

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA
SCUOLA POLITECNICA



TESI DI LAUREA
IN
INGEGNERIA MECCANICA

**Turbina eolica ad asse orizzontale con convogliatori di
flusso**

Relatore:

Chiar.^{mo} Prof. Ing. A. Bottaro

Correlatore:

Dott. Ing. A. Freda

Allievo:

Andrea Pedullà

Marzo 2019

Turbina ad asse orizzontale con convogliatori di flusso

Sommario

L'oggetto di questa tesi è lo studio in galleria del vento di un modello di turbina eolica ad asse orizzontale inserito all'interno di convogliatori d'aria per incrementarne la produttività. L'elaborato tocca i punti fondamentali, dalla taratura della turbina fino alle prove e alla raccolta dati in galleria del vento.

Il modello è stato modificato in corso d'opera per incrementarne la produttività e la ripetibilità durante le prove; inoltre è stata adottata una serie di resistenze elettriche variabili per simulare il carico applicato alla turbina e un programma Arduino per il controllo del numero di giri, la coppia trasmessa e il salvataggio dei dati.

Le prove sono state effettuate nella galleria del vento del polo DICCA in diverse condizioni di regime di vento e geometria del modello stesso, adottando diverse configurazioni di convogliatori per analizzare quella che producesse di più.

Tramite un codice Matlab® è stato poi possibile analizzare i dati di prese di pressioni, velocità del vento, regime di rotazione e incidenza del freno meccanico e creare ed analizzare curve di potenza e di pressione.

Horizontal axis wind turbine with flow conveyors

Abstract

The subject of this thesis is the wind tunnel study of a horizontal axis wind turbine model inserted into air conveyors to increase productivity.

The elaborate touches on the fundamental points, from the calibration of the turbine to the testing and data collection in the wind tunnel.

The model has been modified during the work to increase its productivity and repeatability during the tests; In addition, a series of variable electric resistors has been adopted to simulate the load applied to the turbine and an Arduino program for controlling the number of revolutions, torque transmitted and data saving.

The tests were carried out in the wind tunnel of the DICCA pole under different wind and geometry conditions of the model itself, adopting different conveyor configurations to analyze the one that produces the most.

Through a Matlab® code, it was then possible to analyze the data of pressures, wind speed, rotation and incidence of the mechanical brake and create and analyze power and pressure curves.

Ringraziamenti

Dunque ci siamo.

Tanta fatica, tanti sforzi, tanti fallimenti e altrettanti successi per arrivare finalmente ad oggi.

Ho iniziato questo percorso, oltre che per passione e interesse personale, per una promessa che feci da bambino ad una persona speciale che ora non c'è più, una persona che sono sicuro abbia seguito ogni mio passo fino al raggiungimento di questo traguardo tanto importante.

Questi ringraziamenti devono iniziare elogiando i miei genitori, Vincenzo e Tiziana, che sempre mi hanno supportato, incoraggiandomi e festeggiando i successi, spronandomi a fare meglio dopo gli insuccessi. Grazie a loro sono riuscito a tener duro e proseguire, ma soprattutto a crescere.

Grazie ad Alessio, mio fratello e mio migliore amico, che mi ha sopportato in ogni stato d'animo, con il quale i discorsi da "ingegnere" e i confronti sono diventati spunto per riflessioni e tante risate. Grazie a lui sono riuscito a passare l'ultimo esame, divenuto per me un incubo per troppo tempo.

Voglio ringraziare Teresa per aver sempre creduto in me e per avermi sempre spronato.

Un pensiero va assolutamente al grande "Bora", in primis, e a tutti i compagni di disavventure, con cui abbiamo preparato una marea di esami e con cui tutto lo studio è stato più semplice e piacevole, saranno tanti i momenti che ricorderò e porterò nel cuore.

Proseguo ringraziando tutti i membri della "Swordbase" Andrea, Alessandro, Alessio, Edoardo, Francesco. Francesco, Gregorio, Kenneth, Luca, Matteo, Matteo, Simone, Tommaso, divagare dagli studi non è mai stato così bello!

Ultima ma non per importanza, voglio ringraziare la mia metà, la mia complice, Nicoletta, che non ha dubitato mai di me e che mi ha sempre sostenuto e spinto a fare meglio; anche se da "poco" nella mia vita è stata un mattone fondamentale per tanti, troppi motivi.

È il momento di chiudere, mettere la parola fine su questa "avventura" e voltare pagina per un nuovo inizio... ma è davvero la fine?

Indice

Sommario.....	I
Abstract.....	II
Ringraziamenti.....	III
Simbologia.....	1
1 - Introduzione.....	3
2 - Energie rinnovabili.....	4
2.1 - Eolico.....	4
2.1.1 - Legge di Betz.....	6
2.2 - Turbine eoliche.....	9
2.2.1 - Turbine ad asse orizzontale.....	9
2.2.2 - Turbine ad asse verticale.....	10
3 - Progetto "Ghibli".....	11
4 - Sperimentazione in galleria del vento.....	12
4.1 - Costruzione del modello.....	12
4.1.1 - Codice Arduino®.....	13
4.1.2 - Turbina.....	15
4.1.3 - Resistenze.....	17
4.1.4 - Coni.....	18
4.2 - Calibratura e taratura.....	19
4.3 - Messa in galleria.....	20
4.3.1 - Alloggiamento prese di pressione.....	21
5 - Analisi dei dati.....	22
5.1 - Curve di potenza.....	22
5.2 - Angoli.....	33
5.3 - Pressioni.....	36
6 - Conclusioni.....	45
Appendice A.....	49
1 Camera di prova e sezioni di misura.....	50
2 Gruppo motore.....	52
3 Divergenti.....	52
4 Angoli.....	53
5 Camera di calma e convergente.....	54
6 Caratterizzazione e modellazione dell'impianto.....	55
7 Strumentazione.....	56

Simbologia

Simboli

E	Energia	[J]
ρ	Densità	[kg/m ³]
v	Velocità	[m/s]
m	Massa	[kg]
A	Area	[m ²]
P	Potenza	[W]
\dot{m}	Portata massica	[kg/s]
Q	Portata volumetrica	[m ³ /s]
F	Forza	[N]
Cl	Coefficiente di potenza di Betz	
Cpmax	Coefficiente di Betz	
p	Pressione	[Pa]
h	Quota	[m]
R	Resistenza	[Ω]
V	Tensione	[Volt]
f	Frequenza	[Hz]
T	Tempo	[s]
Cp	Coefficiente di potenza	
Uref	Velocità del flusso in galleria	[m/s]
K	Energia cinetica	[J]

Apici e Pedici

1	iniziale
2	finale
R	reale
s	suolo
z	quota di riferimento
v	volumetrica

1 - Introduzione

L'oggetto di questa tesi sperimentale è lo studio in galleria del vento di una micro turbina eolica a flusso convogliato.

A fronte della sperimentazione in galleria del vento sono state effettuate delle simulazioni a computer per selezionare le modalità più interessanti e produttive da testare in laboratorio.

L'idea di intubare una turbina eolica è nata sull'onda di alcune microturbine installate sui viadotti autostradali spagnoli con il solo convogliatore anteriore. Questa idea è stata poi sviluppata e migliorata aggiungendo al prototipo una camera centrale atta a contenere il corpo macchina e un cono di deflusso per avvantaggiare l'uscita del flusso d'aria a valle della turbina e accelerarne la velocità nella sezione centrale.

I coni scelti sono stati uno a geometria tronco conica per il deflusso, realizzato in carpenteria metallica, e uno a geometria paraboloidale iperbolica creato tramite stampa in 3D.

Uno dei punti chiave della sperimentazione in galleria era analizzare la geometria che più aumentava la produttività, cosa che è stata possibile effettuare variando la disposizione dei coni rispetto al corpo macchina.

Nel corso della sperimentazione la turbina vera e propria ha subito diverse modifiche per poter raggiungere potenze sempre più elevate: si è passati da una prima configurazione a sette palette ad una a tre nel progetto finale, sono stati cambiati sia il freno utilizzato per simulare il carico produttivo sia la cella di carico che permetteva di leggere la potenza prodotta e tutte le grandezze fisiche in gioco.

Il software utilizzato dalla turbina è stato creato in collaborazione con la Axe Factory Metal Works tramite un codice Arduino che permetteva di controllare la registrazione dei dati su micro sd, il controllo del freno elettromagnetico, la lettura del numero di giri, il momento torcente all'albero (tradotto poi in coppia e in potenza prodotta).

Durante i test condotti nella galleria del vento del polo DICCA di ingegneria civile, è stato possibile effettuare diverse campagne di raccolta dati; in generale le prove si sono sempre effettuate con un setup della turbina fissato, facendo variare la velocità del vento e l'azione del freno che simulava la produzione elettrica.

Una volta scelti i setup più soddisfacenti è stata effettuata un'altra campagna di acquisizione dati facendo variare l'angolo di incidenza con il flusso e analizzando le pressioni all'imbocco, in prossimità della girante e allo sbocco.

Tutti i dati sono stati inseriti in delle routine di Matlab® in modo da poter analizzare i risultati.

2 - Energie rinnovabili

Con il termine di energie rinnovabili si intendono energie che si rigenerano in tempi brevi se confrontati alla storia umana. Le fonti di tali forme di energia sono dette risorse energetiche rinnovabili.

Alcune di esse vengono ritenute inestinguibili poiché si rigenerano allo stesso ritmo con il quale vengono consumate [1].

Per citarne alcune, tra le energie rinnovabili si annoverano l'energia eolica, l'energia solare, l'energia idroelettrica.

Le energie rinnovabili sono dunque delle alternative alle risorse fossili; hanno la peculiarità di essere delle "energie pulite", cioè non riversano nell'ambiente sostanze inquinanti.

Il più importante problema derivante dall'utilizzo di energie non rinnovabili quali carbone, combustibili fossili o nucleare riguarda lo smaltimento dei rifiuti e il rilascio in atmosfera di enormi quantità di CO₂.

A tal proposito sono stati stipulati, sia in passato che nel presente, diversi protocolli internazionali e fissati obiettivi per cercare di diminuire sempre più tali emissioni, cercando di abbattere drasticamente la concentrazione di agenti inquinanti nell'atmosfera.

Il più famoso è stato il Protocollo di Kyoto, redatto l'11 dicembre del 1997 che prevedeva l'obbligo per i paesi sottoscrittori di operare una riduzione delle emissioni di elementi inquinanti quali biossido di carbonio, metano, idro-perfluoro ed esafluoro di carbonio con un tetto minimo dell'8,65% rispetto alle emissioni registrate nel 1990, durante il periodo che andava dal 2008 al 2012. Ad oggi si contano 175 paesi che hanno ratificato o hanno iniziato le procedure per la ratifica [6].

L'utilizzo dei combustibili fossili è ancora molto presente nelle realtà quotidiane, anche se è aumentata la consapevolezza del bisogno di aumentare la produzione energetica attraverso le fonti rinnovabili.

Appare evidente quindi l'adozione di metodi differenti da quelli non rinnovabili.

Un valido alleato è il vento e l'energia che se ne può ricavare.

La produzione eolica all'interno dell'eurozona sta crescendo molto velocemente e si punta al raggiungimento del 20% del fabbisogno entro il 2030, uno studio di ANEV (Associazione Nazionale Energia del Vento) rivela infatti che entro tale data si stima un potenziale di 17150 MW di cui 950 MW off-shore e 400 MW minieolici. Tale incremento coinciderebbe con circa il raddoppio della potenza generata attraverso turbine eoliche dato che, a fine 2016, si aggirava attorno ai 9,3 GW per una produzione di circa 17,5 TW/h.

Raggiungere un tale obiettivo vorrebbe dire un risparmio di quasi 50 milioni di barili di petrolio all'anno ed evitare una produzione di CO₂ di circa 25 tonnellate/anno [5].

Attualmente in Italia le fonti rinnovabili permettono di produrre il 37% dell'energia elettrica del paese [6].

Lo studio di questa tesi è volto all'energia eolica e all'ottimizzazione di essa.

2.1 - Eolico

L'energia eolica discende dall'energia solare la quale crea dei moti convettivi nell'atmosfera per via del riscaldamento non uniforme della crosta terrestre, si creano così delle sacche d'aria più calde che si mettono in movimento [3]. Tale movimento crea zone ad alta e a bassa pressione. Il movimento ordinato di queste masse d'aria dovuto alle differenze di pressioni che si generano è detto vento [2].

A seconda della direzione con la quale il vento proviene assume diversi nomi come riportato in Tab. 2.1

Tab. 2.1 - Denominazione dei venti

Punto cardinale	Abbreviazione	Direzione	Vento
Nord	N	0°	Tramontana
Nord-Est	NE	45°	Grecale
Est	E	90°	Levante
Sud-Est	SE	135°	Scirocco
Sud	S	180°	Ostro/Mezzogiorno
Sud-Ovest	SW	225°	Libeccio
Ovest	W	270°	Ponente
Nord-Ovest	NW	315°	Maestrale

I venti possono essere suddivisi in:

- costanti
- periodici (venti che invertono periodicamente il loro senso, per esempio i monsoni o le brezze)
- locali (a seconda delle zone in cui si generano)
- ciclonici

Uno dei modi di creare energia pulita è attraverso il vento, tale tipologia di energia viene chiamata eolica.

Fin dall'antichità l'uomo ha sfruttato questo tipo di energia a proprio vantaggio, per implementare il lavoro manuale o per accelerare le produzioni di grano e prodotti affini. I primi impieghi dell'energia eolica sono stati le vele navali e i mulini a vento.

Il vento non è sempre costante e uniforme, vi sono diversi aspetti che ne caratterizzano la variabilità; uno di essi è la conformazione del territorio e delle infrastrutture che risiedono in esso.

Tipicamente i venti in quota possiedono una velocità più elevata di quelli a terra.

Si è trovato che la velocità del vento in relazione all'altezza a cui si trova vale:

$$v_z = v_s \cdot \left(\frac{h_z}{h_s} \right)^n \quad (2.1)$$

Tale formula permette di capire che le asperità del terreno inducono uno strato limite tanto esteso in verticale quanto più la rugosità è elevata.

Un rilievo naturale o artificiale riduce il passaggio di aria, aumentandone così la velocità e la turbolenza. Nel corso della progettazione di un aerogeneratore bisogna dunque tener conto degli effetti che possono avere le strutture della turbina eolica con il flusso di vento.

Una turbina eolica converte parte dell'energia cinetica del vento in energia meccanica, riducendo la velocità del vento che la attraversa.

L'energia cinetica E per unità di superficie è quella che interessa un'area perpendicolare alla direzione del flusso dell'aria in un intervallo di tempo T risulta essere:

$$E = \frac{1}{2} \int_0^T \rho v^3(t) dt \quad (2.2)$$

dove ρ è la densità dell'aria (1,2 kg/m³) e v è la velocità del vento. Tipicamente il vento che impatta sulla turbina riduce la propria velocità e quindi la propria potenza. La Legge di Betz, fisico ed ingegnere tedesco pioniere della tecnologia delle turbine eoliche, afferma infatti che solo il 59% dell'energia cinetica contenuta nel vento è utilizzabile. Se così non fosse, cioè se tutta l'energia del vento potesse essere assorbita al rotore della turbina, il vento dovrebbe fermarsi tra le pale della girante [2].

2.1.1 - Legge di Betz

Come anticipato, la legge di Betz permette di determinare il valore del rendimento di una turbina eolica.

