

# POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale  
Corso di Laurea in Ingegneria Aeronautica



## ANALISI NUMERICA DEL CAMPO DI MOTO INTORNO AD UN GENERATORE EOLICO AD ASSE VERTICALE

Relatore: Prof. Alberto GUARDONE  
Co-relatore: Ing. Valentina MOTTA

Tesi di laurea di:  
Michele NINI  
Matr. 766208

Anno Accademico 2011 - 2012



# Ringraziamenti

E' doveroso spendere due per dire grazie a tutte le persone che, in un modo o nell'altro, mi hanno aiutato ad arrivare alla fine di questo percorso. Naturalmente il primo pensiero va alla mia famiglia: a mio padre e mia madre, a mio fratello, a mia cognata e a mio nipote Ettore che è nato cinque anni fa, quando mi aggiravo per Milano, in attesa di un posto letto, e questo giorno sembrava soltanto una lontana utopia.

Poi ovviamente un grazie a tutti miei amici sparsi tra Collelungo e Milano, passando per Todi.

Infine i ringraziamenti istituzionali: un grazie innanzitutto al mio relatore, il prof. Alberto Guardone e a Valentina Motta, senza la quale non sarei mai riuscito a scrivere oggi questi parole. Un grande grazie infine a Massimo Biava, per le sue innumerevoli e indispensabili consulenze.



# Prefazione

Di pari passo con lo sviluppo tecnologico, negli ultimi decenni, è aumentato il fabbisogno energetico globale. La principale fonte di energia è rappresentata dai combustibili fossili, ma, negli ultimi anni, a causa del progressivo esaurirsi di tali fonti e di una crescente sensibilità per le tematiche ambientali, è aumentata l'importanza delle fonti rinnovabili. Tra queste un ruolo chiave è ricoperto dall'energia eolica.

Oltre alle classiche turbine ad asse orizzontale, efficienti e adatte a fornire potenze elevate, sta aumentando l'interesse verso i generatori di piccole dimensioni ad asse verticale. Questi infatti sono più facilmente integrabili nell'architettura e più adatti a contesti urbani, data la loro bassa rumorosità e la maggiore insensibilità alle variazioni di direzione del vento. La disponibilità di generatori eolici efficienti è quindi un problema di grande importanza, e la loro progettazione non può prescindere da uno studio aerodinamico adeguato.

Lo scopo del lavoro di tesi qui presentato è lo studio numerico del campo di moto intorno ad un generatore eolico ad asse verticale. L'aerodinamica in gioco è particolarmente complessa e tutt'ora non pienamente compresa: il flusso è fortemente tridimensionale e vi sono fenomeni di stallo dinamico legati alla variazione di incidenza delle pale durante il moto. Particolare attenzione è stata rivolta allo studio del campo di velocità e dei fenomeni vorticosi, come ad esempio la formazione dei vortici di estremità, studiando il campo di moto su più piani. Lo studio è stato realizzato su un modello di VAWT (*Vertical Axis Wind Turbine*) a tre pale rettilinee. Sono state eseguite delle simulazioni numeriche (CFD), sfruttando le equazioni RANS; il solutore scelto per lo scopo è il software ROSITA. Le simulazioni sono state effettuate sfruttando l'ipotesi di simmetria del flusso rispetto al piano orizzontale. I risultati numerici infine sono stati confrontati con risultati sperimentali frutto di precedenti attività in galleria.

Parole chiave: Energia eolica, turbine eoliche ad asse verticale, CFD, RANS



# Abstract

As a consequence of the technological development, the world's energy demand has rapidly risen, becoming one of the most significant modern issues. Coal and other fossil fuels are the fundamental energy sources, but in recent years the depletion of these sources, together with the global warming problem has increased the interest about alternative and sustainable energy sources.

Wind power represents one of the most important and promising renewable alternatives to fossil fuels. A wind turbine is the device used to produce mechanical and electrical energy. Wind turbines can be classified in HAWT Horizontal Axis Wind Turbine and VAWT Vertical Axis Wind Turbine. The first category is the most common but VAWTs show some benefit like the insensibility to the wind direction and are more suitable for urban environment.

For this reason the VAWTs represent an interesting solution. In order to project an efficient turbine we should know the aerodynamic field.

The purpose of this work is to study the aerodynamic fields of vertical axis wind turbine, using the CFD. ROSITA, the software used for the analysis, includes a RANS equations solver and a Spalart-Allmaras turbulence model. The aerodynamic field is very complicated as result of the tridimensional nature of the flux, the possible presence of dynamic stall due to the incidence variation during the rotation, and the tip vortex.

The investigated wind turbine has three straight blades, and in the numerical simulation we assume the symmetry in the plane horizontal plane in order to reduce the computational effort.

Finally, the numerical results have been compared with experimental test.

Key words: wind energy, vertical axis wind turbine, CFD, RANS





# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>9</b>
1.1	Aspetti generali dell'energia eolica . . . . .	9
1.2	VAWT vs HAWT . . . . .	9
1.3	Modelli numerici per i VAWT . . . . .	10
1.4	Presentazione del lavoro di tesi . . . . .	11
<b>2</b>	<b>Aspetti aerodinamici generali</b>	<b>13</b>
2.1	Stallo dinamico . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Solutore numerico</b>	<b>17</b>
3.1	ROSITA . . . . .	17
3.1.1	Equazioni RANS . . . . .	17
3.1.2	Modello di Spalart-Allmaras . . . . .	18
3.1.3	Discretizzazione delle equazioni . . . . .	18
3.2	Algoritmo Chimera . . . . .	20
<b>4</b>	<b>Descrizione delle simulazioni</b>	<b>27</b>
4.1	Modello del generatore . . . . .	27
4.2	Griglia di calcolo originale . . . . .	27
4.3	Griglia modificata . . . . .	30
4.3.1	Ipotesi di simmetria . . . . .	30
4.3.2	Dettaglio griglie . . . . .	30
4.4	Tagging . . . . .	31
4.5	Parametri simulazione . . . . .	35
<b>5</b>	<b>Simulazione griglia originale</b>	<b>37</b>
<b>6</b>	<b>Simulazione con ipotesi di simmetria</b>	<b>41</b>
6.1	Campo di moto nel piano YZ . . . . .	41
6.1.1	Periodicità . . . . .	41
6.1.2	Studio dei vortici . . . . .	43
6.2	Campo di moto nel piano XY . . . . .	44
6.3	Vortici di estremità . . . . .	48

---

<b>7</b>	<b>Confronto con i risultati sperimentali</b>	<b>51</b>
7.1	Descrizione prove sperimentali . . . . .	51
7.2	Media in fase . . . . .	52
7.3	$U/U_\infty$ nel piano di misura . . . . .	53
7.4	Caduta di pressione totale . . . . .	55
7.5	Coefficiente di spinta . . . . .	56
<b>8</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>59</b>
8.1	Possibili lavori futuri . . . . .	59
<b>A</b>	<b>Simulazione numerica TSR= 1.52</b>	<b>61</b>
A.1	Campo di moto nel piano YZ . . . . .	61
A.2	Campo di moto nel piano XY . . . . .	62
	<b>Elenco delle figure</b>	<b>68</b>
	<b>Elenco delle tabelle</b>	<b>69</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>71</b>

# Capitolo 1

## Introduzione

### 1.1 Aspetti generali dell'energia eolica

Una delle sfide più importanti per l'uomo in questo periodo storico è quella di coniugare la crescente richiesta energetica nell'ambito di uno sviluppo sostenibile. In quest'ottica appare evidente l'importanza, nel presente e soprattutto nel futuro prossimo, delle fonti di energia rinnovabili.

Attualmente i combustibili fossili, ed in particolare il carbone, coprono la quota maggiore del fabbisogno energetico mondiale, ma le fonti rinnovabili sono in rapida ascesa: secondo il rapporto della IEA *International Energy Agency* [1] entro il 2035 rappresenteranno la prima fonte energetica mondiale e già nel 2015 saranno al secondo posto.

Tra le principali fonti rinnovabili troviamo l'energia eolica. L'eolico ha già un ruolo di primo piano in paesi come la Danimarca, dove copre il 28% del fabbisogno energetico, e in Irlanda, Spagna, Scozia dove si hanno delle condizioni di vento ottimali. In Italia pur mancando tali condizioni, con parziali eccezione per alcune regioni del Sud, l'eolico garantisce comunque circa il 20% dell'energia da fonte rinnovabile ed il 3% del computo totale [2],[3]. La potenza installata a fine 2011 è pari a 6747 MW dato che colloca l'Italia al terzo posto in Europa per potenza installata dietro Francia e Germania, con un aumento rispetto all'anno precedente del 19% (dati EWEA).

### 1.2 VAWT vs HAWT

I generatori eolici si differenziano in due categorie: generatori ad asse orizzontale (HAWT) *Horizontal Axis Wind Turbine* e generatori ad asse verticale (VAWT) *Vertical Axis Wind Turbine*.

I primi sono i più comuni e attualmente presentano dei vantaggi in termini di costo dell'energia prodotta. Tali generatori possono raggiungere grandi dimensioni e sono in grado di generare considerevoli potenze, specie se installati in parchi eolici

su terra e soprattutto in impianti *off-shore* in mare data l'assenza di strato limite terrestre e di vincoli sul rumore che limitano la velocità all'estremità delle pale. Questo genere di impianti è sensibile alla direzione del vento ed è in genere dotato di sistemi di controllo più o meno complessi, sia passivi che attivi, per ruotare il disco del rotore e, nei casi più complessi, per ottimizzare il passo delle pale in funzione dell'intensità del vento. Esiste una vasta letteratura su questa tipologia di generatori, come testi di riferimento generale di possono citare : [5], [6].

I generatori ad asse verticale hanno dalla loro una minore rumorosità, dovuta alla minore velocità in tip e sono insensibili alle variazioni del vento in direzione normale all'asse del rotore; quindi possono fare a meno del sistema di controllo, caratteristica che rende le macchine più semplici e meno costose. Un ulteriore aspetto che rende la progettazione dei VAWT meno problematica, è la possibilità di inserire gli organi di trasmissione e conversione dell'energia direttamente a terra riducendo quindi i problemi di spazio e i costi di manutenzione.

Questi aspetti, uniti anche a considerazioni di natura estetica e di impatto visivo, garantiscono una maggiore integrabilità architettonica rendendo i VAWT estremamente interessanti per impianti di piccole dimensioni adatti a contesti urbani [8].

Esistono varie tipologie di generatori ad asse verticale, i più comuni sono i cosiddetti *Darrieus*. Questi generatori, a differenza dei Savonius che sfruttano la resistenza, lavorano sfruttando la portanza e sono caratterizzati da pale fisse che possono essere, come nella versione originale, curve ( come ad esempio il rotore *Troposkien*) o rettilinee (rotori H-Darrieus o *Musgrove*).

Per i VAWT non esiste una vasta letteratura come per gli HAWT, tuttavia un ottimo riferimento è rappresentato dal testo di *Ion Paraschivoiu* [7].

### 1.3 Modelli numerici per i VAWT

L'aerodinamica di un generatore eolico ad asse verticale è estremamente complessa, il moto di rivoluzione delle pale porta a separazioni cicliche e fenomeni di stallo dinamico. Inoltre il campo di moto è fortemente tridimensionale.

Per questi motivi spesso sono utilizzati dei modelli semplificativi, tra i più comuni vi sono i BEM (*Blade Element Momentum*) che combinano l'approccio del disco attuatore e la teoria dell'elemento di pala. Tali modelli possono essere applicati anche separando il campo di moto in più tubi di flusso indipendenti (*Multiple Streamtube*) o suddividendo il disco attuatore in due zone, una monte e una a valle del VAWT, modello DMS (*Double-Multiple Streamtube*) [10].

Modelli differenti come i *vortex method* [11] utilizzano come incognite principali la circolazione e la vorticità, portando a dei miglioramenti per quanto riguarda la simulazione dei fenomeni instazionari come la formazione dei vortici di estremità,

ma anche ad un aumento del costo computazionale.

Una strategia alternativa è quella fornita della CFD *Computational Fluid Dynamics*. Normalmente vengono utilizzate le equazioni RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*), anche nel presente lavoro è stata scelta questa strada scegliendo come modello di turbolenza il modello di *Spalart-Allmaras*. Nel cap. 2.2 verranno delineati gli aspetti principali delle RANS e del modello sopra citato. Risultati più accurati sono ottenibili utilizzando la tecnica LES (*Large Eddy Simulation*), che esegue un'operazione di filtraggio e modella soltanto le scale più piccole della turbolenza.

Una via intermedia tra LES e RANS è offerta dalla DES (*Detached Eddy Simulation*), in questo caso le due tecniche vengono alternate in funzione della zona in cui si effettua il calcolo, ad esempio nelle zone vicino alle pareti si predilige l'utilizzo RANS, in questo modo si possono ottenere risultati più accurati rispetto a quest'ultime limitando l'aumento di costo [16].

Infine, l'ultima possibilità è quella dell'integrazione diretta delle equazioni di Navier-Stokes tramite la DNS (*Direct Numerical Simulation*). Chiaramente un approccio di questo tipo provoca un grande incremento in termini di costo computazionale difficilmente sostenibile, se non impossibile, anche per i più moderni calcolatori.

## 1.4 Presentazione del lavoro di tesi

Lo scopo del lavoro qui presentato è lo studio dell'aerodinamica di un generatore eolico ad asse verticale realizzato per scopi di ricerca dalla società *Tozzi Nord Wind Turbines* di Trento (IT).

Per lo studio del campo di moto sono state effettuate delle simulazioni CFD, sfruttando l'ipotesi di simmetria rispetto al piano normale all'asse in modo da ridurre il costo computazionale. I risultati numerici così ottenuti sono stati confrontati con delle prove sperimentali, realizzate da Battisti, Zanne et Al nella galleria del vento del Politecnico di Milano, a parità di condizioni per il medesimo generatore [17].

A seguire è riportata una breve sintesi dei prossimi capitoli:

- Capitolo 2: nel secondo capitolo saranno descritti gli aspetti generali dell'aerodinamica di un generatore eolico ad asse verticale, come la formazione dei vortici di estremità e lo stallo dinamico.
- Capitolo 3: descrizione generale del solutore numerico ROSITA, delle equazioni RANS, del modello di *Spalart-Allmaras* utilizzato dal programma e degli aspetti numerici della discretizzazione delle equazioni. Nel secondo paragrafo

è riportata una descrizione dell'algoritmo *Chimera* utilizzato dal solutore per unire le griglie in movimento reciproco nei punti di sovrapposizione.

- Capitolo 4: descrizione delle simulazioni numeriche effettuate. Verranno presentate in modo dettagliato le griglie di calcolo utilizzate e le modifiche effettuate sfruttando l'ipotesi di simmetria. Saranno riportati i dati relativi alle dimensioni del generatore, alle condizioni operative simulate e ai parametri numerici utilizzati.
- Capitolo 5: in questo capitolo sono riportati i risultati relativi alla simulazione effettuata sulla griglia originale, senza utilizzare l'ipotesi di simmetria. Verrà posta l'attenzione sui problemi causati dall'effetto di interferenza causato dalla vicinanza della parte inferiore della griglia.
- Capitolo 6: analisi del campo di moto a partire dai risultati ottenuti, per la stessa configurazione operativa precedente, utilizzando la griglia modificata con condizioni di simmetria. Verranno presentati i grafici relativi al campo di velocità, pressione e vorticità in vari piani, al fine di studiare gli aspetti caratteristici del campo di moto come le zone di stallo dinamico e i vortici di estremità.
- Capitolo 7: confronto con i risultati sperimentali precedentemente citati.
- Capitolo 8: conclusioni, limiti del lavoro e presentazione di possibili sviluppi futuri.

# Capitolo 2

## Aspetti aerodinamici generali

L'aerodinamica di un generatore eolico ad asse verticale è caratterizzata da una serie di aspetti specifici e complessi. In primo luogo troviamo gli effetti di interferenza tra le pale, evidenti soprattutto durante il passaggio nella zona di *downwind*, dove si ha anche l'effetto non trascurabile della scia dell'albero.

La complessità del campo di moto è ulteriormente accentuata dalla presenza dei vortici di estremità. La pala infatti, esattamente come un'ala, genera portanza e la differenza di pressione fra la superficie interna e quella esterna porta alla formazione dei vortici. Questi vengono rilasciati durante tutto il moto e sono trasportati verso valle dalla velocità asintotica. La loro intensità dipende dalla velocità del vento relativo, è evidente quindi che i vortici generati dalla pala avanzante saranno ben più intensi di quelli generati dalla pala retrocedente.

Perciò, a causa della rotazione, l'unico piano di simmetria per il campo di moto è quello normale al rotore, simmetria che peraltro perdiamo nel caso di vento non orizzontale [22].

Il moto di rotazione però ha anche una conseguenza più importante: la combinazione tra la velocità del vento e la velocità angolare della turbina causa una variazione dell'angolo di incidenza durante tutto il periodo, come è mostrato nella figura 2.1

L'incidenza è data da:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{U_\infty \sin(\theta)}{\Omega R + U_\infty \cos(\theta)}\right) = \arctan\left(\frac{\sin(\theta)}{\lambda + \cos(\theta)}\right) \quad (2.1)$$

dove con  $\lambda$  è stato indicato il TSR *Tip Speed Ratio* ( $\frac{\Omega R}{V_\infty}$ ).

