



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

Numerical Investigation of the Influence of both Length and Root Chord on the Aerodynamic Performance of a Tip-Mounted Blended Winglet for HAWT Application

Anno Accademico 2012-2013

Relatore: Prof. Ing. Ernesto Benini

Co-relatore: Ing. Marco Raciti Castelli

Laureando: Luca Michelini

Matricola: 626573

Indice

1	Introduzione	7
1.1	Sommario	7
1.2	L'energia Eolica	8
1.3	L'utilizzo delle Winglet	10
1.4	Analisi Bibliografica	10
2	Aerodinamica delle Turbine Eoliche	13
2.1	Introduzione	13
2.2	Funzionamento della Turbina Eolica	13
2.3	Modelli Aerodinamici	15
2.3.1	Metodo del Disco Attuatore	17
2.3.2	Metodo dell'Elemento di Pala	22
2.4	Altri Metodi Utilizzati	22
3	Utilizzo della CFD in Ambito Eolico	25
3.1	Sistema di Riferimento Non Inerziale	26
3.2	Modelli di Turbolenza	28
3.3	Condizioni al Contorno	29
4	Modellazione della Turbina Eolica	31
4.1	Configurazione NREL Phase VI	31
4.2	Caratteristiche della Mesh	34
4.3	Parametri del Solutore CFD	35
5	Validazione dei Risultati	39
5.1	Introduzione	39
5.2	Distribuzione di Pressione sulla Pala	40
5.3	Coppia all'Asse	48
5.4	Coefficiente di Potenza	50
5.5	Momento Flettente	50
6	Analisi delle Winglet	55
6.1	Introduzione	55
6.2	Geometria della Winglet	58

6.3	Analisi Fluidodinamiche e Risultati	59
6.3.1	Andamento della Pressione	60
6.3.2	Andamento del Coefficiente di Coppia	64
6.3.3	Confronto tra le Diverse Configurazioni	69
7	Conclusioni	71
7.1	Discussione dei Risultati	71
7.2	Sviluppi Futuri	73
A	Profilo S809	77
B	Articolo	79

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Sommario

Nell'ottica di ridurre il consumo dei carburanti fossili, che sono una tra le cause del cambiamento climatico a cui stiamo assistendo in questi anni, l'energia eolica sta lentamente prendendo piede come una tra le fonti di produzione alternativa di energia.

Le turbine eoliche, presenti anche sul territorio nazionale, presentano una realtà consolidata nel campo della produzione energetica e a livello europeo si osserva un costante trend positivo di crescita del numero annuo di nuove installazioni. Con il fine di generare una potenza maggiore, le turbine eoliche devono espandersi in direzione radiale, aumentando il diametro delle loro pale e l'altezza della torre che le sostiene generando però l'incremento dell'impatto visivo, acustico e ambientale.

Questo lavoro di tesi punta a dimostrare l'efficacia delle winglet, o alette d'estremità, installate alle estremità delle pale di una turbina eolica con lo scopo di aumentare la potenza generata e di ridurre la superficie interessata dal rotore in modo da diminuire l'impatto ambientale e l'inquinamento visivo che le pale potrebbero apportare al paesaggio in cui sono immerse.

Dopo un primo capitolo necessario a fare il punto della situazione sullo stato dell'arte delle turbine eoliche tramite un'analisi bibliografica, il capitolo 2 descrive alcuni modelli matematici utilizzati per analizzare il comportamento aerodinamico delle turbine. Il terzo capitolo è incentrato sulla descrizione dell'utilizzo della CFD per le analisi delle turbine eoliche.

Il capitolo 4 descrive il modello utilizzato. Si è deciso di analizzare un turbina esistente e già studiata in maniera approfondita: la pala sviluppata dalla NREL per le analisi della Fase VI. Questa turbina è stata testata in galleria del vento e tutti i risultati ottenuti sono stati rilasciati pubblicamente.

Nel capitolo 5 vengono riportati i risultati ottenuti nella fase di validazione del modello con un confronto tra i risultati numerici e quelli speri-

mentali. Il capitolo 6 analizza la fase di creazione geometrica delle winglet e i risultati ottenuti dalle simulazioni. L'ultimo capitolo riassume le conclusioni ottenute nei capitoli precedenti e propone alcuni sviluppi futuri sull'argomento.

1.2 L'energia Eolica

Negli ultimi anni si è assistito ad un incremento nella richiesta di energia soddisfatta ancora in gran parte dall'utilizzo dei carburanti fossili che sono alla base dei cambiamenti climatici che stanno avvenendo sul nostro pianeta, legati sia all'effetto serra che all'inquinamento dell'aria. Questi sconvolgimenti climatici hanno portato, nel 1997, alla stesura del Protocollo di Kyoto, a cui hanno aderito più di 160 Paesi nel Mondo. Nella tabella 1.1 sono visibili le percentuali di utilizzo delle diverse fonti di energia, aggiornata al 2011. Si può notare che la fonte più utilizzata risulta tutt'ora il petrolio, seguito dal carbone mentre l'energia eolica viene classificata all'interno della categoria *altre fonte energetiche* che attualmente contribuisce alla richiesta di energia con una percentuale inferiore al 1%.

Tabella 1.1: *Fornitura energetica mondiale, tratto da [1]. Tra le altre fonti d'energia rientrano l'eolico, il solare, il geotermico ed altre.*

Tipologia	%
Petrolio	32.4
Carbone	27.3
Gas naturale	21.4
Nucleare	5.7
Idrodinamico	2.3
Biocarburanti	10.0
Altri	0.9

Il Protocollo di Kyoto prevedeva una riduzione del 5% di emissioni di CO_2 nell'arco temporale 2008 – 2012. Successivamente diversi Paesi, in particolare all'interno dell'Unione Europea, hanno sviluppato dei propri obiettivi per la riduzione delle emissioni inquinanti. Uno dei metodi per diminuire le emissioni è quello di utilizzare le cosiddette energie alternative, ovvero tutte quelle fonti di energia, elettrica o meccanica, che non utilizzano i combustibili fossili. Tra queste rientra anche l'energia eolica, ottenuta convertendo l'energia cinetica del vento in energia meccanica capace di mettere in moto un generatore elettrico necessario per ottenere l'energia elettrica. Nella figura 1.1 è possibile vedere lo spaccato di una navicella della turbina. Le pale, ruotando ad una velocità di diverse decine di giri al minuto, mettono in movimento un moltiplicatore di giri che porta l'albero alla velocità desiderata di alcune centinaia di giri al minuto. Quest'ultimo è collegato al generatore

elettrico che viene fatto ruotare alla velocità necessaria per poter generare corrente, continua o alternata a seconda della rete di alimentazione al quale viene connesso.

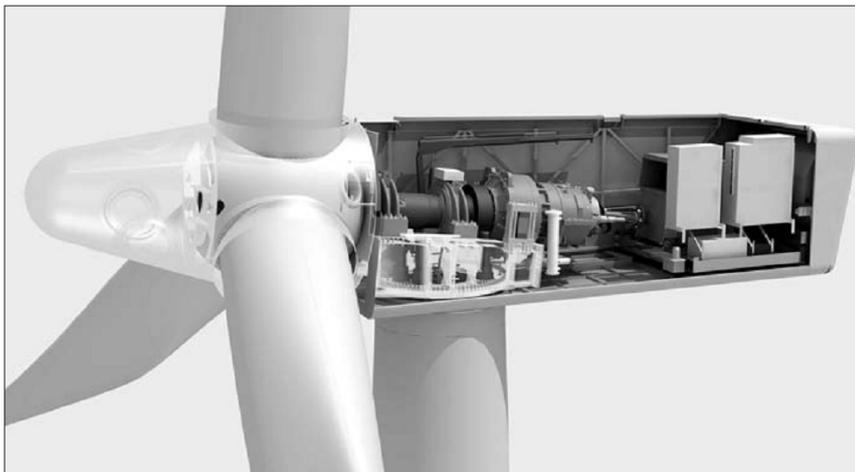


Figura 1.1: Esempio di turbina eolica ad asse orizzontale, tratto da [3].

L'Associazione Europea per l'Energia Eolica, EWEA, ha confermato, nell'analisi annuale del 2012 [2], il trend positivo di crescita delle nuove installazioni eoliche sul territorio dell'Unione Europea con una percentuale del 21.4% rispetto al totale delle nuove installazioni energetiche. Nel 2011 sono state installate nuove turbine per un totale di circa 9.6MW di potenza disponibile con un incremento positivo del 15.6% rispetto l'anno precedente. Il Paese che guida la crescita in Europa è la Germania con circa 2000MW di nuove installazioni annue, seguita dalla Spagna, Francia, Italia e Regno Unito.

La potenza massima estraibile dal flusso d'aria che investe la turbina può essere quantificata pari a

$$P = \frac{1}{2} \rho c_P A V_\infty^3 \quad (1.1)$$

dove è possibile osservare la dipendenza dal flusso d'aria, proporzionale alla densità ρ e al cubo della velocità indisturbata V_∞^3 , e dalle caratteristiche della turbina, generalizzate dal coefficiente di potenza c_P e dall'area spazzata A . Per la Regola di Betz, nel caso di una turbina ad asse orizzontale, il coefficiente di potenza non può superare il valore di 0.593. Al giorno d'oggi le moderne turbine eoliche hanno un valore medio compreso tra 0.45 e 0.5. Per incrementare la potenza generata si utilizza la soluzione di aumentare l'area del rotore in modo da intercettare una quantità d'aria maggiore. Per fare questo, però, occorre aumentare la dimensione delle pale e della torre che sostiene la turbina, facendo crescere di gran lunga i costi di produzione e di installazione, e soprattutto incrementando l'impatto visivo e ambientale del

rotore. Questo è uno dei motivi che hanno rallentato lo sviluppo dell'energia eolica in quanto le turbine, caratterizzate da dimensioni importanti e dovendo essere installate in posizione elevata rispetto il livello del suolo, risultano visibili da grandi distanze e possono modificare il panorama dell'ambiente in cui sono collocate.

1.3 L'utilizzo delle Winglet

Una soluzione che permette di incrementare la potenza senza aumentare la dimensione del rotore è quella di aggiungere delle alette all'estremità della pala ottenendo miglioramenti sull'efficienza della turbina senza aumentare l'impatto ambientale e visivo della macchina. Prevedere la presenza della winglet durante la fase di progetto di una nuova turbina permette di ridurre le dimensioni del rotore a parità di potenza estratta, riducendo quindi gli effetti legati all'inquinamento visivo dato dalla presenza della macchina nell'ambiente.

Le alette d'estremità sono state introdotte negli anni '70 sulle ali dei grandi aerei da trasporto, come descritto da Whitcomb [21] che le ha battezzate con il nome di winglet, con lo scopo di migliorare l'efficienza delle ali riducendo i consumi di carburante. Negli anni successivi si è pensato di introdurre le alette d'estremità sulle pale delle turbine eoliche siano esse ad asse orizzontale che nel caso di quelle ad asse verticale.

Lo scopo di questa tesi è di dimostrare, utilizzando analisi numeriche tramite strumenti CFD, gli effetti della presenza delle winglet sulle caratteristiche aerodinamiche delle turbine eoliche. In particolare verranno analizzati gli effetti legati a singoli parametri geometrici quali la corda alla radice e la lunghezza dell'aletta. L'effetto positivo riscontrato sulle ali degli aerei è stato ritrovato anche sulle pale delle turbine eoliche, permettendo di migliorare l'efficienza del rotore.

1.4 Analisi Bibliografica

In letteratura sono presenti molti articoli riguardanti le prove condotte in galleria del vento da parte della *NREL*, National Renewable Energy Laboratory. Avere a disposizione i risultati sperimentali ottenuti durante le prove in galleria del vento uniti ad una completa documentazione che illustra sia la reale geometria della turbina sia le procedure seguite durante i test, hanno permesso alla comunità scientifica di validare molti modelli numerici utilizzati o crearne di nuovi. Prima di rilasciare i risultati sperimentali ottenuti, la *NREL* ha richiesto ad alcuni istituti di ricerca di prevedere, utilizzando diversi strumenti tra cui metodi CFD, codici aeroelastici e codici BEM, i risultati delle prove in galleria. I valori previsti sono riportati nel documento [9] confrontandoli con quelli misurati durante i test.

Successivamente, molti altri ricercatori hanno utilizzato i risultati disponibili per validare o correggere modelli numerici. Particolare attenzione è stata data agli articoli che descrivono simulazioni della turbina NREL utilizzando strumenti CFD, in modo da confrontare il metodo seguito e i risultati ottenuti in questa tesi. *Mo et al.* [10] hanno simulato le prove in galleria del vento utilizzando Fluent come solutore CFD, ottenendo ottimi risultati. La mesh è stata creata in Gambit, è del tipo strutturato con circa 3 milioni di celle. Il modello di turbolenza utilizzato è il $k - \omega SST$, il valore medio di y^+ è di circa 7 per le simulazioni con vento a $7m/s$.

L'articolo di *Le Pape et al.* [11] descrive le simulazioni CFD condotte sulla turbina NREL, utilizzando un codice CFD, *elsA*, sviluppato internamente all'ONERA. Il modello di turbolenza è il $k - \omega SST$ e i risultati ottenuti alle basse velocità rispecchiano correttamente i risultati sperimentali, mentre alle alte velocità il solutore sottostima i valori della coppia probabilmente a causa di un'errata previsione dello stallo.

Huang et al. [12] hanno sviluppato un solutore delle equazioni di Navier-Stokes con uno schema di preconditionamento pesato non oscillante. Le simulazioni della turbina eolica NREL Phase VI sono state condotte con una mesh di circa 3.6 milioni di celle con un y^+ medio sulla superficie della pala inferiore a 2. Il modello di turbolenza utilizzato è lo Spallart-Allmaras ad una equazione. I risultati numerici ottenuti si discostano lievemente da quelli reali mantenendo però lo stesso trend di quelli sperimentali al variare della velocità.

Sørensen et al. [13] hanno condotto le medesime simulazioni utilizzando il solutore *EllipSys3D* sviluppato al Risø National Laboratory. I risultati ottenuti sono in accordo con quelli sperimentali. La mesh è formata da circa 4 milioni di cell con y^+ inferiore a 2 su tutta la superficie della pala. Il modello di turbolenza utilizzato è il $k - \omega SST$. Sono state condotte due tipologie di analisi con la presenza delle pareti della galleria del vento e senza dimostrando che questa non influenza le caratteristiche aerodinamiche della turbina.

Le winglet sono delle alette aerodinamiche montate all'estremità delle ali su aerei da trasporto di grandi dimensioni con lo scopo di diminuire i consumi di carburante, oppure su alianti ad elevate performance per incrementare l'efficienza dell'ala senza aumentarne l'apertura.

Whitcomb [21] nel 1976 ha dimostrato, grazie ad una esaustiva campagna di prove sperimentali in galleria del vento, l'incremento di efficienza data dall'aggiunta di winglet sulle ali degli aerei da trasporto. Al giorno d'oggi praticamente ogni aereo da trasporto civile è equipaggiato con le alette d'estremità.

Dalla fine degli anni 80 le winglet sono state studiate per migliorare le caratteristiche delle turbine eoliche ad asse orizzontale e verticale. *Shimizu et al.* [?] hanno testato la presenza delle winglet sulle turbine eoliche ad asse orizzontale con prove sperimentali in galleria del vento sviluppando teorie

numeriche. Negli anni successivi *Imamura et al.* [?] hanno sviluppato metodi numerici basati sul metodo dei vortici dimostrandolo l'effetto positivo dato dalla presenza delle winglet sulle turbine eoliche.

Ultimamente *Johansen and Sørensen* [17] hanno simulato gli effetti delle winglet sulle turbine ad asse orizzontale utilizzando un solutore CFD, EllipSys3D. Hanno dimostrato che la presenza della winglet incrementa sia la potenza ottenuta dalla macchina che la spinta assiale. Inoltre hanno dimostrato che la presenza di svergolamento sull'aletta ne incrementa gli effetti mentre posizionarla sul lato in pressione della pala li riduce.

Capitolo 2

Aerodinamica delle Turbine Eoliche

2.1 Introduzione

Esistono principalmente due tipologie di turbine eoliche, classificate in base alla direzione dell'asse di rotazione delle pale: turbine eoliche ad asse orizzontale (*HAWT*, *Horizontal Axis Wind Turbine*), visibili in figura 2.1, e turbine eoliche ad asse verticale (*VAWT*, *Vertical Axis Wind Turbine*), con alcune configurazioni riportate nella figura 2.2. Questa tesi analizza il comportamento di una turbina ad asse orizzontale.

Le turbine ad asse orizzontale presentano diversi vantaggi se paragonate alle *VAWT*, in particolare permettono di ottenere coefficienti di potenza più elevati, possono operare ad un'altezza dal suolo maggiore evitando quindi lo strato più basso di atmosfera caratterizzato dalla presenza dello strato limite e quindi da velocità inferiori del vento e da un flusso d'aria non propriamente pulito e quindi con andamento turbolento, hanno un comportamento meccanico stabile e quindi possono raggiungere dimensioni elevate. Le turbine eoliche ad asse verticale, invece, presentano un'efficienza inferiore ma hanno un funzionamento indipendente dalla direzione di provenienza del vento perciò possono funzionare anche in condizioni di vento turbolento. Sono caratterizzate da una velocità di inizio funzionamento bassa che permette loro di sfruttare venti deboli, quindi possono essere posizionate a livello del suolo diminuendo i costi di installazione e di manutenzione. Avendo un ridotto impatto acustico e visivo possono essere adatte all'uso domestico e urbano.

2.2 Funzionamento della Turbina Eolica

Lo scopo finale di una turbina eolica è quello di convertire l'energia del vento in energia elettrica, passando attraverso l'energia meccanica. La coppia



Figura 2.1: Esempio di configurazione ad asse orizzontale, tratto da [4].

ottenuta dalla rotazione delle pale viene trasferita, tramite un albero motore, al generatore. Questo collegamento può essere diretto o passare attraverso una serie di moltiplicatori o di riduttori di giri con lo scopo di ottenere la corretta velocità di rotazione del generatore. In ogni caso deve essere presente un sistema di controllo e regolazione capace di mantenere la velocità di rotazione della turbina al valore desiderato. Esiste una velocità del vento alla quale la turbina inizia ad operare, detta *cut-in velocity*, solitamente intorno ai 3 m/s, mentre la velocità massima oltre la quale la turbina si ferma viene chiamata *cut-off velocity*, è fissata dal progettista generalmente ad un valore intorno ai 25m/s.

Al fine di garantire la velocità di rotazione ideale, vengono utilizzati alcuni metodi di controllo, in particolare il controllo del pitch, quindi la possibilità di variare l'angolo di pitch, o di passo, della pala a seconda della velocità del vento, oppure il controllo tramite stallo dove la pala entra in stallo se la velocità del vento è superiore ad un prefissato valore massimo dato che il profilo aerodinamico è scelto in modo da operare con angolo d'attacco ottimale alla velocità media, riducendo la portanza generata e aumentando la resistenza prodotta in modo da diminuire la velocità di rotazione.

Una turbina eolica viene caratterizzata da una serie di parametri quali, ad esempio, il numero delle pale, la velocità di rotazione, la velocità dell'estremità, la potenza nominale, il sistema di controllo utilizzato.

La turbina viene montata in cima ad una torre che la mantiene all'altezza

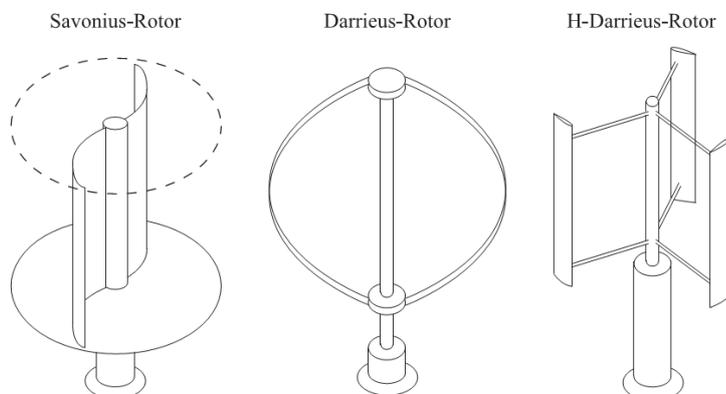


Figura 2.2: Esempi di configurazioni di turbine eoliche ad asse verticale, tratto da [5].

desiderata evitando la zona più vicina al suolo e soggetta ad un flusso di vento turbolento. In cima alla torre è posizionata la gondola, detta anche navicella, che contiene il generatore elettrico, il moltiplicatore di giri e il sistema di controllo della turbina. Inoltre sono presenti metodi passivi oppure sistemi di attuatori elettrici che permettono di ruotare l'asse del rotore per orientarlo verso la direzione di provenienza del vento.

2.3 Modelli Aerodinamici

Sono stati sviluppati diversi metodi analitici per analizzare le caratteristiche aerodinamiche di una turbina eolica che verranno descritti nel presente capitolo. Prima però vengono introdotti dei parametri e delle definizioni di carattere generale.

Rapporto di velocità periferica della pala esprime il rapporto tra la velocità tangenziale dell'estremità della pala e la velocità del flusso indisturbato del vento

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V_\infty} \quad (2.1)$$

dove Ω è la velocità angolare, R la lunghezza della pala e V_∞ la velocità del vento indisturbata. Questo rapporto identifica la condizione in cui opera la turbina.

Solidità viene definita come il rapporto tra l'area della pala e l'area del disco del rotore,

$$\sigma = \frac{\text{Area Pala}}{\text{Area Disco}} \quad (2.2)$$

Coefficiente di potenza descrive la porzione di energia del flusso che viene convertita in potenza dalla turbina

$$c_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho AV_\infty^3} \quad (2.3)$$

dove ρ è la densità del fluido e A l'area del disco. La potenza P è la porzione di energia catturata rispetto a quello disponibile dal vento,

$$P_0 = \dot{m}e = \frac{1}{2}\rho AV_\infty^3 \quad (2.4)$$

dove

$$\dot{m} = \rho AV_\infty \quad (2.5)$$

è la portata di massa del fluido e

$$e = \frac{1}{2}V_\infty^2 \quad (2.6)$$

è l'energia cinetica dell'aria, per unità di massa. Allora

$$P = c_P P_0 \quad (2.7)$$

dove c_P non potrà mai superare il valore massimo $c_{p,max} = 0.59$ in accordo con il limite di Betz.

Coefficiente di coppia è il coefficiente che adimensionalizza la coppia prodotta dalla turbina in modo da poter confrontare i risultati ottenuti da due turbine di diametro diverso

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho RAV_\infty^2} \quad (2.8)$$

Coefficiente di spinta in maniera analoga al coefficiente di potenza, il coefficiente di spinta è il rapporto tra l'integrale delle forze che agiscono sulla pala e il termine dovuto all'energia del fluido sulla superficie del disco,

$$C_S = \frac{S}{\frac{1}{2}\rho AV_\infty^2} \quad (2.9)$$

Coefficiente di pressione, di portanza e di resistenza vengono definiti lungo il profilo aerodinamico di una sezione della pala di corda c e valgono rispettivamente

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho cU^2} \quad (2.10)$$

$$C_l = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho cU^2} \quad (2.11)$$

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho c U^2} \quad (2.12)$$

dove U identifica la velocità del flusso che per una stazione lungo la pala alla distanza r dal mozzo vale $U^2 = V_\infty^2 + \Omega^2 r^2$ mentre L e D sono rispettivamente la portanza e la resistenza del profilo cioè la componente della risultante aerodinamica normale e parallela alla corda. Solitamente, in ambito aeronautico, si utilizza il valore negativo del coefficiente di pressione in modo da ottenere un grafico che rappresenta in alto l'andamento delle pressioni sull'estradosso del profilo e in basso quello sull'intradosso.

2.3.1 Metodo del Disco Attuatore

E' un metodo semplice, descritto da Betz, per ottenere la potenza generata da una turbina ideale utilizzando la teoria della quantità di moto all'interno di un volume di controllo delimitato da un tubo di flusso compreso tra due sezioni trasversali circolari attraversate dal flusso, visibile in figura 2.3. La pala viene rappresentata da un disco attuatore che determina una differenza di pressione sul flusso che lo attraversa.

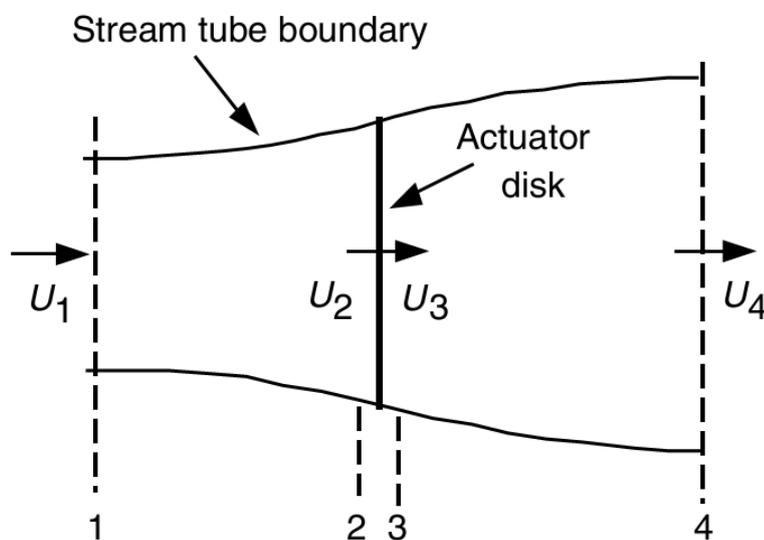


Figura 2.3: Volume di controllo e disco attuatore, tratto da [4].

Questa teoria prevede alcune assunzioni tra cui: l'assenza di resistenza viscosa, flusso costante uniforme e incompressibile, numero infinito di pale, spinta uniforme sul disco, scia non rotante e pressione a valle e a monte del volume di controllo pari alla pressione indisturbata.

Applicando la conservazione della quantità di moto al volume di controllo, come descritto da [4], è possibile determinare la spinta dovuta al flusso d'aria:

$$S = U_1 (\rho AU)_1 - U_4 (\rho AU)_4 \quad (2.13)$$

che nel caso di flusso stazionario diventa

$$S = \dot{m} (U_1 - U_4) \quad (2.14)$$

Dall'equazione di Bernoulli, nella zona a monte della pala

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho U_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho U_2^2 \quad (2.15)$$

mentre nella zona a valle

$$p_3 + \frac{1}{2}\rho U_3^2 = p_4 + \frac{1}{2}\rho U_4^2 \quad (2.16)$$

dove si assume che la pressione molto distante dalla pala sia indisturbata, quindi $p_1 = p_4$ mentre la velocità del flusso che attraversa la pala rimane costante, $U_2 = U_3$.

Dato che la spinta si può ottenere dalla sommatoria delle forze sulla superficie del disco,

$$S = A_2 (p_2 - p_3) \quad (2.17)$$

allora sostituendo le equazioni 2.15 e 2.16 nella 2.17 si ottiene

$$S = \frac{1}{2}\rho A_2 (U_1^2 - U_4^2) \quad (2.18)$$

Uguagliando l'equazione 2.14 con la 2.18 e ricordando che la portata di massa risulta pari a

$$\dot{m} = \rho A_2 U_2 \quad (2.19)$$

si ottiene

$$U_2 = \frac{U_1 + U_4}{2} \quad (2.20)$$

cioè che la velocità del flusso nel piano del rotore è pari alla media della velocità tra il flusso a monte e quello a valle.

Si definisce

$$a = \frac{U_1 - U_2}{U_1} \quad (2.21)$$

il fattore di induzione assiale, pari alla frazione di diminuzione della velocità del vento tra il flusso a monte e sul piano del rotore.

