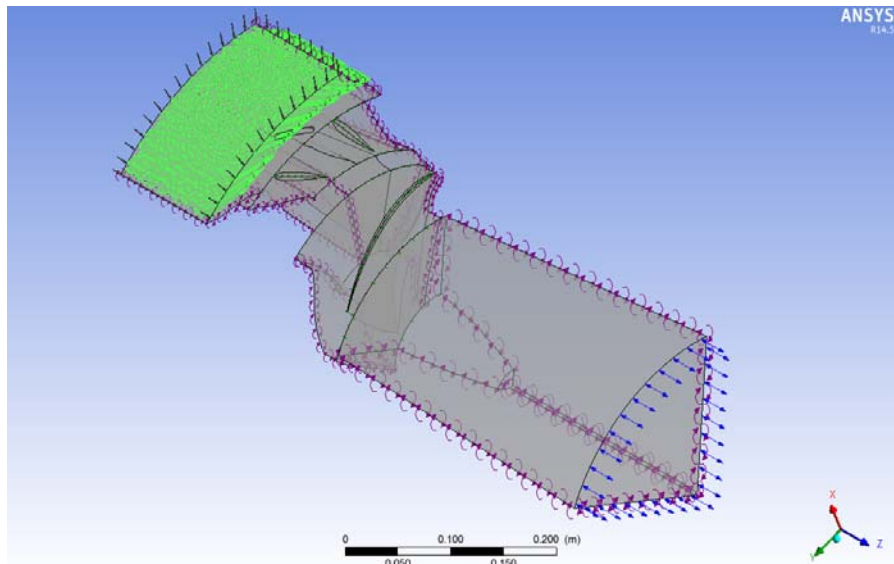


Fig. C7: Dominio Fluido con le relative rappresentazioni di *Boundary* e *Domain Interfaces*.

C.5 . L’inserimento delle Expressions

Dal menù presente nella finestra di sinistra, è possibile selezionare la funzione *Expressions* per ottenere delle espressioni o algoritmi da far girare assieme alla simulazione (vedi Fig. C8).

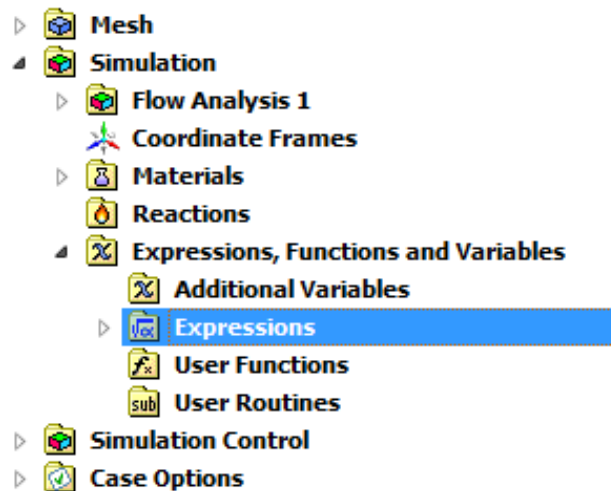


Fig. C8

Per inserire una nuova espressione, basta cliccare col tasto destro su *Expression*, e digitare *Insert, Expression*. Dopo aver nominato opportunamente l’espressione, si passa ad inserire il testo nei *Details*.

Per completare l'algoritmo²⁰, sono state inserite le espressioni di figura C9.

Expressions	
ErrHPerc	$\max(\text{abs}(((H-H\text{ ref})/H\text{ ref}))-0.1,0)*(\text{step}((H-H\text{ ref})/H\text{ ref})^2-1)$
H	$(\text{massFlowAve}(\text{Total Pressure in Stn Frame})@\text{Inflow} - \text{massFlowAve}(\text{Total Pressure in Stn Frame})@\text{Outflow})/997[\text{kg m}^{-3}]/g$
H ref	4 [m]
IO	$\max(-\text{atan}(\log(Q\text{ imbalance}))/90 [\text{deg}],0)$
Q	$((\text{abs}(Q\text{ ref}) + dQ)*\text{step}(\text{aitern}-\text{Trn iter}) + Q\text{ init}*\text{step}(-\text{aitern} + \text{Trn iter}))/8$
Q imbalance	$\text{abs}((\text{massFlow}()@\text{Outflow}*5 + \text{massFlow}()@\text{Inflow}*8)/(\max(\text{massFlow}()@\text{Inflow}*8, 1E-4 [\text{kg s}^{-1}]))) * 100 + 1e-4$
Q init	0.28 [m ³ s ⁻¹] * 997 [kg m ⁻³]
Q ref	$\text{massFlow}()@\text{Inflow}*8$
Trn iter	15
dQ	$-0.02*\text{ErrHPerc}*\text{abs}(Q\text{ ref})*\text{IO}$

