



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

**Università degli Studi di Padova**

---

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

Corso di Laurea in Ingegneria dell'Energia

TESI DI LAUREA



**CARATTERIZZAZIONE DI UNA TURBINA  
DARRIEUS CON IL PROFILO S-1046**

Laureando:

**Riccardo Tosi**

Matricola 1047234

Relatore:

**Prof. Giorgio Pavesi**

---

Anno Accademico 2014-2015



*"Per correr miglior acque alza le vele  
omai la navicella del mio ingegno,  
che lascia dietro a sé mar sì crudele"*

*Dante Alighieri, Divina Commedia,  
Purgatorio, Canto I, 1-3*



## **Sommario**

La seguente tesi presenta un'analisi della turbina eolica Darrieus con l'innovativo profilo S-1046. Sono state effettuate delle analisi attraverso l'utilizzo del programma CFX a un diverso numero di giri della turbina e in condizione di campo di velocità costante ed omogeneo.

Inizialmente una breve introduzione illustrerà l'attuale situazione energetica nel mondo, l'importanza della produzione di energia da risorse rinnovabili ed in particolare la produzione di potenza sfruttando il vento.

Successivamente si analizzeranno i risultati ottenuti dalle analisi, cercando di individuare la condizione ideale di funzionamento della macchina e di confrontare la potenza prodotta con quella ottenuta utilizzando profili alari più tradizionali.

Nel capitolo successivo si esaminerà il funzionamento vero e proprio della macchina, focalizzandosi su alcuni fondamentali parametri che ne caratterizzano il comportamento.

Il fine di questa trattazione è dunque duplice: il primo è quello di confrontare l'efficienza di tale profilo alare con quella di altri profili più tradizionali, il secondo è quello di evidenziare la variazione di alcuni importanti parametri che caratterizzano il funzionamento della macchina.



## INDICE

---

0	ELENCO DEI SIMBOLI	5
1	INTRODUZIONE	7
1.1	Situazione energetica globale	7
1.2	Energia eolica	7
1.2.1	Potenza eolica globale	8
1.3	Turbine eoliche	8
1.3.1	Generatori ad asse orizzontale e verticale	8
1.3.2	Portanza e resistenza aerodinamica	9
1.3.3	Turbina Darrieus	9
2	CONFRONTO CON PROFILI TRADIZIONALI	11
2.1	Analisi $c_p$ e $c_m$	11
2.1.1	Analisi a 100rpm	12
2.1.2	Analisi a 375rpm	13
2.1.3	Analisi a 700rpm	14
3	ANALISI DEL FUNZIONAMENTO DELLA TURBINA	17
3.1	Analisi dei parametri	17
3.1.1	Analisi a 100rpm	17
3.1.2	Analisi a 375rpm	21
3.1.3	Analisi a 700rpm	24
4	CONCLUSIONE	27





## ELENCO DELLE FIGURE

---

Figura 1	Richiesta totale nel mondo di energia primaria. Fonte: [4]	7
Figura 2	Whitelee Wind Farm, parco eolico situato in Scozia. Fonte: [6]	8
Figura 3	Capacità globale eolica installata dal 1997 al 2014. Fonte: [7]	8
Figura 4	Valori di $c_p$ e $c_m$ .	11
Figura 5	Diagramma polare del $c_p$ di una singola pala della turbina a 100rpm.	12
Figura 6	Diagramma polare del $c_p$ delle tre pale della turbina a 100rpm.	13
Figura 7	Diagrammi polari del $c_p$ a 200rpm.	13
Figura 8	Diagramma polare del $c_p$ di una singola pala della turbina a 375rpm.	14
Figura 9	Diagramma polare del $c_p$ delle tre pale della turbina a 375rpm.	14
Figura 10	Diagrammi polari del $c_p$ a 700rpm.	14
Figura 11	Diagrammi polari del $c_p$ a 600rpm.	15
Figura 12	Diverse rappresentazioni della turbina.	17
Figura 13	Linee di flusso delle particelle del vento a 100rpm.	18
Figura 14	Vettori velocità in due delle tre pale a 100rpm.	18
Figura 15	Pressioni in due delle tre pale a 100rpm.	19
Figura 16	Triangolo delle velocità.	20
Figura 17	Pressione totale del vento a 100rpm.	20
Figura 18	Linee di flusso delle particelle del vento a 375rpm.	21
Figura 19	Vettori velocità in due delle tre pale a 375rpm.	22
Figura 20	Pressioni in due delle tre pale a 375rpm.	22
Figura 21	Pressione totale del vento a 375rpm.	23
Figura 22	Linee di flusso delle particelle del vento a 700rpm.	24
Figura 23	Vettori velocità in due delle tre pale a 700rpm.	25
Figura 24	Pressioni in due delle tre pale a 700rpm.	25
Figura 25	Pressione totale del vento a 700rpm.	26



## ELENCO DEI SIMBOLI

---

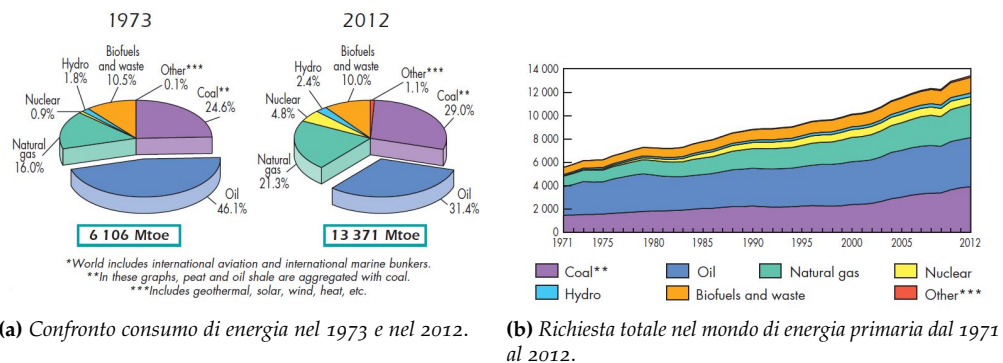
$c_p$	Coefficiente di potenza	[-]
$c_m$	Coefficiente di momento	[-]
$c_L$	Coefficiente di portanza	[-]
$c_D$	Coefficiente di resistenza	[-]
$R$	Raggio esterno del rotore	[m]
$u$	Velocità del flusso indisturbato	[m/s]
$w$	Velocità angolare del rotore	[rad/s]
$v_R$	Velocità relativa del profilo	[m/s]
$\rho$	Densità del vento	[Kg/m <sup>3</sup> ]
$\lambda$	Rapporto di velocità periferica= $wR/u$	[-]
$\dot{m}$	Portata di massa	[Kg/s]
$A$	Sezione del rotore	[m <sup>2</sup> ]
$P_{eolica}$	Potenza del vento= $\frac{1}{2}\rho Au^3$	[W]
$M$	Momento del vento= $\frac{1}{2}\rho ARu^2$	[Nm]
$L$	Portanza aerodinamica= $c_L \frac{1}{2}\rho Av_R^2$	[N]
$D$	Resistenza aerodinamica= $c_D \frac{1}{2}\rho Av_R^2$	[N]
$v, u$	In grassetto corsivo sono indicate le quantità vettoriali, in corsivo quelle scalari	



## INTRODUZIONE

## 1.1 SITUAZIONE ENERGETICA GLOBALE

L'energia è uno dei più importanti e cruciali aspetti per quanto riguarda lo sviluppo socio-economico, si hanno infatti nel mondo una sempre maggiore richiesta di energia ma anche una crescente sensibilità ambientale.



**Figura 1:** Richiesta totale nel mondo di energia primaria.

Fonte: [4]

Come si evince dai grafici in figura 1, negli ultimi quarant'anni è più che raddoppiata la richiesta di energia primaria a livello globale. Tale fabbisogno energetico è soddisfatto prevalentemente dall'uso di combustibili fossili, i quali coprono circa l'82% del consumo energetico, mentre il rimanente è suddiviso tra nucleare e fonti rinnovabili. Tra queste ultime prevalgono ad oggi l'idroelettrico e le biomasse, mentre altre come l'energia solare ed il vento hanno una diffusione inferiore.

Le fonti fossili sono delle fonti energetiche primarie non rinnovabili, e dunque per definizione sono destinate ad esaurirsi. Le risorse rinnovabili invece sono inesauribili, si rinnovano nel tempo e risultano essere disponibili per la sopravvivenza umana pressoché indefinitamente. Un altro vantaggio delle risorse rinnovabili è che l'uso di queste non produce gas serra, non andando quindi ad incentivare il riscaldamento globale ed il cambiamento del clima.

Nel corso degli anni sono stati fatti importanti passi in avanti verso un "carbon free world", cercando di ridurre l'inquinamento atmosferico dovuto alle attività umane ed incentivando l'uso delle risorse rinnovabili.

## 1.2 ENERGIA EOLICA

Una delle principali fonti di energia primaria rinnovabili è certamente il vento il quale viene sfruttato da opportune turbomacchine motrici che convertono la sua energia cinetica in energia meccanica e successivamente tramite un generatore si ottiene energia elettrica.