La potenza ottenuta sul disco del rotore è pari alla spinta moltiplicata per la velocità al disco

$$P = \frac{1}{2}\rho A_2 (U_1^2 - U_4^2) U_2 \quad (2.22)$$

e sostituendo il fattore di induzione assiale

$$P = \frac{1}{2}\rho A_2 U_1^3 4a(1-a)^2 \quad (2.23)$$

Viene definito il coefficiente di potenza il valore adimensionale

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho U^3 A} \quad (2.24)$$

utilizzando le grandezze $A = A_2$ ovvero l'area del rotore e $U = U_1$ cioè la velocità indisturbata. Questo coefficiente rappresenta la frazione di potenza estratta dalla turbina rispetto la potenza complessiva posseduta dal flusso d'aria.

Risulta interessante determinare il massimo della funzione del coefficiente di potenza, ottenuto sostituendo l'espressione 2.23 nella 2.24 ottenendo

$$C_P = 4a(1-a)^2 \quad (2.25)$$

Il massimo della funzione si ha per $a = 1/3$ dove $C_P = 0.5926$, come visibile in fig. 2.4. Nella stessa immagine è visibile anche il coefficiente di spinta definito come

$$C_S = \frac{\frac{1}{2}\rho A U^2 [4a(1-a)]}{\frac{1}{2}\rho A U^2} \quad (2.26)$$

con il massimo ottenuto per $a = 0.5$ dove $C_T = 1$.

Questo grafico rappresenta il comportamento di una turbina eolica ideale che, nel caso riuscisse ad operare con velocità del flusso sul rotore pari a $2/3$ della velocità del flusso indisturbato, si troverebbe nella condizione di massima potenza possibile.

Nella realtà il massimo del coefficiente di potenza sarà sempre inferiore al valore teorico $C_{P,max} = 0.5926$, detto valore limite di Betz, a causa di fenomeni legati alla scia a valle della pala, al numero finito di pale, alle perdite che avvengono all'estremità del rotore e alla resistenza viscosa. Inoltre, per valori del fattore di induzione assiale superiore a $a = 0.5$, la teoria utilizzata non risulta più valida in quanto il flusso a valle del rotore diventa molto complesso.

La teoria appena descritta può essere estesa considerando che il moto del rotore genera una quantità di moto angolare nel fluido a valle del disco attuatore. L'energia utilizzata per generare la componente rotazionale del flusso viene sottratta da quella estratta dal rotore dal vento, quindi la produzione di un flusso rotazionale determina una diminuzione dell'efficienza della turbina. Se si considera la turbina che ruota alla velocità angolare Ω e la velocità angolare del flusso ω inferiore a quella della turbina, allora è possibile ipotizzare [4] che la pressione nella scia molto a valle del rotore sia uguale alla pressione nel flusso indisturbato.

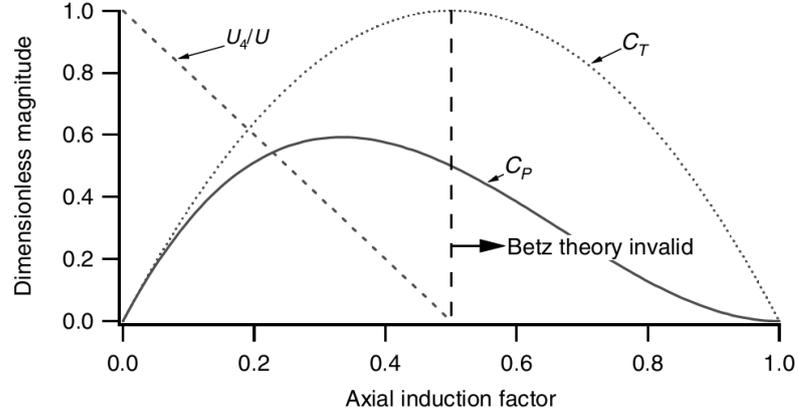


Figura 2.4: *Comportamento del C_P e C_S in funzione del fattore di induzione assiale, tratto da [4].*

Si consideri un elementino anulare del volume di controllo, alla distanza r dall'asse e di spessore dr , che si muove con la velocità angolare del rotore, Ω . Applicando l'equazione dell'energia, osservando che nel passaggio attraverso il disco attuatore la velocità assiale rimane costante mentre quella angolare aumenta da Ω a $\Omega + \omega$, si ricava

$$p_2 - p_3 = \rho \left(\Omega + \frac{1}{2}\omega \right) \omega r^2 \quad (2.27)$$

e di conseguenza la spinta sull'elementino risulta pari a

$$dS = (p_2 - p_3) dA = \left[\rho \left(\Omega + \frac{1}{2}\omega \right) \omega r^2 \right] 2\pi r dr \quad (2.28)$$

Si definisce il fattore di induzione angolare

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega} \quad (2.29)$$

che permette di calcolare la velocità indotta dal rotore nelle due componenti: assiale, Ua , e angolare, $r\Omega a'$.

L'espressione 2.28 diventa

$$dS = 4a' (1 + a') \rho \Omega^2 r^3 \pi dr \quad (2.30)$$

La stessa espressione può essere descritta in funzione del fattore di induzione assiale ottenendo

$$dS = 4a (1 - a) \rho U^2 \pi r dr \quad (2.31)$$

ed uguagliando le due espressioni si ottiene

$$\frac{a(1-a)}{a'(1+a')} = \frac{\Omega^2 r^2}{U^2} = \lambda_r^2 \quad (2.32)$$

dove λ è il rapporto di velocità periferica della pala

$$\lambda = \frac{\Omega R}{U} \quad (2.33)$$

mentre λ_r è il rapporto di velocità locale definito come

$$\lambda_r = \frac{\Omega r}{U} = \frac{\lambda r}{R} \quad (2.34)$$

Dalla legge di conservazione del momento angolare della scia è possibile ricavare l'espressione della coppia esercitata dal rotore, Q . Analizzando un elementino del volume di controllo

$$dQ = d\dot{m}\omega r^2 = 2\rho U_2 \pi \omega r^3 dr \quad (2.35)$$

Sostituendo le espressioni del fattore di induzione assiale e angolare si ottiene

$$dQ = 4a'(1-a)\rho U \Omega r^2 2\pi r dr \quad (2.36)$$

che permette di calcolare la potenza generata dall'elemento

$$dP = \Omega dQ = \frac{1}{2}\rho A U^3 \left[\frac{8}{\lambda^2} a'(1-a) \lambda_r^3 d\lambda_r \right] \quad (2.37)$$

Il coefficiente di potenza si ottiene dall'integrale

$$C_P = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^\lambda a'(1-a) \lambda_r^3 d\lambda_r \quad (2.38)$$

Il valore massimo può essere calcolato sostituendo $x = (1 - 3a)$ ottenendo

$$C_{P,max} = \frac{8}{729\lambda^2} \left\{ \frac{64}{5}x^5 + 72x^4 + 124x^3 + 38x^2 - 63x - 12\ln x - 4x^{-1} \right\}_{x=1-3a_2}^{x=0.25} \quad (2.39)$$

dove il fattore a_2 identifica il fattore di induzione assiale nel caso in cui $\lambda = \lambda_r$.

La figura 2.5 illustra il confronto tra il comportamento ideale in presenza dell'effetto di rotazione della scia e in assenza. Si può osservare che all'aumentare del rapporto di velocità periferica il comportamento della turbina tende al valore massimo teorico cioè al limite di Betz.

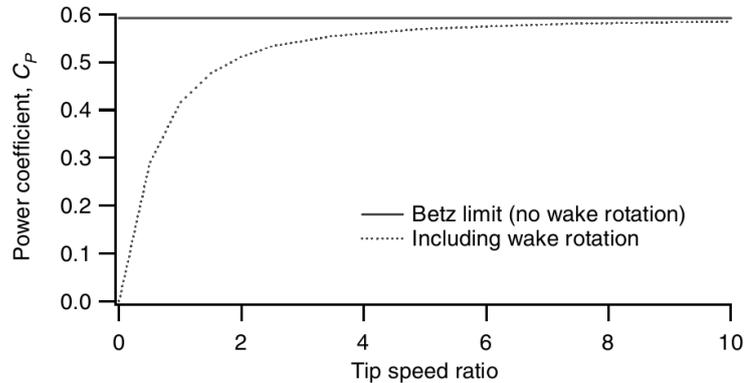


Figura 2.5: Comportamento di una turbina ideale, con e senza l'effetto della rotazione sulla scia, tratto da [4].

2.3.2 Metodo dell'Elemento di Pala

Detto anche metodo *BEM* o *blade element momentum*, permette di ottenere in maniera rapida ed economica ottimi risultati numerici, come descritto da [3]. Si basa sull'idea di suddividere il flusso in numerosi volumi di controllo anulari racchiusi in superfici di flusso come visibile in figura 2.6, dove vengono applicate le equazioni di conservazione della quantità di moto e dell'energia. Permette di calcolare i carichi stazionari, le forze normali e la potenza generata per diverse configurazioni di velocità del vento, velocità di rotazione e angolo di pitch.

Per ottenere soluzioni valide occorre introdurre almeno due tipologie di correzioni, in particolare il fattore di Prandtl della perdita all'estremità della pala che corregge l'assunzione di pala infinita e la correzione di Glauert che lega il coefficiente di spinta con il fattore di induzione assiale quando a è superiore a 0.3.

Attualmente il BEM viene comunemente utilizzato come strumento di progetto nell'industria eolica per il fatto che garantisce buoni risultati in tempi molto brevi. Per maggiori approfondimenti si consiglia di consultare il testo [3].

2.4 Altri Metodi Utilizzati

Esistono altri metodi comunemente utilizzati per l'analisi e la progettazione delle turbine eoliche. Ad esempio sono state sviluppate teorie che utilizzano i metodi dei pannelli o i metodi dei vortici.

Questi metodi utilizzano la teoria della linea portante per rappresentare il comportamento della pala e della scia. L'intensità dei vortici dipende dalla

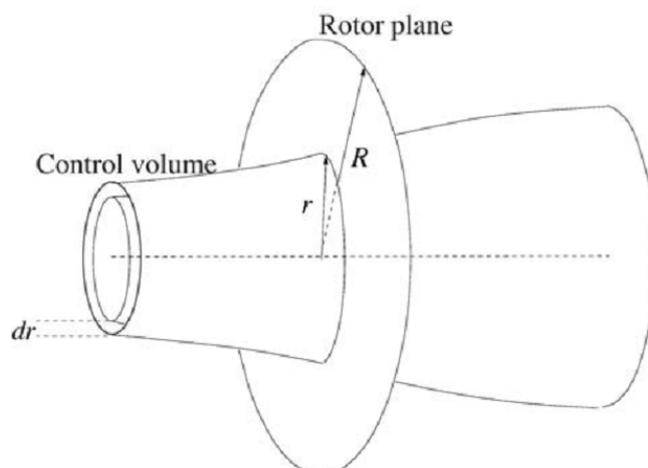


Figura 2.6: Volume di controllo delimitato dalla superficie anulare, tratto da [3].

circolazione attorno alla pala che a sua volta è funzione della portanza creata nella sezione della pala in esame, legati dal teorema di Kutta-Joukowski

$$L = \rho U_{\infty} \Gamma \quad (2.40)$$

dove Γ rappresenta l'intensità della circuitazione.

Per descrivere il comportamento complessivo occorre discretizzare il corpo in esame con una serie di pannelli associati ad una distribuzione superficiale di sorgenti e dipoli. Per maggiori approfondimenti si rimanda a testi specializzati come [15].

I metodi fino a questo punto analizzati, però, hanno il limite di analizzare solamente l'aspetto non viscoso del flusso trascurando una parte del fenomeno. Per questo motivo limitano i risultati ottenuti nello studio di un fenomeno complesso come quello delle turbine eoliche.

Un discorso a parte deve essere fatto per la fluidodinamica computazionale, trattata nel prossimo capitolo, che a partire dagli anni '90 ha dimostrato la propria bontà nelle analisi aerodinamiche dei rotori. Questi strumenti permettono di ottenere un'analisi completa del fenomeno, considerando l'effetto viscoso del flusso anche nel caso di una geometria complessa come la pala con la winglet.

Capitolo 3

Utilizzo della CFD in Ambito Eolico

Grazie allo sviluppo della fluidodinamica computazionale, o Computational Fluid Dynamics, in breve CFD, e all'aumento della potenza dei computers, molti problemi della fluidodinamica che non avevano una soluzione analitica ma che potevano essere analizzati solamente in maniera sperimentale in galleria del vento sono stati risolti con l'aiuto del calcolatore.

Il codice CFD permette di ottenere la soluzione numerica delle equazioni differenziali di Navier-Stokes discretizzandole con metodi a differenze finite o a volumi finiti. Il codice è diviso in tre parti principali:

- il preprocessore, serve a tradurre il problema fisico nel modello matematico. In questa fase viene definito il dominio computazionale, diviso in elementi tramite la mesh e vengono definite le condizioni al contorno e le proprietà del fluido. Di solito la mesh non è uniforme ma viene definita in maniera più fine nei punti del dominio in cui le grandezze analizzate hanno una variabilità maggiore e in maniera più grezza nelle zone lontane dall'ostacolo.
- il solutore, che integra numericamente le equazioni che governano il moto in ogni singolo volumetto della mesh in modo da risolvere il sistema di equazioni algebriche in maniera iterativa.
- il postprocessore, che permette l'analisi dei risultati rendendo la soluzione delle equazioni in ogni volume della griglia in una forma analizzabile e facilmente comprensibile dall'utente.

I vantaggi legati all'utilizzo della CFD per problemi fluidodinamici sono dati dal fatto che questo tipo di analisi è economica e veloce rispetto ad altre tipologie di analisi, in particolare le prove in galleria del vento, ma permette di ottenere risultati globali anche per grandi sistemi. Lo sviluppo dei codici

di calcolo e della potenza dei personal computer permette di svolgere analisi anche molto complesse senza richiedere l'uso di workstations dedicate.

Per la teoria generale alla base delle analisi CFD si rimanda a testi dedicati. In questa tesi si cerca di descrivere gli strumenti a disposizione per una analisi numerica nell'ambito delle turbine eoliche.

Le equazioni che vengono risolte dal solutore e che descrivono le caratteristiche del flusso sono le equazioni di Navier-Stokes che raggruppano l'equazione della conservazione della massa, detta equazione di continuità, scritta nel seguente modo

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

con S_m la sorgente di massa, e l'equazione della conservazione della quantità di moto

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau} + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3.2)$$

dove $\bar{\tau}$ è il tensore delle tensioni pari a

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (3.3)$$

mentre p è la pressione statica, $\rho \vec{g}$ la forza di gravità, mentre \vec{F} sono le forze esterne. L'equazione 3.2 è espressa in un sistema di riferimento inerziale, ma nel caso della simulazione di turbine eoliche risulta più comodo fare riferimento ad un sistema non stazionario in moto rotativo attorno l'asse della turbina.

3.1 Sistema di Riferimento Non Inerziale

Se si considera un sistema di riferimento mobile, le equazioni del moto vengono modificate per incorporare i termini aggiuntivi delle accelerazioni di Coriolis e centripeta che agiscono sul fluido. In questo modo risulta possibile descrivere, con una analisi stazionaria, il flusso attorno ad un corpo in movimento. In particolare, nell'analisi del flusso attorno una turbina eolica, risulta agevole descrivere il moto in rotazione attorno l'asse utilizzando il sistema di riferimento non inerziale che ruota alla stessa velocità della turbina. In questo modo un fenomeno non stazionario può essere analizzato con un metodo stazionario, riducendo la complessità e il tempo di calcolo necessario.

Generalmente si definisce un unico sistema di riferimento per tutto il dominio fluido, utilizzando l'approccio *single reference frame*, ma per geometrie più complesse è possibile suddividere il dominio in diverse zone associando ad ognuna un diverso sistema di riferimento, con approccio *multiple reference frame*.

Si consideri un sistema di riferimento in moto di rotazione con velocità lineare di traslazione \vec{v}_t e angolare $\vec{\omega}$ rispetto al sistema di riferimento inerziale posto ad una distanza \vec{r}_0 , come rappresentato in figura 3.1.

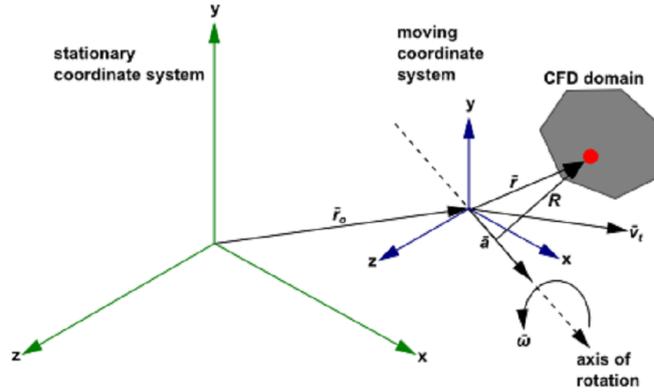


Figura 3.1: Sistema di riferimento mobile, tratto da [6].

L'asse di rotazione è definito dal versore \hat{a} tale che

$$\vec{\omega} = \omega \hat{a} \quad (3.4)$$

L'espressione della velocità relativa, \vec{v}_r , in un generico punto del fluido alla distanza \vec{r} dal sistema di riferimento mobile diventa

$$\vec{v}_r = \vec{v} - \vec{u}_r \quad (3.5)$$

dove

$$\vec{u}_r = \vec{v}_t + \vec{\omega} \times \vec{r} \quad (3.6)$$

rappresenta la velocità del sistema di riferimento mobile rispetto quello inerziale, \vec{v} è la velocità assoluta vista dal sistema inerziale.

Le equazioni del moto, una volta introdotte le componenti e i termini aggiuntivi dovuti al sistema di riferimento in moto, possono essere espresse in due modi diversi: utilizzando le velocità relative come variabili dipendenti, la cosiddetta formulazione con velocità relative, o con le componenti assolute, cioè la formulazione con velocità assolute. La seconda è consigliata nel caso in cui la maggior parte del flusso non è in rotazione, ad esempio nel caso di una piccola ventola in una stanza grande, mentre la formulazione con velocità relativa è appropriata nel caso in cui la maggior parte del fluido sia in rotazione.

Nel caso di una turbina eolica all'interno di una galleria del vento è stata utilizzata la formulazione con velocità assolute. Le equazioni del moto vengono riscritte nel seguente modo:

- conservazione della massa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{v}_r = 0 \quad (3.7)$$

- conservazione della quantità di moto

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \vec{v} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}_r \vec{v}) + \rho (\vec{\omega} \times \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} + \vec{F} \quad (3.8)$$

Per ognuna delle variabili presenti all'interno delle equazioni precedenti è possibile trovare una componente media nel tempo e una componente dovuta ad una fluttuazione casuale. Ad esempio per la componente i -esima della velocità

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (3.9)$$

dove \bar{u}_i rappresenta la componente media della velocità mentre u'_i la componente oscillante.

La componente mediata nel tempo è ottenuta usando l'operatore di Reynolds

$$\bar{u}_i = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} u_i dt \quad (3.10)$$

Applicando queste considerazioni a tutte le variabili delle equazioni di Navier-Stokes si ottengono le equazioni mediate di Navier-Stokes dette anche Reynolds Averaged Navier-Stokes equations o RANS. In questo modo le grandezze non variano più istantaneamente, ma risultano mediate in un certo periodo di tempo sufficientemente grande rispetto ai disturbi della turbolenza. In questo modo è possibile ridurre la complessità computazionale richiesta dai flussi turbolenti.

3.2 Modelli di Turbolenza

Analizzando il flusso viscoso si osserva che il regime laminare esiste solo per bassi valori del numero di Reynolds definito come il rapporto tra le forze d'inerzia e le forze viscoso

$$Re = \frac{\rho U L}{\mu} \quad (3.11)$$

con ρ densità del fluido, U la velocità del fluido, L lunghezza caratteristica del fenomeno e μ la viscosità dinamica.

Al crescere del numero di Reynolds in flusso tende a diventare turbolento con fluttuazioni temporali della velocità. Il flusso si muove sempre lungo linee di flusso medie ma è caratterizzato dalla presenza di fenomeni vorticosi.

Per incorporare il fenomeno nelle equazioni RANS si utilizzano dei modelli di turbolenza come, ad esempio, lo Spalart-Allmaras, il $k - \varepsilon$, il $k - \omega$. In questo lavoro è stato utilizzato prevalentemente il modello $k - \omega$ SST.

Il modello di turbolenza $k-\omega$ SST è stato sviluppato da Menter [19] come modifica al modello originale $k-\omega$. Aggiunge due equazioni al sistema di equazioni RANS che il solutore deve risolvere, introducendo sia l'equazione di trasporto dell'energia cinetica turbolenta che l'equazione del rateo specifico di dissipazione dell'energia cinetica turbolenta. Questo modello garantisce ottimi risultati per casi in cui il flusso presenta gradienti di pressione avversi e separazione del flusso. Il modello originale $k-\omega$ presenta problemi dipendenti dalle condizioni del flusso libero, Menter lo modifica incorporando la bontà del modello $k-\varepsilon$ nelle zone lontane dall'ostacolo.

3.3 Condizioni al Contorno

Per descrivere correttamente il modello fisico analizzato occorre definire le condizioni corrette sulle superfici del dominio di controllo. Nel capitolo successivo verrà descritto in maniera approfondita la procedura di definizione delle diverse condizioni al contorno, in questo paragrafo, invece, viene data una descrizione teorica delle singole condizioni.

Velocity Inlet Viene utilizzata per descrivere la condizione di ingresso del flusso, definendo la direzione e la velocità del fluido. Di solito viene definito il vettore velocità come normale alla superficie di ingresso oppure vengono utilizzate le componenti del vettore per descriverne la direzione.

Pressure Outlet E' la condizione utilizzata per imporre una pressione specifica del flusso all'uscita.

Symmetry Questa condizione corrisponde alla condizione di una parete con sforzo di taglio nullo. In questo modo sia la velocità del fluido che i gradienti delle grandezze in esame in direzione normale alla parete sono nulli.

Wall Questa condizione viene applicata sulle pareti della pala in quanto permette di descrivere una parete solida all'interno del dominio fluido.

Periodic Permette di sfruttare la natura periodica del campo di moto analizzato. In particolare, dato che la turbina ha due pale permette di dividere a metà il dominio e analizzarne solo una parte con riduzione del tempo e della potenza di calcolo necessaria.

Fluid E' la condizione applicata all'interno del dominio dove è presente il flusso d'aria.

Capitolo 4

Modellazione della Turbina Eolica

4.1 Configurazione NREL Phase VI

Per validare il modello CFD sono state utilizzate le misurazioni fatte in galleria del vento durante i test della Fase VI. La turbina eolica sviluppata per l'occasione [7] dalla NREL è caratterizzata da un diametro di $10.06m$, è composta da due pale svergolate e rastremate. Sono state condotte due tipologie di prove durante la campagna di test nella galleria del vento della NASA all'Ames Research Center, la più grande galleria del vento al mondo, con lo scopo di analizzare il funzionamento della turbina emulando le condizioni sul campo di utilizzo e, specificamente, per analizzare le singole caratteristiche della turbina. Nella fig. 4.1 è visibile la torre che sostiene il rotore posizionato all'interno della galleria del vento.

In generale, le prove sono state condotte al variare della velocità del vento da 5 a $25m/s$ modificando di volta in volta alcune caratteristiche tra cui la configurazione della turbina up-wind, sopravento, o down-wind, sottovento cioè con la gondola dietro o davanti al rotore, l'angolo di yaw dell'asse di rotazione del rotore, l'angolo di pitch e l'angolo di cono delle pale e la velocità di rotazione. E' stata testata anche la turbina bloccata in posizione di riposo. In totale sono state eseguite trenta sessioni di prove, alcune di queste caratterizzate dalla pala modificata con la presenza di una estensione all'estremità, dalla presenza di una winglet o perfino da un cilindro profilato che la rende una turbina intubata.

Una delle due pale è stata cablata e strumentata per poter essere in grado di misurare l'andamento delle pressioni lungo la sua superficie, in particolare sono stati posizionati 22 sensori di pressione lungo cinque stazioni della pala, precisamente nei punti con r/R pari a 0.30 , 0.47 , 0.63 , 0.80 , 0.95 . Inoltre sono stati inseriti cinque tubi di Pitot per l'analisi della pressione dinamica,

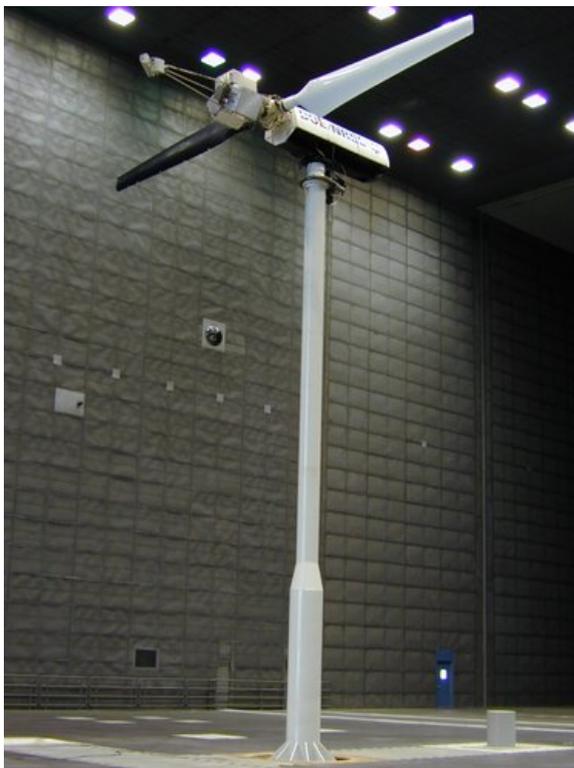


Figura 4.1: *La configurazione della turbina eolica analizzata in galleria del vento.*

e diverse celle di carico necessarie a monitorare le coppie esercitate alla base della pala.

Di tutte le combinazioni di test eseguiti dalla NREL si è preso in considerazione solo il caso S, caratterizzato da una pala con angolo di pitch globale pari a 5° corrispondente ad un angolo di pitch all'estremità della pala di 3° , con angolo di cono e di yaw entrambi nulli. La pala è nella sua configurazione base, descritta da un andamento lineare della corda e uno non lineare dell'angolo di twist, la lunghezza della pala è pari a $5.030m$ con una corda massima di $0.737m$ alla stazione $r/R = 0.25$ e minima pari a $0.356m$ all'estremità, visibile nella figura 4.2.

Nella parte iniziale della pala è presente un cilindro di diametro $0.218m$ che si raccorda con il punto di corda massima della pala, dove viene utilizzato un profilo S809 costante su tutta la pala.

Il profilo utilizzato, S809 riportato in fig. 4.3, è stato disegnato appositamente dalla NREL per applicazioni nel campo delle turbine eoliche ed è caratterizzato dallo spessore massimo pari al 21% della corda e da un profilo laminare come descritto da Somers [20]. Nell'immagine è visibile un profilo normalizzato, con corda unitaria, posizionato in modo da avere il 30% del-

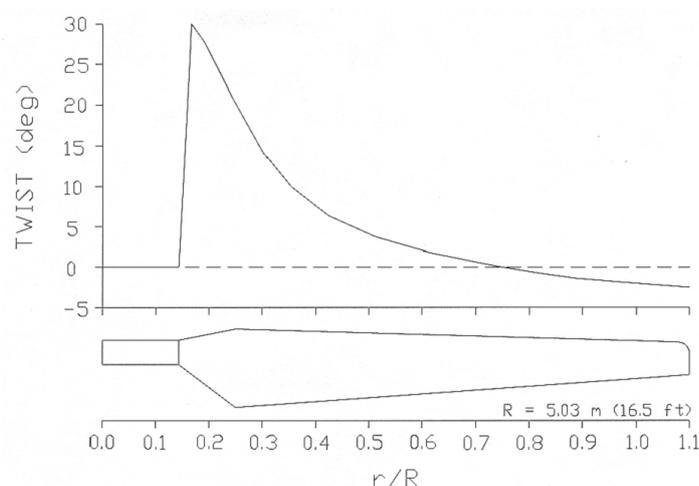


Figura 4.2: Distribuzione della corda e del twist della pala, fonte [7].

la corda nell'origine come definito nella documentazione [8] delle prove in galleria del vento.