Fig. C9

È opportuno inserire in questa appendice, una breve legenda del CFX Expression Language (CEL):

- $\text{massFlow}()@\text{"Location"}$: portata di massa attraverso una *Boundary*;
- $\text{abs}(\text{"Expression"})$: modulo del valore, o valore assoluto;
- $\text{max}(\text{"Expression"})$: valore massimo del valore;
- $\text{massFlowAve}(\text{"var"})@\text{"Location"}$: restituisce il valore medio della variabile o espressione tenendo conto della portata di massa durante la simulazione
 $(\text{massFlowAve}(p) = \frac{\sum(m \cdot p)}{\sum m})$, attraverso la *Boundary*;
- *Total Pressure in Stn Frame* : valore della pressione totale;
- *aitern* : numero di iterazioni accumulate;
- $\text{step}(\text{"Argument"})$: funzione che restituisce il valore 1.0 qualora l'argomento sia vero, 0.0 quando l'argomento è falso.
- $\text{torque}_z()@\text{"Location"}$: componente del vettore Coppia lungo la coordinata "z", attraverso una *Boundary*.

In figura C10, sono mostrate le rimanenti *Expressions* usate nel presente lavoro di tesi.

Expressions	
M	$(\text{torque}_z()@\text{D Blade} + \text{torque}_z()@\text{D Hub} + \text{torque}_z()@\text{E Hub Mov})*\text{Npale}$
Ngiri	-1000 [rev min ⁻¹]
Npale	5
P	$M*\text{Ngiri}^2*\pi/60 [\text{s}]$

Fig. C10

²⁰ L'algoritmo è descritto nel Capitolo 2, paragrafo 2.3.1 .

C.6 . Impostazioni di corredo e definizione delle condizioni di convergenza

Al fine di ottenere dei risultati corretti dalla simulazione numerica è necessario effettuare alcune ultime impostazioni.

Si definiscono le condizioni di convergenza della soluzione: per farlo si clicca sul tasto *Solver Control*, e si assegnano le due condizioni:

- una sul numero massimo di iterazioni (nel caso in esame 600);
- l'altra sul valore che ci si pone come obiettivo per i residui massimi (per la girante 10^{-4});

Attraverso il tasto *Output Control*, è possibile inserire alcune variabili da monitorare durante la simulazione, cliccando su *Add new item* nella finestra di *Monitor*.

Infine è possibile nella finestra di *Execution Control* impostare il nome e la destinazione del *Solver Input File*, e di stabilire se utilizzare uno o più processori hardware per effettuare la simulazione, attraverso il sottomenù *Parallel Environment, Run Mode*.

Dopo aver controllato che tutte le impostazioni siano corrette si avvia il solutore. Per compiere questa operazione si clicca sul tasto *Write Solver Input File* per scrivere il file *.def da avviare tramite software solutore.

Le simulazioni sono state fatte per le varie aperture del distributore (o della girante). Per sostituire un solo componente, mantenendo inalterato tutto il resto, è sufficiente premere il comando *Reload Mesh Files* presente nel menù, ed inserire la nuova mesh che si desidera importare come sostituzione.

C.7 . L'avvio della simulazione fluidodinamica con il CFX-Solver Manager 14.5

Cliccando due volte sul file *.def creato nella apposita cartella, è possibile avviare il solutore. Così facendo si apre il programma *CFX-Solver Manager 14.5* in cui compare già il nome del file *.def appena creato sulla finestra di lancio della simulazione, il *Parallel Environment* impostato precedentemente, e la destinazione dove verrà salvato il file *.res con i risultati della simulazione. Il calcolo comincia cliccando sul tasto *Start Run*.