La potenza eolica del vento è pari alla sua potenza cinetica, e vale

$$P_{\text{eolica}} = \frac{1}{2} \rho A u^3 \quad [\text{W}] \quad , \quad (1)$$

dove  $\rho$  è la densità dell'aria,  $A$  è la sezione del rotore e  $u$  è la velocità del vento.

È possibile dimostrare che esiste un limite, detto limite di Betz, di energia eolica convertibile in energia meccanica, e tale limite è pari al 59.3%.

Esistono vari tipi di turbine eoliche, alcune di esse sono ad asse orizzontale, altre ad asse verticale, alcune di esse sfruttano la portanza, altre la resistenza aerodinamica.

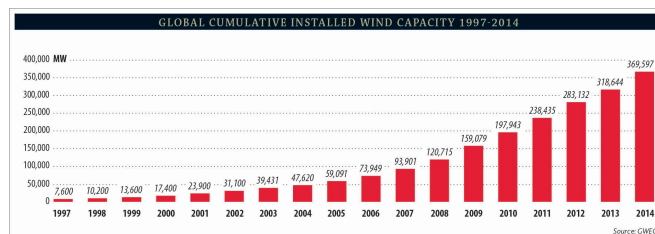
**Figura 2:** Whitelee Wind Farm, parco eolico situato in Scozia.  
Fonte: [6]



I mulini a vento ed i mulini ad acqua sono stati i primi esempi di macchine che convertivano l'energia cinetica di un fluido naturale, in particolare l'aria e l'acqua, in energia meccanica, e le attuali turbine eoliche sono eredi dirette dei primi mulini a vento.

### 1.2.1 Potenza eolica globale

Il totale della potenza eolica installata nel mondo è in netta crescita, segno evidente di quanto tale tipo di produzione di energia sia in netta ascesa.



**Figura 3:** Capacità globale eolica installata dal 1997 al 2014.  
Fonte: [7]

Come si osserva dalla figura 3, la capacità globale eolica è infatti cresciuta di anno in anno in maniera molto consistente. Per esempio, osservando gli ultimi 8 anni, tale capacità si è quintuplicata, mentre nel 2014 per la prima volta si è raggiunto il record di oltre 50GW di potenza eolica installata.

Nel 2014 i paesi con le maggiori capacità eoliche erano rispettivamente la Cina, gli USA e la Germania. L'Italia si collocava al nono posto con uno share sul valore totale pari allo 0,23%.

La penetrazione dell'energia eolica nel mercato globale per la produzione di energia elettrica è, ad oggi, pari al 3%; tuttavia alcuni paesi hanno già raggiunto livelli molto elevati. In Danimarca ad esempio il 39,1% dell'energia elettrica è stata prodotta tramite aerogeneratori nel 2014.

## 1.3 TURBINE EOLICHE

### 1.3.1 Generatori ad asse orizzontale e verticale

Le turbine possono essere ad asse orizzontale o ad asse verticale.

Le prime hanno il vantaggio di avere un rendimento migliore, inoltre le pale sono poste ad un'altezza maggiore e dunque sono soggette ad un vento più intenso e meno turbolento. Il principale svantaggio di questo tipo di turbine è il fatto che per avere una buona efficienza esse devono essere poste frontevento.

Per quanto riguarda quelle ad asse verticale, invece, i vantaggi sono che il funzionamento è garantito indipendentemente dalla direzione del vento e si ha un buon funzionamento della macchina sia a basse che ad alte velocità del vento. Gli svantaggi di tali turbine invece sono quelli di avere un minore rendimento e di generare elevati sforzi meccanici a causa dell'elevato peso della struttura e delle pale.

### 1.3.2 Portanza e resistenza aerodinamica

Gli aerogeneratori, come detto precedentemente, lavorano sfruttando la forza di portanza, la forza di resistenza o entrambe contemporaneamente.

La resistenza è una forza che agisce parallelamente alla direzione del flusso, mentre la portanza perpendicolarmente.

Le turbine che sfruttano la sola resistenza aerodinamica hanno un'efficienza minore rispetto alle altre, e la massima potenza meccanica ottenibile da quella eolica è pari circa al 20%, ovvero un terzo del limite di Betz.

$$L = c_L \frac{1}{2} \rho A v_R^2 \quad [\text{N}] \quad (2)$$

è la forza di portanza,

$$D = c_D \frac{1}{2} \rho A v_R^2 \quad [\text{N}] \quad (3)$$

quella di resistenza, dove  $v_R$  è la velocità relativa, data dalla differenza tra la velocità del vento indisturbato  $u$  e quella della macchina.

Queste forze sono funzione dei coefficienti di portanza e di resistenza, i quali dipendono dalla forma del profilo alare e dall'angolo tra la direzione della velocità relativa e la corda della pala.

### 1.3.3 Turbina Darrieus

La turbina, o rotore, Darrieus deriva il suo nome dall'ingegnere Georges Jean Darrieus, il quale la brevettò nel 1931, ed è una turbina eolica ad asse verticale.

Tale macchina lavora sfruttando la forza di portanza generata dal vento sui profili alari, la quale produce una coppia motrice positiva sull'albero. Essa inoltre presenta un buon comportamento, come tutte le turbine ad asse verticale, indipendentemente dalla direzione del vento. Essa risulta allora essere indicata per applicazioni in piccola scala e domestiche, è inoltre facilmente integrabile negli edifici in quanto non soffre dei possibili cambi di direzione del vento, comuni nelle aree urbane.

Questo rotore inoltre ha un'efficienza molto elevata in condizione di vento costante.

#### *Turbina Darrieus con il profilo S-1046*

La turbina considerata in questo lavoro di tesi è di piccole dimensioni e dunque produce una potenza limitata, nell'ordine delle decine o centinaia di KW, presenta tre pale ed ha un raggio di 375mm.

Il vento con cui la macchina interagisce è costante nel tempo ed omogeneo nello spazio, ha un'intensità pari a 6m/s e si trova alla pressione atmosferica, pari a 101325Pa.

Le analisi effettuate riguardano diversi aspetti come il coefficiente di potenza  $c_p$  e di momento  $c_m$  e le principali cause di perdita che ne riducono il valore, il valore delle pressioni in prossimità delle pale, della pressione totale nel dominio del sistema e l'andamento delle particelle di fluido.

Le misurazioni sono state effettuate a diversi numeri di giri, partendo da  $n=100\text{rpm}$  ed arrivando a  $n=700\text{rpm}$  attraverso il programma CFX.





## CONFRONTO CON PROFILI TRADIZIONALI

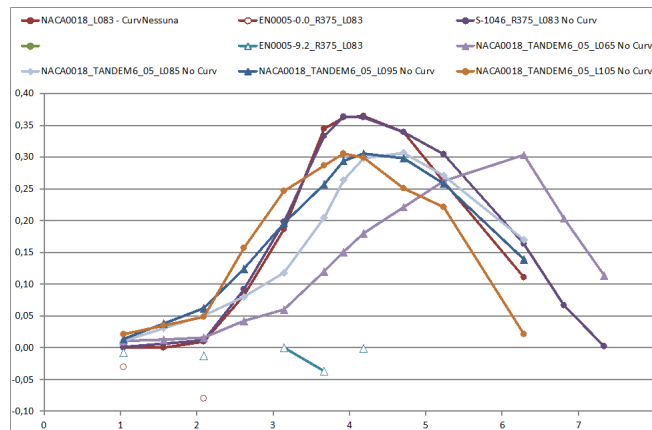
### 2.1 ANALISI $c_p$ E $c_m$

Il confronto del profilo S-1046 con altri profili è stato effettuato confrontando il valore del coefficiente di potenza

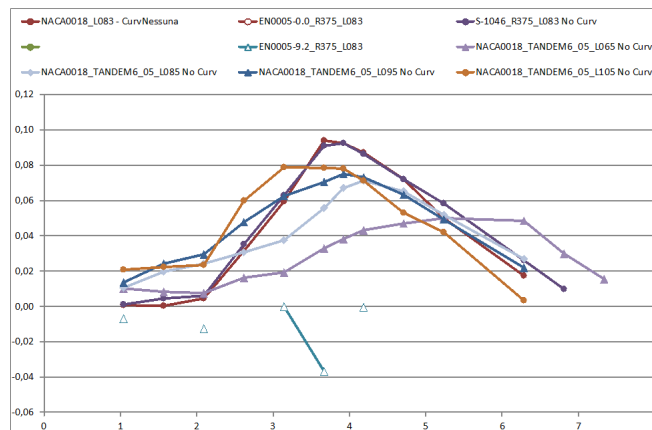
$$c_p = \frac{P_{\text{meccanica}}}{P_{\text{eolica}}} \quad [-] \quad (4)$$

e del coefficiente di momento

$$c_m = \frac{c_p}{\lambda} \quad [-] \quad (5)$$



(a) Valore del coefficiente di potenza.



