



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea in Ingegneria Civile indirizzo Strutture

**“Studio di una turbina ad asse verticale per la conversione delle perdite aerodinamiche dei veicoli in energia eolica”**

**“Study of the behavior of a vertical axis wind turbine to recover Energy losses of moving vehicles”**

Relatore:

Prof. Ing. Renato Vitaliani

Correlatore:

Ing. Tommaso Morbiato

Tesi di Laurea di

Silvia Colladet

Matricola n. 1041449

ANNO ACCADEMICO 2013 / 2014







*Dedica*

*“Alla Vittoria della mia famiglia”*



## Indice

Introduzione .....	9
1. Il progetto.....	13
1.1. Il vento e l' energia eolica.....	13
1.2. Usare le perdite aerodinamiche dei veicoli per produrre energia eolica si può definire energia sostenibile? .....	13
1.3. Le turbine eoliche .....	15
1.3.1. Turbina Darrieus .....	17
2. Aerodinamica di una Vawt .....	20
2.1. Parametri aerodinamici di una Vawt .....	20
2.2. Profili Naca .....	21
2.2.1. Generalità.....	21
2.3. Teoria unidimensionale e Limite di Betz.....	23
2.4. Teoria degli Elementi di Pala (BEM) .....	28
2.5. Single streamtube model.....	28
2.5.1. Risultati ottenuti per il Single Streamtube Model .....	33
2.6. Multiple Streamtubes Model .....	36
2.7. Double Multiple Streamtubes Model.....	36
3. Dati Sperimentali .....	39
3.1. Descrizione dei prototipi.....	39
3.2. Risultati sperimentali .....	40
3.2.1. Curve di potenza lorde rotor TREO .....	40
3.2.2. Curve di potenza nette rotor TREO .....	41
4. Confronto tra i dati sperimentali e IL DMSM .....	43
4.1. Conseguenze del limite di Betz all' interno del codice BEM.....	50
4.2. Considerazioni dei parametri che governano il problema: Re, a, Angolo di attacco, Tip-speed ratio.....	55
4.2.1. Angolo di attacco $\alpha$ .....	55
4.2.2. Numero di Reynolds .....	56
4.2.3. Tip Speed Ratio e problematiche di avviamento di una Vawt .....	57
4.3. Effetti secondari sulle performance aerodinamiche di una turbina Darrieus .....	59
4.3.1. Stallo dinamico .....	59
4.3.2. Curvatura virtuale .....	61
4.3.3. Espansione dei tubi di flusso .....	61
5. Analisi della risposta aerodinamica della turbina nel transitorio.....	63
5.1. Ragioni per studiare il comportamento transitorio .....	64
5.2. Test in galleria del vento, Calibrazione ed attuazione del codice BEM dipendente dal tempo .....	65
5.3. Gruppi di mezzi pesanti e durata del vento.....	68
5.4. Analisi in Transitorio con veicolo unico ad intervalli di tempo .....	69
5.5. Riflessioni sulla avviabilità in presenza di venti variabili .....	73
5.6. Analisi in transitorio per gruppi di mezzi pesanti.....	74
6. Conclusioni .....	78



# Introduzione

Treo è la tecnologia che converte le perdite aerodinamiche prodotte dai veicoli in movimento in energia eolica e al contempo rappresenta un potente strumento per analizzare gli effetti del traffico sull'ambiente.

E' un sistema che rende disponibile quell'energia che sarebbe altrimenti persa e che, accoppiato con un sistema di data assimilation, consente di analizzare e predire in modo del tutto innovativo l'impatto ambientale dei nostri veicoli. Una conversione intelligente dell'energia che assieme al controllo dell'ambiente, è un'opportunità per il presente ed il futuro.

La recente attenzione rivolta ai cambiamenti climatici, l' esigenza di incrementare la quota di energia pulita ed i timori di una diminuzione futura della disponibilità di petrolio hanno promosso un rinnovato interesse per la produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili e quindi anche l' eolico.

Il progetto di studio anche se non prevede l' uso diretto del vento, intende utilizzare un' energia che si trova disponibile in grande scala, vuole presentarne vantaggi ma anche le soluzioni ai possibili limiti e difetti.

Nello specifico Treo è un' attività sperimentale iniziata nel 2010, studiando come primo passo i campi di flusso che vengono generati dal traffico in autostrada. L' analisi per quantificare la risorsa energetica ha permesso di affermare che l' utilizzo delle perdite aerodinamiche dei veicoli può definirsi energia sostenibile.

Il presente lavoro di tesi invece si basa sullo studio delle prestazioni degli aerogeneratori da utilizzarsi per la conversione di energia.

L' aerogeneratore di cui si descriveranno le caratteristiche è una turbina VAWT (vertical axis wind turbine) di tipo Darrieus, ideata nel 1931 grazie a George Darrieus, che è riuscito ad incrementarne la potenza estraibile. Fu lui infatti, prendendo in prestito dall'aeronautica i nascenti studi sulle sezioni alari, a brevettare la turbina eolica basata sul principio della portanza. Le turbine dette "a portanza" sono così chiamate poiché le superfici esposte al vento presentano un profilo alare aerodinamico in grado di generare una distribuzione di pressione favorevole lungo la superficie della pala e, di conseguenza, una coppia disponibile all'asse nel verso di rotazione della macchina. Nel 1926, alla luce dei suoi studi sull'aerodinamica di una turbina eolica, Albert Betz arrivò a sentenziare che: *una macchina eolica è in grado di estrarre al massimo il 59.26% della potenza messa a disposizione dal vento*. Con la modellazione matematica della macchina eolica sviluppata da Betz, a causa delle forti semplificazioni introdotte, non era però possibile comprendere a fondo i fenomeni che si instaurano quando il vento investe il rotore. A tal scopo, negli anni successivi, per le turbine a portanza, è stata sviluppata una teoria che studia da vicino il rotore, introducendo le forze aerodinamiche prodotte dalle pale; tale teoria è detta appunto BEM: Blade Element Momentum. Nella prima parte del lavoro di tesi si sono messe a confronto le teorie sopra introdotte, cercando di valutare le performance aerodinamiche attraverso l' uso del "single streamtube model"(tubo di flusso singolo), proposto da Templin nel 1974 e con il "double multiple streamtube model" ideato da Paraschivoiu.

Si è proceduto confrontando i valori ottenuti con il codice BEM con i dati sperimentali ottenuti grazie alla sperimentazione svolta dal CRIACIV dell' Università di Firenze per verificare i limiti della teoria BEM e indicarne le possibili soluzioni.

Con i risultati più attendibili ottenuti dal codice BEM si è passati all' analisi in transitorio in cui si vuole valutare nello specifico il comportamento della turbina inserita nel contesto stradale, in cui il vento e la sua velocità sono rappresentati dal flusso del traffico e dalle sue caratteristiche: flusso continuo, interruzioni, accodamenti.





# 1. Il progetto

## 1.1. *Il vento e l'energia eolica*

Il vento è uno spostamento di masse d'aria dovuto a dislivelli di pressione e temperatura sulla superficie terrestre e nell'atmosfera, per via del riscaldamento solare disomogeneo nelle varie zone della superficie terrestre. I salti di temperatura producono infatti differenze di pressione e densità, che provocano l'insorgere dei moti ventosi. Per questa ragione, l'energia eolica è chiamata anche “energia solare indiretta”. Il vento presenta direzioni e velocità variabili con il tempo. Il problema della direzione è risolvibile prevedendo sistemi automatici di orientamento dei rotori eolici per la captazione della massima energia possibile posseduta dalla vena fluida. Per quanto riguarda la velocità, in una data località geografica essa risulta comunque oscillante intorno ad un valore medio che varia con periodo maggiore rispetto al tempo di variazione di velocità istantanea, permettendo quindi un'ottimizzazione dell'impianto in base ad una definita velocità media-velocità efficace.

## 1.2. *Usare le perdite aerodinamiche dei veicoli per produrre energia eolica si può definire energia sostenibile?*

È il primo interrogativo che bisogna porsi per validare l'efficacia di tale progetto. Usare una perdita che proviene da una risorsa ambientalmente impattante, per produrre invece una risorsa eco-sostenibile. Munasinghe, interrogandosi sul livello ottimale di energia rinnovabile, indica come quantità quella in cui i costi dell'impianto sono pari ai costi evitati per la generazione fossile, compresi i danni ambientali. Nell'articolo “Wind Energy Harvesting from Transport systems: A resource Estimation Assesment” di Tommaso Morbiato, Claudio Borri e Renato Vitaliani, gli autori presentano lo studio del caso generale di veicoli che impattano l'aria in una sezione rettilinea autostradale in assenza di ostacoli che potrebbero alterare il campo di flusso. L'analisi delle risorse è risultata necessaria per far conoscere la possibilità di una nuova tecnologia al mondo scientifico e per quantificare la risorsa energetica e descriverne le caratteristiche. Nella prima parte dell'articolo si risponde al quesito: perché pensare al traffico come una risorsa sostenibile?

- è una fornitura di energia costante, associata alla domanda di trasporto.
- al contrario delle altre energie rinnovabili, le perdite aerodinamiche dei veicoli appartengono alla fonte dei costi: si deduce l'efficienza della macchina, e parte dell'energia persa viene riutilizzata positivamente.

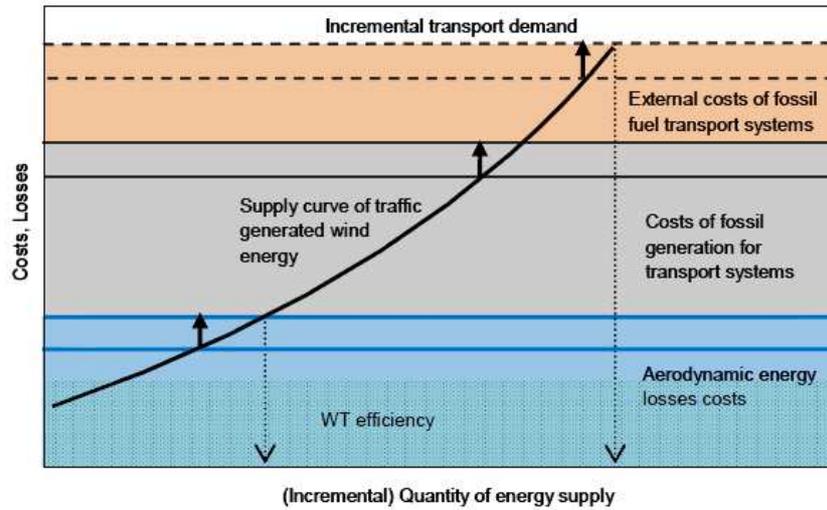


Fig. 1

*Ci sarà sempre una quantità incrementale dell'approvvigionamento energetico ottimale (curva in grassetto) associato ad un incremento della domanda di trasporto (frecche verticali in grassetto): anche in un futuro più sostenibile in cui i sistemi di trasporto non si baseranno più sulla generazione fossile (si sottrae livello di costo zona grigia) e ipotizzando i costi dei futuri trasporti almeno pari ai costi di approvvigionamento dell'energia eolica, la quantità incrementale di energia ottimale proviene dalle perdite aerodinamiche (costo area blu livello). Grafico adattato da Munasinghe.*

### 1.3. Le turbine eoliche

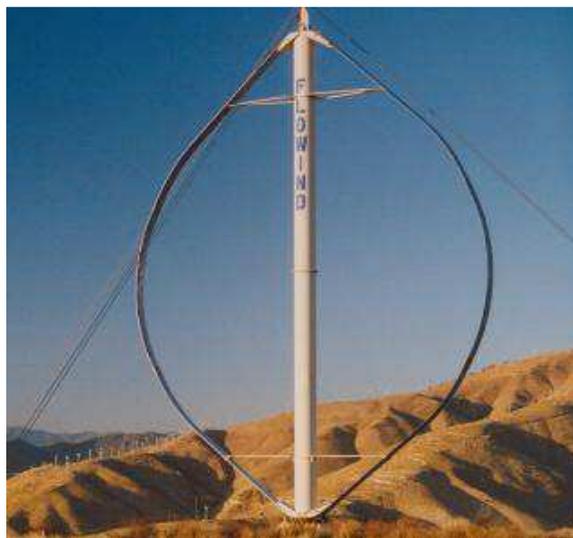
Una turbina eolica o aerogeneratore trasforma l'energia cinetica posseduta dal vento in energia elettrica senza l'utilizzo di alcun combustibile e passando attraverso lo stadio di conversione in energia meccanica di rotazione effettuato dalle pale. Le turbine possono essere a "portanza" o "resistenza" in funzione di quale sia la forza generata dal vento e sfruttata come "forza motrice". Tra gli aerogeneratori si possono distinguere due grandi categorie; in base alla disposizione dell'asse di rotazione si individuano macchine ad asse orizzontale e macchine ad asse verticale a seconda se l'asse è rispettivamente parallelo o perpendicolare alla direzione del vento. Nello specifico:

- Turbine ad asse verticale – Vawt (Vertical Axis Wind Turbine );



*Fig. 1*  
*Turbina HAWT*

- Turbine ad asse orizzontale – Hawt ( Horizontal Axis Wind Turbine).



*Fig. 2*  
*Turbina VAWT*

A loro volta le turbine Vawt si suddividono in:

- Turbine di tipo Savonius;
- Turbine di tipo Darrieus;
- Turbine di tipo misto Darrieus-Savonius.

Mentre le turbine Hawt si distinguono in:

- Turbine sopravento ( upwind );
- Turbine sottovento ( downwind).

Le macchine eoliche si possono dividere in tre grandi gruppi, assumendo come criterio discriminante la taglia intesa sia come classe di potenza del generatore che come diametro del rotore.

<b>Tipologia</b>	<b>Potenza generatore</b>	<b>Diametro rotore</b>
Piccola taglia	$P < 100 \text{ kW}$	$D < 20 \text{ m}$
Media taglia	$100 \text{ kW} < P < 1000 \text{ kW}$	$20 \text{ m} < D < 50 \text{ m}$
Grande taglia	$P > 1000 \text{ kW}$	$D > 50 \text{ m}$

All' interno delle macchine di piccola taglia possiamo distinguere in base alla potenza del generatore due tipologie di turbine, secondo la classificazione dei sistemi minieolici secondo le IEC 61400-2 (2006)

<b>Tipologia</b>	<b>Potenza generatore</b>
Pico eolico	$P < 1 \text{ kW}$
Micro eolico	$1 \text{ kW} < P < 7 \text{ kW}$
Mini eolico	$7 \text{ kW} < P < 50 \text{ kW}$
Mini eolico	$50 \text{ kW} < P < 100 \text{ kW}$

La tecnologia delle macchine micro e mini eoliche ha oggi raggiunto un livello di maturità tale da consentire la produzione e commercializzazione da parte di varie industrie del settore. Queste macchine sono ormai tecnologicamente mature e competitive per l'alimentazione dei servizi gli utenti isolati con e senza accumulo e per l'alimentazione di elettropompe. I generatori a bassissima potenza possono essere validamente impiegati per la ricarica di accumulatori che alimentano boe, segnali luminosi, impianti di telecomunicazione i quali, per la loro ubicazione, sono difficilmente alimentabili dalla rete.

L'impatto ambientale ha elementi in comune con quello dei grandi impianti, poiché interferisce con i medesimi elementi naturali, pur determinando risultati percettivi diversi. Da una parte le microturbine hanno dimensioni minori rispetto ai grandi aerogeneratori, conseguentemente necessitano di spazi limitati e sono relativamente poco visibili. Dall' altra però sono spesso installate in prossimità delle utenze che possono soffrirne la presenza in termini di spazio sottratto ad altri usi, accettabilità dal punto visivo (si tratta di una presenza invasiva con cui convivere, anche se possono essere piacevoli dal punto di vista estetico). Pur se quantitativamente non rilevanti questi inconvenienti devono preliminarmente essere messi in conto nello studio di fattibilità del progetto.

Una problematica importante inoltre è quella del rumore: la vicinanza all' utente e l'assenza di schermi per evitare interferenze alla direzione ed intensità del vento,

deve condurre ad una scelta ponderata del modello di turbina e del luogo d'installazione.

A fronte di alcuni impatti sull'ambiente è doveroso citare gli innumerevoli benefici legati alle applicazioni di piccoli impianti eolici. Questi sono riconducibili principalmente ai danni evitati rispetto al ricorso ad altre forme di energia o a soluzioni di connessione alla rete difficilmente attuabili e comunque con costi elevatissimi.

In breve si può affermare che i benefici di applicazioni di micro-eolico sono:

- servizio a zone altrimenti isolate o raggiungibili mediante opere di maggior impatto;
- attuazione di una politica di distribuzione della generazione di energia elettrica;
- contributo alla diversificazione delle fonti;
- riduzione della dipendenza energetica da fonti convenzionali della zona interessata dal progetto;
- infine si evita l'emissione di sostanze inquinanti.

Per l' utilizzo all' interno di questo progetto di tesi, ci si riferisce al micro eolico con turbine di taglia compresa tra 1 kW e 10 kW, ad asse verticale e di tipo Darrieus.

### 1.3.1. Turbina Darrieus

Le Turbine Darrieus sono turbine ad asse verticale basate sul principio della portanza, brevettate da George Darrieus nel 1931, sono in grado di produrre potenza al pari e anche maggiore delle migliori turbine ad asse orizzontale attualmente in grandissima diffusione. Il nome Darrieus si riferisce a tre classi di turbine ad asse verticale: le "eggbeater", "H-type", e la Darrieus elicoidale che si differenziano tra di loro solo per la forma delle pale, ma tutte funzionano sfruttando la portanza creata dal profilo palare.

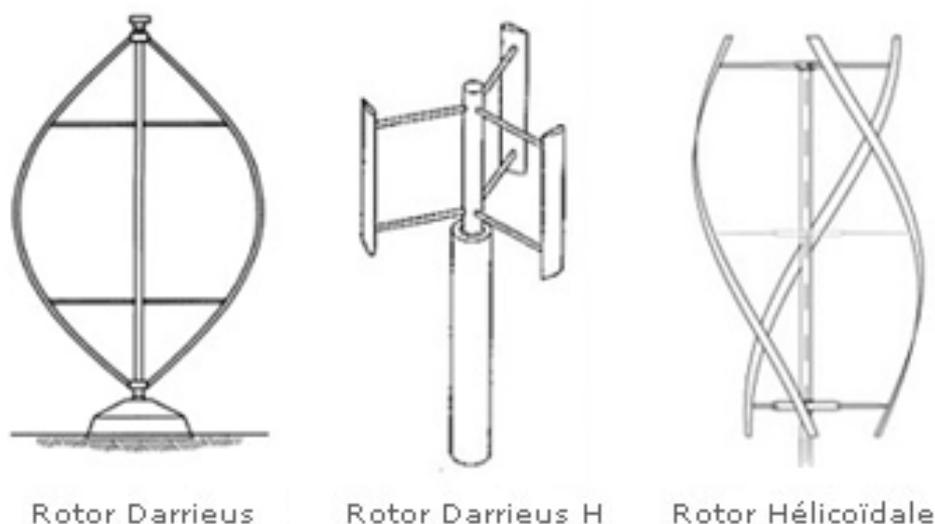


Fig. 3 Rotori Darrieus

La configurazione Darrieus ha il grande difetto di non auto avviarsi: affinché la portanza sviluppata sulle pale sia in grado di movimentare il generatore, il rotore deve essere portato a una velocità minima.

A dire il vero, una turbina con un numero di pale superiore a uno si potrebbe avviare in qualsiasi posizione (solo una turbina Darrieus monopala presenta alcune posizioni in cui non si avvia autonomamente), ma il problema è che questo si verifica solo con grandi velocità del vento e in condizioni ideali.

Per superare il problema appena descritto esistono diverse soluzioni, una delle quali consiste nel montare un dispositivo a resistenza (una turbina Savonius) all'interno di una turbina Darrieus esistente. Questa Savonius dovrebbe avere una forma tale da creare abbastanza resistenza per poter muovere velocemente le pale della Darrieus finché queste non sono in grado di produrre sufficiente portanza per auto – movimentarsi e a quel punto l'avviatore sarebbe disaccoppiato.

Un altro sistema per l'avviamento consiste nell'utilizzare elettricità per portarsi nella condizione di auto sufficienza; sebbene questo metodo è funzionante, non sempre è desiderabile, in quanto la turbina deve essere collegata ad una centrale elettrica e nel caso in cui essa venga usata per il pompaggio dell'acqua è un grosso inconveniente mancando il generatore, inoltre complica notevolmente il design della macchina limitandone l'uso solo in alcune aree (zone offshore nelle vicinanze di reti elettriche).

Quando il rotore gira, il profilo avanza nell'aria alla velocità tangenziale di rotazione. A questa velocità si somma settorialmente la velocità del vento, creando un angolo d'attacco per il profilo. Questo genera una portanza la cui proiezione in direzione tangenziale fornisce la coppia che fa ruotare la turbina nella direzione in cui già sta ruotando. Uno dei problemi da tener presente quando si pensa al design di una turbina Darrieus è che l'angolo d'attacco varia durante la rotazione, quindi ogni pala genera il massimo della portanza (e quindi della coppia) in due punti durante una rotazione: questo produce un andamento sinusoidale della coppia. In particolare, quasi tutte le turbine Darrieus hanno dei modi di risonanza, che ad una certa velocità angolare, possono essere eccitati e causare intensi sforzi sulla struttura o addirittura il suo danneggiamento. Per questo motivo, molte turbine Darrieus hanno freni meccanici o sistemi di controllo della velocità per controllare la velocità angolare.

Inoltre, poiché la maggior parte della massa del rotore è all'esterno, invece che vicino al mozzo, come è per le eliche, si hanno degli stress molto intensi generati dalla forza centrifuga. Una soluzione comune per minimizzare questo effetto è curvare le pale come nella configurazione Troposkein.

Le forze trainanti delle turbine Darrieus possono essere descritte in dettaglio con l'aiuto della figura sottostante. Ci sono due componenti di velocità: la velocità del profilo alare rispetto all'albero, che è sempre parallela alla corda, di modulo pari alla velocità angolare moltiplicata per il raggio e la velocità del vento, approssimata con una velocità costante in direzione, modulo e verso. La risultante di questi due vettori è la velocità dell'aria rispetto al profilo alare, cioè la velocità apparente del vento, detta anche velocità relativa. L'angolo tra questa risultante e la corda del profilo alare si chiama l'angolo di attacco  $\alpha$ .

Le pale che fendono l'aria sotto un certo angolo di attacco sono soggette ad una differenza di pressione, origine della forza chiamata portanza che spinge in avanti la pala.

Nella figura vengono rappresentate quattro pale con un profilo alare simmetrico, nella posizione  $\theta=0^\circ$  e in quella  $\theta=180^\circ$  si ha  $\alpha=0^\circ$  ed esiste solo una forza di resistenza; per poter generare una spinta di portanza è necessario un angolo di attacco diverso da zero, altrimenti a causa della simmetria tra dorso e ventre della pala non si

genera nessuna differenza di pressione e quindi nessuna forza motrice positiva (mentre se il profilo è asimmetrico l'angolo di attacco per il quale si ha portanza nulla varia da profilo a profilo, cosicché anche con un angolo di attacco nullo si potrebbe ottenere generazione di portanza).

Non appena le pale si allontanano dall'angolo appena descritto nasce la portanza, dall'inglese "lift force", cioè una forza perpendicolare alla velocità relativa che possiede una componente in grado di spingere in avanti le pale; naturalmente la forza di resistenza, dall'inglese "drag force", diretta come la velocità relativa rimane e tende a rallentare le pale.

La coppia generata dalle forze di portanza deve essere maggiore della coppia generata da quelle di resistenza per poter essere in grado di produrre energia utile.

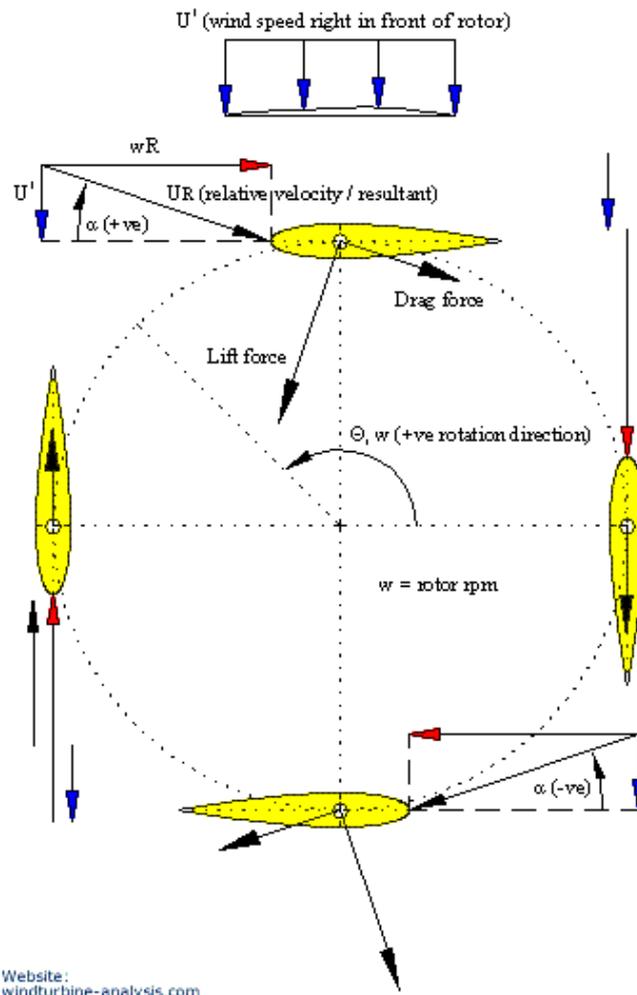


Fig. 4 Forze trainanti le turbine Darrieus

Nella figura 4 la freccia blu rappresenta la velocità dell'aria rispetto al terreno, la freccia rossa la velocità dell'aria che incide sul profilo alare e dovuta alla sola rotazione del rotore, la freccia nera rappresenta la cosiddetta velocità relativa, ovvero la risultante delle due appena descritte, la freccia verde la forza di portanza e la freccia grigia la forza di resistenza.

## 2. Aerodinamica di una Vawt

### 2.1. Parametri aerodinamici di una Vawt

Il vantaggio di una VAWT è la capacità di mantenersi in rotazione indipendentemente dalla direzione del vento. Però rispetto ad una più convenzionale HAWT, poiché l'asse di rotazione di una VAWT è perpendicolare al flusso d'aria che la investe, l'aerodinamica che si sviluppa è molto più complessa. E' già stato precedentemente accennato che durante la rotazione, sulle pale si realizzano elevati angoli d'attacco e il flusso che investe le pale sottovento è disturbato dalla scia dell'asse e delle pale sopravento.

In questo capitolo verranno presentati i parametri aerodinamici che descrivono il funzionamento della turbina e i modelli matematici messi a confronto che sono stati utilizzati per calcolare i suddetti parametri.

Innanzitutto è utile inserire una nomenclatura dei simboli che rappresentano tutti i parametri che entrano in gioco:

$a$	=	fattore induzione	
$c$	=	corda del profilo	[m]
$C_{DD}$	=	coefficiente di resistenza del disco	
$C_N$	=	coefficiente di forza normale	
$C_P$	=	coefficiente medio di potenza	
$C_T$	=	coefficiente di forza tangenziale	
$c/R$	=	rapporto tra la corda e il raggio	
$D$	=	resistenza della turbina eolica	[N]
$F_N$	=	forza normale nella pala della turbina	[N]
$F_T$	=	forza tangenziale nella pala della turbina	[N]
$h$	=	altezza del tubo di flusso	[N]
$H$	=	altezza del rotore	[m]
$L$	=	forza di portanza	[N]
$N$	=	numero di pale	
$Nc/R$	=	solidità del rotore	
$q$	=	pressione dinamica relativa locale	[N/m <sup>2</sup> ]
$r$	=	raggio locale della turbina	[m]
$R$	=	raggio	[m]
$S$	=	area del disco	[m <sup>2</sup> ]
$\vec{V}$	=	velocità del fluido	[m/s]
$\vec{v}_d$	=	velocità attraverso il disco della turbina eolica	[m/s]
$\vec{V}_d$	=	velocità disturbata	[m/s]
$\vec{V}_r$	=	velocità relativa del fluido	[m/s]
$\vec{V}_t$	=	velocità di punta	[m/s]
$\vec{V}_\infty$	=	velocità del vento imperturbato	[m/s]
$\vec{W}$	=	velocità relativa	[m/s]
$X$	=	tip speed ratio	
$\alpha$	=	angolo di attacco	[°]
$\theta$	=	Azimut, posizione angolare della pala della turbina	[°]
$\rho$	=	densità del fluido	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\omega$	=	velocità angolare	[rad <sup>-1</sup> ]

## 2.2. Profili Naca

Prima di passare allo studio delle performance aerodinamiche di una Vawt di tipo Darrieus è utile descrivere i profili alari attualmente in commercio.