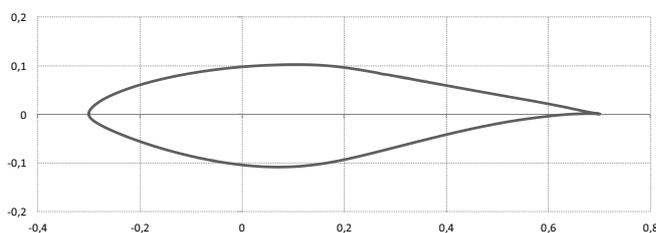


Figura 4.3: Profilo S809 utilizzato nella costruzione della pala, tratto da [7].

Per simulare al meglio le caratteristiche della prova in galleria del vento è stato creato un volume di controllo con le misure che rispecchiassero quelle della galleria che presenta una sezione massima rettangolare di $24 \times 36m$. Il volume di controllo ha una sezione circolare per motivi di simmetria, con un raggio costante di $15.09m$ e una lunghezza complessiva di $125.75m$ suddivisi in $50.30m$ a monte della turbina e il restante a valle, come riportato in fig. 4.4. A questo volume è stato sottratto un cilindro attorno l'asse di rotazione con un raggio di $0.522m$ per descrivere la presenza della navicella che, per motivi di semplificazione, è stata rimossa dal volume di controllo.

Il modello è stato disegnato in SolidWorks, esportato in un file di tipo IGES successivamente importato in Gambit per la generazione della mesh.

Si è scelto di non far terminare il profilo della pala con un bordo accuminato nel punto d'uscita in quanto, oltre a complicare inutilmente la

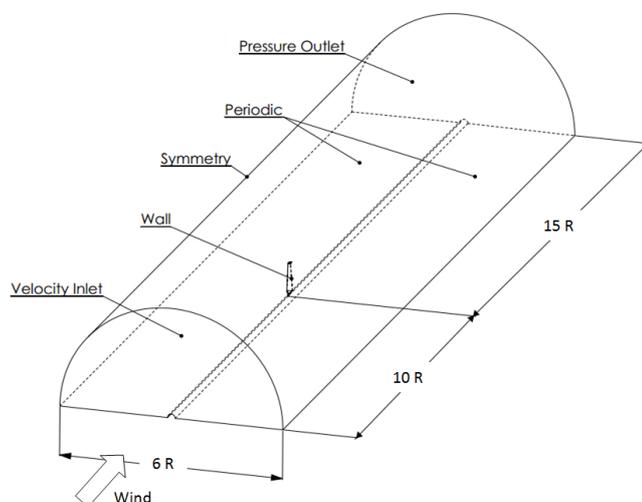


Figura 4.4: Volume di controllo.

creazione della mesh e la simulazione fluidodinamica, non rappresenta correttamente la reale geometria della pala. Per questo motivo il profilo è stato troncato al 99.6% della corda.

4.2 Caratteristiche della Mesh

La mesh è di tipo non strutturato, è formata da circa sei milioni di celle con la forma di tetraedri successivamente trasformati circa 3 milioni di celle con la forma di poliedro, conversione effettuata direttamente all'interno di Fluent. Dopo aver condotto una analisi di sensibilità, è stato trovato che il valore ideale di nodi posti lungo il profilo è pari a 250, numero mantenuto costante lungo tutta la pala, il che definisce una diminuzione della dimensione della cella che passa da circa 6mm nella zona di corda massima a circa 2mm all'estremità. Nel raccordo è stata impostata una dimensione delle celle di 4mm . Una volta generata la mesh sulle superfici è stata utilizzata una funzione di forma di tipo *Meshed* con fattore di crescita di 1.2 che si sviluppa dalla superficie della pala verso il volume di fluido. Per simulare lo strato viscoso è stata introdotto uno strato tramite il comando *Boundary Layer* formato da due serie di celle con la prima caratterizzata da un'altezza costante fissata al 15% della dimensione della cella a parete in modo da avere una diminuzione dello strato andando verso l'estremità della pala. Il secondo strato si sviluppa dal primo con un fattore di crescita pari a 1.2.

Particolare attenzione è stata posta nel piano di mezzeria del volume cilindrico. Data la sua natura periodica, risulta possibile simulare solo metà del dominio in quanto l'altra metà risulta una ripetizione della prima, dimezzando il tempo di calcolo e la complessità della simulazione. Per fare ciò

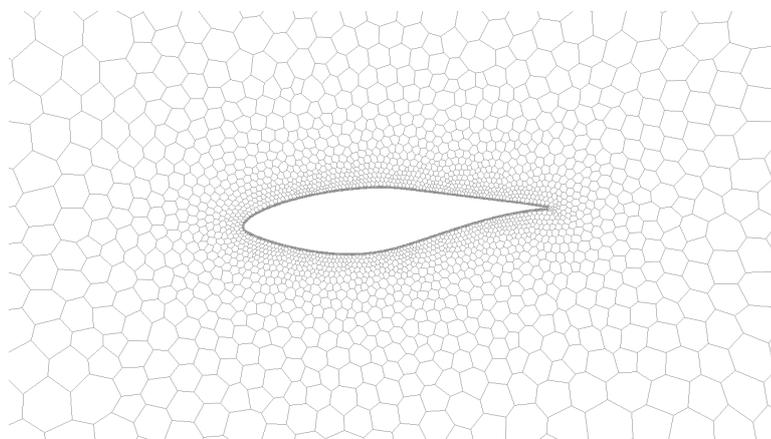


Figura 4.5: Mesh di volume attorno al profilo.

occorre introdurre la condizione al contorno periodica alle facce di mezzeria del volume, condizione che deve essere imposta in fase di generazione della mesh in quanto la griglia deve essere perfettamente speculare tra le due facce opposte. In Gambit si utilizza il comando *Link-Face* specificando poi la condizione al contorno *Periodic*. Successivamente in Fluent è necessario specificare che la condizione periodica è di tipo rotazionale e non traslazionale che è la condizione di default.

Le altre condizioni al contorno da specificare sono: *wall*, per le pareti della pala, *symmetry*, per le pareti cilindriche del dominio fluido, *velocity inlet* e *pressure outlet*, rispettivamente per la parete di ingresso e di uscita della galleria, *interior*, per tutte le facce interne utilizzate in fase di costruzione della mesh ma non realmente esistenti. Per facilitare l'analisi dei risultati, la superficie della pala è stata suddivisa in venti sezioni equidistanziate in modo da poter comprendere l'importanza di ciascuna sezione nella risultante complessiva della coppia generata della pala.

4.3 Parametri del Solutore CFD

L'analisi fluidodinamica è stata condotta in Fluent utilizzando un sistema di riferimento posto in rotazione alla stessa velocità angolare della turbina e solidale alla pala. Questo metodo di soluzione permette di descrivere l'effetto della rotazione della pala, introducendo gli effetti dovuti alle componenti di accelerazione di Coriolis e centripeta, all'interno delle equazioni del moto, senza la necessità di avere una mesh rotante che comporterebbe un tempo di calcolo notevolmente superiore in quanto richiederebbe delle simulazioni di tipo tempovariante. Il sistema utilizzato viene chiamato Moving Reference Frame (MRF), in questo caso il sistema di coordinate mobili è posizionato nell'origine e ruota attorno l'asse x che corrisponde sia all'asse di rotazione

della turbina che alla direzione del vento, in quanto l'angolo di yaw è nullo. Le pareti della pala sono caratterizzate dalla condizione di velocità relativa nulla rispetto alle celle adiacenti. Questo metodo permette di modificare le equazioni del moto introducendo i termini delle accelerazioni centrifuga e di Coriolis.

Per simulare le condizioni controllate del flusso d'aria nella galleria, occorre impostare un valore molto basso dell'intensità di turbolenza, ponendolo a circa 0.5 come suggerito da [18] al posto di un valore medio di 10 utilizzato per descrivere condizioni medie di vento naturale.

Il solutore scelto per l'analisi è di tipo pressure-based, consigliato per le analisi a bassa velocità di fluidi incomprimibili, è stato utilizzato l'algoritmo "coupled" che accoppia le equazioni della continuità e della quantità di moto risolvendo il sistema di equazioni in una maniera più rapida rispetto alla soluzione "segregated" ma richiedendo maggiore capacità di calcolo.

Il modello di turbolenza utilizzato è il $k - \omega$ SST, un modello a due equazioni che risolve l'equazione dell'energia cinetica turbolenta insieme all'equazione della velocità di dissipazione dell'energia cinetica turbolenta. Rispetto al modello $k - \omega$, la formulazione "shear stress transport" (SST) introduce una modifica sviluppata da Menter [19] che permette di sfruttare i benefici del modello $k - \omega$ nella zona vicino alla parete con il modello $k - \varepsilon$ nella zona lontana dal corpo. Grazie a queste modifiche il modello risulta descrivere correttamente i casi che presentano elevati gradienti di pressione avverso e distacco di flusso, fenomeni molto frequenti nelle turbine eoliche. Dopo aver fatto un'analisi di sensibilità, è stato scelto di utilizzare un modello con y^+ superiore a 30 utilizzando il solutore con le equazioni di parete per il substrato viscoso. Questa soluzione permette di simulare il flusso attorno la turbina senza perdita di qualità nei risultati garantendo minor carico di lavoro alla macchina, dimezzando il tempo di calcolo in quanto non occorre discretizzare in maniera fitta lo strato limite con conseguente riduzione del numero di celle necessarie a definire la mesh.

Dopo aver importato la mesh nel pre-processore di Fluent è stata eseguita una conversione di tutte le celle che compongono il volume di controllo da tetraedri a poliedri. Questo comporta una riduzione di circa il 40% del numero di elementi e permette di ottenere più facilmente la convergenza. La mesh così ottenuta è formata da circa tre milioni di elementi. Tra le opzioni del programma è stata scelta la forma di inizializzazione ibrida che permette di ridurre ulteriormente il numero di iterazioni necessarie a giungere a convergenza.

Il metodo di soluzione utilizzato è il seguente:

- Pressure-velocity coupling: scheme coupled
- spatial discretization:
 - Gradient: Least squares cell based

- Pressure: second order
- Momentum: second order upwind
- Turbulent kinetic energy: second order upwind
- Specific dissipation rate: second order upwind

Inoltre è stato utilizzata l'opzione *pseudo transient* che sfrutta un sistema di fattori di sottorilassamento impliciti abbinati, in questo caso, alla velocità di rotazione del sistema di riferimento. All'interno della scheda in cui è possibile specificare il numero di iterazioni, occorre definire lo pseudo time step definito in secondi e pari a $0.1/\omega$ come descritto nel manuale del programma.

Per le simulazioni del primo ordine i residui sono stati imposti tutti a 10^{-5} . Una volta raggiunta la convergenza lo schema di discretizzazione è portato al secondo ordine e risulta necessario diminuire il residuo dell'energia cinetica turbolenta a 10^{-4} .

I parametri utilizzati durante le prove in galleria del vento e successivamente utilizzati anche durante le simulazioni sono riportati nella tabella 4.1.

Tabella 4.1: *Parametri dei test in galleria del vento.*

Configurazione	Velocità [m/s]	Densità [kg/m ³]	rpm
S0700000	7.02	1.25	71.87
S1000000	10.05	1.25	72.10
S1300000	13.07	1.23	72.09
S1500000	15.10	1.22	72.06
S2000000	20.13	1.22	72.01
S2500001	25.11	1.22	72.16

Capitolo 5

Validazione dei Risultati

5.1 Introduzione

Per la validazione del modello sono stati confrontati i risultati numerici generati dalle simulazioni fluidodinamiche con i valori misurati durante le prove sperimentali in galleria del vento. Grazie alla varietà e alla quantità dei risultati sperimentali disponibili è stato possibile confrontare tra loro i risultati numerici e sperimentali in termini di valori puntuali, come i valori della pressione misurati in diversi punti sulla superficie della pala, e in valori globali come ad esempio la coppia misurata all'asse o la potenza estratta del flusso del vento. Questi ultimi due valori vengono indicati rispettivamente in funzione della velocità indisturbata del vento, V_∞ , e del rapporto di velocità periferica definita come

$$TSR = \frac{\omega R}{V_\infty} \quad (5.1)$$

Solitamente questi termini vengono adimensionalizzati ottenendo il coefficiente di momento

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 RA} \quad (5.2)$$

e il coefficiente di potenza

$$C_P = \frac{T\omega}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^3 A} \quad (5.3)$$

dove:

- T rappresenta la coppia misurata all'asse, espressa in Nm ;
- ρ la densità del fluido, in kg/m^3 ;
- V_∞ la velocità del flusso indisturbato, in m/s ;
- R la lunghezza della pala, in questo caso $R = 5.030m$;
- A l'area spazzata dalla turbina, pari a $A = \pi R^2$;

- ω rappresenta la velocità angolare, espressa in rad/s ;
- TSR è l'acronimo di tip speed ratio, rapporto di velocità periferica.

I coefficienti risultano molto utili per confrontare tra loro turbine di diverse dimensioni. In questo caso, dato che è stata simulata la configurazione originale della pala, risulta più comodo confrontare direttamente il valore assoluto.

Durante le prove condotte in galleria del vento sono stati misurati molte altre grandezze tra cui le pressioni lungo il profilo su cinque sezioni radiali della pala e il momento flettente misurato alla base della pala. Le stesse grandezze sono state ricavate in Fluent e confrontate con quelle misurate.

5.2 Distribuzione di Pressione sulla Pala

Le pressioni sulla superficie della pala sono state misurate in cinque sezioni della pala, individuabili dalla coordinata r/R pari a 0.3, 0.47, 0.63, 0.8 e 0.95, tramite 22 sensori distribuiti lungo il profilo e concentrati verso il bordo d'attacco. Nella figura 5.1 vengono rappresentati con una \otimes i sensori posizionati su un generico profilo della pala, mentre in figura 5.2 vengono messe in evidenza le sezioni della pala che contengono i sensori di pressione.

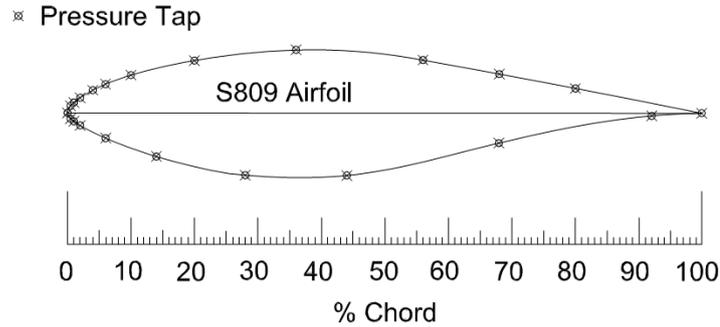


Figura 5.1: Posizione dei sensori di pressione sulla sezione della pala NREL, tratto da [8].

Fluent permette di sezionare facilmente il volume fluido definendo un piano all'altezza desiderata e determinando l'intersezione con le superfici della pala. In questo modo è possibile ottenere la sezione desiderata per poter ricavare i valori puntuali della pressione lungo l'intersezione tra il piano e la pala. I valori delle pressioni così ottenuti sono stati adimensionalizzati ottenendo il coefficiente di pressione, definito dall'equazione

$$c_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho c (V_\infty^2 + \omega^2 R^2)} \quad (5.4)$$



Figura 5.2: *Distribuzione radiale dei profili della pala che contengono i sensori di pressione.*

e rapportato alla posizione x/c adimensionalizzata lungo la corda del profilo corrispondente. La pala è stata sezionata alle cinque altezze desiderate, per r/R pari a 0.30, 0.47, 0.63, 0.80 e 0.95, corrispondenti alle altezze $h = 1.510, 2.343, 3.185, 4.023, 4.780m$ dal piano di mezzeria del volume fluido.

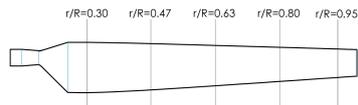
Sono stati creati in questo modo i grafici riportati nelle immagini 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8 ottenuti per le simulazioni alle diverse velocità. Si fa notare che l'asse delle ordinate è stato invertito per permettere di visualizzare il coefficiente di pressione mantenendo nella parte superiore del grafico l'estradosso del profilo, mentre nella parte inferiore l'intradosso.

In generale si nota che i risultati numerici sono in linea con quelli sperimentali. L'andamento delle pressioni calcolate lungo la superficie della pala sono in accordo con quelle sperimentali dimostrando la capacità del solutore di calcolare in maniera corretta la distribuzione delle pressioni e prevedere i fenomeni di distacco del flusso che avvengono durante lo stallo.

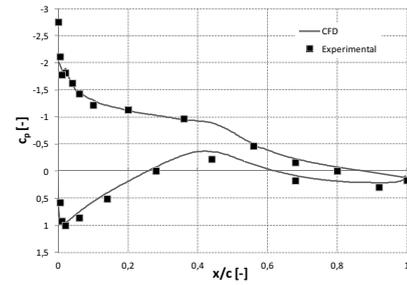
La zona interna della pala, per valori di r/R inferiori a 0.47, presenta le differenze maggiori tra i risultati numerici e quelli sperimentali, probabilmente dovute all'effetto della presenza dell'hub che non è stato inserito nel dominio fluido o per la presenza del raccordo, tra il profilo S809 della pala presente dalla sezione $r/R = 0.25$ in poi e la base circolare della pala, che non è descritto in maniera completa nella documentazione disponibile.

Nella figura 5.9 vengono rappresentati gli andamenti delle pressioni nelle diverse stazioni radiali della pala. Risulta visibile il punto di ristagno caratterizzato dalla alta pressione e la zona sull'estradosso caratterizzata da una depressione.

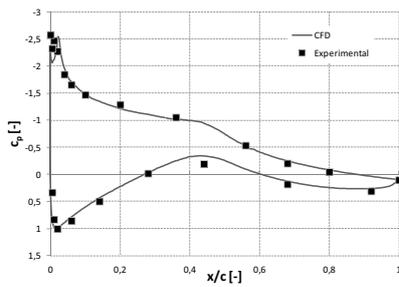
La figura 5.10 descrive l'andamento della velocità del fluido attorno la pala nelle cinque stazioni radiali con cui è stata divisa la pala. Si può notare l'aumento della velocità del fluido nella zona dell'estradosso della pala, nella figura in alto, e la zona di rallentamento sull'intradosso. In questa figura il vento proviene dal basso verso l'alto.



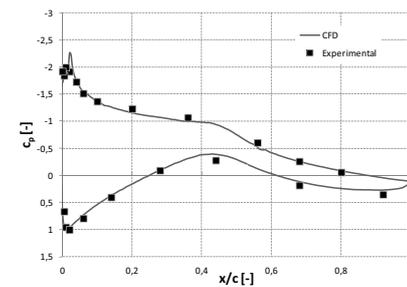
(a) Distribuzione dei sensori di pressione lungo la pala.



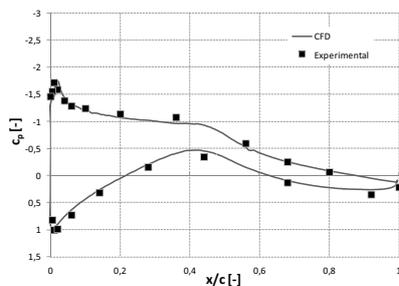
(b) $r/R = 0.30$



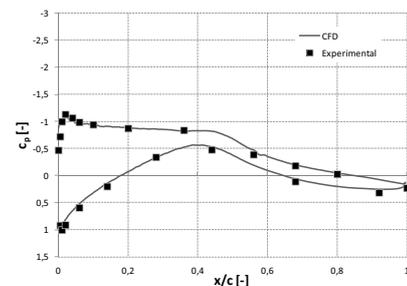
(c) $r/R = 0.47$



(d) $r/R = 0.63$

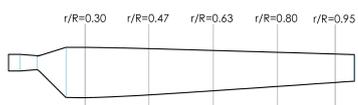


(e) $r/R = 0.80$

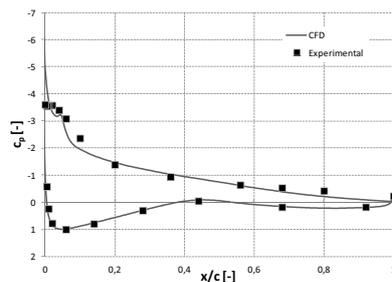


(f) $r/R = 0.95$

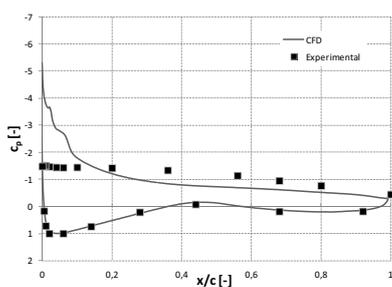
Figura 5.3: Coefficienti di pressione con $V_\infty = 7m/s$.



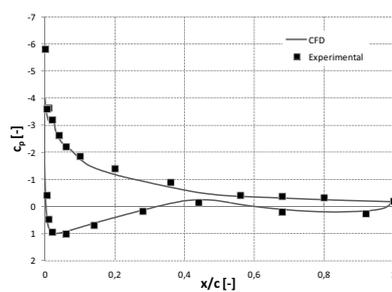
(a) Distribuzione dei sensori di pressione lungo la pala.



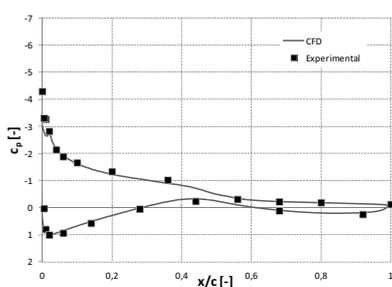
(b) $r/R = 0.30$



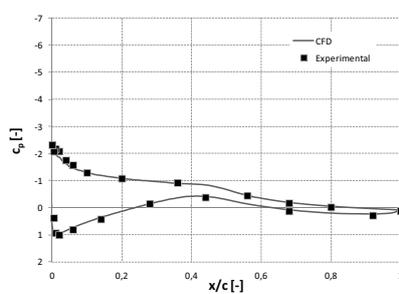
(c) $r/R = 0.47$



(d) $r/R = 0.63$

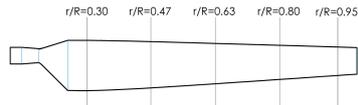


(e) $r/R = 0.80$

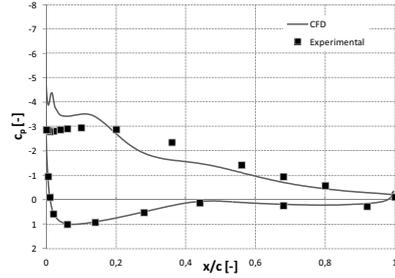


(f) $r/R = 0.95$

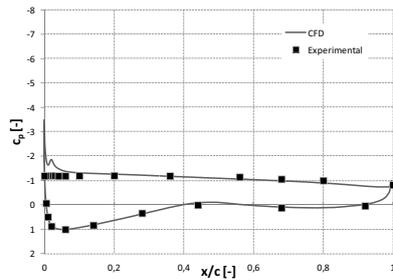
Figura 5.4: Coefficienti di pressione con $V_\infty = 10\text{m/s}$.



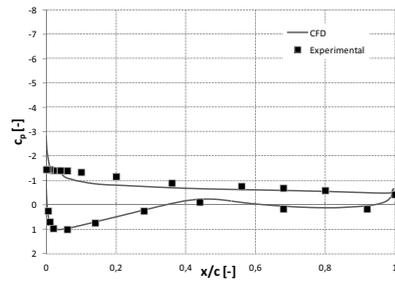
(a) Distribuzione dei sensori di pressione lungo la pala.



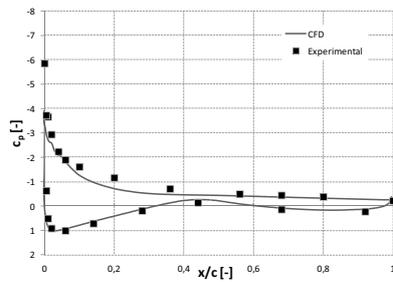
(b) $r/R = 0.30$



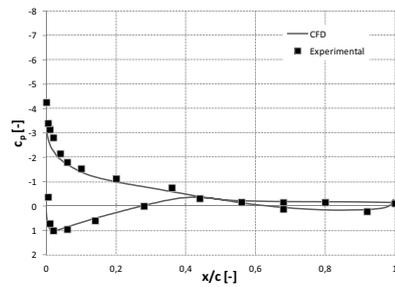
(c) $r/R = 0.47$



(d) $r/R = 0.63$

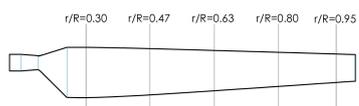


(e) $r/R = 0.80$

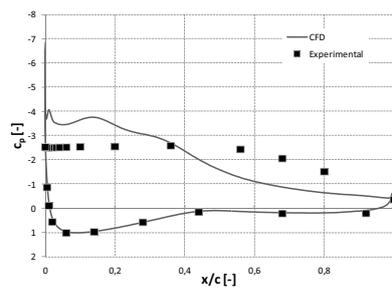


(f) $r/R = 0.95$

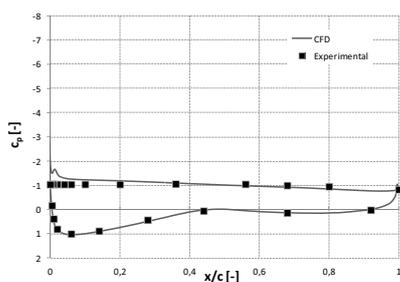
Figura 5.5: Coefficienti di pressione con $V_\infty = 13m/s$.



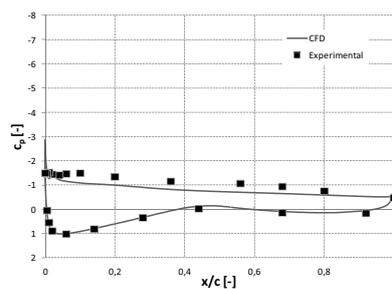
(a) Distribuzione dei sensori di pressione lungo la pala.



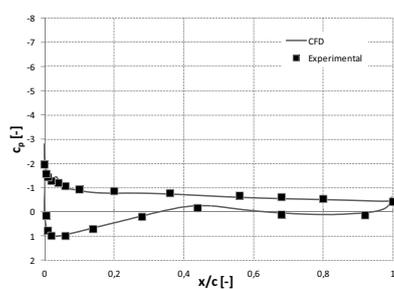
(b) $r/R = 0.30$



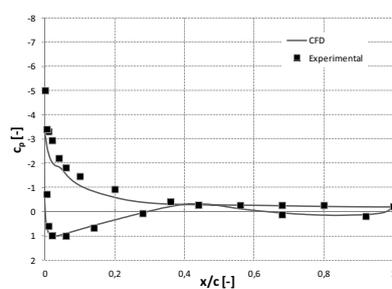
(c) $r/R = 0.47$



(d) $r/R = 0.63$

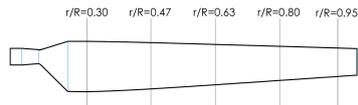


(e) $r/R = 0.80$

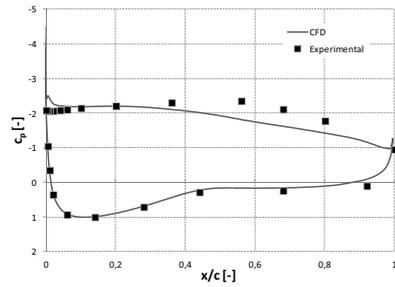


(f) $r/R = 0.95$

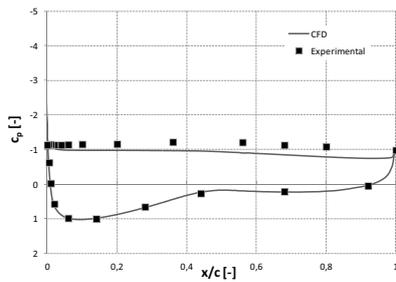
Figura 5.6: Coefficienti di pressione con $V_\infty = 15m/s$.