(b) Valore del coefficiente di momento.

Figura 4: Valori di  $c_p$  e  $c_m$ .

$$\lambda = \frac{wR}{u} \quad [-] \quad (6)$$

è il rapporto di velocità periferica, dove  $w$  è la velocità angolare del rotore,  $R$  è il raggio esterno del rotore e  $u$  è la velocità del vento indisturbato.

Il coefficiente di momento può essere anche espresso dal rapporto tra la coppia motrice ottenuta ed il momento del vento, pari a

$$M = \frac{1}{2} \rho A R u^2 \quad [\text{Nm}] \quad . \quad (7)$$

Dai grafici in figura 4 si osserva che la macchina presenta un funzionamento ottimale con un numero di giri  $n=375\text{rpm}$ , raggiungendo un valore di  $c_p=0,3632739$ , mentre con valori di  $n$  molto elevati o molto ridotti tale valore è prossimo allo zero, generando dunque una potenza meccanica circa nulla.

Per il coefficiente di momento si nota che presenta anch'esso un massimo per  $n=375\text{rpm}$ , con  $c_m=0,09250693$ , mentre assume valori molto ridotti in condizioni analoghe all'analisi del  $c_p$ , per le quali la coppia motrice media assume valori inferiori.

Si può anche affermare che la turbina Darrieus con profilo S-1046 assume valori massimi molto vicini a quelli raggiunti utilizzando un profilo tradizionale, come il profilo NACA0018\_Lo83, e valori superiori a molti altri profili. Inoltre tale turbina garantisce un funzionamento accettabile anche per velocità del vento più basse.

### 2.1.1 Analisi a 100rpm

100rpm è il numero minimo di giri al minuto utilizzato nell'analisi della turbina, e si sono ottenuti i valori di 0,001221503 per il  $c_p$  e di 0,00116645 per il  $c_m$ . Tali valori risultano essere molto piccoli e permettono di avere una conversione di potenza da eolica a meccanica molto limitata e una coppia motrice ridotta.

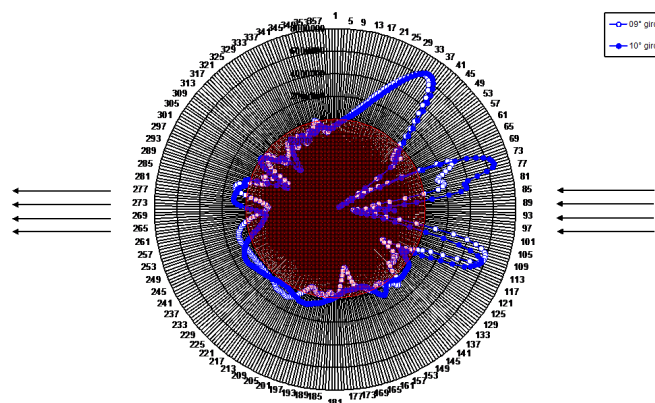


Figura 5: Diagramma polare del  $c_p$  di una singola pala della turbina a 100rpm.

In questa situazione si hanno infatti, come si può osservare dal diagramma polare in figura 5, certi angoli in cui la singola pala ha un  $c_p$  buono, altri angoli per cui invece esso è circa nullo o addirittura negativo, situazione limite che prevede una spesa di energia affinché la pala si possa muovere.

Come inoltre si può ben intuire da questo diagramma la pala produce la massima potenza meccanica quando si trova frontevento, mentre quando essa è sottovento la potenza prodotta è molto limitata e talvolta minore di zero, comportando quindi un assorbimento di energia anziché una produzione.

Analogamente si può tracciare il diagramma polare del coefficiente di potenza riferito questa volta alle tre pale della turbina, ottenendo il diagramma riportato in figura 6. Come si può osservare anche in questo caso il valore di  $c_p$  è oscillante tra valori positivi e negativi e complessivamente il valore di tale coefficiente è di poco superiore allo zero, comportando una limitata produzione di potenza.

Per completezza si riportano i diagrammi polari del coefficiente di potenza anche a 200rpm in figura 7, e come si può osservare essi non sono eccessivamente diversi da quelli ottenuti a 100rpm.

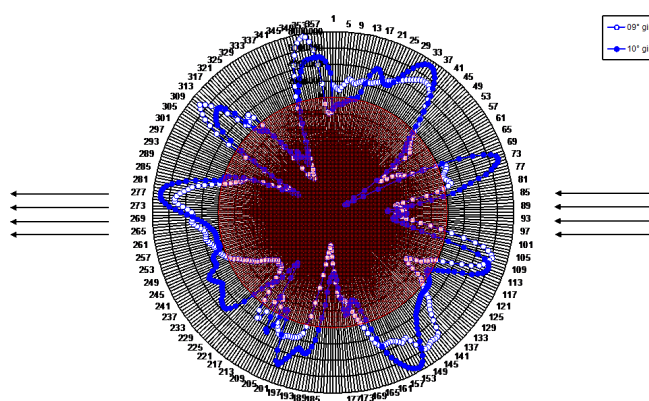
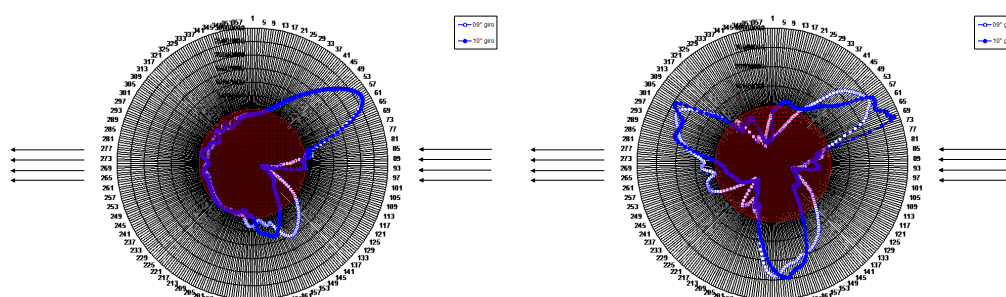


Figura 6: Diagramma polare del  $c_p$  delle tre pale della turbina a 100rpm.



(a) Diagramma polare del  $c_p$  della singola pala della turbina a 200rpm. (b) Diagramma polare del  $c_p$  delle tre pale della turbina a 200rpm.

Figura 7: Diagrammi polari del  $c_p$  a 200rpm.

Anche a tale numero di giri infatti il  $c_p$  della singola pala assume un valore massimo quando questa è circa frontevento, mentre il suo valore diminuisce notevolmente fino ad avere valori negativi nelle altre posizioni.

Per quanto riguarda il  $c_p$  riferito alle tre pale si può notare che anche in questo caso esso assume valori oscillanti tra il positivo ed il negativo. È comunque possibile individuare all'incirca tre zone in cui presenta un massimo, e tali posizioni sono circa coincidenti a quelle in cui una singola pala si trova frontevento, e dunque con il massimo  $c_p$ . Tuttavia anche a tale numero di giri la conversione di potenza risulta essere limitata dal basso valore del coefficiente di potenza.

### 2.1.2 Analisi a 375rpm

A 375rpm la turbina funziona alla massima efficienza, infatti sia il  $c_p$  che il  $c_m$  raggiungono il loro massimo valore a tale numero di giri.

Anche in questa condizione sono stati tracciati i diagrammi polari.

Nel grafico della singola pala in figura 8 si osserva che il coefficiente di potenza è massimo quando la pala risulta essere frontevento, ma esso risulta essere quasi sempre maggiore di zero in ogni punto del diagramma polare.

Per quanto riguarda il diagramma polare riferito alle tre pale, riportato in figura 9, si nota che la conversione di potenza eolica in potenza meccanica è massimizzata in tre posizioni, ovvero quando ciascuna delle tre pale si trova frontevento e dunque con il massimo  $c_p$ .

Inoltre tale coefficiente risulta essere all'incirca sempre maggiore di zero in ogni punto del diagramma polare, facendo sì che complessivamente il suo valore sia elevato e permetta un'elevata produzione di potenza meccanica.

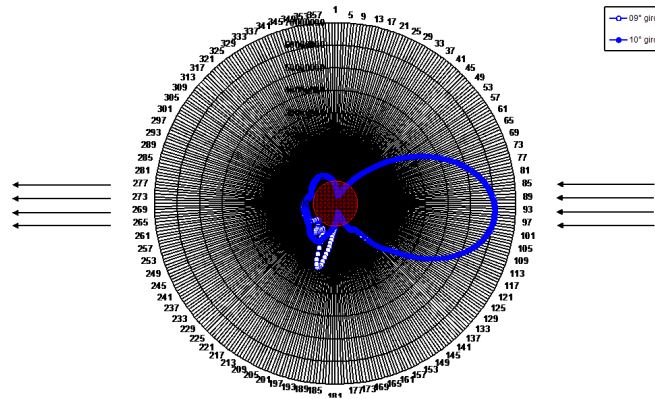


Figura 8: Diagramma polare del  $c_p$  di una singola pala della turbina a 375rpm.