### 2.2.1. Generalità

Il profilo alare è la sezione di un'ala condotta secondo un piano verticale e parallelo alla mezzeria dell'ala stessa. Anche le sezioni di una pala di turbomacchina o di un'elica propulsiva sono costruite secondo i principi dei profili alari.

Naca è l'acronimo di *Northern advisory committee for aeronautics*. Sono oltre 1.800 i profili definiti in modo univoco ed utilizzati nella produzione dei velivoli di serie. I più comuni sono quelli definiti dall'organizzazione governativa americana NACA identificati con numeri a 4 o 5 cifre, che tutt'oggi sono uno standard per la produzione in serie di profili alari ad uso civile.

I profili possono essere caratterizzati da una sigla composta in vario modo:

- NACA 4-Digit series (1932), 4 cifre numeriche  
NACA 1st SERIES, dove le cifre rappresentano nell'ordine: camber (prima cifra), posizione del massimo del camber rispetto alla corda (seconda cifra), spessore del profilo rispetto alla corda (ultime due cifre). Ad esempio il profilo NACA 2412, indica che il camber è lo 0,02-c (2% della corda), che esso è situato a 0,4-c (40% della corda) e che lo spessore è 0,12 volte la corda (12%).
- NACA 5-Digit series (1935), 5 cifre numeriche  
Nel caso in cui le cifre siano 5 i profili fanno parte dei NACA 2nd SERIES; in questi, la prima cifra moltiplicata  $\times 3/2$  indica il  $C_L$  di progetto e rappresenta la portanza nel caso di angolo di incidenza nullo; la seconda e terza cifra divisa per 2 si riferiscono alla percentuale di corda dove si trova il massimo camber, mentre le ultime due danno come nel primo caso la misura dello spessore.
- NACA serie 1 (1939), 5 cifre numeriche  
Tipo NACA 16-212 dove:  
1 sta ad indicare la serie;  
6 indica che la pressione minima è localizzata al 60% della corda  
2 indica che il  $C_L$  di progetto in decimi ( $C_L=0.2$ ) ad  $\alpha=0^\circ$   
12 indica il massimo spessore (cm)
- NACA serie 6  
Sono progettati per realizzare un diagramma di carico costante fino ad un certo valore di  $x/c$   
Ad esempio 651-212  $a=0.6$   
6 sta ad indicare la serie;  
5 indica che la pressione minima è localizzata al 50% della corda  
1 questo pedice indica che la bassa resistenza è mantenuta nel campo  $0.2-0.1 < C_L < 0.2+0.1$   
2 indica che il  $C_L$  di progetto in decimi ( $C_L=0.2$ ) ad  $\alpha=0^\circ$   
12 indica lo spessore relativo  
 $a=0.6$  valore di  $x/c$  a cui il diagramma di carico è costante. Se il suo valore non è specificato il carico è mantenuto unitario ed uniforme fino a  $x/c=1$ .

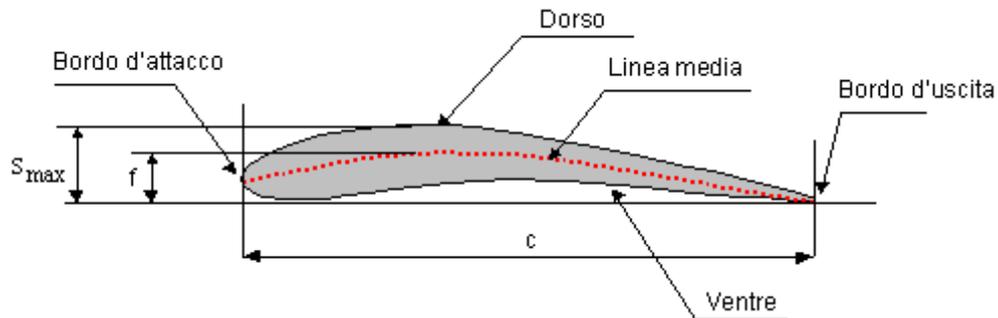


Fig.5 Profilo NACA

Come mostrato in figura, un profilo alare può essere considerato come composto da una distribuzione di spessore simmetrica, adagiata su una linea media di forma opportuna. La linea media, infatti, è quella linea curva che è in ogni punto equidistante dal dorso e dal ventre del profilo. La distanza, misurata perpendicolarmente alla linea media, fra il dorso e il ventre del profilo è detta spessore.

I punti in cui la linea media incontra il profilo nella zona anteriore e nella zona posteriore si chiamano rispettivamente bordo d'attacco e bordo d'uscita. Il segmento che unisce questi due punti si chiama invece corda del profilo. E' facile vedere geometricamente che in un profilo simmetrico la corda del profilo coincide con la linea media, cioè in un profilo simmetrico la linea media è un segmento che congiunge il bordo d'attacco con il bordo d'uscita.

Per definire la componente di portanza e di resistenza di un profilo si definisce con  $V$  la velocità: l'incidenza del profilo è l'angolo compreso tra la direzione della velocità  $V$  e la corda del profilo, positivo in senso orario. *La portanza è la componente della forza che la corrente esercita sul profilo in direzione normale alla velocità  $V$ , mentre la resistenza è la componente della forza in direzione parallela a  $V$ .*

E' conveniente esprimere le forze aerodinamiche e il momento delle forze in forma adimensionale dividendo la portanza  $l$  (lift) e la resistenza (drag), per unità di apertura, per  $1/2 * \rho V^2 c$ , mentre il momento  $m$ , per unità di apertura, dev' essere diviso per  $1/2 * \rho V^2 c^2$ . Si ottengono così i seguenti coefficienti aerodinamici:

- Coefficiente di portanza:  $c_l = \frac{2l}{\rho V^2 c}$ ;
- Coefficiente di resistenza:  $c_d = \frac{2d}{\rho V^2 c}$ ;
- Coefficiente di momento di beccheggio:  $c_m = \frac{2m}{\rho V^2 c^2}$ .

I coefficienti aerodinamici dipendono dal numero di Reynolds,  $Re$ , e dall'angolo di incidenza,  $\alpha$ . I valori di  $c_l$  e  $c_d$  sono stati presi già catalogati in base ad angoli  $\alpha$  (da 0 a 360°) e numeri di Reynolds (da 0 a  $10^6$ ). Le matrici si leggono come righe- $\alpha$  e colonne- $Re$ .

### 2.3. Teoria unidimensionale e Limite di Betz

Le turbine eoliche prelevano energia cinetica dal vento convertendola in energia meccanica all'albero della macchina: è quindi possibile definire una sezione all'interno della quale avviene la conversione; per una macchina ad asse orizzontale tale zona altro non è che la l'area spazzata delle pale. Ipotizzando di separare l'aria che attraversa tale sezione dal resto del flusso, è stato possibile definire una regione che si estende sia a monte che a valle della sezione rotorica, all'interno della quale scorre la portata d'aria che attraverserà la macchina, tale regione è detta tubo di flusso *streamtube*.

L'energia cinetica  $E_c$  posseduta da una massa d'aria  $m$  che si muove ad una velocità  $V_\infty$  costante è pari a:

$$E_c = \frac{1}{2} m V_\infty^2$$

La potenza disponibile posseduta da una massa d'aria di portata  $q = \frac{dm}{dt}$  vale:

$$P_{disp} = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} q V_\infty^2$$

La portata si può anche esprimere nella formula:

$$q = \frac{dm}{dt} = \dot{m} = \rho A V_\infty$$

In cui :

- $\rho$  = densità dell'aria
- $A$  = la sezione del tubo di flusso dell'aria considerata

La potenza disponibile specifica risulta:

$$P_{disp} = \frac{1}{2} \rho A V_\infty^3$$

Un modello semplificato, attribuito ad Albert Betz, è utilizzato per determinare la potenza estraibile da una turbina eolica ideale avente a disposizione questa potenza del vento incidente.

Le ipotesi su cui si basa la teoria di Betz sono:

- l'insieme delle pale del rotore eolico è assimilabile ad un disco di spessore nullo: disco attuatore con un numero infinito di pale;

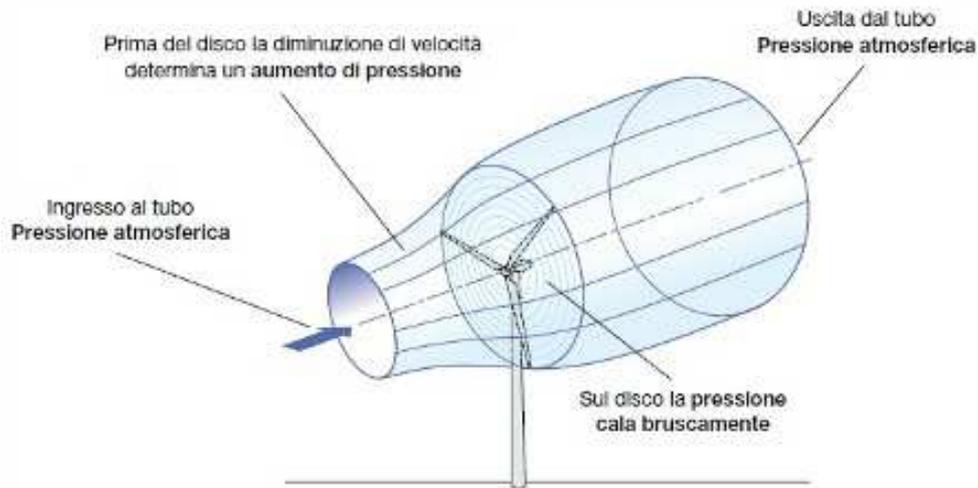


Fig.6 Rotore schematizzato secondo Betz.

- la massa d'aria che investe il disco rimane separata da quella che la circonda;
- la massa d'aria fluisce solo in direzione longitudinale;
- il rallentamento dell'aria sul disco attuatore è distribuito uniformemente sulla sezione del disco;
- nelle sezioni infinitamente a monte e a valle la pressione è pari a quella atmosferica;
- il flusso eolico non incontra ostacoli oltre la turbina, né a monte, né a valle di essa;
- il vento è stazionario e di intensità costante con la quota;
- non ci sono effetti rotatori sulla massa d'aria;
- si trascura la comprimibilità dell'aria, ossia la densità è assunta costante.

Come si può notare dalla figura, assumendo costante la portata d'aria e la densità si evince che la diminuzione della velocità della vena fluida in ingresso ed in uscita dal tubo di flusso, ha come risultato l'aumento della sezione del tubo di flusso stesso.

Inoltre, partendo dalla pressione atmosferica in ingresso al tubo, la diminuzione graduale di velocità lungo il tubo di flusso determina un aumento di pressione, la quale cala bruscamente sul disco per poi ritornare gradualmente alla pressione atmosferica in uscita dal tubo di flusso.

Indicando con:

- $p_1$  e  $v_1$  la pressione e la velocità del vento nella sezione  $A_1$  in ingresso al tubo di flusso e sufficientemente lontano dalla turbina;
- $p_2$  e  $v_2$  la pressione e la velocità del vento nella sezione  $A_2$  in uscita dal tubo di flusso e sufficientemente lontano dalla turbina;
- $p_3$  e  $p_4$  le pressioni immediatamente prima e dopo la sezione A;
- $v$  la velocità del vento in corrispondenza del piano del rotore

nell' ipotesi che non vi siano variazioni di energia potenziale e che non vi sia scambio di calore ed estrazione di lavoro tra  $A_1$  ed  $A_2$ , si può scrivere l' equazione di Bernoulli<sup>1</sup> come segue:<sup>1</sup>

$$p_1 + \rho \cdot \frac{v_1^2}{2} = p_3 + \rho \frac{v^2}{2}$$

Analogamente tra  $A$  e  $A_2$ :

$$p_4 + \rho \cdot \frac{v^2}{2} = p_2 + \rho \frac{v_2^2}{2}$$

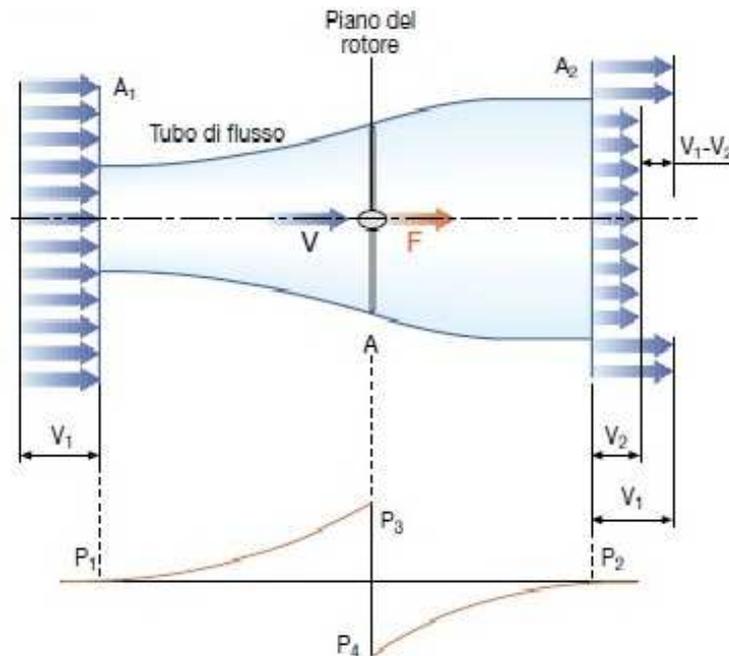


Fig.7 Velocità all' interno del rotore

La velocità del vento decresce dalla sezione 1 in ingresso al tubo di flusso alla sezione 2 in uscita senza discontinuità. Pertanto sul disco non si ha un gradiente di velocità come avviene per la pressione.  $p_1$  e  $p_2$  sono di pari valore ed eguagliano la pressione atmosferica. La variazione di pressione sul disco, quindi può essere scritta come:

$$\Delta p = p_3 - p_4 = \rho \frac{v_1^2 - v_2^2}{2}$$

La forza assiale  $F$ , nella direzione del vento, sul disco attuatore di sezione  $A$  perpendicolare al flusso è data da:

$$F = \Delta p \cdot A = \rho A \frac{v_1^2 - v_2^2}{2}$$

Tale forza, per il teorema dell' impulso, è uguale alla variazione della quantità di moto della corrente d' aria:

$$F = F_3 - F_4 = \dot{m}(v_1 - v_2)$$

Si trova allora:

$$F = \rho \cdot A \cdot v \cdot (v_1 - v_2)$$

<sup>1</sup>In fluidodinamica, l' equazione di Bernoulli rappresenta una particolare forma semplificata delle equazioni di Navier-Stokes, ottenuta, in caso di flusso non viscoso ( ovvero flusso nel quale la viscosità può essere trascurata), dall' integrazione lungo una linea di flusso e descrive il moto di un fluido lungo tale linea.

Si riesce così a calcolare la velocità nella sezione del disco attuatore:

$$v = \frac{1}{2}(v_1 - v_2)$$

Si definisce “fattore di interferenza  $a$ ” il rapporto tra:

$$a = \frac{v_1 - v}{v_1} = 1 - \frac{v}{v_1}$$

Il fattore di induzione rappresenta la diminuzione di velocità davanti al disco.

Esprimendo le velocità  $v$  sul piano del disco e la velocità  $v_2$  in uscita dal tubo di flusso in funzione del fattore di induzione  $a$  e della velocità di ingresso  $v_1$  si ottiene:

$$v = v_1 - a \cdot v_1 = (1 - a)v_1$$

$$v_2 = 2 \cdot v - v_1 = 2 \cdot (1 - a)v_1 - v_1 = (1 - 2a)v_1$$

La potenza captata dalla pala può essere espressa come prodotto della forza esercitata dal vento  $F$  per la sua velocità incidente  $v$ :

$$P = F \cdot v = (\rho \cdot A \cdot v \cdot (v_1 - v_2)) \cdot v$$

Inserendo la velocità del disco attuatore:

$$P = \left( \rho \cdot A \cdot \frac{v_1 + v_2}{2} \right) \cdot \left( \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} \right)$$

La potenza che viene estratta dal vento è proporzionale alla portata massiccia che attraversa il rotore ed alla differenza di energia cinetica tra la sezione d'ingresso e la sezione di uscita. Scrivendo i valori delle velocità in relazione al fattore di interferenza la potenza diventa:

$$P = 2 \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \cdot a \cdot (1 - a)^2$$

Questo risultato permette di affermare che la potenza dipende:

- in modo proporzionale alla densità  $\rho$  della massa d'aria incidente, per cui si ha una riduzione di potenza estratta in climi caldi o in montagna;
- in modo proporzionale all'area  $A$  del rotore, per cui aumentando la lunghezza delle pale aumenta l'area del disco da esse “disegnato” in rotazione;
- dal cubo della velocità in ingresso del vento;
- dalla velocità del vento in uscita  $v_2$  attraverso il fattore di interferenza  $a$ .

In particolare, la teoria monodimensionale di Betz permette di calcolare un valore ottimale della velocità in uscita  $v_2$ , in corrispondenza della quale si ha la massima potenza estraibile. Tale valore si ottiene differenziando  $P$  rispetto ad  $a$  ed eguagliando a zero la derivata ottenuta:

$$\frac{\partial P}{\partial a} = 2 \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \cdot (3 \cdot a^2 - 4 \cdot a + 1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial a} = 0 \rightarrow 3 \cdot a^2 - 4 \cdot a + 1 = 0$$

Risolvendo tale equazione di II grado si ottengono due valori di  $a$ :

- 1 che non è accettabile perché si avrebbe una velocità del vento in uscita negativa.
- $1/3$  a cui corrisponde una velocità d' uscita pari ad un terzo di quella di ingresso.

Per  $a=1/3$  la potenza massima estratta dal vento sarà pari a:

$$P_{max} = \frac{8}{27} \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3$$

Si definisce il coefficiente di potenza  $C_p$  il rapporto tra la potenza estratta e la potenza disponibile del vento:

$$C_p = \frac{P}{P_{disp}} = \frac{2 \cdot \rho \cdot A \cdot v_1^3 \cdot a \cdot (1 - a)^2}{\frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v_1^3} = 4a(1 - a)^2$$

In corrispondenza di  $a=1/3$  si ha il massimo teorico  $C_p = \frac{16}{27} = 0,59$  che è il cosiddetto *limite di Betz* ed esprime il seguente concetto:

*“La massima portata che si può estrarre, in via teorica, da una corrente d' aria con un aerogeneratore ideale, non può superare il 59% della potenza disponibile del vento incidente”.*

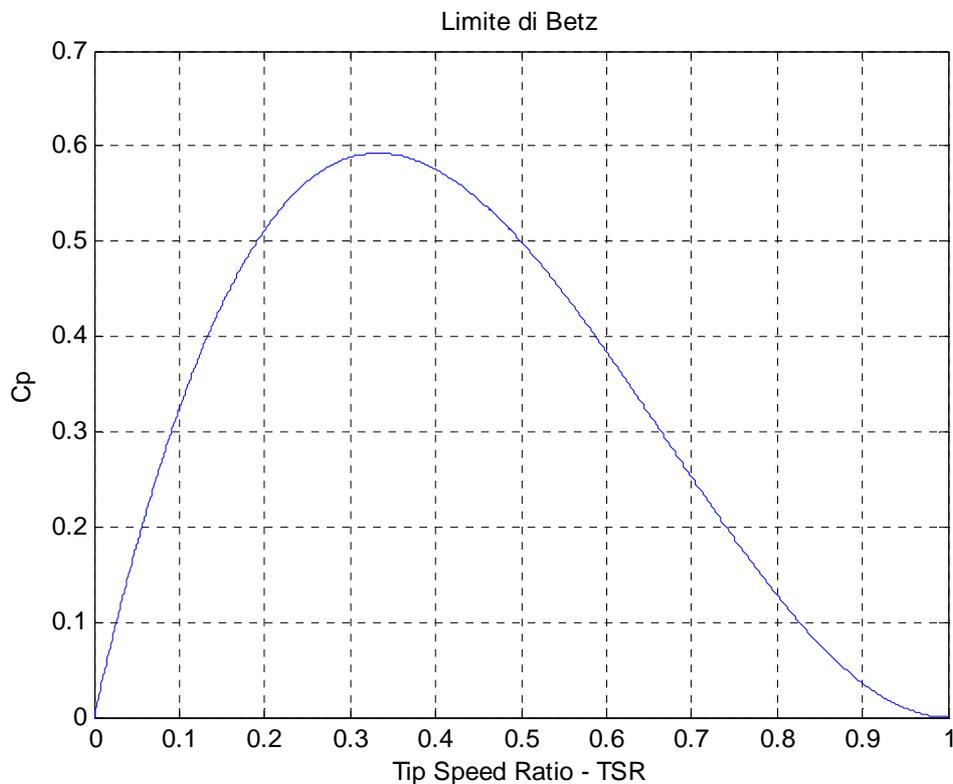


Grafico 1 :  $C_p$ - $a$  per la teoria di Betz

Il coefficiente di potenza  $C_p$  cresce all' aumentare del fattore di interferenza  $a$ , raggiunge il massimo in corrispondenza di  $a=1/3$  e poi decresce fino ad  $a=1/2$  in cui la velocità in uscita risulta nulla.

## 2.4. Teoria degli Elementi di Pala (BEM)

Le teorie proposte finora hanno analizzato globalmente il comportamento del rotore. Con la teoria BEM è possibile entrare nel dettaglio della macchina, andando a considerare l'interazione del flusso con i singoli elementi di pala. Gli elementi di pala altro non sono che delle sezioni conformate come dei profili alari, dunque se investiti da una corrente fluida producono una forza aerodinamica, scomponibile nella direzione perpendicolare al flusso incidente detta portanza  $L$ , e nella direzione parallela detta resistenza  $D$ . Portanza e resistenza aerodinamica sono responsabili della variazione della quantità di moto assiale e tangenziale per il flusso che attraversa l'anello di tubo di flusso spazzato dall'elemento della pala. Per valutare le performance aerodinamiche dei profili, in letteratura esistono modelli come il "single streamtube" e il "double multiple streamtube" che sono stati messi a confronto nel seguente lavoro di tesi.

## 2.5. Single streamtube model

Il modello single streamtube è stato inizialmente sviluppato da Templin per calcolare le performance aerodinamiche di una turbina ad asse verticale.

Questo modello è basato sull' approccio di eliche o aeromotori con dischi attuatori che assumono costante la velocità indotta e rivolta direttamente alla resistenza della turbina.

La velocità indotta è da assumere uguale nella parte controvento e sottovento del rotore.

In accordo con la teoria di Glauert, la velocità attraverso il disco dell' aeromotore  $V_D$  è il significato aritmetico della velocità indisturbata  $V_\infty$  e della velocità della scia.

$$D = 2\rho S V_D (V_\infty - V_D)$$

con:

$\rho =$  densità del fluido

$S =$  area del disco

Il coefficiente del disco  $C_{DD}$  basato sulla pressione dinamica e sull' area del disco viene definito come:

$$C_{DD} = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V_D^2 S}$$

che diventa sostituendo  $D$ :

$$C_{DD} = 4 \left( \frac{V_{\infty}}{V_D} - 1 \right)$$

$$\frac{V_{\infty}}{V_D} = 1 + \frac{1}{4} C_{DD}$$

Per gli scopi strutturali è più conveniente usare il coefficiente  $C_D$ , che è basato sulla pressione dinamica dell' ambiente:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2 S} = C_{DD} \left( \frac{V_D}{V_{\infty}} \right)^2 = \frac{C_{DD}}{\left( 1 + \frac{1}{4} C_{DD} \right)^2}$$

Avendo come dati iniziali la geometria della turbina, la velocità rotazionale  $\omega$  le performance aerodinamiche, la potenza delle turbine e il coefficiente Drag della turbina vengono calcolate attraverso la cosiddetta "Blade element theory".

In generale, si collega la forma curva del rotore di una turbina ad asse verticale a quello di una corda, unita all' asse verticale e assumendo per ipotesi le forze di gravità trascurabili.

Se si ipotizza un rapporto unitario tra l' altezza del rotore e il diametro, la forma può essere approssimata da una parabola con la seguente espressione:

$$\frac{r}{R} = 1 - \left( \frac{z}{H} \right)^2$$

che nella forma adimensionale diventa:

$$\delta = \tan^{-1} \left( \frac{1}{2\xi} \right)$$

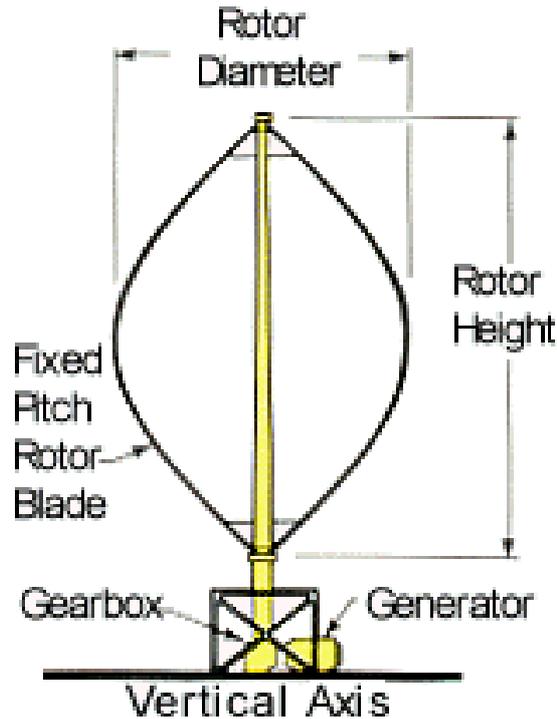


Fig.8 Curved blade vertical-axis wind turbine with two blades

Possiamo così ottenere la curvatura locale della pala.

Il coefficiente del rotore  $C_{DD}$  richiede l'integrazione delle forze della pala sulla superficie del disco, risolte nella direzione del vento.

Per calcolare le forze della pala sono richiesti l'angolo aerodinamico locale di attacco  $\alpha$  e la pressione dinamica relativa locale.

La risultante (vettore velocità), che serve per il movimento della pala, è risolta in due componenti perpendicolari: una parallela al flusso della pala, l'altra al piano dell'elemento di sostentamento. La componente di velocità parallela al flusso della pala non ha effetti sulle forze aerodinamiche.