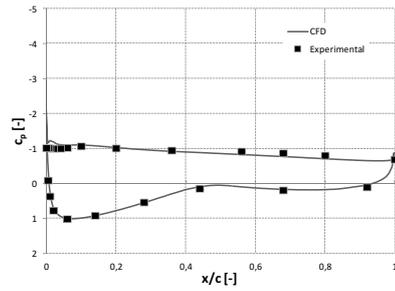
(a) distribuzione dei sensori di pressione lungo la pala.



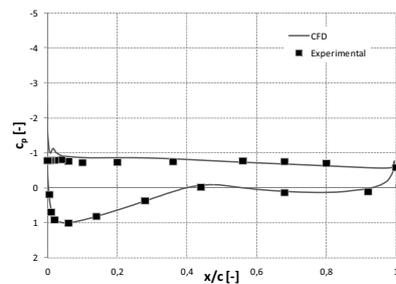
(b) $r/R = 0.30$



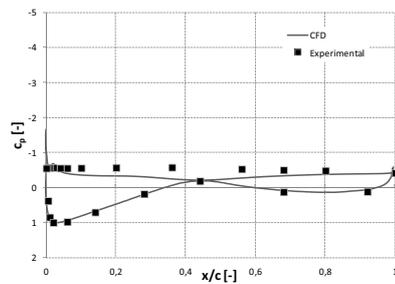
(c) $r/R = 0.47$



(d) $r/R = 0.63$

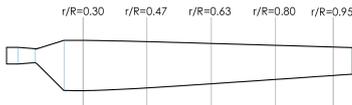


(e) $r/R = 0.80$

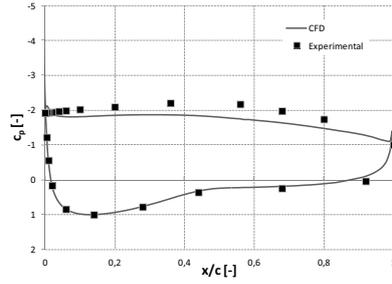


(f) $r/R = 0.95$

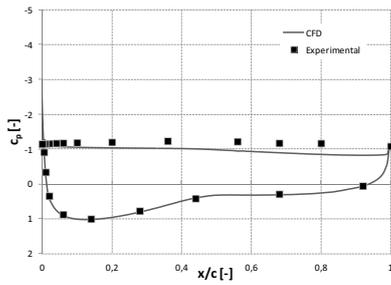
Figura 5.7: Coefficienti di pressione con $V_\infty = 20\text{m/s}$.



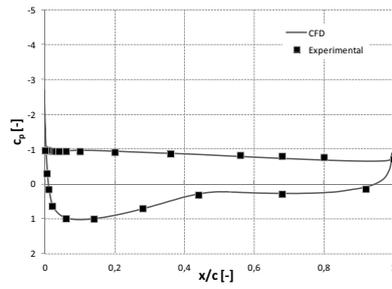
(a) distribuzione dei sensori di pressione lungo la pala.



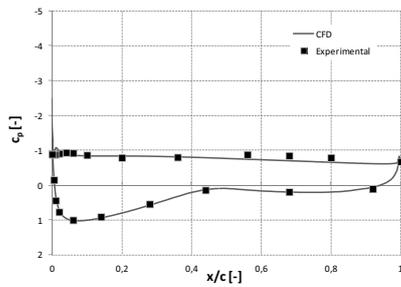
(b) $r/R = 0.30$



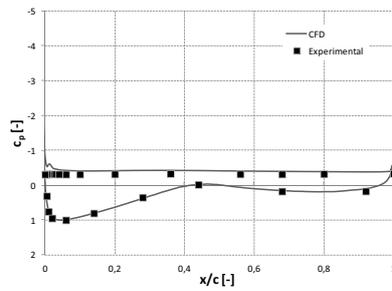
(c) $r/R = 0.47$



(d) $r/R = 0.63$



(e) $r/R = 0.80$



(f) $r/R = 0.95$

Figura 5.8: Coefficienti di pressione con $V_\infty = 25m/s$.

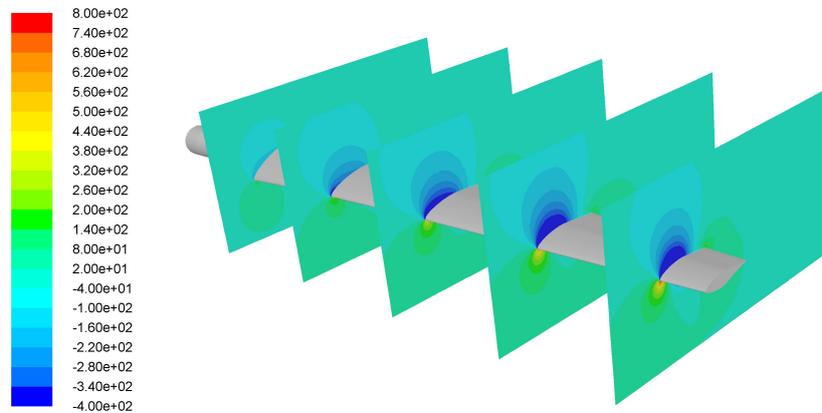


Figura 5.9: *Andamento della pressione per le cinque stazioni radiali, per $V_\infty = 7m/s$.*

5.3 Coppia all'Asse

Il momento all'asse è una grandezza integrale, in quanto determinata dall'effetto della distribuzione di pressioni lungo tutta la superficie della pala e permette di avere un valore di giudizio complessivo sul modo di operare della turbina. Il valore numerico è stato ottenuto integrando la distribuzione di pressione sulla superficie della pala suddivisa in venti strisce radiali in modo da ottenere la componente della risultante aerodinamica nella direzione di avanzamento della pala. Per ottenere la coppia, la forza ottenuta è stata moltiplicata per la distanza dell'elemento di superficie dall'asse di rotazione. In questo modo è possibile avere la distribuzione della coppia lungo la pala, una rappresentazione che risulterà molto utile per confrontare l'effetto benefico della presenza di una aletta posta all'estremità della pala.

Sperimentalmente, la coppia misurata all'asse è stata corretta per la presenza dell'effetto della forza di gravità che influenza la rotazione della pala accelerandola lungo metà periodo e rallentandola nell'altra metà, come descritto in [?]. Nell'immagine 5.11 si può osservare il confronto tra la coppia sperimentale corretta dall'effetto della gravità e la coppia ottenuta numericamente dalle simulazioni, in ascissa la velocità del vento in m/s e in ordinata la coppia totale generata dall'effetto delle due pale, espressa in Nm . Nell'immagine 5.12 viene riproposta la stessa immagine aggiungendo anche i valori ottenuti da altri ricercatori, utilizzando sempre strumenti CFD.

Si può notare che l'andamento dei valori calcolati rispecchia l'andamento dei risultati sperimentali. Inoltre tutti i risultati tranne quello ottenuto alla velocità minima, sono all'interno dell'incertezza di misura del valore ottenuto in galleria del vento. Il risultato ottenuto permette di affermare che il modello CFD utilizzato riesce a descrivere correttamente il fenomeno fluidodinamico

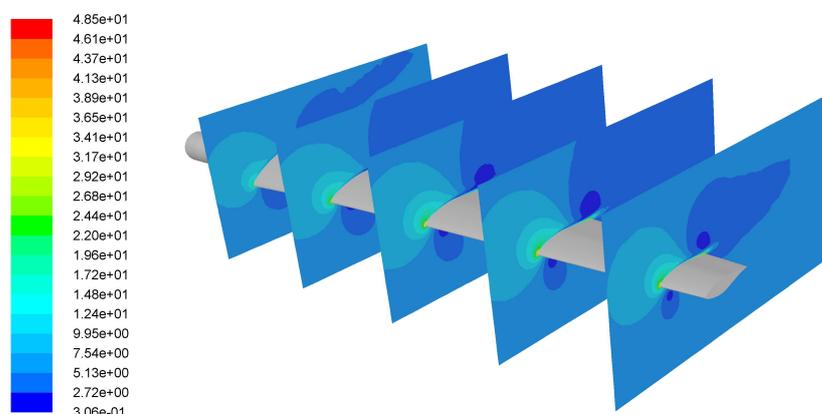


Figura 5.10: *Andamento della velocità per le cinque stazioni radiali, per $V_{\infty} = 7m/s$.*

in esame.

Nell'immagine 5.13 è stato riportato l'andamento della coppia normalizzata per unità di lunghezza lungo la pala. Sono visibili i risultati ottenuti per le prove svolte alle diverse velocità del vento da $7m/s$ fino a $25m/s$.

Analizzando la curva a $7m/s$ si vede chiaramente che la coppia generata sulla pala cresce all'aumentare della posizione radiale, raggiungendo un massimo intorno al valore $r/R = 85\%$, superato questo valore la coppia generata crolla a causa degli effetti di estremità della pala. Nelle configurazioni con velocità superiore sono ben visibili le zone della pala in cui i profili entrano in stallo. A causa del rapporto di rastremazione prossimo a 0.5, la pala tende a stallare principalmente nella zona centrale, di conseguenza in seguito al fenomeno di distacco del flusso dal profilo la portanza generata e di conseguenza anche la coppia prodotta diminuisce. A velocità superiori a $20m/s$ si nota che l'estremità della pala produce una coppia negativa. Questo fenomeno è dovuto al fatto che la turbina è stata progettata per essere regolata con il metodo dello stallo in modo da mantenere la velocità di rotazione e la potenza generata costante. Grazie a questo sistema di regolazione, all'aumentare della velocità, l'angolo d'attacco locale del profilo aumenterà fino a raggiungere il valore critico. Superato questo valore alcune sezioni della pala entreranno in stallo provocando la diminuzione della portanza e quindi della coppia generata e infine della potenza prodotta. Quando un profilo entra in stallo si nota un aumento della resistenza che si oppone al moto della pala. Per questo fenomeno, la coppia misurata all'estremità della pala nella figura 5.13 assume valori negativi.

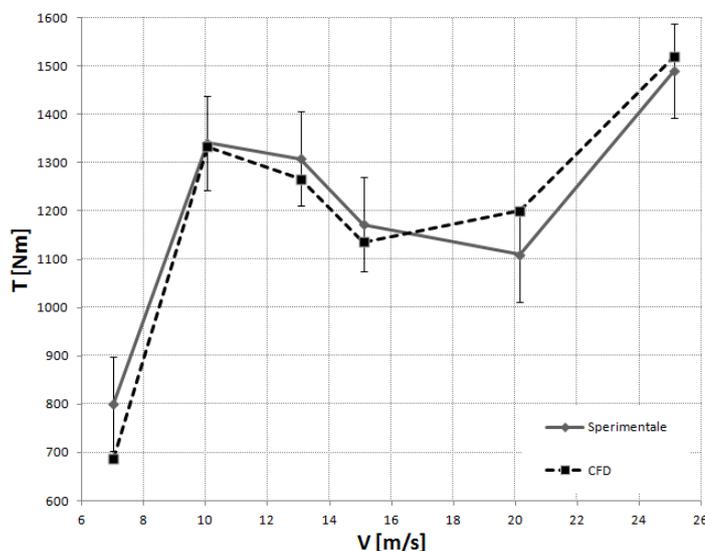


Figura 5.11: Coppia calcolata all'asse confrontata con quella misurata in galleria del vento.

5.4 Coefficiente di Potenza

Un altro indice utilizzato per descrivere le proprietà di turbina è il coefficiente di potenza in funzione del rapporto di velocità periferico, visibile nell'immagine 5.14. Analiticamente, il massimo valore del coefficiente di potenza è pari a 0.5963 e definito come limite di Betz [3]. Attualmente le turbine eoliche ad asse orizzontale raggiungono un valore massimo compreso tra 0.45 e 0.5.

Dalla figura 5.14 si nota che, in generale, i valori ottenuti dalle simulazioni sono analoghi a quelli ottenuti in via sperimentale, tranne per il punto alla velocità più bassa, o alla TSR maggiore, che si discosta maggiormente, in maniera analoga a quanto visto nelle immagini precedenti sulle altre grandezze analizzate.

5.5 Momento Flettente

Risulta interessante analizzare il momento flettente misurato alla base della pala e necessario per progettare correttamente la turbina a livello strutturale.

Come descritto da [8], durante le prove in galleria del vento il valore del momento flettente è stato misurato tramite estensimetri alla base della pala e stimato dall'integrazione numerica dei valori di pressione e attrito viscoso sulle superfici della pala. In questo modo sono stati ottenute due tipologie di risultati: la prima descrive il momento flettente a cui è effettivamente

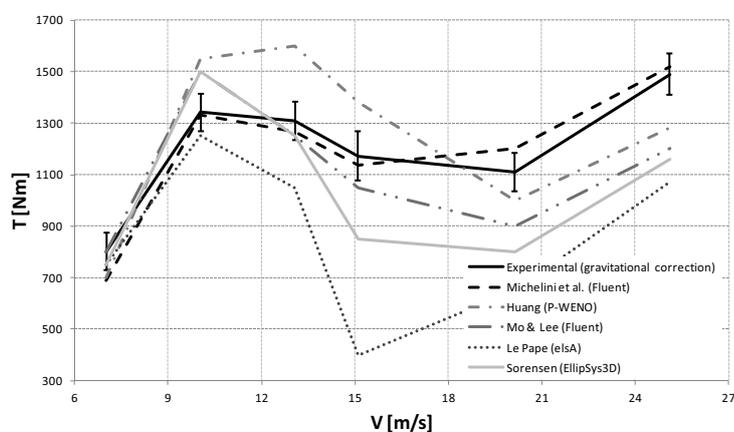


Figura 5.12: Confronto della coppia calcolata con quella ottenuta da altri ricercatori.

soggetta la pala della turbina, introducendo sia gli effetti aerodinamici che quelli strutturali e inerziali; la seconda tipologia permette di determinare il contributo puramente aerodinamico che corrisponde a quanto viene calcolato dalle simulazioni fluidodinamiche.

Nell'immagine 5.15 si può osservare, al variare della velocità del vento, come il momento flettente tende ad aumentare a causa dell'aumento dell'effetto dovuto alla pressione del flusso sulla pala, proporzionale all'energia cinetica del flusso. Questa componente, chiamata componente aerodinamica del momento flettente, viene in parte compensata dall'effetto dovuto all'inerzia della pala messa in rotazione a $72rpm$. Dai valori sperimentali si può notare che nelle condizioni di vento superiore ai $20m/s$ il momento flettente percepito dalla pala è puramente aerodinamico mentre a valori inferiori la componente inerziale tende a far diminuire il momento percepito sulla pala.

Durante la simulazione CFD non vengono contemplati fenomeni di carattere strutturale della pala, infatti i risultati ottenuti sono compatibili con quelli stimati sulla base dell'effetto della pressione del fluido sul corpo. Alle basse velocità i risultati si equivalgono, con un errore medio inferiore al 3% mentre a velocità superiore a $20m/s$ le due curve si distaccano con un errore massimo del 15% alla velocità massima.

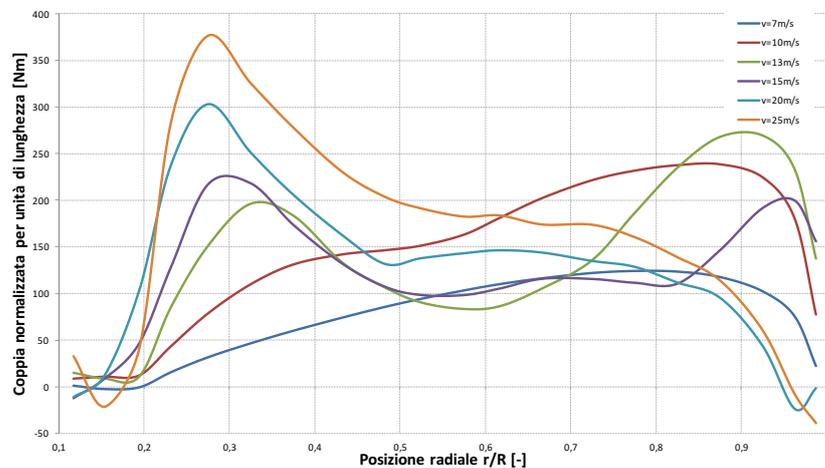


Figura 5.13: Distribuzione sulla pala della coppia calcolata normalizzata per unità di lunghezza.

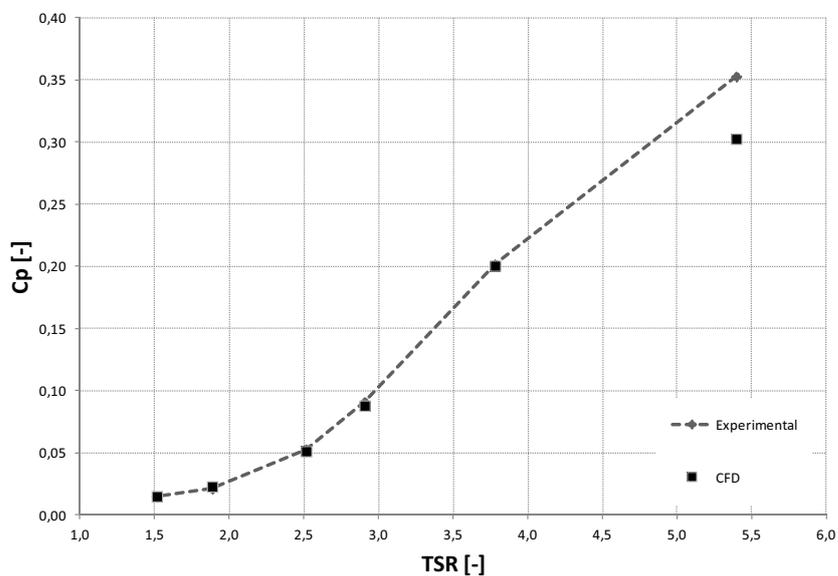


Figura 5.14: Confronto tra i valori sperimentali e quelli numerici del coefficiente di potenza.

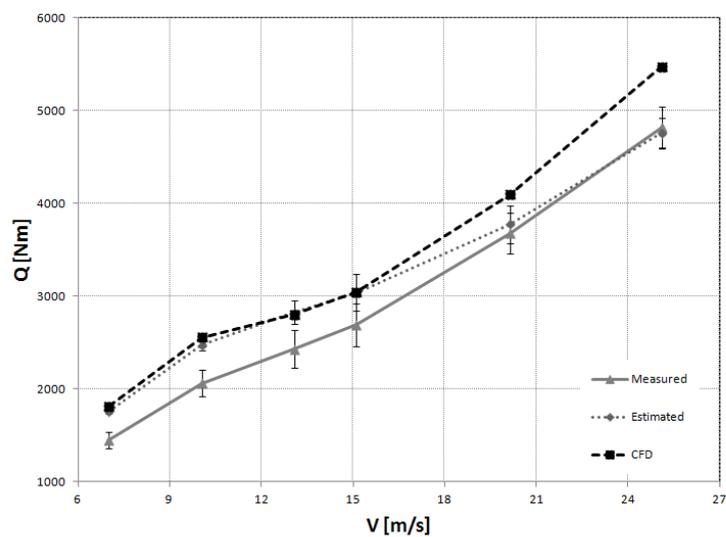


Figura 5.15: Momento flettente misurato alla base della pala.

Capitolo 6

Analisi delle Winglet

6.1 Introduzione

Le winglet, o alette d'estremità, sono superfici non planari introdotte inizialmente sulle ali degli aerei di linea [21] con lo scopo di ridurre la resistenza indotta. Nonostante determinino un incremento nella resistenza viscosa dell'ala in quanto ne aumentano la superficie bagnata, le winglet permettono di ridurre i vortici di estremità ostacolando il flusso d'aria che si muove dalla superficie in pressione richiamato dalla bassa pressione della superficie di estradosso.

La portanza in un'ala è generata dal campo di pressione presente attorno alla pala, in particolare dalla sovrappressione nell'intradosso e da una depressione sull'estradosso. In direzione radiale è presente un gradiente di pressione che genera una distribuzione di portanza che assume valore massimo al centro e tende ad annullarsi all'estremità dell'ala dove, non essendoci più la separazione fisica tra i due campi di pressione, il flusso dall'intradosso tende a risalire verso l'estradosso richiamato dalla depressione e generando una serie di vortici che si distaccano dal bordo d'uscita, come rappresentato in fig. 6.1.

Analizzando la distribuzione della pressione sulla superficie dell'ala si può notare che sull'intradosso il campo di pressione è decrescente procedendo dalla mezzeria all'estremità generando una componente del flusso in direzione radiale verso l'estremità. Discorso opposto sull'estradosso dove la depressione tende a diminuire andando verso l'estremità provocando una componente di velocità diretta verso l'interno dell'ala. Le linee di corrente scorrendo attorno alla pala sono soggette al campo di velocità e determinano una serie di vortici che si distaccano dal bordo d'uscita dell'ala. I vortici con l'intensità maggiore sono i cosiddetti vortici d'estremità in quanto si sviluppano all'estremità dell'ala dove la pressione è più bassa e tendono a richiamare i vortici provenienti dagli altri punti della pala formando una treccia vorticoso, come descritto da [15].

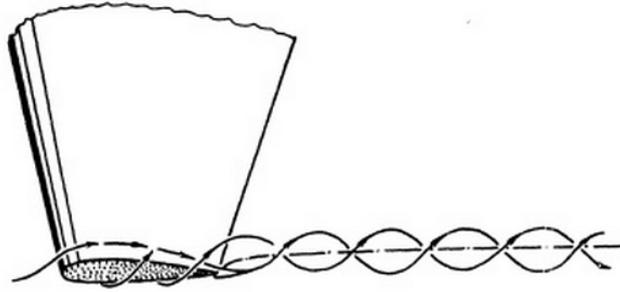


Figura 6.1: *Andamento del flusso dall'intradosso all'estradosso dell'ala, tratto da [14].*

I vortici di estremità determinano una componente della corrente d'aria a valle dell'ala diretta verso il basso chiamata *downwash* che, combinata con la corrente indisturbata, produce una velocità relativa locale che risulta inclinata di un angolo di attacco indotto α_i rispetto l'angolo d'attacco geometrico α_g . L'angolo d'attacco effettivo di una generica sezione dell'ala risulterà inferiore al valore previsto nel caso bidimensionale. Il valore è calcolabile con la seguente equazione:

$$\alpha_{eff} = \alpha_g - \alpha_i \quad (6.1)$$

La sezione alare locale risulterà investita da una corrente proveniente da un angolo d'attacco inferiore e siccome il vettore portanza è perpendicolare alla direzione del vento locale risulterà inclinato rispetto la verticale dell'angolo α_i . Di conseguenza una componente del vettore portanza sarà parallelo alla direzione del vento indisturbato generando una resistenza detta resistenza indotta.

L'introduzione della winglet all'estremità dell'ala [22] permette di ridurre il flusso che si sviluppa dall'intradosso verso l'estradosso, ostacolando la formazione dei vortici e, in ultima analisi, di diminuire la resistenza indotta. Allo stesso tempo, però, la presenza della winglet aumenta la superficie bagnata dell'ala, incrementandone la resistenza viscosa. La differenza sostanziale tra un winglet e una semplice piastra posizionata all'estremità della pala è che la prima, essendo formata da profili aerodinamici, genera un sistema di forze aerodinamiche che interagiscono con quelle dell'ala riducendo il flusso radiale. A parità di risultati ottenuti, una piastra richiederebbe una superficie di gran lunga superiore con incremento della resistenza viscosa.

Nel caso di una turbina eolica, il flusso sulla pala si sviluppa in modo analogo ma viene influenzato dal flusso radiale dovuto alla rotazione della pala che genera un sistema di forze sul fluido dovute alle accelerazioni centripeta e di Coriolis.

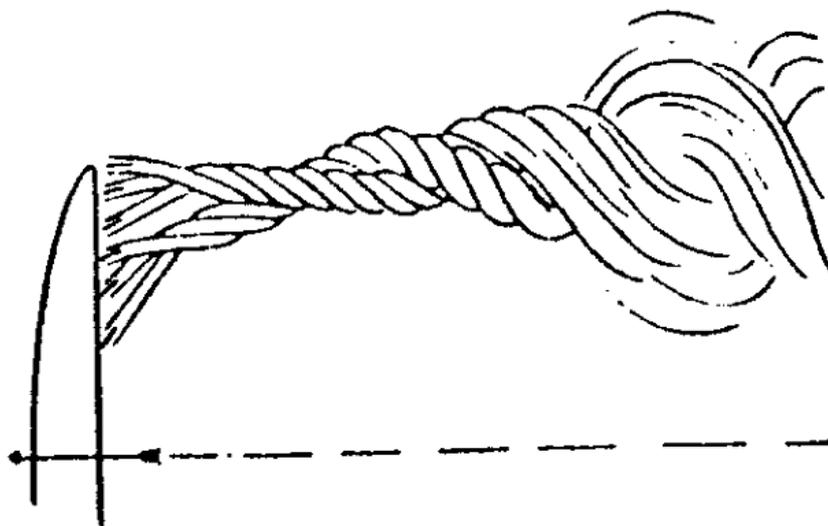


Figura 6.2: *Treccia vorticoso sviluppata all'estremità di un'ala, tratto da [16] scritto nel 1907.*

Per progettare correttamente la winglet occorre bilanciare i benefici legati alla diminuzione di resistenza indotta e quindi all'incremento di portanza e coppia generata, con l'incremento di resistenza viscosa dovuto all'aumento della superficie bagnata della pala. Quest'ultimo contributo determina un sostanziale aumento della coppia flettente che agisce sulla pala. Occorre però far notare che l'introduzione della winglet, rispetto ad un analogo incremento di lunghezza della pala, genera un aumento inferiore del momento flettente in quanto non aumenta in maniera sostanziale la dimensione radiale della turbina.

I risultati ottenuti dimostrano che il campo di moto che si sviluppa attorno alla winglet influenza gran parte della distribuzione del campo di pressione sulla pala. Come verrà descritto nei capitoli seguenti, la presenza della winglet modifica la distribuzione della coppia lungo la pala a partire dal 40 – 50% della lunghezza. Complessivamente la coppia generata dalla pala con l'aletta risulta del 15 – 20% maggiore rispetto al caso senza aletta.

6.2 Geometria della Winglet

Per descrivere correttamente la winglet sono necessari svariati parametri geometrici, seguendo quanto detto da Maughmer [22] i parametri principali sono visibili nella figura e sono:

- la distribuzione del twist dei profili,
- la distribuzione della corda dei profili,
- l'angolo di convergenza (toe angle) alla base della winglet, tra la corda e l'asse longitudinale del velivolo,
- l'angolo di freccia (sweep angle),
- l'angolo di inclinazione (cant angle).