La variazione di incidenza porta, per TSR bassi, all'insorgere di fenomeni di stallo dinamico. Questi sono stati evidenziati soprattutto tra i 90° e i 180°; nella zona di *downwind* tali fenomeni sono limitati dall'azione del vento che tende ad allontanare la scia vorticoso al profilo. Nella zona di *upwind*, al contrario, l'azione del vento tende a portare sul dorso del profilo i vortici formati sul bordo d'attacco e sul bordo d'uscita prolungando lo stallo. In alcune articoli

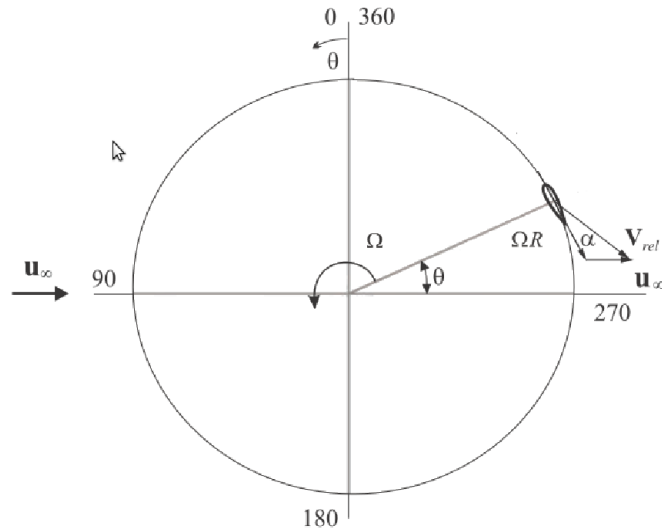


Figura 2.1: Sistema di riferimento - Fonte [7]

(ad esempio [9] e [25]) è stata evidenziata in questa zona la formazione di due coppie di vortici controrotanti. Nel paragrafo successivo è riportata una rapida descrizione degli aspetti caratteristici dello stallo dinamico.

## 2.1 Stallo dinamico

Un profilo sottoposto a una variazione dinamica dell'incidenza, raggiunge lo stallo ad angoli più elevati rispetto al caso stazionario. Questo fenomeno è dovuto essenzialmente alla formazione di un vortice sul dorso del profilo, all'altezza del bordo d'attacco. Il vortice fa variare la distribuzione di pressione portando ad un aumento della portanza, questa continua ad aumentare fin quando il vortice non raggiunge il bordo di uscita. A questo punto si ha una separazione netta con una brusca caduta di portanza unita ad un forte aumento di resistenza.

Una delle caratteristiche dello stallo dinamico è che, una volta avvenuta la separazione, diminuendo l'incidenza non si hanno più gli stessi valori di coefficiente di portanza, come invece avviene nel caso stazionario 2.2.

Lo stallo dinamico ha importanti conseguenze non solo per l'aerodinamica ma anche da un punto di vista strutturale, può causare infatti forti vibrazioni aeroelastiche con conseguente riduzione della vita a fatica delle pale.



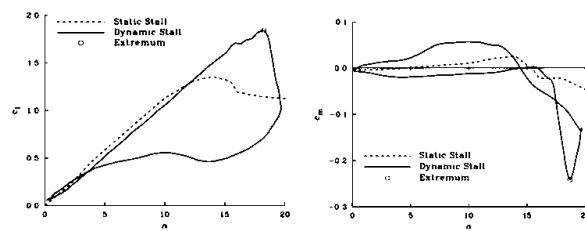


Figura 2.2: Curve di  $C_L$  e  $C_D$  per un rotore in stallo dinamico



# Capitolo 3

## Solutore numerico

### 3.1 ROSITA

ROSITA (*ROtorcraft Software Italy*) è un codice CFD in grado di risolvere le equazioni RANS utilizzando il modello di turbolenza di *Spalart-Almaras*. ROSITA opera con gas perfetti comprimibili sia in condizioni stazionarie che instazionarie, adottando un approccio ai volumi finiti. Una delle caratteristiche principali del programma è l'utilizzo di griglie multi-blocco mobili accoppiate tra loro dall'algoritmo *CHIMERA* (cap. 2.2).

A seguire è riportata una rapida descrizione del solutore, è stata seguita la traccia fornita da [18], e a questa si rimanda per una lettura più approfondita.

#### 3.1.1 Equazioni RANS

Le equazioni RANS (3.2), integrate da *ROSITA*, sono ricavate applicando l'operatore di media nel tempo alle equazioni di *Navier-Stokes*. Lo scopo di questa operazione è quello di fornire una descrizione statistica dei flussi turbolenti che porti ad una riduzione delle dimensioni del problema.

Per semplicità, data l'ipotesi di fluido comprimibile, è conveniente utilizzare una media pesata con la densità:

$$\bar{\mathbf{u}} = \frac{\langle \rho \mathbf{u} \rangle}{\langle \rho \rangle} \quad (3.1)$$

In questo modo possiamo definire una fluttuazione di velocità che indicheremo  $\mathbf{u}''$ , in maniera tale da non confonderla con la fluttuazione rispetto al campo medio standard, solitamente indicata in letteratura con  $\mathbf{u}'$ .

Applicando l'operatore di media definito dalla (3.1) alle equazioni di Navier-Stokes otteniamo:

$$\begin{cases} \frac{\langle \partial \rho \rangle}{\partial t} + \nabla \cdot \langle \rho \rangle \bar{\mathbf{u}} = \mathbf{0} \\ \frac{\partial \langle \rho \rangle \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + \nabla \cdot (\langle \rho \rangle \bar{\mathbf{u}} \otimes \bar{\mathbf{u}} + \langle \mathbf{P} \rangle \mathbf{I} - \langle \mu \tau \rangle + \langle \rho \mathbf{u}'' \otimes \mathbf{u}'' \rangle) = \mathbf{0} \\ \frac{\partial}{\partial t} [\langle \rho \rangle (\bar{e}^t + k)] + \nabla \cdot [\langle \rho \rangle (\bar{h} + \frac{1}{2} |\bar{\mathbf{u}}|^2 + k) \bar{\mathbf{u}}] - \\ \nabla \cdot [(\langle \mu \tau \rangle - \langle \rho \bar{\mathbf{u}}' \otimes \bar{\mathbf{u}}' \rangle) \cdot \bar{\mathbf{u}} - K \nabla \bar{T} + \mathbf{q}_t] = \mathbf{0} \end{cases} \quad (3.2)$$

In cui:  $\langle \mu \tau \rangle = -\frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \bar{\mathbf{u}}) \mathbf{I} + \mu (\nabla^T \bar{\mathbf{u}} + \nabla \bar{\mathbf{u}})$ ,  $\mathbf{q}_t = \langle \rho \mathbf{h}'' \mathbf{u}'' \rangle$  e  $k$  rappresenta l'energia cinetica turbolenta.

L'operazione di media introduce un nuovo tensore incognito:  $-\langle \rho \mathbf{u}' \otimes \mathbf{u}' \rangle$  che viene definito *tensore degli sforzi di Reynolds*. Per ottenere la chiusura del sistema occorre quindi modellare opportunamente questo termine.

### 3.1.2 Modello di Spalart-Allmaras

Una possibile soluzione al problema della chiusura delle equazioni RANS è fornita dall'ipotesi di Boussinesq. Questa approssima il tensore degli sforzi di Reynolds a partire dal tensore gradiente medio di deformazione e da un coefficiente di viscosità turbolenta  $\nu_t$ . A differenza dei noti modelli  $k - \epsilon$  e  $k - \omega$ , anch'essi basati sull'ipotesi di Boussinesq, il modello di Spalart-Allmaras [20] è costituito da un' unica equazione di trasporto:

$$\frac{\partial \rho \nu_t^*}{\partial t} + \nabla \cdot \left[ \rho \nu_t^* - \frac{\mu + \rho \nu_t^*}{\sigma_{SA}} \nabla \nu_t^* \right] = S_\nu \quad (3.3)$$

$S_\nu$  è un termine di sorgente dipendente da funzioni adimensionali che possono essere modificate a seconda del campo di moto in esame (nel caso specifico, per questi e anche per i successivi parametri del modello, sono stati mantenuti valori di default);  $\sigma_{SA}$  è una costante adimensionale e  $\nu_t^*$  viene definita variabile di Spalart-Allmaras. Quest'ultima è legata alla viscosità turbolenta dalla relazione:

$$\nu_t = \nu_t^* f_{v1} \quad (3.4)$$

dove  $f_{v1}$  è una costante adimensionale minore di uno.

Quindi, risolvendo l'equazione (3.3) e sfruttando la relazione (3.4), è possibile modellare il tensore degli sforzi di Reynolds in modo da chiudere il problema.

### 3.1.3 Discretizzazione delle equazioni

#### Discretizzazione spaziale

La discretizzazione spaziale delle equazioni avviene eseguendo un' implementazione ai volumi finiti nel centro delle celle. A titolo di esempio riportiamo

sinteticamente i passi che portano alla discretizzazione delle equazioni di Navier-Stokes. Per arrivare alla formulazione definitiva partiamo dalle equazioni in forma integrale:

$$\frac{\partial}{\partial t} \oint_{V_{ijk}} \mathbf{W} dV + \int_{S_{ijk}} (\mathbf{F}_c \cdot \mathbf{n} - \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} \mathbf{W}) dS - \int_{S_{ijk}} \mathbf{F}_d \cdot \mathbf{n} dS = \oint_{V_{ijk}} \mathbf{S} dV \quad (3.5)$$

dove con  $V_{ijk}$  è indicato il volume di controllo con superficie esterna  $S_{ijk}$ . Il vettore  $\mathbf{W}$  rappresenta le variabili conservative ( $\mathbf{W} = [\rho, \rho u, \rho v, \rho w, \rho e^t]^T$ ) mentre con  $\mathbf{F}_c$  e  $\mathbf{F}_d$  sono indicati rispettivamente i tensori di flusso convettivo, funzione di  $\mathbf{W}$ , e diffusivo ( $\mathbf{F}_d = \mathbf{F}_d(\mathbf{W}, \nabla \mathbf{W})$ ).

A destra infine abbiamo un termine sorgente legato al movimento del sistema di riferimento utilizzato rispetto a quello assoluto.

Effettuando la discretizzazione, si arriva a ridefinire il sistema (3.5) in forma di equazioni differenziali ordinarie; l'incognita è rappresentata dall'evoluzione del flusso delle variabili conservative tra i centri dei volumi di controllo:

$$\frac{d}{dt} (V\mathbf{W})_{ijk} + \mathbf{R}_{ijk} = \mathbf{0}, \quad (3.6)$$

$\mathbf{R}_{ijk}$  è il bilancio del flusso a cavallo della superficie  $S_{ijk}$ , e può essere riscritto come:

$$\mathbf{R}_{ijk} = (\mathbf{Q}_c)_{ijk} - (\mathbf{Q}_d)_{ijk} - \mathbf{S}_{ijk} \quad (3.7)$$

In questo modo si evidenziano rispettivamente il contributo convettivo, quello diffusivo (legato agli effetti viscosi) e il termine di sorgente precedentemente citato.

Il flusso convettivo viene approssimato con un'accuratezza del secondo ordine, utilizzando lo schema Roe-MUSCL con un limitatore di Van Albada, in modo da eliminare eventuali oscillazioni nella soluzione. Per quanto riguarda il contributo di diffusione invece viene utilizzata una discretizzazione centrata del secondo ordine.

## Discretizzazione temporale

La derivata nel tempo presente nel sistema (3.6) viene approssimata con uno schema BDF implicito del secondo ordine:

$$\frac{3(V\mathbf{W})_{ijk}^{n+1} - 4(V\mathbf{W})_{ijk}^n + 2(V\mathbf{W})_{ijk}^{n-1}}{2\Delta t} + \mathbf{R}_{ijk}^{n+1} = \mathbf{0} \quad (3.8)$$

Data la non linearità in  $\mathbf{W}_{ijk}^{n+1}$  dell'equazione (3.8), si introduce un nuovo problema ricorrendo al concetto di *pseudo-time*,  $t^*$ . Per ogni istante reale di tempo viene risolto, con un metodo di Eulero implicito, il seguente sistema:

$$\frac{\partial \mathbf{W}_{ijk}}{\partial t^*} + \frac{1}{V_{ijk}} \mathbf{R}^*(\mathbf{W})_{ijk} = \mathbf{0} \quad (3.9)$$

dove  $\mathbf{R}^*(\mathbf{W})_{ijk}$  rappresenta il residuo ed è dato da:

$$\mathbf{R}^*(\mathbf{W})_{ijk} = \frac{3(\mathbf{VW})_{ijk}^{n+1} - 4(\mathbf{VW})_{ijk}^n + 2(\mathbf{VW})_{ijk}^{n-1}}{2\Delta t} + \mathbf{R}(\mathbf{W})_{ijk} \quad (3.10)$$

Una volta raggiunta la soluzione statica della (3.9) si avrà che  $\mathbf{W}_{ijk} \rightarrow \mathbf{W}_{ijk}^{n+1}$  ottenendo così la soluzione dell'equazione BDF per il tempo reale considerato.

Procedimenti analoghi vengono utilizzati per effettuare la discretizzazione dell'equazione del modello di turbolenza di Spalart-Allmaras.

Una volta effettuata la discretizzazione nello spazio e nel tempo si ottiene un sistema lineare che si risolve utilizzando il metodo del gradiente coniugato generalizzato (GCG), preconditionato con la fattorizzazione BILU (*Block Incomplete Lower Upper*).

## 3.2 Algoritmo Chimera

La tecnica *Chimera* viene utilizzata nelle zone di sovrapposizione tra griglie in movimento. Generalmente si hanno delle griglie costruite intorno ai corpi in movimento più fitte che si sovrappongono alle griglie di background più lasche le quali, generalmente cartesiane, coprono la parte restante del dominio.

Il solutore risolve le equazioni PDE *Partial Differential Equation* nei *valid points* che costituiscono la gran parte dei punti, intesi come centro dei volumi di calcolo delle varie griglie. Nelle zone di sovrapposizione si hanno i cosiddetti *fringe points*, qui la soluzione verrà interpolata a partire dai valori ricavati da punti sulla griglia sovrapposta (*donor points*). I punti che non vengono utilizzati vengono infine chiamati *hole points*.

Per quanto riguarda l'interpolazione si distinguono due tipologie: esplicita e implicita. Nel primo caso i *fringe points* non possono allo stesso tempo essere donor, questo ha per conseguenza che l'interpolazione avviene utilizzando esclusivamente i valori ricavati dai *valid points*, nel caso implicito invece possono essere utilizzati anche i valori provenienti dai *fringe*. In ROSITA viene utilizzata una tecnica esplicita basata sul metodo di Chesshire e Henshaw [21].

Per la ricerca dei punti donor si definisce un indice di priorità: il valore maggiore viene tipicamente assegnato alla griglia più fitta, in genere quella intorno al corpo in movimento, mentre alla griglia di background si assegna il valore più basso: 1.

La tecnica Chimera può essere schematizzata sinteticamente in sei passi, a titolo di esempio consideriamo il sistema in (Fig.3.1) :

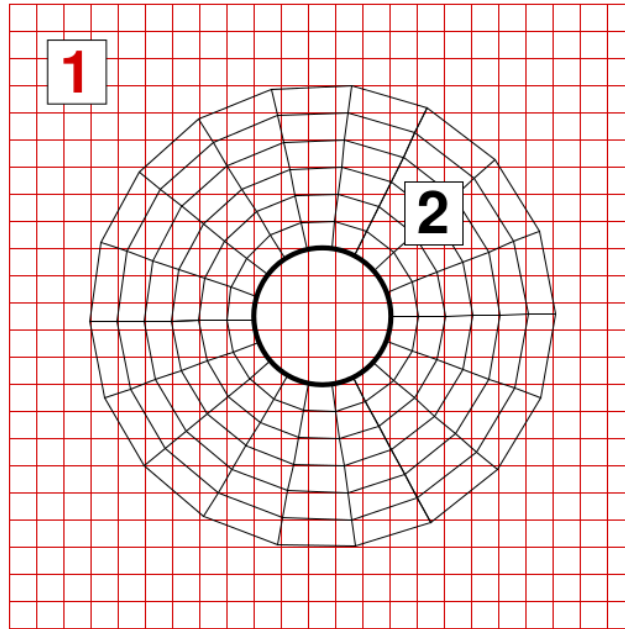


Figura 3.1: Esempio di griglie sovrapposte

### Passo 1: Inizializzazione

Come primo passo vengono definiti hole points i punti fantasma cioè esterni alla griglia costruita intorno al corpo, ma utilizzati per calcolare la soluzione all'interno della stessa. In questo modo i punti adiacenti, i cui valori dipendevano dai punti cancellati, diventano fringe points (Fig.3.2).

### Passo 2: Ricerca dei *seeds*

I *seeds* sono i punti cancellati per la presenza del corpo, intorno ai quali idealmente cresce una regione di hole points. A partire dalla griglia, o dalle griglie, contenenti il corpo solido sono considerati seeds tutti i punti appartenenti alle altre griglie sufficientemente vicini, tali punti vengono classificati come hole, (Fig. 3.3).