Prima di procedere bisogna introdurre delle ipotesi semplificative:

- il flusso in ingresso e in uscita del disco rotorico è uniforme e assiale
- il rotore della turbina viene schematizzato come un disco di superficie A
- il flusso è incomprimibile e il fenomeno non genera scambi di calore
- il rotore non possiede mozzo e ha un numero infinito di pale con attrito nullo
- ad eccezione del rotore non sono presenti altri ostacoli all'interno delle vene fluide

L'energia cinetica espressa da una massa in movimento è, come noto:

$$K = \frac{1}{2} m v^2 \quad (2.3)$$

Conoscendo la velocità della massa e una generica sezione attraverso la quale essa passa è possibile calcolare la portata volumetrica e quella massica:

$$Q_v = vA \quad (2.4) \quad \dot{m} = \rho vA \quad (2.5)$$

La quantità di energia trasportata dal flusso per unità di tempo rappresenta la potenza del flusso stesso ed è data da:

$$P = \frac{1}{2} \rho v^3 A \quad (2.6)$$

La potenza estraibile da un aerogeneratore è pari alla differenza delle potenze a monte e a valle del flusso:

$$P = \frac{1}{2} \rho v_1^3 A_1 - \frac{1}{2} \rho v_2^3 A_2 = \frac{1}{2} \rho (v_1^3 A_1 - v_2^3 A_2) \quad (2.7)$$

Considerando la continuità è possibile scrivere:

$$P = \frac{1}{2} \dot{m} (v_1^3 - v_2^3) \quad (2.8)$$

Dalla quale è facilmente dimostrabile che potenze massime si otterrebbero con velocità in uscita nulle, cosa impossibile perché comporterebbe che anche la velocità in ingresso v_1 sia nulla, senza avere quindi un flusso.

Il vero significato fisico non è quindi da riscontrare nei valori delle velocità ma nel rapporto delle stesse. Per utilizzare tale rapporto bisogna introdurre una nuova equazione che esprime la forza esercitata dal flusso sul rotore:

$$F = \dot{m} (v_1 - v_2) \quad (2.9)$$

Per la terza legge di Newton questa forza deve essere compensata da una uguale e opposta dal disco rotorico, ad una velocità v' . La potenza richiesta sarà quindi:

$$P = Fv' = \dot{m} (v_1 - v_2) v' \quad (2.10)$$

eguagliando le due equazioni 2.8 e 2.10 della potenza si ottiene

$$v' = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (2.11)$$

a seguito della quale è possibile scrivere, sostituendo la 2.11 nella 2.8:

$$P = \frac{1}{4} \dot{m} (v_1^3 - v_2^3) (v_1 + v_2) \quad (2.12)$$

Al fine di definire un parametro universale che permetta di stimare la potenza che può generare un convertitore, si mettano in relazione la potenza ottenuta dalla 2.12 con quella iniziale del flusso data dalla 2.6:

$$C_p = \frac{P}{P_0} = \frac{\frac{1}{4} \dot{m} (v_1^3 - v_2^3) (v_1 + v_2)}{\frac{1}{2} \rho v^3 A} \quad (2.13)$$

Tale quantità viene definita coefficiente di potenza, esso rappresenta la potenza teorica che può essere estratta da una corrente fluida. Derivando la 2.13 rispetto a $\frac{v_2}{v_1}$ si ottiene il

massimo della funzione C_p riscontrabile in $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$. Sostituendo tale valore in C_p si

ottiene il valore massimo del coefficiente di potenza in $C_p = 0,593$. L'equazione è rappresentabile in funzione del rapporto di velocità e del coefficiente di potenza:

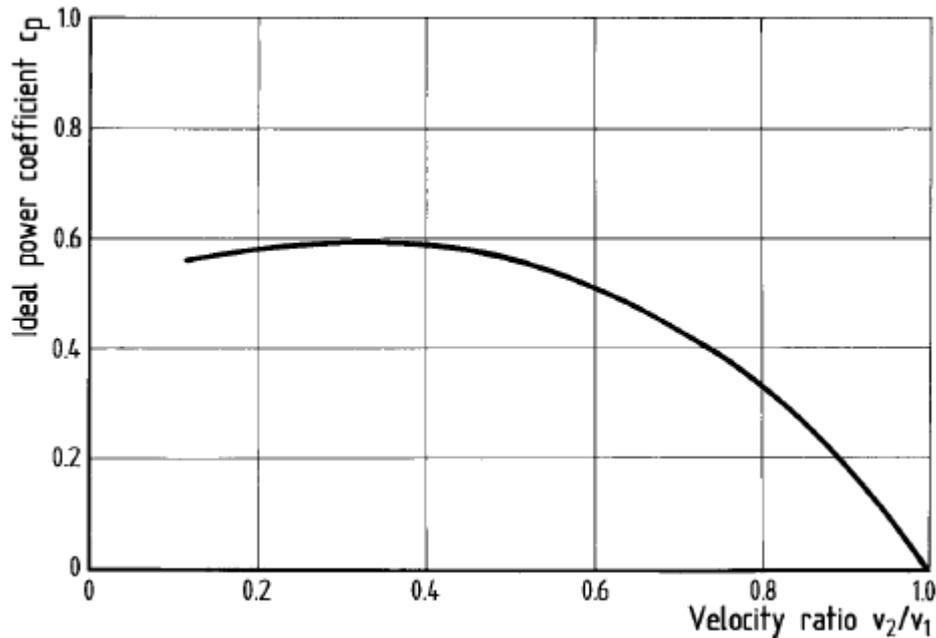


Fig.2.1 - Coefficiente di Betz

È possibile quindi calcolare il coefficiente di potenza massimo

$$C_{p_{\max}} = 0,593$$

Questo risultato permette di affermare che, al massimo, è possibile sfruttare il 59% della potenza della corrente libera.

La potenza erogata da un generatore eolico risulta quindi essere:

$$P_r = C_l \frac{1}{2} \rho v^3 A \quad (2.14)$$

Dove:

- P_r è la potenza reale prodotta
- C_l è il coefficiente di potenza che tiene conto della legge di Betz ($C_l = 0,593$)
- A è l'area spazzata dalle pale
- v è la velocità del vento

La legge di Betz ci può dare solo una stima delle reali potenzialità di una turbina eolica.

La velocità del flusso che investe la turbina non è solo importante per poter calcolare la potenza prodotta da quest'ultima, ma anche per designare i diversi range di funzionamento del convertitore.

Usualmente i generatori eolici sono progettati per iniziare a lavorare a una cosiddetta "cut on wind speed", una velocità del vento prefissata sotto la quale non avrebbe senso far lavorare la turbina e che è solitamente posta tra i 3 e i 5 m/s.

Analogamente alla velocità inferiore di funzionamento esiste anche una velocità superiore di funzionamento detta "cut off wind speed", tipicamente fissata a 25 m/s oltre la quale si verrebbero a generare sovrasollecitazioni che potrebbero generare rotture [2].

Questi limiti sono i problemi produttivi più grossi per l'eolico, in quanto si devono presentare le condizioni giuste per poter produrre. Per ridurre questo inconveniente, prima di iniziare la progettazione, è buona norma effettuare una campagna anemometrica nel sito in cui sorgerà il convertitore eolico, così da sapere la forza e la durata dei venti.

2.2 - Turbine eoliche

Gli aerogeneratori possono essere classificati secondo due principali aspetti: il funzionamento aerodinamico e il design di costruzione.

Il funzionamento aerodinamico è caratterizzato dal metodo in cui le pale convertono il flusso d'aria in energia, che le suddivide in turbine a portanza (o lift) e a resistenza (o drag). Le più diffuse sono quelle a portanza, in esse, rispetto a quelle a drag, il vento scorre su entrambe le facce della pala (che hanno due profili differenti) creando così in corrispondenza della superficie superiore una zona di deportanza rispetto a quella sulla faccia inferiore. Il profilo alare della pala determina una velocità differente della vena fluida tra la superficie superiore rispetto a quella inferiore che produce la differenza di pressione introdotta poc'anzi. Questa differenza di pressione determina una forza detta portanza aerodinamica, analoga a quella che si genera sulle ali degli aerei.

Per quanto riguarda invece le turbine basate sul dragging, esse sfruttano la semplice pressione aerodinamica che viene esercitata dal vento impattando sulla superficie delle pale.

La classificazione secondo il design di costruzione è possibile suddividendo gli aerogeneratori in due grandi gruppi facilmente distinguibili: turbine ad asse di rotazione verticale e turbine ad asse di rotazione orizzontale.

2.2.1 - Turbine ad asse orizzontale



Fig. 2.2 - Turbine ad asse orizzontale

La stragrande maggioranza delle turbine è ad asse orizzontale, con l'asse della navicella e del rotore parallelo alla direzione del vento.

Tali generatori hanno il rotore sopravento rispetto alla torre. Ne esistono diversi tipi a seconda dell'impiego:

- Monopala: poco diffuse per via della loro rumorosità, sfruttano venti molto veloci
- Bipala: in queste macchine è stato introdotto il mozzo oscillante che permette di ridurre gli sforzi al piede della pala
- Tripala: i più utilizzati, riducono le dinamiche tra pala e rotore permettendo una coppia motrice uniforme
- Multipala: aumentando il numero di pale si riduce la velocità di rotazione

Le turbine ad asse orizzontale hanno tipicamente rendimenti maggiori di quelle ad asse verticale e, a parità di vento a pieno regime, producono più energia.

In contro hanno un problema di orientazione delle pale rispetto al vento, cosa che, in presenza di venti turbolenti o incostanti, può creare difficoltà per la generazione di energia.

Un altro fondamentale problema è la rumorosità che non ne permette l'installazione nei pressi di centri abitati.

2.2.2 - Turbine ad asse verticale

Le turbine ad asse verticale hanno l'asse di rotazione perpendicolare alla direzione del vento.

In principio si basavano sul principio del dragging.

Ne esistono di diversi tipi:

- Savonius: costituito da due o tre pale semicilindriche, facilmente integrabile in edifici per via della sua poca rumorosità
- Darrieus: geometria particolare e alto regime di rotazione, sconsigliata l'installazione vicino a centri urbani

Uno dei principali svantaggi delle turbine eoliche ad asse verticale che viene tradotto in minori potenze generate è che, mentre una pala è sopravento, un'altra rimane sottovento, diminuendo l'area in favore del vento.

Al contrario delle turbine ad asse orizzontale vantano invece rumorosità molto contenuta, geometria più compatta, coppia di avviamento richiesta molto bassa, inoltre sono installabili in campo domestico.

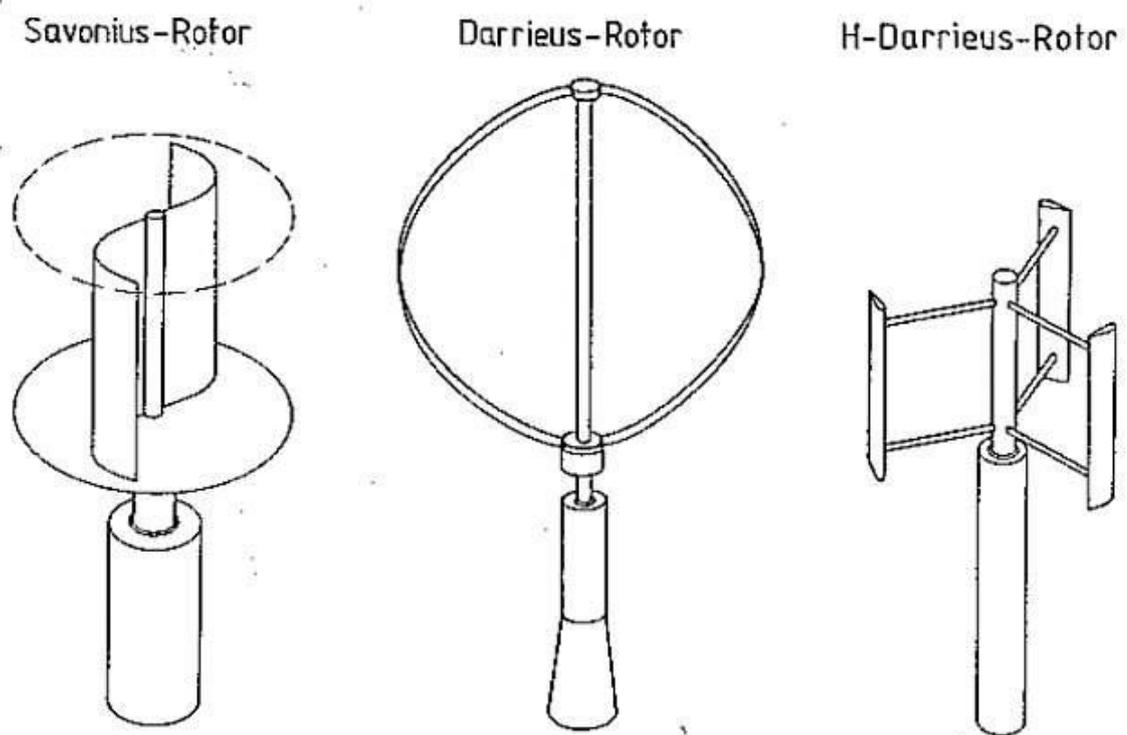


Fig. 2.3 - Turbine ad asse verticale

3 - Progetto "Ghibli"

Il progetto "Ghibli" è stato ideato sulla falsa riga di alcuni generatori eolici Spagnoli installati su dei viadotti autostradali e inseriti all'interno di cilindri che comprimano l'aria nell'intorno della girante. La turbina eolica del progetto "Ghibli" parte da questa idea migliorandola, inserendo oltre al cilindro che abbraccia il corpo della turbina, anche convogliatori a monte e a valle di essa.

I convogliatori in ingresso hanno la funzione di comprimere il flusso d'aria a monte del corpo macchina in modo da aumentarne la velocità e la portata, creando così un flusso impattante la turbina di maggiore entità; grazie poi a dei diffusori in uscita è possibile accelerare l'aria all'interno del sistema aumentando ancora la portata. Tutte le analisi teoriche hanno avuto riscontro più che positivo durante la sperimentazione in galleria del vento.

3.1 - Moto in condotti

Degna di nota è l'analisi dei fluidi all'interno di condotti. Analizziamo l'equazione di Bernoulli:

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + h_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + h_2 \quad (3.1)$$

Prendiamo poi in considerazione un condotto (come quello della turbina in analisi) che ha la sezione 1 e la sezione 2 alla stessa quota, la formula 3.1 si modifica in:

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (3.2)$$

Da cui è possibile affermare che:

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{cost} \quad (3.3)$$

Se dunque l'area della sezione 2 è più piccola di quella 1, allora la velocità 2 è più alta della 1, in tal modo la pressione 2 risulta più bassa rispetto alla 1.

Si può notare quindi che all'aumentare la velocità del fluido si crea necessariamente una diminuzione della pressione interna al fluido stesso. Tale fenomeno è stato studiato ed analizzato da Giovanni Battista Venturi, da cui prende il nome.

L'effetto Venturi è anche detto paradosso idrodinamico poiché si può pensare che la pressione aumenti in corrispondenza delle strozzature; tuttavia, per la legge della portata, in corrispondenza delle strozzature è la velocità ad aumentare [4].

Il fenomeno fisico alla base dell'effetto Venturi è di basilare importanza per il funzionamento dell'aerogeneratore oggetto di questa tesi, grazie ad esso infatti, è possibile aumentare la velocità dell'aria all'interno del condotto, aumentando così la velocità di rotazione della turbina e innalzando così il picco di potenza generato.

4 - Sperimentazione in galleria del vento

La sperimentazione in galleria del vento è stata scandita da diversi punti fondamentali:

- costruzione del modello in tutte le sue parti
- calibratura e taratura delle celle di carico del modello
- messa in galleria
- alloggiamento delle prese di pressione
- raccolta dati e analisi

4.1 - Costruzione del modello

La costruzione del modello è stata affidata alla ditta "Axe factory metalworks" grazie alla quale è stato possibile sperimentare diversi tipi di pale e corpi turbina.

Il primo modello presentava corpo in acciaio e una girante a sette pale. All'interno del corpo macchina era alloggiata una cella di carico in ferro (appositamente creata per tale modello) atta a calcolare il momento ricevuto dalla girante per via del carico applicato tramite un freno elettromagnetico, e da un contagiri tramite sensore ad effetto Hall. Il valore del momento torcente è stato ricavato attraverso la calibratura statica del modello. In seguito la cella di carico è stata sostituita da una in acciaio, poiché quella in ferro soffriva

di effetti di isteresi che ne compromettevano la ripetibilità delle letture e la velocità nella risposta.

La seconda girante è stata modificata da quella a sette pale ad una a sei pale realizzate in resina epossidica con geometria nettamente differente per incrementare il regime di rotazione, geometria che, è stata modificata altre due volte per trovare lo spin desiderato.