La simulazione terminerà non appena una delle due condizioni imposte viene raggiunta. Qualora si volesse interromperla manualmente basta cliccare sul tasto *Stop the CFX Solver Run in progress* nel menù principale del programma solutore.

APPENDICE D

Nozioni per la visualizzazione dei risultati mediante post- processore CFD-Post 14.5

In questa appendice verranno presentate le linee guida necessarie per la visualizzazione dei risultati di una simulazione fluidodinamica.

D.1 . Considerazioni preliminari

Alla fine dell'esecuzione, nella directory da cui è stata avviata la simulazione, vengono memorizzati due files aventi estensioni *.out e *.res .

Il primo, che può essere aperto con il blocco note, raccoglie il listato generato durante l'esecuzione della simulazione nella metà di destra della finestra del programma *CFX-Solver Manager 14.5* . Mediante questo file è possibile controllare il numero di iterazioni ed i valori dei residui raggiunti al momento di arresto dell'esecuzione.

Il secondo file, di dimensioni ben maggiori del primo, contiene i risultati della simulazione.

D.2 . Apertura del file *.res e generazione degli oggetti

Da ambiente Windows lanciare *CFX 14.5*.

Dal menù a tendina, presente nella barra principale, si seleziona la directory dalla quale è stata lanciata la simulazione e successivamente si avvia *CFD-Post 14.5* cliccando sulla corrispondente icona.

Dalla barra principale degli strumenti si seleziona la funzione *Load Results...* e, specificando il nome del file *.res che si intende visionare, si aprono i risultati della simulazione. Non appena il computer ha caricato il file si entra nell'ambiente di lavoro di *CFD-Post 14.5* (vedi Fig. D1).