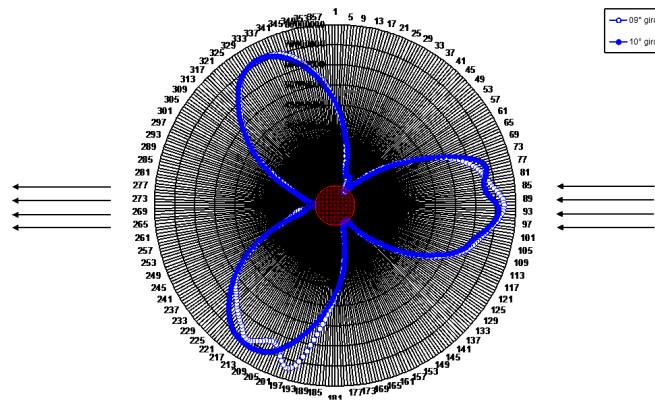
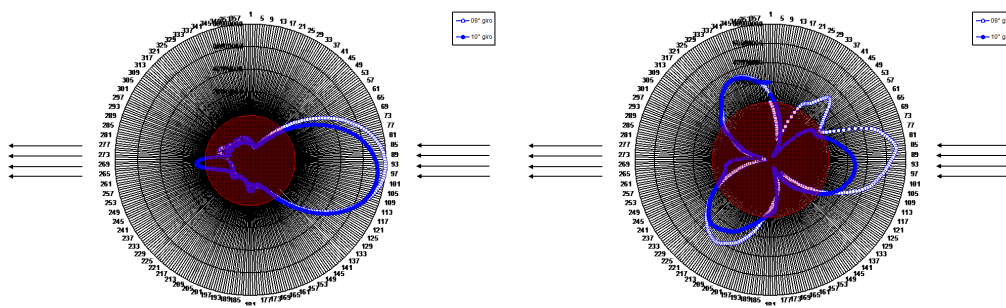


Figura 9: Diagramma polare del  $c_p$  delle tre pale della turbina a 375rpm.

### 2.1.3 Analisi a 700rpm

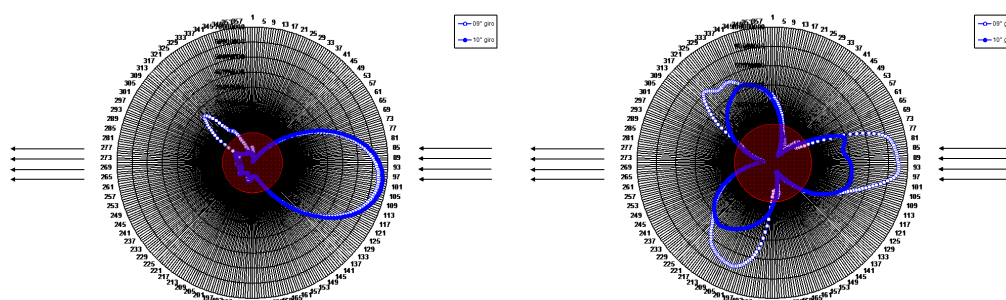
La massima velocità fatta raggiungere dalla turbina in queste analisi è di 700rpm. A tale numero di giri i valori dei due coefficienti sono molto ridotti, infatti risulta  $c_p=0,002301812$  e  $c_m=0,00031401$ , e la conseguenza è che la potenza meccanica e la coppia motrice ottenute risultano essere molto limitate.



(a) Diagramma polare del  $c_p$  della singola pala della turbina a 700rpm. (b) Diagramma polare del  $c_p$  delle tre pale della turbina a 700rpm.

Figura 10: Diagrammi polari del  $c_p$  a 700rpm.

Sono stati tracciati anche a tale numero di giri i diagrammi polari, riportati in figura 10. Si osserva che il coefficiente di potenza relativo alla singola pala assume il valore massimo frontevento, mentre nelle altre posizioni esso è negativo o prossimo al valore nullo.



(a) Diagramma polare del  $c_p$  della singola pala della turbina a 600rpm. (b) Diagramma polare del  $c_p$  delle tre pale della turbina a 600rpm.

**Figura 11:** Diagrammi polari del  $c_p$  a 600rpm.

Per quanto riguarda il  $c_p$  relativo alle tre pale esso risulta avere sempre tre punti di massimo in corrispondenza dei quali una delle tre pale si trova frontevento. Tuttavia il coefficiente oscilla tra valori positivi e negativi e complessivamente assume un valore di poco superiore allo zero e prossimo a quello che si era ottenuto a 100rpm.

Si è dunque notato che generalmente il valore del coefficiente di potenza non è costante ma dipende dalla posizione in cui si trovano le pale. Complessivamente però esso risulta avere un andamento prevedibile, infatti il  $c_p$  relativo alla singola pala risulta avere un massimo quando questa si trova frontevento, mentre si riduce notevolmente quando essa si trova nelle altre posizioni. Il  $c_p$  relativo alle tre pale invece generalmente presenta tre punti di massimo, in corrispondenza di ciascuno dei quali una delle tre pale si trova frontevento e dunque con il massimo  $c_p$ .

Tale analisi viene confermata anche a numeri di giri al minuto della turbina diversi da quelli considerati, infatti ad esempio a 600rpm si ottengono i diagrammi polari riportati in figura 11 che rispettano le precedenti affermazioni.



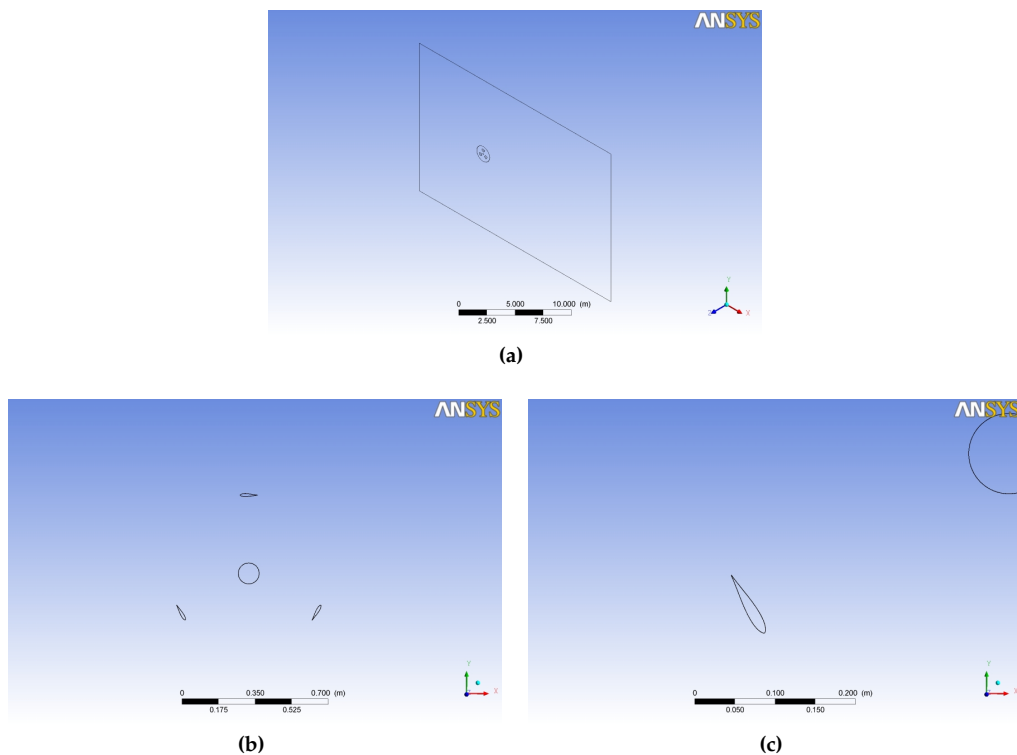
## ANALISI DEL FUNZIONAMENTO DELLA TURBINA

In questo capitolo si tratterà il funzionamento vero e proprio della macchina, focalizzandosi sui parametri che ne caratterizzano il comportamento.

In alcuni casi il sistema di riferimento sarà l'intera zona limitrofa alla turbina, mentre in altri casi sarà la singola pala.

Dalle immagini in figura 12 si nota che le pale risultano essere sfasate di 120 gradi tra di loro e che una di esse, quella che si trova nella posizione superiore, è posizionata frontevento e dunque presenta un funzionamento alla massima efficienza ad ogni numero di giri.

Nel caso in cui si analizzi il funzionamento in prossimità delle pale ci si focalizzerà solamente sulle due pale inferiori, le quali presentano un comportamento non ottimale, e dunque permettono di evidenziare alcune delle maggiori cause di perdita di energia con precisione.