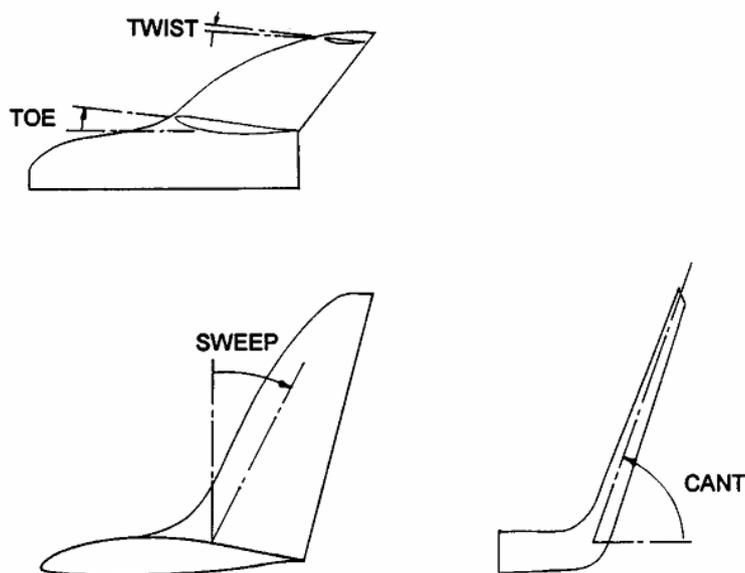


Figura 6.3: Parametri geometrici di una winglet aeronautica, tratto da [22].

Nel caso di una turbina eolica risulta necessario specificare su quale lato è posta l'aletta, se verso il lato in depressione, sottovento o downwind, o sul lato in pressione, sopravvento o upwind. Nella figura 6.4 è visibile il confronto tra la pala originale e la configurazione con la winglet che si estende in direzione sottovento.

Per costruire l'aletta è stata presa come sezione di riferimento l'ultima sezione della pala caratterizzata da una corda $c_{b,t} = 0.356m$. Questa sezione

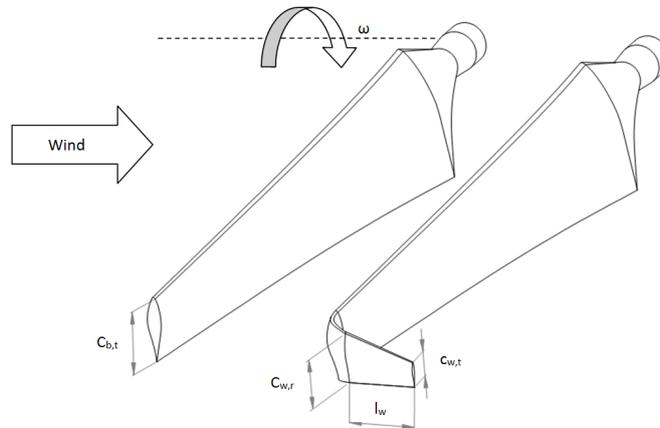


Figura 6.4: Geometria della winglet nella configurazione sottovento.

è stata ruotata di 90° rispetto ad un punto posizionato lungo la normale alla corda dell'ultima sezione a $0.25c_{b,t}$ sul piano passante per la superficie sull'estremità della pala facendo in modo di mantenere allineati il bordo d'uscita di tutti i profili aggiunti sia della winglet che del raccordo pala-winglet.

Sia la corda alla radice della winglet che la sua lunghezza sono state fatte variare in cinque diverse configurazioni: per la corda da $c_{w,r} = 0.6 \cdot c_{b,t}$ fino a $c_{w,r} = 1.00 \cdot c_{b,t}$ con passi di $0.1 \cdot c_{b,t}$, per la lunghezza tra $l_w = 0.25 \cdot c_{b,t}$ fino a $l_w = 1.25 \cdot c_{b,t}$ con passi di $0.25 \cdot c_{b,t}$. La corda all'estremità della winglet rimane sempre uguale alla metà della corda alla radice della winglet, $c_{w,t} = 0.5c_{w,r}$. In questo modo si sono ottenute 25 configurazioni riassunte nella tabella 6.1.

Delle 25 configurazioni, al momento le analisi sono state condotte solo per dodici configurazioni di alette in direzione sottovento e sei in direzione sopravvento. Inoltre è stata analizzata anche una configurazione con la pala allungata in senso radiale della lunghezza della winglet e del raccordo della configurazione R della winglet, ovvero la pala base è stata allungata di $0.496m$ mantenendo l'andamento della rastremazione e del twist della pala originale.

6.3 Analisi Fluidodinamiche e Risultati

Le analisi CFD sono state condotte nello stesso modo delle simulazioni utilizzate in fase di validazione, utilizzando le stesse impostazioni e gli stessi parametri riportati nella tabella 4.1 in modo da poter eseguire un confronto tra le diverse geometrie studiate. La mesh è stata creata in maniera analoga verificando l'andamento del valore del y^+ sulle superfici della winglet. Sono state testate tre tipologie di configurazioni: la pala con la winglet sottovento,

		$c_{w,r}$				
		$0.6 \cdot c_{b,t}$	$0.7 \cdot c_{b,t}$	$0.8 \cdot c_{b,t}$	$0.9 \cdot c_{b,t}$	$1.0 \cdot c_{b,t}$
l_w	$0.25c_{b,t}$	A	B	C	D	E
	$0.50c_{b,t}$	F	G	H	I	J
	$0.75c_{b,t}$	K	L	M	N	O
	$1.00c_{b,t}$	P	Q	R	S	T
	$1.25c_{b,t}$	U	V	W	X	Y

Tabella 6.1: *Combinazioni dei parametri geometrici delle winglet in esame.*

il caso con la winglet sopravento e il caso con la pala estesa di una lunghezza pari a quella della winglet e per ognuna di queste configurazioni sono state analizzate diverse combinazioni dei parametri geometrici.

Le analisi CFD generano come risultati una serie di valori rappresentativi dell'andamento delle grandezze caratteristiche del fluido attorno la pala, come ad esempio la pressione e la velocità. Per confrontare in maniera agevola i risultati ottenuti si può far riferimento a delle grandezze integrali, che riassumono in un valore le performance della turbina. In particolare si è fatto riferimento alla coppia all'asse, misurata attorno l'asse x , e al momento flettente, misurato attorno l'asse y . Questi due valori contengono una componente dovuta all'attrito viscoso che dipende sia dalla superficie bagnata che dalla velocità del flusso d'aria.

6.3.1 Andamento della Pressione

Per analizzare l'andamento delle pressioni attorno la pala, in particolare nella zona delle winglet, si è posizionato un piano, visibile in figura 6.6, che intercetta il profilo all'estremità della pala al 75% della corda e si estende verso la radice per il 10% della lunghezza della pala.

Nella figura 6.7 è possibile osservare il campo di pressione che si sviluppa attorno l'estremità della pala, in alcune configurazioni geometriche di winglet. Il piano rappresentato in figura è posizionato al 75% della corda del profilo all'estremità della pala e le pressioni sono state ottenute durante le simulazioni a $V_\infty = 7m/s$. Nelle immagini il vento soffia da destra verso sinistra.

Nella prima immagine si vede chiaramente che la differenza di pressione tra intradosso ed estradosso, responsabile della produzione della portanza, diminuisce avvicinandosi all'estremità della pala. In particolare si può notare chiaramente la presenza del vortice d'estremità caratterizzato da una zona circolare di bassa pressione.

Dalla sequenza di immagini è possibile notare che la presenza della winglet posizionata sull'estradosso della pala, figura 6.7b, modifica completamente l'andamento delle pressioni mantenendo costante la differenza di pressione

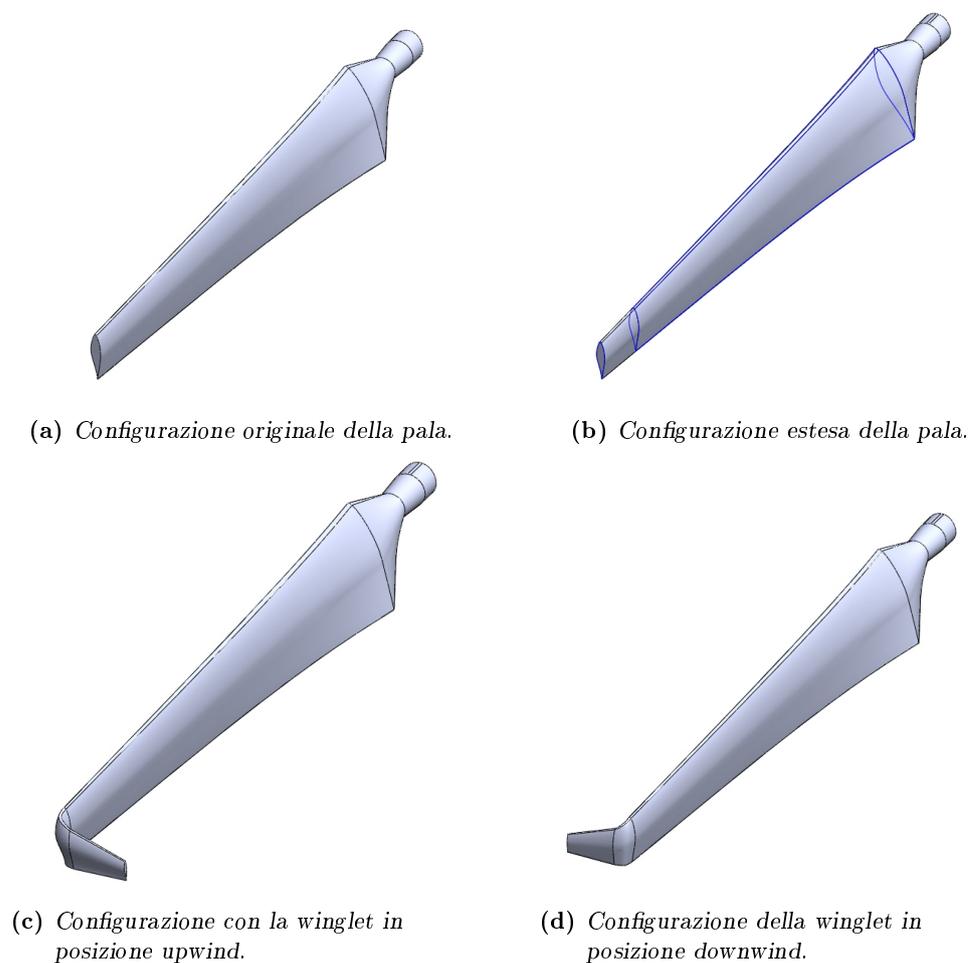


Figura 6.5: Confronto tra le diverse configurazioni geometriche studiate. In tutte le immagini il vento proviene da sinistra verso destra.

tra i due lati della pala per tutta la sua lunghezza. Questo fenomeno è dovuto al campo di bassa pressione che si genera attorno l'aletta che richiama il flusso dall'estradosso della pala e, allo stesso tempo, la presenza fisica della winglet impedisce il moto dell'aria dall'intradosso alla superficie in depressione.

Dalla figura 6.7c si nota che la presenza della winglet che si sviluppa sul lato in sovrappressione non influenza la distribuzione di pressione sull'estradosso della pala anche se riduce la generazione del vortice d'estremità.

Nella figura 6.8 è visibile il confronto della coppia generata dalle tre configurazioni di pale trattate nella figura 6.7. La coppia misurata su ogni stazione radiale della pala è stata normalizzata in base alla lunghezza della sezione. Dalla figura è possibile notare che la presenza della winglet fa incrementare la coppia generata a partire da $r/R \simeq 0.50$ verso l'estremità della

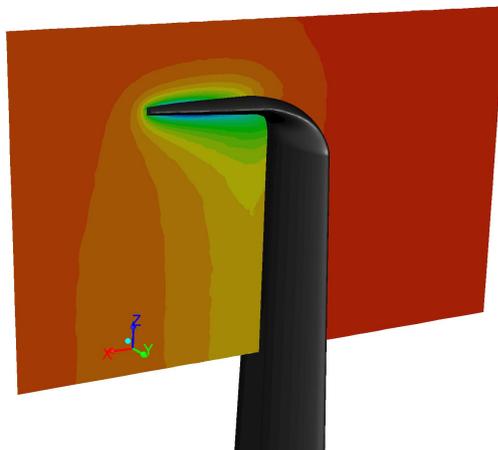


Figura 6.6: Posizione del piano all'estremità della pala.

pala ritardando il brusco crollo che si ottiene nella parte esterna della pala. Come si poteva immaginare osservando la figura 6.7, la winglet che genera l'effetto migliore è la configurazione K downwind, che si estende in direzione della superficie dell'estradosso.

Nella figura 6.9 vengono confrontate quattro diverse configurazioni di winglet sul lato in sovrappressione, facendo riferimento alla tabella 6.1 le configurazioni F, K, P, U, caratterizzate dalla stessa corda alla radice ma da lunghezza via via crescente.

Si nota che l'andamento delle pressioni è praticamente identico in tutti i quattro i casi ma le coppie misurate sono crescenti al diminuire della lunghezza. Questo significa che l'effetto della winglet sul campo di pressione non è influenzato dalla lunghezza dell'aletta ma il risultato finale sulla coppia misurata è dipendente dalla superficie della winglet per il fatto che allungando l'aletta si incrementa la superficie bagnata della pala con conseguente aumento della resistenza viscosa.

La figura 6.10 illustra l'andamento della pressione a valle della turbina all'altezza dell'estremità. Le immagini si sviluppano dall'altezza del bordo d'uscita del profilo al tip della pala, che corrisponde al bordo d'uscita della winglet, e si sviluppano verso valle distanziati di $0.10 \cdot c_{b,t}$. Le due colonne confrontano il campo di pressione della pala originale, a sinistra, con quella con la winglet F in configurazione downwind sulla destra.

Nella colonna di sinistra è possibile notare un cerchio blu posizionato sull'estremità della pala corrispondente al vortice d'estremità caratterizzato da una zona di bassa pressione. Nelle immagini tratte dalla configurazione con la winglet si nota che il vortice d'estremità si è spostato all'estremità libera della winglet ma con un diametro decisamente inferiore e con una

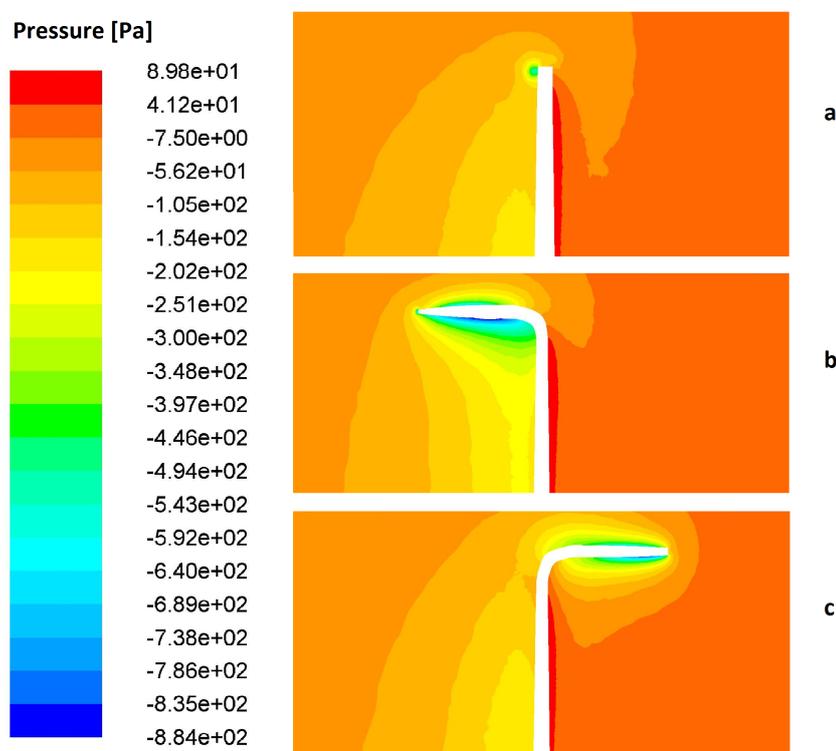


Figura 6.7: *Andamento della pressione [Pa] all'estremità della pala, nella configurazione: a) pala base, b) winglet K, c) winglet K in direzione upwind.*

pressione superiore. La dimensione del vortice è direttamente proporzionale all'energia dispersa per crearlo, energia sottratta a quella prodotta dalla turbina eolica. Di conseguenza, la riduzione della scia vorticoso è indice di un miglioramento dell'efficienza della pala. Nella figura sono stati riportati i vettori velocità del flusso nella zona del vortice.

Nell'immagine 6.10 sono state confrontate tra loro la pala nella configurazione base e la pala con la winglet F, cioè la configurazione che presenta il massimo incremento del coefficiente di coppia. Risulta interessante osservare il confronto tra la coppia prodotta dalla pala originale e nel caso in cui venga aggiunta la winglet, in configurazione F. La figura 6.11 riporta l'andamento della produzione della coppia lungo l'estensione della pala. Si può notare che l'incremento di coppia dovuto all'effetto dato dalla presenza dell'aletta inizia a partire da circa il 40% della pala e si estende fino all'estremità. Si può dire, quindi, che la presenza della winglet determini un incremento globale delle caratteristiche della pala e non solamente localizzato nella parte terminale.

Dalle immagini analizzate si può dedurre che la presenza della winglet,

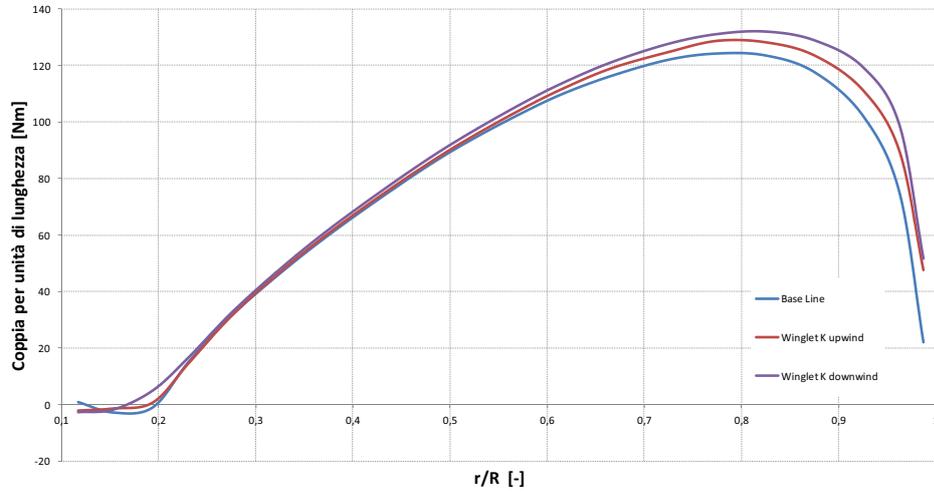


Figura 6.8: Distribuzione della coppia generata per unità di lunghezza sull'estensione della pala.

oltre a diminuire la scia e la dimensione del vortice visibile in fig. 6.10, modifica sostanzialmente il campo di pressione sulla parte dell'estradosso della pala, come si può notare dalla fig. 6.7 alterando la distribuzione della portanza e quindi della coppia prodotta lungo la pala, con un incremento visibile in fig. 6.11.

6.3.2 Andamento del Coefficiente di Coppia

Confrontare tra loro i valori numerici della coppia generata dalla pala nella configurazione base e nella configurazione con la winglet non propriamente corretto, a causa della variazione della lunghezza della pala. Se si aumenta la dimensione del rotore, aumenterà di conseguenza anche l'area spazzata e quindi la potenza massima che la turbina può estrarre dal vento.

Per poter confrontare i risultati tra la pala base e quella con la winglet è stato utilizzato un coefficiente adimensionale, il *coefficiente di coppia*, definito nel seguente modo:

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 RA} \quad (6.2)$$

dove T è la coppia misurata all'asse, ρ è la densità dell'aria, V_∞ la velocità del vento, nel caso della pala base $R = 5.030m$, nel caso con la winglet $R = 5.112m$ e per la pala estesa $R = 5.526m$. L'area spazzata si ottiene con l'equazione

$$A = \pi R^2 \quad (6.3)$$

La pala NREL è stata progettata [7] per massimizzare la produzione di energia annua in una regione in cui la velocità media del vento è pari a $V_\infty =$

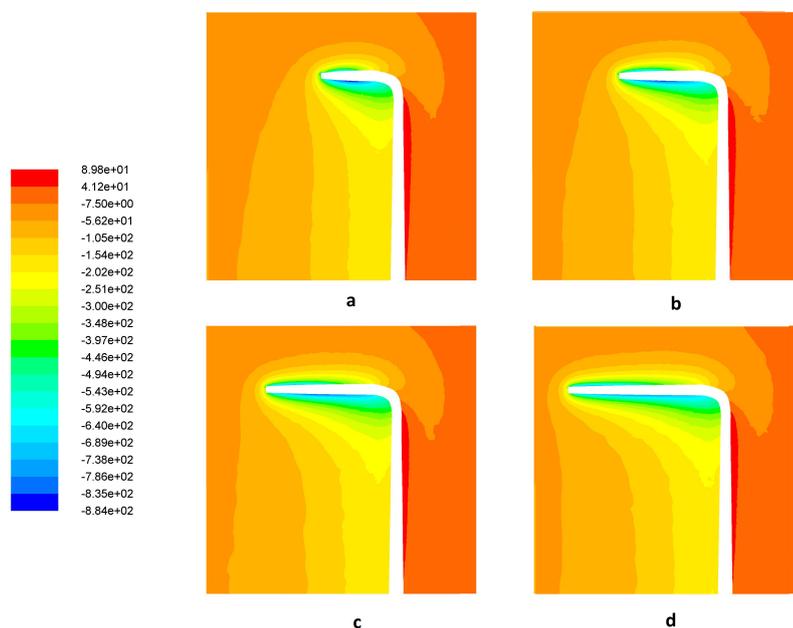


Figura 6.9: Confronto tra i campi di pressione [Pa] sviluppati dalla pala con winglet in funzione della lunghezza dell'aletta. Le configurazioni sono: a) winglet F, b) winglet K, c) winglet P, d) winglet U.

$7.2m/s$, quindi la condizione di massima efficienza della pala si ha per questo valore di velocità. Di conseguenza i valori ottenuti con la presenza di winglet sulla pala sono stati confrontati con quelli della pala base alla stessa velocità. I risultati, espressi in percentuale di incremento del coefficiente di coppia, sono riportati in figura 6.12 per le winglet in configurazione downwind.

Si può notare che all'aumentare della corda alla radice si ha un aumento dell'effetto benefico della presenza della winglet che tende a ridurre la resistenza indotta facendo aumentare la coppia prodotta. Allo stesso tempo, però, si ha un aumento della resistenza viscosa dovuto all'aumentare della superficie della pala. Esiste un valore, in questo caso $c_{w,r} = 0.8 \cdot c_{b,t}$, dove l'incremento di coppia è massimo in quanto gli effetti positivi superano quelli negati. Per valori inferiori della corda l'effetto benefico sulla resistenza indotta diminuisce mentre per valori superiori la resistenza viscosa prende il sopravvento facendo diminuire la coppia generata.

La lunghezza della winglet influenza in maniera analoga il risultato infatti all'aumentare della lunghezza, e quindi della superficie bagnata della pala, l'incremento della coppia prodotta diminuisce per effetto dell'aumento della resistenza viscosa.

Un discorso diverso vale per le winglet in configurazione upwind. Dalla

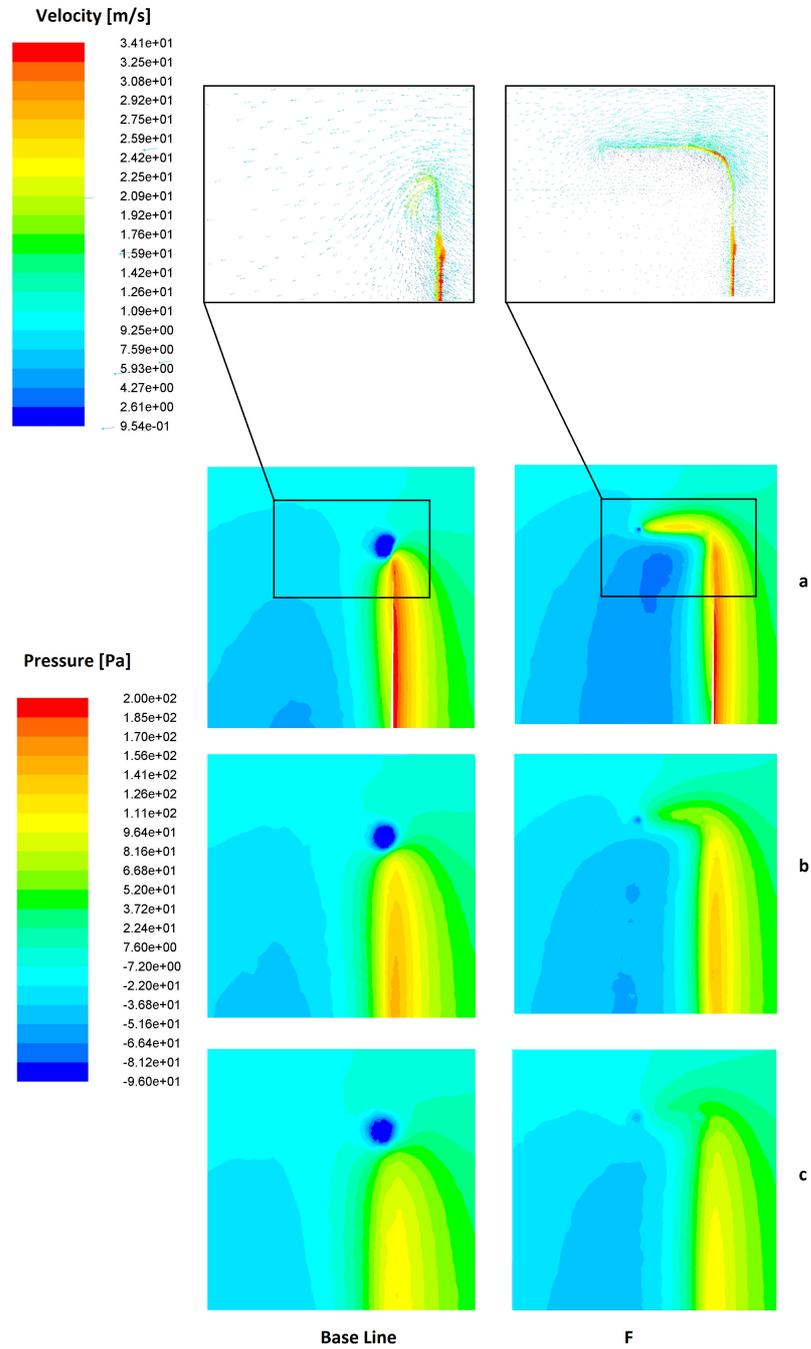


Figura 6.10: Confronto tra il campo di pressioni [Pa] generato nella scia prodotta a valle della pala con e senza winglet.

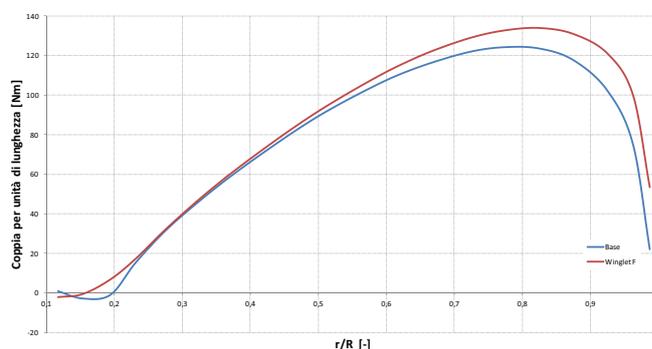


Figura 6.11: Confronto tra la coppia prodotta dalla pala base e quella con la winglet F.