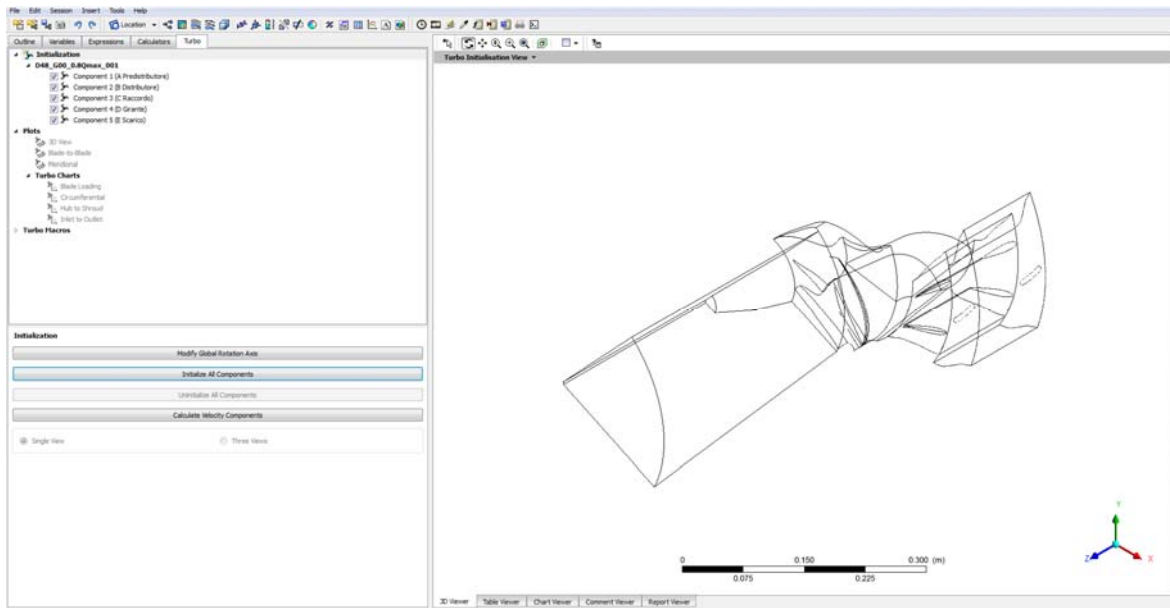


Fig D1: Schermata di lavoro del post-processore

Un'importante precisazione di fondamentale importanza è che le grandezze possono essere visualizzate solamente su un oggetto: una linea, una superficie o un volume. Oltre alle superfici già esistenti (in quanto generate nel preprocessore) possono essere creati dei nuovi oggetti mediante la funzione *Location* presente nel menù principale della barra di comando. Di particolare utilità sono le superfici *Turbo Surface*: queste possono essere superfici cilindriche, coniche o semplicemente dei dischi, ottenibili dalle superfici già esistenti della macchina oppure da sezioni all'interno dei vari componenti. Così facendo è possibile generare delle utili superfici meridiane (metodo *Constant Theta*) o delle altrettanto utili superfici equidistanti da mozzo e corona (metodo *Constant Span*), sulle quali plottare i risultati che si vogliono estrapolare dalla simulazione.

Cliccando sulla funzione *Turbo* e successivamente sul tasto *Initialize All Components* è possibile inizializzare i domini della turbina affinché vengano trattati come elementi di turbomacchina. Dallo stesso menù, è possibile attivare il calcolo automatico delle componenti della velocità, cliccando sul tasto *Calculate Velocity Components*.

Nel caso in esame sono state generate delle *Turbo Surfaces* in corrispondenza di ogni profilo elementare utilizzato per il dimensionamento della parte statorica e rotorica al fine di controllare le condizioni di incidenza del fluido e l'andamento delle pressioni sul condotto interpolare.

Infine, per una completa visualizzazione della macchina sui 360°, dalla funzione della finestra di sinistra, *Outline*, si è moltiplicato ogni componente per il numero di periodicità

che vanno a completare la macchina. Nel menù a tendina, cliccando su *Cases*, è possibile visualizzare i domini di ogni mesh con le relative *Boundaries*, come sono state impostate precedentemente nel pre-processore. Con un doppio clic sul componente, si modifica il numero di volte in cui il componente viene visualizzato sui 360°, andando ad inserire il numero su *Number of Graphical Instances* (8 per predistributore, distributore, raccordo; 5 per girante e scarico).

D.3 . Rappresentazione delle variabili computate dal programma

Le grandezze che è possibile visualizzare nel post-processore sono molto numerose, tuttavia tre sono quelle che maggiormente interessano nell'analisi dei risultati: la velocità (*Velocity*), la pressione (*Pressure*) e la pressione totale (*Total Pressure*).

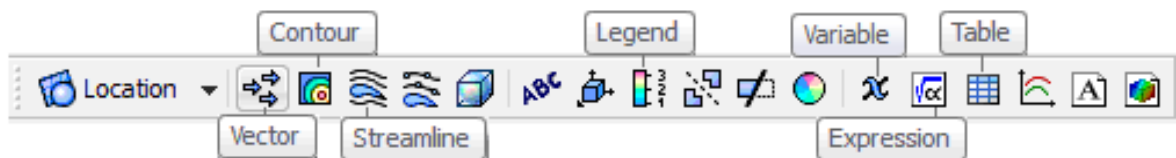


Fig. D2: menù *Create*: in evidenza le funzioni per la rappresentazione delle variabili

Il vettore velocità può essere visualizzato selezionando la funzione *Vector* dalla barra di comando del programma (vedi Fig. D2). Tramite questa funzione è possibile visualizzare la distribuzione del vettore velocità su una superficie (precedentemente creata o definita durante l'utilizzo del preprocessor). Oltre alla rappresentazione dell'intero vettore, il programma ne permette la proiezione lungo molteplici direzioni (tangenziale, radiale, ecc.): è così possibile raffigurare l'andamento solamente di una sua componente.

Altrettanto importate è la funzione *Contour* (vedi Fig. D2). Tramite quest'ultima è possibile visualizzare i gradienti della grandezza selezionata, in quanto viene automaticamente assegnato un colore per ogni banda di valori che questa assume. Di particolare interesse è l'analisi della distribuzione delle pressioni statiche e della velocità. Tramite un *Contour Plot* della variabile *Pressure* (o *Velocity*, ecc) è infatti possibile visualizzare l'andamento di questa nel condotto interpolare ed effettuare così delle rapide verifiche di cavitazione e stallo (oltre alla valutazione delle condizioni di incidenza a cui prima si è accennato).