È stato utilizzato un codice Arduino per la selezione del freno elettromagnetico, la registrazione e la raccolta dei dati.

A seguito di alcune prove è stato riscontrato che questa configurazione permetteva prove poco ripetibili.

È stata cambiata nuovamente la geometria del modello e del sistema del freno per generare il carico: è stato utilizzato un motorino elettrico ESCAP® con uscita da 0-24V e un sistema di resistenze per il carico selezionabile tramite due potenziometri. Come ultima modifica è stato ridotto il numero di pale, passando da 6 a 3, per incrementare il numero di giri (minor numero di pale si traduce in velocità di rotazione più elevata).

In Fig. 4.1 il modello finale nella camera di prova della galleria del vento.

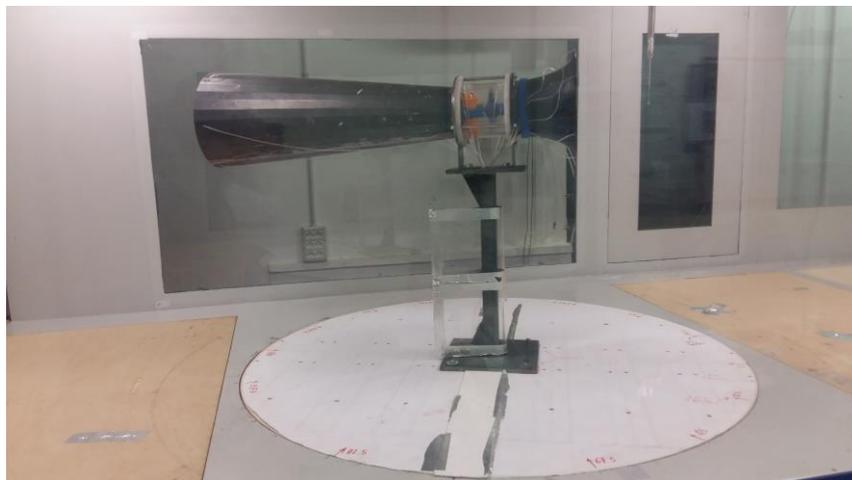


Fig. 4.1 - Modello nella configurazione finale

4.1.1 - Codice Arduino®

Come già anticipato è stato creato un codice Arduino® per la selezione del freno del primo modello, per l'acquisizione e la registrazione dei dati e per la tara della cella di carico.

Il sistema è stato progettato in modo da poter essere alimentato tramite power bank, in vista dell'utilizzo finale del progetto.

Vengono analizzate di seguito le porzioni di codice fondamentali e di maggiore rilievo, al fine di comprendere il funzionamento del programma.

La prima parte di codice riguarda il caricamento delle librerie per far funzionare lo schermo LCD, la micro SD e quelle riservate ai calcoli:

```
//#include <Q2HX711.h>

#include <SPI.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>
#include <EEPROM.h>
#include "HX711.h"
#include <SD.h>
```

La seconda parte del codice riguarda la definizione delle costanti quali i valori per le celle di carico e i bracci per calcolare i momenti:

```
//#define costante 1280.f // coeff gr. alluminio da controllare
//#define costante 65034.f // coeff alluminio braccio 12
#define costante 42200.f // coeff inox braccio 15
```

A questo punto Arduino blocca per un istante il valore del contagiri letto dal sensore di Hall e calcola i giri al minuto:

```
// interrupt contagiri sensore hall
#define r_counter 2 // ingresso contagiri
#define interrupt_pin_rpm 2
#define interrupt_num 0
#define coeff_watt 0.001047194
//#define conv_gradi_radianti 0.017453293

// moltiplicato 360 gradi 6.2831628 radianti per giro

// diviso 60 0.10471938 per ottenere radianti al secondo da giri al
minuto

// divido per 1000 perche il braccio e in mm
#define braccio 15.000000000 // braccio in mm
```

La quarta parte di codice è programmata per la definizione dei tasti sull'interfaccia utente, assegnando ad ogni interruttore un pin della motherboard, definendo i tasti di avvio e fine registrazione, il tasto per la tara della cella di carico ed infine il tasto per visualizzare le grandezze:

```
// tastiera assegnazione pin

#define tasto1 22 // tasto start rec
#define tasto2 24 // tasto tara loadcell
#define tasto3 26 // tasto display visualizzazione grandezze
#define tasto4 28 // tasto stop rec
```

Una volta fatto ciò il codice salva sulla memoria esterna i valori e azzera nuovamente tutti i contatori per iniziare un nuovo ciclo.

Lo step successivo è quello di calcolare il nuovo valore della cella di carico, del contagiri e del valore della potenza prodotta:

```
// cella di carico
loadcell_value = scale.get_units(5);

// calcolo rpm
rpm = ((c1 - c1_old) * 60000) / (millis() - t_old_rpm);
c1_old = c1;
t_old_rpm = millis();

// calcolo watt
```

```
// float watt = loadcell_value * rpm * coeff_watt * braccio ;  
float watt = loadcell_value * rpm * coeff_watt ;
```

L'ultima istruzione consiste nel salvare i file su SD e chiudere il ciclo.

Tutto ciò viene ripetuto per tutta la durata della campagna di acquisizione dati.

Grazie alla motherboard di Arduino, Fig. 4.2, è stato inoltre possibile inserire un filtro Trigger per eliminare il rumore continuo di 1 Volt proveniente dall'inverter di galleria che durante le campagne di acquisizione dati creava un grosso disturbo e rendeva di fatto poco ripetibili le prove. Questo rumore andava a disturbare soprattutto il lettore del contagiri, impedendo al software della galleria di filtrare i valori del sensore di Hall, tradotti in un'onda quadra. Con l'aggiunta del filtro è stato possibile proseguire gli esperimenti.

La selezione del freno è stata effettuata attraverso due potenziometri in serie che permettevano di far variare il carico di resistenze.

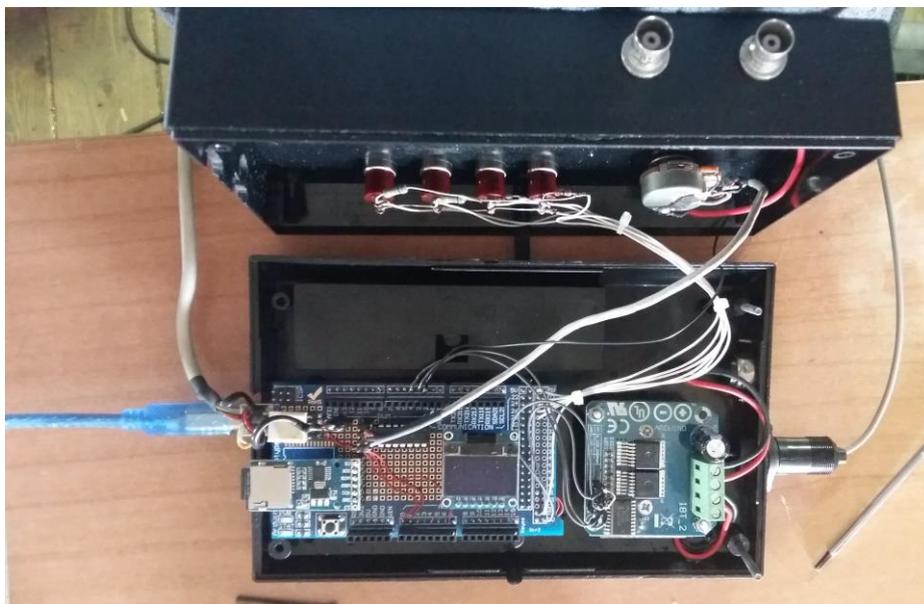


Fig. 4.2 - Motherboard Arduino

4.1.2 - Turbina

La realizzazione della turbina è stata effettuata dalla "Axe Factory metalworks".

Il primo modello prevedeva un corpo macchina in acciaio contenente i cablaggi per il collegamento in galleria, il freno elettromagnetico per la simulazione del carico, una cella di carico per il calcolo della coppia trasmessa e da essa la potenza, un sensore ad effetto Hall per il contagiri.

Il freno elettromagnetico è stato realizzato attraverso tre dischi asolati in cui sono state alloggiare delle spine fissate all'ogiva che li mette in rotazione. A seconda della quantità di corrente che si dà alla bobina i tre dischi si avvicinano o si allontanano tra loro ingranando e frenando il moto rotatorio della turbina. Prima di ogni campagna di acquisizione dati i dischi sono stati oliati per evitare sfregamenti.

Il sensore per effetto Hall permette di calcolare la velocità della girante attraverso il moto di un piccolo magnete posto sull'ogiva del corpo macchina: quando il magnete è in prossimità del sensore esso restituisce 5V, quando invece il magnete è lontano dal sensore

si leggeranno 0V. Da questo alternarsi di tensione/non tensione si è costruita un'onda quadra che faceva coincidere ogni cresta ad ogni passaggio del magnete sul sensore.



Fig. 4.3 - Primo modello

Per il secondo corpo macchina è stato utilizzato un motorino elettrico ESCAP® che ha permesso di utilizzare la turbina come un generatore. Il motore elettrico è stato racchiuso all'interno di una custodia in stampa 3D per salvaguardarne l'integrità e permetterne l'installazione all'interno del cilindro in plexiglass.

L'implementazione della turbina non ha solo interessato il corpo macchina e il suo sistema interno, ma anche le palette della girante.

La prima girante era equipaggiata da sette palette, poi ridotte a sei in resina epossidica. Ben presto ci si è resi conto che le palette in resina erano troppo pesanti e in sovrannumero per i regimi di rotazione prefissati per il progetto; sono state quindi ridotte a tre e ne è stato modificato il profilo sia sul bordo d'attacco che sul bordo d'uscita.

Il modello finale è stato equipaggiato da tre palette in stampa 3D accoppiate per mezzo di un incastro a coda di rondine al tamburo del motore elettrico.



Fig. 4.4 - Palette in stampa 3D

4.1.3 - Resistenze

È stato creato un sistema di resistenze per far variare il freno attraverso il motorino elettrico in modo uniforme e ripetibile per poter iniziare la sperimentazione in galleria. Si sono utilizzate resistenze con valori nominali di 4.7Ω, 8.2 Ω, 9.4 Ω, 12.9 Ω, 16.4 Ω, 22 Ω, 32 Ω, 47 Ω, 56 Ω, 69 Ω, 78 Ω, 94 Ω, 112 Ω.



Fig. 4.5 - Resistenze

Prima di collegare le resistenze tra di loro sono stati controllati i valori di ognuna di esse tramite un tester così da avere i valori reali: 5 Ω, 8.4 Ω, 9.6 Ω, 13.1 Ω, 16.4 Ω, 22 Ω, 31.8 Ω, 51.2 Ω, 60.8 Ω, 72.3 Ω, 81.7 Ω, 96.5 Ω, 116.6 Ω.

Le resistenze sono state messe in serie tra loro e collegate a due potenziometri in modo da far variare il carico applicato.

In tabella Tab. 4.1 sono riportate le posizioni dei potenziometri per ottenere il valore di resistenza desiderato

Tab. 4.1 - Posizioni dei potenziometri per selezione del freno

Posizione potenziometro 1	Posizione potenziometro 2	Valore resistenza
1	1	5,0 Ω
2	1	8,4 Ω
3	1	9,6 Ω
4	1	13,1 Ω
5	1	16,4 Ω
6	1	22,0 Ω
7	1	31,8 Ω
1	2	51,2 Ω
2	2	54,8 Ω
1	3	60,8 Ω

3	3	65,6 Ω
1	4	72,3 Ω
7	2	78,3 Ω
4	4	80,5 Ω
1	5	81,7 Ω
7	3	87,7 Ω
1	6	96,5 Ω
7	4	99,3 Ω
2	6	100,1 Ω
3	6	101,3 Ω
4	6	105,0 Ω
7	5	108,7 Ω
6	6	113,6 Ω
1	7	116,6 Ω
2	7	120,3 Ω
3	7	121,3 Ω
7	6	123,5 Ω
4	7	124,8 Ω
5	7	128,3 Ω
6	7	133,8 Ω
7	7	143,5 Ω
8	8	9999 Ω

La posizione 8-8 viene riportata con resistenza 9999 Ω per simulare resistenza infinita (motore libero di girare senza freno).

Per ogni misurazione in galleria sono state utilizzate le resistenze con più influenza sulla costruzione della curva di potenza; non sono state utilizzate resistenze simili tra loro né resistenze troppo basse per una velocità del vento troppo elevata, né resistenze troppo alte per valori di vento troppo basso.

4.1.4 - Coni

Punto focale per il progetto sono stati i coni a monte e a valle del generatore eolico. Tali coni infatti sono la chiave di volta per aumentare la potenza della turbina. Dapprima erano stati teorizzati coni di imbocco sia a geometria cilindrica che a geometria quadrata, i secondi sono stati poi abbandonati.

Il cono a monte è stato realizzato tramite una stampa 3D e in seguito lavorato e laccato per migliorarne la finitura superficiale garantendo così un migliore deflusso aerodinamico.

Il cono di uscita (cono a valle) è stato realizzato in carpenteria metallica.

Per fare in modo che i coni fossero alloggiati in posizione perfettamente assiale rispetto alla turbina sono state realizzate delle flange su cui sono stati avvitati i convogliatori.



Fig. 4.6 - Coni di ingresso e di uscita

A seconda del tipo di prova condotta, sono stati scambiati od omessi entrambi o uno dei due coni, in modo da poter analizzare il comportamento della turbina in ogni condizione di utilizzo.

4.2 - Calibratura e taratura

La prima calibratura è avvenuta attraverso pesi di noto valore attaccati al corpo della turbina grazie ad un filo in nylon in modo tale da creare un momento torcente sulla cella di carico per calibrarla.

Il controllo dei pesi è stato effettuato grazie a delle celle di carico "Interface®" modello SMT1-100N-10 con fondo scala di 100N e tramite un bilancino di precisione.



Fig. 4.7 - Cella di carico

In un secondo momento sono stati torniti dei pesi di ottone da 6.1g, 9.3g, 10.9g, 14.5g, 22.2g, 36g, 56.7g e dotati di un foro filettato per alloggiare una vite direttamente sul corpo della turbina permettendo delle misurazioni con meno errori indiretti.

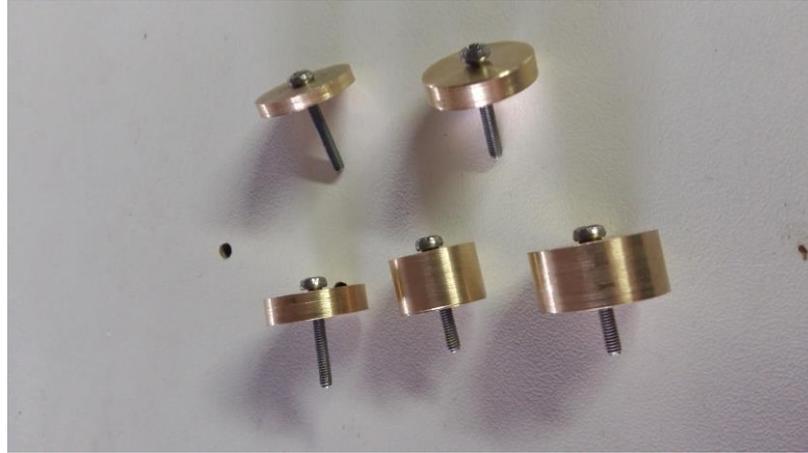


Fig. 4.8 - Pesi per la taratura

Conoscendo la massa, l'inclinazione del peso rispetto all'asse della turbina e il braccio tra il centro di massa del peso in ottone e la cella di carico è stato possibile calcolare il momento torcente generato e così confrontarlo con quello letto dalla cella di carico per poter effettuare la calibratura.

Una volta confrontati i valori di lettura della cella con quelli reali si è intervenuto sul codice Arduino® per correggerli.

4.3 - Messa in galleria

Il posizionamento del modello in galleria è stato effettuato attraverso un piedistallo in carpenteria metallica appositamente realizzato, imbullonato attraverso due flange al cilindro in plexiglass del modello, fissato ad una base di legno rotante per permetterne la rotazione una volta all'interno della galleria.