### Passo 3: Ricerca dei *donors*

Una volta attuati i primi due passi occorre procedere all'interpolazione per i punti (fringe) i cui valori dipendevano dagli hole points. Per prima cosa vengono identificati tutti i punti per poi passare all'interpolazione, utilizzando la griglia a

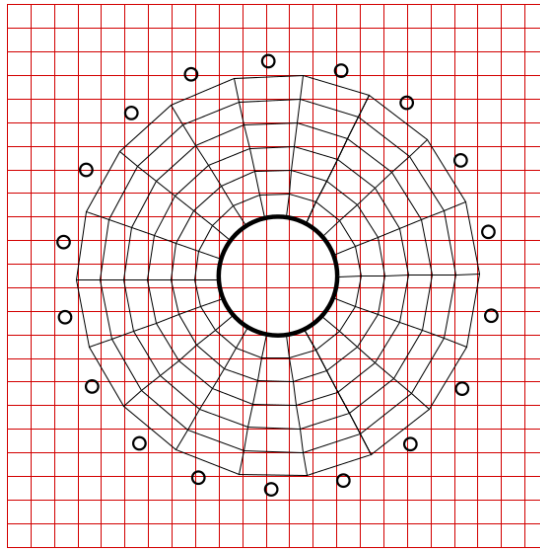


Figura 3.2: Passo 1: i cerchi neri rappresentano i punti contrassegnati come hole

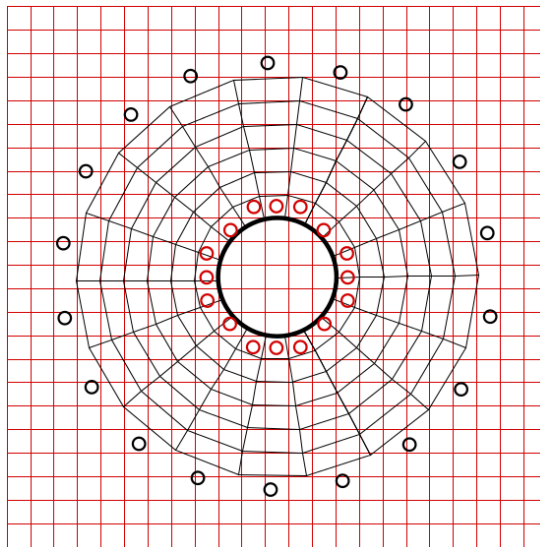


Figura 3.3: Passo 2: i cerchi rossi rappresentano i seed

priorità maggiore (Fig. 3.4); in questa prima fase l'algoritmo può utilizzare anche una tecnica implicita.

Successivamente ogni punto viene controllato per verificare se sia stato interpolato in modo esplicito. In caso contrario l'algoritmo cerca di ottenere un' interpolazione esplicita, inizialmente cercando di modificare l'assegnazione dei donori e poi cercando dei donori nelle griglie a priorità più bassa. Se il procedimento non porta ad alcun risultato il punto viene segnalato come implicito, generalmente questa è una situazione da evitare.



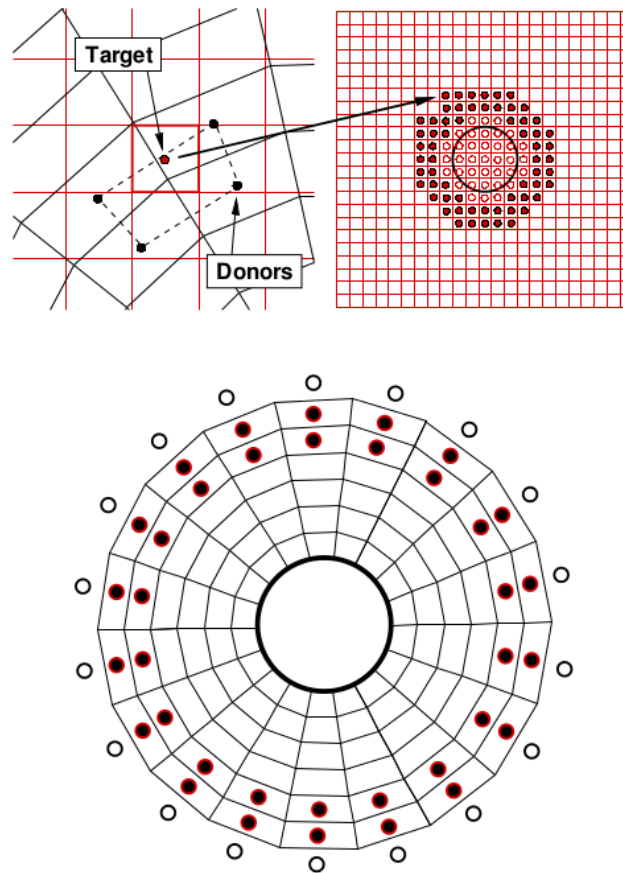


Figura 3.4: Passo 3: nella figura rappresentati i punti fringe e hole, in alto a destra quelli relativi alla griglia 1 (background), immediatamente sopra quelli relativi alla griglia 2

**Passo 4: Blocco dei *donors***

I punti donor identificati nel passo precedente vengono bloccati in maniera tale da non venire eliminati nel passo successivo.

**Passo 5: Cancellazione/promozione dei punti**

In questa fase i punti interpolati non necessari vengono eliminati, a questa categoria appartengono ad esempio i punti non bloccati al passo precedente. Allo stesso tempo i fringe points possono essere assimilati a normali punti se nelle zone limitrofe non sono presenti hole points. (Fig. 3.5)

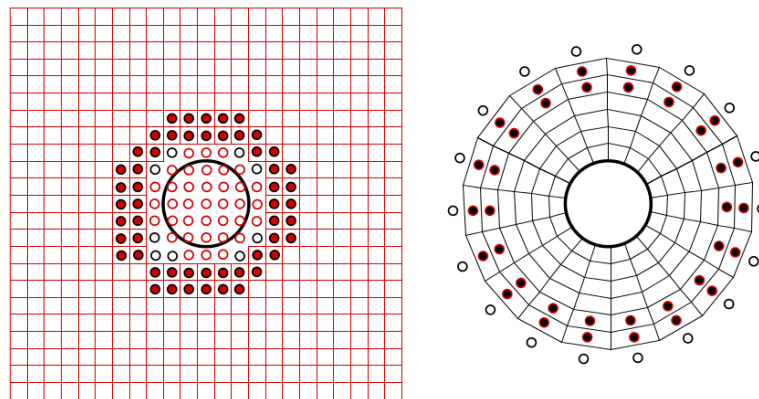


Figura 3.5: Passo 5: griglie 1 e 2 dopo la fase di cancellazione/promozione (in questo caso non c'è stata alcuna promozione)

**Passo 6: Verifica dell'interpolazione esplicita**

In questo passo tutti i donor vengono analizzati per verificare se sono o meno classificabili come valid points e si ha così la griglia definitiva (Fig. 3.6). I punti che non soddisfano questa richiesta vengono segnalati e rappresentano delle zone critiche.

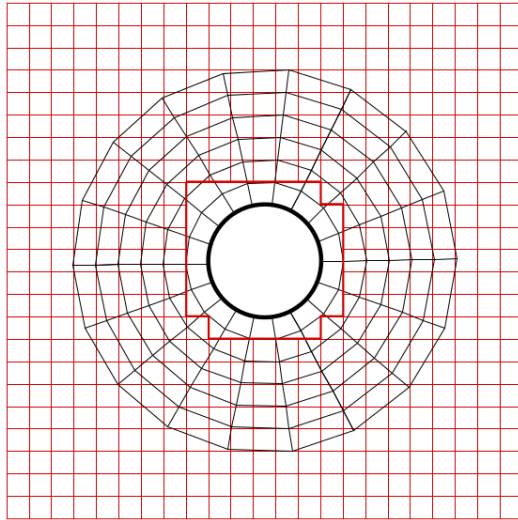


Figura 3.6: Passo 6: Griglia definitiva



# Capitolo 4

## Descrizione delle simulazioni

### 4.1 Modello del generatore

Il generatore eolico ad asse verticale studiato è stato realizzato dalla società società *Tozzi Nord Wind Turbines* di Trento (IT) per finalità di ricerca. Su questo modello è stata già condotta una serie di prove sperimentali (alcune delle quali verranno utilizzate successivamente per confrontare i risultati numerici) nell'ambito di un progetto congiunto con Università di Trento e Politecnico di Milano. Il rotore è costituito da tre pale rettilinee con un profilo NACA0021, collegate all'albero tramite due razze (Fig.4.1).

Nella seguente tabella riassuntiva (Tab. 4.1) sono riportate le dimensioni e i parametri tecnici del modello:

### 4.2 Griglia di calcolo originale

Inizialmente è stata utilizzata una griglia preesistente (Fig. 4.2 - 4.3) composta da quattro griglie:

Lunghezza pala ( $2H$ )	1.457m
Diametro rotore ( $D$ )	1.030m
Solidità ( $Nc/D$ )	0.25
Profilo pala	NACA0021
Corda profilo ( $c$ )	0.086m

Tabella 4.1: caratteristiche generali VAWT

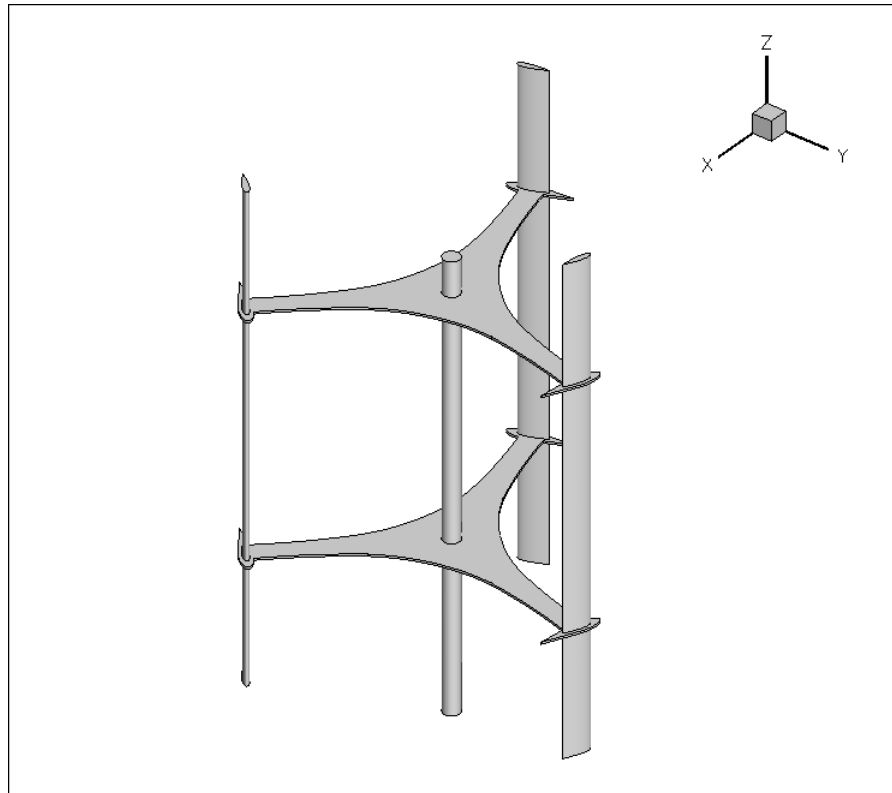


Figura 4.1: modello generatore VAWT

- *Griglia BackCoarse*: è la griglia più esterna e più lasca, è di tipo cartesiano e conta 395858 elementi. Le condizioni al contorno sono di tipo *farfield* per la superficie laterale e superiore e di tipo *wall inviscid* per il pavimento.
- *Griglia BackNear*: è il blocco che costituisce la zona più vicina al rotore, è anch'essa una griglia cartesiana contiene 4692240 celle.
- *Griglia Albero*: la griglia comprende l'albero e metà delle due razze che sostengono le pale, la griglia è infittita nelle zone dei contorni solidi a causa delle contorni di parete viscosa. Il numero di elementi che compongono la griglia è pari a 1344000.
- *Griglia Pala*: in questo blocco cilindrico è contenuta la pala e l'altra metà della razza. Intorno alla pala si ha una zona di celle estremamente fitte in maniera tale da avere una buona accuratezza anche in presenza degli effetti viscosi. La griglia contiene 2520842 elementi e viene chiamata tre volte dal solutore per costruire la griglia definitiva, in questo modo il contributo complessivo delle griglie di pala è di 7562526 elementi.

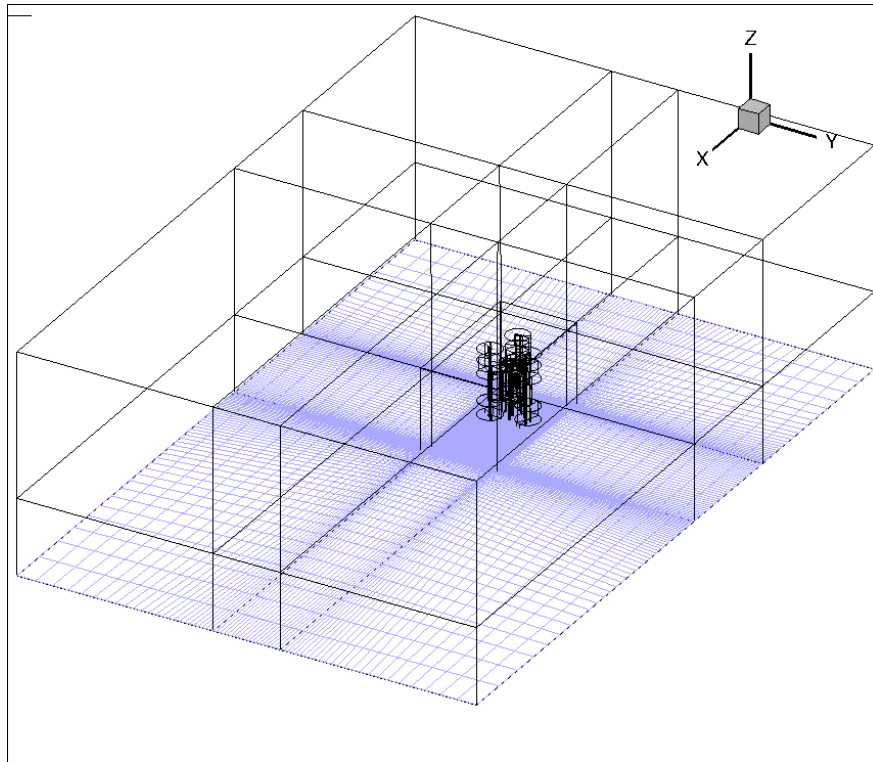


Figura 4.2: Griglia originale (nella parte inferiore della griglia è rappresentata la traccia della mesh tridimensionale)

Il numero totale di elementi per la griglia quindi è pari a circa 14 milioni. La simulazione RANS su questa griglia, impiegando 96 processori procede al ritmo di circa 60 passi di discretizzazione al giorno.

La griglia, come verrà evidenziato nel capitolo successivo, presenta un problema nella zona inferiore: infatti la parete sottostante il generatore è troppo vicina a quest'ultimo. La conseguenza di questa vicinanza è un effetto di bloccaggio che altera il campo di moto.

E' stato necessario quindi effettuare una modifica della griglia. Le due possibilità prese in considerazione sono state: inserire dei blocchi tra il rotore e il pavimento, scelta che però avrebbe aumentato la già grande quantità di celle, oppure tagliare la griglia a metà dell'altezza del rotore ed inserire un piano di simmetria. La decisione è ricaduta su quest'ultima possibilità, nel capitolo successivo sono spiegate le ragioni di questa scelta.

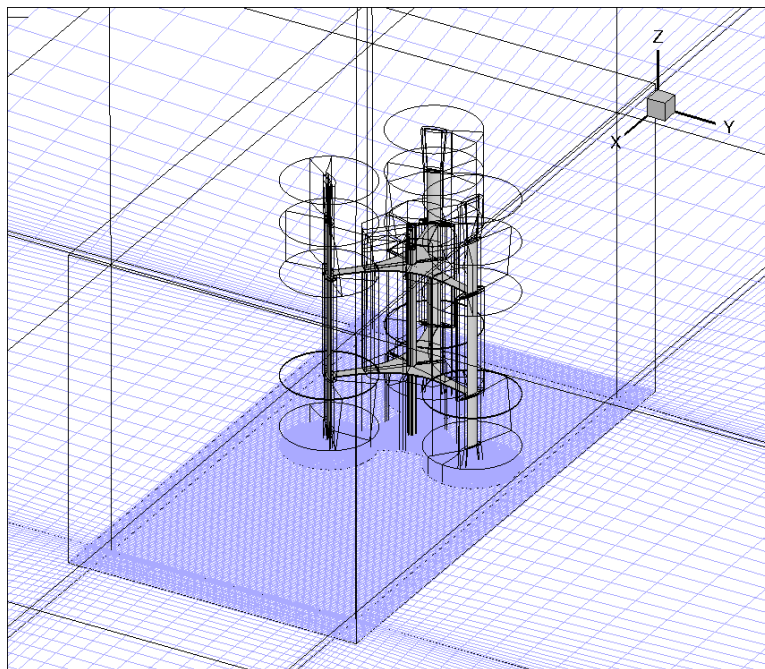


Figura 4.3: Griglia originale - dettaglio rotore: la parte esterna costituisce il BackCoarse, il parallelepipedo intorno al rotore il BackNear, i tre blocchi cilindrici le griglie di pala e al centro è visibile la griglia per l'albero.

## 4.3 Griglia modificata

### 4.3.1 Ipotesi di simmetria

La nuova griglia è stata quindi modificata inserendo un piano di simmetria, con relative condizioni al contorno, nel piano normale del rotore.

L'ipotesi nel caso di flusso orizzontale è ben verificata, la principale approssimazione, introdotta in questo caso, consiste nel trascurare il contributo della parte inferiore dell'albero. Questa assunzione è stata ritenuta accettabile in relazione al beneficio ottenuto, in termini di costo computazionale, dalla riduzione del dominio di calcolo.

### 4.3.2 Dettaglio griglie

La griglia modificata mantiene la stessa composizione della precedente, sotto sono riportati gli aspetti principali delle griglie che la compongono.

#### Griglia BackCoarse

La griglia di BackCoarse modificata (Fig. 4.4 (a)) è composta da 298166 celle, a fronte delle 395858 precedenti. Le condizioni al contorno per la superficie laterale



e superiore sono le stesse della griglia precedente (farfield), mentre nel piano inferiore sono state imposte le condizioni di simmetria.