**Figura 12:** Diverse rappresentazioni della turbina.

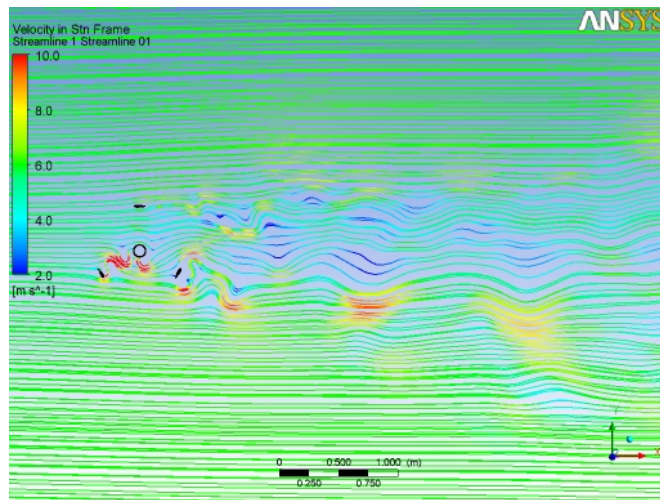
Come nel capitolo precedente le analisi saranno trattate singolarmente al variare del numero di giri.

### 3.1 ANALISI DEI PARAMETRI

#### 3.1.1 *Analisi a 100rpm*

Come visto precedentemente a tale numero di giri la turbina ha un  $c_p$  ed un  $c_m$  molto piccoli e dunque la potenza meccanica e la coppia motrice ottenute risultano essere molto ridotte: complessivamente la macchina lavora in condizioni di pessima efficienza.

È possibile individuare alcune delle principali cause della scarsa efficienza di funzionamento anche tramite l'osservazione e l'analisi di opportuni parametri.



**Figura 13:** Linee di flusso delle particelle del vento a 100rpm.

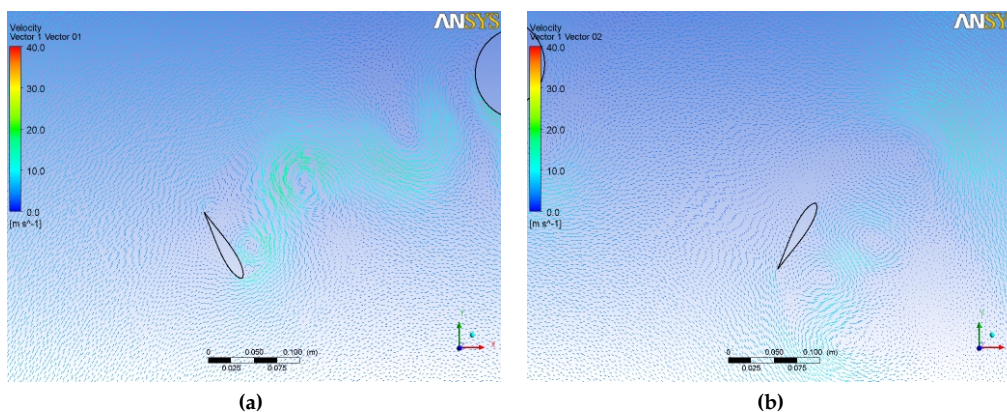
### *Linee di flusso*

Come si può osservare dalla figura 13, la quale rappresenta il percorso delle particelle di vento, il campo di velocità risulta essere notevolmente influenzato dalla presenza della macchina. Il vento infatti subisce notevoli variazioni di velocità, sia a livello di modulo che di direzione.

Il fluido risulta avere in alcune zone a valle della turbina una velocità superiore ai 6m/s mentre in altre una velocità inferiore.<sup>1</sup> Ciò comporta dunque la formazione di vortici, i quali possono essere individuati nelle immagini, ai quali è associata un'elevata dissipazione di energia.

Si può inoltre osservare che è necessario che le particelle di vento percorrano un'elevata distanza prima che ritornino ad essere in equilibrio con il resto del campo di moto, sia a livello di intensità che di direzione del vento, ed il fluido ritorni ad avere l'energia che aveva a monte della turbina.

### *Vettori velocità*



**Figura 14:** Vettori velocità in due delle tre pale a 100rpm.

Nelle immagini in figura 14 è riportato l'andamento dei vettori velocità in prossimità delle pale.

La posizione ottimale della pala, ovvero quello che permette di avere il massimo  $c_p$ , risulta essere quella in cui il fluido entra nella turbina parallelamente alla pala, minimizzando le perdite localizzate.

<sup>1</sup> La velocità indisturbata del vento è 6m/s.



Nelle due immagini riportate invece le pale non si trovano in tale posizione, l'ingresso del fluido non è parallelo alla pala e dunque si ha la presenza di perdite localizzate alle quali segue una dissipazione di energia. Le pale dunque non lavorano alla massima efficienza ma provocano la formazione di vortici e di flusso non ottimale.

Infatti, come visto nel capitolo precedente, il coefficiente di potenza della singola pala è massimo quando questa risulta essere frontevento, mentre cala sensibilmente nelle altre posizioni. Nelle posizioni riportate il  $c_p$  della singola pala risulta essere prossimo allo zero e anche negativo, e dunque è necessario spendere energia per muovere la pala in tali posizioni.

A valle delle due pale è possibile osservare sia che il campo di moto non risulta essere omogeneo, sia la presenza dei vortici, i quali sono causati dal fatto che il fluido impatta in maniera non ottimale con la pala. Questi riducono notevolmente l'energia del fluido ma senza produrre lavoro, essi la dissipano sotto forma di calore.

### Pressioni

La turbina Darrieus è una macchina che funziona sfruttando la forza di portanza, la quale è perpendicolare alla direzione della velocità relativa. Tale forza è direttamente proporzionale alla differenza di pressione che si ha lungo il profilo alare, ortogonalmente all'asse della pala.

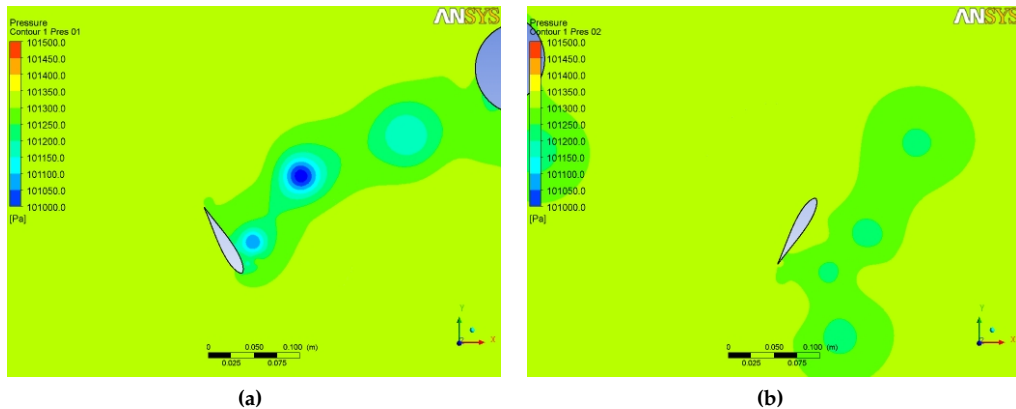


Figura 15: Pressioni in due delle tre pale a 100rpm.

Come si può osservare dalla figura 15, le differenze di pressione che si hanno ortogonalmente alle pale risultano essere molto ridotte, nell'ordine dei 50-100Pa, e dunque si hanno delle piccole forze di portanza a cui consegue la generazione di una limitata coppia motrice.

Ciò giustifica dunque le affermazioni fatte precedentemente di produzione di una potenza meccanica e di una coppia motrice molto ridotte.

Inoltre osservando le immagini si può fare un'altra importante considerazione.

Si osserva infatti che a valle delle pale si ha un andamento disomogeneo delle pressioni, le quali raggiungono anche valori molto piccoli. In tali zone il fluido possiede una velocità molto elevata, e dunque si ha la presenza di vortici, i quali causano perdita di energia e dunque un funzionamento non efficiente.

Come detto in precedenza inoltre l'impatto del fluido con la pala non avviene parallelamente ad essa e dunque si ha la presenza di perdite localizzate, che sono causa di ulteriori dissipazioni di energia.

### Pressione totale

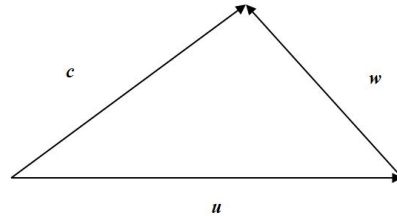
La pressione totale è la somma dell'energia statica, cinetica e di posizione del fluido ed è pari a

$$p^0 = p + \rho \frac{c^2}{2} + \rho g z \quad [\text{Pa}] \quad , \quad (8)$$

e altro non è che l'equazione di Bernoulli, la quale valuta l'energia totale specifica, espressa in Pa.