Abbinare i comandi di *Turbosurface* con il *Contour* e il *Vector*, permette di ottenere la rappresentazione grafica della variabile nel punto della macchina che si vuole analizzare. Ad esempio, creando una *Turbosurface* a "Constant span = 0.5", nel dominio della girante,

e abbinandone *Contour* e *Vector* della distribuzione della velocità, si ottiene facilmente la figura D3.

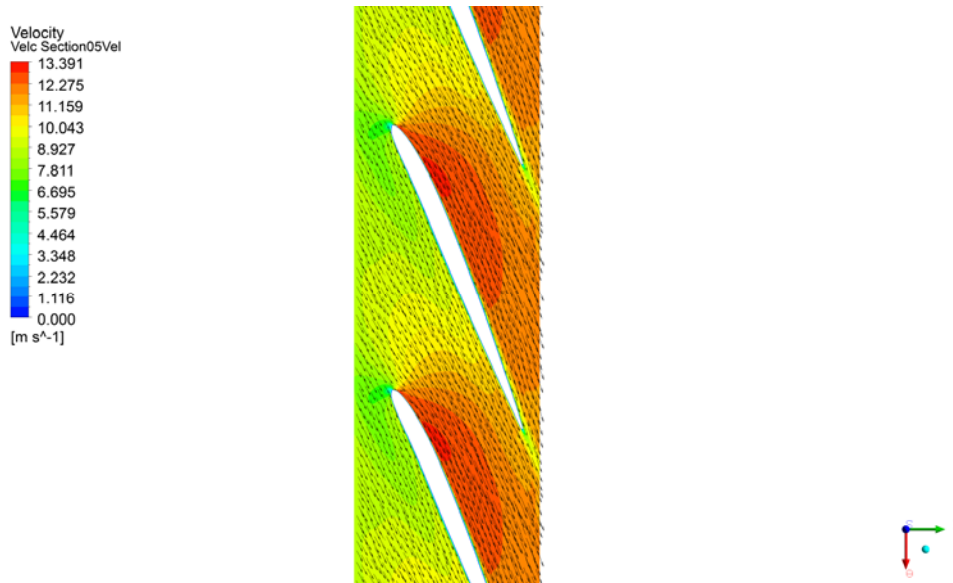


Fig. D3: Andamento della velocità nella sezione a span 0.5, nella girante.

Per abbinare alla figura la relativa legenda, basta cliccare sul comando *Legend* (vedi Fig. D2) e inserire la variabile corretta.

Un'ulteriore utile funzione è la *Streamline* (vedi Fig. D2) che permette di tracciare le traiettorie delle particelle fluide all'interno di un volume o su una superficie, al fine di comprendere meglio le modalità con cui il fluido si sposta all'interno del dominio simulato.

In *CFD-Post 14.5* è possibile anche generare delle nuove variabili. Tramite la funzione *Variable*, infatti, si possono definire tutte le grandezze necessarie allo studio della macchina, utilizzando eventualmente anche quelle già esistenti durante la loro costruzione.

Le variabili prese in considerazione sono state le seguenti:

$$C_m = \text{abs}(\text{Velocity Meridional});$$

$$C_u = \text{abs}(\text{Velocity in Stn Frame Circumferential});$$

$$\text{Alfa} = \text{atan}(C_m/C_u);$$

$$\text{Beta} = \text{atan}(C_m/W_u);$$

$$\text{Pressure [m]} = (\text{Pressure-massFlowAve(Pressure)@Outflow})/997[\text{kg m}^{-3}]/g;$$

$$\text{Total Pressure [m]} = (\text{Total Pressure-massFlowAve(Pressure)@Outflow})/997[\text{kg m}^{-3}]/g.$$

Come già visto per il pre-processore²¹, anche nel post-processore è possibile creare delle espressioni cliccando su *Expressions*. Per ottenere i valori di rendimento e perdite, sono state calcolate le seguenti espressioni:









 Ht	$P/(g*997[\text{kg m}^{-3}]*\text{Portata})$
 Ht1	massFlowAve(Total pressure m)@Inflow
 Ht2	massFlowAve(Total pressure m)@A to B Side 1
 Ht3	massFlowAve(Total pressure m)@B To C Side 1
 Ht4	massFlowAve(Total pressure m)@C To D Side 1
 Ht5	massFlowAve(Total pressure m)@D To E Side 2
 Ht6	massFlowAve(Total pressure m)@Outflow
 Htot	Ht1-Ht6

Fig. D4: *Expressions* utilizzate nel *CFD-Post*.