La tavola su cui è stato alloggiato il modello permette la rotazione rispetto all'asse verticale. Tale rotazione è stata utilizzata per effettuare le prove con la turbina angolata rispetto alla direzione del vento.

Il piedistallo è stato accessorizzato da un foglio di plastica con geometria alare per permettere al fluido di non impattare direttamente sulla superficie planare del supporto e creare vortici che avrebbero falsato le misurazioni.

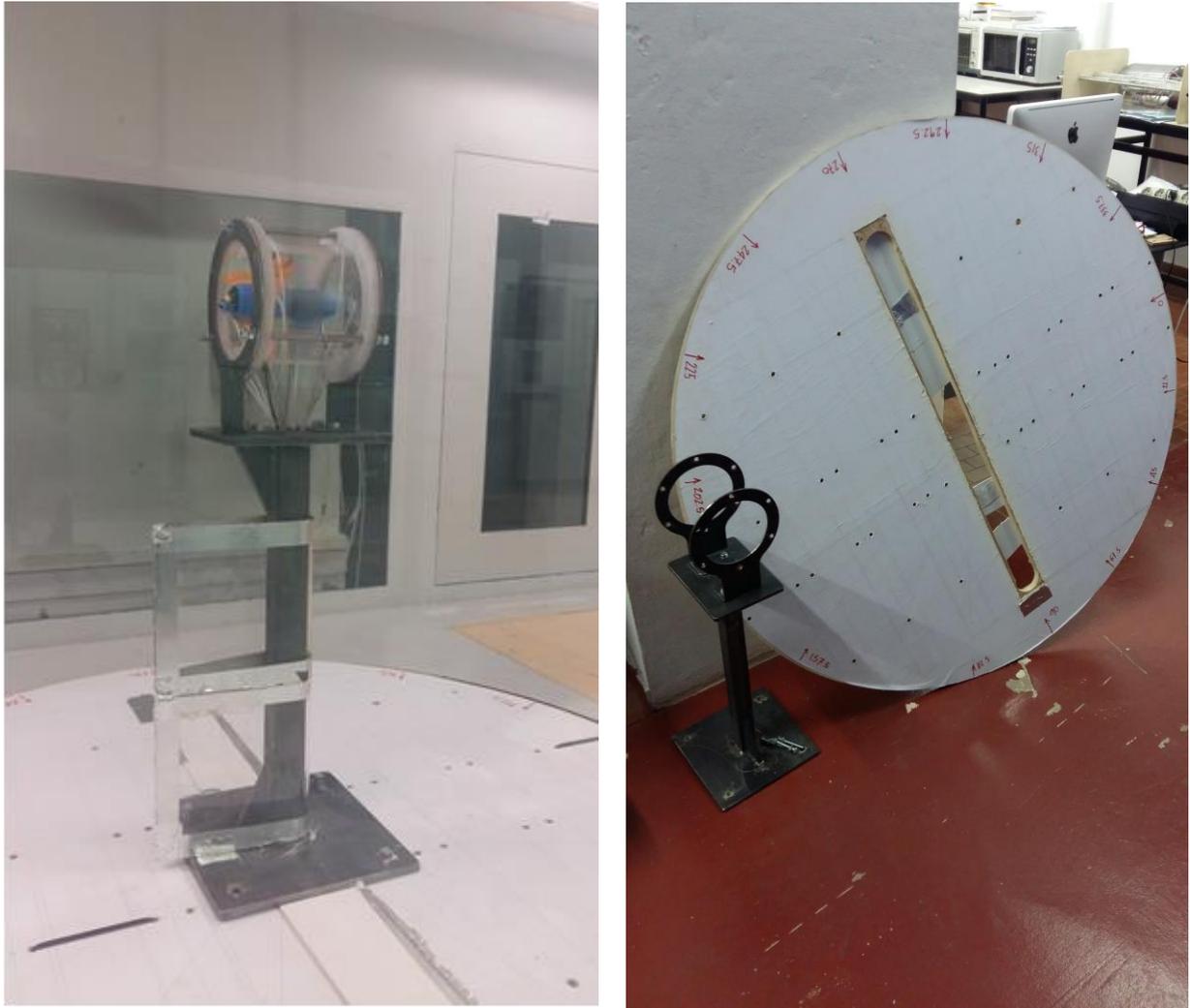


Fig. 4.9 – Installazione modello in galleria del vento

4.3.1 - Alloggiamento prese di pressione

Per poter analizzare l'andamento delle pressioni generatesi dall'impatto dell'aria sul modello, sono state alloggiate delle prese di pressione.

La disposizione adottata è stata di sei prese di pressione a monte della girante sul cilindro in plexiglass, sei a valle della girante sul cilindro in plexiglass, sei a valle del diffusore posteriore, sei a monte sulla corona circolare del cilindro in stampa 3D.

Per poter calcolare le diverse pressioni è stato utilizzato un trasduttore di pressione a cui sono stati collegati i 24 tubicini in Tygon® S3 E-3603, tubi in gomma di diametro 0,8mm. Ognuno di essi è stato fatto passare all'interno del piedistallo in carpenteria metallica e collegato ad una porta del trasduttore di pressione posto sotto la camera di prova all'esterno di quest'ultima.

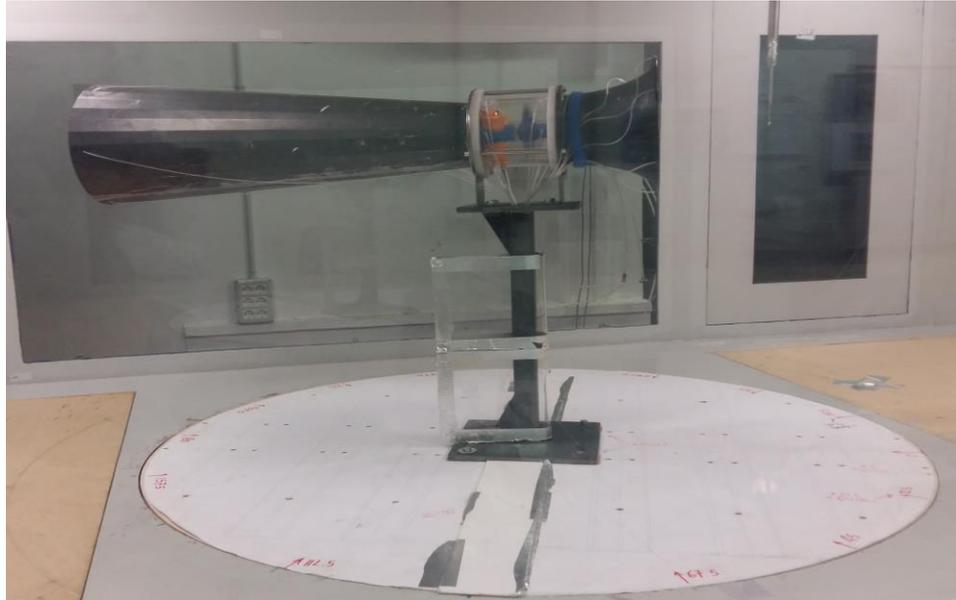


Fig 4.10 - Modello in galleria con prese di pressione

Il posizionamento delle prese di pressione è stato possibile effettuando dei fori nei punti sopra indicati, alloggiando e fermando tramite colla le estremità del Tygon® in essi.

5 - Analisi dei dati

L'analisi delle curve di potenza è avvenuta concordando con il committente diversi setup sperimentali (geometria del modello, velocità del flusso, angolo d'incidenza). In tali configurazioni sono state misurate, in condizioni stazionarie, diverse grandezze:

- temperatura in camera di prova e pressione dinamica di riferimento (per la valutazione della velocità indisturbata del flusso di galleria, U_{ref})
- frequenza di rotazione della girante del modello al variare della resistenza R applicata
- tensione V prodotta dal generatore del modello al variare della resistenza R

Per alcuni setup (i più significativi) sono state inoltre acquisite le pressioni statiche in diverse sezioni del modello.

5.1 - Curve di potenza

Tramite le grandezze di giri al secondo della turbina (giri/sec) e la potenza ($P = \frac{V^2}{R}$) generata dal modello è stato possibile creare delle curve di potenza che esprimessero il picco di potenza massimo, qualora fosse possibile registrarlo, in relazione alla resistenza applicata.

Il modello è stato dapprima inserito in galleria del vento in configurazione "libera", cioè con un solo supporto verticale per sorreggere il corpo turbina, senza alcun deflettore (Fig. 5.1)



Fig. 5.1 - Modello in galleria

E' stato fatto variare sia il carico che la velocità del vento su quattro frequenze di inverter differenti di 9Hz, 12Hz, 15Hz, 18Hz e 28Hz. La velocità del vento in galleria viene calcolata tramite frequenza di rotazione di inverter poiché, per effettuare una stima sulle grandezze fondamentali che la caratterizzano quali:

- temperatura dell'aria
- umidità dell'aria
- pressioni interne ed esterne alla galleria
- velocità rilevate dai tubi di Pitot

sarebbe stato gravoso sui tempi della campagna di acquisizione dati e non avrebbe portato grossi benefici (la velocità calcolata tramite frequenza di inverter differisce da quella reale per qualche decimo di punto percentuale).

L'analisi dei dati così condotta ha portato ai seguenti risultati. Ogni grafico è stato creato utilizzando la funzione "plot" di Matlab® utilizzando come grandezze i giri al secondo della turbina ("giri/sec") e la potenza ("P").

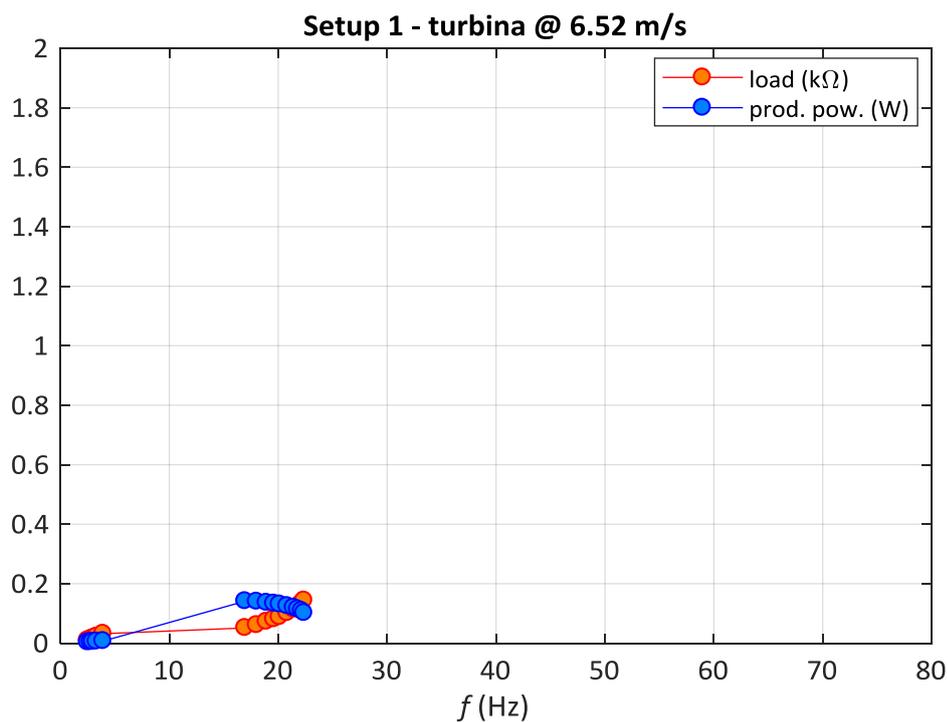


Fig. 5.2 - Grafico setup01 a 12 Hz

Il grafico in figura Fig. 5.2 corrisponde alla frequenza di rotazione di 12 Hz (circa 6,5 m/s). La potenza massima è riscontrabile con 0.1413 W ad un valore di resistenza di 5 ohm.

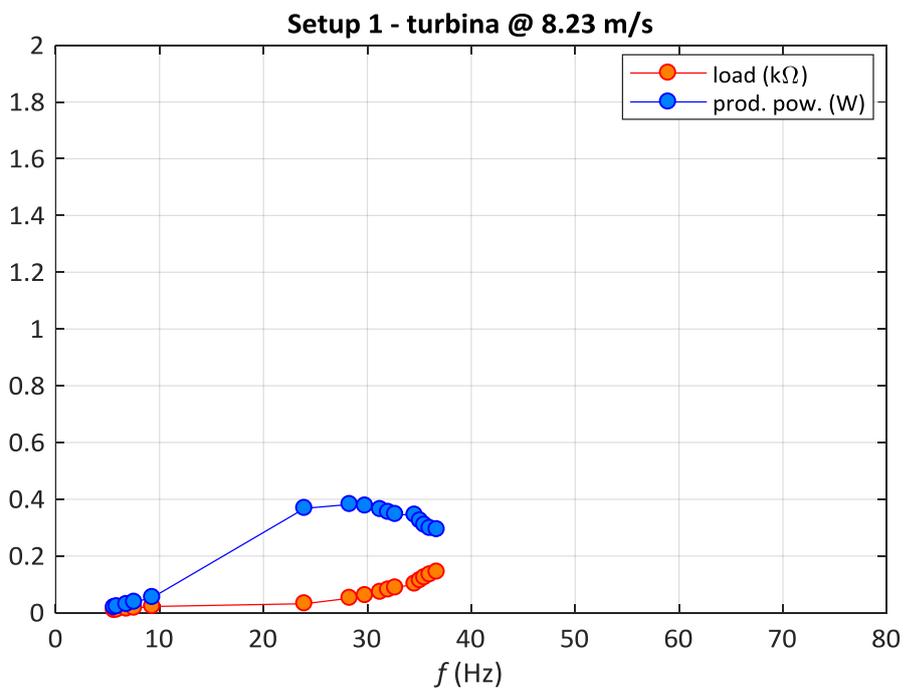


Fig. 5.3 - Grafico setup01 a 15 Hz

Il secondo grafico in Fig. 5.3 riguarda la potenza prodotta ad una velocità di rotazione di 15Hz (circa 8,2 m/s).

Come si può notare il picco di potenza si è alzato, così come la frequenza di rotazione passando da 16,97 Hz a 28,32 Hz con il relativo picco di potenza situato a 0,3818 W

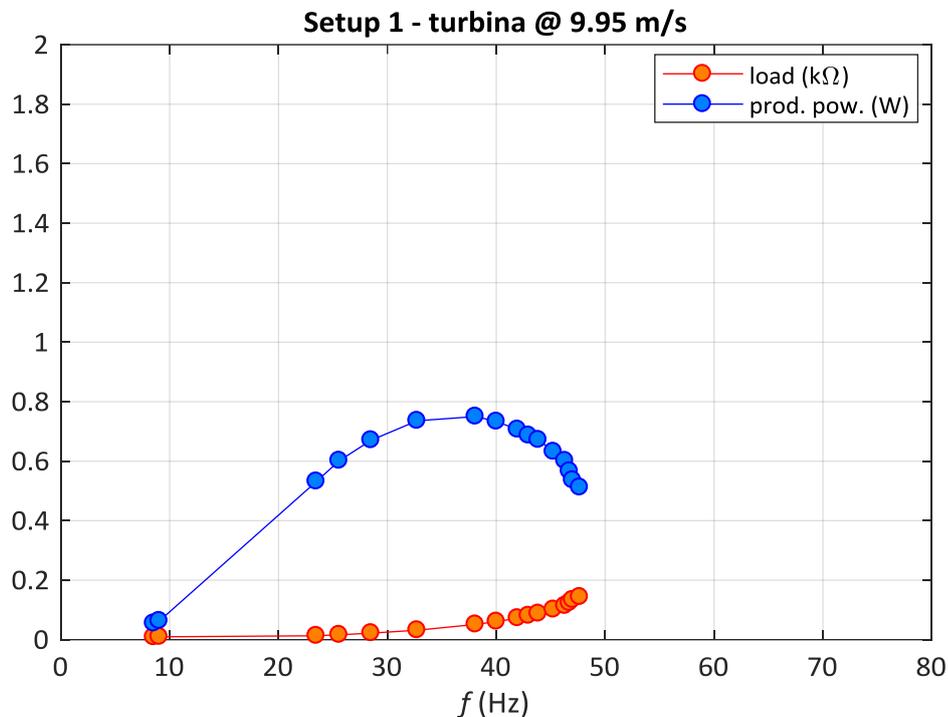


Fig. 5.4 - Grafico setup01 a 18 Hz

Il grafico in Fig. 5.4 rappresenta la potenza prodotta per un regime di rotazione dell'inverter di 18 Hz corrispondenti a circa 10 m/s di vento effettivi.