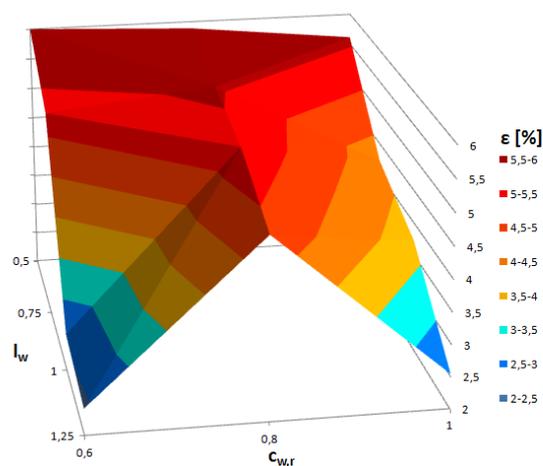


Figure 6.12: Andamento dell'incremento di coppia per $V_\infty = 7m/s$.

figura 6.13 è possibile vedere che tutte le configurazioni determinano un incremento negativo del coefficiente di coppia rispetto la condizione della pala base. Si nota, però, un comportamento analogo in funzione dell'allungamento della winglet, ovvero la coppia generata diminuisce all'aumentare della winglet a causa di un aumento della resistenza viscosa.

L'incremento negativo del coefficiente è dovuto al fatto che la presenza della winglet genera comunque un incremento di coppia all'asse ma non abbastanza elevato da compensare l'aumento della lunghezza della pala e quindi dell'area spazzata. Il risultato ottenuto è in linea con quanto stimato dall'analisi del campo di pressione attorno alla pala fatto nel paragrafo precedente osservando la figura 6.7.

Confrontando le configurazioni F, K, P, U, nella figura 6.14 sono rappresentati i contributi dati dalla winglet e dal raccordo tra winglet e pala

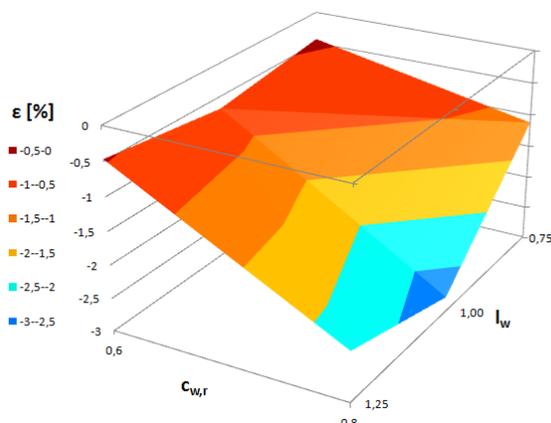


Figure 6.13: Incremento del coefficiente di coppia per le winglet in configurazione upwind.

sulla coppia totale misurata all'asse. In particolare la figura 6.14a descrive l'andamento della coppia dovuto solamente agli effetti di pressione, mentre nella figura 6.14b sono rappresentati i contributi dati dai soli effetti viscosi. Si può notare, dalla prima immagine, che l'effetto di pressione sul raccordo, che resta lo stesso nelle diverse configurazioni, rimane praticamente costante nelle quattro analisi, mentre sulla winglet, che aumenta di lunghezza dalla configurazione F alla U, l'effetto delle pressioni genera un incremento della coppia prodotta.

Le forze viscosi determinano una coppia che si oppone alla rotazione della pala, infatti nella figura 6.14b si può vedere che la coppia generata è negativa in tutte le quattro configurazioni. In particolare l'effetto viscoso sul raccordo è lo stesso per i diversi casi mentre sulla winglet, dato che la sua lunghezza aumenta tra la configurazione F e la U, la coppia negativa cresce linearmente per le diverse configurazioni analizzate.

Nelle figure 6.15 vengono visualizzati sia i coefficienti di coppia che i loro incrementi rispetto la pala nella configurazione base, per diverse winglet posizionate sul lato in depressione della pala. In particolare si è messo in evidenza l'effetto della lunghezza della winglet, con le configurazioni M, R, W, e l'effetto dell'aumento della corda alla radice della winglet nelle configurazioni P, R, T.

Come è stato spiegato precedentemente, risulta significativo il punto alla velocità di massima efficienza della pala originale pari a $7m/s$. In ogni caso anche alle altre velocità si nota un generale incremento delle caratteristiche della turbina. Si può quindi affermare che una winglet progettata per migliorare il funzionamento della turbina nel suo punto di ottimo garantisce un generale incremento anche nelle altre condizioni di utilizzo del rotore.

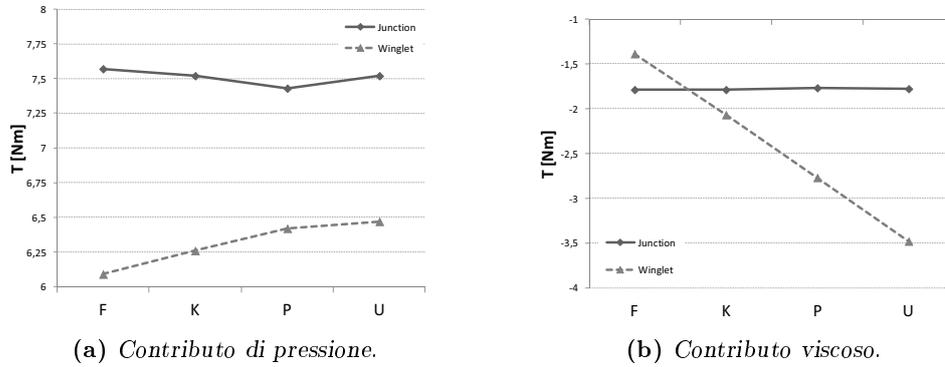


Figura 6.14: Contributo sulla coppia dovuto alla winglet e al raccordo.

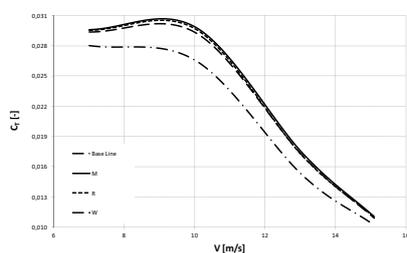
6.3.3 Confronto tra le Diverse Configurazioni

Nella tabella 6.2 sono riportati i valori ottenuti dal confronto tra la pala originale e tre diverse configurazioni. La winglet corrisponde alla configurazione R cioè con una corda alla radice pari a $c_{w,r} = 0.8 \cdot c_{b,t}$ e lunghezza $l_w = 1.00 \cdot c_{b,t}$ che si sviluppa verso il lato in depressione, configurazione upwind, o verso il lato in pressione, configurazione downwind. Nella configurazione estesa la pala è stata allungata mantenendo, il trend di variazione della corda e dell'angolo di twist, di $0.496m$ pari alla lunghezza della winglet compreso il raccordo, in modo da poter avere un confronto tra i risultati a parità di superficie aggiunta alla pala originale.

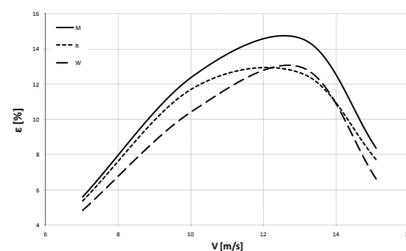
Tabella 6.2: Confronto tra la configurazione base, estesa e con le winglet a $V_\infty = 7m/s$.

Configurazione	Base	Estesa	W. Upwind	W. Downwind
Q	343.68	429.16	350.74	380.10
Q_{visc}	-21.12	-28.91	-25.82	-27.40
T	1814.92	2418.28	1865.23	2030.27
T_{visc}	3.73	4.97	4.88	5.15
C_T	0.0280	0.0264	0.0273	0.0288
ΔC_T	-	-5.71%	-2.5%	+2.86%

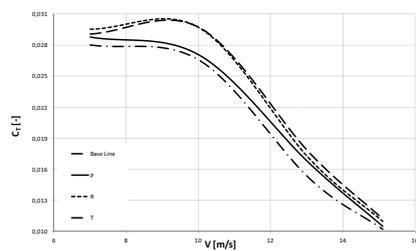
Osservando i risultati finali si nota che l'aumento della superficie della pala genera un incremento complessivo sia della coppia utile che del momento flettente, aumentando di conseguenza anche le loro componenti viscose. In realtà questi valori sono ingannevoli in quanto bisogna rapportarli alle dimensioni effettive della pala. Per questo motivo è stato introdotto il coefficiente di coppia, espresso con l'equazione 6.2, che permette di valutare l'effetto reale dell'aumento di dimensione della pala. L'incremento del coefficiente di coppia è negativo sia per la configurazione estesa che per quella



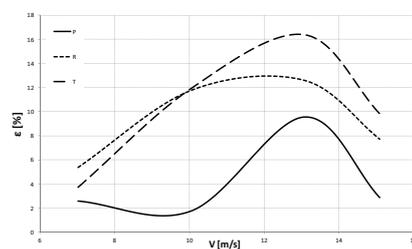
(a) Coefficiente di coppia per le configurazioni M, R, W.



(b) Incremento del coefficiente di coppia.



(c) Coefficiente di coppia per le configurazioni P, R, T.



(d) Incremento del coefficiente di coppia.

Figura 6.15: Effetti della presenza delle winglet in configurazione downwind sul coefficiente di coppia.

con le winglet sul lato in pressione mentre risulta positivo solo nel caso di winglet sul lato in depressione.

Capitolo 7

Conclusioni

Negli ultimi anni, la società è diventata sempre più sensibile alle problematiche legate alla salvaguardia del pianeta. Grazie anche a finanziamenti e leggi promulgate dal parlamento europeo, i cittadini hanno sviluppato una coscienza ecologica volta alla tutela dell'ambiente che ci circonda anche grazie all'utilizzo di energie rinnovabili. Tra queste, trova una collocazione anche lo sfruttamento dell'energia generata dal vento e convertita in energia elettrica mediante l'utilizzo delle turbine eoliche. Anche a fronte di un ridotto impatto ambientale ed ecologico di questi dispositivi, l'utilizzo ne è stato molto limitato a causa della volontà di non modificare eccessivamente il profilo morfologico del territorio. La loro conformazione e dimensione, infatti, è direttamente proporzionale alla quantità di energia che sono in grado di produrre con il conseguente incremento dell'impatto visivo nel territorio nel quale sono collocati.

Lo scopo di questo lavoro di tesi è quello introdurre le winglet all'estremità della pala in modo da migliorare l'efficienza delle turbine eoliche ad asse orizzontale e di aumentare quindi la quantità di energia prodotta a parità di dimensione ed intensità del vento. Ciò permette inoltre lo studio di nuove turbine con pale di lunghezza ridotta che permetterebbero un impatto visivo inferiore garantendo comunque un'elevata prestazione a livello di potenza prodotta.

7.1 Discussione dei Risultati

L'analisi dei risultati deve partire dalla fase di validazione del modello, descritto nel capitolo 5. In questa prima fase, lo scopo principale è stato quello di generare un modello CFD che garantisse buoni risultati per la simulazione delle turbine eoliche. La fase di sviluppo del modello è durata parecchi mesi durante i quali sono state testate diverse combinazioni tra le caratteristiche della mesh e quelle del solutore CFD. Ad esempio sono state provate mesh strutturate e non strutturate, è stata verificata, tramite

un'analisi di sensibilità, che la dimensione delle celle sia tale da non influenzare il risultato finale e in maniera analoga che la presenza delle pareti della galleria non interferisse con il moto del fluido. All'interno del codice Fluent sono stati testati diversi modelli di turbolenza e diverse opzioni del solutore al fine di ottenere dei risultati compatibili con quelli disponibili dalle prove sperimentali.

Alla fine si è scelto un modello di mesh non strutturata, con un valore medio del y^+ di circa 30 su tutta la superficie della pala. Queste scelte permettono di avere una griglia non eccessivamente fitta che garantisce di ottenere i risultati voluti senza richiedere eccessive risorse temporali e di potenza di calcolo.

Le immagini più rappresentative della bontà della simulazione sono quelle che descrivono l'andamento della pressione, o meglio del coefficiente di pressione, sulla superficie della pala, in corrispondenza di alcune sezioni. Dalle immagini 5.3-5.8 è visibile la precisione della previsione del comportamento della turbina. Si può osservare che lungo le diverse sezioni sulla pala, i valori dei coefficienti di pressione sono stati previsti con buona accuratezza per tutte le velocità analizzate. Occorre ricordare che la zona iniziale della pala, per r/R inferiore a 0.25, non è descritta in maniera approfondita nella documentazione disponibile in quanto è un raccordo tra il profilo S809 e l'hub. Inoltre quella zona è investita da un flusso alterato dalla presenza della navicella che non è stata rappresentata nelle simulazioni. Per questi motivi si notano delle differenze tra i risultati numerici e quelli sperimentali nella parte inferiore della pala.

Le immagini seguenti dimostrano, con dati generali, le performance globali della turbina. Valori come il coefficiente di potenza o la coppia misurata all'albero danno una informazione di tipo integrale dato che condensano in un unico valore le prestazioni di tutta la turbina. Osservando il confronto tra i risultati numerici e quelli sperimentali si può considerare validato il modello utilizzato dal momento che quasi tutti i risultati ottenuti sono all'interno dell'incertezza della misura.

Dopo aver validato il modello numerico si è passati alla seconda fase, che comprende l'analisi dell'effetto della geometria della winglet sulle performance della turbina eolica. L'immagine 6.7 dimostra chiaramente l'effetto della presenza dell'aletta sul campo di pressione attorno la pala. Nella zona dell'intradosso il campo non è influenzato mentre sull'estradosso il campo di bassa pressione attorno la winglet richiama il flusso dalla pala garantendo un'elevata differenza di pressione tra la zona in sovrappressione e quella in depressione e, di conseguenza, aumentando la produzione di portanza e della coppia generata.

La presenza della winglet fa spostare il vortice d'estremità dall'ultima sezione della pala fino all'estremità della winglet riducendone il diametro e l'intensità, quindi facendo diminuire l'energia dissipata per generarlo. Aumentare la lunghezza della winglet permette di incrementare la componente

della coppia dovuta agli effetti legati alla pressione del fluido sulla pala, ma allo stesso tempo genera l'incremento della componente, negativa, di origine viscosa. Complessivamente variare la lunghezza dell'aletta provoca la diminuzione della coppia totale.

Per analizzare correttamente l'effetto della winglet rispetto la condizione base della pala occorre osservare la turbina nella sua condizione ottimale ovvero nella condizione in cui opera con efficienza massima, in questo caso alla velocità del vento di $7m/s$. Risulta comunque interessante esaminare il comportamento dell'aletta in condizioni diverse da quella ottimale. Le figure 6.15 permettono di verificare che anche in condizioni diverse la presenza dell'aletta migliora le caratteristiche globali della pala.

Infine è stato dimostrato che la winglet in configurazione downwind è l'unica, tra le configurazioni analizzate, che permette di incrementare il coefficiente di potenza della macchina e, a parità di superficie aggiunta all'estremità della turbina, la winglet permette di ridurre il momento flettente generato alla base della pala.

7.2 Sviluppi Futuri

Le analisi condotte hanno messo in evidenza l'effetto della presenza della winglet rispetto la configurazione base della turbina. Sono state valutate diverse geometrie delle alette modificando solamente alcuni dei diversi parametri che le descrivono. Ad esempio, si potrebbe studiare l'influenza dell'angolo di freccia dell'aletta o della sua posizione sulla corda del profilo all'estremità della pala.

Tuttavia l'analisi CFD permette di ottenere solamente risultati di carattere aerodinamico trascurando completamente l'effetto strutturale. Per questo motivi, il passo successivo sarebbe quello di creare un'analisi aeroelastica che utilizzi i risultati aerodinamici come carichi di pressione e di taglio dovuti al flusso dell'aria sulla pala soggetta ai carichi inerziali e strutturali dovuti alla rotazione attorno all'asse del rotore. Come risultato dall'analisi strutturale, la nuova configurazione deformata della pala dovrebbe essere sottoposta nuovamente all'analisi fluidodinamica fino al raggiungimento della convergenza.

Una delle problematiche maggiori che ostacola la crescita e lo sviluppo della produzione di energia eolica è legato a tematiche di carattere acustico. L'introduzione delle winglet sull'estremità della pala potrebbe modificare il rumore generato dalla rotazione della turbina. Questo potrebbe essere un altro ambito di ricerca futuro.

Infine, si potrebbe condurre un'analisi di ottimizzazione della geometria della winglet al fine di migliorare alcuni parametri geometrici con l'obiettivo di massimizzare il coefficiente di coppia totale della turbina.

Bibliografia

- [1] International Energy Agency, *Key World Energy Statistics*, 2012.
- [2] EWEA European Wind Energy Association, *Wind in Power, 2011 European Statistics*, February 2012.
- [3] Martin O. L. Hansen, *Aerodynamics of Wind Turbine*, Second Edition, Earthscan, 2012.
- [4] J. F. Manwell, J.G McGowan, A.L. Rogers, *Wind Energy Explained, Theory, Design and Application*, Second Edition, Wiley 2009.
- [5] Wei Tong, *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*, WIT Press 2010.
- [6] ANSYS® FLUENT, *Theory Guide*, Release 14.0 November 2011.
- [7] P. Giguère and M.S. Selig, *Design of a Tapered and Twisted Blade for the NREL Combined Experiment Rotor*, NREL/SR-500-26173, April 1999.
- [8] M.M. Hand, D.A. Simms, L.J. Fingersh, D.W. Jager. J.R. Cotrell, S. Schreck, S.M. Larwood, *Unsteady Aerodynamics Experiment Phase VI: Wind Tunnel Test Configuration and Available Data Campaigns*, NREL/TP-500-29955, December 2001.
- [9] D. Simms S. Schreck M. Hand L.J. Fingersh, *NREL Unsteady Aerodynamics Experiment in the NASA-Ames Wind Tunnel: A Comparison of Predictions to Measurements*, NREL/TP-500-29494, June 2001
- [10] Jang-Oh MO and Young-Ho LEE, *CFD Investigation on the aerodynamic characteristics of a small-sized wind turbine of NREL PHASE VI operating with a stall-regulated method*, Journal of Mechanical Science and Technology 26 (1) (2012) 81~92.
- [11] A. Le Pape and J. Lecanu, *3D Navier–Stokes computations of a stall-regulated wind turbine*, Wind energy Volume 7 (4), pages 309–324, October/December 2004.

-
- [12] J. C. Huang, H. Lin, T. Y. Hsieh, J. Y. Yang, *Aerodynamic Analysis of Wind Turbines Rotors with High Lift Airfoils by Using Pre-conditioned WENO Scheme*, Seventh International Conference on Computational Fluid Dynamics (ICCFD7), Big Island, Hawaii, July 9-13, 2012.
- [13] N. N. Sørensen, J. A. Michelsen, and S. Schreck, *Navier-Stokes Predictions of the NREL Phase VI Rotor in the NASA Ames 80 ft 120 ft Wind Tunnel*, *Wind Energy*, 2002, 5:151-169.
- [14] Sighard F. Hoerner, *Fluid-Dynamic Lift*, Hoerner Fluid Dynamics, 2nd edition, 1992
- [15] Anderson, J. D. Jr., *Fundamentals of Aerodynamics*, 5th Edition, McGraw Hill, 2010.
- [16] Lanchester, F. W., *Aerodynamics*, A. Constable & Co. Ltd., 1907.
- [17] Jeppe Johansen and Niels N. Sørensen, *Aerodynamic investigation of Winglets on Wind Turbine Blades using CFD*, Risø-R-1543(EN) February 2006.
- [18] D. Simms, S. Schreck, M. Hand, and L.J. Fingersh, *NREL Unsteady Aerodynamics Experiment in the NAS-Ames Wind Tunnel: A Comparison of Predictions to Measurements*, NREL/TP-500-29494, June 2001.
- [19] Menter, F. R., *Zonal Two Equation $k-\omega$ Turbulence Models for Aerodynamic Flows*, AIAA Paper 93-2906, 1993.
- [20] Dan M. Somers, *Design and Experimental Results for the S809 Airfoil*, NREL/SR-440-6918 UC Category: 1213 DE97000206, January 1997.
- [21] Whitcomb, R. T., *A Design Approach and Selected Wind-Tunnel Results at High Subsonic Speeds for Wing-Tip Mounted Winglets*, NASA T. N. D-8260, Langley Research Center, Hampton, Va. 23665, July 1976.
- [22] Mark D. Maughmer, *The Design of Winglets for High-Performance Sailplanes*, AIAA 2001-2406.

Appendice A

Profilo S809

Il profilo S809 è stato appositamente sviluppato all'interno della NREL per impieghi in ambito eolico, nello specifico per le turbine eoliche ad asse orizzontale. Ha uno spessore massimo del 21% della corda. Il profilo è stato sviluppato per avere una sensibilità minima alla rugosità superficiale, per avere una ridotta resistenza di profilo e un elevato valore della portanza.

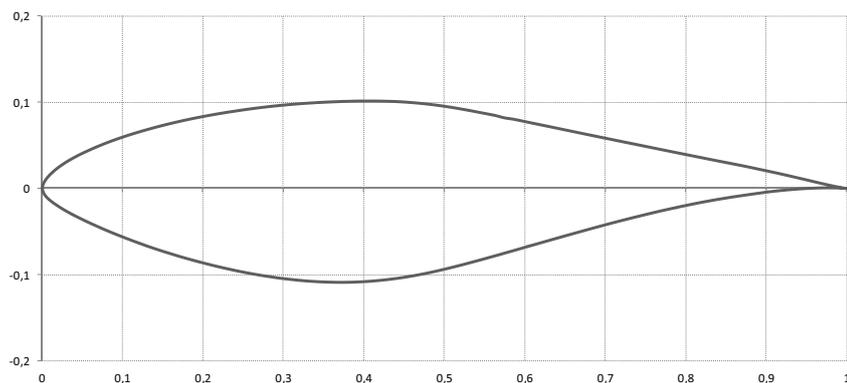


Figura A.1: *Profilo S809.*

Nella tabella A.1 sono riportate le coordinate nel piano $x - y$ dei punti che compongono il profilo. Gli stessi punti sono stati utilizzati per generare la figura A.1. Si fa notare che le coordinate fanno riferimento ad un profilo normalizzato, con corda unitaria e bordo d'attacco posizionato nell'origine degli assi.

Tabella A.1: *Coordinate xy che compongono il profilo, tratte da [8].*

x/c	y/c	x/c	y/c
1.000000	0.000000	0.000213	-0.001794
0.996203	0.000487	0.001045	-0.003477
0.985190	0.002373	0.001208	-0.003724
0.967844	0.005960	0.002398	-0.005266
0.945073	0.011024	0.009313	-0.011499
0.917488	0.017033	0.023230	-0.020399
0.885293	0.023458	0.042320	-0.030269
0.848455	0.030280	0.065877	-0.040821
0.807470	0.037766	0.093426	-0.051923
0.763042	0.045974	0.124111	-0.063082
0.715952	0.054872	0.157653	-0.073730
0.667064	0.064353	0.193738	-0.083567
0.617331	0.074214	0.231914	-0.092442
0.567830	0.084095	0.271438	-0.099905
0.519832	0.093268	0.311968	-0.105281
0.474243	0.099392	0.353370	-0.108181
0.428461	0.101760	0.395329	-0.108011
0.382612	0.101840	0.438273	-0.104552
0.337260	0.100070	0.481920	-0.097347
0.292970	0.096703	0.527928	-0.086571
0.250247	0.091908	0.576211	-0.073979
0.209576	0.085851	0.626092	-0.060644
0.171409	0.078687	0.676744	-0.047441
0.136174	0.070580	0.727211	-0.035100
0.104263	0.061697	0.776432	-0.024204
0.076035	0.052224	0.823285	-0.015163
0.051823	0.042352	0.866630	-0.008204
0.031910	0.032299	0.905365	-0.003363
0.016590	0.022290	0.938474	-0.000487
0.006026	0.012615	0.965086	0.000743
0.000658	0.000204	0.984478	0.000775
0.000204	0.001942	0.996141	0.000290
0.000000	-0.000020	1.000000	0.000000

Appendice B

Articolo

Numerical Investigation of the Influence of both Length and Root Chord on the Aerodynamic Performance of a Tip-Mounted Blended Winglet for HAWT Application

Luca Michelini, Marco Raciti Castelli, Ernesto Benini

Luca Michelini is completing his M.Sc. in Mechanical Engineering at the University of Padua, Via Venezia 1, 35131 Padova, Italy (e-mail: luca.michelini@studenti.unipd.it).

Marco Raciti Castelli is a Research Associate at the Department of Industrial Engineering of the University of Padua, Via Venezia 1, 35131 Padova, Italy (e-mail: marco.raciticastelli@unipd.it).

Ernesto Benini is an Associate Professor at the Department of Industrial Engineering of the University of Padua, Via Venezia 1, 35131 Padova, Italy (e-mail: ernesto.benini@unipd.it).

Abstract

Winglets are widely used on aircraft wings for the capability of decrease induced-drag and increment lift. In the last years, the number of wind turbines installed worldwide has grown along with the request of energy. This paper analyzes the effects of winglets, placed at the tip of the blade of the NREL Phase VI wind turbine, with the purpose to improve the aerodynamic efficiency, to reduce the rotor size and the environmental impact. The influence of winglet geometry factors was computed using a commercial CFD code validated with the data coming from NREL wind-tunnel tests. Winglet root chord, length and side positioning are modified to analyze influence of geometrical parameters on blade performance.

Keywords: Horizontal-axis wind turbine, CFD, winglet, NREL phase VI.

1. Introduction and background

In the last years the request of energy has grown worldwide but the main energy supplies remains oil and coal. After the sign of Kyoto Protocol in 1997 over 160 Country had decided to reduce the production of CO_2 . By 2020 the EU wants to reduce the emissions of greenhouse gas by 30%, improving the use of alternative energy supply, as wind energy.

In 2011, EWEA analyzed [1] that wind power new installations in EU was about 9.6MW, the 21.4% of new power capacity installations. Annual

Table 1: Case S input parameters.

Configuration	Velocity [m/s]	Density [kg/m^3]	rpm
S0700000	7.02	1.25	71.87
S1000000	10.05	1.25	72.10
S1300000	13.07	1.23	72.09
S1500000	15.10	1.22	72.06
S2000000	20.13	1.22	72.01
S2500001	25.11	1.22	72.16

installations of wind power supply have an increased trend with an annual growth of 15.6% which shows a global interest in this alternative energy supply. Germany has the largest EU installed capacity with about 29000MW followed by Spain, France, Italy and UK.

A wind turbine is used to convert the air flow kinetic energy in mechanical energy to moves the electric convertert. The maximum power that a wind turbine can extract from the wind is

$$P = \frac{1}{2}\rho C_p AV_\infty^3 \quad (1)$$

It is proportional to indisturbed wind velocity, to air density, to power coefficient and the swept area. To increment the power is necessary, with constant wind conditions, to expand the area swept by the blades which corresponde to increase the length of the blades and the height of the tower, incrementing the visual and the environment impact. Visual impact is one of the obstacle that a wind turbine designer have to face.

Winglets are introduced to obtain more power from wind with the same swept area incrementing the efficiency of a wind turbine. They can be added to a new blade or an existing one without increment the enviroment impact or uses during the design phase to reduce the rotor diameter.

This paper take advantages from the NREL Phase VI S-case wind tunnel tests [2] to validate the numerical model, then analyzes several geometrical configuration of winglets on NREL blade to investigate the influence of geometrical parameters on aerodynamic and structural characteristics. NREL tested a 2-bladed, 10-meter diameter wind turbine in the NASA/AMES $24.4 \times 36.6m$ wind tunnel, tests parameters are summarized in table 1.

The blade has S809 airfoils with linear taper and nonlinear twist distribution as described in [2, 3].

In literature there are a lot of papers about NREL wind tunnel tests, because the availability of results allows to validate new numerical wind turbine codes.

Mo et al. [4] analyzed aerodynamic characteristics of the NREL's wind turbine from Phase VI using Fluent as CFD code with a structured mesh of about 3×10^6 cells. They used the $k - \omega$ turbulent model with wall function approach using a mean y^+ about 7 at $7m/s$ and they simulated the S-case with the turbine positioned upwind with a wind speed varying from 7 to $25m/s$. All the simulations present a good agreement with the experimental data.