L'espressione dell'angolo di attacco  $\alpha$  e la relativa pressione dinamica sono funzione solo dell'orientamento e della velocità della componente situata nel piano della pala e sono determinate da considerazioni geometriche:

$$\alpha = \tan^{-1} \left( \frac{\sin \theta}{\frac{r}{R} \cdot \frac{R\omega}{V_D} + \cos \theta} \right)$$

$$\frac{q}{\frac{1}{2} \rho V_D^2} = \left( \frac{r}{R} \frac{R\omega}{V_D} + \cos \theta \right)^2 + \sin^2 \theta \cos^2 \delta$$

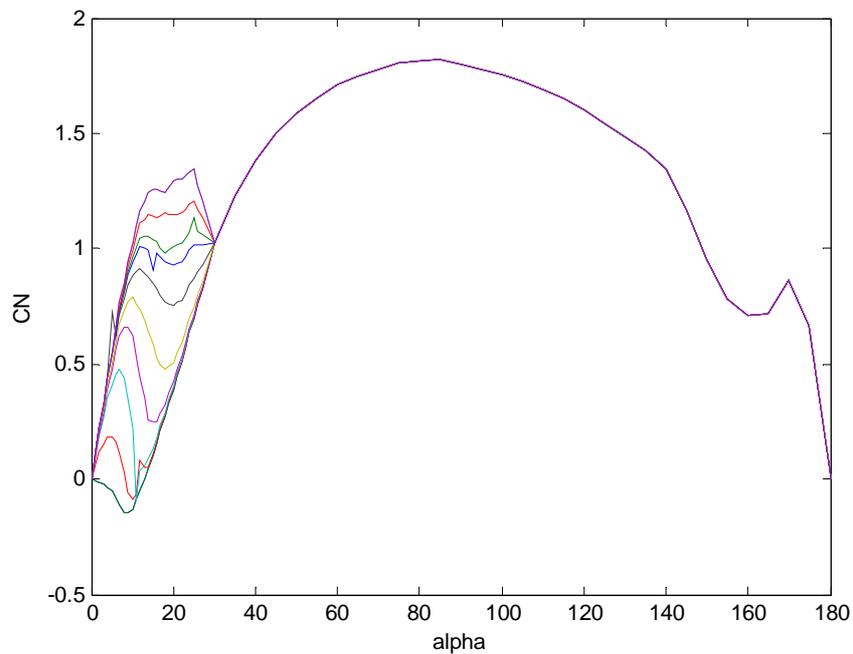
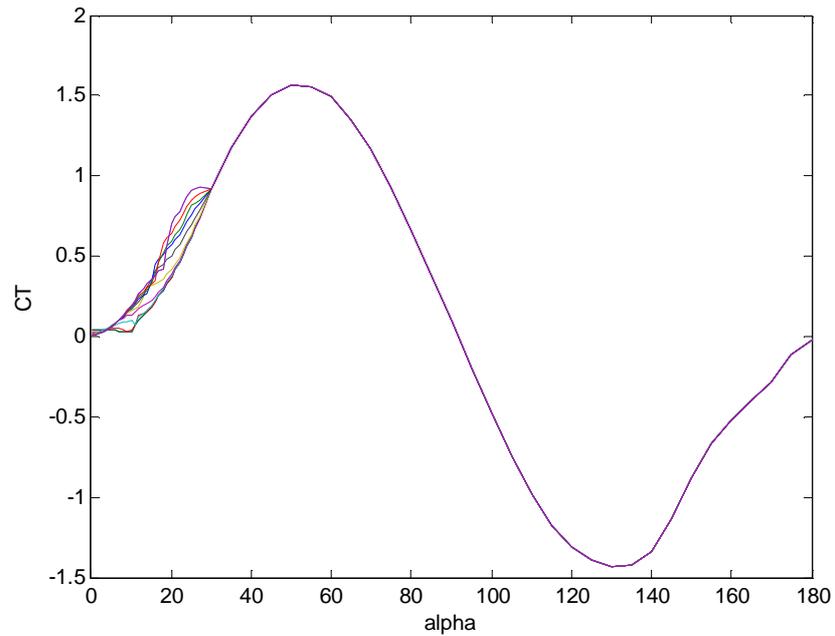
L'angolo azimutale della pala  $\theta$ , varia da 0 a 180° nella parte controvento e da 180° a 360° nella parte sottovento del rotore.

Assumendo che i coefficienti Lift and Drag sono funzioni dell' angolo di attacco, i coefficienti di forza normale e tangenziale sono dati da:

$$C_N = C_L \cos\alpha + C_D \sin\alpha$$

$$C_T = C_L \sin\alpha - C_D \cos\alpha$$

Per il profilo NACA 0018 l' andamento di  $C_T$  e  $C_N$  per i vari numeri di Reynolds hanno il seguente andamento:



Grafici 2: Andamento di  $C_T$  e  $C_N$  rispetto ad  $\alpha$

Una pala di corda  $C$  è soggetta ad una forza normale  $dN$  e tangenziale  $dT$ , date dalle relazioni:

$$dN = C_N q c dz \quad \text{and} \quad dT = C_T q c dz$$

dove  $q$  è la pressione dinamica locale relativa del vento.

Il Drag è dato da :

$$dD = dN \sin \theta - dT \cos \theta = qc(C_N \sin \theta - C_T \cos \theta) dz$$

e integrando rispetto a  $\theta$  ottengo il Drag effettivo:

$$D = \frac{Nc}{2\pi} \int_{\theta=0}^{2\pi} q(C_N \sin \theta - C_T \cos \theta) d\theta$$

E il  $C_{DD}$  diventa:

$$C_{DD} = \frac{3}{4} \cdot \frac{1}{2\pi} \frac{Nc}{R} \int_{\theta=0}^{2\pi} \frac{q}{\frac{1}{2} \rho V_D^2} (C_N \sin \theta - C_T \cos \theta) d\theta$$

Se si definisce la funzione sotto integrale data da:

$$F_1 = \left( \frac{q}{\frac{1}{2} \rho V_D^2} \right) (C_N \sin \theta - C_T \cos \theta)$$

Si può riscrivere:

$$C_{DD} = \frac{3}{4} \frac{Nc}{R} \bar{F}$$

Si calcola infine il valore del TSR ( tip-speed ratio ):

$$X_{EQ} = \frac{R\omega}{V_\infty} = \frac{R\omega}{V_D} \left( \frac{1}{1 + \frac{1}{4} C_{DD}} \right)$$

Il coefficiente di potenza  $C_p$  può essere definito come il rapporto tra la potenza  $P$  e la massima potenza  $P_{max}$  e diventa:

$$C_p = \frac{P}{P_{max}} = \frac{27}{32} \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{Nc}{R} \cdot \frac{R\omega}{V_D} \left( \frac{V_D}{V_\infty} \right)^3 \int_{\theta=0}^{2\pi} \left( \frac{q}{\frac{1}{2} \rho V_D^2} \right) C_T \frac{r}{R} d\theta$$

Sostituendo:

$$F_2 = \left( \frac{q}{\frac{1}{2} \rho V_D^2} \right) C_T \frac{r}{R}$$

### 2.5.1. Risultati ottenuti per il Single Streamtube Model

Con questo semplice modello è stato scritto uno script in matlab che permettesse di valutare i parametri in gioco per il profilo alare usato all' interno del progetto TREO:

- NACA4415

Prima di ricercare il  $C_p$  massimo valutato per il profilo scelta, si è provveduto a validare il codice attraverso i risultati presenti in letteratura. Nello specifico si sono confrontati i valori del NACA0012 con quelli ottenuti da Paraschivoiu. Per il profilo si è proceduto leggendo i valori  $C_d$  e  $C_l$  catalogati in funzione di  $\alpha$  e  $Re$ . I due valori vengono calcolati con un interpolazione lineare in base agli angoli di attacco calcolati e il numero di Reynolds.

Dati della turbina PARASCHIVOIU:

- raggio rotore [m]  
 $R = 1.83$ ;
- altezza rotore [m]  
 $H = 1.83$ ;
- area rotore [ $m^2$ ]  
 $S = 2.667 * R * H$ ;
- numero pale [/]  
 $N = 3$ ;
- profilo NACA 0012
- larghezza di corda:  
 $c = 0.1525$  m ;

Dati per lo script matlab:

```
% -----  
% definizione parametri geometrici  
% -----  
  
% raggio rotore [m]  
R = 1.83;  
% altezza rotore [m]  
H = 1.83;  
% area rotore [m^2]  
S = 2.667 * R * H;  
% numero lame [/]  
N = 3;  
% profilo NACA 0012  
  
% height over chord ratio []  
hoc = 0.18;  
% area over chord^2 []  
aoc2 = 0.0613;  
% airfoil chord[m]  
c = 0.1525;  
% altezza airfoil[m]  
h = c * hoc;  
% area airfoil[m^2]
```

```

a = c^2 * aoc2;

%-----
% -----
% parametri di flusso
%-----

% densità fluido [kg/m^3]
rho = 1.293;
% viscosità dinamica [kg/ms]
mu = 1.78e-5;
% viscosità cinematica [m^2/s]
nu = mu / rho;
Re0=4e4;

```

Grafico di confronto:

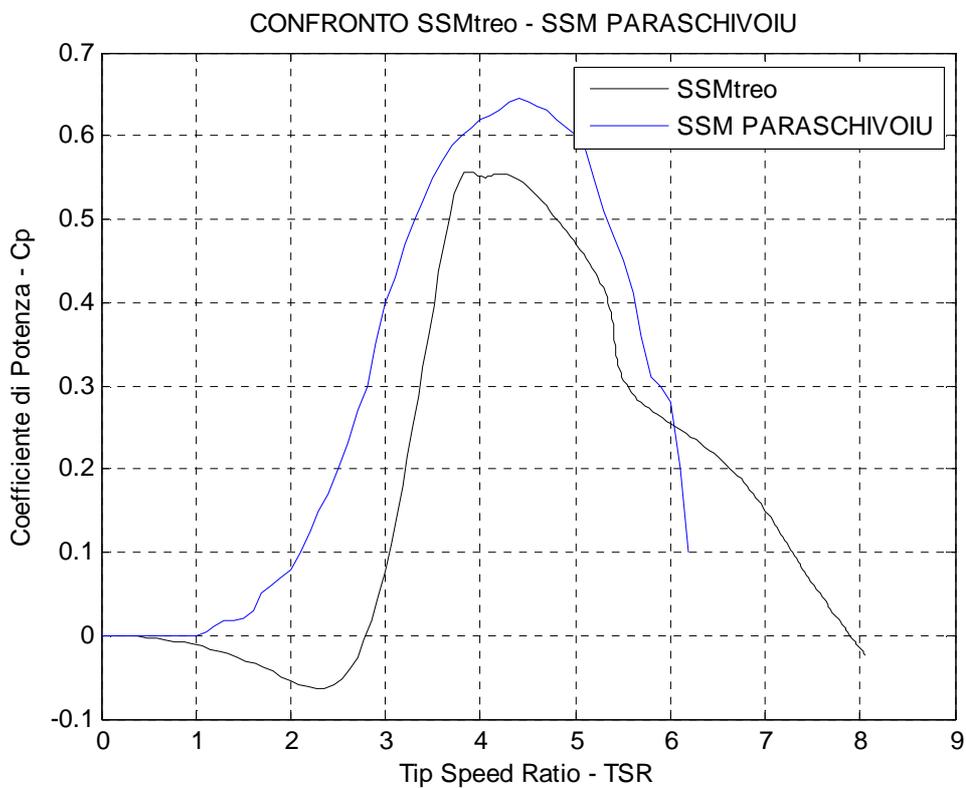


Grafico 3: Confronto SSM-TREO e SSM-Paraschivoiu

Il codice si considera validato, perché l' andamento è pressochè identico, il Cp massimo si trova, per tutti e due i codici, all' incirca ad un valore del TSR pari a 4. Le differenze sono da attribuirsi al fatto che non si conoscono i reali valori ottenuti da Paraschivoiu ma si sono inseriti manualmente osservando il grafico presente nel libro "Wind Turbine Design". Inoltre i due profili sono diversi, in quanto si sono messe in relazione le due solidità radiali che sono adimensionali:  $Nc/R$ . Si può osservare come per Paraschivoiu viene superato enormemente il limite di Betz, argomento discusso nel capitolo seguente.

Il risultato ottenuto invece per il profilo NACA4415, utilizzato per il progetto TREO:

Dati della turbina TREO:

- raggio rotore [m]  
 $R = 0.5$ ;
- altezza rotore [m]  
 $H = 1.5$ ;
- area rotore [ $m^2$ ]  
 $S = 2.667 * R * H$ ;
- numero pale [/]  
 $N = 3$ ;
- profilo NACA 4415

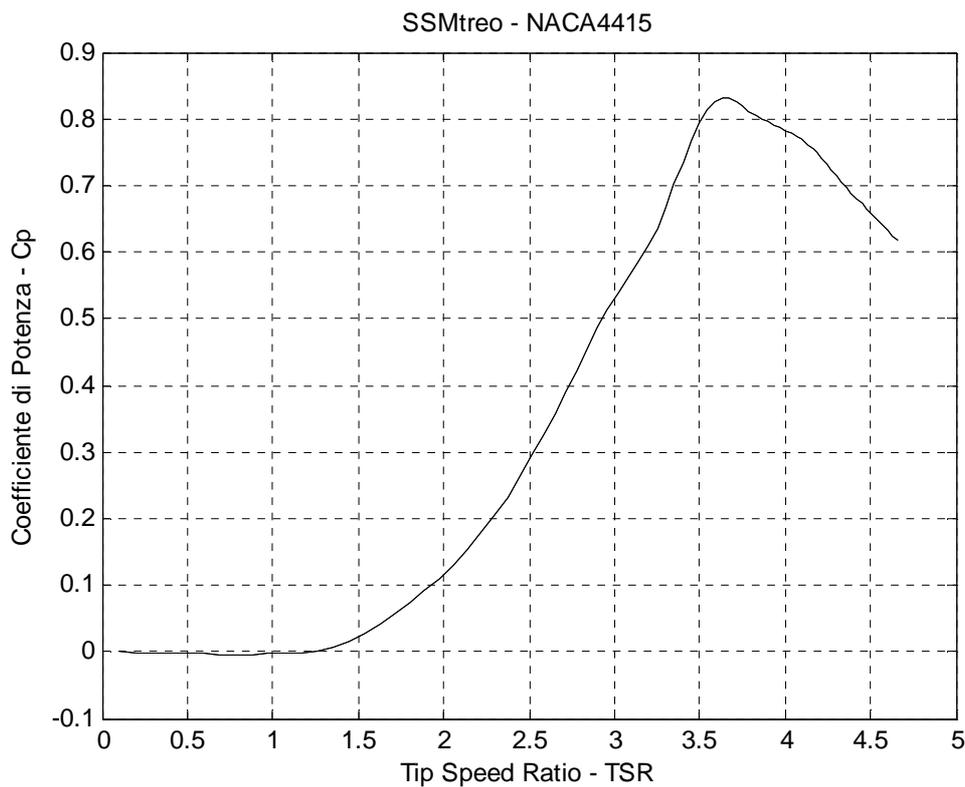


Grafico 4:  $C_p$ -TSR NACA4415

Il single streamtube model fornisce un'idea sul valore massimo del coefficiente di potenza raggiunto dai due profili NACA e può indicare preliminarmente qual è il profilo alare migliore. Lo svantaggio di utilizzare questo tipo di metodo è ritenere le velocità del flusso e le posizioni delle pale costanti. Infatti una turbina ad asse verticale dovrebbe interagire con il flusso due volte (sopravvento e sottovento). Per questo motivo sono stati introdotti successivamente da Lapin e da Strickland il "Double Multiple Streamtube model" e il "Multiple streamtube model".

## 2.6. Multiple Streamtubes Model

Per superare i limiti del modello di Templin, nel 1975 Strickland ha introdotto il Multiple Streamtubes Model per avere una previsione più accurata delle variazioni imposte dalla velocità del vento sul rotore Darrieus. Si considera il rotore diviso in una serie di tubi di flusso adiacenti.

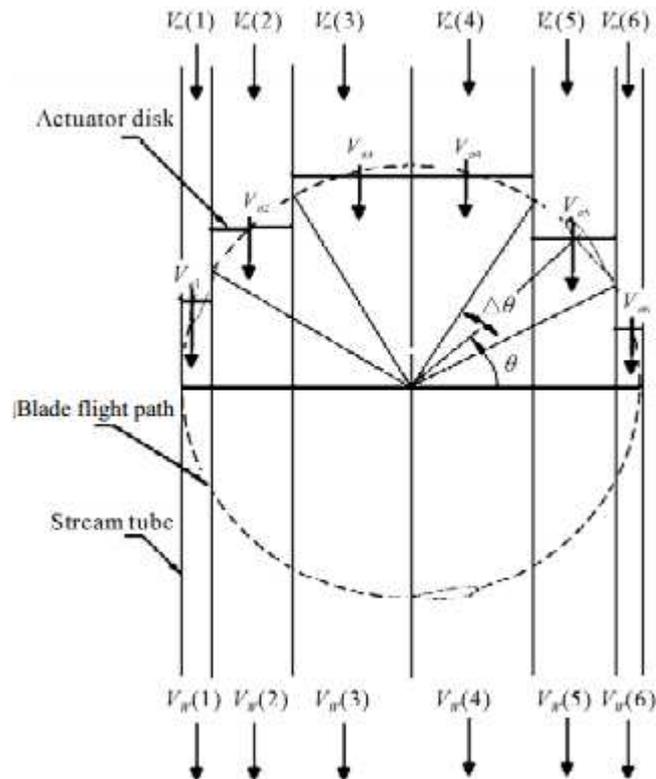


Fig. 9 Multiple stream tube model with 6 stream tubes divided by uniform  $\Delta\theta$ .

## 2.7. Double Multiple Streamtubes Model

I limiti del single streamtube model sono di ipotizzare un flusso unico, senza considerare le due parti sottovento e sopravento del rotore. Si procede quindi valutando lo stesso parametro aerodinamico con il double multiple streamtube model creato da Paraschivoiu per un rotore Darrieus.

Nel DMSM l'angolo di attacco diventa:

$$\alpha = \arctg \left[ \frac{V_b \sin \theta}{V_b \cos \theta + \omega R} \right]$$

E la velocità relativa alla pala può essere scritta come:

$$W = \frac{V_b \sin \theta}{\sin \alpha}$$

Si definisce il fattore di induzione assiale:

$$a = 1 - \frac{V_b}{V_\infty}$$

Che unito alla definizione della forza adimensionale longitudinale:

$$F_x^* = \frac{Nc}{8\pi r} \left(\frac{w}{V_\infty}\right)^2 \left(C_N - C_T \frac{\cos \theta}{\sin \theta}\right)$$

Forma le basi per la soluzione iterativa:

$$a = F_x^* + a^2$$

Per valutare il fattore di induzione assiale è stata implementata nel codice la correzione di Glauert per valori maggiori di 0,5.

Dopo aver ottenuto il coefficiente di induzione per le due parti sottovento e sopravento si procede con il calcolare per ogni parte il valore del torcente e il rispettivo coefficiente di potenza.

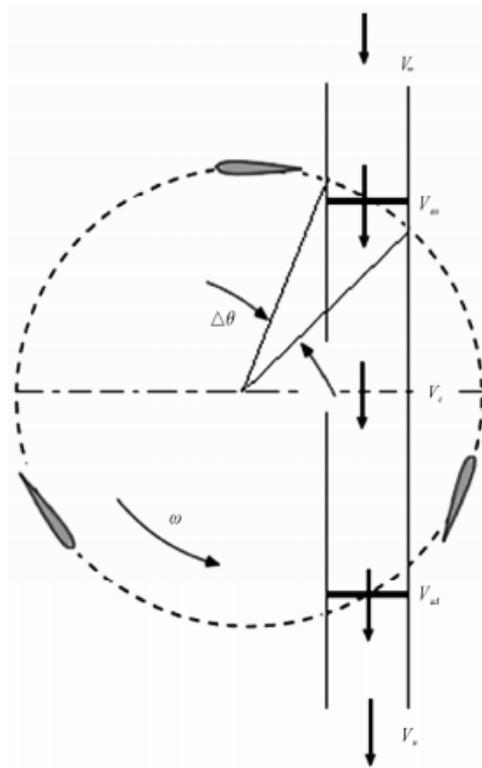


Fig. 10 DMST with actuator discs and velocity vectors  $V_{au}$  is induced velocity at upstream actuator disc,  $V_e$  is equilibrium value, and  $V_{ad}$  induced velocity at downstream actuator disc.

Di seguito si inserisce lo script matlab del codice creato per valutare le performance aerodinamiche del rotore TREO:

```
Vmin=1;      %minimum inlet [m/s]
d_V=.1;     %step through inlets
Vmax=15;    %maximum inlet

Smin= 5; %20; %minimum turbine speed [RPM]
Smax=1000; %maximum turbine speed
d_S=Smax/100; %step through speeds

d_theta=2*pi/36; %cycle angular resolution [rad]

R=0.5;      %turbine (.5=max, in transient I_var use) radius [m]
c=.094;     %blade chord [m]
N=3;       %no. of blades
sigmR=N*c/R; %radial solidity of machine
H=1.5;     %height(length) of H-Darrieus turbine [m]
d_H=H/10;  %blade element resolution, is dummy for H-Darrieus,
           %is effective for troposkien shape

% densità fluido [kg/m^3]
rho = 1.293;
% viscosità dinamica [kg/ms]
mu = 1.78e-5;
% viscosità cinematica [m^2/s]
nu = mu / rho;
```

Prima di procedere alla discussione sui risultati ottenuti è utile presentare i valori ottenuti con la sperimentazione in galleria del vento.

### 3. Dati Sperimentali

Il presente sottocapitolo contiene i risultati delle analisi sperimentali condotte presso il CRIACIV ( Inter-University research Centre on Building Aerodynamics and Wind Engineering) dell' Università di Firenze, in merito alla valutazione sperimentale del comportamento aerodinamico di generatori eolici inseriti nel progetto di ricerca TREO.

Le prove riguardano test su vari prototipi di turbine eoliche di tipo Darrieus al fine di valutare le relative prestazioni ed efficienze, più specificatamente, le finalità delle prove condotte sugli aerogeneratori possono essere riassunte nei seguenti punti:

- Definizione delle curve di potenza assorbita
- Definizione delle curve caratteristiche di potenza
- Valutazione delle condizioni di avvio (Start-Up)
- Valutazione della risposta ai carichi eolici transitori (Transitorio Zero e Transitorio Raffica)

Nel presente lavoro di tesi si inseriscono i risultati del modello TREO utilizzato per validare i codici SSM e DMSM.

#### 3.1. Descrizione dei prototipi

I tests hanno interessato vari prototipi di turbine di tipo small VAWT del tipo H Darrieus (DAR). In particolare, sono stati sperimentati 6 rotor con 3 pale, realizzati con profili NACA asimmetrici in fibra di carbonio ottenuti con due valori della corda di 4.7 e 9.4 cm, due diametri 50 e 100 cm e due diverse lunghezze delle pale 75 e 150 cm. La tabella 1 riporta i parametri caratteristici delle turbine testate, le varie configurazioni di prova e le relative condizioni del flusso di prova.

Il modello sottolineato in rosso nella tabella sottostante è quello utilizzato dal codice.

Modello	Diametro [cm]	Corda [mm]	Lung. Pala [mm]	Flusso di test
<b>TREO 94x1500 R50</b>	<b>100</b>	<b>94</b>	<b>1500</b>	<b>Laminare, Turbolento</b>
TREO 94x750 R50	100	94	750	Laminare
TREO 94x750 R25	50	94	750	Laminare
TREO 47x750 R25	50	47	750	Laminare
TREO 94x1500 R25	50	94	1500	Laminare, Turbolento
TREO 94x1500 R25 EP*	50	94	1500	Laminare
<b>EP* Turbina provvista di dischi di confinamento (End Plates).</b>				

Tab. 1 Caratteristiche delle turbine testate.

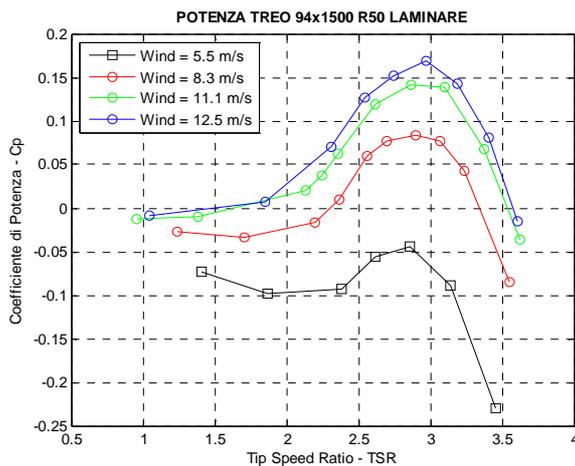


a) TREO 94x1500 R50

Fig. 11 Prototipo

## 3.2. Risultati sperimentali

### 3.2.1. Curve di potenza lorde rotori TREO



**Modello:** TREO 94x1500 R50  
**Flusso:** Laminare ( $I_t < 1\%$ )  
**Data:** 13 set di misure, 10 punti,  $t=60$  s,  $f=2000$  Hz

Le figure precedenti riportano i valori dei coefficienti di potenza ( $C_p$ ) misurati a varie velocità del vento per il modello TREO esaminato. Ai dati di coppia e velocità di rotazione ottenuti dalla campagna sperimentale non è stata apportata alcuna correzione, al di là della semplice adimensionalizzazione della potenza in termini di  $C_p$  e della velocità di rotazione in termini di TSR; sono state inoltre aggiunte delle linee per mostrare con maggiore chiarezza la tendenza dei dati.

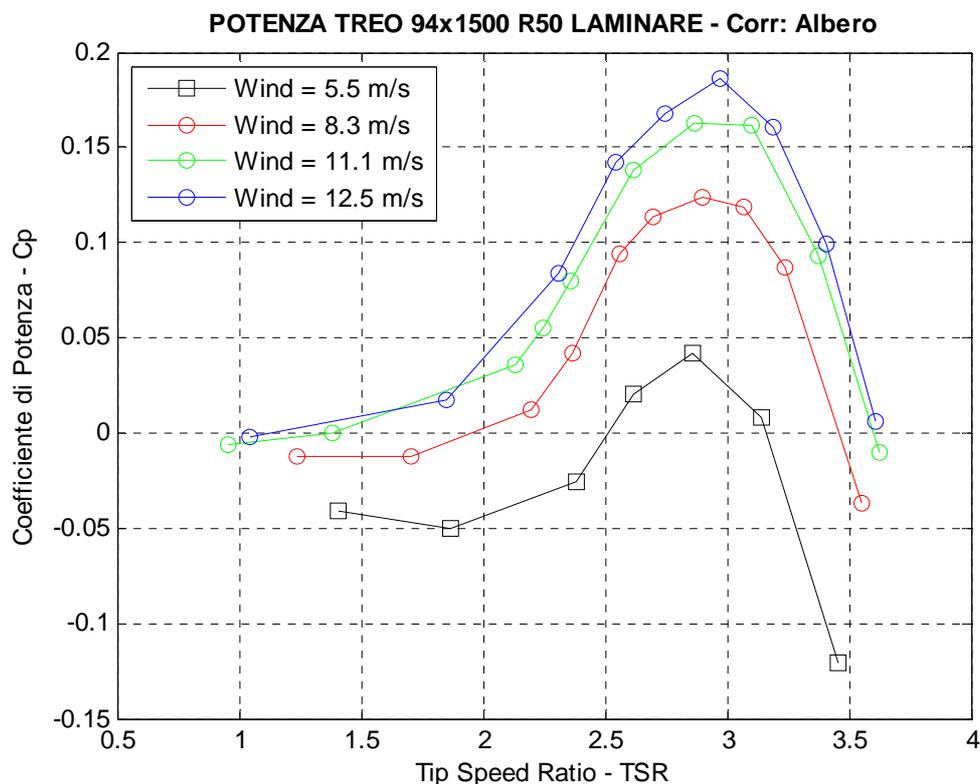
La migliore prestazione del modello TREO 94x1500 R50 è  $C_p = 0.17$  in corrispondenza di TSR di 3.

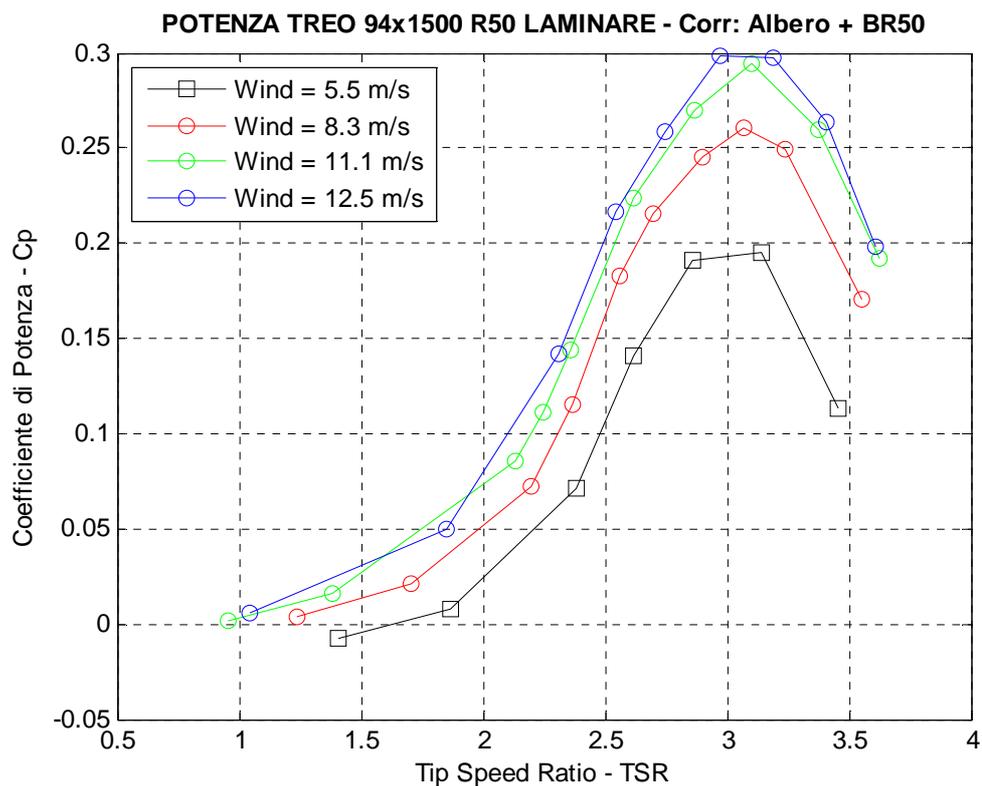
### 3.2.2. Curve di potenza nette rotori TREO

Per confrontare i risultati ottenuti dal codice con quelli offerti dalla sperimentazione era necessario correggere i valori di  $C_p$  misurati per depurarli dalle resistenze aerodinamiche estranee ai profili NACA. Sono state utilizzate le curve nette dei rotori TREO. Per ottenerle sono state apportate, sempre all' interno dello studio sperimentale due correzioni, citate in questa tesi per spiegare i valori  $C_p$  utilizzati:

- Una correzione 1, nella quale si va a correggere la potenza andando a depurare i valori di coppia misurati dal torsiometro con quelli ottenuti dalla curva di assorbimento relativa al solo albero calettato (*Corr. Albero*);
- Una correzione 2, nella quale si va a correggere la potenza andando a depurare non solo i contributi di coppia assorbiti dall'albero ma anche dai braccetti profilati, per mezzo delle curve di assorbimento braccetti R50 e R25. In questo modo è in qualche modo possibile quantificare la potenza imputabile alla sola aerodinamica dei profili NACA (*Corr. Albero + BR25/BR50*).