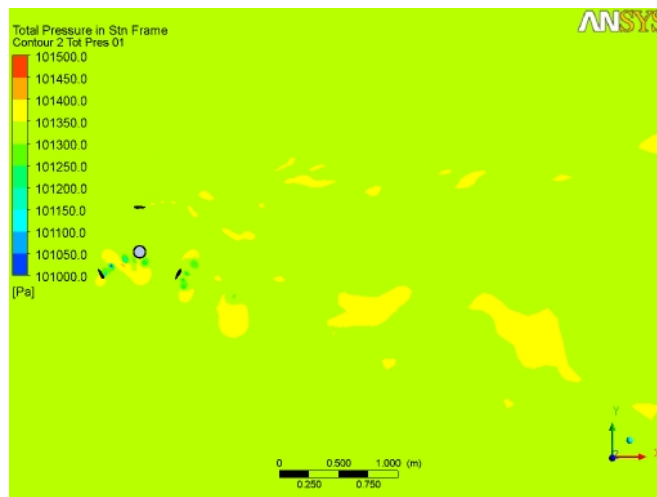
$c$  è la velocità assoluta del fluido ed è data dalla somma vettoriale della velocità di trascinamento  $u = \omega r$  e della velocità relativa  $w$ , quindi

$$c = u + w \quad . \quad (9)$$



**Figura 16:** Triangolo delle velocità.

Per via grafica il vettore  $c$  è definito dal triangolo delle velocità osservabile in figura 16, i cui tre lati sono i tre vettori  $c$ ,  $w$  e  $u$ .



**Figura 17:** Pressione totale del vento a 100rpm.

La figura 17 rappresenta la pressione totale che il fluido possiede.

Si può osservare che essa non è costante ma varia a causa dello scambio di energia che avviene tra il vento e la turbina.

In seguito all'interazione con le singole pale si nota che si hanno comportamenti diversi: a valle di quella superiore, la quale si trova in posizione di massima efficienza, si ha una minima variazione dell'energia totale, che comunque diminuisce, mentre a valle delle altre pale, le quali non sono in condizioni di massima efficienza, si osserva che l'energia totale del fluido è notevolmente disomogenea, in alcune zone essa cresce ed in altre decresce.

Le cause di ciò sono sia lo scambio di energia che la presenza delle perdite, localizzate e continue, che dei vortici.

Complessivamente inoltre si constata che, come detto in precedenza, il flusso di aria ritorna ad avere la stessa pressione totale che aveva a monte della turbina solamente ad una distanza elevata da essa.

In aggiunta si osserva che il principale contributo alla pressione totale a monte della turbina è dato dall'energia statica, in quanto  $p^0$  assume un valore di circa 101350Pa, prossimo alla pressione atmosferica dell'aria.

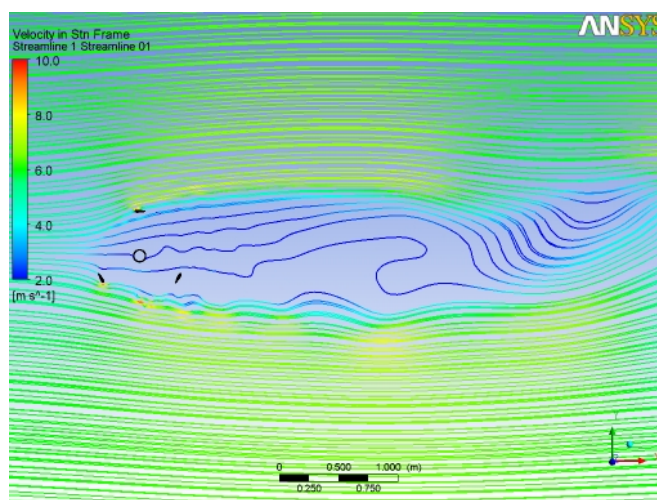
Si può dunque dire che a tale numero di giri la turbina, oltre a lavorare con i  $c_p$  e  $c_m$  molto bassi, disturba notevolmente a livello energetico la zona a lei limitrofa.

### 3.1.2 Analisi a 375rpm

La turbina a 375rpm presenta un funzionamento ottimale, essa infatti ha  $c_p$  e  $c_m$  massimi e dunque la potenza meccanica e la coppia motrice ottenute risultano essere massime.

#### Linee di flusso

Tramite l'osservazione dalla figura 18, la quale rappresenta il percorso delle particelle di vento, si constata che anche in questo caso il campo di velocità risulta essere notevolmente influenzato dalla presenza della macchina. Il vento infatti subisce variazioni di velocità, sia a livello di modulo che di direzione.



**Figura 18:** Linee di flusso delle particelle del vento a 375rpm.

Tuttavia si nota che a valle della turbina il campo di moto risulta essere molto più ordinato di quello che si era ottenuto a 100rpm.

A valle della turbina inoltre la velocità dell'aria risulta essere sempre minore di 6m/s ed in nessuna zona raggiunge velocità superiori, a differenza di ciò che si era ottenuto a 100rpm.

Anche in questo caso è necessario che il fluido percorra una discreta distanza, dopo aver interagito con la macchina, prima che ritorni ad avere la stessa energia che aveva prima dell'interazione. Tale distanza è comunque inferiore a quella del caso di funzionamento a bassa efficienza a 100rpm.

#### Vettori velocità

Nelle immagini in figura 19 è riportato l'andamento dei vettori velocità in prossimità alle pale.

Anche in questo caso, come detto precedentemente, la pala che si trova in posizione ottimale è quella superiore.

Inoltre, nonostante le altre due pale non siano frontevento, il loro  $c_p$  assume lo stesso un valore positivo e dunque producono potenza meccanica, a differenza del caso precedente dove la produzione era nulla o negativa.

In più, a tale numero di giri, si riducono le perdite localizzate, dovute all'impatto del fluido con la pala, rispetto al caso precedente, a valle delle pale il campo di moto risulta essere abbastanza omogeneo e non si ha la presenza di vortici.

Si può anche osservare che a ridosso del profilo alare si ha una zona dove il fluido raggiunge una velocità notevolmente elevata rispetto al resto del campo di moto. Conseguentemente dunque, poiché il fluido conserva la propria rotolpia, in tale zona la sua pressione sarà molto piccola.

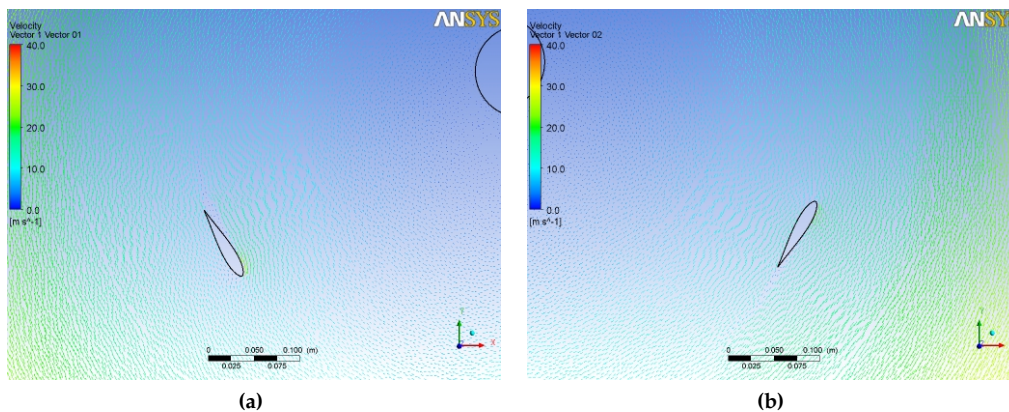


Figura 19: Vettori velocità in due delle tre pale a 375rpm.

La rotalpia è l'energia del sistema rotante ed è pari a

$$H_w^0 = \frac{p}{\rho} + \frac{w^2}{2} - \frac{u^2}{2} \quad [J/Kg] \quad , \quad (10)$$

dove  $w$  è il vettore velocità relativa mentre  $u$  è il vettore velocità di trascinamento.

Il fluido mantiene tale energia costante sia nella direzione del moto che ortogonalmente ad esso, le singole grandezze termodinamiche dunque possono assumere localmente valori differenti ma mantengono costante la rotalpia.

È possibile prevedere dunque che nelle zone dove si hanno le maggiori velocità la pressione risulti essere quella minima.

Allora poiché a monte e a valle del profilo alare la velocità assume, in modulo, valori notevolmente diversi, presumibilmente anche le pressioni avranno un andamento analogo e dunque si avrà un'elevata forza di portanza, la quale è direttamente proporzionale alla differenza di pressione.

### Pressioni

Come detto anche nell'analisi a 100rpm, è importante conoscere l'andamento della pressione lungo il profilo alare in modo tale da poter determinare la forza di portanza che genera la coppia motrice.