Si ricorda che le espressioni necessarie per definire le nuove variabili vanno scritte secondo delle precise regole sintattiche. Due sono le più importanti:

- i valori numerici devono sempre essere accompagnati dall'unità di misura. Questa va scritta tra parentesi quadre indicando la potenza di ogni unità utilizzata (es. per indicare un'accelerazione: 9,8 [m¹ s⁻²]);
- se nella definizione di nuove grandezze compaiono quelle già presenti in *CFD-Post*, è necessario richiamarle con la loro precisa definizione, che può essere attinta dalla lista presente sotto la voce *Variables* della finestra di sinistra dello schermo.

Un ulteriore utile strumento di visualizzazione dei risultati presente in *CFD-Post* è rappresentato dalla funzione *Table* (vedi Fig. D2). Tramite questo comando è possibile visualizzare in una tabella tutte le variabili e le espressioni costruite.

Infine, dalla finestra *Turbo* (vedi Fig. D5), si possono costruire dei grafici dei valori delle componenti della velocità, pressione o angoli del fluido, in funzione della posizione dove si vuole fare il rilievo. In questo lavoro di tesi, è stato utile rilevare le componenti della velocità in funzione dello span (cioè della distanza radiale tra mozzo e corona), all'ingresso e all'uscita della girante.

²¹ Vedi Appendice C.

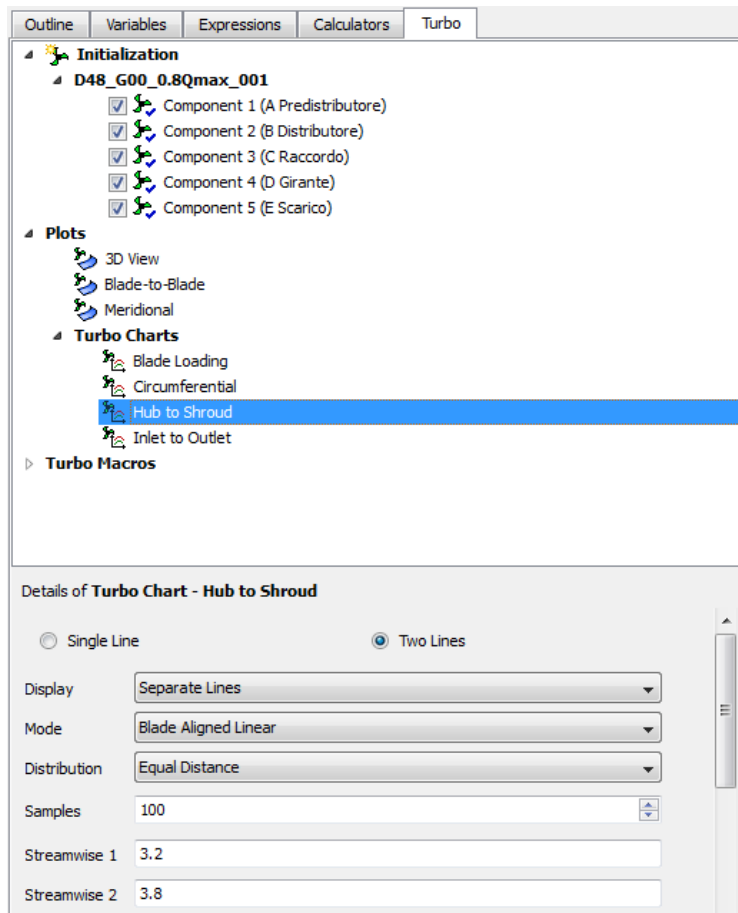


Fig. D5: Creazione delle *Turbo Charts*.