Chiaramente l'applicazione della seconda correzione conduce a valori del coefficiente di potenza ( $C_p$ ) più elevati rispetto a quella relativa al solo albero calettato. Si riportano di seguito i grafici delle curve nette, riprese in seguito per la validazione dei codici.





Lo studio sperimentale ha permesso di stabilire che la miglior configurazione in termini energetici è sicuramente la TREO 94x1500 R50 in quanto riesce a fornire valori elevati del coefficiente di potenza anche a bassi valori di velocità del vento. La turbina inoltre si avvia ad una velocità del vento relativamente bassa (4.5 m/s) e presenta anche una buona risposta al transitorio. Chiaramente viste le dimensioni del rotore non devono essere di certo trascurati gli effetti dovuti al bloccaggio che influenzano i risultati.

## 4. Confronto tra i dati sperimentali e IL DMSM

Per confrontare i risultati del codice con quelli della sperimentazione si è scelta la turbina con le prestazioni migliori.

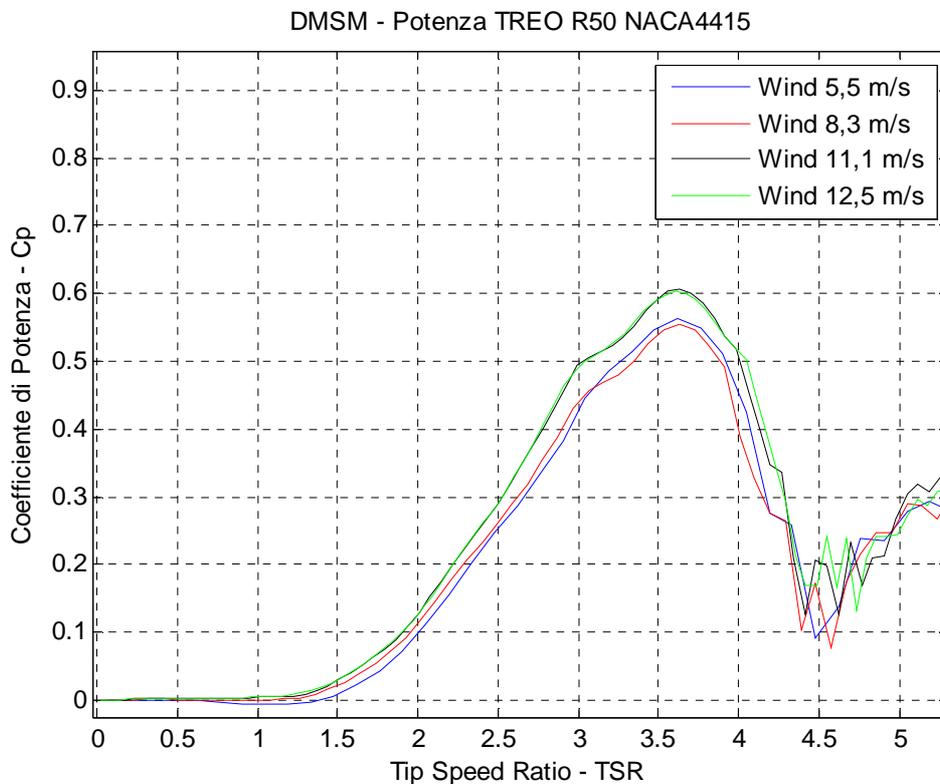
Dati della turbina TREO:

- $R = 0,5$  m;
- $H = 1,5$  m;
- Chord =  $0,094$  m;
- $N$  ( numero di pale) = 3;

Per il codice invece, particolare attenzione è stata rivolta al limite di Betz. In letteratura la definizione è la seguente:

*“La massima portata che si può estrarre, in via teorica, da una corrente d’ aria con un aerogeneratore ideale, non può superare il 59% della potenza disponibile del vento incidente”.*

Una riflessione è stata rivolta nei confronti di tale limite perché all’ interno del codice non si sapeva dove poteva essere implementato. Sono state svolte delle prove, inserendolo prima alla fine dello script matlab, come sembra fare nei suoi studi sperimentali Paraschivoiu, riducendo del 59% i valori ottenuti del coefficiente di potenza. Si sono ottenuti i seguenti risultati:



Come si può osservare dal grafico il coefficiente di potenza supera leggermente il limite di Betz e i risultati ottenuti sono da ritenersi non attendibili perché una turbina con le seguenti caratteristiche difficilmente supererà un valore del coefficiente di potenza pari a 0,3-0,4. Il secondo tentativo è stato eseguito inserendo il limite all' inizio del codice, ovvero sia diminuendo del 59% il vento incidente, come suggerirebbe la definizione teorica.

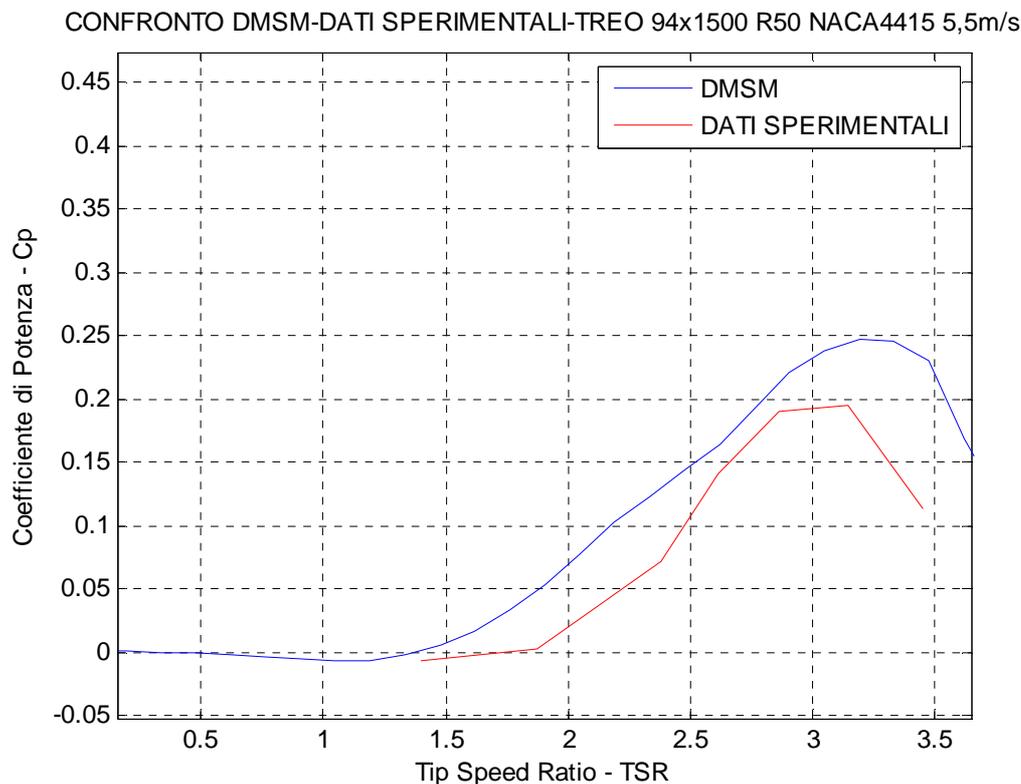
Nello specifico, all' interno dello script matlab del DMSM, riportato nell' appendice B, le velocità in entrata del vento comprese tra i due valori:

$V_{inf} = 1 \text{ m/s}$   
 $V_{max} = 15 \text{ m/s}$

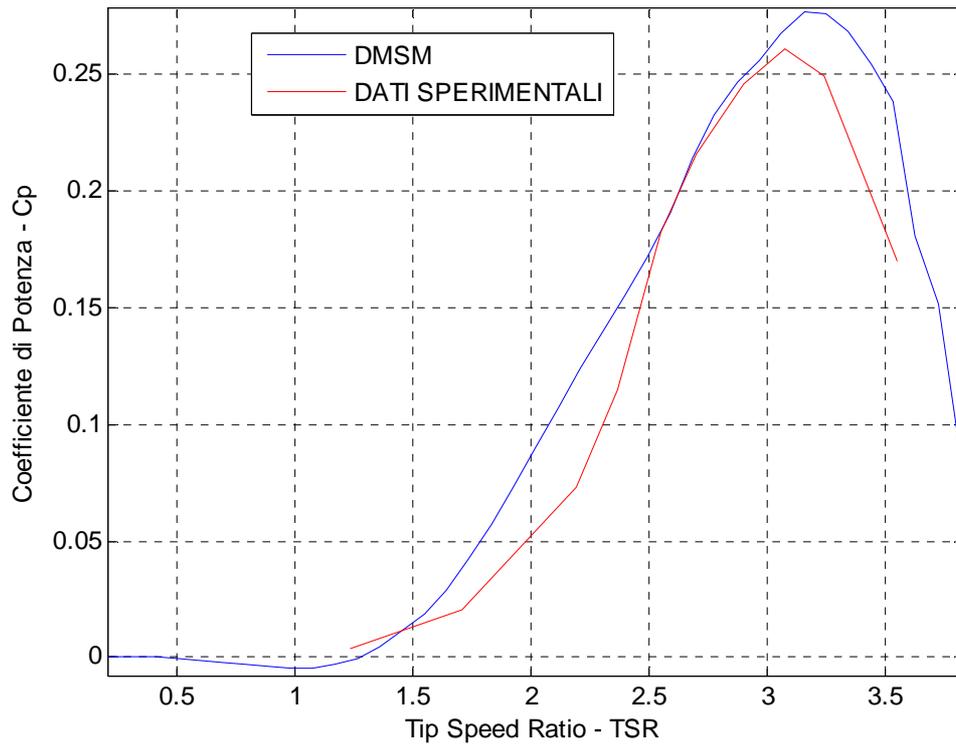
Sono state ridotte al valore:

$V = 0.59 * (V_{inf} < V < V_{max})$

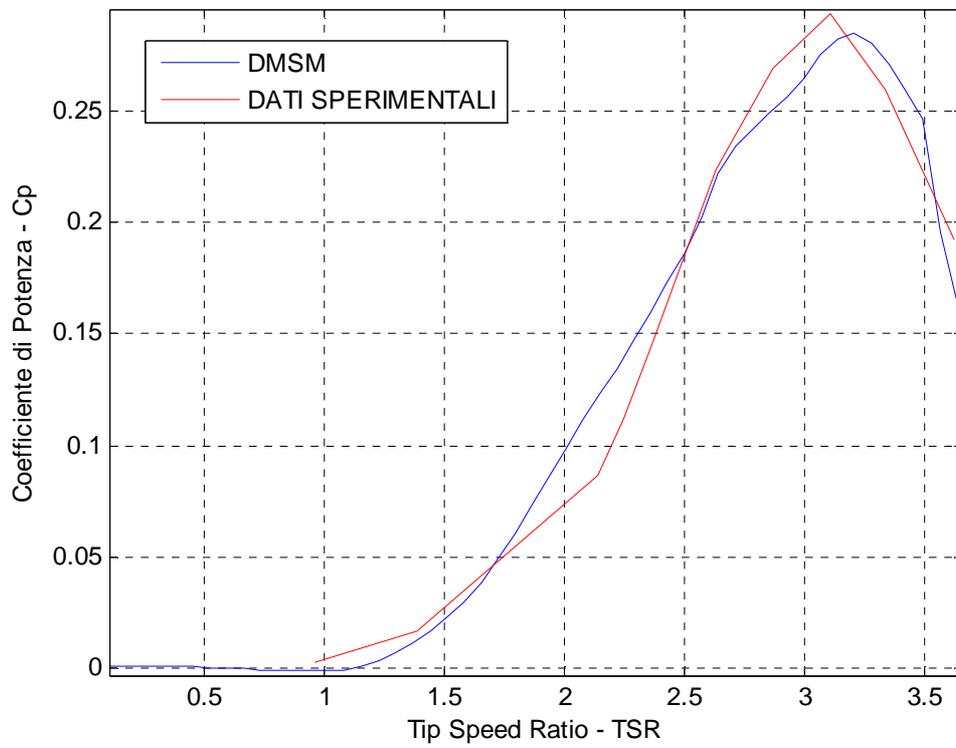
I risultati ottenuti con questo tentativo sono quelli che consentono di validare il codice e di confrontarlo con i dati sperimentali.



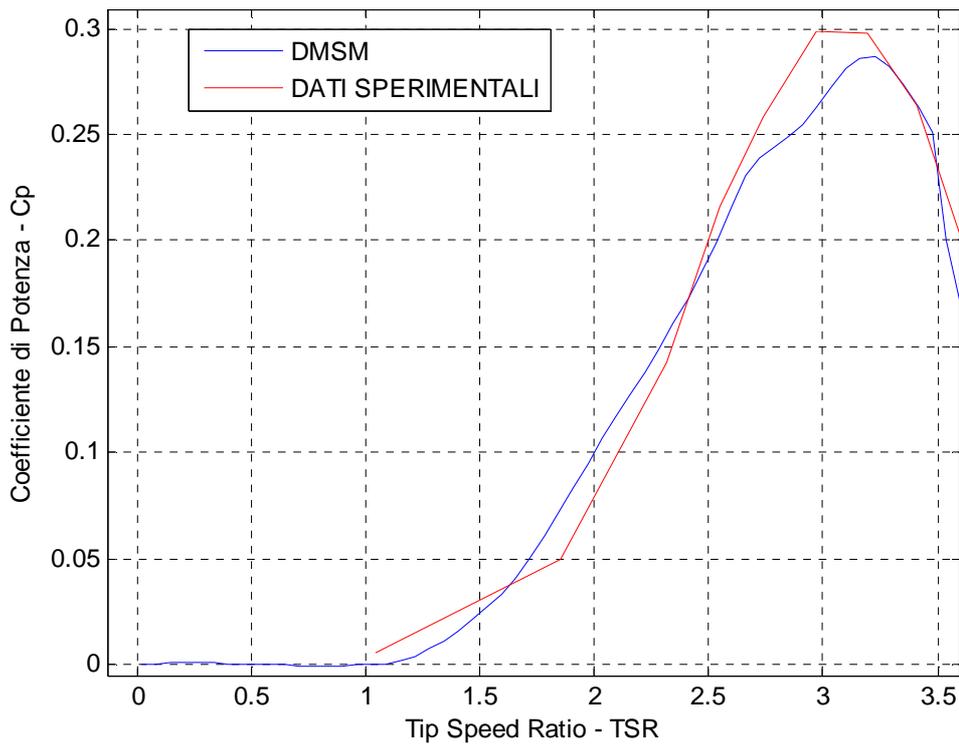
CONFRONTO DMSM-DATI SPERIMENTALI-TREO 94x1500 R50 NACA4415 8,3m/s



CONFRONTO DMSM-DATI SPERIMENTALI-TREO 94x1500 R50 NACA4415 11,1m/s



CONFRONTO DMSM-DATI SPERIMENTALI-TREO 94x1500 R50 NACA4415 12,5m/s



Osservazioni:

Si può notare come i risultati ottenuti dal codice DMSM e sperimentali siano quasi identici:

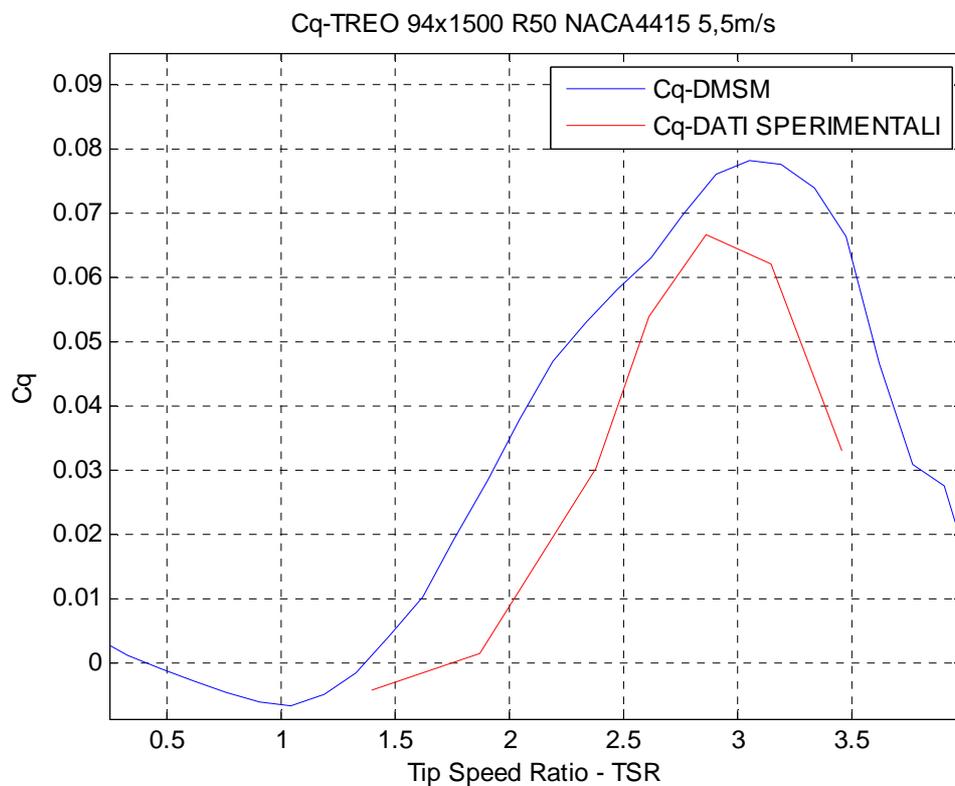
- Il Cp massimo si evince allo stesso TSR compreso tra 3 e 3,5.
- I valori del Cp massimo ottenuti, pur ritendendoli risultati di tutto rispetto, non superano lo 0,3 com' era prevedibile per una turbina con queste caratteristiche
- Bisognerebbe inserire nel codice gli effetti mancanti che interferiscono con le prestazioni della turbina o cercare un coefficiente che possa indicare quanto il codice si distacchi dalla realtà ma i risultati così vicini fanno sì che il codice approssimi bene la realtà e possa essere usato per le analisi successive.
- Molto probabilmente gli effetti mancanti elencati nei paragrafi seguenti non riportano valori significanti per turbine di questa taglia.

### Curve TSR-Cq:

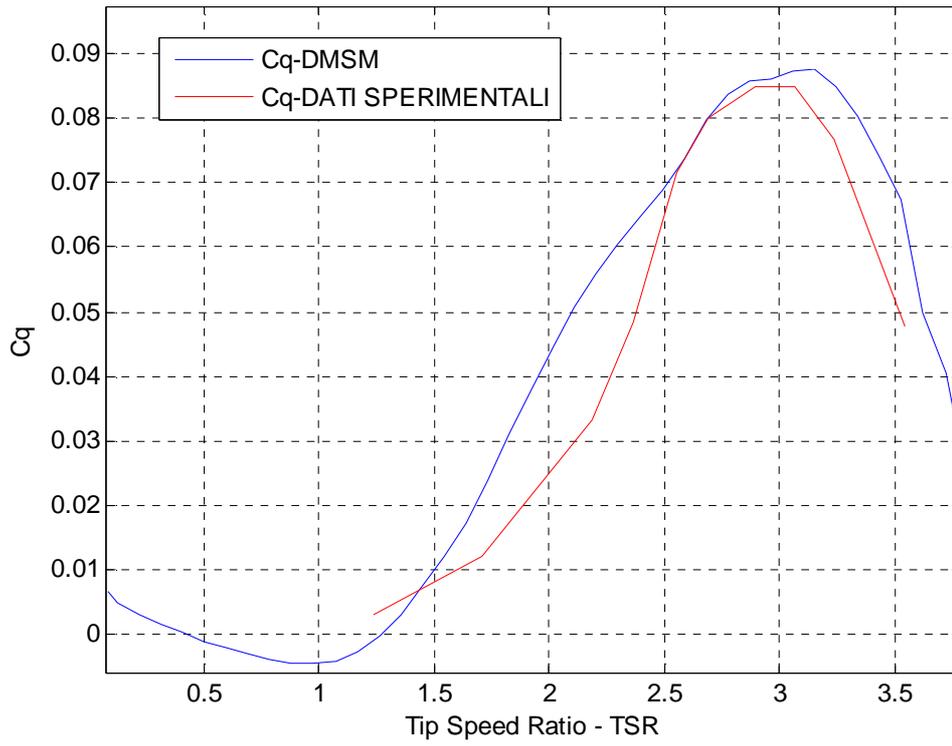
Le curve Cq-TSR sono state calcolate nel presente lavoro di tesi, e confrontate, per le varie velocità in ingresso con i risultati sperimentali. Essendo il coefficiente torque pari a:

$$C_q = \frac{C_p}{TSR}$$

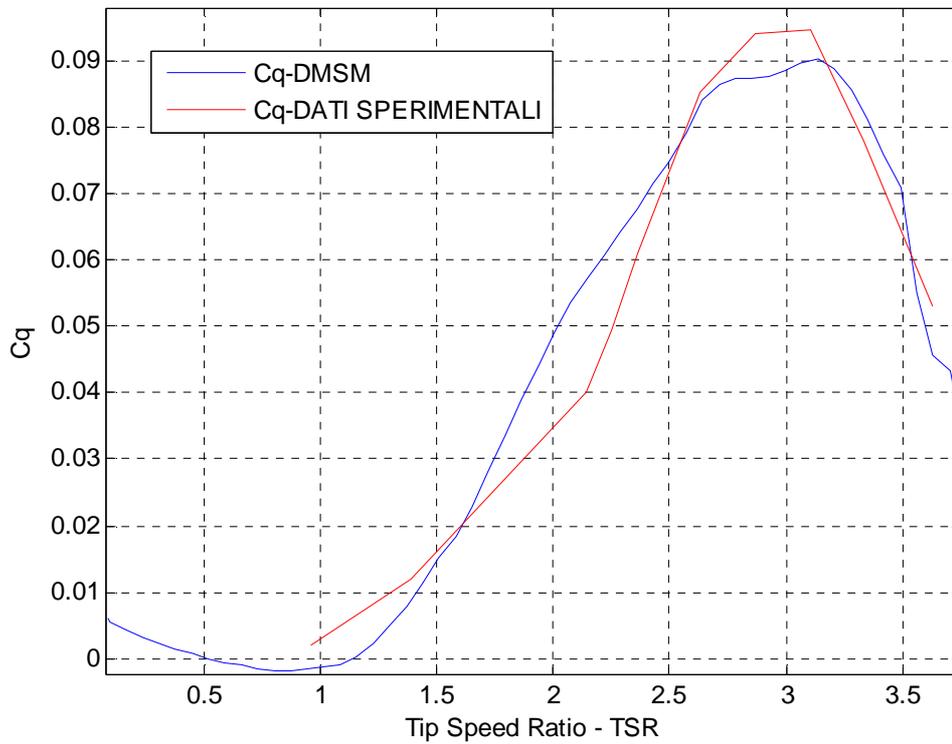
Si ottiene il valore del TSR per cui Cp è massimo e il valore per cui la turbina è in grado di auto avviarsi e cominciare a generare potenza. Come si può notare per il rotore TREO 94x1500 di raggio pari a 50 cm, il Cq e il Cp massimi si ottengono per un range di TSR compreso tra 2,5 e 3,5 e la turbina inizia a generare potenza per un TSR pari a 1,2 circa.