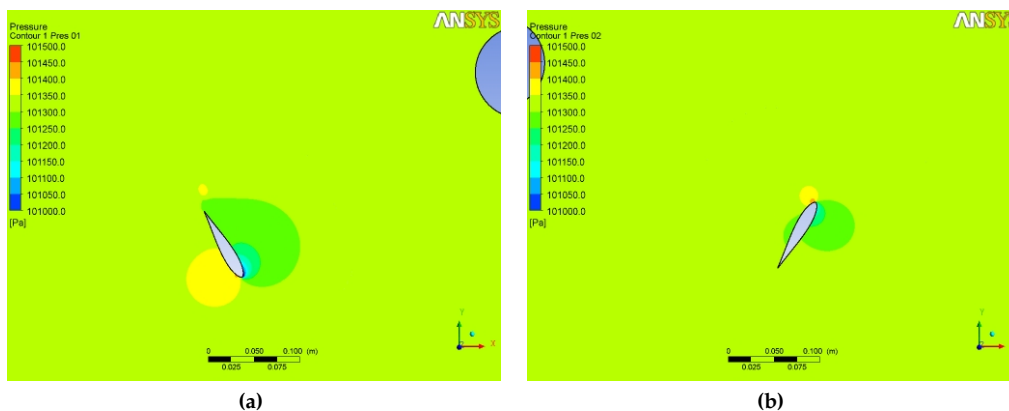


Figura 20: Pressioni in due delle tre pale a 375rpm.

Osservando la figura 20 si nota che si hanno delle differenze di pressione molto elevate ortogonalmente al profilo alare. Tale differenza di pressione raggiunge valori massimi di circa

400Pa, e dunque si ha la presenza di una forza di portanza che produce un'elevata coppia motrice.

Inoltre, poiché il fluido conserva la propria rotolpia, le zone dove esso ha la maggiore energia statica coincidono con quelle dove l'energia cinetica è minima, e viceversa. Confrontando le figure 19 e 20 si nota come tale affermazione venga confermata.

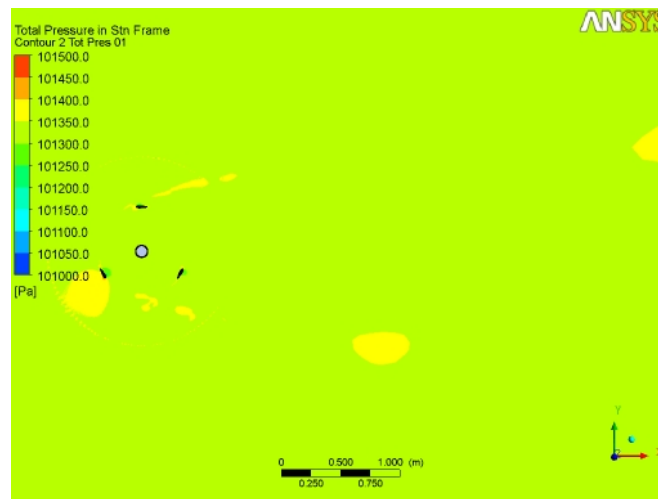
Si constata anche che a valle della pala il fluido aumenta in modo graduale la propria pressione, riducendo dunque la propria velocità, e non vi sono zone di depressione che indicano la presenza di vortici e dunque di dissipazione di energia; ciò è sinonimo di un funzionamento ottimale che effettivamente avviene a tale numero di giri.

#### *Pressione totale*

L'andamento della pressione totale

$$p^0 = p + \rho \frac{c^2}{2} + \rho g z \quad [\text{Pa}]$$

dell'aria è riportato in figura 21.



**Figura 21:** Pressione totale del vento a 375rpm.

Osservando l'immagine si può notare che anche in questo caso essa non è costante a causa dell'interazione tra il vento e la turbina, tuttavia la pressione totale ha un andamento molto più omogeneo ed ordinato di quello che si era ottenuto a 100rpm.

A monte e a valle della macchina infatti  $p^0$  assume sostanzialmente sempre lo stesso valore, con alcune zone in cui invece cresce o decresce.

Se ci si focalizza sulle tre pale si nota che procedendo da monte a valle di ciascuna di esse la pressione totale diminuisce, e dunque tutte e tre estraggono lavoro dal fluido che riduce il proprio contenuto energetico, a meno comunque della dissipazione di energia dovuta alle perdite localizzate e continue.

Ciò conferma quello che era stato detto: il  $c_p$  della pala infatti in queste tre posizioni è maggiore di zero.

Analogamente al caso precedente inoltre si constata che il flusso di aria deve percorrere una certa distanza, dopo aver interagito con la macchina, affinché ritorni ad avere la stessa energia che aveva a monte della turbina, nonostante comunque il campo di moto non sia eccessivamente disturbato. Tale distanza tuttavia è molto inferiore a quella che è necessario percorrere in caso di funzionamento a bassa efficienza, come è possibile osservare confrontando le figure 17 e 21.

Si può dunque dire che nel funzionamento ottimale la macchina, oltre ad avere il massimo  $c_p$  e  $c_m$ , disturba notevolmente meno la zona a lei limitrofa rispetto al caso di funzionamento non efficiente.

### 3.1.3 Analisi a 700rpm

La turbina a 700rpm presenta un pessimo funzionamento, i valori del  $c_p$  e del  $c_m$  sono infatti minimi e dunque si hanno una ridotta produzione di potenza meccanica ed una piccola coppia motrice.

È possibile osservare le principali cause della scarsa efficienza tramite l'analisi del comportamento del rotore attraverso i parametri considerati anche nei casi precedenti.

#### Linee di flusso

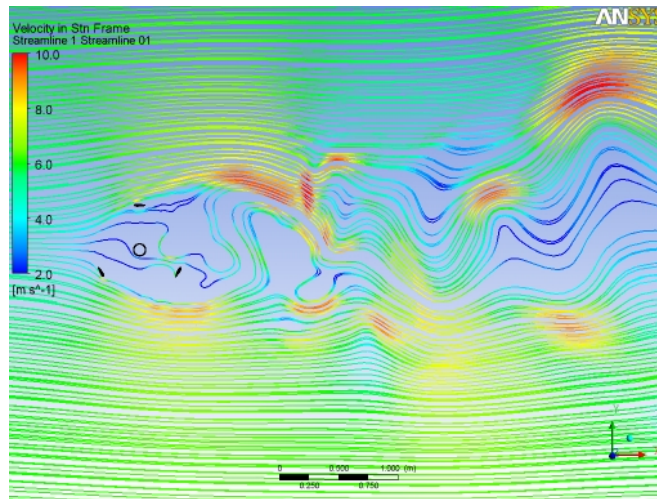


Figura 22: Linee di flusso delle particelle del vento a 700rpm.

Come si può osservare dalla figura 22, la quale rappresenta le linee di flusso delle particelle di vento, il campo di moto risulta essere notevolmente disturbato dalla presenza della turbina; a valle della macchina infatti questo è notevolmente disomogeneo pure a distanze elevate da essa.

Anche in questo caso si nota che il vento subisce notevoli variazioni di velocità, sia in modulo che in direzione. In alcune zone infatti il fluido possiede una velocità inferiore ai 6m/s, mentre in altre superiore; la sua direzione inoltre varia notevolmente, in particolare in prossimità della macchina.

In analogia al caso a 100rpm si constata che è necessario che il fluido percorra un'elevata distanza, superiore a quella che le particelle percorrono nel caso di funzionamento ottimale a 375rpm, prima che il campo di moto e l'energia del vento assumano lo stesso valore che avevano a monte del rotore.

#### Vettori velocità

Come detto nel capitolo precedente, a tale numero di giri la singola pala presenta un funzionamento efficiente quando si trova frontevento, mentre il  $c_p$  risulta essere anche minore di zero nelle altre posizioni.

Nelle immagini riportate in figura 23 sono rappresentati i vettori velocità in prossimità di due delle tre pale della turbina, in particolare quelle che non presentano un funzionamento ottimale. In tali posizioni le due pale infatti hanno un  $c_p$  prossimo allo zero, se non negativo, e dunque la macchina eroga una potenza meccanica minore di zero, ovvero assorbe energia.

Dall'osservazione delle immagini si può osservare che la differenza di velocità, ortogonalmente alla pala, risulta essere molto piccola in entrambe le posizioni, e dunque è possibile presumere che anche la differenza di pressione sia piccola.

L'ingresso del fluido nella pala, tuttavia, è circa parallelo all'asse della stessa e dunque le perdite localizzate sono piccole. Inoltre si può notare che non si ha la presenza di vortici,

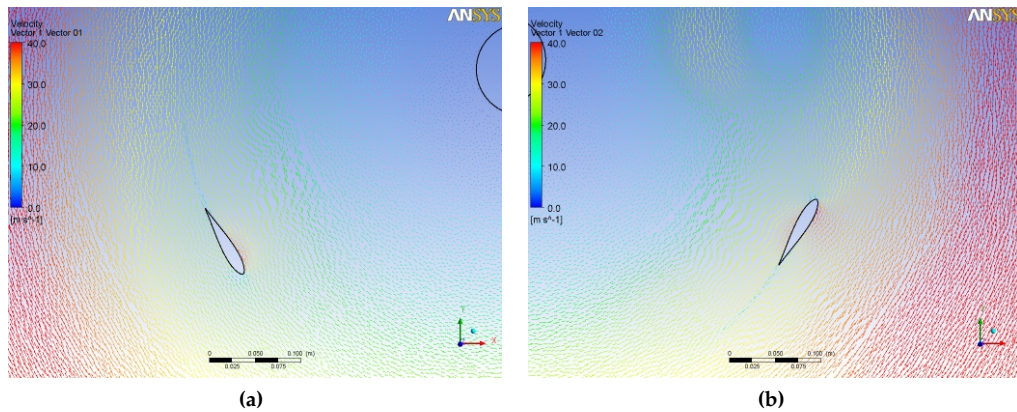


Figura 23: Vettori velocità in due delle tre pale a 700rpm.

anche se comunque dall'analisi delle linee di flusso il moto delle particelle di vento a valle delle singole pale non è ottimale.