### Griglia BackNear

La griglia BackNear (Fig. 4.4 (b)) una volta ridotta passa da 4692240 a 2971114 elementi. In questo caso le operazioni di modifica sono state particolarmente semplici, grazie alla struttura cartesiana e monoblocco della griglia, e alla grandezza omogenea delle celle, pertanto la qualità finale della griglia è identica alla precedente.

### Griglia pala

La griglia di pala (Fig. 4.4 (c)) è probabilmente la più complessa e la sua modifica è stata meno agevole rispetto alle altre, in particolare nella zona di strato limite dove la griglia è più fitta. Il numero finale di celle ottenuto è pari a 1302827, valore prossimo alla metà della celle del caso precedente.

### Griglia albero

Per quanto riguarda la griglia dell'albero (Fig. 4.4 (d)) il numero finale di celle ottenuto è pari a 768489 celle, anche in questo caso si ha quindi un risparmio di vicino al 50%.

### Griglia finale

La griglia finale (Fig. 4.5), ottenuta dall'unione delle griglie sopra descritte, conta un numero di celle inferiore a 8000000. L'ipotesi di simmetria porta quindi a una riduzione del numero di celle di circa il 43% rispetto alla griglia originale, con un notevole beneficio in termini di tempo di calcolo.

## 4.4 Tagging

Nella fase di assemblaggio delle varie griglie si ha un problema nelle zone in cui queste si sovrappongono. La compresenza di più celle appartenenti a griglie diverse viene risolta utilizzando la tecnica *Chimera*, descritta nel capitolo precedente (cap. 2.2). Questa fase, denominata *tagging*, è eseguita prima dell'inizio delle simulazioni per tutte le posizioni in cui verrà calcolata la soluzione. Nel caso della simulazione sulla griglia simmetrica ad esempio, avendo scelto un passo di integrazione di  $2^\circ$ , sono stati generati 180 file di output, i quali saranno successivamente letti dal solutore al momento della risoluzione.

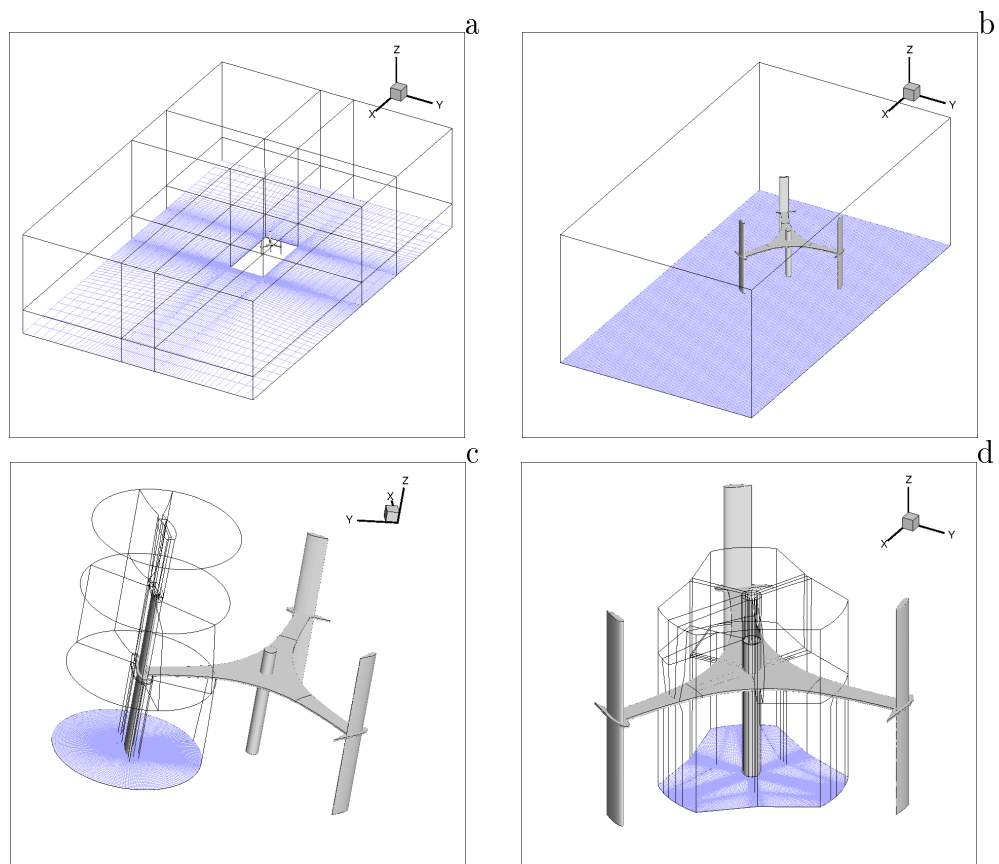


Figura 4.4: Griglie: (a) BackCoarse, (b) BackNear, (c) pala, (d) albero

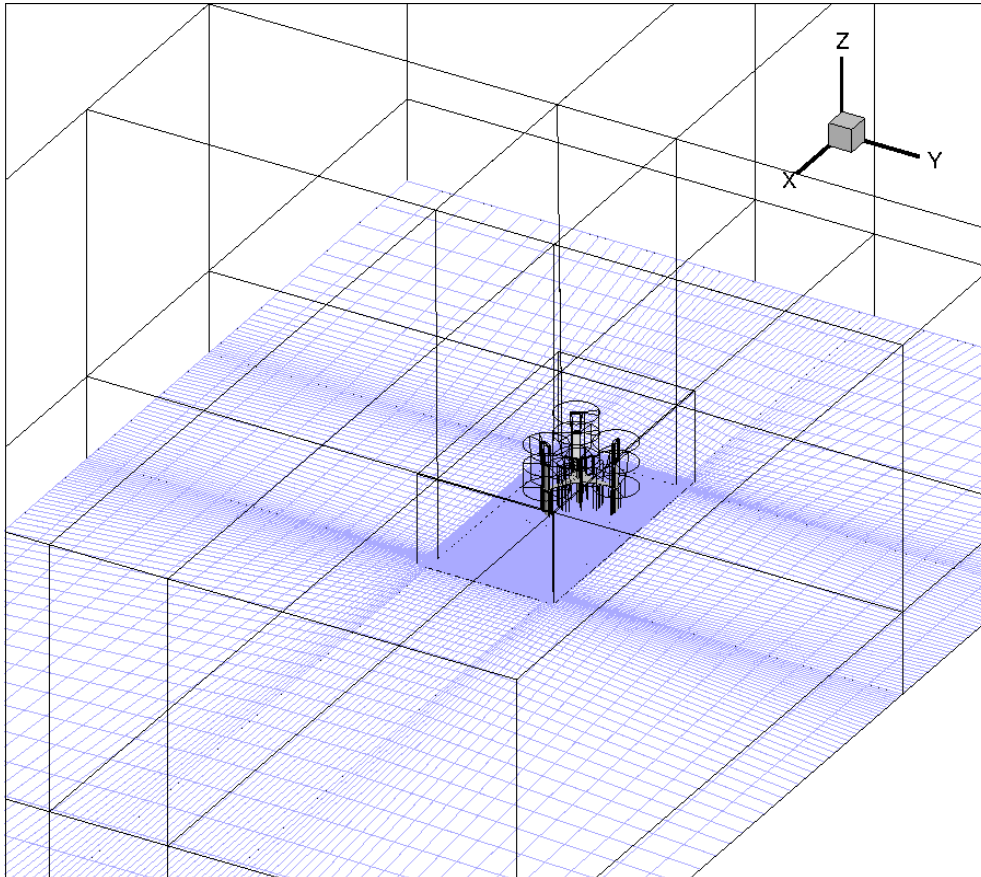


Figura 4.5: Griglia finale

Per mostrare in modo chiaro l'effetto del tagging possiamo considerare la zona della razza: qui si uniscono le griglie di albero e pala. In Fig.4.6 sono evidenziate le zone in cui le due griglie sono sovrapposte. Nel caso specifico le due griglie non sono in movimento relativo tra loro e quindi la loro configurazione non cambia nei vari istanti, condizione che non si verifica ad esempio nel caso della sovrapposizione con la griglia BackNear.

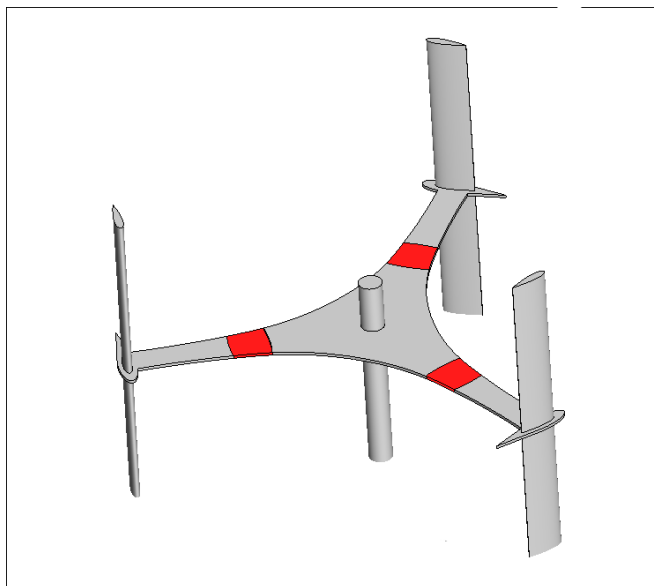


Figura 4.6: Generatore VAWT- in rosso le zone di sovrapposizione fra griglie

In Fig. 4.7 viene riportata la mesh sulla superficie della razza prima e dopo l'esecuzione del tagging.

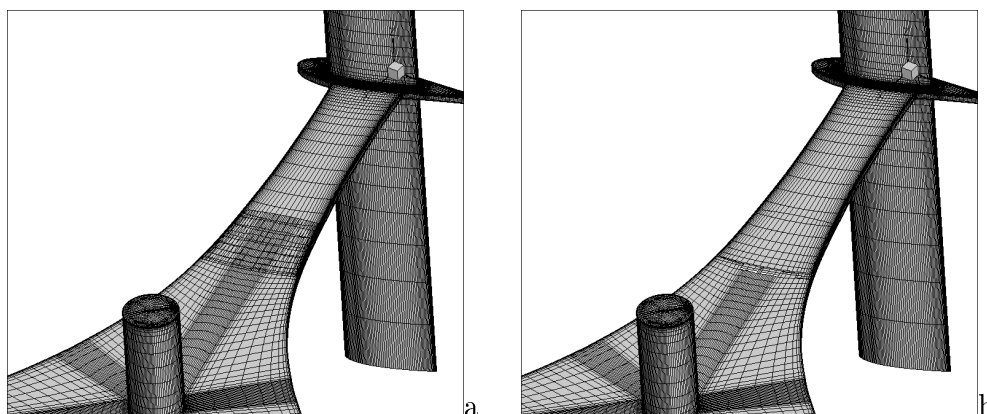


Figura 4.7: Razza prima (a) e dopo (b) L'applicazione dell'algoritmo Chimera

## 4.5 Parametri simulazione

### Valori fisici

Sono state effettuate due simulazioni, una sulla griglia originale e una per la griglia modificata nelle medesime condizione operative ( è stata effettuata anche un ulteriore simulazione, con condizioni operative differenti, i cui risultati sono riportati in appendice )

I dati delle simulazioni sono stati scelti fra quelli considerati nell'attività sperimentale precedentemente citati, in maniera tale da poter avere un confronto. In particolare il valore di velocità asintotica è pari a  $10.5 \frac{m}{s}$  mentre la velocità angolare costante è di  $50.97 \frac{rad}{s}$ . Con questi valori, uniti alla misura del raggio ( $0.515m$ ), si ha un TSR di 2.5.

In (Tab. 4.5) sono riportati i dati fisici utilizzati per le due simulazioni:

Velocità asintotica ( $V$ )	$10.5m/s$
Velocità angolare ( $\Omega$ )	$50.97rad/s(486.72rpm)$
TSR ( $\Omega r/V$ )	2.5
Temperatura ( $T$ )	$296.79K$
Mach ( $Ma$ )	0.0304
Reynolds ( $Re$ )	$7.7 \cdot 10^5$

Tabella 4.2: Valori fisici simulazioni

### Parametri numerici

Come già accennato nei precedenti capitoli, le simulazioni sono state svolte risolvendo equazioni RANS accoppiate con il modello di turbolenza di Spalart-Allmaras.

La soluzione viene valutata ogni  $2^\circ$  corrispondenti, alla velocità angolare della prima simulazione considerata, ad un intervallo in tempo di circa  $0.006s$ .

Per la discretizzazione spaziale è stato utilizzato uno schema di Roe-MUSCL con correzione di Martinelli, schema che garantisce un'accuratezza del secondo ordine. La discretizzazione temporale è stata effettuata inizialmente attraverso un ciclo di 50 *pseudo-time*; per i primi passi è stato impiegato un valore di CFL iniziale pari a 1 aumentata in modo lineare fino a raggiungere il valore di 2.

Successivamente, una volta verificata la stabilità del calcolo, la CFL massima è stata progressivamente aumentata fino a raggiungere il valore di 5 in modo da

aumentare la velocità di convergenza. In questo modo è stato possibile ridurre il numero massimo di pseudo time da 50 a 30 per ciclo, ottenendo un notevole miglioramento in termini di rapidità di calcolo: la velocità di avanzamento finale è di circa 205 passi al giorno a fronte dei 128 iniziali. Per quanto riguarda invece la simulazione senza l'ipotesi di simmetria la velocità di avanzamento è stata costante e pari a 60 passi al giorno.

# Capitolo 5

## Simulazione griglia originale

In questa sezione sono riportati i risultati numerici ottenuti dalla prima simulazione effettuata, utilizzando la griglia originale presentata nel capitolo 4.2. Il sistema di riferimento utilizzato, per questo e per i successivi capitoli, è centrato nell'asse del rotore, e in alcuni grafici le distanze sono espresse in forma adimensionale, utilizzando il diametro (D) o il raggio (R) per le direzioni X e Y e la semi-altezza della pala (H) per la direzione Z.

La simulazione è stata ultimata dopo cinque giri completi, in modo da esaurire il transitorio iniziale. I grafici riportati in questa sezione fanno riferimento all'ultimo istante calcolato.

In fig. 5.1 è presentata un'immagine dell'andamento di alcune isosuperfici di vorticità, è una figura puramente qualitativa che serve però a mostrare la complessità del campo di moto.

Come già accennato precedentemente, il problema principale della griglia è legato alla vicinanza del generatore al terreno. La condizione al contorno di parete inviscida causa un importante effetto di bloccaggio che porta ad avere una *super-velocità* nella parte inferiore. L'accelerazione causa una diminuzione di pressione con conseguente schiacciamento verso il basso del flusso nella zona a valle.

Per evidenziare tale fenomeno è stato calcolato il rapporto tra la velocità in direzione x e la velocità asintotica su cinque piani paralleli ed equidistanti posti a valle della turbina a partire dal primo posto a  $X/R = 0.75$  (fig. 5.2).

La figura 5.3 mostra in modo chiaro lo spostamento verso il basso del tubo di flusso. E' evidente che, pur essendoci un effetto di bloccaggio in tutta la zona intorno al rotore, le velocità maggiori (in rosso) sono in prossimità del suolo, la differenza è molto netta soprattutto nella nell'immagine 5.3(c).