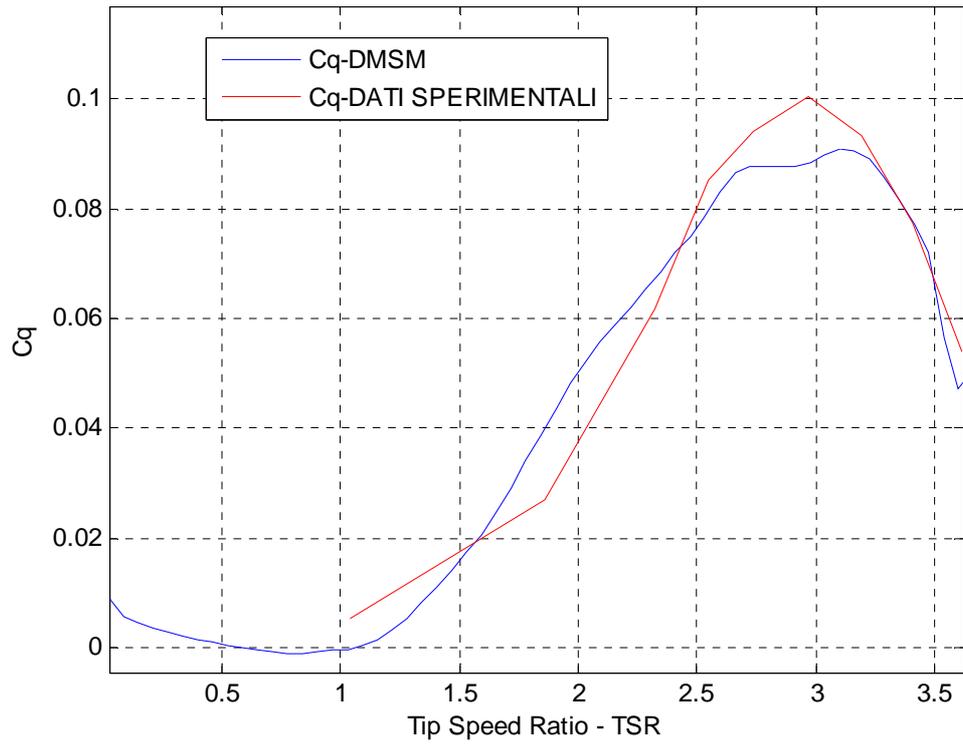
Cq-TREO 94x1500 R50 NACA4415 8,3m/s



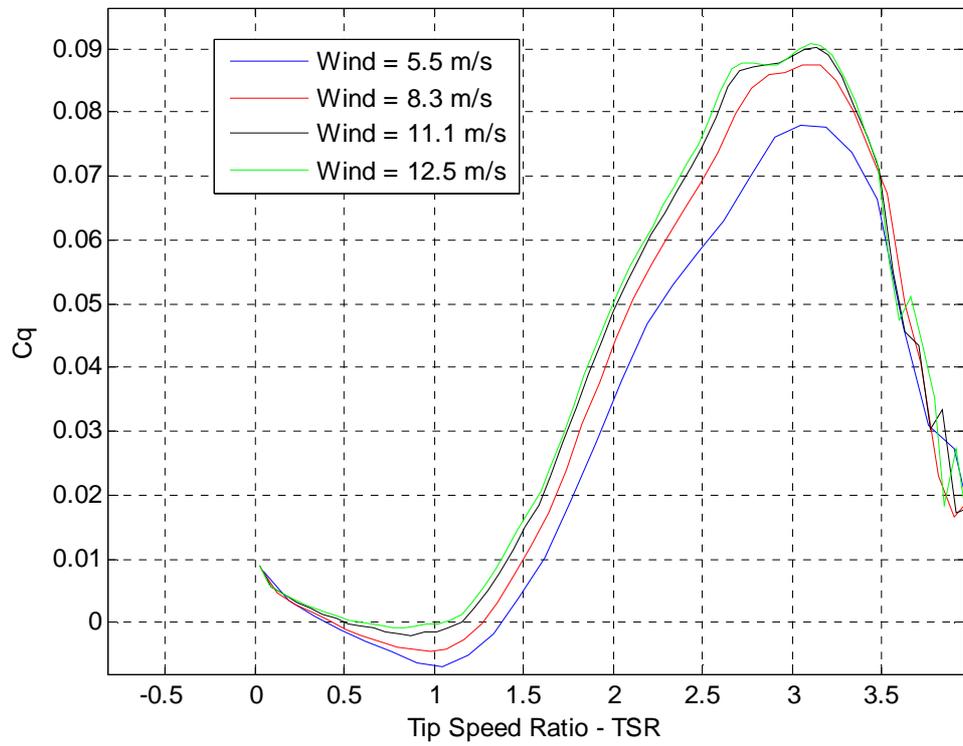
Cq-TREO 94x1500 R50 NACA4415 11,1m/s



Cq-TREO 94x1500 R50 NACA4415 12,5m/s



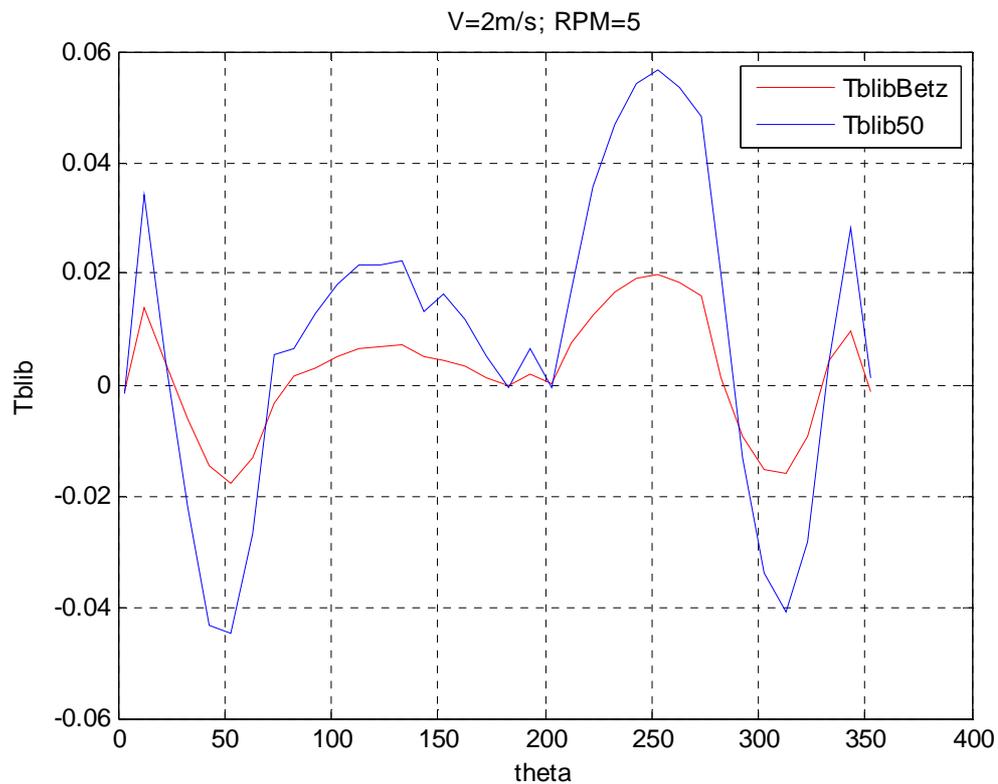
Cq TREO 94x1500 R50 NACA4415

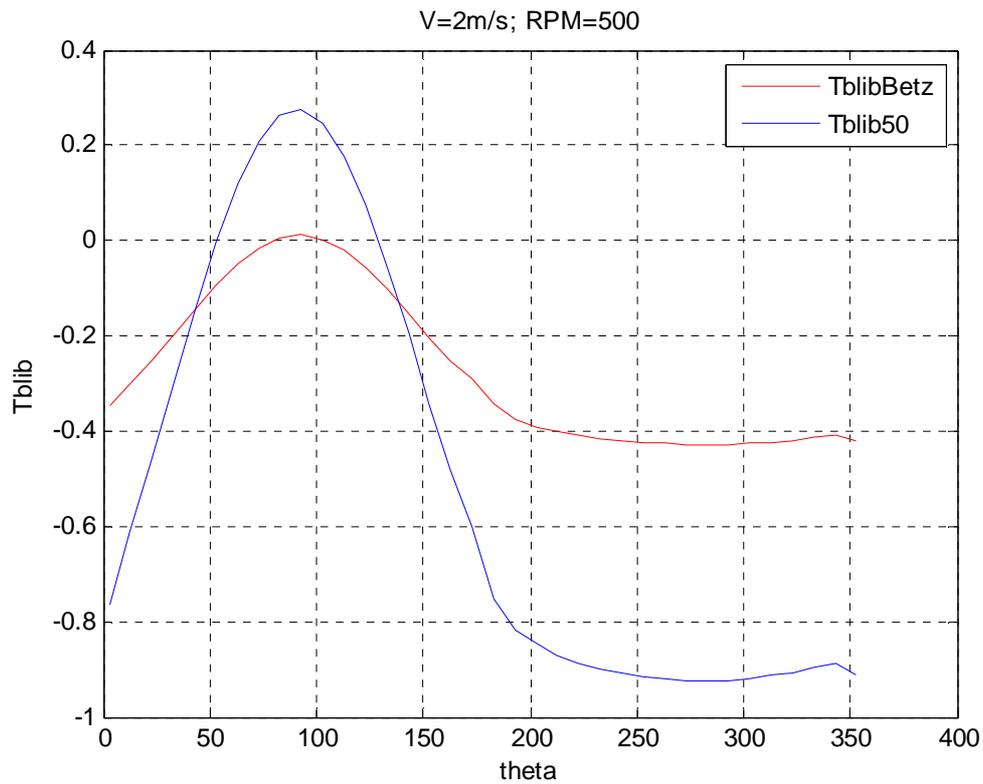
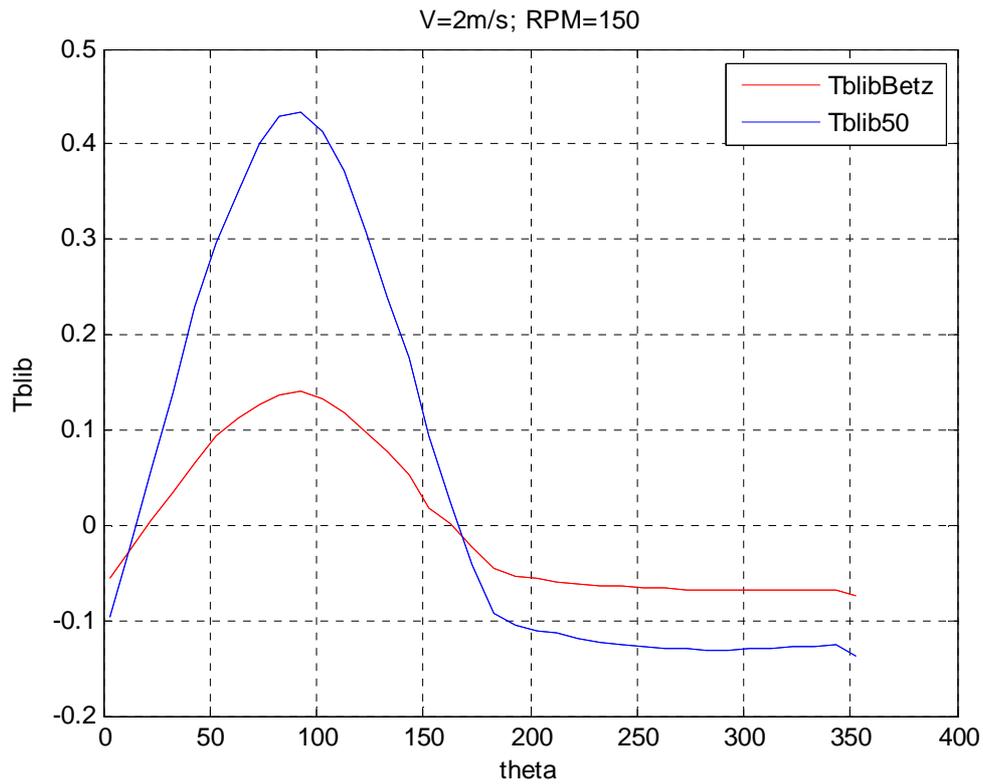


#### 4.1. Conseguenze del limite di Betz all' interno del codice BEM

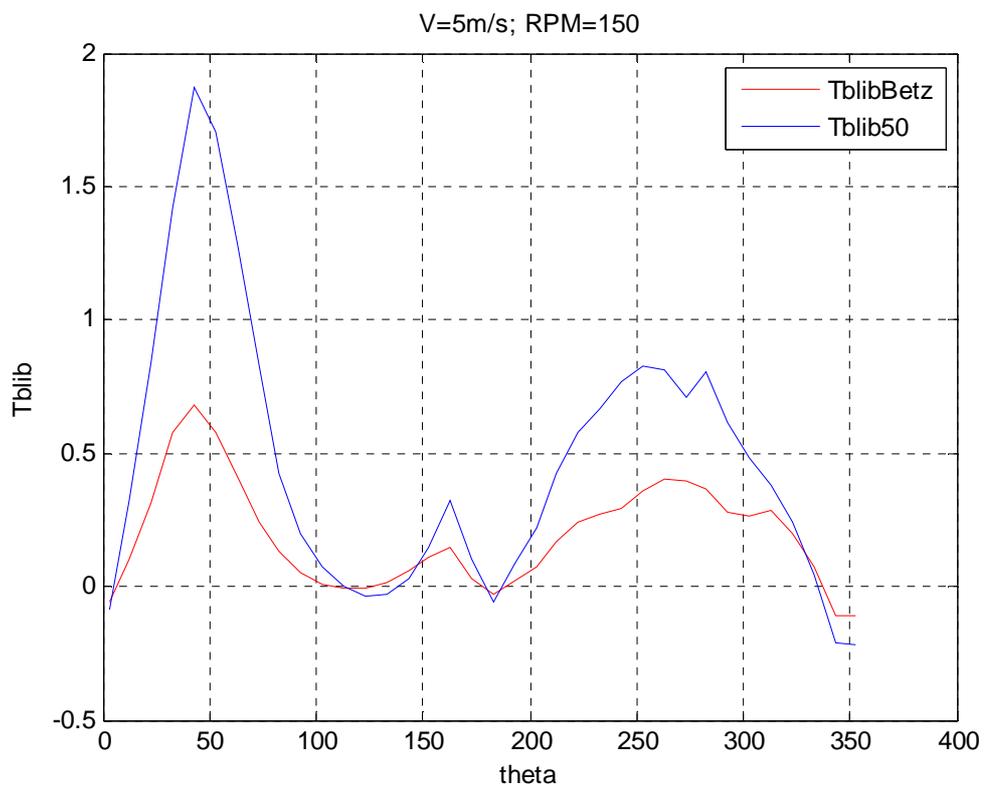
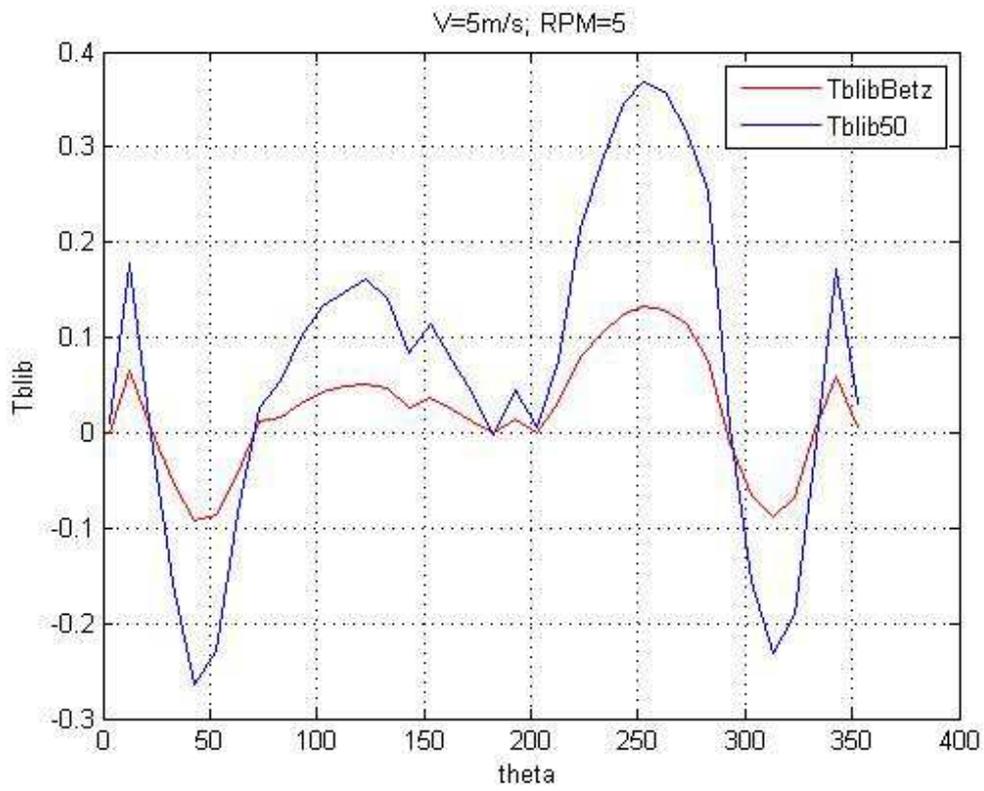
Per valutare gli effetti che poteva produrre l' inserimento di un limite così restrittivo all' interno del codice utilizzato per calcolare l' aerodinamica di una VAWT, sono stati messi a confronto i valori della coppia torcente, chiamati nello script " Tblib", ottenuti con il codice con e senza Betz, per varie velocità del vento e per vari RPM della turbina.

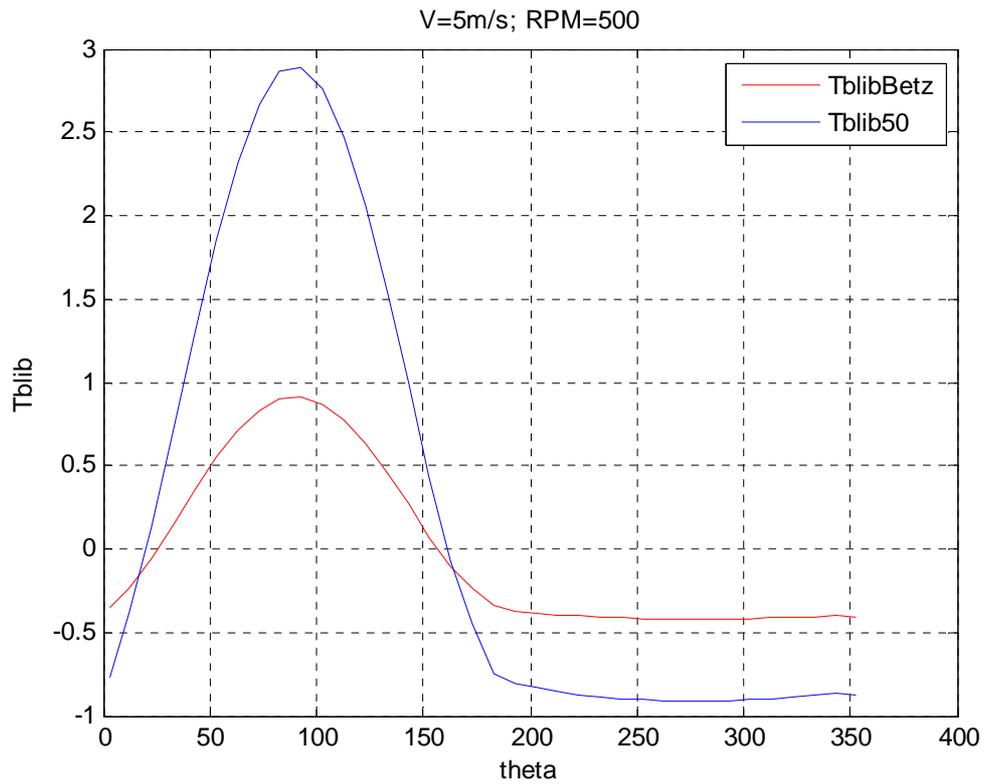
- Velocità 2 m/s:



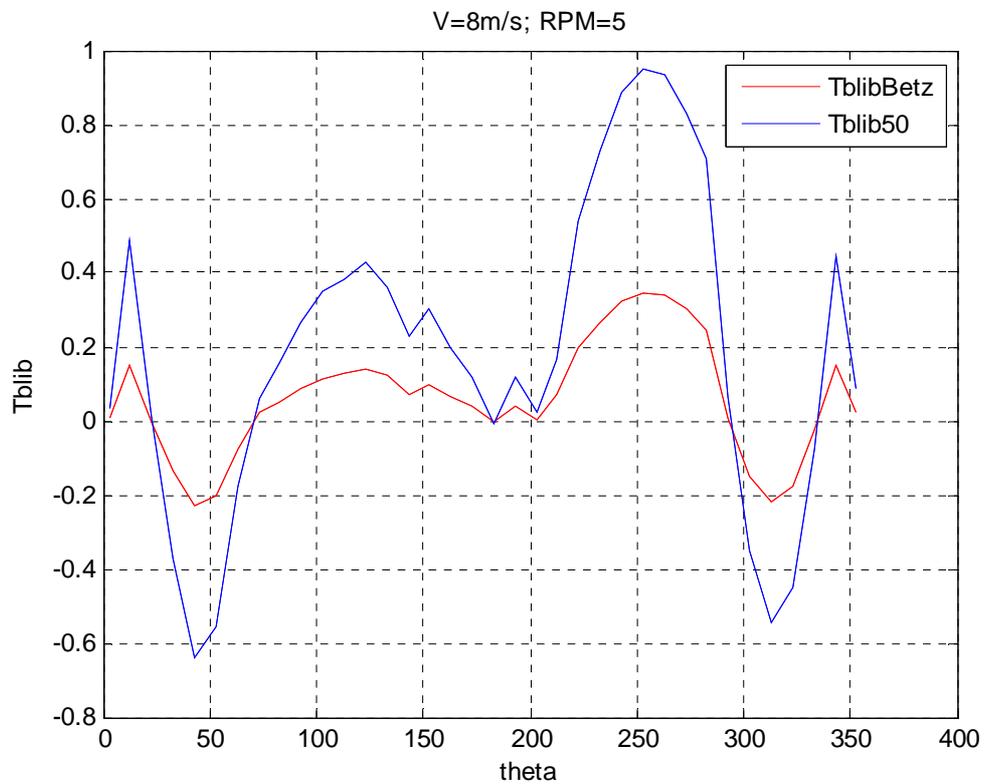


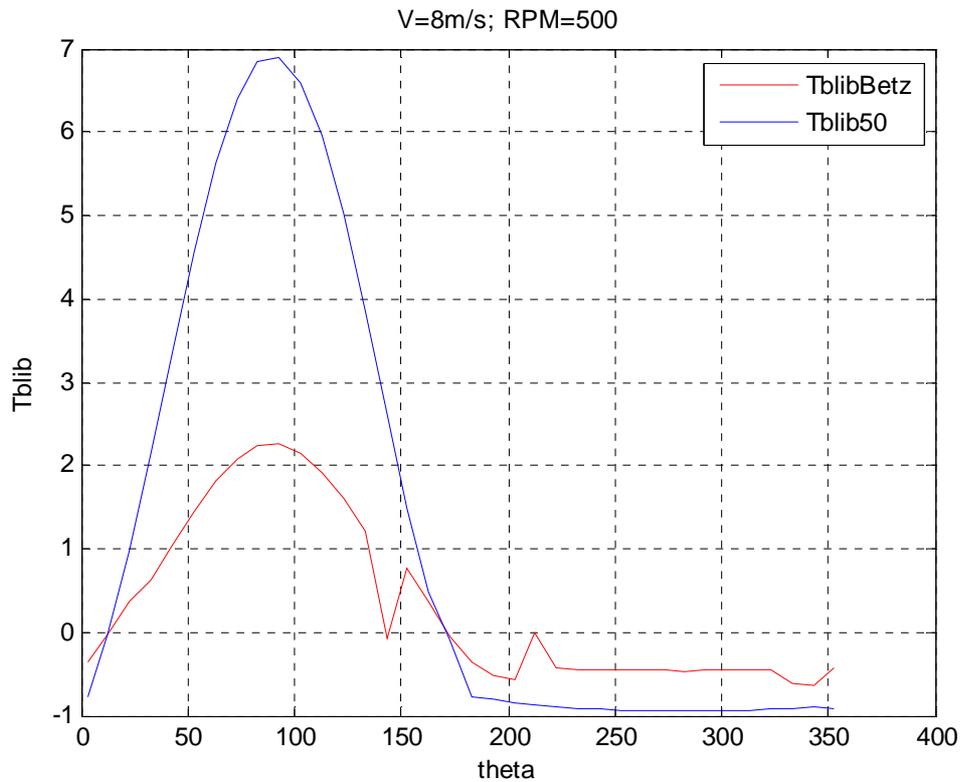
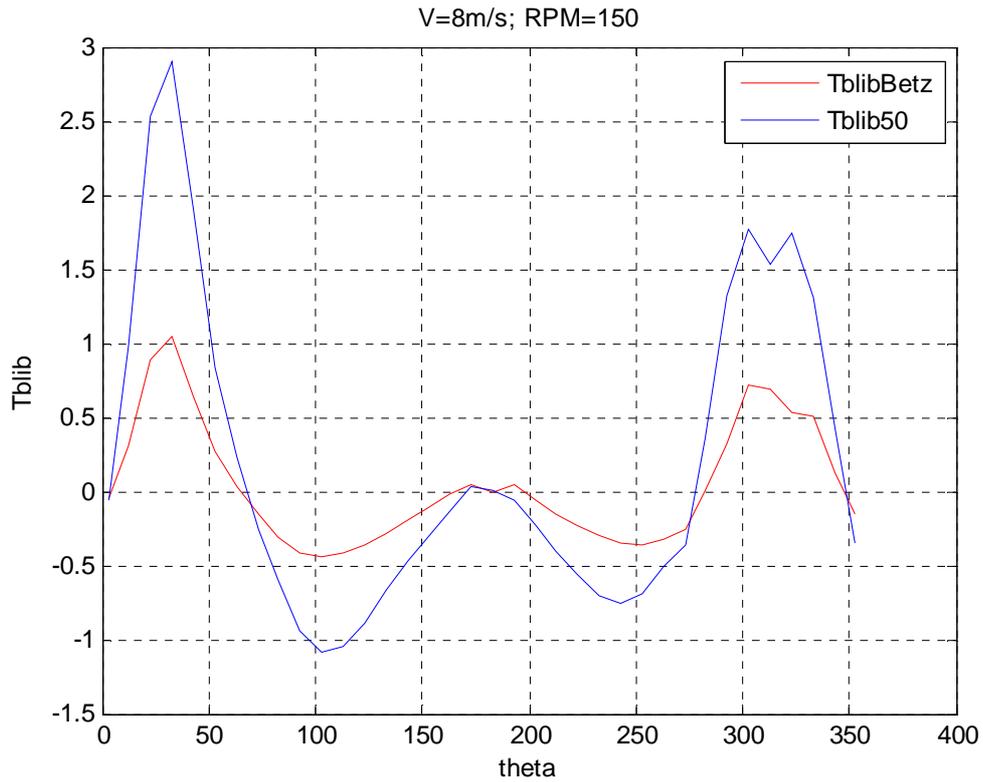
- Velocità 5 m/s:





- Velocità 8 m/s:



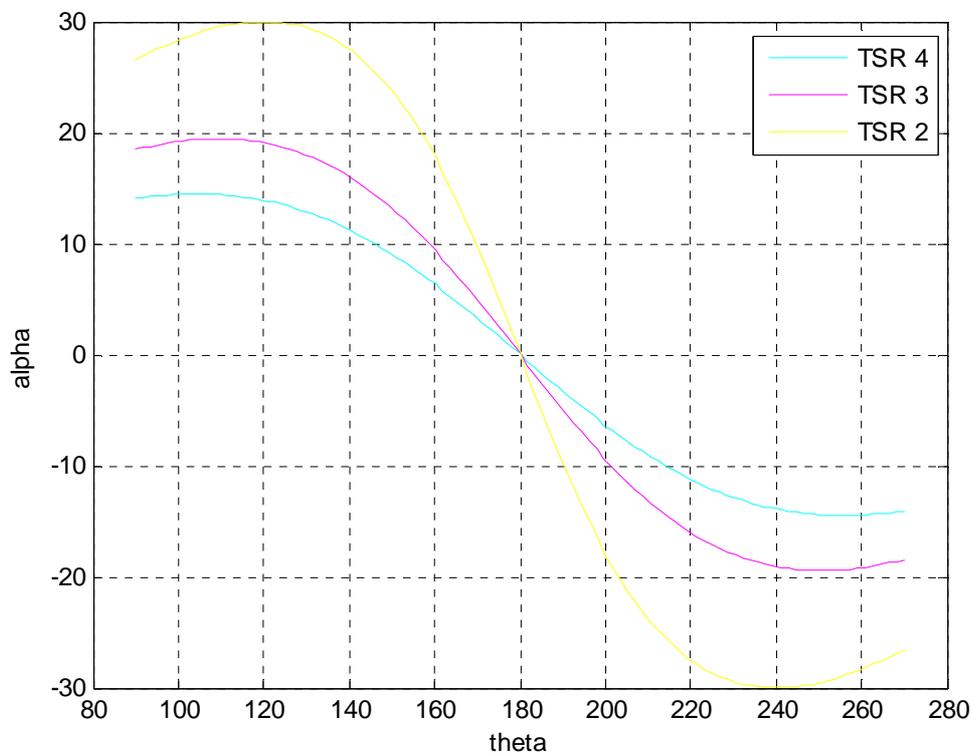


Il codice DMSM si può considerare validato perché l'andamento per le due librerie di valori ottenute è simile, ma ovviamente molto più bassa per quanto riguarda i risultati ottenuti con Betz, come ci si aspettava.

## 4.2. Considerazioni dei parametri che governano il problema: $Re$ , $a$ , Angolo di attacco, Tip-speed ratio

### 4.2.1. Angolo di attacco $\alpha$

Al crescere della velocità di rotazione, il massimo angolo di attacco raggiungibile diminuisce, come si vede nell'immagine sottostante: maggiore è la velocità di rotazione, minore sarà l'influenza della velocità del flusso indisturbato sulla velocità effettiva vista dalla pala. Inoltre poiché nella parte sopravento le pale sottraggono energia al flusso e lo rallentano, le pale nella parte sottovento avranno un angolo d'attacco minore, in quanto sarà minore la velocità locale del vento che si somma alla velocità tangenziale delle pale.



Generalmente, raggiunto un certo angolo d'attacco, il flusso sul dorso di un profilo tenderà a separarsi. La separazione inizia al bordo d'uscita e si sposta in avanti al crescere dell'angolo. Aumentando ulteriormente l'angolo il punto di separazione si sposta in avanti fino a raggiungere il bordo d'attacco: questo fenomeno viene chiamato superstallo. Se il profilo è in superstallo, questa condizione viene mantenuta per una frazione di tempo, anche se l'angolo d'attacco diminuisce, formando un ciclo di isteresi. L'angolo al quale si verifica il superstallo dipende dal numero di Reynolds e dalla curvatura del bordo d'attacco. Questo fenomeno ha una forte influenza negativa sulle prestazioni del profilo, perché durante il ciclo di isteresi la portanza si riduce sensibilmente e la resistenza rimane elevata.

## 4.2.2. Numero di Reynolds

Un fattore importante per le prestazioni di piccole turbine Numero di Reynolds è l'intervallo dei bassi numeri di Reynolds ( $< 10^6$ ) in cui esse operano. In aerodinamica sono stati condotti molti studi per velivoli che operano a numeri di Reynolds superiori a  $3 \cdot 10^6$ . Il coefficiente di massima portanza e l'angolo di stallo decrescono sensibilmente al diminuire del numero di Reynolds. A bassi numeri di Reynolds è spesso presente una tipica struttura chiamata bolla di separazione laminare. Quando lo strato limite laminare non è più in grado di seguire il contorno del profilo a causa del gradiente avverso di pressione, e le instabilità aerodinamiche non si sono sviluppate sufficientemente per avviare la transizione turbolenta, si verifica la separazione dello strato limite. A questo punto il flusso può diventare turbolento e riattaccarsi al profilo, formando la cosiddetta bolla di separazione laminare. Questo fenomeno va ad alterare la forma del flusso intorno al profilo, riducendone le prestazioni e addirittura in alcuni casi la bolla può estendersi oltre il bordo d'uscita del profilo perché il gradiente di pressione avversa è troppo elevato per far sì che lo strato turbolento possa riattaccarsi. Nelle figure da 12 a 14 sono mostrati gli effetti del numero di Reynolds sulle caratteristiche aerodinamiche di un profilo, in particolare nella Figura 14 si vede come per il profilo NACA 0018 il coefficiente di massima portanza e l'angolo di stallo decrescono sensibilmente al diminuire del numero di Reynolds.