Tenendo presente la figura D5, selezionare *Hub To Shroud* per ottenere la finestra dalla quale impostare la *Turbo Chart*. Da qui è possibile selezionare *Two Lines*, per ottenere la media di due valori alla volta, rispetto allo span, nello stesso grafico. La modalità di raccolta dei dati è seguendo la linea radiale della pala della girante (*Blade Aligned Linear*). Lo *Streamwise* infine riguarda la posizione relativa lungo la linea meridiana, nella quale viene fatto il rilievo. Ad esempio, se i due rilievi sono stati fatti nelle posizioni 3.2 e 3.8, significa che 3.2 = componente numero 3, e posizione 2/10 all'interno del componente; 3.8 = componente numero 3, e posizione 8/10 all'interno del componente (il componente numero 3 è la girante perché il predistributore, che è in prima posizione, parte dal numero 0). Il risultato è quello mostrato in figura D6.

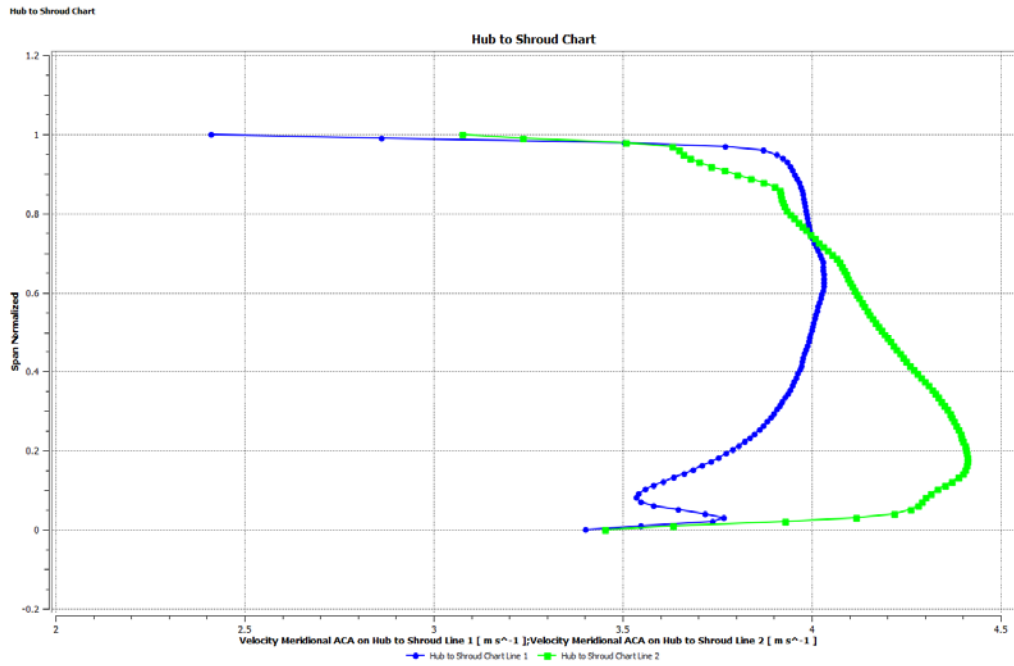


Fig. D6: *Turbo Chart* della velocità meridiana in funzione dello span.

Per esportare i dati dalla *Turbo Chart*, basta cliccare il tasto *Export*.

Infine è possibile esportare i risultati voluti, ovvero immagini, tabelle e grafici, andando a creare un file *.HTML di raccolta dati. Selezionare col tasto destro *Report*, all'interno della finestra *Outline*, e cliccare *Publish*.

Bibliografia

- G. Ventrone, “*MACCHINE per allievi Ingegneri*”, Cortina, Padova, 2002
- G. Pavesi, Appunti di “*Macchine*”, Padova, 2011
- G. Ardizzon, Appunti di “*Macchine 2*”, Padova
- G. Pavesi, Appunti di “*Macchine per fonti rinnovabili*”, Padova, 2013
- G. Pavesi , “*MiniHydro, Notes for Students*”, Padova, 2013
- *ANSYS User’s Guides*, Southpointe, 2009