#### Pressioni

Dalla precedente analisi dei vettori velocità in prossimità delle pale si è constatato che ortogonalmente ad esse la differenza di velocità risulta essere molto ridotta.

Conseguentemente dunque, poiché la rotalia

$$H_w^0 = \frac{p}{\rho} + \frac{w^2}{2} - \frac{u^2}{2} \quad [J/Kg]$$

si conserva sia nella direzione del moto che ortogonalmente ad esso, anche la differenza di pressione sarà minima.

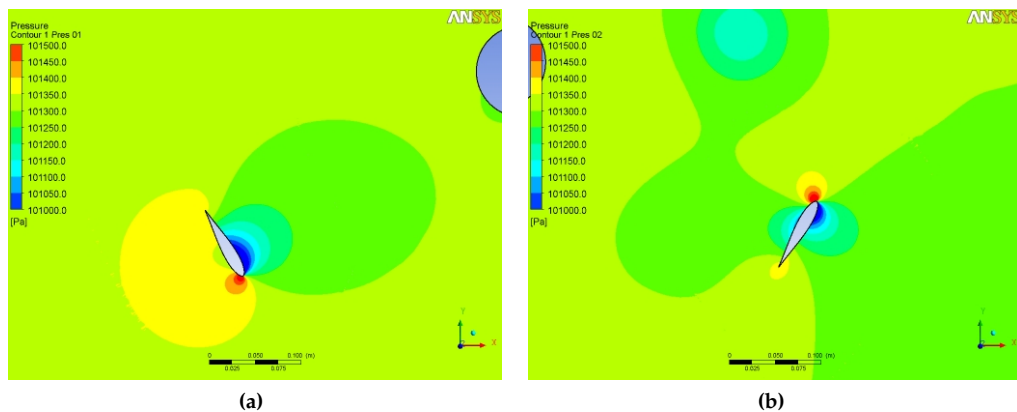


Figura 24: Pressioni in due delle tre pale a 700rpm.

Nelle immagini riportate in figura 24 è riportato l'andamento della pressione in prossimità delle singole pale, e si può osservare come la precedente affermazione sia corretta.

Infatti si nota che ortogonalmente all'asse della singola pala la differenza di pressione è molto piccola, nell'ordine dei 100-200Pa. Ciò comporta la produzione di una piccola forza radiale e dunque di una coppia motrice e una potenza meccanica molto limitate, con la conseguenza che il coefficiente di potenza ed il coefficiente di momento assumono valori molto piccoli.

Si nota anche che la zona di ingresso del fluido nella pala, ovvero quella dove si raggiungono le pressioni più elevate, riduce notevolmente le perdite localizzate, come precedentemente detto, e dunque si ha una piccola dissipazione di energia.

Non si ha inoltre a valle delle pale la presenza di vortici, in quanto l'andamento delle pressioni risulta essere omogeneo.

Dunque a 700rpm non si hanno elevate dissipazioni di energia, ma comunque il  $c_p$  risulta essere molto piccolo. La principale causa della scarsa efficienza della macchina a tale numero di giri è la minima differenza di velocità e dunque di pressione del fluido ortogonalmente all'asse della pala.

#### Pressione totale

La pressione totale

$$p^0 = p + \rho \frac{c^2}{2} + \rho gz \quad [\text{Pa}]$$

è, come detto precedentemente, la somma dell'energia statica, cinetica e potenziale del fluido, espresse in Pa.

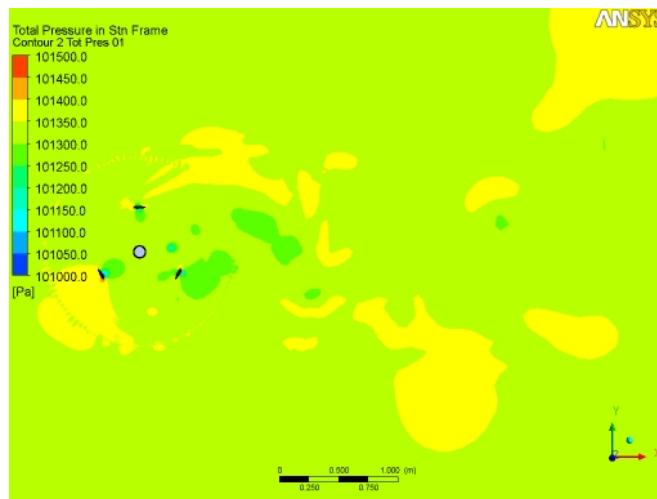


Figura 25: Pressione totale del vento a 700rpm.

L'andamento della pressione totale dell'aria a 700rpm è riportato in figura 25.

Come si può osservare anche in questo caso  $p^0$  non è costante a causa dello scambio di energia tra vento e macchina e ha un andamento meno ordinato ed omogeneo di quello che aveva a 375rpm.

A valle la pressione totale dell'aria assume valori sia superiori che inferiori a quelli che ha a monte della turbina, ciò a causa del flusso irregolare delle particelle di vento, osservato tramite le linee di flusso.

L'andamento della pressione totale risulta essere notevolmente disomogeneo anche a ridosso delle singole pale.

Si osserva che il fluido varia la propria energia totale prima dell'interazione con queste, in due casi aumentandola e nel terzo diminuendola, e dopo lo scambio di energia la sua pressione totale diminuisce. Ciò avviene a causa della produzione di potenza e della dissipazione di energia.

Anche in questo caso è necessario che il flusso d'aria percorra un'elevata distanza, dopo aver interagito con la macchina, affinché ritorni ad avere lo stesso contenuto energetico che aveva a monte della turbina. Tale distanza risulta essere superiore a quella che il vento deve percorrere nel funzionamento ottimale a 375rpm, come si può constatare confrontando le figure 21 e 25.

Complessivamente dunque a 700rpm la turbina, oltre a funzionare con una bassa efficienza, disturba notevolmente a livello energetico la zona e lei limitrofa.



## CONCLUSIONE

---

Si può dunque concludere dicendo che si ottengono la massima potenza meccanica e la massima coppia motrice per la turbina in considerazione quando questa ruota a 375rpm, ed i valori massimi del  $c_p$  e del  $c_m$  risultano essere prossimi, se non superiori, a quelli che si otterrebbero con altri profili alari.

Per di più, a tale numero di giri, la macchina disturba meno a livello energetico l'ambiente a lei limitrofo rispetto a quanto succede in caso di funzionamento non efficiente. Si è infatti visto che in queste situazioni si può avere la formazioni di vortici ed il vento è soggetto a bruschi cambi di direzione ed intensità dopo aver interagito con le pale.

Si è anche osservato che la potenza prodotta ha un andamento periodico: la frequenza dipende dal numero di giri al minuto, il valore istantaneo dalla posizione angolare in cui si trova la pala.

Le simulazioni sono state tutte effettuate mantenendo il campo di moto costante nel tempo ed omogeneo nello spazio, altre simulazioni andrebbero dunque effettuate impostando una velocità del vento variabile, come effettivamente avviene nella realtà, per osservare il comportamento della turbina in questa situazione.

Si è anche visto che il range operativo della turbina risulta essere più ampio di quello che si ha con altri profili, come dedotto dalla figura 4, e ciò garantisce un funzionamento accettabile anche per velocità del vento più basse.

La turbina Darrieus con il profilo S-1046 sembra dunque essere molto promettente per la produzione di potenza dal vento, in particolare nelle aree urbane, dove questo non raggiunge velocità troppo elevate ed è spesso soggetto a cambi di direzione.



## BIBLIOGRAFIA

---

- [1] S. Mathew, *Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics*, Netherlands, Springer, 2006.
- [2] G. Ventrone, *Macchine per allievi ingegneri*, Italy, Libreria Cortina, 2006.
- [3] M. O. Hamdan, H. A. N. Hejase, H. N. Noura, A. A. Fardoun, *ICREGA'14 - Renewable Energy: Generation and Applications*, Springer, 2014, pp.443-454.
- [4] "Key World Energy Statistics", *International Energy Agency (IEA)*, 2014.
- [5] "conBio News & Facts: the Bioenergy Gateway", <http://www.conbio.info/post/release-of-ieas-key-world-energy-statistics-2014-edition/>, Settembre 2014.
- [6] "The Sun", <http://www.thesun.co.uk/sol/homepage/news/3893761/Wind-farms-shut-because-its-too-windy.html>, Luglio 2015.
- [7] "Global Wind Energy Council (GWEC)", <http://www.gwec.net/>, Agosto 2015.