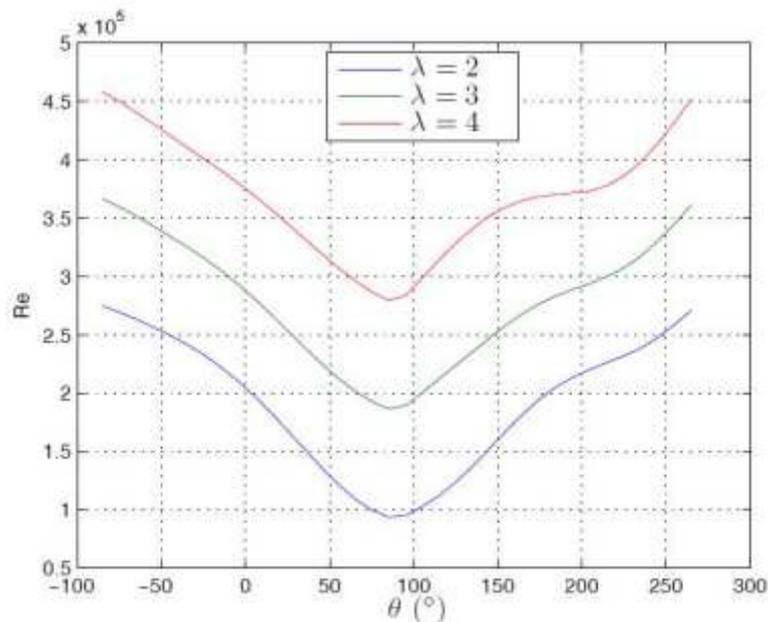


Fig. 12 Variazione del numero di Reynolds per  $V_\infty = 10$  m/s

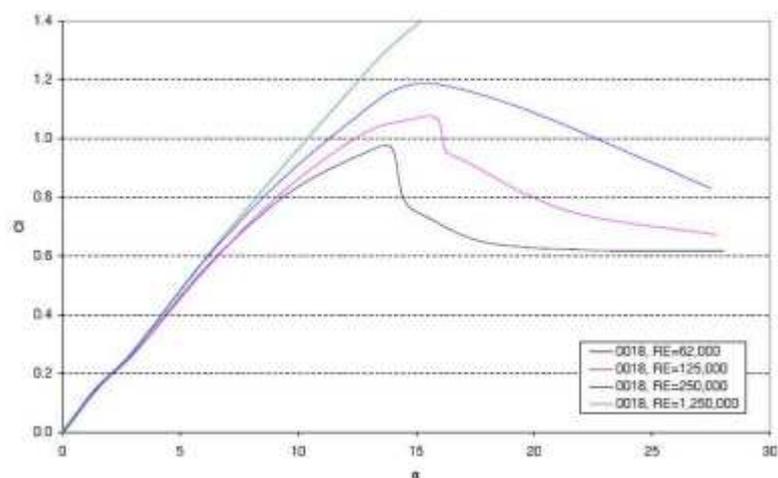


Fig. 13 Effetti del numero di Reynolds sulla curva di portanza di un profilo NACA 0018 (Jacobs e Sherman, 1937).

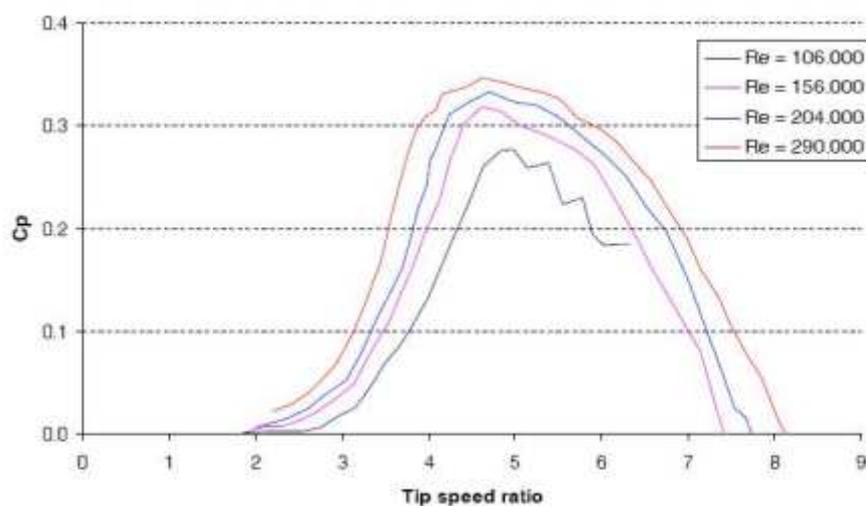


Fig. 14 Influenza del numero di Reynolds su un rotore Sandia di 2 metri (Paraschivoiu, 2002)

#### 4.2.3. Tip Speed Ratio e problematiche di avviamento di una Vawt

La più grande limitazione nell' utilizzo di turbine Vawt, come è sta stato accennato, è l' incapacità delle turbine Darrieus di raggiungere una velocità sufficiente tale per cui si possa sviluppare una portanza che autoalimenti il moto di rotazione della turbina. Per analizzare il problema di bisogna definire con precisione il termine “ auto-avviamento”. Kirk afferma che una turbina può definirsi in grado di auto avviarsi solo se essa è in grado di accelerare dal momento in cui produce un “ output significativo”, mentre Ebert e Wood sostengono che l' avviamento termina quando la turbina è in grado di estrarre potenza. Lunt ha invece posto un limite, ritenendo che la turbina si avvii quando le pale operano ad una velocità costante che supera quella della vena fluida indisturbata e per definizione si pone un  $TSR > 1$  ( il Tip Speed Ratio è il rapporto tra la velocità periferica della macchina e la velocità del vento). La limitazione dell' ultima definizione sta nel fatto che nel momento in cui inizia a

generarsi portanza, lungo una parte significativa della rivoluzione, non è garantito che la macchina continui ad accelerare. In questa definizione si inserisce Baker che suppone che avendo un  $TSR < 2$  la coppia è insufficiente o negativa e ostacola un'ulteriore generazione. Il processo di avviamento di una turbina Darrieus a profili simmetrici avviene compiutamente sotto precise condizioni atmosferiche.

Gli aerogeneratori Darrieus sono in grado di lavorare ad una tip speed ratio  $4,7 < \lambda < 6,8$  con un valore massimo  $\lambda = 6$ , paragonabile al valore dei rotori HAWT. Il coefficiente di potenza  $C_p$  però non è così alto come nei rotori ad asse orizzontale ma è compreso tra  $0,26 < C_p < 0,45$ , un valore di tutto rispetto che colloca questa tipologia di turbine tra le più performanti.

### 4.3. Effetti secondari sulle performance aerodinamiche di una turbina Darrieus

I modelli SST e DMST non tengono conto di effetti secondari che influenzano i calcoli dei parametri aerodinamici del rotore, che andrebbero implementati nel codice per ottenere un risultato più vicino possibile alla realtà. Vista però la bontà dei risultati acquisiti attraverso il codice, utilizzando l' approssimazione suggerita da Albert Betz, ci si limita ad elencarli per spiegare quali effetti producono sul comportamento della turbina. Il motivo per cui questi effetti non sono incidenti in questa tipologia di aerogeneratore si riconduce al fatto della piccola taglia ( altezza e raggio contenuti ).

#### 4.3.1. Stallo dinamico

Sui profili che hanno una rapida variazione di angolo di attacco si verifica il fenomeno dello stallo dinamico. L'effetto di questo repentino cambiamento è un'isteresi sulla portanza, sulla resistenza e sul momento aerodinamico. Lo stallo dinamico è caratterizzato dal rilascio di vortici controrotanti dalla superficie a bassa pressione del corpo portante. La turbina eolica di tipo Darrieus è particolarmente sensibile allo stallo dinamico, poiché la variazione di angolo di incidenza è ampia, specialmente a bassi tip speed ratio. Poiché le pale nella sezione sottovento sono influenzate dalla scia prodotta dalle pale sopravvento è importante capire bene il fenomeno dello stallo dinamico e della relativa scia, poiché ad esso è associato un aumento di rumore, di vibrazioni aeroelastiche e di fatica per il profilo.

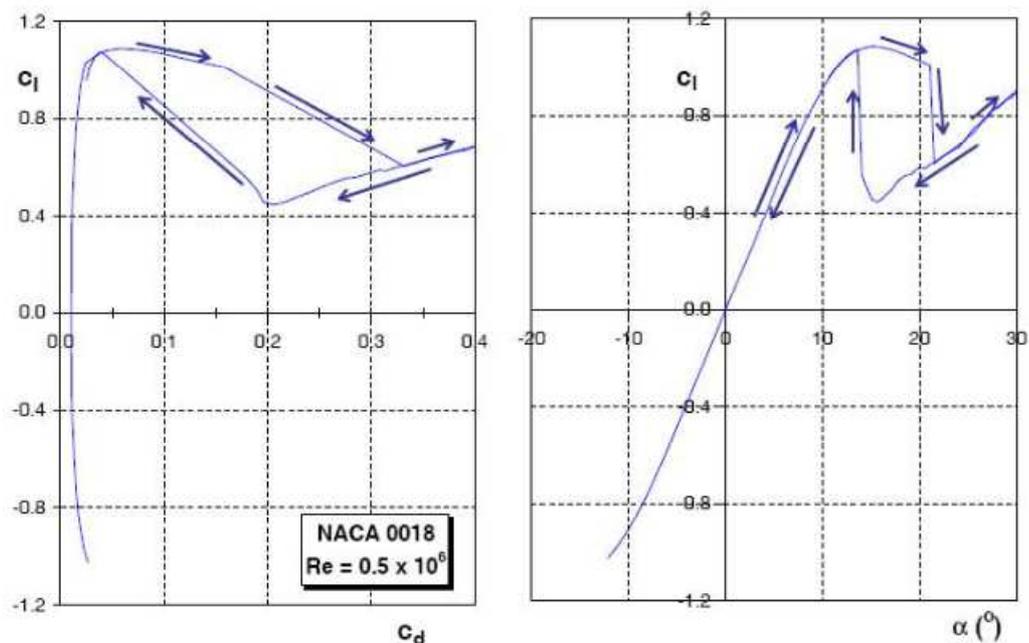


Fig. 15 Caratteristiche di superstallo per un profilo NACA 0018

La prima visualizzazione dello stallo dinamico di una VAWT è stato fatto da Brochier et al. (1986). Gli esperimenti sono stati fatti in un canale d'acqua, con tecnica LDV e bolle di idrogeno ad un numero di Reynolds di  $10 \times 10^3$  variando il tip speed ratio da 1 a 8. La turbina era di tipo Darrieus con due profili NACA 0018.

La visualizzazione per  $\lambda = 2, 14$  è riportata in Figura 16 e 17. Il primo vortice si forma al bordo d'attacco del profilo, un secondo vortice, rotante in direzione opposta, nasce dal bordo d'uscita; insieme formano una struttura caratteristica di due vortici controrotanti, che traslano verso il basso fino a incontrare il secondo profilo. Poiché gli angoli di incidenza sono maggiori per bassi tip speed ratio, in queste condizioni lo stallo dinamico è presente in maniera più rilevante. Dalla Figura 18 possiamo vedere come per  $\lambda = 1$  i vortici controrotanti sono di dimensioni maggiori, e che comunque la struttura dei vortici risulta indipendente dal tip speed ratio. Ad alti  $\lambda$ , sopra 4, lo stallo dinamico diventa di minor importanza. Gli studi citati mostrano la presenza di una forte asimmetria nelle proprietà del flusso all'interno della turbina, infatti le pale attraversano la scia dello stallo dinamico solo durante una parte del ciclo, lavorando in condizioni di flusso fortemente turbolento.

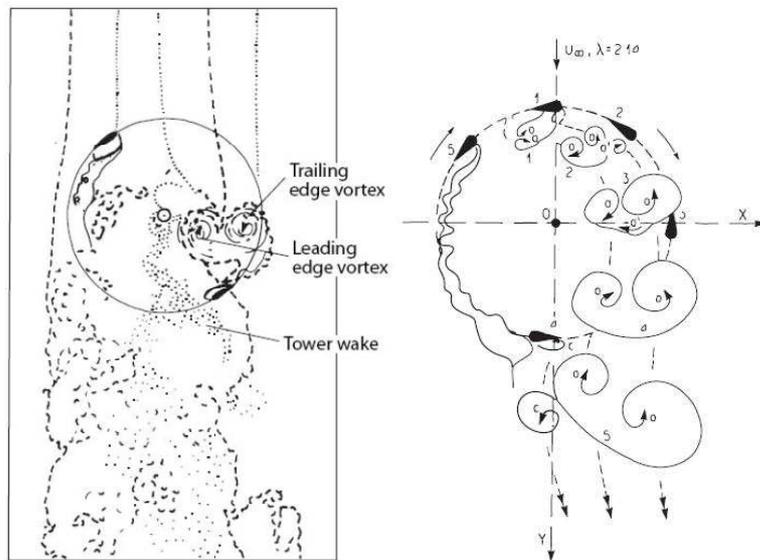


Fig.16-17 Visualizzazione del flusso e Diagramma schematico Visualizzazione dello stallo dinamico per  $\lambda = 2, 14$  (Brochier et al., 1986)

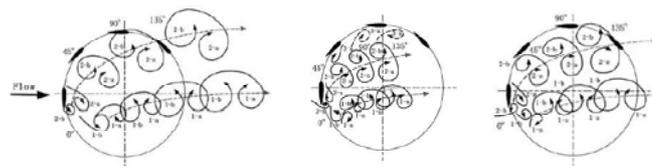


Fig. 18 Illustrazione schematica dello stallo dinamico per diversi  $\lambda=1,2,3$  (Fujisawa e Shibuya, 2001)

### 4.3.2. Curvatura virtuale

Studi condotti da Migliore et al. (1980) mostrano come le caratteristiche aerodinamiche di un profilo sono differenti se il flusso che lo investe è curvilineo oppure rettilineo. Poiché in una VAWT il profilo ruota, un profilo simmetrico si comporta come un profilo con curvatura e angolo di attacco investito da un flusso rettilineo. L'influenza di un campo di velocità curvilineo sulle caratteristiche aerodinamiche dipendono molto dal rapporto tra corda e raggio  $c=R$ . Se questo rapporto cresce, l'influenza del flusso curvilineo aumenta. Una curvatura virtuale causa uno spostamento verso l'alto della curva di portanza e introduce un momento aerodinamico. Un angolo di incidenza virtuale invece causa lo spostamento verso sinistra della curva di portanza. Il preciso effetto di questi fenomeni sulle prestazioni di una VAWT devono essere ancora studiati accuratamente.

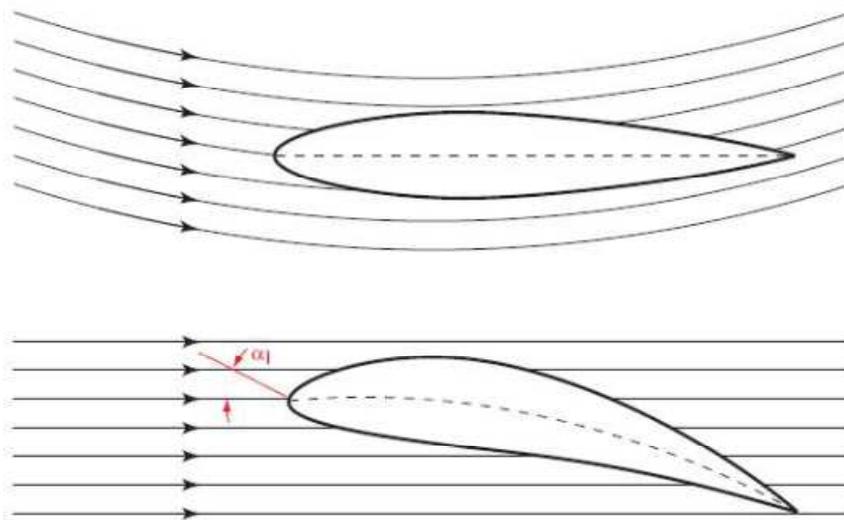


Fig. 19 Cameratura virtuale dovuta a un flusso curvilineo  
(Migliore et al., 1980)

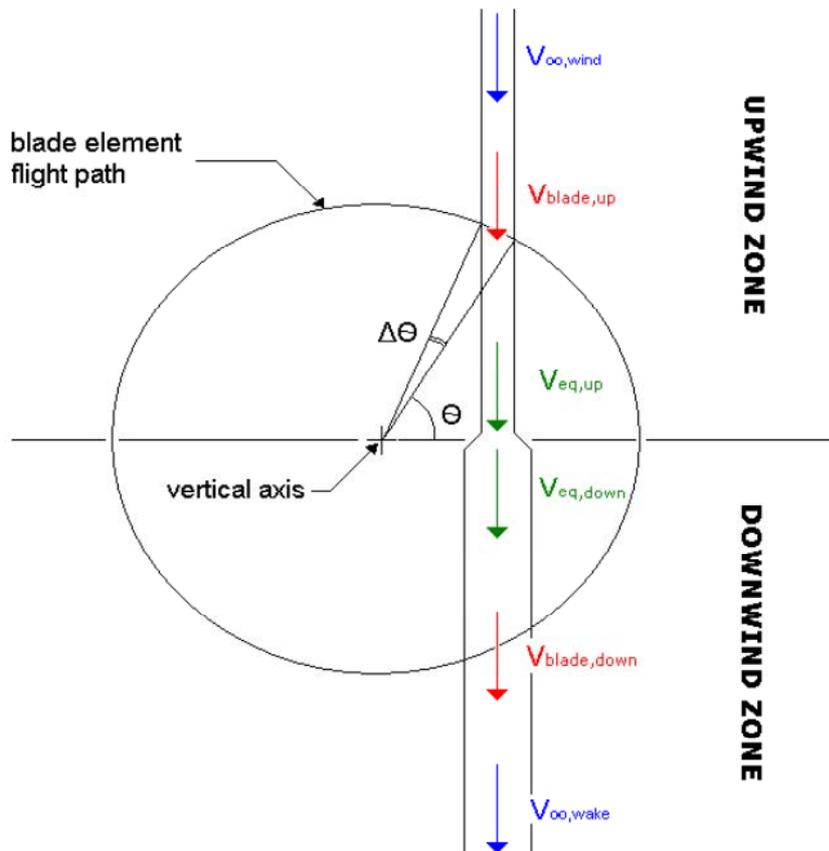
### 4.3.3. Espansione dei tubi di flusso

L'espansione dei tubi di flusso è la tendenza del flusso a espandersi nel piano di rotazione che passa attraverso il rotore a causa della conservazione della massa e del volume del flusso che il rotore fa ritardare. E' più pronunciato in condizioni di carico pesante per l'elevata solidità o ad alta punta di velocità per il rapporto,  $\lambda$ , causando il flusso d'aria intorno alla turbina piuttosto che attraverso essa.

Questo fenomeno è ben compreso ma, la difficoltà sorge quando si applica l'implementazione ai modelli. In generale, se l'espansione del flusso deve essere presa in considerazione, c'è una difficoltà a definire i confini tra i diversi tubi di flusso, perché la posizione azimutale di questi limiti dipende dalla quantità di flusso in espansione e quindi genera cambiamenti sui fattori di induzione. Utilizzando l'approssimazione di tubi di flusso rettilinei, possono essere definiti invece inizialmente in termini di  $\psi$  un angolo tra il tubo di flusso e linea radiale sporgente dal percorso di rotazione. I fattori di induzione possono quindi essere calcolati prima di determinare la quantità di espansione del tubo di flusso e le posizioni azimutali dei confini di essi.

Una volta che sono stati calcolati i fattori di induzione, la velocità del vento in direzione assiale possono essere determinati.

Dei risultati sull' implementazione in un codice DMSM dell' espansione dei tubi di flusso sono stati ottenuti da M. Raciti Castelli, A. Fedrigo and E. Benini, i quali per considerare tale effetto, valutato per la prima volta nelle turbine eoliche ad asse verticale da Read e Sharpe, inseriscono due velocità di equilibrio indotte nel piano medio tra le zone a monte e a valle del rotore, sia per la parte controvento sia per quella sottovento.



*Fig. 20 Vista in pianta della sezione del rotore e visualizzazione delle sei velocità di flusso caratteristiche*

*flusso per una configurazione double multiple streamtube con correzione dell' espansione dei tubi di flusso.*

Tutti questi effetti, che possono influenzare i risultati del codice potrebbero essere implementati nel codice e sono uno spunto di riflessione per lavori futuri all' interno del progetto TREO.

Essendo i risultati ottenuti molto simili a quelli presi in laboratorio, si può affermare che per un rotore di tali dimensioni tali effetti possano essere trascurati.

## 5. Analisi della risposta aerodinamica della turbina nel transitorio

Il progetto TREO è iniziato con l'analisi della risorsa, valutando la correlazione tra il flusso veicolare e la velocità del vento prodotta, ottenendo il risultato che durante le ore dei giorni della settimana il traffico genera una risorsa che può provvedere ad una conversione che rende positivo il bilancio energetico del sistema. È stato risolto anche l'inconveniente di dover separare il vento atmosferico da quello creato dal traffico, in quanto in ogni finestra di tempo di 5 secondi, i dati del flusso sono sottoposti alla prova:  $\|\bar{u}_4^2 + \bar{v}_4^2 + \bar{w}_4^2\| < 0,5 \text{ m/s}$  prima di essere inclusi nel campionamento, dove gli indici 4 indicano l'anemometro più lontano dal flusso di mezzi pesanti.

Una distribuzione delle classi del vento è stata effettuata misurando in sito i flussi del traffico nell'autostrada di Venezia A4, sommando per ogni ora tutti i campioni nei quali la velocità del vento è maggiore o uguale a 3 m/s. Il numero di campioni viene poi convertito in secondi dividendo tale risorsa per la frequenza di campionamento 40 Hz. Si ottiene l'informazione di quanti secondi la velocità del vento prodotta è superiore al tasso cut-in durante l'ora h.

In figura sono rappresentati gli indicatori delle risorse dei sotto processi per un giorno medio, convertito in minuti: sembra che per parecchie ore al giorno il vento è sopra la velocità di cut-in di 3 m/s per almeno il 20% del tempo.

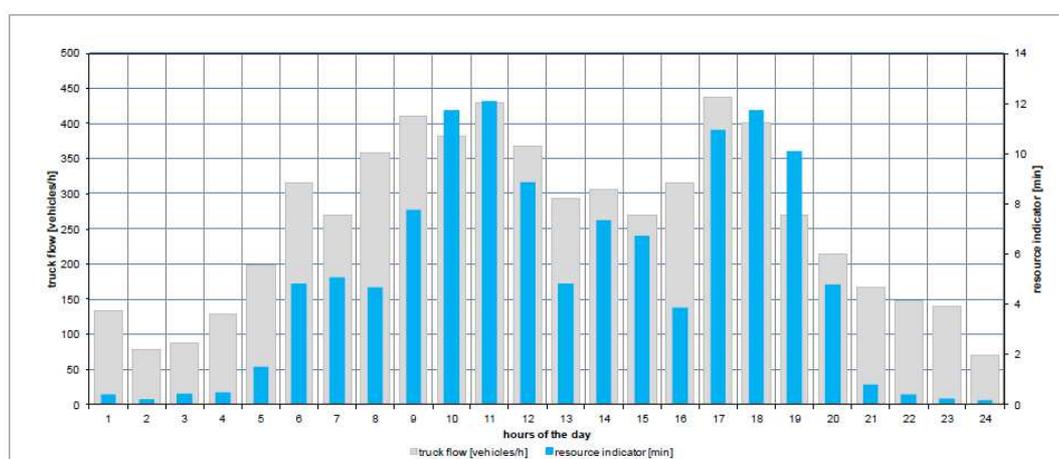


Fig. 21 Stima della risorsa in base al flusso dei mezzi pesanti nelle varie ore della giornata

Poiché l'energia raccolta potenzialmente è il prodotto di una macchina che opera ad una certa potenza durante un periodo di tempo, finalmente si valuta come indicatore indiretto la misura della risorsa energetica disponibile, vale a dire uno stimatore della risorsa vento al grezzo. Sorprendentemente, questi dati sono aggregati in un modo da permettere una correlazione diretta con il flusso di mezzi pesanti misurati in situ: infatti il contatore di campioni che definisce le classi di vento viene aggiornato ogni ora e associato con il corrispondente numero di veicoli all'ora.

Questo tipo di studio, oltre ad essere utile per quantificare la risorsa, è da utilizzarsi qualora il progetto venisse applicato per valutare le zone adatte all'inserimento delle turbine TREO. Nelle pagine seguenti, per approfondire il comportamento di una mini VAWT inserita nel contesto di un sistema di trasporto, si presentano i risultati

ottenuti nel codice dipendente dal tempo per l'analisi in transitorio, dove vengono inseriti i risultati ottenuti tramite il codice BEM. Si analizzano anche le capacità di avviamento di una turbina H-Darrieus, provando a capire se la macchina ripartirebbe più facilmente fermandosi con un determinato angolo di immissione. Le simulazioni in transitorio mostrano i trend di crescita e decrescita della velocità della macchina causati dai gruppi di mezzi pesanti, considerando più gap temporali realistici. Si possono così valutare la geometria e l'inerzia da dare al rotore per avere i risultati più soddisfacenti.

### 5.1. Ragioni per studiare il comportamento transitorio

Nello studio dei flussi indotti dai veicoli, la caratteristica principale sembra essere l'effetto della resistenza creata da gruppi di traffico, in cui si visualizza una bolla di separazione nella parte superiore dei camion.

E' quindi l'onda creata da molti camion che viaggiano in linea, l'oggetto di studio per una comprensione della fonte più profonda della risorsa: a seconda della densità di flusso dei camion infatti, l'onda prodotta potrebbe essere sufficiente per consentire o l'avvio di una mini turbina VAWT in kW-gamma, il suo funzionamento a velocità variabile, e il suo stato stabilizzato a velocità costante di rotazione ottimale.

Lo studio TREO ha prodotto due tipiche finestre temporali adimensionali di segnali di velocità del vento correlati al transito dei veicoli, selezionati per i giorni della settimana e vengono presentati in Figura 22: la velocità del vento adimensionale, la componente "v" diretta lungo l'asse stradale, è mostrata, per 4 strumenti posizionati all'aumentare della distanza verticale

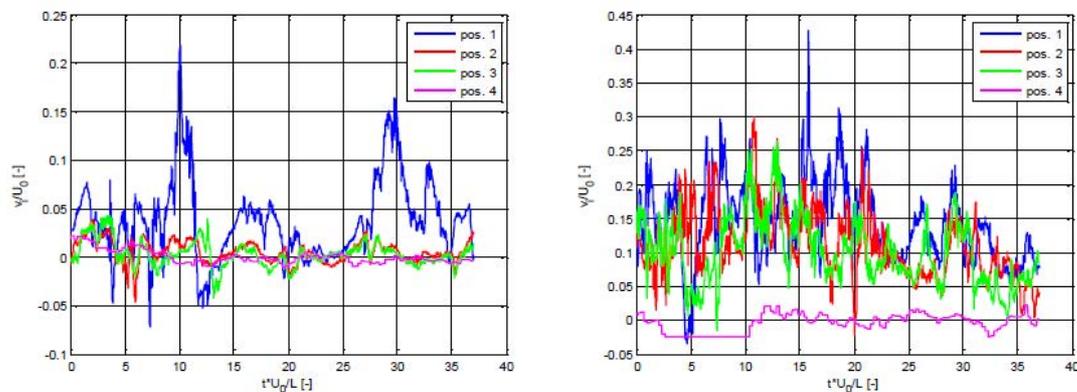


Fig. 22 Tipiche finestre temporali adimensionale di segnali di velocità del vento correlati al transito dei veicoli

dalla parte superiore del mezzo pesante, dove la posizione 4 è il riferimento atmosferico. Il tempo e velocità del vento sono adimensionalizzati considerando la lunghezza del camion  $L = 18\text{m}$ , e  $U_0$  la sua velocità = 100 km/h. In figura 20 la finestra temporale a sinistra corrisponde ad un flusso a bassa densità di camion, mentre la finestra temporale sulla destra corrisponde ad un flusso di camion ad alta densità. In figura 23 è presentato l'equivalente della velocità di flusso adimensionalizzata corrispondente al transito di un camion: tale tendenza è riconoscibile in misure sperimentali, e la sua forma è stata usata come riferimento di dati input di un 1-veicolo per l'analisi transitoria eseguita in questo lavoro.