The paper of Le Pape et al. [5] describes the CFD simulations of a NREL phase VI wind turbine using *elsA* Navier-Stokes solver developed at ONERA. This solver uses the $k - \omega$ turbulent model with the SST correction obtaining excellent results at low speeds but with some differences at high speeds due to a premature stall prediction at intermediate speeds.

Sørensen et al. [6] applied an incompressible Reynolds-averaged Navier-Stokes solver, *EllipSys3D*, developed at Risø National Laboratory, to analyze the NREL Phase VI wind turbine obtaining the best agreement with the experimental data. Analysis was conducted in configuration with and without the cylindrical wall that described the wind tunnel; the mesh was about 4×10^6 cells with a y^+ below 2 everywhere; the turbulent model utilized was a $k - \omega SST$. The results showed a good agreement with the experimental data and the tunnel wall presence had a small influence on the total results.

Winglets are wingtip devices used on high performance sailplanes or commercial aircraft for improving performance and reduce fuel consumptions. Whitcomb [7], in 1976, demonstrate with a full wind tunnel experimental campaign the improves of efficiency of winglets mounted on first-generation jet transport wing. Today no-one transport airline use aircraft without winglets.

Winglets are non-planar surface mounted at wingtip to reduce induced drag and improve the lift distribution over the wing span.

At the end of '80s, winglets technology was studied to be applied on horizontal-axis wind turbine. Shimizu et al. [8] tested tip attachments with wind tunnel and open field experiments, developing a global theories.

Imamura et al. [9] demonstrate numerically using a vortex lattice method the aerodynamic effectiveness of winglet with an increment of power coefficient and flatwise bending moment.

In the last years CFD analysis was conducted on various wind turbine blade tip, Johansen and Sørensen [10] used *EllipSys3D* to study the aerodynamic of several winglet geometries with different twist distribution and camber on a wind turbine. They noticed that the presence of a winglet increments also the mechanical power also the thrust. Furthermore, a twisted winglet produces more effects then the straight one and a winglet on the suction side is more effective than the one on the pressure side.

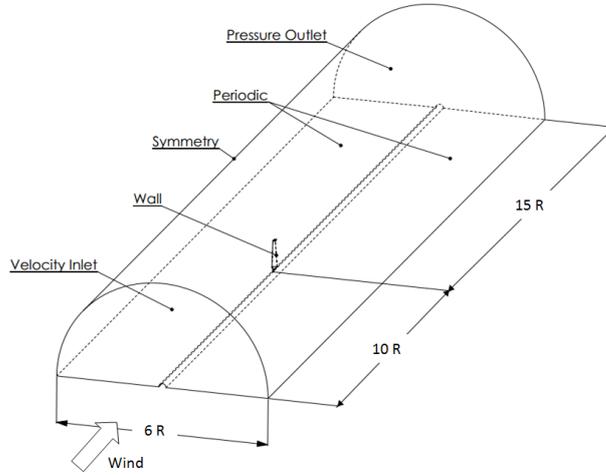


Figure 1: Volume geometry and boundary conditions.

The objective of this investigation is to clearly demonstrate the innovation and the improvement guaranteed by introduction of winglet on horizontal axis wind turbine, that allows to augment the efficiency of existing blade or reduce swept area on new designed turbine reducing visive and environment impact.

2. Case Study

With the availability of NREL data, various kind of mesh configurations and analysis parameters were analyzed with the aim of finding the best suited combination of element size, element number, boundary layer height and turbulence model. The external volume is related to the length of a blade, $R = 5.030m$. It is a cylinder with $3 \cdot R$ external radius, extends for $10 \cdot R$ before the blade and $15 \cdot R$ after; furthermore, around the rotation axis, there is a cylinder of radius $0.522m$ subtracted from the volume representing the hub, as visible in figure 1.

2.1. Computational Mesh

Taking advantages from symmetry, only half volume can be analyzed, using the *periodic* boundary condition. The mesh was made using Gambit, with about 5-million tetraedral elements and then converted in poliedral elements inside Fluent, obtaining less than 3-million cells. On the surface of the blade, the mesh was made using triangolar elements, placing 250 nodes on every airfoils. The element size varies linearly with the chord length, from about $6mm$ to $2mm$ and the boundary layer height is fixed to 15% of

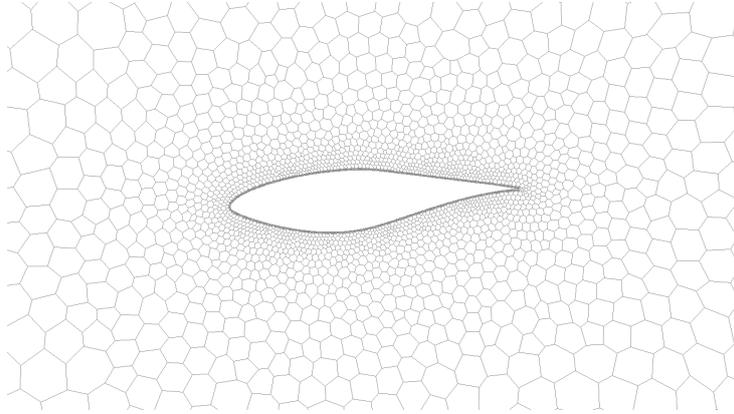


Figure 2: Volume mesh around airfoil after poliedral conversion.

element size. A function size was used to generate the volume mesh from surface mesh, using a grow rate of 1.2, visible in fig.2.

The S809 airfoil was modified at 99.6% of chord with a straight edge to remove the sharp trailing edge because it complicates the generation of mesh cells and is not representative of real blade. A cylindrical surface with a radius of $2m$ divide the computational domain in two zones: inside the cylinder there is the wind turbine blade, with a thickened mesh, and outside the mesh goes spreading with a grow factor of 1.2.

All the boundary conditions zones are visible in fig.1, velocity inlet, pressure outlet and symmetry are the condition at the far-field surface, periodic condition on the horizontal plane to halve the domain cells numbers, the blade surfaces are wall.

2.2. Numerical Solver

All the analysis was conducted with Fluent solutor, using $k - \omega SST$ turbulent model. This model was develop by Menter to take advantages of $k - \omega$ model inside the near wall-layer and the $k - \varepsilon$ model in the far field and it is adequate to analyze separation of flow or adverse pressure gradient, similar to the case of wind turbine analysis. Over the blade surface, the y^+ value is about 30 so the viscous sub layer was described by a wall function. On the velocity inlet surface, the velocity was define normal to the boundary, with a turbulent intensity value of 0.5 representing the wind tunnel conditions. The blade walls are moving at the same velocity of the moving reference frame, define rotating around the longitudinal axis at the value of 72 rpm. In this way the centripetal and Coriolis acceleration are include in the motion equations. Spatial discretization scheme was imposed to first order upwind to initialize the solution, than switch to second order

to obtain the final solution. Initialization used the pseudo-hybrid method and the pseudo-transient method was utilised as under-relaxation factor, as define in Ansys Fluent User guide, with a pseudo-transient time step of $\frac{0.1}{\omega}$ s.

2.3. Validation

To validate the CFD model, numerical results are compared to measured data from NREL wind tunnel tests. The method of experimental measurements consist in averaged results over several revolutions and the mean values are indicated with the standard deviations to show the dispersion around the averaged value.

From NREL analysis there are two kind of data: punctual data, like the pressure distribution measured at every single point over the blade surface, and the integrated loads, like shaft torque and flap moment, where the distribution of pressure are integrated to obtain a single final results.

Pressure distributions are described as pressure coefficient over the airfoil on five spanwise positions on the blade at $r/R = 0.30, 0.47, 0.63, 0.80, 0.95$. Pressure coefficients are define as

$$c_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho c (V_\infty^2 + \omega^2 R^2)} \quad (2)$$

and the plots utilizes $-c_p$ as usual in aerodynamics analysis to describe the suction and pressure side of the airfoils respectively on the upper and the lower side of the graphs. Results are illustrated in figures 3 to 8.

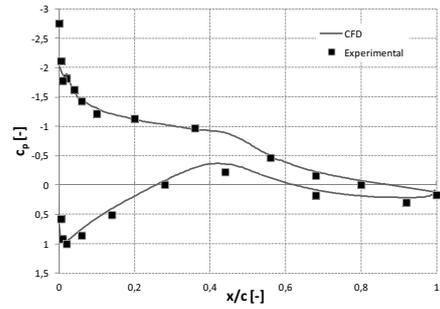
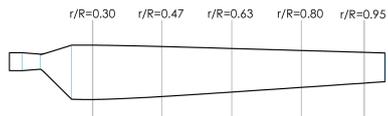
Generally, they show a good agreement between computed and measurement value, in particular in the outer part of the blade near the tip. The inner part of the blade, near the root, the results are probably affect by stall phenomenon or caused by the geometric simplification of the hub.

Integrated load are syntetical parameters to describe the overall functioning of the wind turbine. Shaft torques and root flap moments are obtained by integration of pressure and skin friction over the blade surface. In fig.9 are presented the computed torques and the measured torques shows good agreement with a mean difference about 5%. In the same figure are visible the numerical results computed by other research worldwide, using CFD solver.

The biggest difference occur at the minimum velocity, $7m/s$, with a discrepancy of about 14%. At $20m/s$ the discrepancy is about 8%, in all the others cases the computed results are inside the measurement uncertainty.

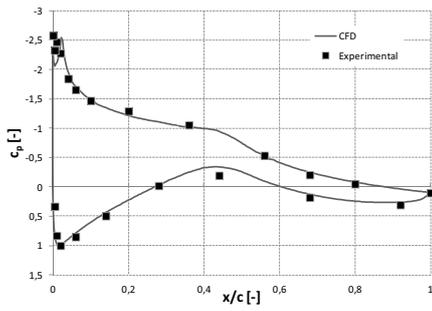
Analysis of power coefficients, define as

$$C_P = \frac{T\omega}{\frac{1}{2}\rho AV_\infty^3} \quad (3)$$

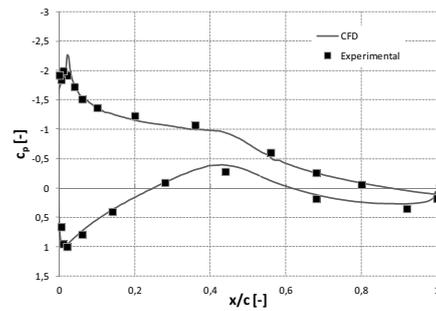


(a) Pressure tab distributions.

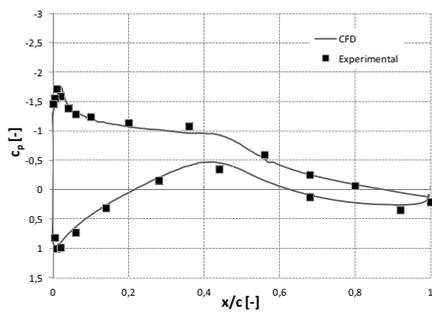
(b) $r/R = 0.30$.



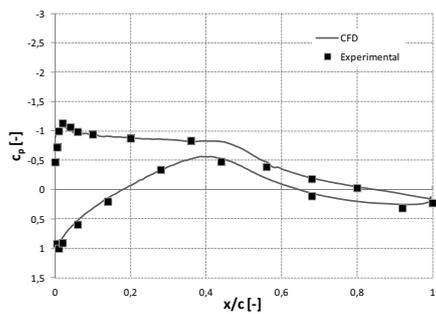
(c) $r/R = 0.47$.



(d) $r/R = 0.63$.

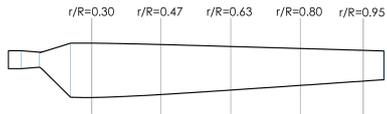


(e) $r/R = 0.80$.

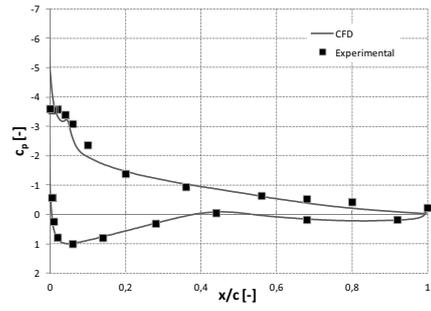


(f) $r/R = 0.95$.

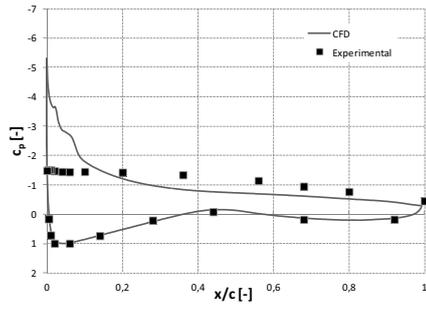
Figure 3: Pressure coefficients at $V_\infty = 7m/s$.



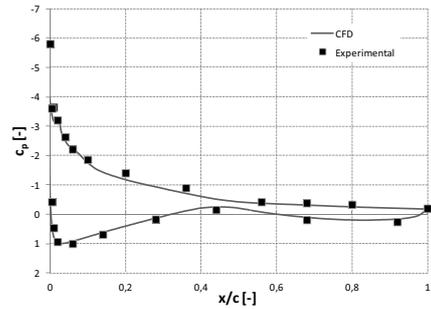
(a) Pressure tab distributions.



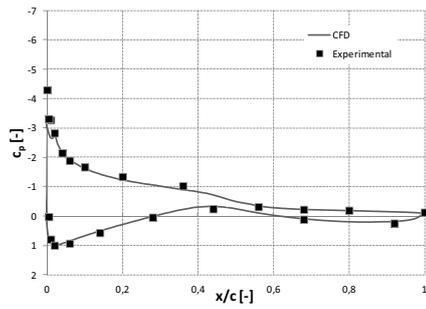
(b) $r/R = 0.30$.



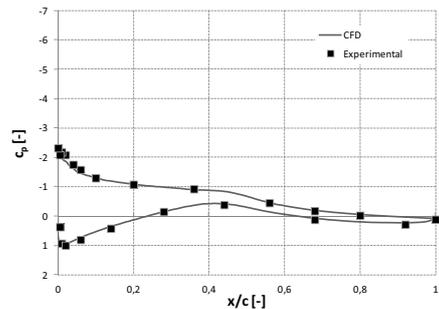
(c) $r/R = 0.47$.



(d) $r/R = 0.63$.

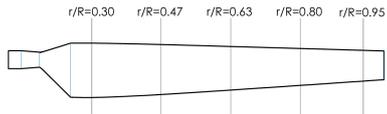


(e) $r/R = 0.80$.

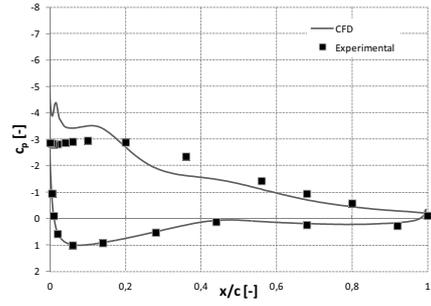


(f) $r/R = 0.95$.

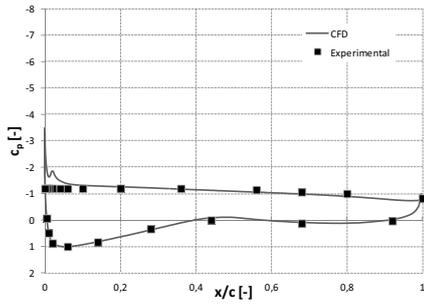
Figure 4: Pressure coefficients at $V_\infty = 10m/s$.



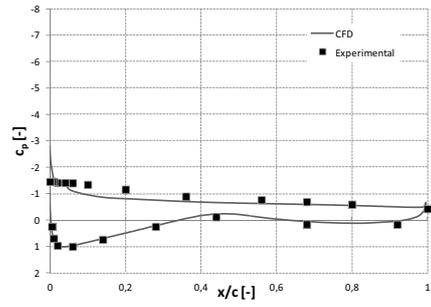
(a) Pressure tab distributions.



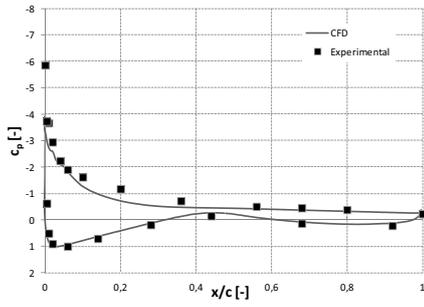
(b) $r/R = 0.30$.



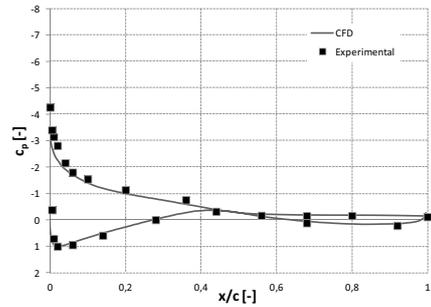
(c) $r/R = 0.47$.



(d) $r/R = 0.63$.

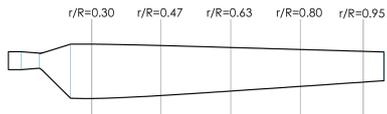


(e) $r/R = 0.80$.

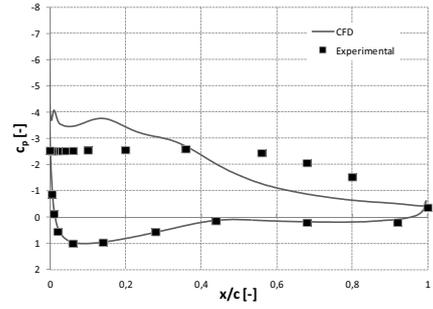


(f) $r/R = 0.95$.

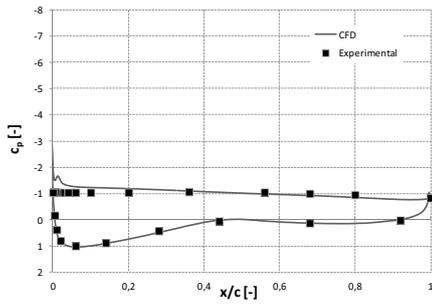
Figure 5: Pressure coefficients at $V_\infty = 13m/s$.



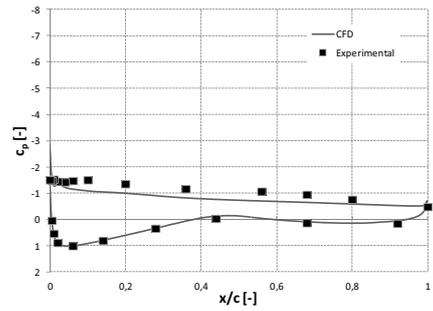
(a) Pressure tab distributions.



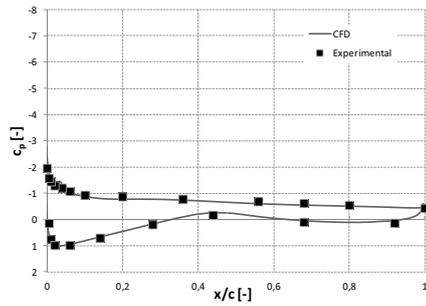
(b) $r/R = 0.30$.



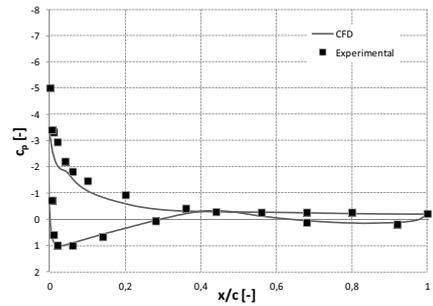
(c) $r/R = 0.47$.



(d) $r/R = 0.63$.

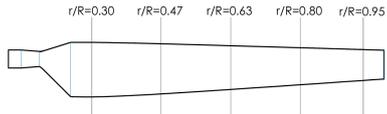


(e) $r/R = 0.80$.

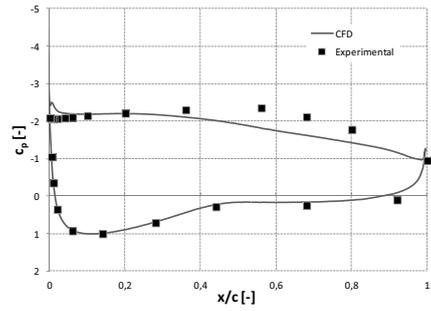


(f) $r/R = 0.95$.

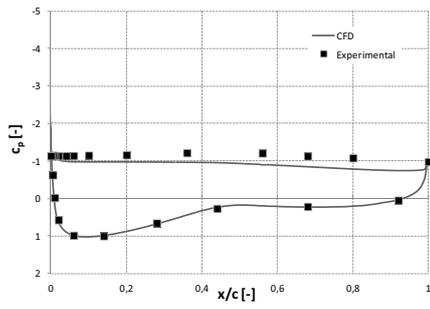
Figure 6: Pressure coefficients at $V_\infty = 15m/s$.



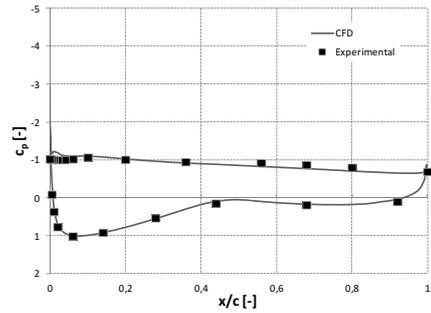
(a) Pressure tab distributions.



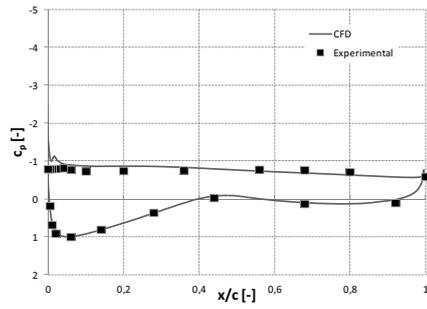
(b) $r/R = 0.30$.



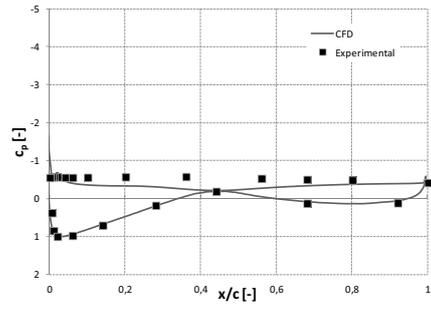
(c) $r/R = 0.47$.



(d) $r/R = 0.63$.

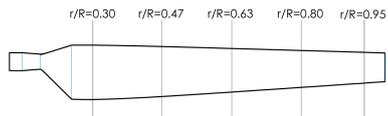


(e) $r/R = 0.80$.

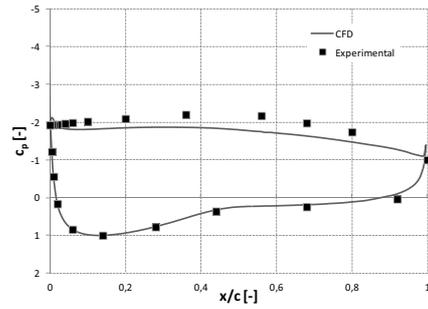


(f) $r/R = 0.95$.

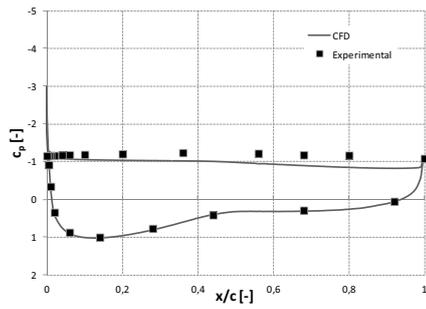
Figure 7: Pressure coefficients at $V_\infty = 20m/s$.



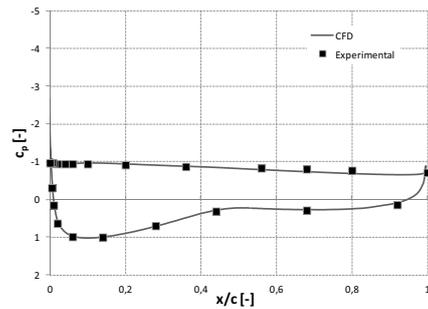
(a) Pressure tab distributions.



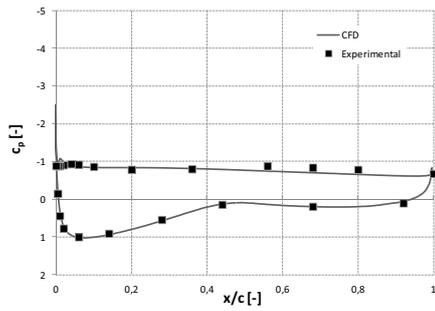
(b) $r/R = 0.30$.



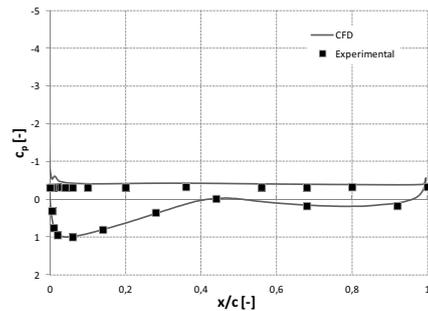
(c) $r/R = 0.47$.



(d) $r/R = 0.63$.



(e) $r/R = 0.80$.



(f) $r/R = 0.95$.

Figure 8: Pressure coefficients at $V_\infty = 25m/s$.

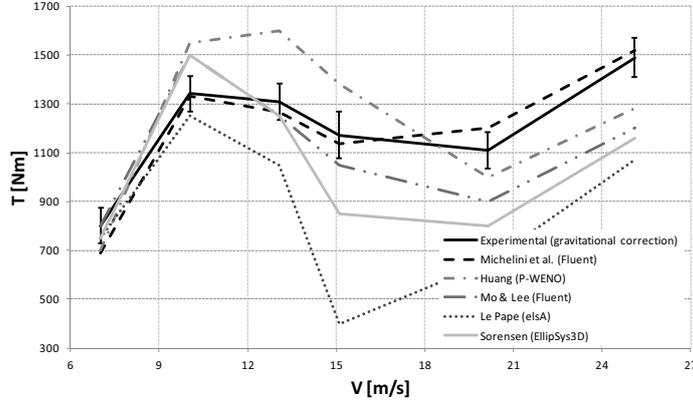


Figure 9: Comparison of measured and numerical shaft torque.

depending by tip speed ratio,

$$TSR = \frac{\omega R}{V_{\infty}} \quad (4)$$

are represented in fig.10 compared to measured data. The computed results are compatible with the experimental data except for the case at the low velocity, or great TSR , where the solution is underpredicted.

Root flap moments were measured with strain gauges, but they were also estimated using the pressure measurements as described by [2], for this reason there are two different values: measured root flap moment, obtained by the strain gauges and representing the structural torque due to blade inertia, pressure and viscous effects, while estimated root flap moments are obtained by integrated pressure and viscous forces over the blade surface. CFD simulations can predict only the aerodynamic effect so they had to be compared only with the estimated root flap moments. At low velocity the differences between computed and estimated results are less than 3% but at higher velocity the differences grew up to 15%.

3. Winglet

Winglets are non planar surfaces introduced in aircraft wings [7] to reduce induced drag and improve efficiency. Adding a winglet on the wing tip increases the wing wet surface and the viscous drag but the presence of a blended surface obstructs the flow from the lower wing surface to the upper surface, reducing wingtip vortex, downwash and induced drag, as described in [11]. Winglets are aerodynamical surfaces, developed with S809 airfoils,

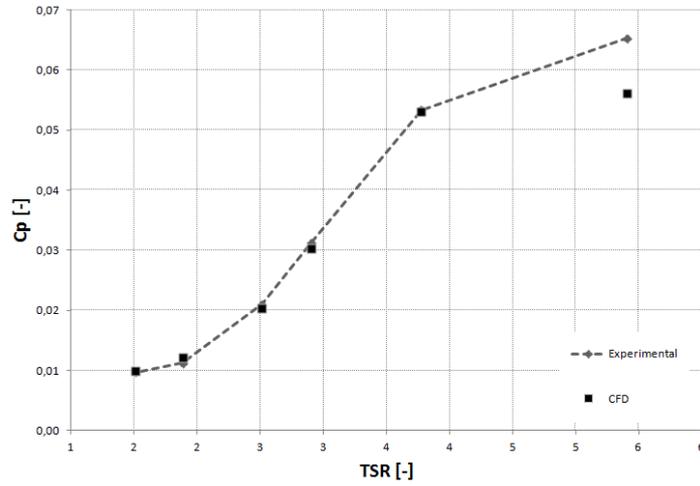


Figure 10: Comparison of measured and computed power coefficient.