La curva risulta più omogenea, il picco, come da aspettative, si sposta sempre più in alto e la potenza prodotta aumenta da 0,3818 W a 0,75 W.

Quarta ed ultima velocità per questo setup è stata quella a 28Hz corrispondenti a 15,7 m/s rappresentato in figura Fig.5.5.

Durante l'acquisizione dei punti si è riscontrato un problema riguardante l'impossibilità di rappresentare le acquisizioni a freno inferiore con velocità del vento elevate, poiché il sistema di galleria permette di registrare con valori compresi tra -10 V e +10 V, in questo caso si andava oltre tali valori (Fig. 5.5).

A seguito di questa prova si è optato per registrare a frequenze inferiori.

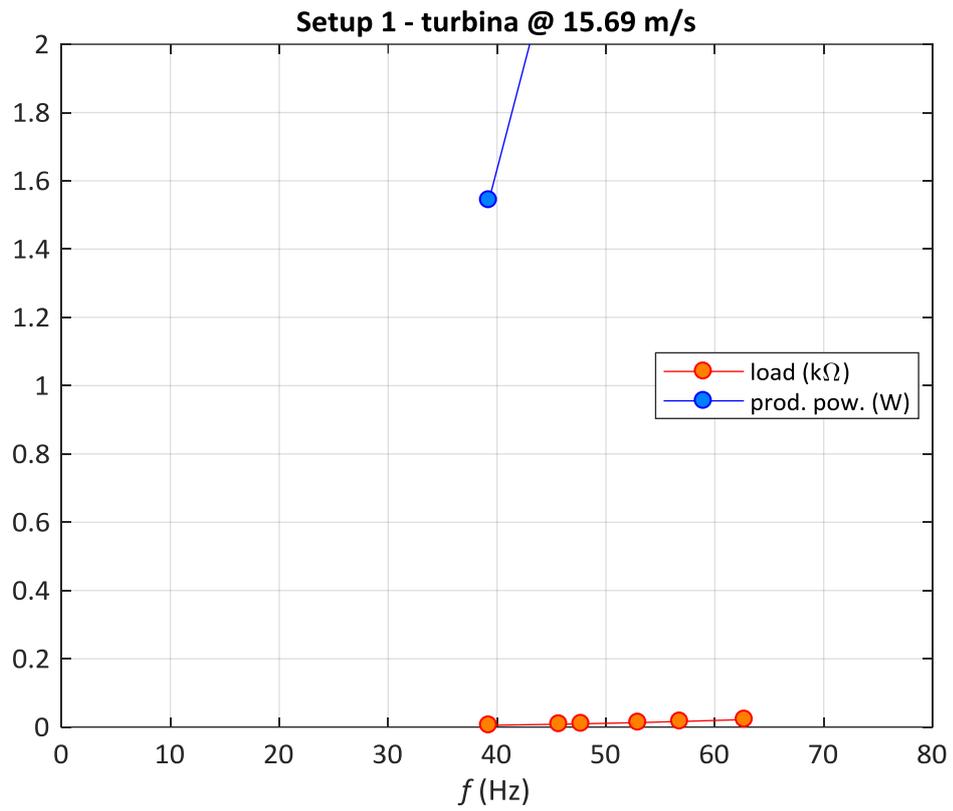


Fig. 5.5 - Grafico setup01 a 28 Hz

In Fig. 5.6 sono rappresentate le quattro velocità per il setup libero e il loro confronto.

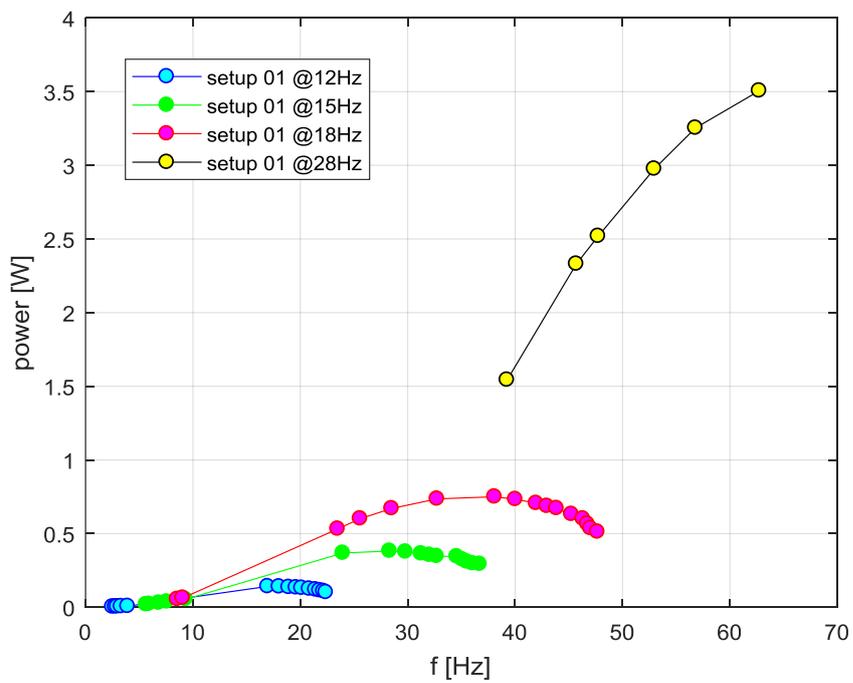


Fig. 5.6 - Grafico potenze setup01

A seguito della prova della sola turbina senza convogliatori si è iniziata una campagna di acquisizione dati che si è posta come obiettivo quello di analizzare le curve di potenza al variare della geometria, dell'angolo di inclinazione del modello rispetto al flusso di galleria e della velocità dello stesso, seguendo la tabella Tab. 5.1.

Tab. 5.1 - Tipologie di geometrie, velocità e angoli utilizzati per le prove

Setup	Carico	Velocità (Hz inverter)	Angolo	Geometria adottata
1	Variabile	12-15-18-28	0	Libera
2	Variabile	12-15-18-21	0	Intubato
3	Variabile	18-21	0	Intubato
4	Variabile	9-12-15-18	0	Corto avanti
5	Variabile	15	22,5	Corto avanti
6	Variabile	15	0	Corto avanti
7	Variabile	15	22,5	Corto avanti
8	Variabile	15	11,25	Corto avanti
9	Variabile	15	-22,5	Corto avanti
10	Variabile	15	-11,25	Corto avanti
11	Variabile	15	0	Lungo avanti
12	Variabile	15	0	Solo cilindro
13	Variabile	15	45	Corto avanti
14	Variabile	15	45	Corto avanti
15	Variabile	15	33,75	Corto avanti
16	Variabile	15	33,75	Corto avanti

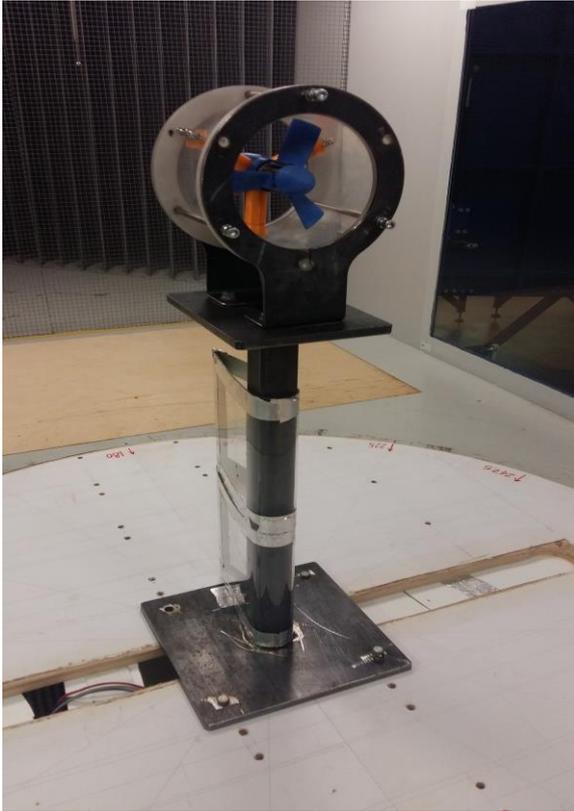


Fig. 5.7 - Turbina in geometria "intubata"

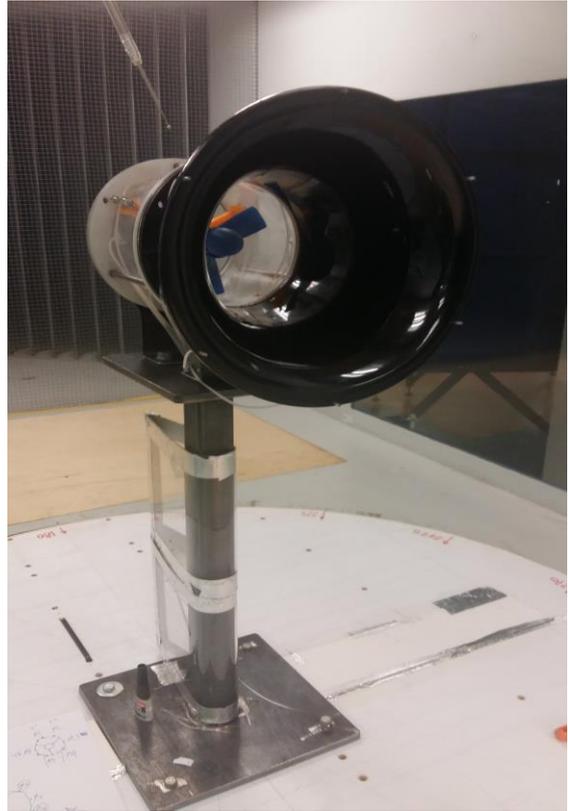


Fig. 5.8 - Turbina in geometria "corto avanti"

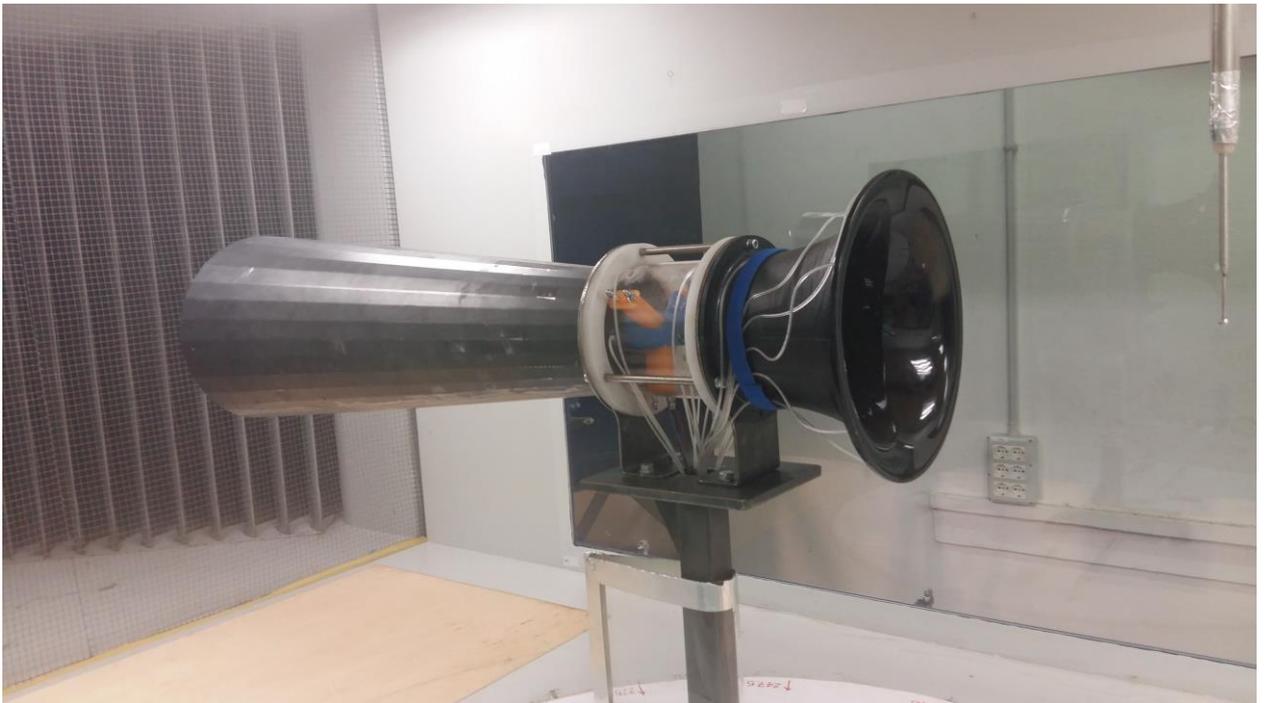


Fig. 5.9 - Turbina in geometria "cono piccolo avanti"

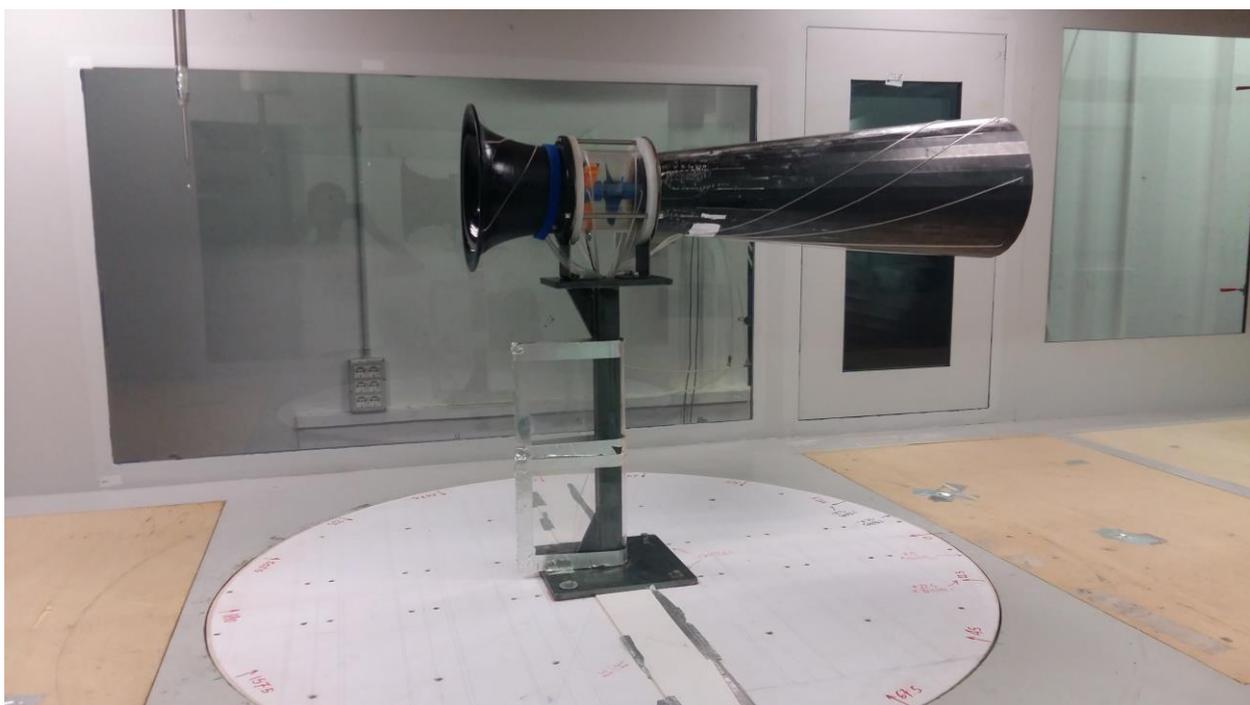


Fig. 5.10 - Turbina in geometria "cono lungo avanti"

In prima analisi si studiano gli andamenti delle curve a 12Hz dei setup 1, 2 e 4:

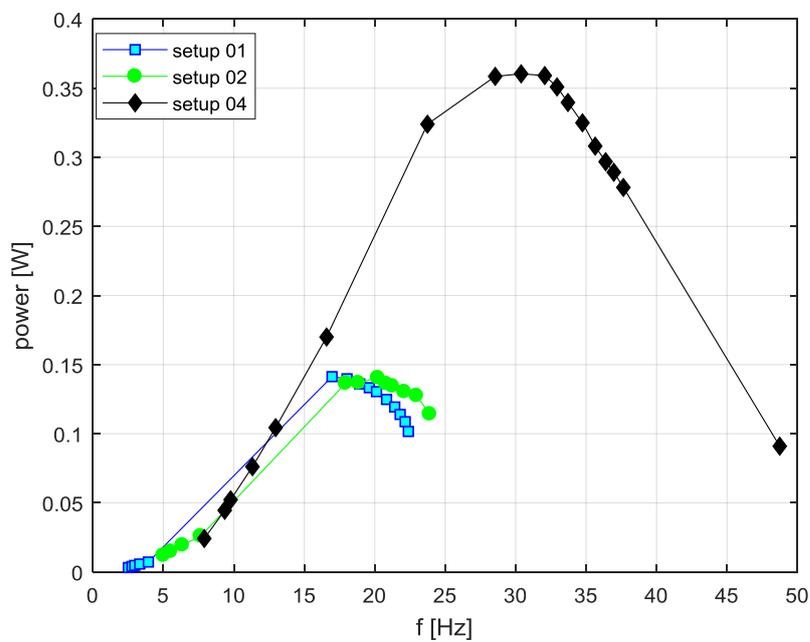


Fig. 5.11 - Curve di potenza

Tab. 5.2 - Rapporti dei picchi di potenza a 12 Hz

Setup	Pmax/Pmax(setup1)	Hz
1	1	16,97
2	0,99	20,23
4	2,55	30,39

Per i setup 1 e 2 (turbina libera e turbina intubata) la potenza risulta quasi invariata mentre la frequenza di rotazione aumenta del 19,21%. Tra i setup 2 e 4 (turbina intubata e turbina col solo cono corto anteriore) si ha un incremento della potenza prodotta del 157.58% mentre per quanto riguarda la frequenza di rotazione l'aumento è del 50,24%. Complessivamente le curve tendono tutte a spostarsi verso l'alto e a destra del sistema di riferimento.