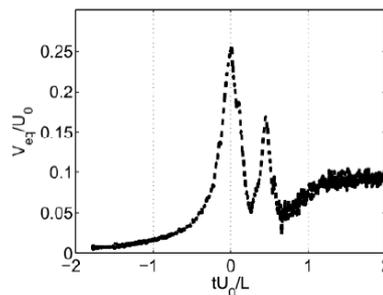


Fig. 23 *Equivalentente della velocità di flusso adimensionalizzata corrispondente al transito di un camion*

L'ipotesi che tutti i campioni che producono una velocità del vento rilevante fossero continui, cioè che la risorsa del vento traffico fosse continua nel tempo è stata abbandonata perché come mostrato in figura 22 ci sono dei punti in cui il vento cala nei traffici a bassa densità e potrebbe eventualmente pregiudicare la continuità delle risorse. Il comportamento in transitorio concede un'analisi più accurata della possibile conversione dell'energia.

Le analisi transitorie di questo lavoro sono quindi eseguite tra due picchi di velocità positivi per giudicare come potrebbe essere rilevante la presenza di vuoti per le prestazioni delle turbine.

## **5.2. Test in galleria del vento, Calibrazione ed attuazione del codice BEM dipendente dal tempo**

Con l'obiettivo di calibrare un codice dipendente dal tempo basato su un approccio teorico derivato dalla teoria degli elementi pala, come precedentemente introdotto, è stata effettuata una campagna sperimentale nel laboratorio del CRIACIV (Centro interuniversitario di ricerca sulla costruzione Aerodinamica e Ingegneria del Vento) presso l'Università di Firenze.

Il laboratorio è attrezzato con una galleria del vento a "strato limite", cioè appositamente studiata per riprodurre in scala opportuna gli effetti del vento turbolento nello strato limite atmosferico sulle costruzioni civili e sull'ambiente costruito. L'impianto è costituito dalla galleria vera e propria e da una serie di apparecchiature e strumentazioni per la misura di tutte le grandezze fisiche di interesse. La galleria del vento è realizzata in circuito aperto con un convergente iniziale singolo ed un diffusore finale a T simmetrico disposto su un piano orizzontale, ha una sezione di prova larga 2.4 m ed alta 1.6 m, ed è del tipo aspirato lineare (Göttingen-Eiffel). La dimensione longitudinale complessiva è di circa 22 metri, mentre la sezione trasversale varia da circa 2.20x1.60 (all'imbocco) a 2.40x1.60 (in corrispondenza della sezione della camera di prova). La struttura portante della galleria è in acciaio, con pannellature in legno o vetro e pavimento in legno. La dimensione longitudinale complessiva della zona per lo sviluppo dello strato limite è circa 11 m (8 m a monte della sezione di prova e 3 m in corrispondenza della sezione di prova). Il gruppo motore-ventilatore, della potenza di 156 kW nominali, è posto a valle della sezione/camera di prova. La velocità del vento nella sezione di prova è regolabile tra 1 e 28 m/s circa (nelle prove sui prototipi TREO la

velocità è stata limitata a 20 m/s per motivi di resistenza strutturale e sicurezza operativa).



Fig. 24 La galleria del vento del CRIACIV

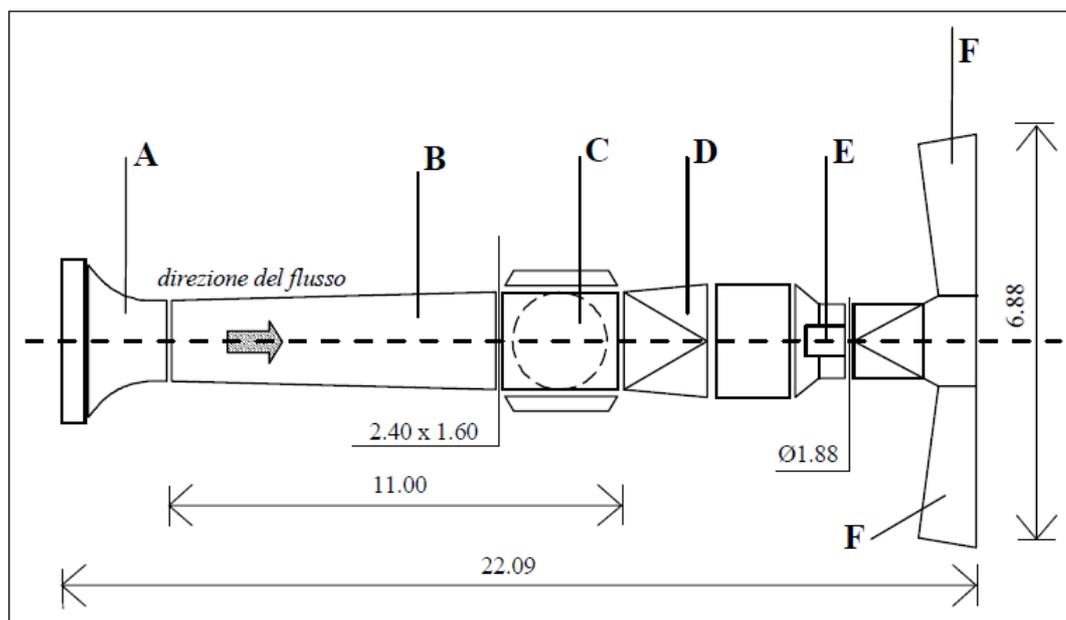


Fig. 25 Pianta della galleria del vento

(A): contrazione iniziale; (B) zona di sviluppo dello strato limite;  
 (C) sezione di prova (2.40 x 1.60 m); (D) raccordo sezione; (E) motore;  
 (F) divergente.

I risultati ottenuti da questa campagna ci sono serviti per calibrare quelli derivanti dal codice BEM, infatti risulta conveniente, in fase di sperimentazione del progetto, avere uno strumento di valutazione veloce e meno oneroso, che permetta di valutare la capacità di una mini VAWT inserita nel contesto autostradale, senza dover ricorrere alle analisi di laboratorio molto più costose.

Secondo Simão-Ferreira le nuove tendenze nel campo dell' eolico sono sempre più rivolte ad indagare in profondità il complesso dei fenomeni aerodinamici che si svolgono all' interno di una VAWT funzionante. Un approccio teorico basato sul Blade Element Method (BEM) può ancora fornire alcuni vantaggi, sotto certe circostanze, in particolare per quanto riguarda una riduzione dell' onere computazionale. Il problema è per lo più rilevante nell'affrontare l'analisi transitoria di una turbina, in cui le interazioni aerodinamiche devono essere risolte istante per istante, con un sensibile aumento degli sforzi computazionali. Il diagramma di flusso mostra come lo strumento numerico per la valutazione del comportamento transitorio è stato concepito come una subroutine diretta dal codice principale DMSM descritto nel secondo capitolo.

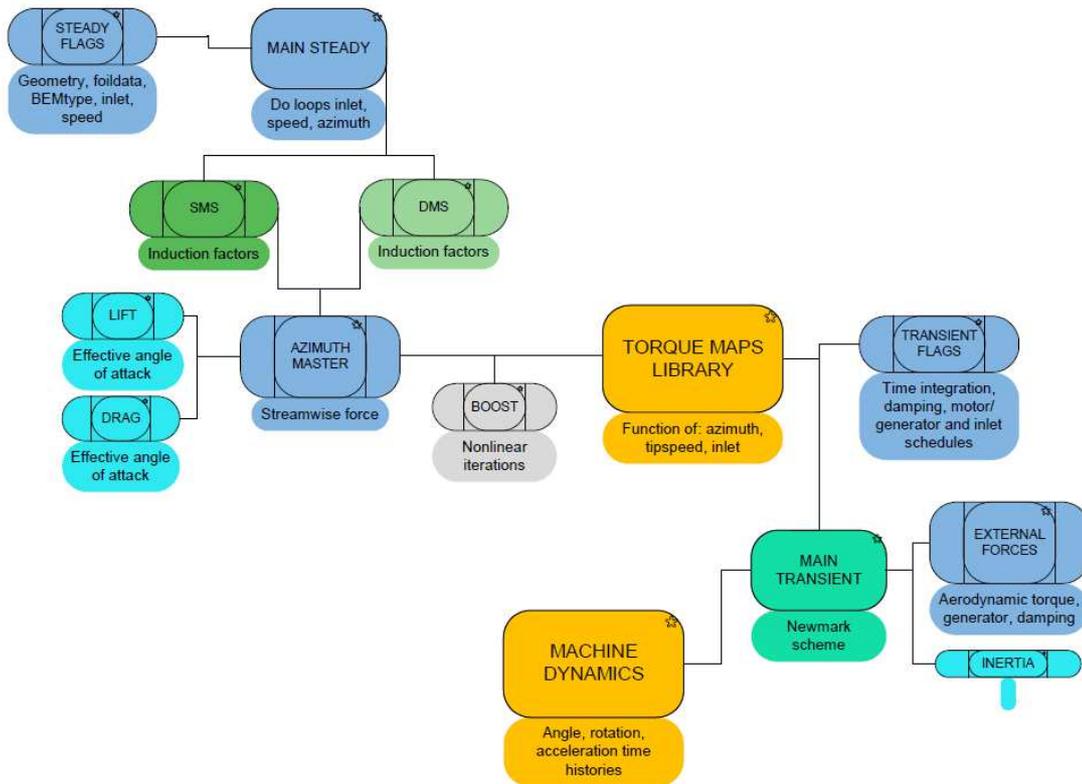


Fig. 26 Diagramma di flusso della subroutine dipendente dal DMSM

La libreria salvata dal codice DMSM contiene il valore di coppia torcente in funzione della velocità di rotazione della macchina  $\dot{\theta}$  e dell'angolo azimutale  $\theta$  per un determinato valore di velocità del vento in ingresso  $V_\infty$ . Partendo da questi parametri di ingresso e da alcune condizioni al contorno (ad esempio la posizione della turbina con l'azimut iniziale, la velocità di rotazione, smorzamento, inerzia), il codice dipendente dal tempo risolve, istante per istante, l'equazione del moto nel dominio del tempo con uno schema Newmark non lineare:

$$I\ddot{\theta} = D\dot{\theta} + T_{load}(t) + T_{para}(\theta, \dot{\theta}) + \sum_{i=1, \dots, N} T_{AERO,i}(\theta, \dot{\theta}, V_\infty(t))$$

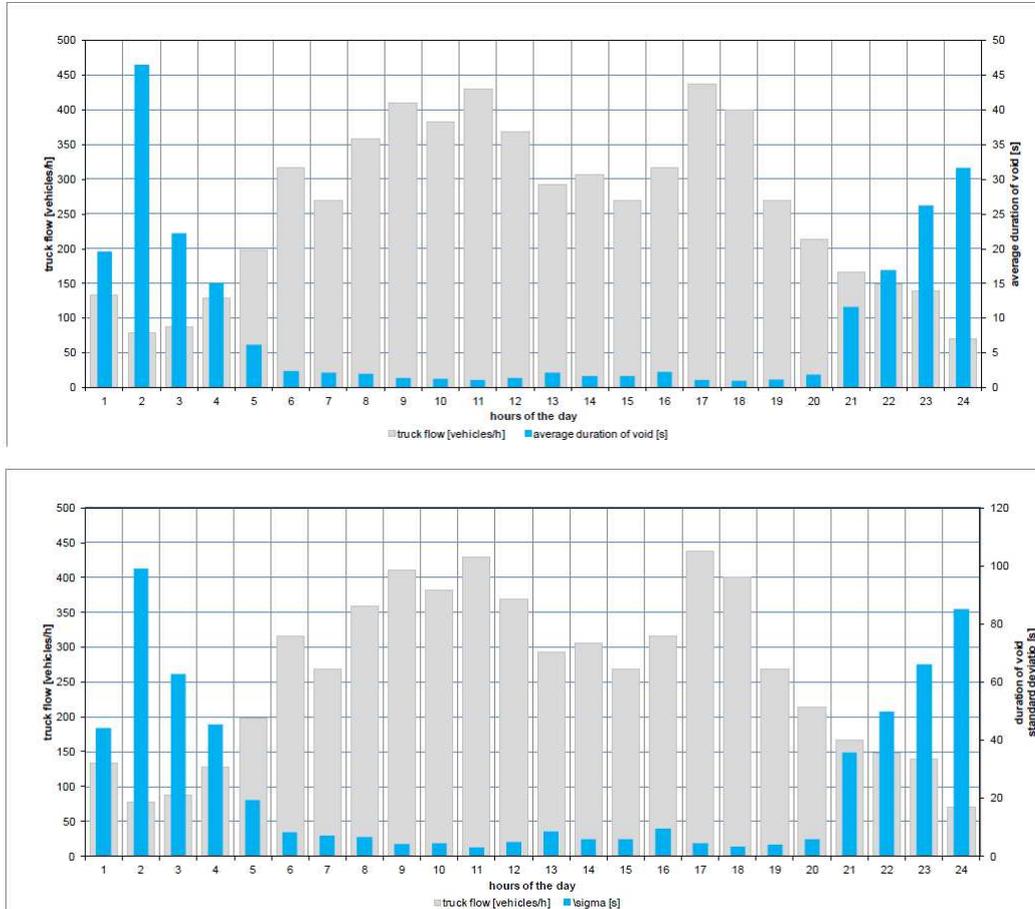
La coppia aerodinamica è determinata ad ogni istante da un' interpolazione all' interno della libreria di valori per ciascuna pala, corrispondente alla velocità istantanea effettiva del vento.

Per l'analisi in transitorio è stato scritto uno script matlab che prende i valori ottenuti attraverso il codice DMSM per ottenere l'andamento del tempo delle velocità del vento create dai flussi di traffico in movimento a diversi gap temporali.

### 5.3. Gruppi di mezzi pesanti e durata del vento

Come abbiamo detto la durata del vento caratterizza l'ingresso del vento transitorio, quindi la valutazione circa la natura di tali vuoti è obbligatoria. In figura 27 sono rappresentate le misure elaborate dalla campagna sperimentale: i dati vengono aggregati in 60 minuti di riferimento per il giorno medio feriale, in modo che possano essere direttamente associate alle 24 h dei sotto-processi. L'associazione è sempre proposta in termini di flussi di camion (asse verticale a sinistra).

Le misure sono: durata media dei vuoti, la deviazione standard, la durata massima di vuoti, e il numero totale dei vuoti in 60 '. Se si mettono in relazione tali misure con la cadenza oraria, corrispondenti ai flussi di camion, si ottiene  $R^2 > 0,85$  per tutte le coppie: data questa correlazione, in altre parole lo studio della durata del vento è stato un mezzo indiretto per by-passare il vento atmosferico, studiando il rapporto della fonte di energia unicamente con il flusso di traffico e non del vento ambiente, cioè raggruppando i camion e i relativi vuoti. Il coefficiente di correlazione è negativo per la durata del vuoto, mentre è positivo per il numero di vuoti.



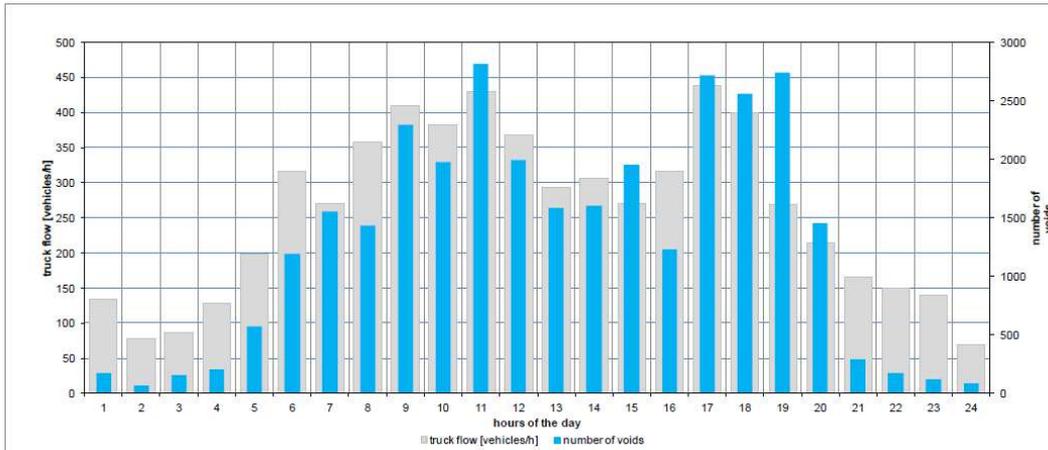


Fig. 27 Durata media dei vuoti, deviazione standard della durata dei vuoti, numero di vuoti

#### 5.4. Analisi in Transitorio con veicolo unico ad intervalli di tempo

Le analisi transitorie sono state eseguite in condizioni di free ride per la macchina, e utilizzando come modulo di ingresso la cronologia temporale corrispondente al transito di un camion. In questo sottocapitolo si ottengono i risultati della ripetizione di più moduli di singoli mezzi pesanti intervallati da vari gap temporali. Tali intervalli di tempo, durante i quali l'ingresso è mantenuto ad una velocità minima di 1 m/s, simboleggiano il vento. La forma del traffico risultante in tale caso è quindi una teorica in cui tutti i transiti sono separati, mentre è stato precedentemente dimostrato che gruppi di autocarri reali sono in grado di produrre un continuo segnale senza intervalli di tempo interni. In quel caso il gap deve essere inserito tra due diversi gruppi, non in tra due transiti.

I risultati dell'analisi del modulo di ripetizione di 1-veicolo da una chiara visione circa l'esistenza di una soglia dell'intervallo di tempo tra due camion in cui la macchina tende a fermarsi, a seconda della sua geometria. Nelle Figure 23,24,25,26,27,28 sono considerati tre differenti VAWTs H-Darrieus a 3 lame con rotori di diametro 0.125H, 0.175H, e 0.250H, dove  $H = 4m$  è l'altezza del veicolo: pesi specifici, proporzioni e la lama gli accordi sono gli stessi per tutti i rotori. Le storie temporali di entrata considerate sono: aumentando fino a  $9m/s = 0.25U_0$ , i singoli camion separati da un gap temporale di 5 secondi, singoli camion separati da 10 secondi, singoli camion separati da 15 secondi e infine da 20 secondi.

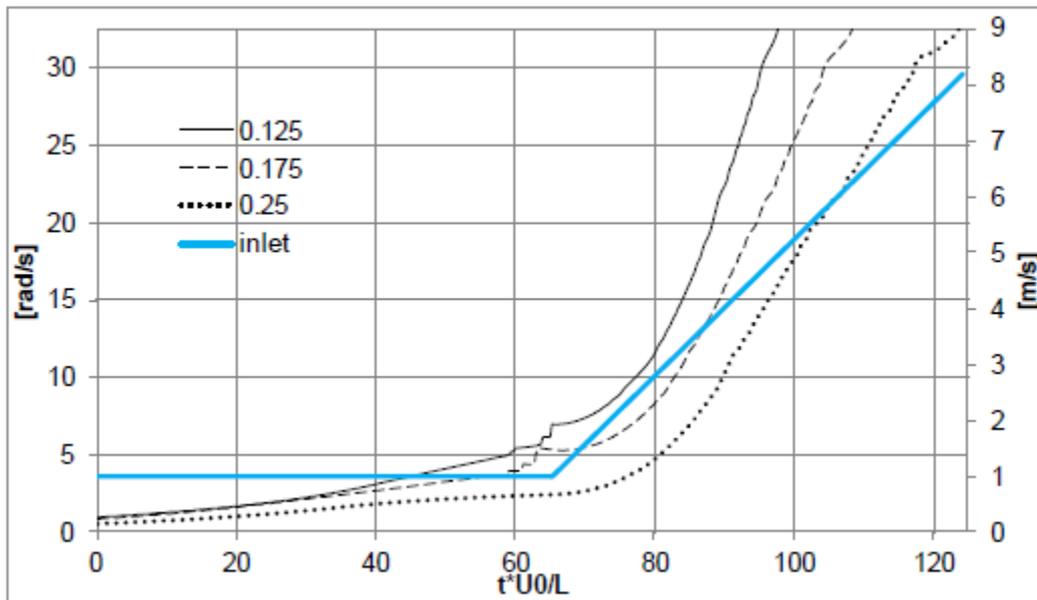


Fig. 28 Flusso continuo

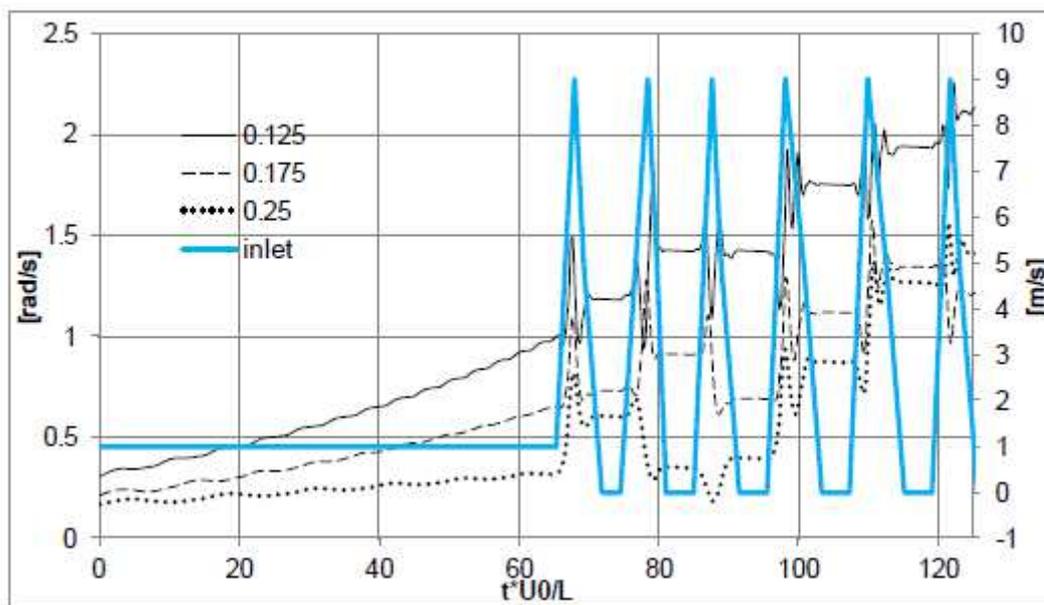


Fig. 29 Gap temporale di 5 secondi

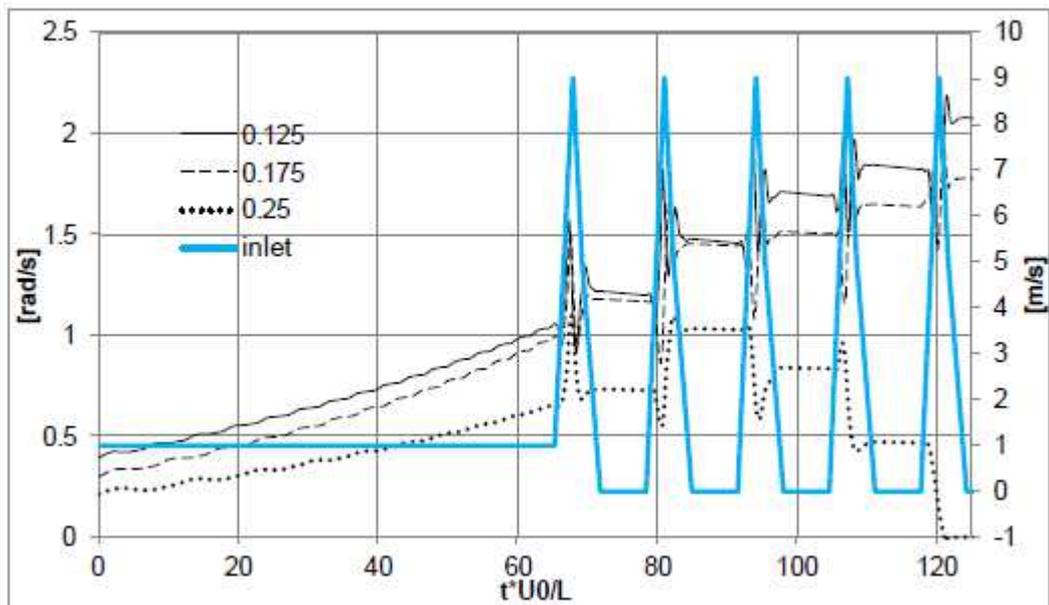


Fig. 30 Gap temporale di 10 secondi

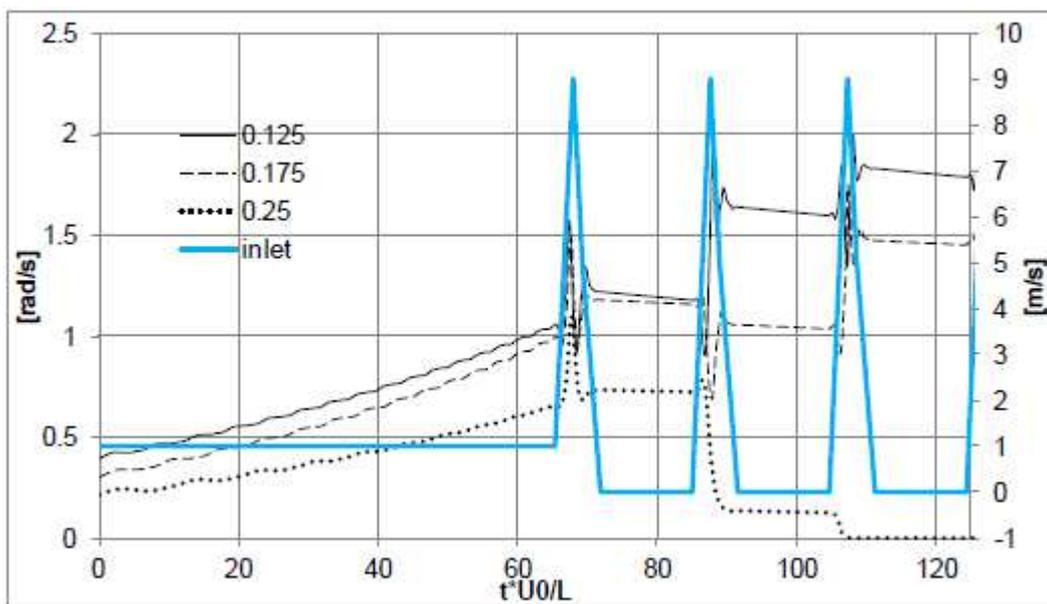


Fig. 31 Gap temporale di 15 secondi

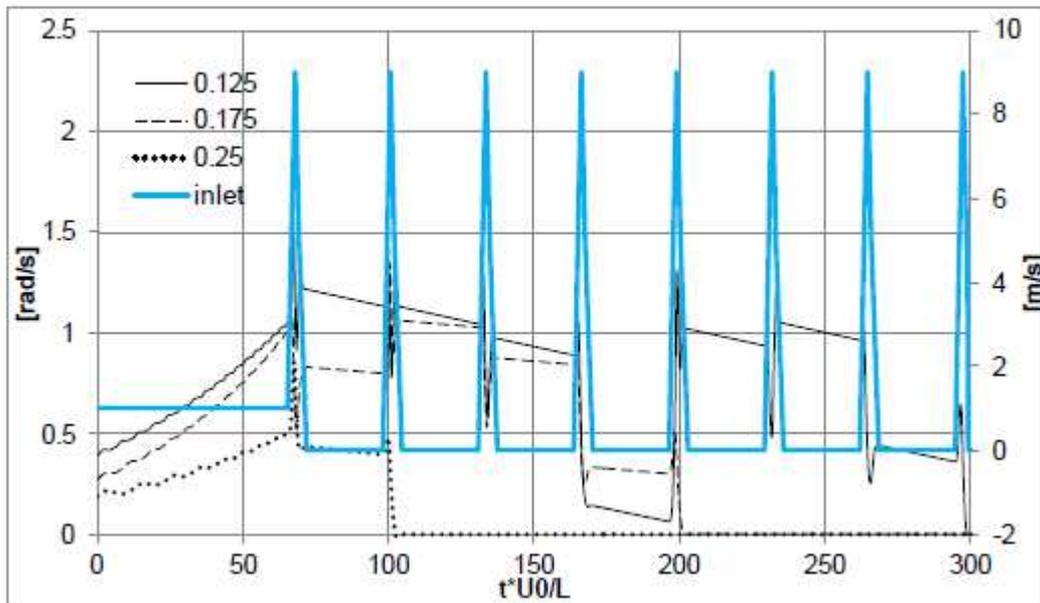


Fig. 32 Gap temporale di 20 secondi

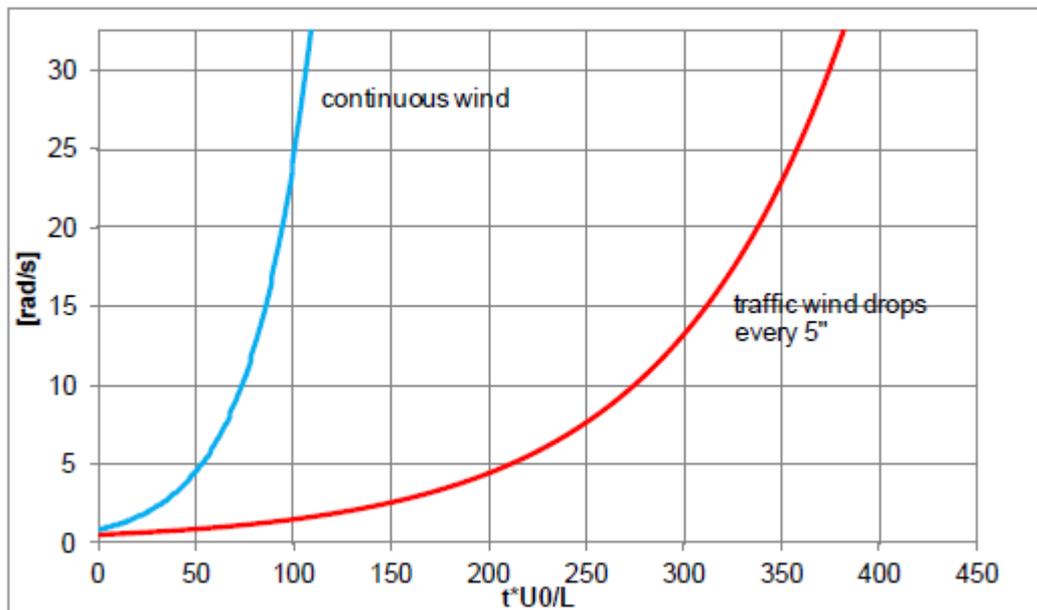


Fig. 33 Differenza tra vento continuo e vento ogni 5 secondi

Mentre nessuno dei 3 rotori si ferma per un gap temporale di 5", tutti si fermano per 20", e solo i rotori di 0.125H, 0.175H sono in grado di avviarsi per 10". È interessante notare dall'ultimo grafico di figura 7 come nel caso del gap temporale di 5" il rotore 0.125H è ancora in grado di arrivare alla sua velocità di free-ride, solo dopo il 400% del tempo rispetto al caso di ingresso continua, che guarda caso è il rotore scelto per l'analisi dei parametri aerodinamici.