Nonostante l'errore introdotto dalla parete inviscida, dai grafici presentati possono essere dedotte comunque importanti informazioni generali. Ad esempio nel piano più vicino al rotore, dove ancora l'effetto di deviazione è limitato, si può vedere come l'ipotesi di simmetria del flusso rispetto al piano orizzontale sia ben

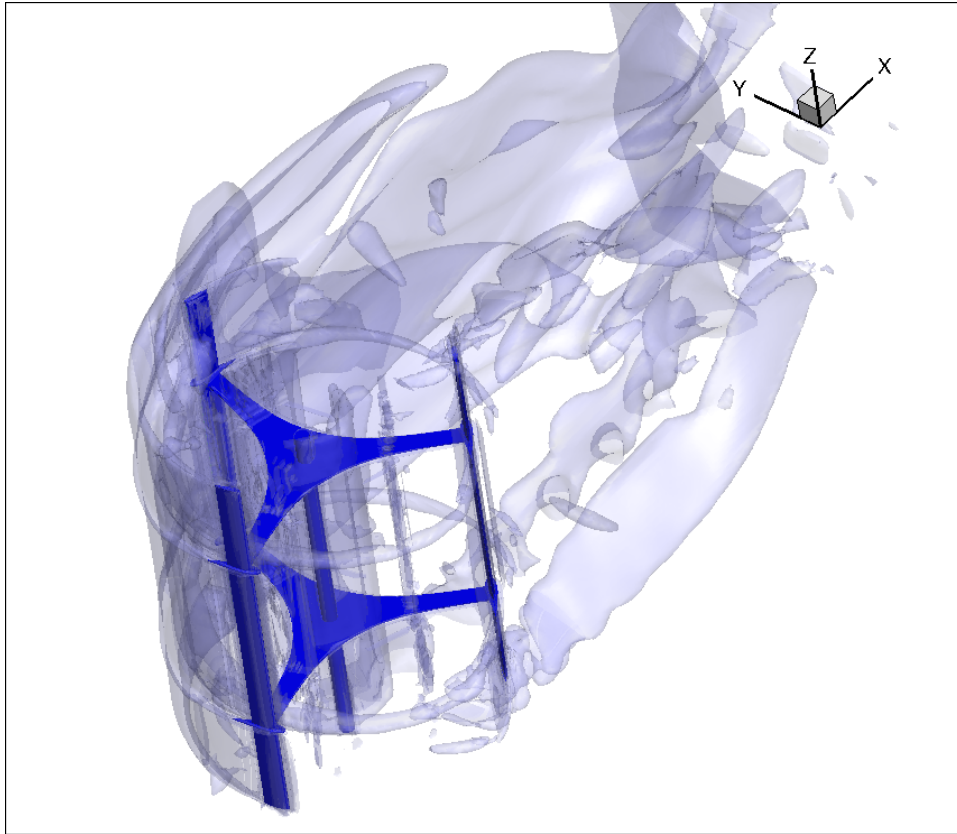


Figura 5.1: alcune isosuperfici della componente in direzione Z della vorticità

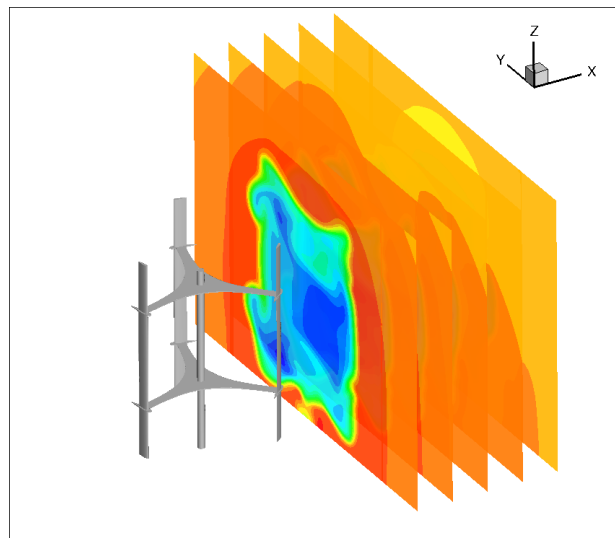


Figura 5.2: piani di misura per il rapporto  $U/U_\infty$



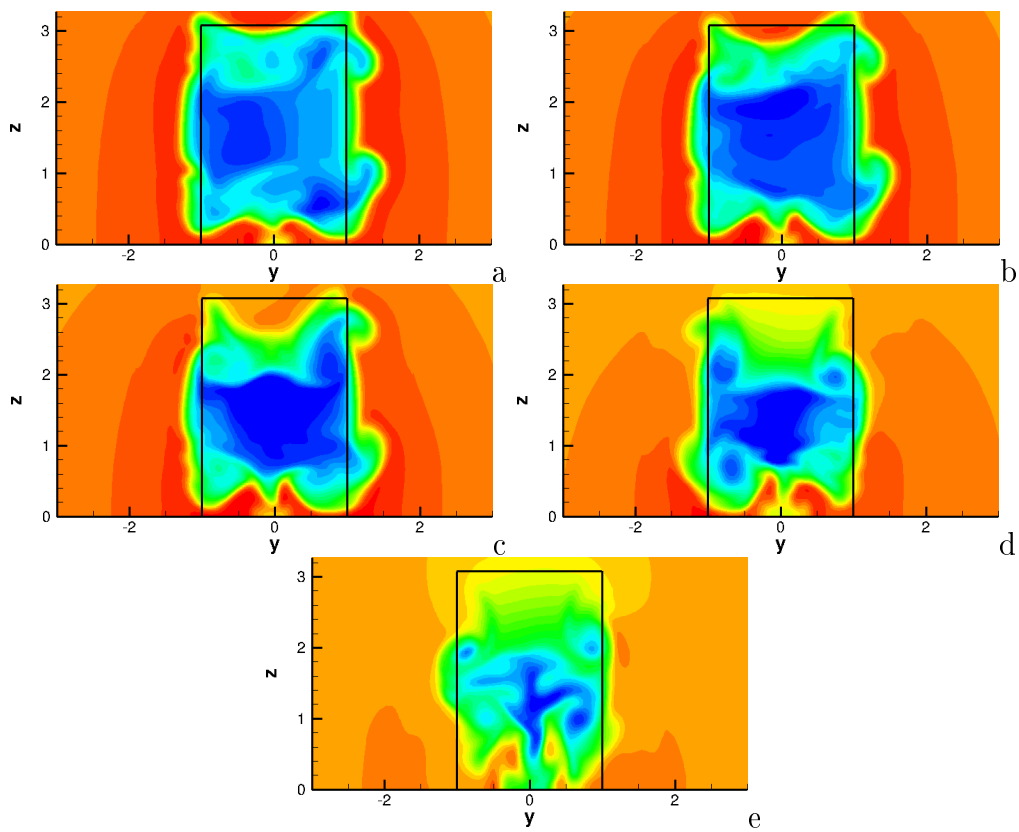


Figura 5.3: Rapporto  $U/U_\infty$  nei piani (griglia originale): (a)  $X/R = 1.5$ , (b)  $X/R = 2.0$ , (c)  $X/R = 2.5$ , (d)  $X/R = 3.0$ , (e)  $X/R = 3.5$

rispettata. Un altro aspetto importante è l'andamento della scia: si può notare il movimento delle zone a bassa velocità (in blu) nei vari, segno evidente di una scia alternata. Questi aspetti verranno approfonditi nel successivo capitolo, riferito ai valori ottenuti dalla simulazione sulla griglia modificata.

# Capitolo 6

## Simulazione con ipotesi di simmetria

### 6.1 Campo di moto nel piano YZ

Per valutare l'effetto dell'ipotesi di simmetria, è utile studiare come varia l'andamento del campo di velocità negli stessi piani di misura del capitolo precedente precedente (fig. 6.1).

I grafici presentati fanno riferimento ad istanti di tempo diversi quindi non deve stupire l'andamento differente. Ciò che è importante notare è la posizione delle zone di bassa velocità che sono sensibilmente spostati verso l'alto, venendo meno l'effetto di bloccaggio precedentemente descritto.

Un aspetto importante che emerge è l'asimmetria rispetto al piano XZ, infatti il tubo di flusso è spostato verso sinistra, nella direzione della pala avanzante. Questo fenomeno è legato alla maggiore intensità della scia vorticoso della pala avanzante che vede una velocità relativa più elevata.

#### 6.1.1 Periodicità

Osservando il campo di velocità sul piano normale al flusso, è possibile anche fare delle considerazioni sulla periodicità del campo di moto.

Il generatore è composto da tre pale, questo può portare a immaginare una periodicità con un periodo di  $120^\circ$ . Per verificare questa assunzione, si può osservare (fig. 6.2) il campo di velocità, su uno stesso piano, per rotazioni di  $\pm 120^\circ$  rispetto alla configurazione utilizzata per il grafico precedente (assunta come  $0^\circ$ ).

Come si può vedere, gli andamenti dei tre grafici presentano delle similitudini che tendono a confermare una certa periodicità del campo, tuttavia sono evidenti anche delle discrepanze.

Queste sono principalmente legate alla scia turbolenta che si forma a causa dell'ostacolo rappresentato dalla presenza del rotore, le cui parti agiscono in modo

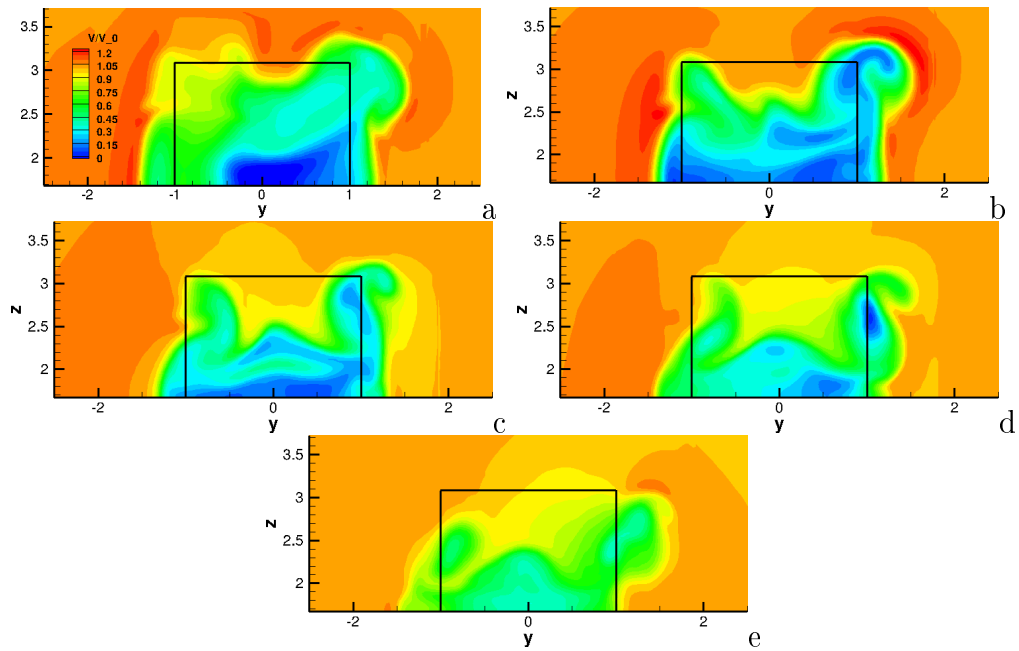


Figura 6.1: Rapporto  $U/U_\infty$  nei piani (griglia modificata): (a)  $X/R = 1.5$ , (b)  $X/R = 2.0$ , (c)  $X/R = 2.5$ , (d)  $X/R = 3.0$ , (e)  $X/R = 3.5$

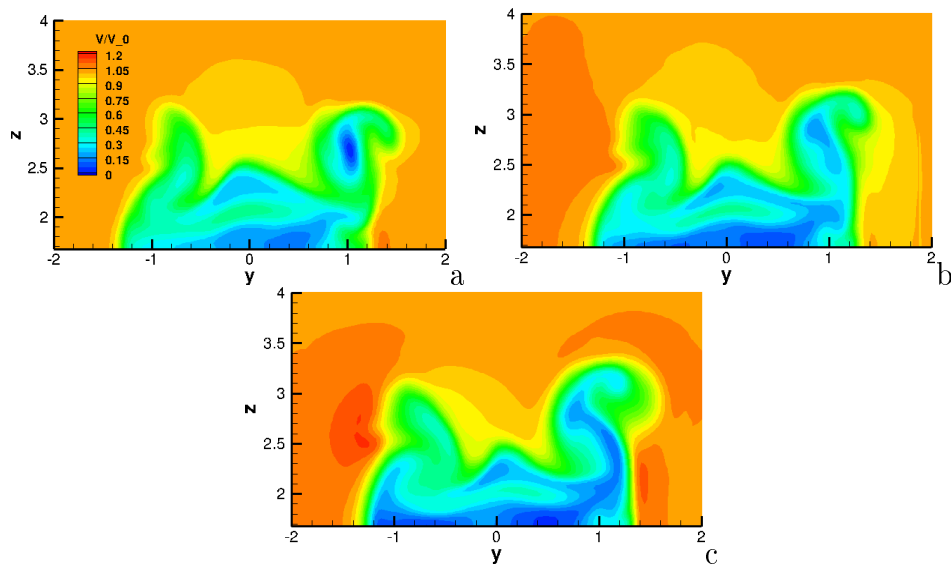


Figura 6.2: Rapporto  $U/U_\infty$  nel piano  $X/R = 2.5$ : (a)  $-120^\circ$ , (b)  $0^\circ$ , (c)  $+120^\circ$

simile a dei corpi tozzi. Infatti, anche ammesso che esista una frequenza costante di *shedding* non c'è ragione per cui questa debba essere multipla della frequenza associata alla rotazione delle pale.

Per tali ragioni nella scia possiamo individuare un'importante parte periodica, con

periodo di  $120^\circ$ , legata al movimento di rotazione delle pale e quindi al rilascio dei vortici di estremità e ai fenomeni di stallo dinamico; ma anche una parte non periodica, o più in generale di periodo diverso, imputabile alla solidità del rotore e alla presenza dell'albero e delle razze.

### 6.1.2 Studio dei vortici

In tutti i grafici riferiti alla velocità nel piano normale al flusso, sono evidenti delle zone circolari caratterizzate da un buco di velocità. Intuitivamente possiamo attribuire questo alla presenza di una zona vorticoso. Per meglio studiare questo fenomeno consideriamo il piano di figura 6.2 (a) dove il picco di bassa velocità è particolarmente evidente.

Il problema della determinazione, e della definizione stessa di vortice, è tutt'altro che banale ed è stato affrontato in molti articoli, si veda ad esempio [23]. In questo caso è stato applicato il *Q-criterion*: uno dei primi più semplici metodi 3D introdotti per determinare la presenza di un vortice, il criterio è basato sullo studio del tensore gradiente di velocità [24].

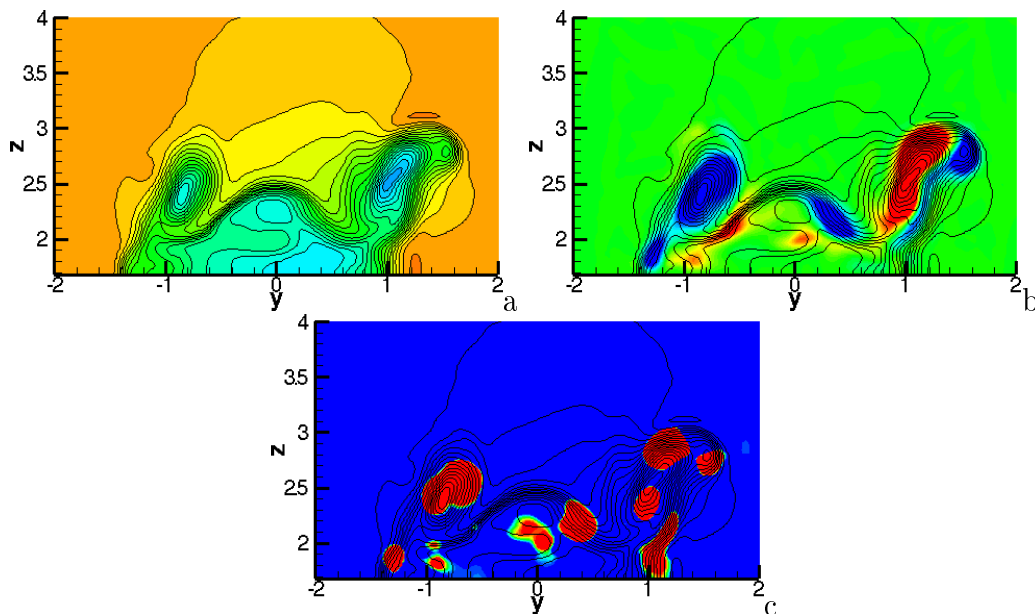


Figura 6.3: Piano  $X/R = 2.5$ : (a)  $U/U_\infty$ , (b) componente x della vorticità, (c) Q-criterion

Nella figura 6.3 sono riportati la velocità, la componente X della vorticità e la Q del criterio, nelle zone in rosso ( $Q > 0$ ) il criterio suggerisce la presenza di un vortice (nelle immagini 6.3 (b) e (c) per facilitare la lettura sono riportate le linee dei contour di velocità). Sia dallo studio della vorticità che dal criterio si ha

una conferma della presenza del vortice. E' interessante notare la differenza del segno della vorticità nelle zone laterali, questa caratteristica, unita alla maggiore intensità del vortice nella zona della pala avanzante, suggerisce che il buco di velocità sia in qualche modo legato ai vortici di estremità rilasciati durante il passaggio nelle zone laterali ( $0^\circ$  e  $180^\circ$  nella figura 2.1) della pala.

Questa ipotesi verrà studiata nella sezione 6.3, dedicata ai vortici di estremità.

## 6.2 Campo di moto nel piano XY

L'analisi del campo di moto nel piano XY di mettere in evidenza molti aspetti aerodinamici del campo, sia per quanto riguarda la scia che per quanta riguarda la zona interna al rotore.

In quest'ottica, lo studio della componente normale della vorticità (Z) consente di valutare l'effetto di mutua interferenza fra le pale nelle varie fasi della rotazione. In fig. A.4 è presentato appunto l'andamento della componente Z del vettore vorticità, valutata su un piano parallelo al flusso poco sopra al piano di simmetria. Nella figura sono presentati gli andamenti per cinque posizioni successive con un passo di  $30^\circ$ , in modo da coprire un'area di  $120^\circ$

L'aspetto più evidente è la formazione di due vortici laterali controrotanti. La formazione di questi è probabilmente legata all'interazione tra la scia vorticosa delle pale e la corrente asintotica. Poco possiamo dire invece sugli effetti di stallo dinamico, in particolare non è stata evidenziata la presenza di vortici controrotanti formati dal passaggio della pala in direzione perpendicolare al vento ([9], [25]) probabilmente a causa del modello di turbolenza utilizzato.

Per meglio evidenziare lo stallo dei profili e l'effetto di interferenza si può studiare l'andamento della pressione e della componente x della velocità. In fig 6.5 e 6.6 sono riportati tali andamenti, per le stesse posizioni visualizzate nel precedente grafico.

Dal campo di pressione e di velocità lungo x si può intuire lo stallo del profilo durante il passaggio nella zona di upwind. L'aspetto più evidente però è lo spostamento della scia in direzione del senso di rotazione della turbina, questo comportamento è evidente anche per la scia dell' albero, come si può vedere già dai grafici della vorticità.