Vengono ora analizzati i medesimi setup ad una frequenza di rotazione di 15Hz (Fig. 5.12).

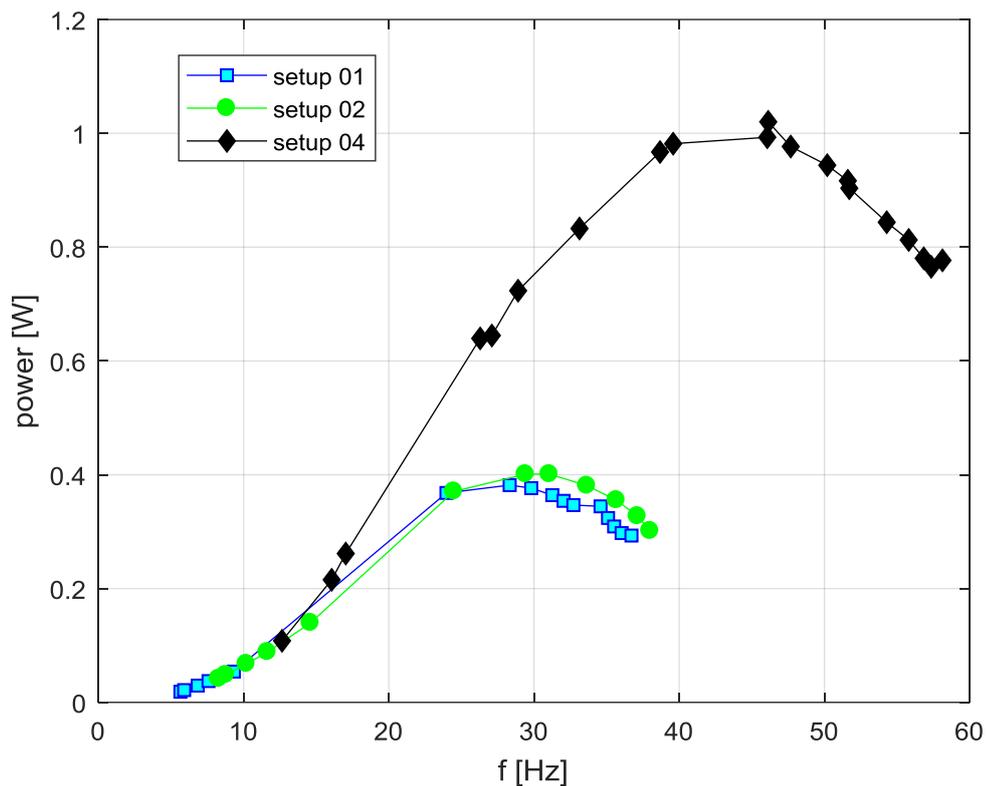


Fig. 5.12 - Potenze a 15 Hz

Tab. 5.3 - Rapporti dei picchi di potenza a 15 Hz

Setup	Pmax/Pmax(setup1)	Hz
1	1	28,32
2	1,05	31,06
4	2,67	46,13

Tra i setup 1 e 2, come è riscontrabile in tabella Tab. 5.3, vi è una differenza di potenza del 5% mentre la variazione di frequenza di rotazione è del 9,68%.

Per quanto riguarda le variazioni tra i setup 2 e 4 si ha un incremento del 48.52% di velocità di rotazione e del 154,29% per la potenza.

Si prende ora in analisi i setup 1,2,4,6,11,12 nei casi di turbina libera, intubata, cilindro corto avanti, cilindro lungo avanti e col solo cilindro corto avanti ad una velocità di inverter fissa di 15Hz.

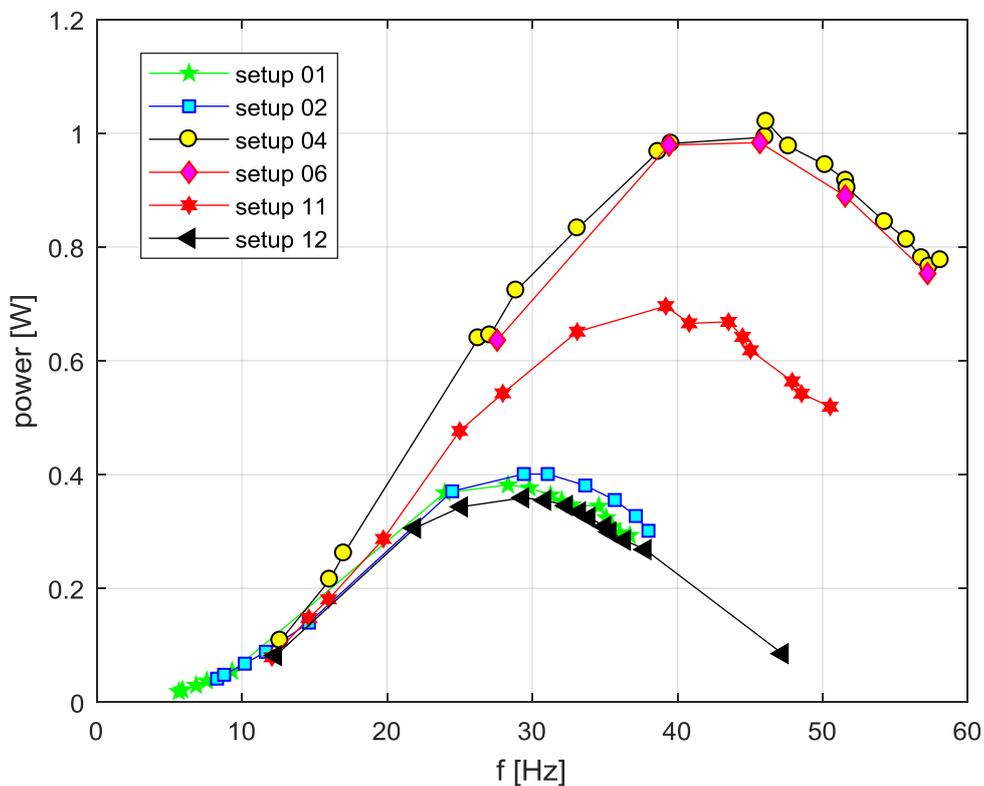


Fig. 5.13 - Potenze a 15 Hz

La potenza massima viene espressa dal setup 4 nella modalità cono corto a monte e diffusore a valle (Fig. 5.13).

Tab. 5.4 - Rapporti picchi di potenza a 15 Hz

Setup	Pmax/Pmax(setup1)	Hz
1	1	28,32
2	1,05	31,06
4	2,67	46,13
6	2,58	45,68
11	1,82	39,19
12	0,95	29,35

Come già riscontrabile visivamente, il rapporto tra le diverse potenze rivela che il setup 4 è quello che produce di più (Tab. 5.4), facendo registrare un incremento della potenza del 167% rispetto al setup 1.

Tale analisi ci ha permesso di capire quale setup avrebbe avuto più senso sviluppare a fronte della geometria adottata (cono corto a monte).

Selezionata la geometria del modello, lo studio è proseguito facendo variare l'angolazione dell'asse della turbina rispetto alla direzione del vento in camera di prova.

In Fig. 5.14 sono riportate le curve di potenza in geometria "corto avanti" riferite alle velocità di 15Hz.

Si sono effettuate prove ad angoli di 0°; 11,25°; 22,5°; 33,75°; 45°; -11,25°; -22,5°.

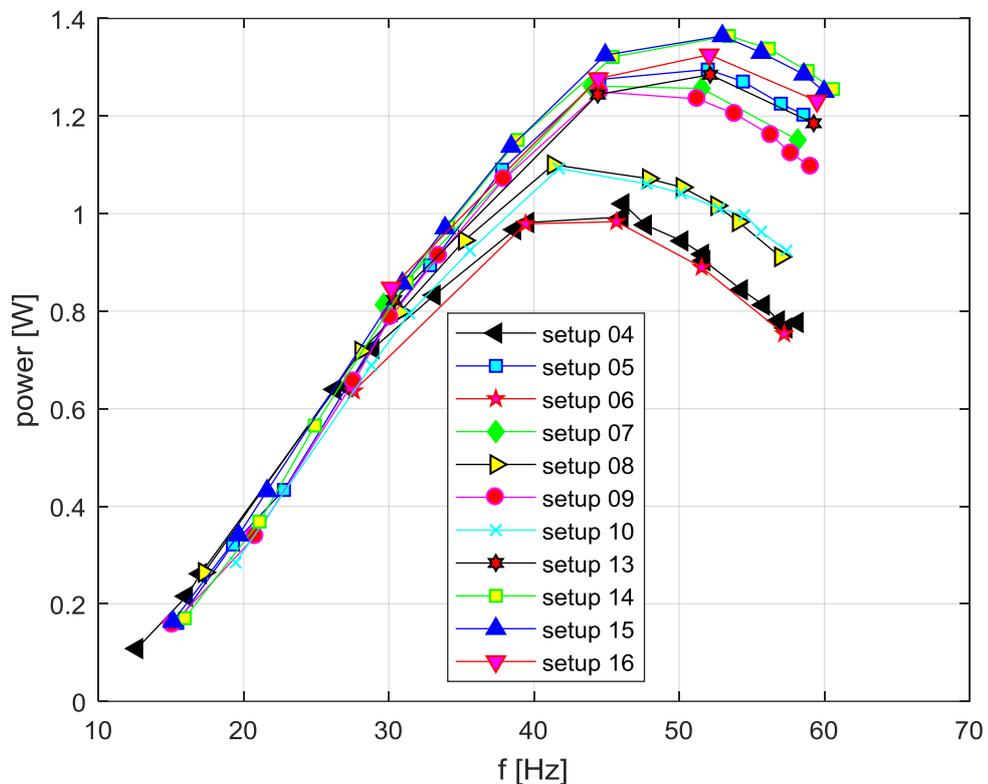


Fig. 5.14 - Potenze in geometria "corto avanti"

Tab. 5.5 - Rapporti picchi di potenza tra e diverse tipologie adottate

Setup	Angolo	Note	Pmax/Pmax(setup4)	Hz
4	0		1	46,1
5	22,5		1,27	52
6	0	Finestre aperte	0,96	45,7
7	22,5	Finestre aperte	1,23	44
8	11,25		1,08	41,3
9	-22,5		1,26	29,4
10	-11,25		1,07	41,7
13	45	Finestre aperte	1,25	52,1
14	45		1,33	53,4
15	33,75		1,33	53
16	33,75	Finestre aperte	1,3	52,1

Si nota che il setup che produce di più è quello con turbina inclinata rispetto all'asse del flusso del vento di 45 gradi.

A tal proposito sono stati condotti test sia con angoli positivi che negativi per escludere la possibilità che la turbina avesse una direzione preferenziale di rotazione ma, come ricondotto dalle analisi, la potenza di picco rimaneva pressoché costante, portandoci alla conclusione che non servisse variare l'angolo in positivo o in negativo.

Si è pensato che inclinando di molto la turbina all'interno della galleria, per via delle sue dimensioni e la prossimità del cono di uscita con le pareti della camera di prova si potesse risentire di effetti di parete che potessero aiutare o peggiorare il flusso dell'aria nel sistema, si sono quindi effettuati i setup 6,7,8,13 e 16 a finestre di galleria aperte.

5.2 - Angoli

Per analizzare in modo più realistico l'andamento della potenza si sono effettuati dei test con un'inclinazione della turbina rispetto alla direzione del vento variabile. Gli angoli utilizzati sono stati:

- 0°
- 11,25°
- -11,25°
- 22,5
- -22,5°
- 33,75°
- 45°

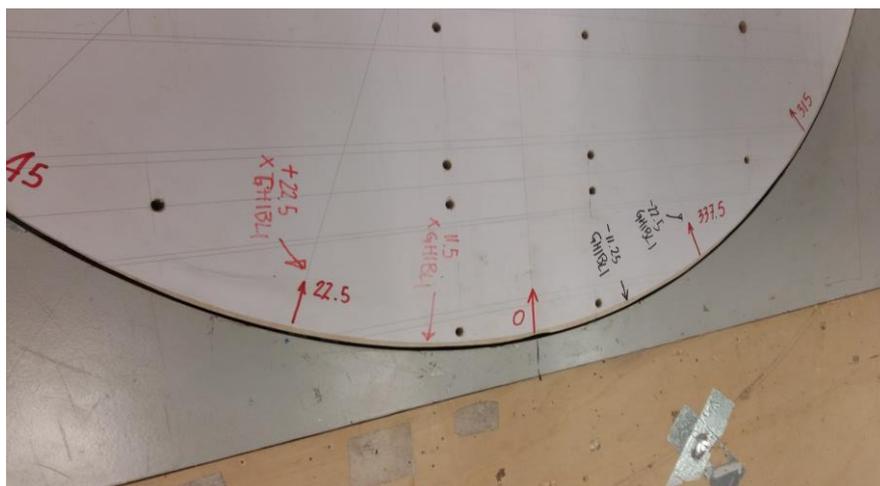


Fig. 5.15 – Angoli di riferimento

Sulla tavola che alloggia il modello sono stati tracciati i diversi angoli per le prove permettendone così l'esatta ripetibilità (Fig. 5.15).

Ogni volta che il modello è stato orientato, si sono effettuate prove a diverse velocità del vento in modo da analizzare i picchi di potenza e la velocità ottimale di produzione.

La geometria adottata prevedeva come cono di imbocco quello piccolo e come cono di uscita quello in carpenteria metallica a seguito dei test soddisfacenti precedentemente effettuati.

Dalle prove si è potuto evincere che con angoli più grandi (rispetto alla direzione del vento) la turbina produce di più, a prescindere che siano angoli positivi (11,25; 22,5; 33,75; 45) o negativi (-11,25; -22,5).