## 5.5. Riflessioni sulla avviabilità in presenza di venti variabili

Il cosiddetto self-starting in condizioni di vento variabile quale è quello generato dal traffico può diventare un problema piuttosto grave. In linea generale in merito al comportamento transitorio sulle onde di traffico, si assumerà che le condizioni di start-up del dispositivo possono essere soddisfatte: infatti dalla Figura 20 (lato destro) si riconosce che  $\frac{v_1}{U_0} > 0,083$  ovvero la soglia di 3 m/s; per periodi continui  $\frac{t}{L} > 25 \div 30$ ; vale a dire fino a 60s che è un tempo di avvio comunemente accettato per un mini dispositivo VAWT in kW-range.

Le corrispondenti mappe di coppia torcente ottenute con le subroutine del nostro codice, e riportati in figura 34 per rotori di diametro 0.125H, ad un ingresso di 3m/s: mostrano come dalla regione di bassa velocità di punta sia le mappe di coppie che i valori di coppia sono positivi per tutte e tre le lame (reciprocamente distanziati a 120 °) solo se la macchina ha un angolo iniziale preferenziale nel range compreso tra -20 °; +10 °.

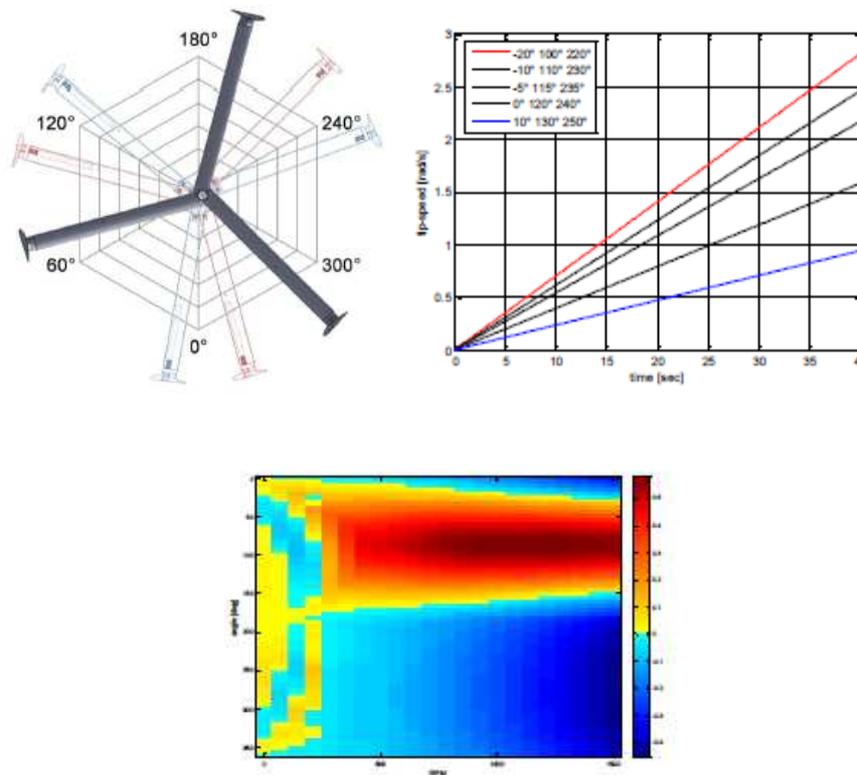


Figura 34 VAWT geometry and azimuth convention; self-starting region where tip-speed is not negative [-20°; +10°] range ; Torque maps at inlet 3m/s for (c) R=0.125H. The color-map indicates torque values.

## 5.6. Analisi in transitorio per gruppi di mezzi pesanti

È stata eseguita un'altra analisi in transitorio, cercando di simulare gruppi di camion realistici e permettendo così - con riferimento al picco  $0.25U_0$  1-veicolo di figura 20 - un ingresso medio di  $0.11U_0 = 4\text{ m/s}$  come valore di riferimento. Come mostra la figura 20 gruppi di mezzi pesanti sono in grado di produrre un segnale continuo senza interruzioni temporali interno, in questo modo gli intervalli di tempo vengono rappresentati solo tra due gruppi diversi, e non tra due transiti. Questa seconda classe di simulazioni in transitorio quindi non si caratterizza per il picco e tempo gap 1-veicolo come prima, ma da un'insenatura media nella durata del flusso del gruppo di mezzi pesanti e l'intervallo di tempo tra due di essi.

In Figura 30 e Figura 31 sono considerati tre diverse VAWTs H-Darrieus tripala con rotori di diametro  $0.125H$ ,  $0.175H$ , e  $0.250H$ , dove  $H = 4\text{ m}$  è l' altezza del veicolo: i pesi specifici, proporzioni e la lama gli accordi sono gli stessi per tutti i rotori. L'ingresso tempo-storia della figura 35 corrisponde a lunghi periodi in cui il vento cala, mentre quella di figura 36 i periodi tra un transito e l' altro diminuisce: si può notare come la velocità di tutti i rotori diminuisce al valore di  $1\text{ m/s}$  nel caso di periodi di lunghi in cui cala il vento, mentre nel caso di corti periodi il rotore  $0,25H$  grazie alle sue elevate proprietà inerziali, riesce progressivamente a non perdere tutta la sua velocità fino al valore di free-ride di  $1\text{ m/s}$ . Con il gruppo di transito successivo, il tempo per raggiungere il valore di free-ride di  $4\text{ m/s}$  sarà più lungo per i più piccoli rotori  $0.125H$  e  $0.175H$ , sempre a causa delle proprietà superiori inerziali del rotore con  $0,25H$ .

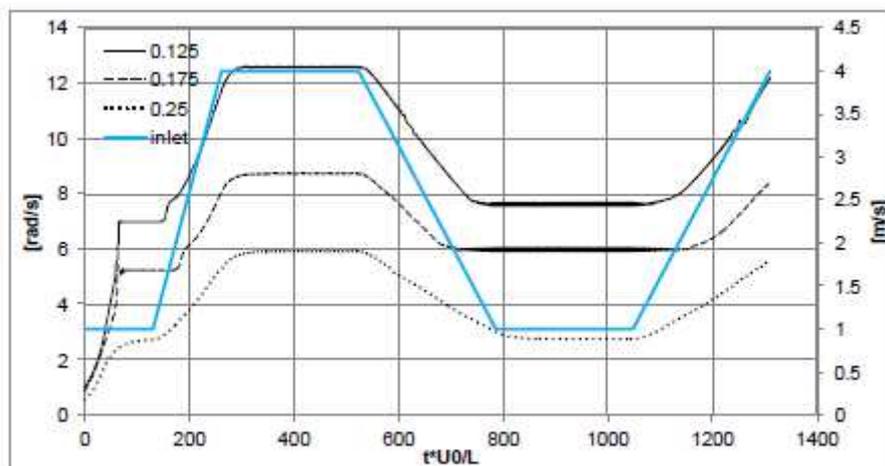


Figura 35 Periodi lunghi di vento calante e andamento delle turbine con diversi rotori

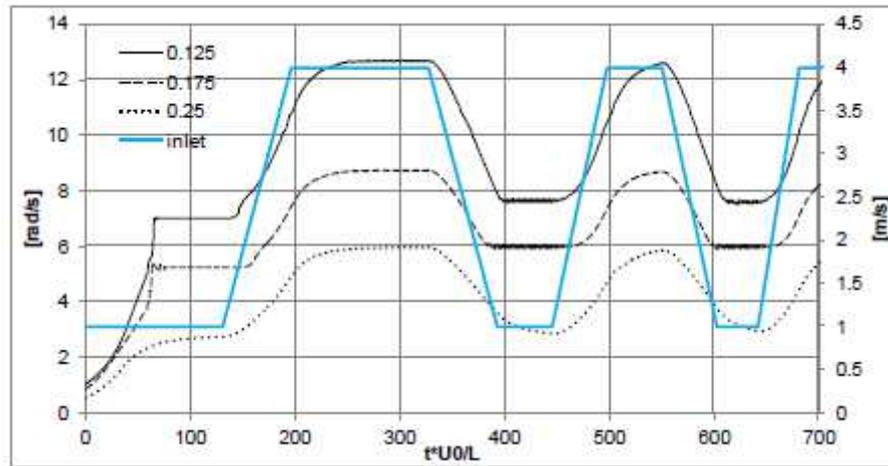


Figura 36 Periodi corti di vento calante e andamento delle turbine con diversi rotori

Nella Figura 32 e Figura 33 sono considerati tre rotori VAWTs H-Darrieus tripala con raggio pari a  $0,25H$  aventi diverso peso specifico o proprietà inerziali, in proporzione di 0,5, 1 e 2 con lo  $0,25H$ , mentre le proporzioni e le lame sono gli stessi per tutti i rotori.

Anche in questo caso, l'ingresso tempo-storia della Figura 37 corrisponde a periodi lunghi in cui il vento cala, mentre quella di figura 38 a periodi sempre più brevi in cui il vento scende. Si è visto dalla figura 38 che, fatta eccezione per la prima messa in servizio, l'effetto dato da inerzie diverse nei periodi lunghi è meno evidente. In caso dei più brevi, si è visto dalla figura 38 che la macchina ideale da applicare in un tratto autostradale dovrebbe avere inerzia minore nelle parti di accelerazione positiva, per raccogliere buona parte della velocità del vento in entrata, ma poi una inerzia maggiore nelle parti di accelerazione negativa, per perdere una parte più piccola della velocità acquisita. Infine, si è visto come l'analisi transitoria accoppiata con mappe di coppia calcolate da un codice streamtube multiple BEM consentono di lavorare senza le considerazioni sulle relative geometrie ottimali di un CAWT da utilizzare in un possibile sistema di trasporto.

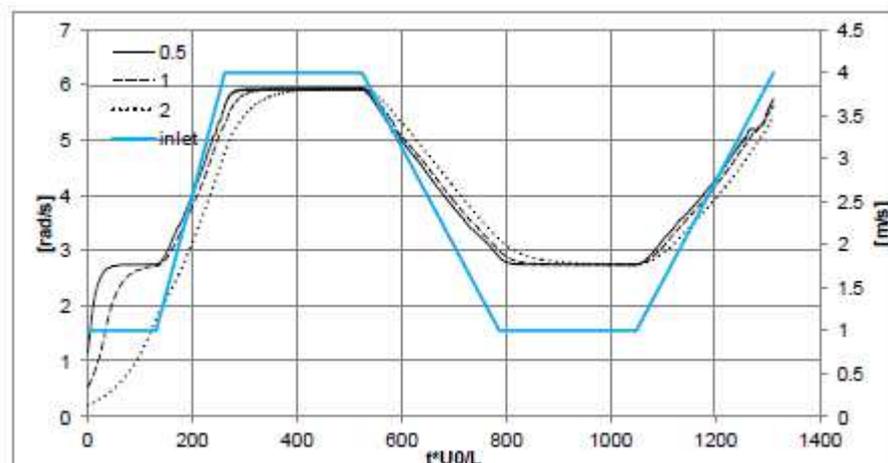


Figura 37 Periodi lunghi di vento calante e andamento delle turbine con diversi rotori

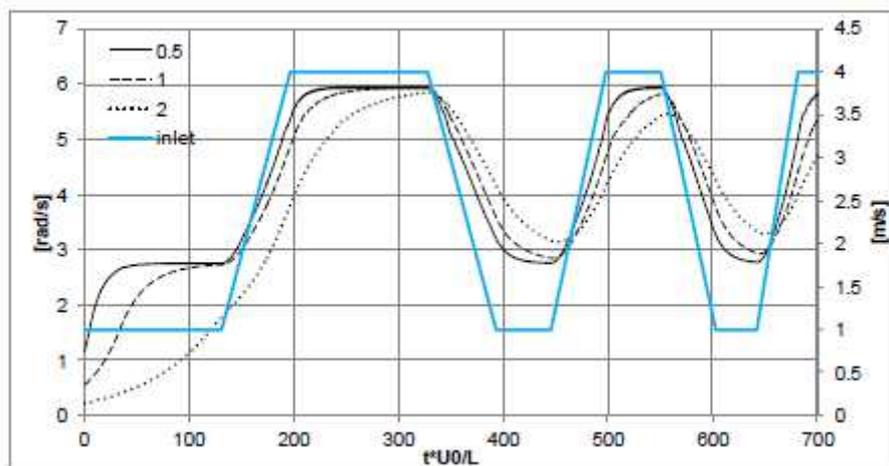


Figura 38 Periodi corti di vento calante e andamento delle turbine con diversi rotori

Il comportamento della turbina nel campo del transitorio è stato studiato per valutare le proprietà geometriche e inerziali del dispositivo CAWT da impiegare nell' applicazioni all' interno dei sistemi di trasporto.



## 6. Conclusioni

Il presente lavoro di tesi si è posto l'obiettivo di presentare le caratteristiche principali di una turbina ad asse verticale sottoposta ad un vento incidente creato dall'iterazione che si crea tra i veicoli e l'atmosfera. Oltre ad essere importante per un recupero di energie intelligente, lo studio ha presentato e risolto i limiti della teoria presente in letteratura nei codici BEM. Infatti solo recentemente si è posta l'attenzione alle cosiddette turbine VAWT, considerandole convenienti rispetto alle più utilizzate HAWT. Il limite dell'uso delle turbine ad asse verticale infatti, era rappresentato dalla difficoltà di ottenere in termini previsionali le capacità aerodinamiche. Per ottenere il coefficiente "Cp", coefficiente di potenza, che caratterizza al meglio il rendimento di una turbina era necessario risolvere l'equazione di secondo ordine non lineare attraverso un algoritmo di carattere iterativo per ottenere il fattore di induzione "a". Tale equazione, provocando un onere computazionale non indifferente, era poco risolvibile senza i moderni sistemi di calcolo presenti nel mercato.

Questo è il motivo principale per cui lo studio delle VAWT è stato abbandonato per molti anni. Ora invece è stato ripreso assiduamente in tutti gli studi del campo eolico. Nello specifico nel progetto TREO si è optato per una turbina con tali caratteristiche perché bene si presta al mini eolico e rappresentava la soluzione migliore. I codici BEM inoltre permetteranno nel proseguo dello studio sperimentale di ottenere le caratteristiche più performanti e di scegliere il profilo alare senza dover più ricorrere ai costosi esperimenti in laboratorio.

Ottenendo direttamente dai codici i valori da inserire per le analisi in transitorio si è potuto proseguire con delle considerazioni sulla geometria da dare ad un rotore inserito nei sistemi di trasporto. La ricerca ha dimostrato che durante le ore diurne feriali il traffico genera una risorsa che può consentire una conversione di energia interessante, permettendo un bilancio energetico positivo del sistema. Valutando la risposta aerodinamica nel ambiente traffico, la turbina risulta sensibile ad alcuni gap temporali, ma migliorando inerzia e profili si possono prevedere buoni risultati per una futura applicazione reale.

Bombando i profili alari e inserendo un dispositivo di arresto selettivo si potrebbero inoltre migliorare le capacità di auto-avviamento, che abbiamo visto essere la maggiore difficoltà per una VAWT.

Reali prove in transitorio su turbine eoliche poste in loco in un tratto di autostrada e nei sistemi di trasporto dovrebbero essere eseguite per integrare gli attuali risultati di lavoro con dati sperimentali affetti da reali segnali di vento creato dal traffico. La presente ricerca si focalizza principalmente sulle questioni aerodinamiche e meccaniche, mentre la ricerca futura dovrebbe concentrarsi anche sui problemi di generazione di energia e di potenza elettronica.

Ovviamente tale studio risulta ancora agli inizi, infatti considera solo un rettilineo autostradale, ma si potrebbe verificare il rendimento della turbina in curva, al di fuori delle gallerie, ai lati della strada o per sistemi di trasporto in generale, come ferrovie, vie d'acqua o negli aeroporti, e queste ipotetiche soluzioni aprono il campo a diversi progetti sperimentali che bisognerebbe analizzare in futuro.



## Bibliografia

Ion Paraschivoiu, “Wind turbine design with emphasis on Darrieus Concept”, Presses internationales Polytechnique, 2002.

J.F.Manwell, J.G.Mcgowan, A.L.Rogers, “Wind Energy Explained: Theory, Design and Application”, Wiley,2010.

Kirke, B.K., “ Evaluation of self-starting vertical axis wind turbines for stand-alone applications”, PhD Thesis, Griffith University,1988.

Migliore, P., Wofle, P., e Fanucci, J. (1980), “Flow curvature effect on darrieus turbine blade aerodynamic” , Journal of Energy,, vol. 4, 1980.

Morbiato T, Borri C., Vitaliani R., “Wind Energy Harvesting from Transport Systems: A Resource Estimation Assessment”, Journal of Applied Energy,2014.

Munasinghe M., “Sustainable Development in Practice – Sustainomics Methodology and Applications”, Cambridge University Press, 2009.

Raciti Castelli M., Fedrigo A. and Benini E.,“ Effect of Dynamic Stall, Finite Aspect Ratio and streamtube Expansion on Vawt Performance prediction using BEM Model”, World Academy of Science, Engineering and Technology 68,2012.

Simao-Ferreira, “The near wake of the VAWT – 2D and 3D views of the VAWT aerodynamics”, PhD Dissertation, TUDelft, 2009.

Strickland J. H., “ The Darrieus Turbine: A Performance Prediction Model Using Multiple Streamtube”, Sandia Report, SAND75-0431.

M. Sakamaki. “Tunnel Installation Type Aerogenerator”. Japan Patent JP56034979A, Filed Apr. 07, 1981.

T F. Wiegel, K.C. Stevens. “Traffic-Driven Wind Generator”. United States Patent US007098553B2, Filed Jan. 12, 2005.

G.S. Fein, E. Merritt, Genedics Clean Energy, Llc. “System and method for creating a networked infrastructure distribution platform of small fixed and vehicle based wind energy gathering devices along roadways”. United States Patent US 7741727 B2, Filed Dec. 22, 2006.

Quinn A, Backer C, Wright N. “Wind and vehicle induced forces on flat plates-part 2: vehicle induced force”. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 2001;89:831–47

A. Mattana, S. Salvadori, T. Morbiato, C. Borri. “On The Ground-Vehicle Induced Flows And Obstacle Interaction”. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Submitted for publication INDAER-D-13-00237, August 2013.

N. Kalthoff, D. Baumer, U. Cosmeier, M. Kohler and B. Vogel. "Vehicle Induced Turbulence near a Motorway", *Atmospheric Environment*, 39:5737-5749, 2005.

I. Paraschivoiu, "Double-multiple streamtube model for studying vertical-axis wind turbines", *Journal of Propulsion and Power* 4(4): 370-377, 1988

A. Bianchini, L. Ferrari, S. Magnani, "Start-up Behaviour of a Three-Bladed H-Darrieus VAWT: Experimental and Numerical Analysis", *Proceedings of ASME Turbo Expo 2011 GT2011*, Vancouver, Canada

B.K. Kirke, "Evaluation of Self-Starting Vertical Axis Wind Turbines for Stand-alone Applications", PhD Dissertation, Griffith University, Australia, 1998

N.C.K. Pawsey, "Development and Evaluation of Passive Variable-Pitch Vertical Axis Wind Turbines", PhD Dissertation, University of New South Wales, Australia, 2002

N. Hill, R. Dominy, G. Ingram, J. Dominy, "Darrieus turbines: The physics of self-starting", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* 2009 223: 21-29

R. Dominy, P. Lunt, A. Bickerdyke, J. Dominy, "Self-starting of a Darrieus turbines, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*", Part A: *Journal of Power and Energy* 2007 221: 111-120

E.N. Jacobs, A. Sherman, "Airfoil section characteristics as affected by variation of the Reynolds number", *National Advisory Committee for Aeronautics, Report n° 586*, 1937

F. Balduzzi, A. Bianchini, L. Ferrari, "Microeolic turbines in the built environment: Influence of the installation site on the potential energy yield", *Renewable Energy*, 45, (2012) , 163-174

## APPENDICE A

### Script Single Streamtube Model per profilo NACA4415

```
% -----  
% definizione parametri geometrici  
% -----  
  
% raggio rotore [m]  
R = 1.5;  
% altezza rotore [m]  
H = 3;  
% area rotore [m^2]  
S = 2.667 * R * H;  
% numero lame [/  
N = 3;  
% profilo NACA 4415  
  
% height over chord ratio [/  
hoc = 0.18;  
% area over chord^2 [/  
aoc2 = 0.0613;  
% airfoil chord[m]  
c = 0.1;  
% altezza airfoil[m]  
h = c * hoc;  
% area airfoil[m^2]  
a = c^2 * aoc2;  
  
% -----  
% parametri di flusso  
% -----  
  
% densità fluido [kg/m^3]  
rho = 1.293;  
% viscosità dinamica [kg/ms]  
mu = 1.78e-5;  
% viscosità cinematica [m^2/s]  
nu = mu / rho;  
Re0=4e4;  
  
%INIZIO PROGRAMMA  
  
TSRD = 0.1:0.1:8;  
theta = 0:pi/100:2*pi;  
  
for i=1:size(TSRD,2);  
  
    alpha=1:size(theta,2);  
    LRDP=1:size(theta,2);  
  
    CNa=1:size(theta,2);  
    CTa=1:size(theta,2);
```

```

for j=1:1:size(theta,2);
    alpha(j)=atan(sin(theta(j))/(TSRD(i)+cos(theta(j))));

    LRDP(j)=(TSRD(i)+cos(theta(j)))^2+sin(theta(j))^2;

    Reb=Re0*(TSRD(i)+1);

    cd = drag(cd_t,Re_t,alpha_t,alpha(j),Reb);
    cl = lift(cl_t,Re_t,alpha_t,alpha(j),Reb);

    CNa(j)=cl*cos(alpha(j))+cd*sin(alpha(j));
    CTa(j)=cl*sin(alpha(j))-cd*cos(alpha(j));

    F1(j)=LRDP(j)*(CNa(j)*sin(theta(j))-CTa(j)*cos(theta(j)));

end

CDD= N*H*c*(trapz(theta,F1)/2/pi)/S;

VR=1+ CDD/4;

TSR(i) = TSRD(i)*(1/(1+CDD/4));

for k=1:1:size(theta,2);
    F2(k)=LRDP(k)*CTa(k);
end

CP(i) = 27*N*c*TSR(i)*(trapz(theta,F2)/2/pi)/32/R/(VR^3);

end

```

## APPENDICE B

### Script Double Multiple Streamtube Model per NACA4415

```
Vinf = Vmin:d_V:Vmax;

Vinf=0.59*Vinf;

Omg = Smin/60*2*pi:d_S/60*2*pi:Smax/60*2*pi;   theta =
0.05:d_theta:2*pi;

case 'DMS'

Tbllib = zeros([size(theta,2) size(Omg,2) size(Vinf,2)]);
% preallocating libraries
CTlib = zeros([size(theta,2) size(Omg,2) size(Vinf,2)]);
% preallocating libraries
CNlib = zeros([size(theta,2) size(Omg,2) size(Vinf,2)]);
% preallocating libraries
Cplib = zeros([size(Omg,2) size(Vinf,2)]);
% preallocating libraries

    for i=1:size(Vinf,2);
    % ciclo ext del TSR su Vinf

        for j=1:size(Omg,2);
        % ciclo int del TSR su Omega

            aveT=0;
% initialize average rotor torque
            a_ini=0.01;
            % initialize induction factor before streamtubes cycle (see
            induction script)

                for k=1:size(theta,2)/2; % streamtubes upwind half-cycle

                    dms_inductionUP;
                    % call script updating double actuator induction factor "a" for
                    current upwind streamtube

                        CNlib(k,j,i) = CNa;
% store values of normal force coefficients
                        CTlib(k,j,i) = CTa;
% store values of tangential force coefficients
                        Ts1 = (0.5*rho*CTa*d_H*c*W^2)*R;
% blade element torque at center of each streamtube
                        Tbllib(k,j,i) = H/d_H*Ts1;
% overall torque value of a single blade, at center of each
streamtube

                            aveT = N*d_theta/2/pi*Tbllib(k,j,i) + aveT;
% average rotor torque incremental in streamtubes contributes

                end

            end

        end

    end

end
```

```

        for k=(size(theta,2)/2+1):size(theta,2); % streamtubes
downwind half-cycle

            dms_inductionDW;
            % call script updating double actuator induction factor "a'" for
            current downwind streamtube

            CNlib(k,j,i) = CNa;
            % store values of normal force coefficients
            CTlib(k,j,i) = CTa;
            % store values of tangential force coefficients
            Ts1 = (0.5*rho*CTa*d_H*c*W^2)*R;
            % blade element torque at center of each streamtube
            Tblib(k,j,i) = H/d_H*Ts1;
            % overall torque value of a single blade, at center of each
            streamtube

            aveT = N*d_theta/2/pi*Tblib(k,j,i) + aveT;
        end

        Cplib(j,i) = (aveT)*Omg(j)/0.5/rho/2/R/H/(Vinf(i)^3);

    end
end

```

## APPENDICE C

### Script Caratteristiche Turbina TREO per DMSM

```
Vmin=1;      %minimum inlet [m/s]
d_V=.1;     %step through inlets
Vmax=15;    %maximum inlet

Smin= 5; %20; %minimum turbine speed [RPM]
Smax=1000; %maximum turbine speed
d_S=Smax/100; %step through speeds

d_theta=2*pi/36; %cycle angular resolution [rad]

R=0.5;      %turbine (.5=max, in transient I_var use) radius [m]
c=.094;     %blade chord [m]
N=3;       %no. of blades
sigmR=N*c/R; %radial solidity of machine
H=1.5;     %height(length) of H-Darrieus turbine [m]
d_H=H/10;  %blade element resolution, is dummy for H-Darrieus,
is effective for troposkien shape

% densità fluido [kg/m^3]
rho = 1.293;
% viscosità dinamica [kg/ms]
mu = 1.78e-5;
% viscosità cinematica [m^2/s]
nu = mu / rho;
```