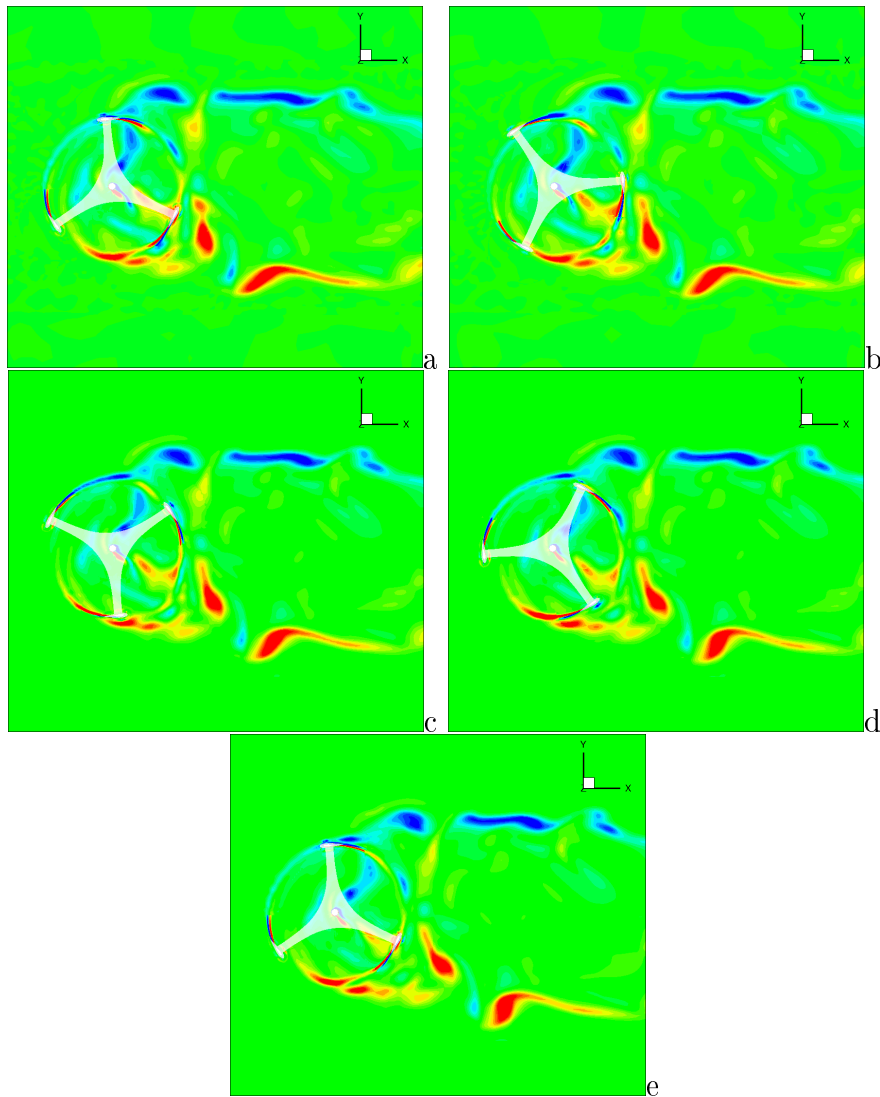


Figura 6.4: Piano XY - componente Z della vorticità: (a)  $0^\circ$ , (b)  $30^\circ$ , (c)  $60^\circ$ , (d)  $90^\circ$ , (e)  $120^\circ$

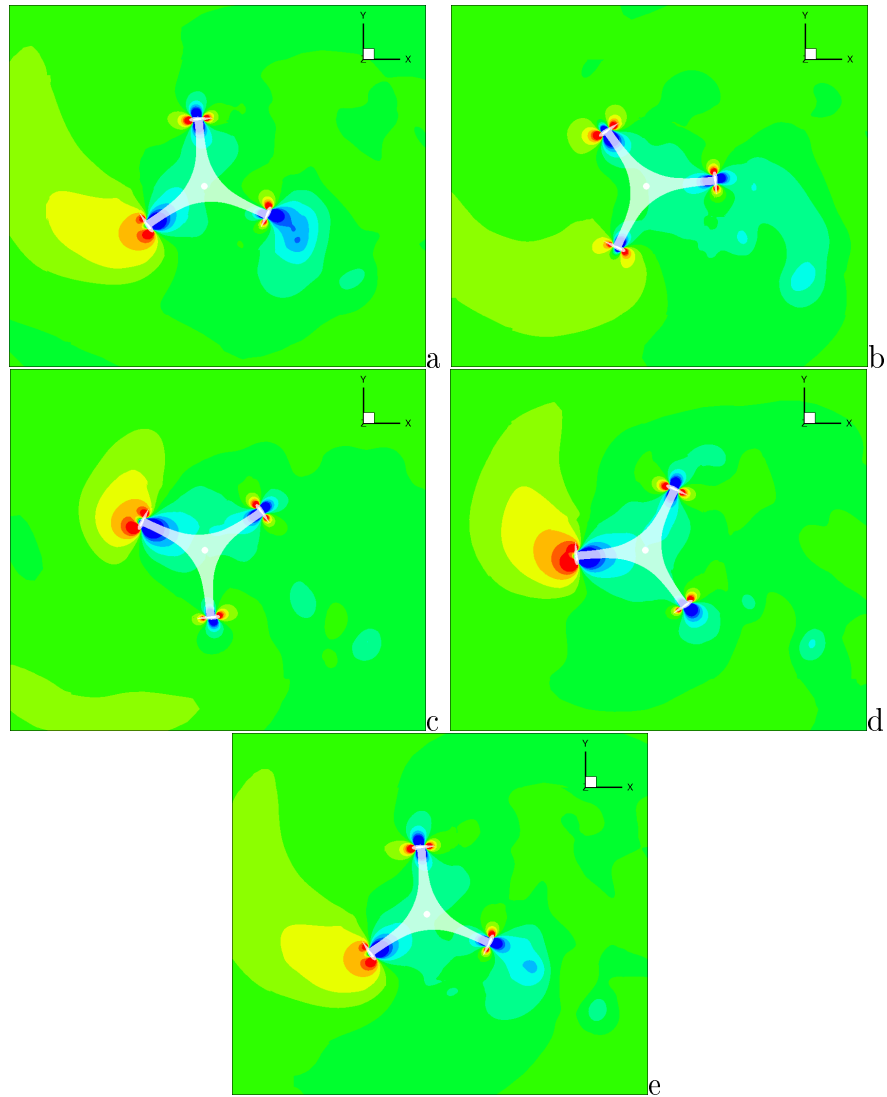


Figura 6.5: Piano XY, campo di pressione: (a)  $0^\circ$ , (b)  $30^\circ$ , (c)  $60^\circ$ , (d)  $90^\circ$ , (e)  $120^\circ$



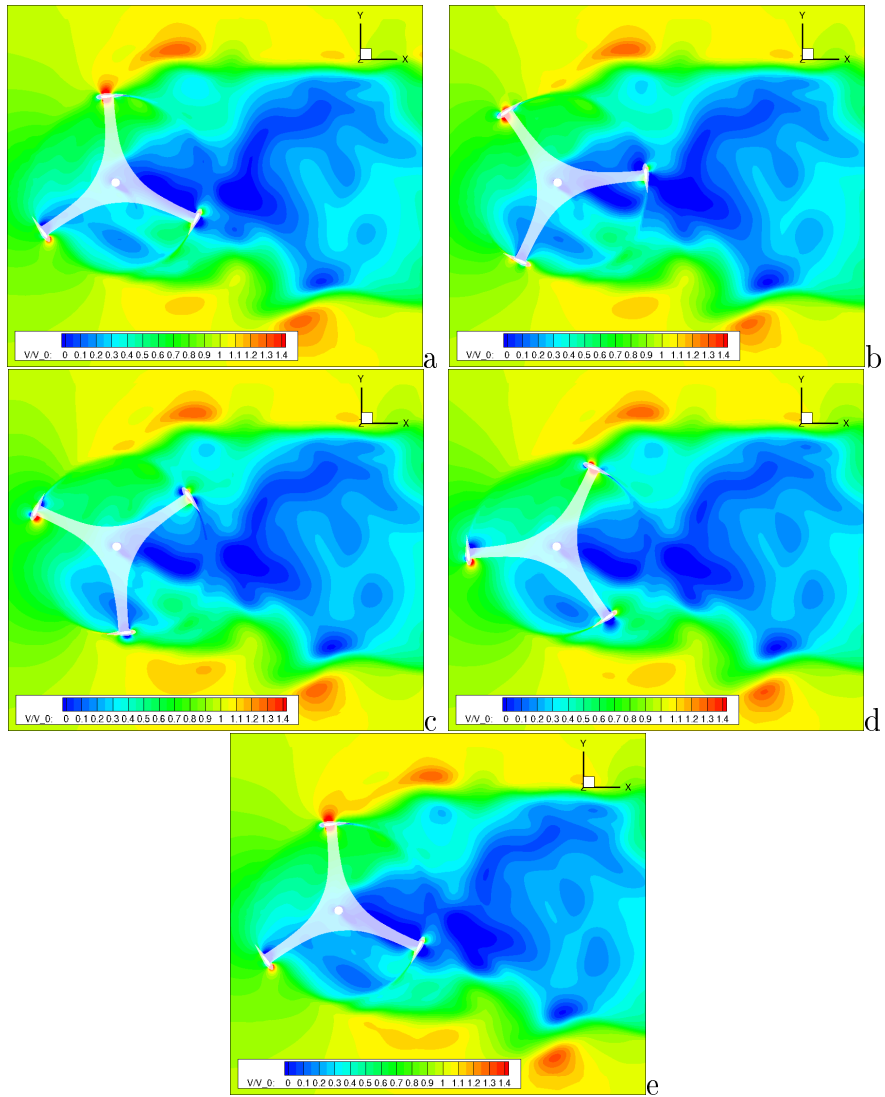


Figura 6.6: Piano XY, campo di velocità: (a)  $0^\circ$ , (b)  $30^\circ$ , (c)  $60^\circ$ , (d)  $90^\circ$ , (e)  $120^\circ$

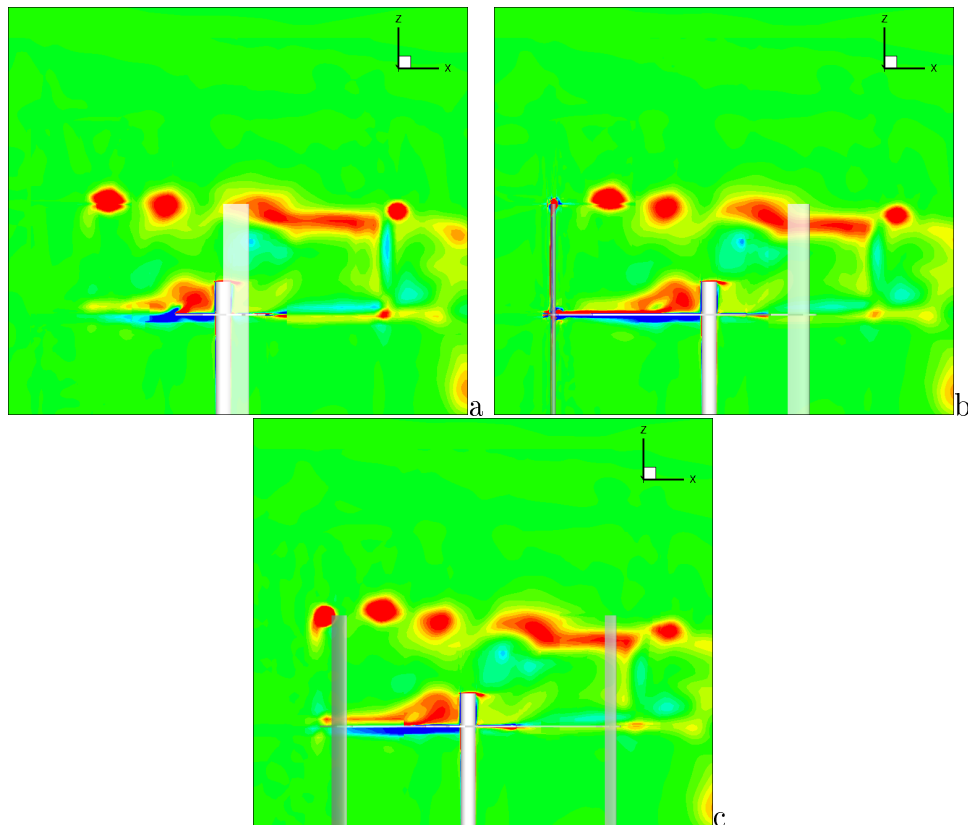


Figura 6.7: Piano  $Y=0$  - componente  $Y$  della vorticità: (a) prima, (b) durante, (c) dopo il passaggio della pala

### 6.3 Vortici di estremità

Come già anticipato i vortici d'estremità sono uno dei fenomeni caratteristici e più importanti nell'aerodinamica di un generatore eolico ad asse verticale.

In figura 6.7 sono riportati i valori per la componente  $y$  della vorticità nel piano  $XZ$  all'altezza dell'asse della turbina. In questo modo si può mostrare il vortice di estremità rilasciato durante il passaggio della pala a  $90^\circ$ , cioè nella posizione di upwind perpendicolare al flusso.

Non appena il vortice di estremità viene generato 6.7(b) è trasportato a valle dalla corrente asintotica, si forma quindi una scia alternata, ben evidente in tutte le figure mostrate. La scia subisce uno spostamento verso il basso che la porta ad interferire con il flusso nella zona di downwind.

Precedentemente è stata avanzata l'ipotesi che i vortici di estremità fossero in qualche modo trasportati a valle, causando il buco di velocità evidenziati nei grafici relativi piano normale al flusso. Per verificare questa ipotesi utilizziamo una nuova sezione nel piano  $XZ$ , questa volta spostata all'altezza della pala avanzante,

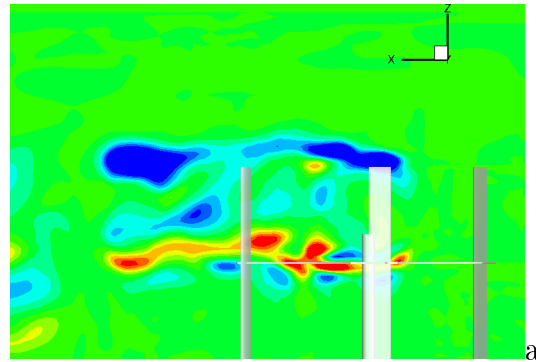


Figura 6.8: Piano  $Y=-1$  - componente X della vorticità

e analizziamo la componente X della vorticità.

La vorticità in figura 6.8 mostra la formazione di un vortice di estremità, tuttavia questo sembra esaurirsi prima di raggiungere i piani utilizzati per i traversi di velocità. Possiamo quindi ipotizzare che i vortici rilevati in tali piani non coincidano con i vortici di estremità. E' chiaro che questi ultimi hanno comunque un ruolo chiave nella loro formazione: probabilmente tali vortici sono generati dall'interazione dei vortici di estremità con la corrente asintotica e con una serie di fenomeni altri vorticosi, come la scia del bordo di uscita delle pale e soprattutto della razza (ben visibile nella stessa figura).



# Capitolo 7

## Confronto con i risultati sperimentali

I risultati numerici della simulazione su griglia simmetrica sono stati confrontati con i dati sperimentali ottenuti da *Battisti, Zanne et Al.* [17]. E' importante sottolineare però che numericamente sono state simulate condizioni di aria libera e non in galleria. A seguire è riportata una breve descrizione dell'apparato sperimentale, per maggiori dettagli si rimanda all'articolo citato.

### 7.1 Descrizione prove sperimentali

Le prove sono state eseguite nella galleria del vento del Politecnico di Milano. Questa galleria dispone di due camere di prove: una di dimensioni maggiori (14 m  $\times$  3.84 m) nella quale si ha una velocità massima di  $15 \frac{m}{s}$  e l'altra (4 m  $\times$  3.84 m), che può lavorare sia in camera aperta che chiusa, nella quale si possono raggiungere velocità di circa  $55 \frac{m}{s}$  con livelli di turbolenza inferiori al 1%.

Nel caso in esame è stata utilizzata la seconda camera di prova. Per la validazione verranno utilizzati i risultati provenienti da due prove distinte, una eseguita in camera aperta e l'altra in camera chiusa. Nella tabella seguente (Tab. 7.1) sono riportati i dati relativi alla prove, si può notare che le condizioni della prova in camera aperta coincidono esattamente con quelle della simulazione numerica, mentre per la prova in camera chiusa si hanno delle leggere discrepanze ritenute però non rilevanti ai fini di un confronto qualitativo.

Le misure sono state effettuate tramite una sonda di pressione a cinque fori ed una sonda a filo caldo. Il campo di misura (Fig. 7.1) è posto a valle del generatore e parte, data la simmetria del flusso, dal centro del generatore ( $z = 0$ ); le sue dimensioni sono di 900 mm in altezza, in modo da superare il rotore di circa 170 mm, e di 3700 mm in larghezza (direzione  $y$ ).

	camera aperta	camera chiusa
Velocità asintotica ( $V_\infty$ )	$10.50 \frac{m}{s}$	$10.55 \frac{m}{s}$
TSR ( $\Omega r/V$ )	2.50	2.54
Velocità angolare ( $\Omega$ )	$50.97 \frac{rad}{s}$	$52.03 \frac{rad}{s}$

Tabella 7.1: Parametri prove sperimentali

I punti in cui sono state effettuate le misure all'interno del campo sono 21 per la direzione y e 9 per in direzione z.

I risultati sperimentali utilizzati per il confronto sono: il rapporto tra la velocità nel piano di misura e la velocità asintotica, il coefficiente di pressione totale nello stesso piano e il coefficiente di spinta.