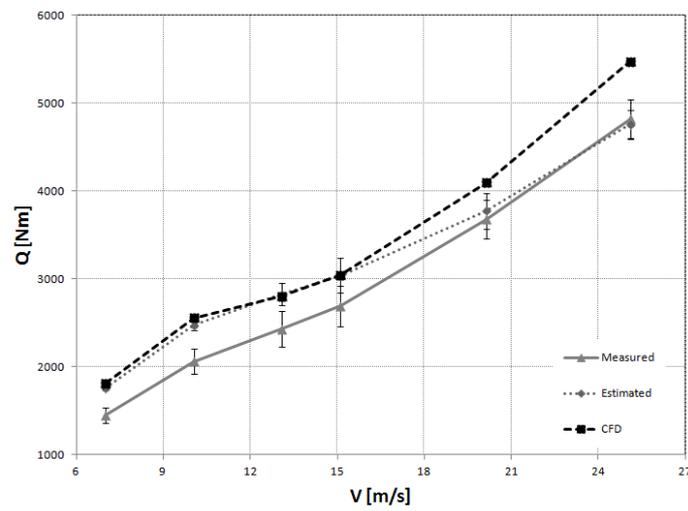


Figure 11: Comparison of numerical, estimated and measured root flap moments.

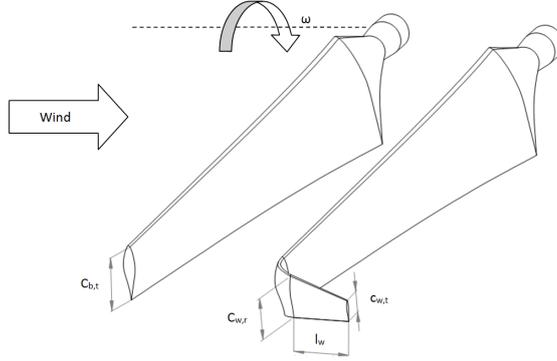


Figure 12: Winglet geometry parameters on downwind configuration.

so they generate a flow field that interferes with the wing pressure field with benefits on lift distribution.

On a wind turbine blade the velocity flow field is different from a wing because it is rotating around an axis and Coriolis and centrifugal forces play an important role on the flow, as described in [13].

To design winglet geometry, the chord, $c_{b,t}$, of the last blade airfoil was taken as reference. The last blade airfoil was rotated for 90° around a point positioned at $0.25 \cdot c_{b,t}$ over the trailing edge, in a direction normal to the chord on the tip plane, towards the suction side for the downwind winglets or towards the pressure side for the upwind winglets. Afterwards the winglet length was extruded in the normal direction, as visible in fig.12. All the winglet sections are scaled with the trailing edge aligned with the blade tip trailing edge and the winglet tip chord was set to half the winglet root chord, $c_{w,t} = 0.5 \cdot c_{w,r}$.

Winglet root chord varies from $c_{w,r} = 0.6 \cdot c_{b,t}$ to $c_{w,r} = 1.0 \cdot c_{b,t}$ with a step of $0.1 \cdot c_{b,t}$ while winglet length varies from $l_w = 0.25 \cdot c_{b,t}$ to $l_w = 1.25 \cdot c_{b,t}$ with a step of $0.25 \cdot c_{b,t}$. Overall 25 geometrical combinations are summarized in table 2. In this article only twelve geometrical configurations were studied for downwind winglet and six for the upwind configuration with wind parameters from table 1 from velocity $7m/s$ to $15m/s$.

The winglet effects on turbine performance are described as pressure distribution around the blade and as torque increment. The pressure fields are visualized on a new plane, positioned at the blade tip, at a height of $0.75 \cdot c_{b,t}$ with a height of $0.1 \cdot R$, as visible in fig.13.

In fig.14a can be observed the pressure fields around the blade tip in the baseline configuration while in fig.14b and fig.14c the blade has downwind and upwind K winglet configurations. Wind comes from right to left.

The winglet effect is clearly visible: in fig.14a, the wingtip vortex generated

Table 2: Winglet geometry configuration.

	$c_{w,r}$				
	$0.6 \cdot c_{b,t}$	$0.7 \cdot c_{b,t}$	$0.8 \cdot c_{b,t}$	$0.9 \cdot c_{b,t}$	$1.0 \cdot c_{b,t}$
$l_w = 0.25 \cdot c_{b,t}$	A	B	C	D	E
$l_w = 0.50 \cdot c_{b,t}$	F	G	H	I	J
$l_w = 0.75 \cdot c_{b,t}$	K	L	M	N	O
$l_w = 1.00 \cdot c_{b,t}$	P	Q	R	S	T
$l_w = 1.25 \cdot c_{b,t}$	U	V	W	X	Y

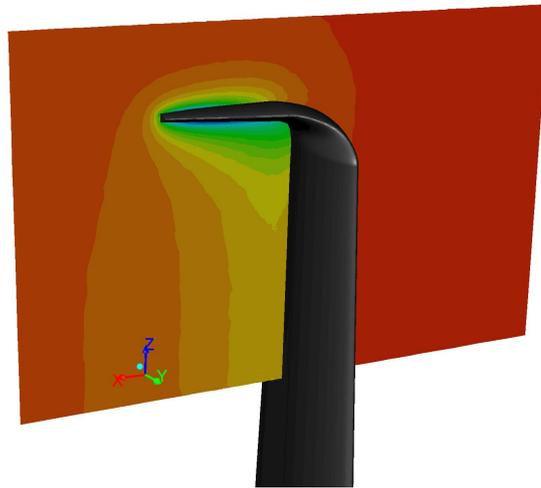


Figura 13: New plane added to visualized pressure fields.

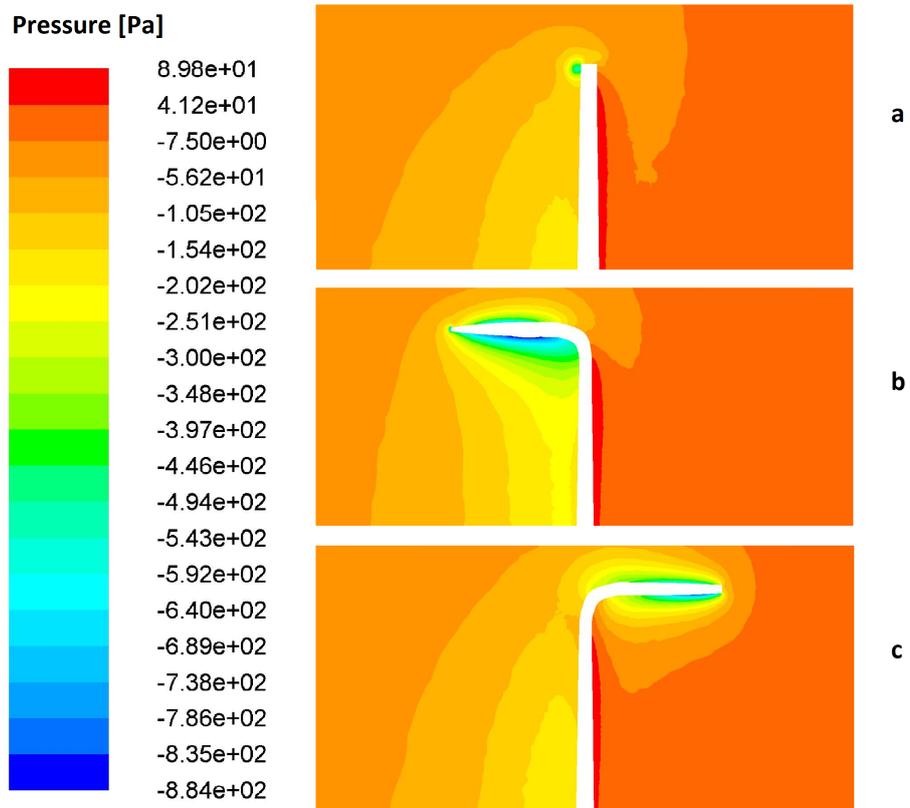


Figura 14: Pressure fields around blade tips.

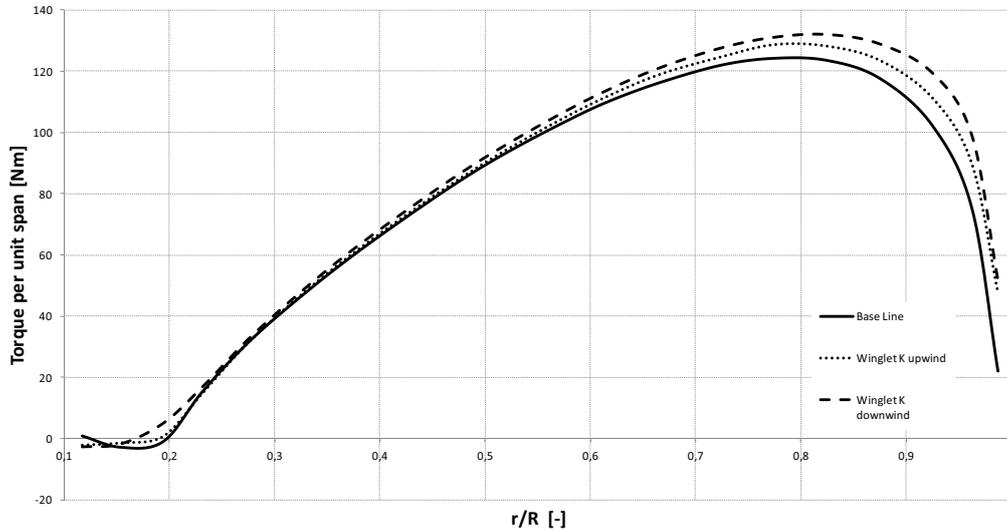


Figure 15: Comparison of torque per unit span distribution on various blade configurations.

a low pressure region, while in fig.14b the vortex is nearly absent. In the three cases pressure fields on pressure side are very similar because winglet interfere mostly with the suction side.

In fig.14b is visible the benefits of downwind winglet that improve suction side low pressure spreading tip vortex. Physical winglet presence acts like an endplate, reducing spanwise flow and vortex production. Incrementing pressure difference from pressure side and suction side corresponds to increment lifting force over the blade with an increase of total torque, as show in fig.15.

On the downwind configuration, the increment on winglet length is shown in fig.16. The pressure fields are very similar but the total torque on the blade are decreasing with the length increment, as visible in fig. 19. This is demonstrate on fig.17 where pressure and viscous contribution of winglet and junction surface on total torque are quantify. An increment in winglet length generates an increment of positive pressure-component torque and an increment in negative viscous-component torque on the winglet surfaces, while on the junction surfaces the pressure and viscous components remains constant because the junction surface is the same for all the winglet length.

Pressure fields are shown in figure 18 for three planes on the trailing edge of the blade and behind at $0.1 \cdot c_{b,t}$ and $0.2 \cdot c_{b,t}$ from leading edge, for baseline and F configurations. Wingtip vortex is clearly visible on the base line configuration at the tip of the blade and over the others planes. With

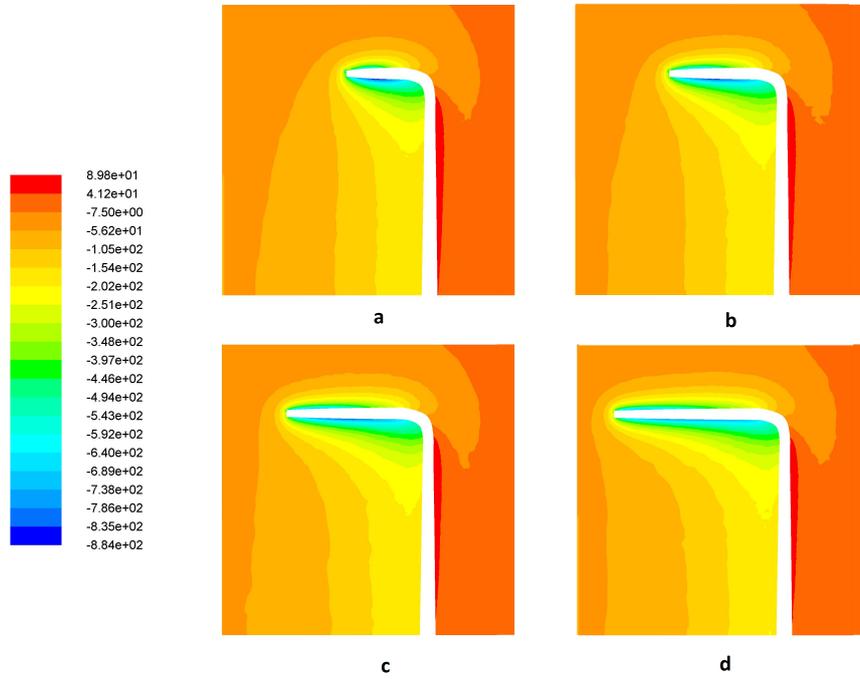


Figure 16: Pressure fields for different winglet length. Winglet configurations are F, K, P, U, respectively.

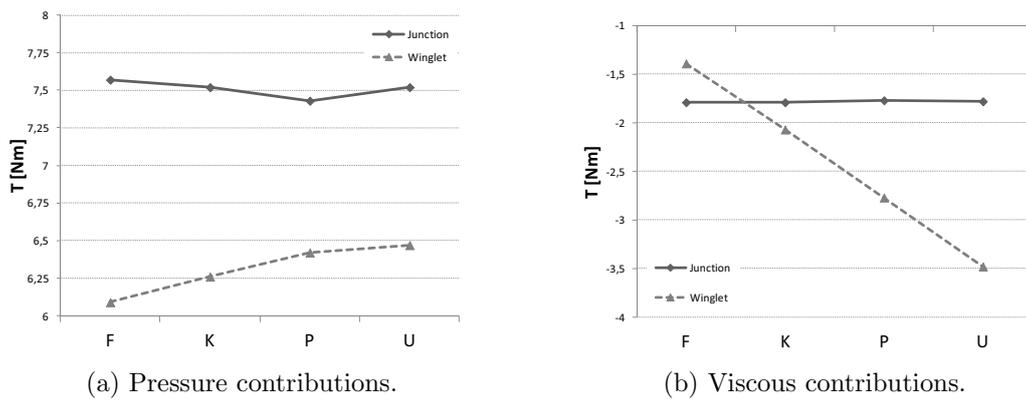


Figure 17: Torque generating on junction and winglet surfaces.

the winglet extension, the vortex moves to the winglet tip and reduces size and intensity demonstrating that winglet presence decrease induced drag. In the same figure velocity vectors are shown on the wintip regions.

During the design process of NREL Phase VI wind turbine, the blade geometry was optimized for maximum annual energy production [3] at the average wind speed of 7.2 m/s. With this wind condition the blade operates with the maximum efficiency so is interesting to analyze the effect of winglet presence refered to this optimum condition.

Figure 19 shows the increment of torque coefficients refered to the base NREL blade, at 7m/s wind speed. Torque coefficients are define as

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho R A V_\infty^2} \quad (5)$$

where $R = 5.030m$ for base blade and $R = 5.112m$ for winglet blade.

Increasing winglet root chord causes the reduction of induced drag but improve the wet area and the viscous drag. There is an optimum configuration for $c_{w,r} = 0.8 \cdot c_{b,t}$ where the benefits due to winglet presence outweigh the increment in drag.

Extending the winglet length tends to improve winglet surface with an increment of viscous drag, the torque increment is maximum for short winglet, say $l_w \leq 0.75 \cdot c_{b,t}$.

In figures 20 are compared some winglet configurations at various wind speed. There are generally an increment in measured torque at any wind speed.

Upwind winglet configurations determines a modest increment in absolute torque refered to base blade, but torque coefficients in figure 21 shows a negative increment because swept area is increased.

4. Conclusion

Blade aerodynamic is a key point on horizontal axis wind turbine performance. To increment power extracted from the wind, extending blade size is not the best option so the designer have to improve blade efficiency.

Results from this paper shows that adding a winglet on a wind turbine blade is possible to improve the power extracted from wind, changing downwash distribution and reducing tip vortex, without increment rotor size .

- Validation results show the capacity of CFD to predict correct fluidynamics phenomena. With wind speed from 6 to 25 m/s, the results are in good agreement with the experimental data.

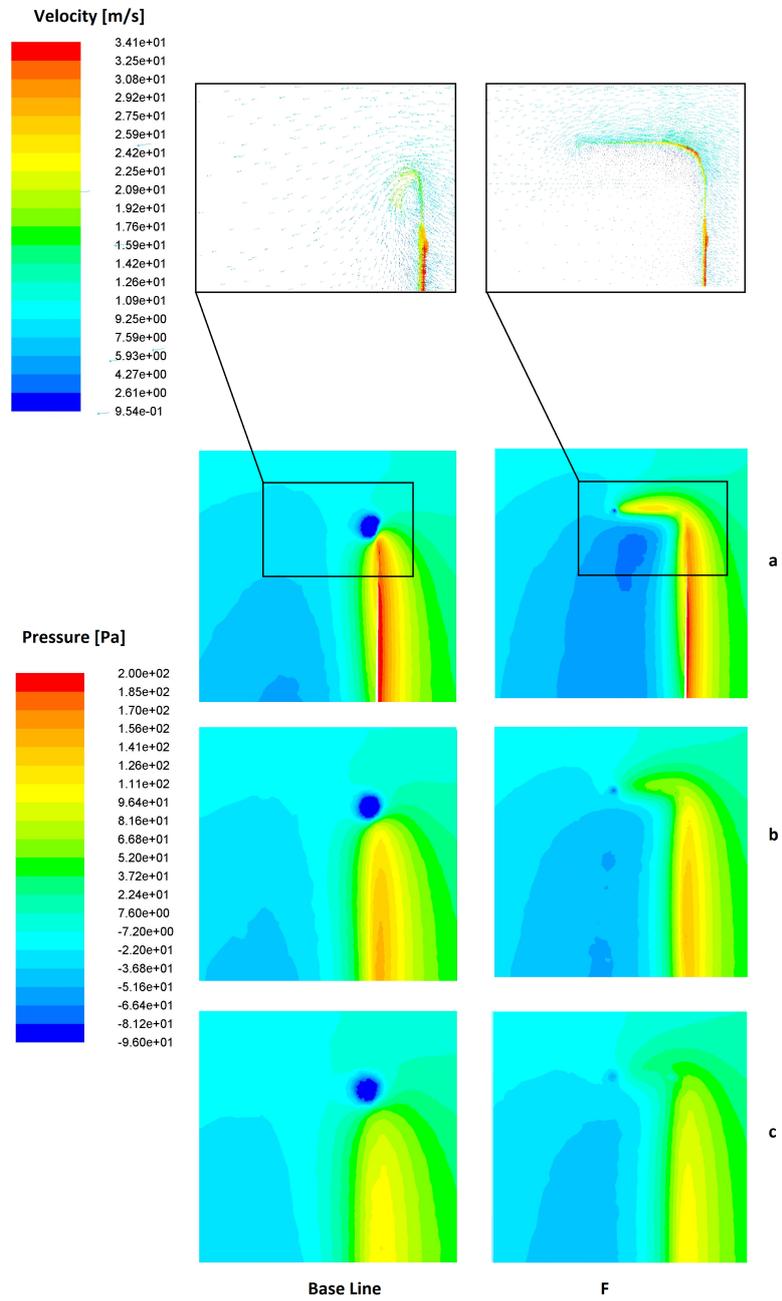


Figure 18: Comparison of vortex wake behind blade tip.

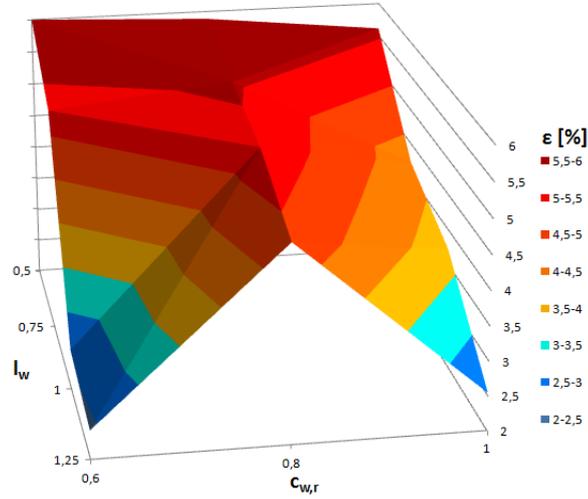
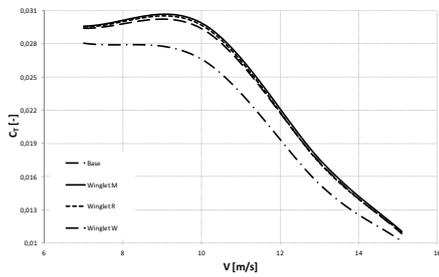
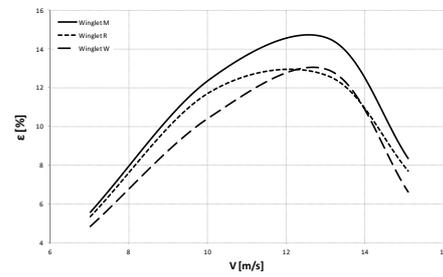


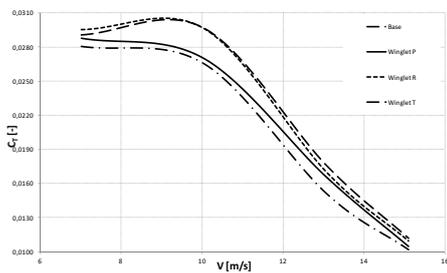
Figure 19: Comparison of torque coefficient increment.



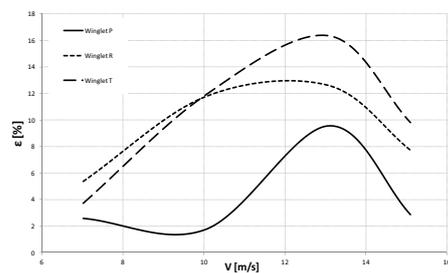
(a) Torque coefficients.



(b) Torque coefficients increments.



(c) Torque coefficients.



(d) Torque coefficients increments.

Figure 20: Comparison of torque coefficients for base NREL blade and some winglet configurations.

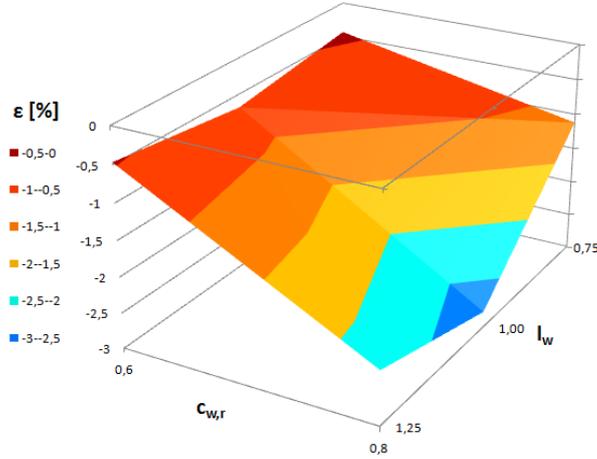


Figure 21: Increment in torque coefficient for upwind winglet configuration.

- It was observed that downwind winglet are more useful than upwind configuration. Total torque value are incremented by adding a winglet but only downwind configuration had a positive torque coefficient increment.
- Extend winglet length determine increment in viscous drag that reduce positive effect on induce drag. There is a critical length value that maximize reduction of induced drag and increment of viscous drag.
- The presence of winglet moves wingtip vortex from blade tip to winglet tip. The new vortex became weaker and smaller with less waste energy.
- The effect of modified winglet root chord has effects similar to length modification. A critical root chord value exist that balance positive and negative effects.

Blade tip noise probably can be modified by winglet geometry, but this effect has non been investigated in this paper.

Nomenclature

$A [m^2]$	Rotor swept area
$c [m]$	Airfoil chord
$c_{b,t} [m]$	Airfoil chord at blade tip
$c_{w,r} [m]$	Airfoil chord at winglet root

$c_{w,t}$ [m]	Airfoil chord at winglet tip
c_p [–]	Airfoil pressure coefficient
C_p [–]	Rotor power coefficient
l_w [–]	Winglet length
p [Pa]	Air pressure
p_∞ [Pa]	Indisturbed air pressure
P [W]	Power produced by the turbine
r [m]	Rotor radius
R [m]	Wind turbine maximum radius
T [Nm]	Blade total torque
TSR [–]	Tip speed ratio
V_∞ [m/s]	Wind speed
ρ [kg/m ³]	Air density
ω [rad/s]	Rotor angular velocity

Bibliography

- [1] EWEA European Wind Energy Association, *Wind in Power, 2011 European Statistics*, February 2012.
- [2] M.M. Hand, D.A. Simms, L.J. Fingersh, D.W. Jager, J.R. Cotrell, S. Schreck, S.M. Larwood, *Unsteady Aerodynamics Experiment Phase VI: Wind Tunnel Test Configuration and Available Data Campaigns*, NREL/TP-500-29955, December 2001.
- [3] P. Giguère and M.S. Selig, *Design of a Tapered and Twisted Blade for the NREL Combined Experiment Rotor*, NREL/SR-500-26173, April 1999.
- [4] Jang-Oh MO and Young-Ho LEE, *CFD Investigation on the aerodynamic characteristics of a small-sized wind turbine of NREL PHASE VI operating with a stall-regulated method*, Journal of Mechanical Science and Technology 26 (1) (2012) 81~92.
- [5] A. Le Pape and J. Lecanu, *3D Navier–Stokes computations of a stall-regulated wind turbine*, Wind energy Volume 7 (4), pages 309–324, October/December 2004.
- [6] N. N. Sørensen, J. A. Michelsen, and S. Schreck, *Navier-Stokes Predictions of the NREL Phase VI Rotor in the NASA Ames 80 ft 120 ft Wind Tunnel*, Wind Energy, 2002, 5:151-169.

- [7] Whitcomb RT. *A design approach and selected wind tunnel results at high subsonic speeds for wing-tip mounted winglets*, NASA TN D-8260 1976.
- [8] Shimizu, Y., Van Bussel, G. J. W., Matsumara, S., Bruining, A., Kikuyama, K., Hasegawa, Y, *Studies on Horizontal Axis Wind Turbines with Tip Attachments*, EWEC 90 Conference Proceedings, Madrid (Spain), September 10-14, 1990, pp. 279-283.
- [9] Imamura, H., Hasegawa, Y, Kikuyama, K. *Numerical Analysis of the Horizontal Axis Wind Turbine with Winglets*, JSME International Journal, Series B, Vol. 41, No. 1, 1998.
- [10] Jeppe Johansen and Niels N. Sørensen, *Aerodynamic investigation of Winglets on Wind Turbine Blades using CFD*, Risø-R-1543(EN) February 2006.
- [11] Mark D. Maughmer, *The Design of Winglets for High-Performance Sailplanes*, AIAA 2001-2406
- [12] Dan M. Somers, *Design and Experimental Results for the S809 Airfoil*, NREL/SR-440-6918 UC Category: 1213 DE97000206, January 1997.
- [13] Martin O. L. Hansen, *Aerodynamics of Wind Turbine*, Second Edition, Earthscan, 2012.