A tale proposito, per evitare che la turbina, al crescere dell'angolo di incidenza, risentisse di effetti di parete dovuti alla compressione della vena fluida lungo le pareti della galleria e alla vicinanza del cono di uscita con essa, si sono condotti i test a 0°, 11,25°, 22,5°, 33,75° e 45° con le finestre della camera di prova della galleria aperte.

I risultati sono rimasti pressoché invariati, con differenze dell'ordine dell'1 o 2%, molto probabilmente riscontrabili per via della non perfettamente identica velocità del vento (si ricordi che la velocità del vento in galleria viene calcolata attraverso la velocità di rotazione dell'inverter) così facendo si è scartata la possibilità che la potenza reale fosse falsata da effetti indesiderati. La velocità è stata fissata a 15Hz (circa 8,1 m/s). I setup utilizzati sono stati:

- setup 6 → 0°
- setup 7 → 22,5°
- setup 8 → 11,25°
- setup 9 → -22,5°
- setup 10 → -11,25°
- setup 13 → 45°
- setup 16 → 33,75°

In figura Fig. 5.16 sono riportati i grafici della potenza in funzione del numero di giri riferiti ai vari setup

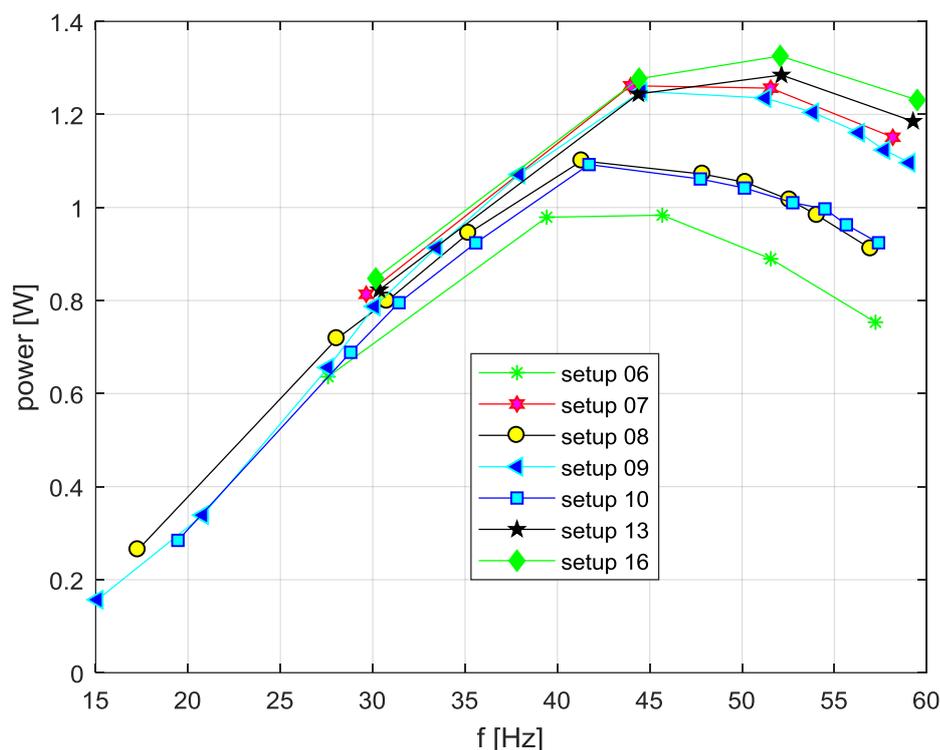


Fig. 5.16 - Potenze di riferimento ad angoli particolari

Come è possibile riscontrare dal grafico in Fig. 5.16, il picco di potenza si alza all'aumentare del grado di inclinazione del modello rispetto alla direzione del vento.

Le due coppie di setup 7, 9 e 8, 10 sono riferiti rispettivamente agli angoli $\pm 22,5^\circ$ e $\pm 11,25^\circ$. Come si può notare dalla figura, non vi è sostanziale differenza tra angoli positivi e negativi, questo dimostra che la turbina non ha una direzione preferenziale ma lavora in ugual modo sia con vento proveniente da una direzione piuttosto che un'altra.

Gli angoli che producono di più sono $33,75^\circ$ e 45° riferiti ai setup 16 e 13.

Tab. 5.6 - Picchi di potenza in relazione all'angolo

Setup	Angolo	Picco di potenza
16	$33,75^\circ$	1,326
13	45°	1,285
7	$22,5^\circ$	1,262
9	$-22,5^\circ$	1,25
8	$11,25^\circ$	1,1
10	$-11,25^\circ$	1,092
6	0°	0,9835

In tabella sono riportati i valori degli angoli e delle potenze in Watt dei rispettivi setup.

Si può notare che, dal setup 6 al setup 16 l'incremento della potenza è dell'ordine di 34 punti percentuali.

I test non hanno dato risposte esaurienti capaci di spiegare il verificarsi di tale fenomeno di aumento di potenza.

5.3 - Pressioni

Per poter analizzare le pressioni è stato necessario creare nel cono d'ingresso, nel cilindro centrale e nel cono di uscita, dei fori sfalsati di 60° atti ad ospitare delle prese di pressione.

La campagna di acquisizione è stata svolta su quattro setup differenti:

- setup 3 - turbina nel solo cilindro di plexiglass (intubata)
- setup 4 - turbina nella geometria cono corto a monte e diffusore lungo a valle (corto avanti)
- setup 5 - turbina angolata di $22,5^\circ$ nella geometria cono corto a monte e diffusore lungo a valle (corto avanti)
- setup 11 - turbina nella geometria diffusore lungo a monte e cono piccolo a valle (lungo avanti)

L'analisi dei grafici di seguito riportati si basa sui valori delle pressioni al variare del valore del freno impostato attraverso le resistenze, quanti più valori di freno sono stati utilizzati, tanti più punti si leggono a diagramma.

Per il setup 3 sono state rilevate pressioni a 18Hz e 21Hz.

In tale configurazione è stato possibile registrare solo le pressioni a monte e a valle del cilindro in plexiglass.

Le prese di pressione sul cilindro in plexiglass sono state alloggiare secondo la disposizione in figura.

Quelle inserite nella parte a valle sono simmetriche rispetto a quelle a monte.

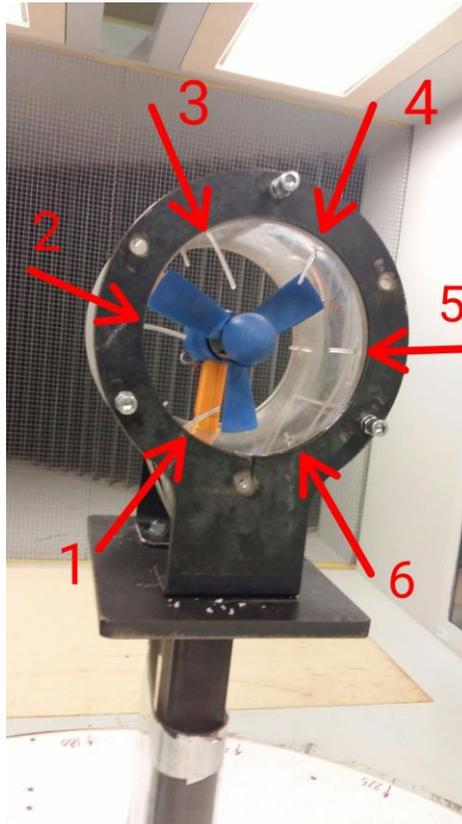


Fig. 5.17 - Posizione prese di pressione sul cilindro in plexiglass

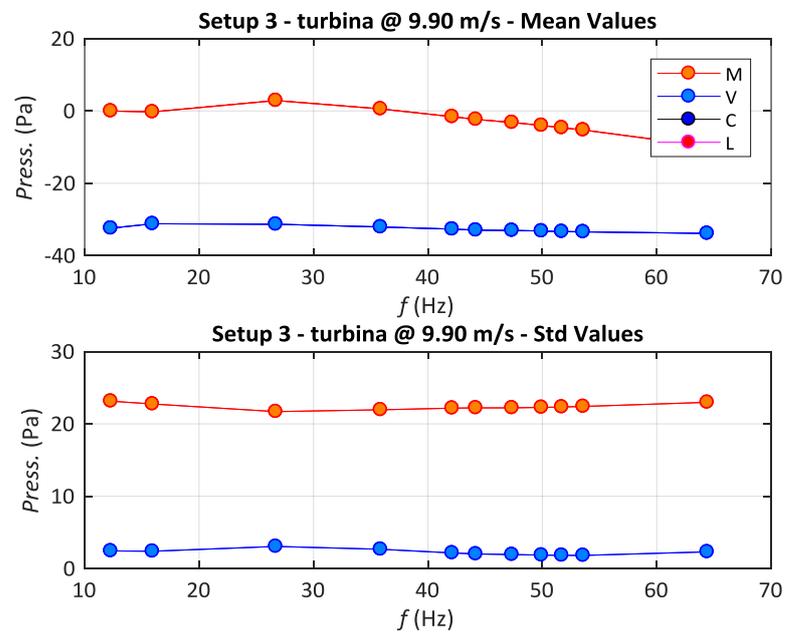


Fig. 5.18 - Andamento pressioni setup03

I dati riportati in Fig. 5.18 rappresentano i valori mediati delle pressioni a monte e a valle del cilindro in plexiglass ad una velocità di circa 9,90 m/s. Da tale grafico è possibile intuire l'andamento generale delle pressioni, ma non quello particolare di ogni punto del modello.

È possibile visualizzare in Fig. 5.19 l'andamento delle pressioni sui sei punti di misura a monte del cilindro in plexiglass.

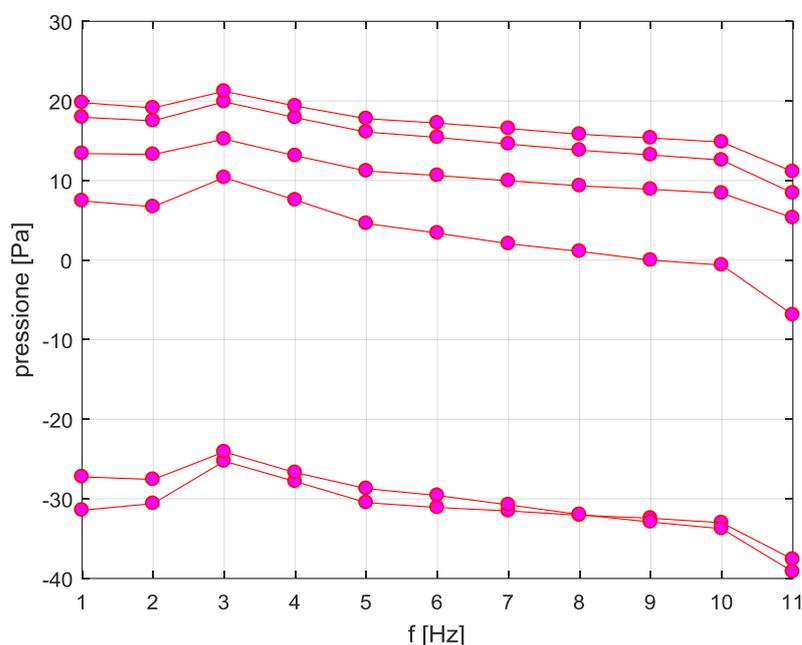


Fig. 5.19 - Pressioni a monte della girante

Le quattro pressioni i cui valori più alti sono forniti dalle sonde inserite nella parte superiore del modello (prese di pressione numeri 2, 3, 4, 5) mentre quelle a valori più bassi e negativi sono poste nella parte bassa del modello (prese di pressione 1 e 6).

Si può facilmente concludere che le pressioni corrispondenti alle posizioni 1 e 6 risultano in sottopressione per via della presenza del piedistallo su cui il flusso d'aria impatta creando dei vortici.

Le pressioni 2, 3, 4 e 5 invece, risultano in sovrappressione per la costrizione del flusso che si genera all'interno del cilindro.

In questa fase, il modello privo di diffusori, crea in uscita dalla turbina delle grosse turbolenze, dovute al moto della girante e al punto di distacco della vena fluida dal cilindro. Tali irregolarità sono facilmente riscontrabili in figura Fig. 5.20.

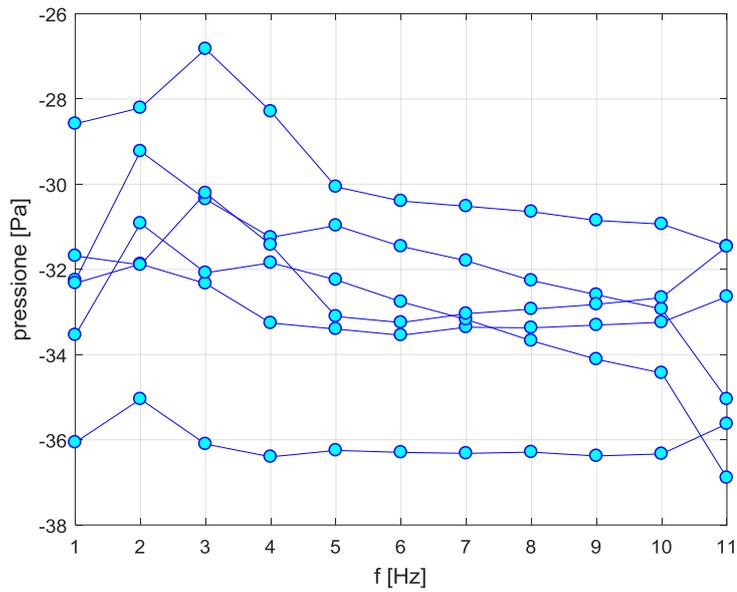


Fig. 5.20 - Pressioni a valle della girante

Le analisi condotte con stessa geometria del caso precedente ma con velocità superiori hanno fatto riportare valori e curve simili.

Anche a velocità di circa 11,60 m/s (21 Hz) le pressioni dei punti 1 e 6 risultano in depressione mentre, quelle dei punti 2, 3, 4 e 5 in sovrappressione, l'unica differenza viene rilevata nei valori più elevati per via della velocità più alta.

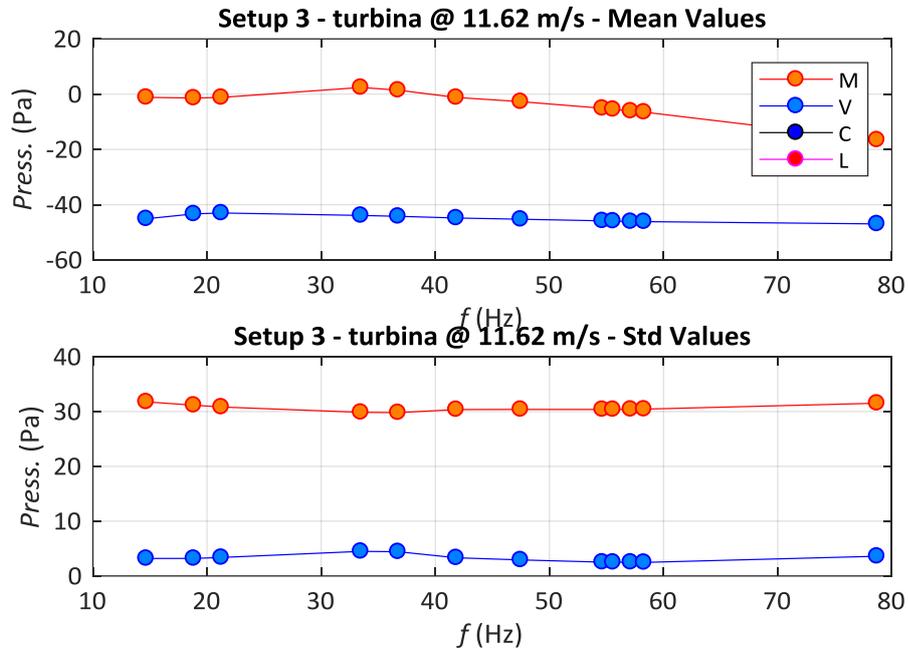


Fig. 5.21 - Pressioni setup03

Il secondo setup analizzato è quello con il cono corto a monte e il diffusore lungo a valle (setup 4).

Durante questa acquisizione è stato possibile studiare l'andamento delle pressioni anche sui coni in ingresso e in uscita.