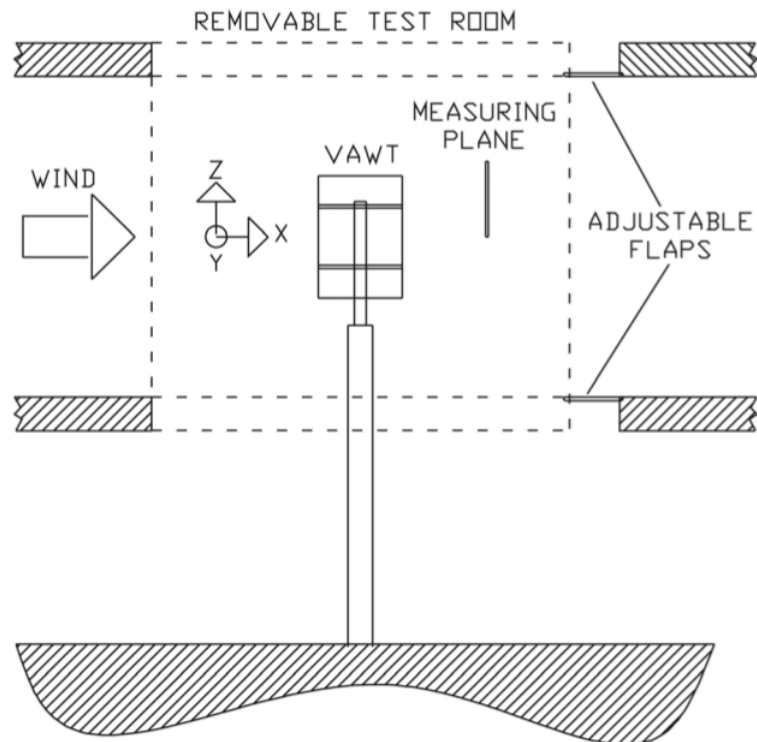


Figura 7.1: Campo di misura - Fonte - [17]

## 7.2 Media in fase

Il flusso studiato è non stazionario ma in prima approssimazione periodico, i valori sperimentali sono stati ricavati utilizzando la tecnica della media in fase.

Per avere un confronto con le prove, nei grafici riportati in questa sezione, è stata utilizzata la medesima tecnica. In particolare è stato utilizzato un periodo di  $360^\circ$  e sono stati mediati i valori con un passo di  $10^\circ$ . Ricordiamo che il passo di discretizzazione (di  $2^\circ$ ), per ragioni di stabilità numerica, è ovviamente ben inferiore al valore utilizzato per effettuare la media in fase.

### 7.3 $U/U_\infty$ nel piano di misura

Nelle figure 7.2 e 7.3 sono riportati i valori, ottenuti dalle prove sperimentali in camera aperta e chiusa, di velocità adimensionalizzata con il valore asintotico. Si può notare come, a causa del maggiore effetto di bloccaggio, in camera chiusa si raggiungano delle velocità leggermente superiori nella zona esterna. Altro aspetto evidente è l'asimmetria del campo di velocità: nella parte sinistra dei grafici, corrispondenti alla zona della pala avanzante, si hanno velocità inferiori. In figura 7.4 sono invece riportati i valori numerici.

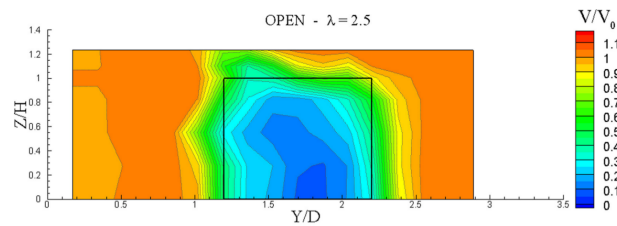


Figura 7.2: Campo di velocità in camera aperta

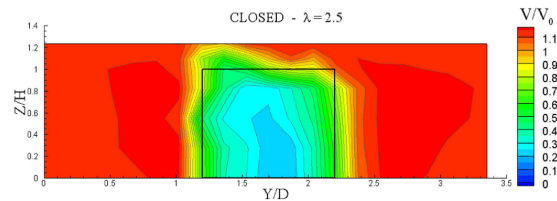


Figura 7.3: Campo di velocità in camera chiusa

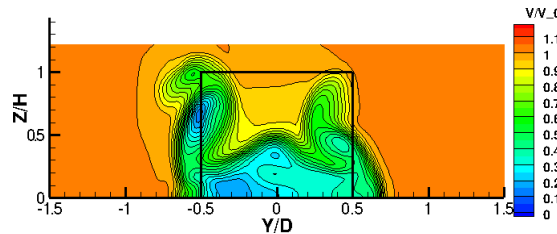


Figura 7.4: Campo di velocità simulazione numerica

I risultati numerici confermano l'andamento delle prove sperimentali, in particolare per quanto riguarda l'asimmetria del campo di velocità, ma presentano anche delle differenze sostanziali. In particolare, le velocità rilevate numericamente sono nella parte centrale sensibilmente maggiori. Un'altra evidente differenza è data dalla presenza delle due zone a bassa velocità, attribuibili al distacco dei vortici di estremità, nelle parti laterali del grafico. L'assenza di questi nei risultati sperimentali è attribuibile alla minore risoluzione delle misure.



## 7.4 Caduta di pressione totale

Il coefficiente di pressione totale è stato calcolato utilizzando la seguente formula:

$$C_{PT} = \frac{P_{t,u} - P_{t,d}}{\frac{1}{2}\rho V_{\infty}^2} \quad (7.1)$$

dove con  $P_{t,u}$  è stata indicata la pressione totale a monte del generatore *upwind* e con  $P_{t,d}$  la pressione totale a valle *downwind*. Il coefficiente è strettamente legato alla quantità di lavoro che il generatore riesce ad estrarre dal flusso. In Fig 7.5 sono riportati i valori sperimentali a varie altezze ( $Z/H$  corrisponde al piano di simmetria) per le prove in camera chiusa. I risultati numerici sono in figura 7.6

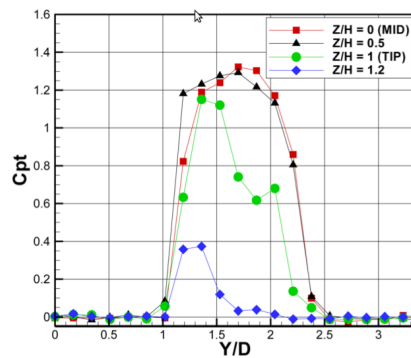


Figura 7.5: Prova in camera chiusa, Coefficiente di pressione totale

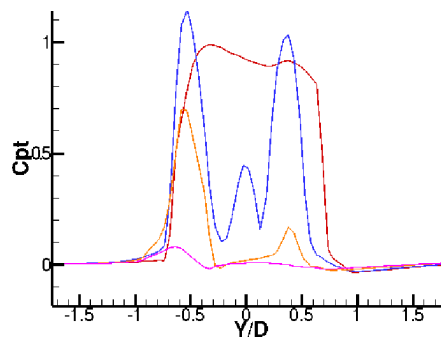


Figura 7.6: Simulazione numerica, Coefficiente di pressione totale

I valori del coefficiente di pressione totale non possono che confermare quanto già visto nei grafici precedenti: i maggiori valori di velocità riscontrati nelle simulazioni portano ad una minore caduta di pressione totale. I picchi nel grafico 7.6 corrispondono ai buchi di velocità precedentemente visti precedentemente, si noti ancora una volta come la maggiore altezza dei picchi nella parte sinistra, confermi il maggiore rallentamento del flusso conseguente all'intensità maggiore

dei vortici di estremità per la pala avanzante.

Per avere una visione più completa in figura 7.7 è riportato il valore del coefficiente di pressione totale per tutto il piano di misura.

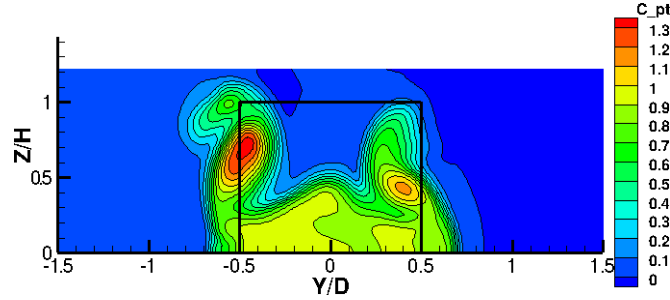


Figura 7.7: Piano  $X/R = 3$ , Coefficiente di pressione totale

## 7.5 Coefficiente di spinta

La spinta sul disco del rotore è data dalla formula:

$$T = \frac{1}{2} \rho V^2 A_D C_T \quad (7.2)$$

dove  $A_D$  è l'area del disco del rotore e  $C_T$  è il coefficiente di spinta. Sperimentalmente il valore della spinta è stato misurato a partire dai valori di pressione e velocità.

Infatti la spinta si può ricavare come:

$$T = (p_u - p_d) A_D \quad (7.3)$$

essendo  $p_u$  e  $p_d$  i valori di pressione statica nella zona di upwind e di downwind. Con la formula 7.4, e ipotizzando che la pressione totale si mantenga costante nella zona a monte e valle del rotore, possiamo calcolare la spinta conoscendo i valori di pressione e velocità in due zone qualsiasi a monte e valle del rotore. Ad esempio possiamo facilmente ricavare la  $p_u$  a partire dai valori asintotici scrivendo:

$$p_u = p_0 - \frac{1}{2} \rho V_0^2 \quad (7.4)$$

in modo analogo si possono ricavare i valori di  $p_d$  sono stati ricavati conoscendo i valori nel piano di misura ( $X/R = 3$ ).

Per il confronto numerico è stata utilizzata la stessa tecnica riportata sopra, il calcolo è stato svolto scegliendo un'area sufficientemente grande ( $2D \times 1.5H$ ). Non è importante fissare un accurato criterio per la determinazione dell'area, dal

momento che la formula 7.4 viene applicata punto per punto e quindi i contributi nella zona esterna al tubo di flusso, non essendoci perdita di pressione totale, si annullano. Infine, il coefficiente di spinta si ottiene semplicemente invertendo la 7.2:

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho V^2 A_D} \quad (7.5)$$

I valori ottenuti sono riportati nella tabella 7.5

Camera aperta	Camera chiusa	Valore numerico
0.68	0.78	0.31

Tabella 7.2: Valori del coefficiente di spinta

Il coefficiente di spinta ricavato numericamente presenta dei valori molto inferiori rispetto a quelli valutati sperimentalmente, questo è coerente con i valori di velocità e pressione precedentemente mostrati. Il valore in camera chiusa è più elevato anche sia per il maggior bloccaggio che per la maggiore velocità a cui la prova è stata effettuata. Oltre alle già citate differenze legate alla risoluzione e a possibili errori numerici, esiste anche il probabile influsso dell'effetto di galleria: in [27] sono stati evidenziati dei valori del coefficiente di spinta in aria libera leggermente minori rispetto alle prove in camera aperta e chiusa.



# Capitolo 8

## Conclusioni

Lo studio condotto ha evidenziato alcuni aspetti importanti dell'aerodinamica di un generatore eolico ad asse verticale.

In particolare, è stata confermata l'importanza dei vortici di estremità e la loro influenza sulla scia a valle della turbina e sulla pala passante nella zona di downwind.

E' difficile tuttavia individuare nella scia, e ancor più all'interno del rotore, dei singoli contributi, oltre ai già menzionati vortici di estremità, hanno un ruolo non trascurabile anche l'albero e ancor più le razze, come è stato evidenziato nel grafico della componente Y vorticità nel piano XZ.

Un discorso a parte merita lo stallo dinamico. E' stato mostrato tramite i grafici di velocità e pressione la presenza di ampie zone di separazione durante il passaggio della pala nella zona di *upwind*, tuttavia non è stata individuata la presenza delle coppie di vortici controrotanti mostrati da più fonti. Questo è attribuibile alla scelta del modello di turbolenza utilizzato (Spalart-Allmaras) [25].

### 8.1 Possibili lavori futuri

Possibili sviluppi del lavoro presentato possono riguardare:

- Ripetizione dei calcoli utilizzando la tecnica DES *Detached Eddy Simulation* o la LES *Large Eddy Simulation*. Come spiegato precedentemente infatti, l'utilizzo delle equazioni RANS non consente di rilevare accuratamente alcuni vortici, evidenziati da studi effettuati ad esempio tramite PIV. In particolare è presumibile un prossimo studio tramite LES, essendo questa in fase di implementazione all'interno di ROSITA.
- Studio di altre configurazioni operative e delle variazioni nel campo di moto introdotte dalla variazione del *TSR*.
- Simulazione delle condizioni in galleria, sia in camera chiusa che in camera aperta in modo da valutare gli effetti di bloccaggio per un VAWT. Infatti

ancora oggi non esistono metodi specifici sufficientemente accurati per la correzione di galleria da applicare ad un generatore eolico ad asse verticale.

# Appendice A

## Simulazione numerica TSR= 1.52

In questa sezione sono riportati i risultati numerici ottenuti per una nuova configurazione operativa, i valori fisici utilizzati sono riportati in tabA

Velocità asintotica ( $V$ )	14.2 <i>m/s</i>
Velocità angolare ( $\Omega$ )	41.89 <i>rad/s</i> (400 <i>rpm</i> )
TSR ( $\Omega r/V$ )	1.52
Temperatura ( $T$ )	299.65 <i>K</i>
Mach ( $Ma$ )	0.0409
Reynolds ( $Re$ )	$8.9 \cdot 10^5$

Tabella A.1: Valori fisici simulazione

I risultati presentati sono stati ricavati dopo un tempo inferiore rispetto agli altri valori, per questo motivo non si può escludere la presenza residua di fenomeni legati al transitorio iniziale.

### A.1 Campo di moto nel piano YZ

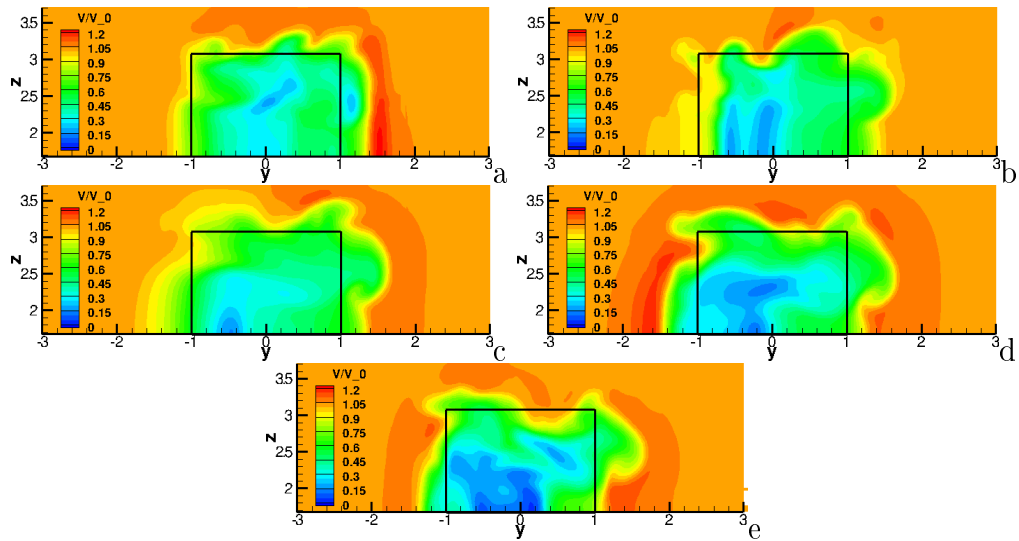


Figura A.1: Rapporto  $U/U_\infty$  nei piani : (a)  $X/R = 1.5$ , (b)  $X/R = 2.0$ , (c)  $X/R = 2.5$ , (d)  $X/R = 3.0$ , (e)  $X/R = 3.5$

## A.2 Campo di moto nel piano XY

In questa sezione, in analogia con quanto fatto in precedenza, mostriamo l'evoluzione della componente Z della vorticità, della velocità e della pressione per rotazioni successive della turbina, anche in questo caso l'intervallo tra i grafici è di  $30^\circ$ .



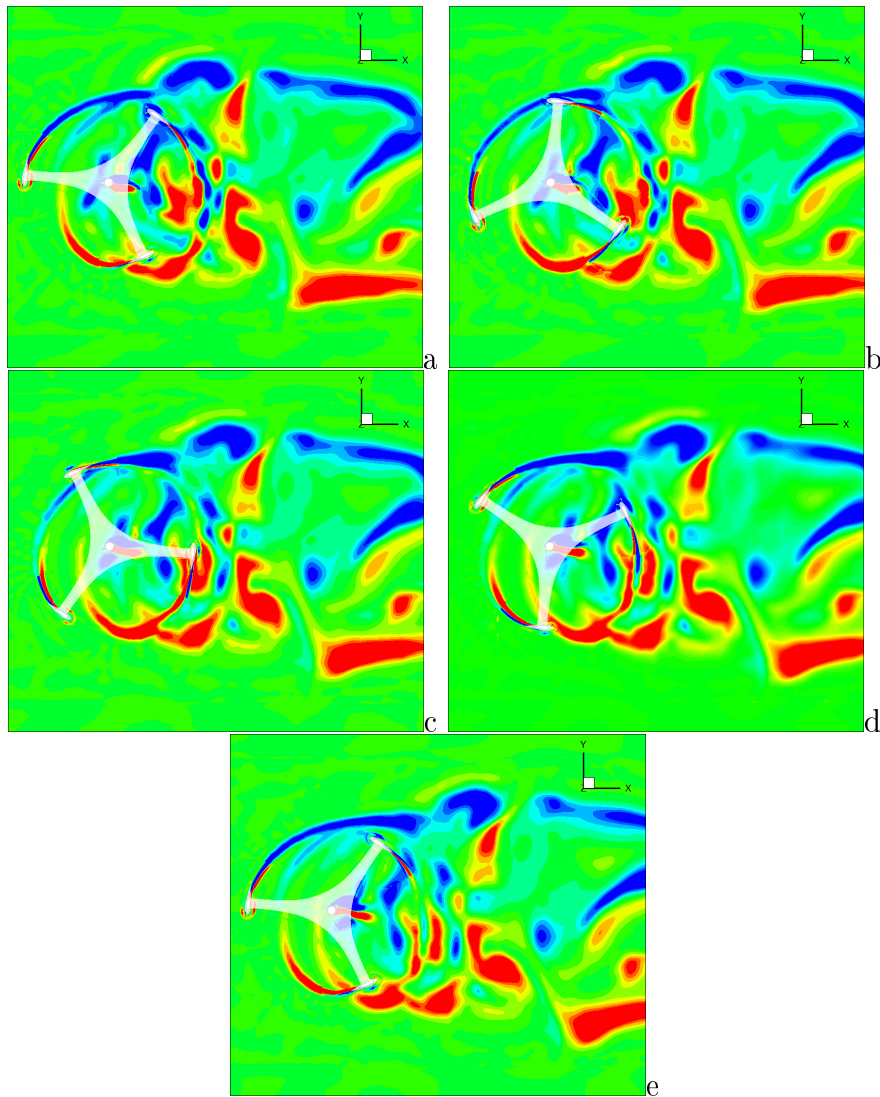


Figura A.2: Piano XY, componente Z della vorticità: (a)  $0^\circ$ , (b)  $+30^\circ$ , (c)  $+60^\circ$ , (d)  $+90^\circ$ , (e)  $+120^\circ$

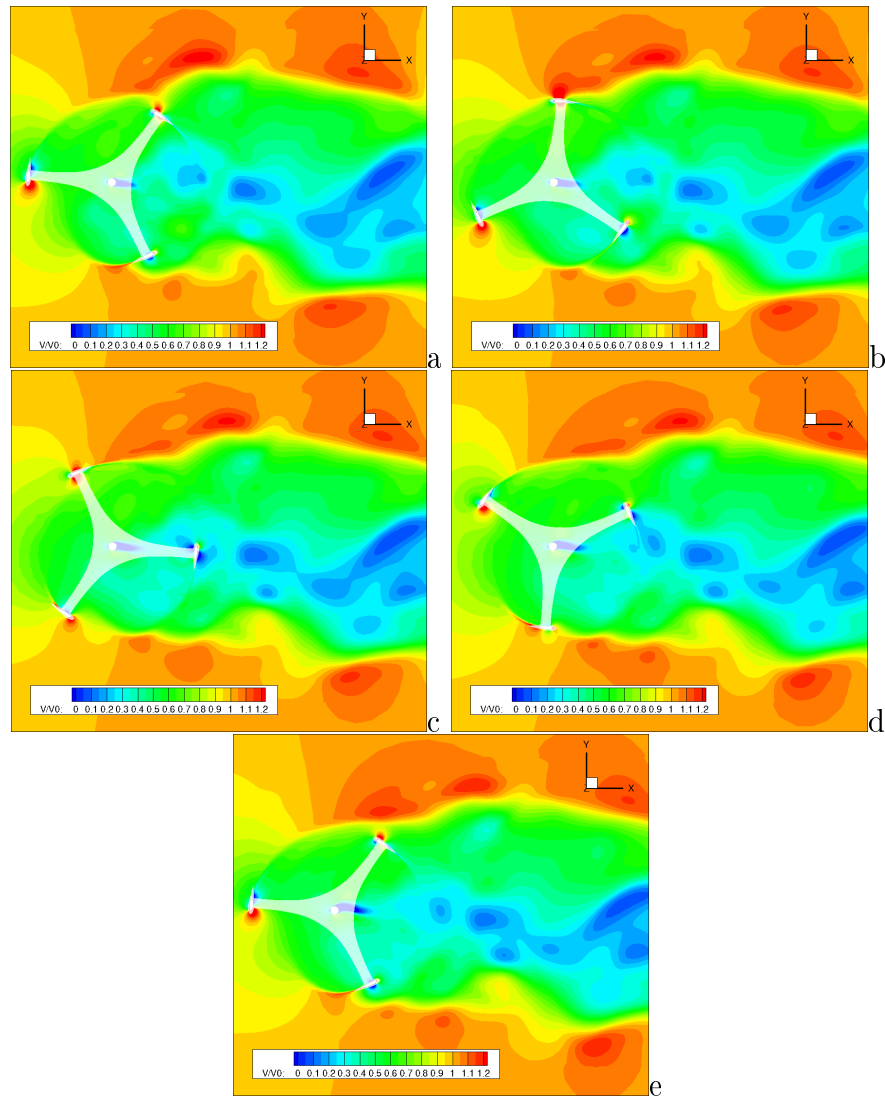


Figura A.3: Piano XY, rapporto  $U/U_\infty$ : (a)  $0^\circ$ , (b)  $+30^\circ$ , (c)  $+60^\circ$ , (d)  $+90^\circ$ , (e)  $+120^\circ$

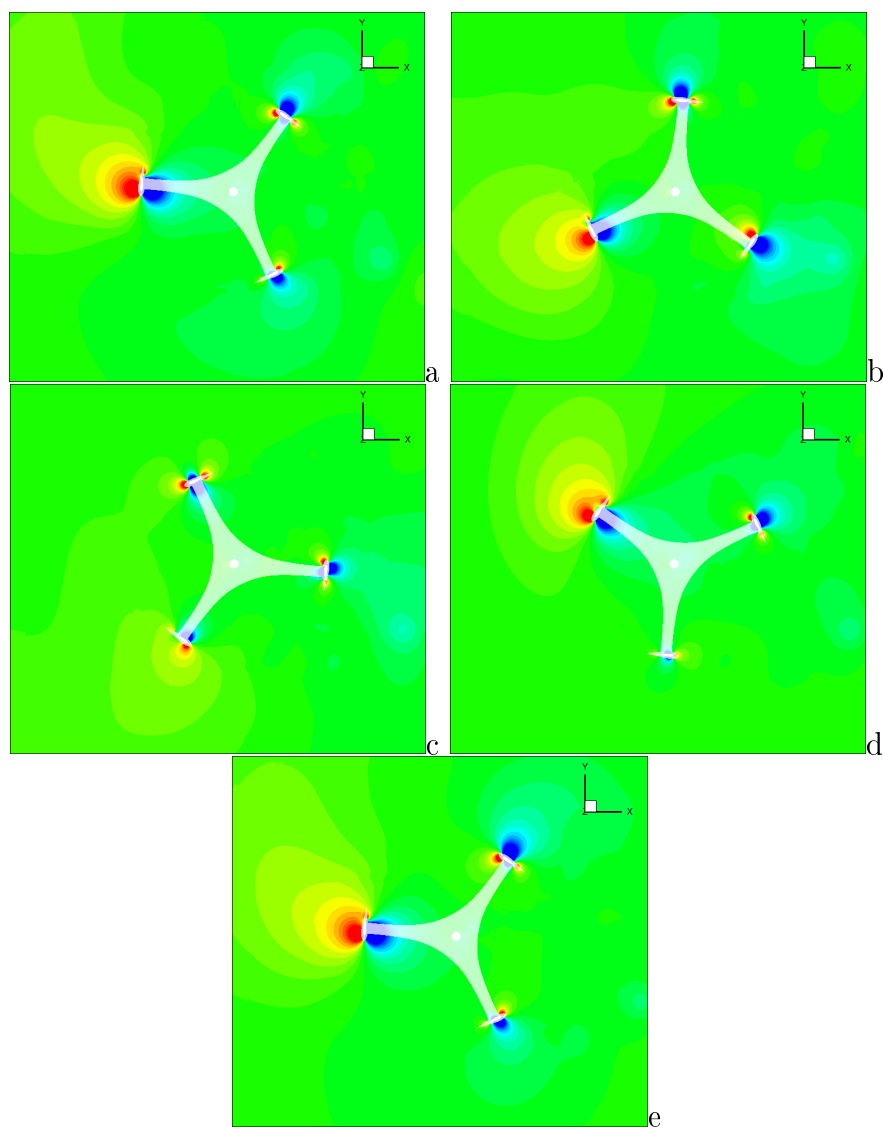


Figura A.4: Piano XY, campo di pressione: (a)  $0^\circ$ , (b)  $+30^\circ$ , (c)  $+60^\circ$ , (d)  $+90^\circ$ , (e)  $+120^\circ$



# Elenco delle figure

2.1	Sistema di riferimento - <i>Fonte</i> [7] . . . . .	14
2.2	Curve di $C_L$ e $C_D$ per un rotore in stallo dinamico . . . . .	15
3.1	Esempio di griglie sovrapposte . . . . .	21
3.2	Passo 1: i cerchi neri rappresentano i punti contrassegnati come hole	22
3.3	Passo 2: i cerchi rossi rappresentano i seed . . . . .	22
3.4	Passo 3: nella figura rappresentati i punti fringe e hole, in alto a destra quelli relativi alla griglia 1 (background), immediatamente sopra quelli relativi alla griglia 2 . . . . .	23
3.5	Passo 5: griglie 1 e 2 dopo la fase di cancellazione/promozione (in questo caso non c'è stata alcuna promozione) . . . . .	24
3.6	Passo 6: Griglia definitiva . . . . .	25
4.1	modello generatore VAWT . . . . .	28
4.2	Griglia originale (nella parte inferiore della griglia è rappresentata la traccia della mesh tridimensionale) . . . . .	29
4.3	Griglia originale - dettaglio rotore: la parte esterna costituisce il BackCoarse, il parallelepipedo intorno al rotore il BackNear, i tre blocchi cilindrici le griglie di pala e al centro è visibile la griglia per l'albero. . . . .	30
4.4	Griglie: (a) BackCoarse, (b) BackNear, (c) pala, (d) albero . . . . .	32
4.5	Griglia finale . . . . .	33
4.6	Generatore VAWT- in rosso le zone di sovrapposizione fra griglie .	34
4.7	Razza prima (a) e dopo (b) L'applicazione dell'algoritmo Chimera	34
5.1	alcune isosuperfici della componente in direzione Z della vorticità	38
5.2	piani di misura per il rapporto $U/U_\infty$ . . . . .	38
5.3	Rapporto $U/U_\infty$ nei piani (griglia originale): (a) $X/R = 1.5$ , (b) $X/R = 2.0$ , (c) $X/R = 2.5$ , (d) $X/R = 3.0$ , (e) $X/R = 3.5$ . . . . .	39
6.1	Rapporto $U/U_\infty$ nei piani (griglia modificata): (a) $X/R = 1.5$ , (b) $X/R = 2.0$ , (c) $X/R = 2.5$ , (d) $X/R = 3.0$ , (e) $X/R = 3.5$ . . . . .	42
6.2	Rapporto $U/U_\infty$ nel piano $X/R = 2.5$ : (a) $-120^\circ$ , (b) $0^\circ$ , (c) $+120^\circ$	42

6.3	Piano $X/R = 2.5$ : (a) $U/U_\infty$ , (b) componente x della vorticità, (c) Q-criterion . . . . .	43
6.4	Piano XY - componente Z della vorticità: (a) $0^\circ$ , (b) $30^\circ$ , (c) $60^\circ$ , (d) $90^\circ$ , (e) $120^\circ$ . . . . .	45
6.5	Piano XY, campo di pressione: (a) $0^\circ$ , (b) $30^\circ$ , (c) $60^\circ$ , (d) $90^\circ$ , (e) $120^\circ$ . . . . .	46
6.6	Piano XY, campo di velocità: (a) $0^\circ$ , (b) $30^\circ$ , (c) $60^\circ$ , (d) $90^\circ$ , (e) $120^\circ$ . . . . .	47
6.7	Piano $Y=0$ - componente Y della vorticità: (a) prima, (b) durante, (c) dopo il passaggio della pala . . . . .	48
6.8	Piano $Y=-1$ - componente X della vorticità . . . . .	49
7.1	Campo di misura - <i>Fonte</i> - [17] . . . . .	52
7.2	Campo di velocità in camera aperta . . . . .	53
7.3	Campo di velocità in camera chiusa . . . . .	53
7.4	Campo di velocità simulazione numerica . . . . .	53
7.5	Prova in camera chiusa, Coefficiente di pressione totale . . . . .	55
7.6	Simulazione numerica, Coefficiente di pressione totale . . . . .	55
7.7	Piano $X/R = 3$ , Coefficiente di pressione totale . . . . .	56
A.1	Rapporto $U/U_\infty$ nei piani : (a) $X/R = 1.5$ , (b) $X/R = 2.0$ , (c) $X/R = 2.5$ , (d) $X/R = 3.0$ , (e) $X/R = 3.5$ . . . . .	62
A.2	Piano XY, componente Z della vorticità: (a) $0^\circ$ , (b) $+30^\circ$ , (c) $+60^\circ$ , (d) $+90^\circ$ , (e) $+120^\circ$ . . . . .	63
A.3	Piano XY, rapporto $U/U_\infty$ : (a) $0^\circ$ , (b) $+30^\circ$ , (c) $+60^\circ$ , (d) $+90^\circ$ , (e) $+120^\circ$ . . . . .	64
A.4	Piano XY, campo di pressione: (a) $0^\circ$ , (b) $+30^\circ$ , (c) $+60^\circ$ , (d) $+90^\circ$ , (e) $+120^\circ$ . . . . .	65

# Elenco delle tabelle

4.1	caratteristiche generali VAWT . . . . .	27
4.2	Valori fisici simulazioni . . . . .	35
7.1	Parametri prove sperimentali . . . . .	52
7.2	Valori del coefficiente di spinta . . . . .	57
A.1	Valori fisici simulazione . . . . .	61





# Bibliografia

- [1] IEA (International Energy Agency) (2012) *World Energy Outlook - 2012*
- [2] IEA Wind (2011) *IEA Wind Annual Report - 2011*
- [3] EWEA (European Wind Energy Association) (2011) *EWEA Annual Report 2011*
- [4] Bottasso, C.L. (2012) Slide del corso di *Progetto di generatori eolici*
- [5] Manwell, J.F., McGowan, J.G., Rogers A.L. (2009) *Wind Energy Explained - theory, design and application, 2<sup>a</sup> edizione, JohnWileySons*
- [6] Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., Bossanyi, E. (2011) *Wind Energy Handbook, 2<sup>a</sup> edizione, JohnWileySons,*
- [7] Paraschivoiu, I. (2009) *Wind Turbine Design - With Emphasis on Darrieus Concept, (1<sup>a</sup> edizione 2002), Presses Internationales Polytechnique*
- [8] Mertens, S., van Kuik, G., van Bussel, G. (2003) "Performance of a H-Darrieus in the Skewed Flow on a Roof," *ASME J. Sol. Energy Eng.*, pp. 433–440
- [9] Fujisawa, N., Shibuya, S. (2001) Observations of dynamic stall on Darrieus wind turbine blades, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 89, pp. 201–214
- [10] Paraschivoiu, I. (2008) "Double-multiple streamtube model for studying vertical-axis wind turbines", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 4, No. 4, 370-377
- [11] Strickland, J.H. (1980) A Vortex Model of the Darrieus Turbine: An Analytical and Experimental Study, *Sandia Report SAND81-7917*
- [12] Anderson, J. D. Jr (2001) *Fundamentals of Aerodynamics*, McGraw-Hill
- [13] De Ponte, S. (2000) *Aerodinamica Tecnica*, CUSL editore
- [14] Pope, S. B. (2000) *Turbulence Flows* Cambridge University Press
- [15] Quadrio, M. (2012) Slide del corso di *Instabilità e turbolenza*
- [16] Spalart, P. R., Jou, W., Strelets, M., Allmaras, S.R. (1997) Comments on the Feasibility of LES for Wings, and on a Hybrid RANS/LES Approach, 1st AFOSR Int. Conf. On DNS/LES

- [17] Battisti, L., Zanne, L., Dell'Anna, S., Dossena, V., Persico, G., Paradiso, B. (2011) Aerodynamic Measurements on a Vertical Axis Wind Turbine in a Large Scale Wind Tunnel, *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 133,
- [18] Biava, M. (2007) *RANS computations of rotor/fuselage unsteady interactional aerodynamics*, Doctor of Philosophy Thesis, Politecnico di Milano, Milano, Italia
- [19] ROSITA Rotorcraft Software ITALy, *Manual Report*
- [20] Spalart, P. R., Allmaras, S. R. (1992) A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows *AIAA Paper*. 92-0439
- [21] Chesshire, G., Henshaw, W.D. (1990) Composite overlapping meshes for the solution of partial differential equations, *J. Comp. Phys.*, 90, pp. 1–64
- [22] Ferreira, C., van Kuik, G., van Bussel, G. (2006) *Wind tunnel hotwire measurements, flow visualization and thrust measurement of a VAWT in skew*, 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit 9-12 January 2006, Reno, Nevada
- [23] Haller, G. (2005) An objective definition of a vortex, *J. Fluid Mech.*, vol. 525, pp. 1–26.
- [24] Hunt, J. C. R., Wray, A., Moin, P. (1988) Eddies, stream, and convergence zones in turbulent flows, *Center for Turbulence Research Report CTR-S88*
- [25] Ferreira, C.J. S., Bijl, H., van Bussel, G., van Kuik, G. (2007) Simulating Dynamic Stall in a 2D VAWT: Modeling strategy, verification and validation with Particle Image Velocimetry data *Journal of Physics Conference Series* 75
- [26] Hofemann, C., Ferreira, C.J. S., Dixon, K., van Bussel, G., van Kuik, G., Scarano, F. (2008) 3D Stereo PIV Study of tip vortex evolution on a VAWT
- [27] Sørensen, J.N., Shen, W.Z., Mikkelsen, R. (2006) Wall Correction Model for Wind Tunnels with Open Test Section, *AIAA journal*, vol. 44, n. 8