Analogamente per il cilindro in plexiglass, le prese di pressione sui diffusori sono state inserite sfalsandole di 60°. Per quanto riguarda il cono di imbocco, le prese sono state alloggiare sul bordo d'attacco del cono, mentre per il cilindro di uscita sulla superficie laterale.

La registrazione delle pressioni è avvenuta su quattro valori di velocità: 9Hz, 12Hz, 15Hz e 18Hz.

La prima analisi è stata effettuata a velocità di circa 4,8 m/s, corrispondenti a 9 Hz di frequenza dell'inverter.

Le prese sul cono corto a monte hanno fatto riscontrare valori delle pressioni molto variabili, per via della loro posizione sul bordo del modello. Quelle all'interno del cilindro (sia a monte che a valle) sono in depressione, con alcuni valori variabili.

Per quanto riguarda le pressioni registrate a valle, nel cono di uscita, sono tutte in pressione.

Tale distribuzione di pressioni sul modello è conforme alle aspettative, in quanto, l'aria nella prima parte del modello viene accelerata e compressa, per poi espandersi e rallentare nella parte posteriore.

Vengono riportati gli andamenti medi delle pressioni per i casi a 9 Hz, 12 Hz, 15 Hz, 18 Hz con la medesima geometria:

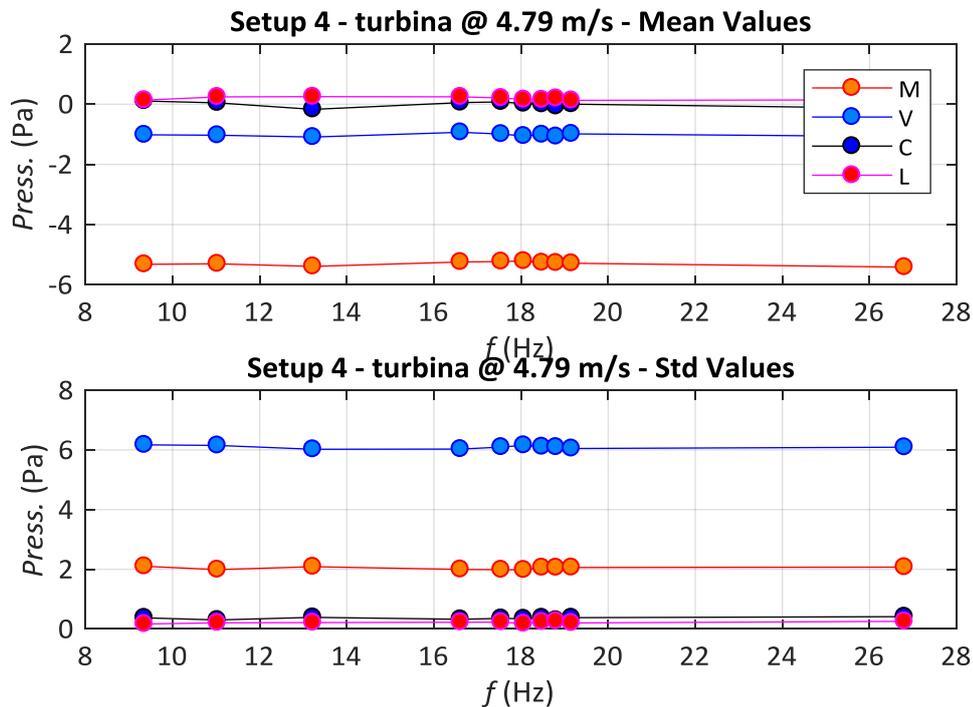


Fig. 5.22 - Pressioni setup04 a 9 Hz

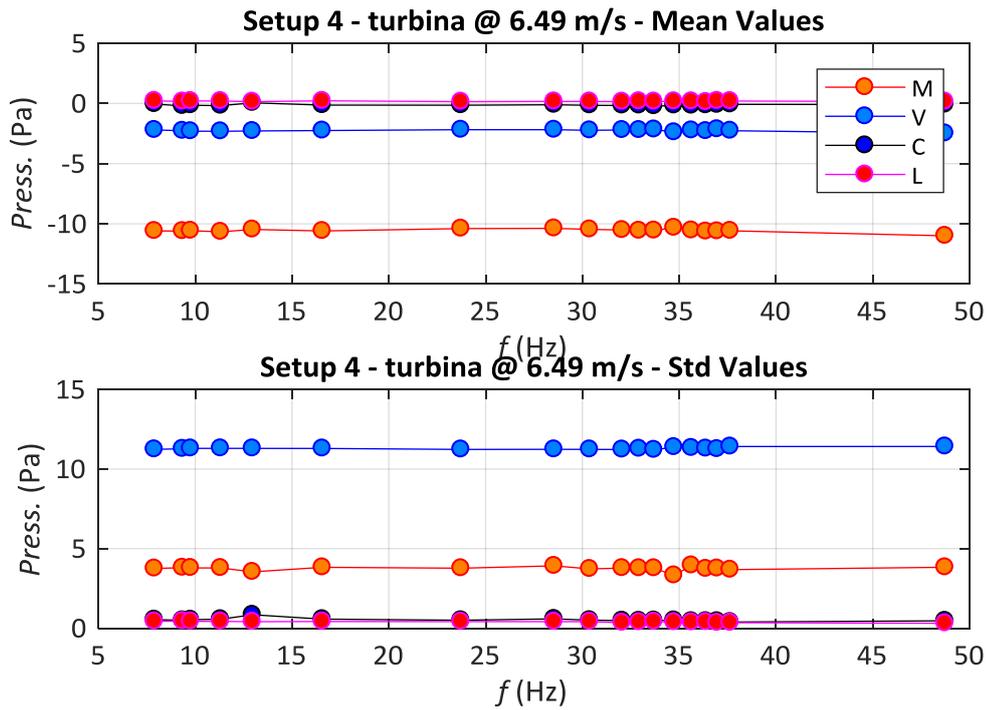


Fig. 5.23 - Pressioni setup04 a 12 Hz

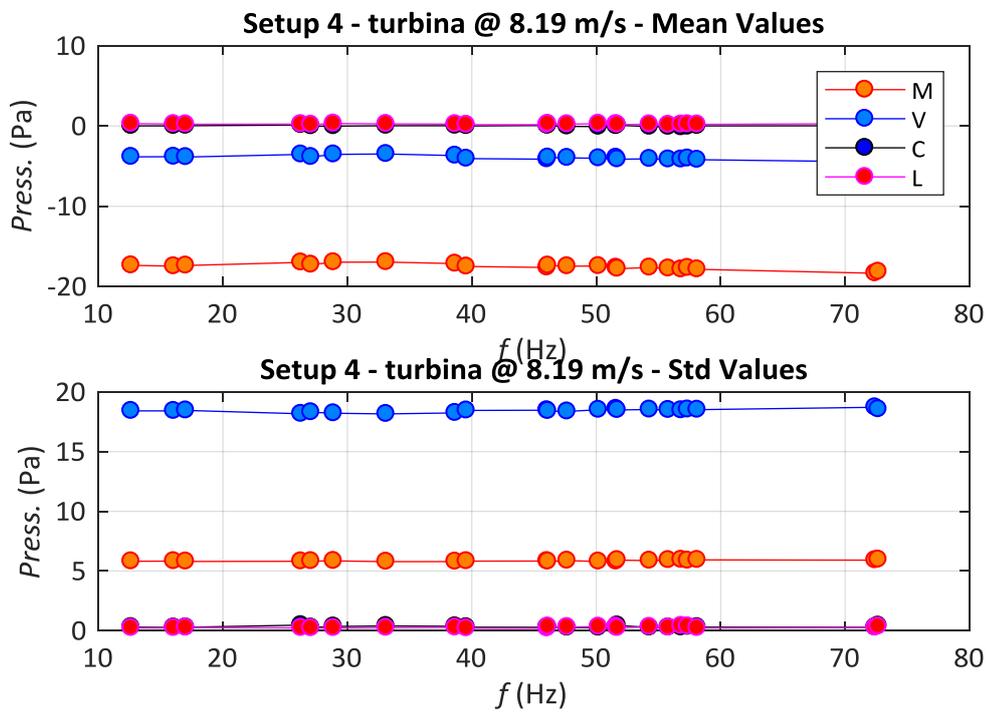


Fig. 5.24 - Pressioni setup04 a 15 Hz

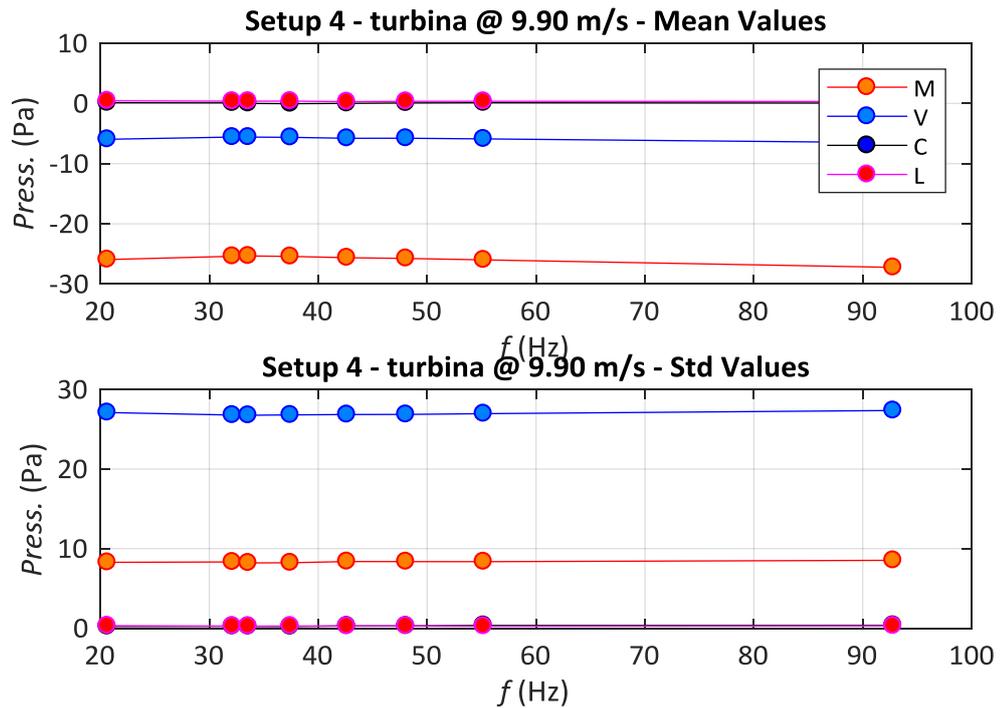


Fig. 5.25 - Pressioni setup04 a 18 Hz

Come è possibile esaminare, il modello, come per il caso precedente, si comporta in maniera analoga: all'aumentare della velocità aumentano in modulo le pressioni, nelle varie sezioni vengono però mantenuti i segni positivi o negativi di tali valori. Sul cono corto a monte risulta difficile fare una stima per la grande variabilità dei valori. Nella sezione centrale il modello presenta pressioni negative a monte della girante e pressioni positive a valle di essa. Nel cono in carpenteria metallica invece si registrano sempre pressioni positive (Fig. 5.22 – 5.25).

Per il setup 5 è stata mantenuta la geometria con il cono corto a monte e il diffusore lungo a valle, ma è stato cambiato l'angolo di incidenza del modello col flusso dell'aria, angolandolo di 22,5°.

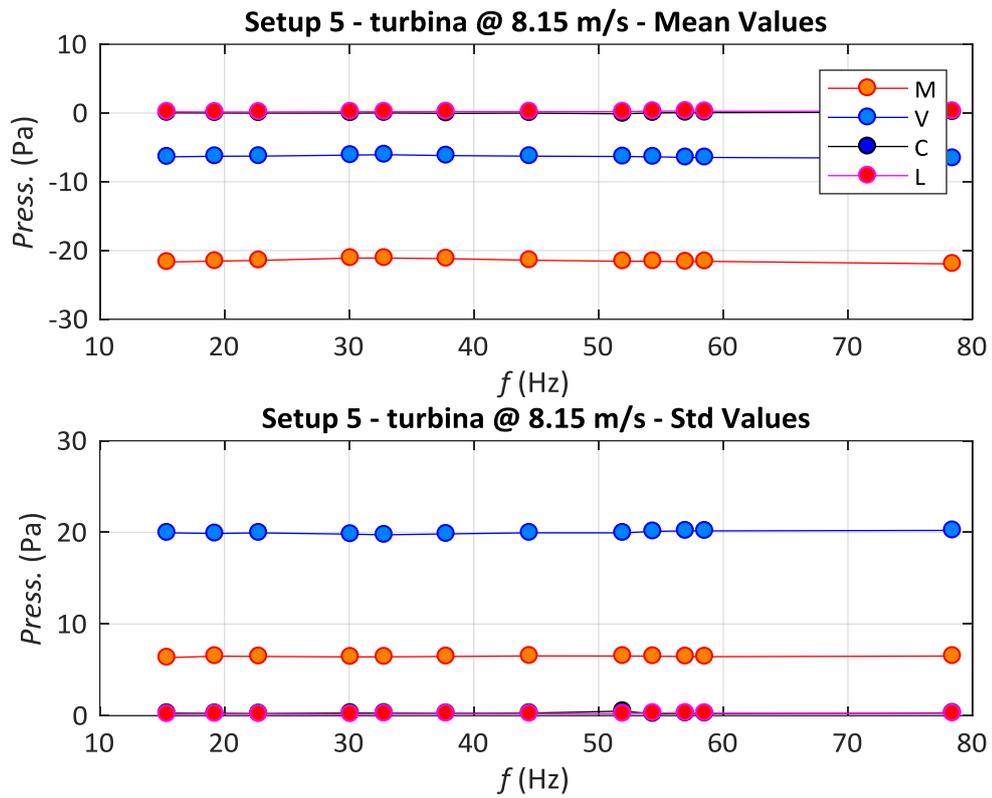


Fig. 5.26 - Pressioni setup05 a 15Hz

Le pressioni risultano mantenersi nei range già analizzati. Come già riscontrato durante l'analisi delle potenze, è possibile dimostrare che, angolando la turbina, la produzione aumenti per via della più alta velocità all'interno del condotto. Si prendano in esame le pressioni immediatamente a monte della girante riferite ai setup 4 e 5 alla medesima velocità del vento:

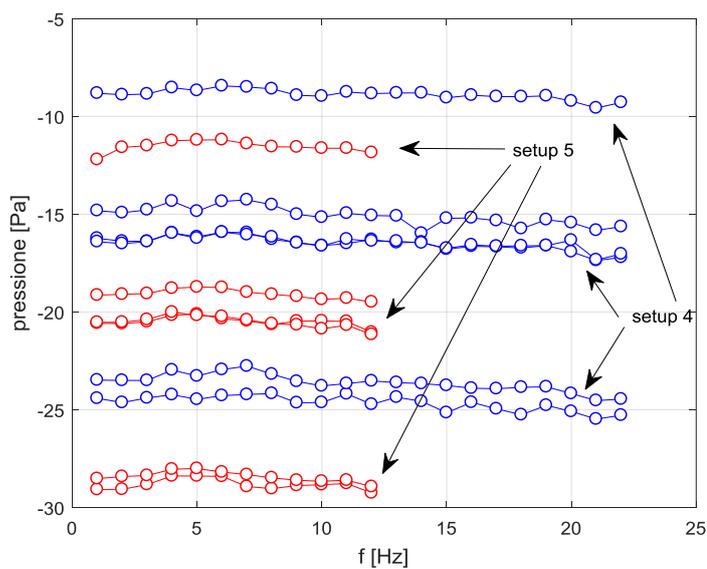


Fig. 5.27 - Confronto pressioni a monte della girante per i setup04 e 05

Come è facilmente riscontrabile dalla Fig. 5.27, le pressioni a monte della girante con il flusso perpendicolare a quest'ultima risultano più basse in modulo delle medesime ma a modello angolato.

Venga analizzato ora il setup 11, il quale prevede una geometria opposta rispetto a quelle fin ora adottate: cono diffusore lungo a monte e cono piccolo a valle.

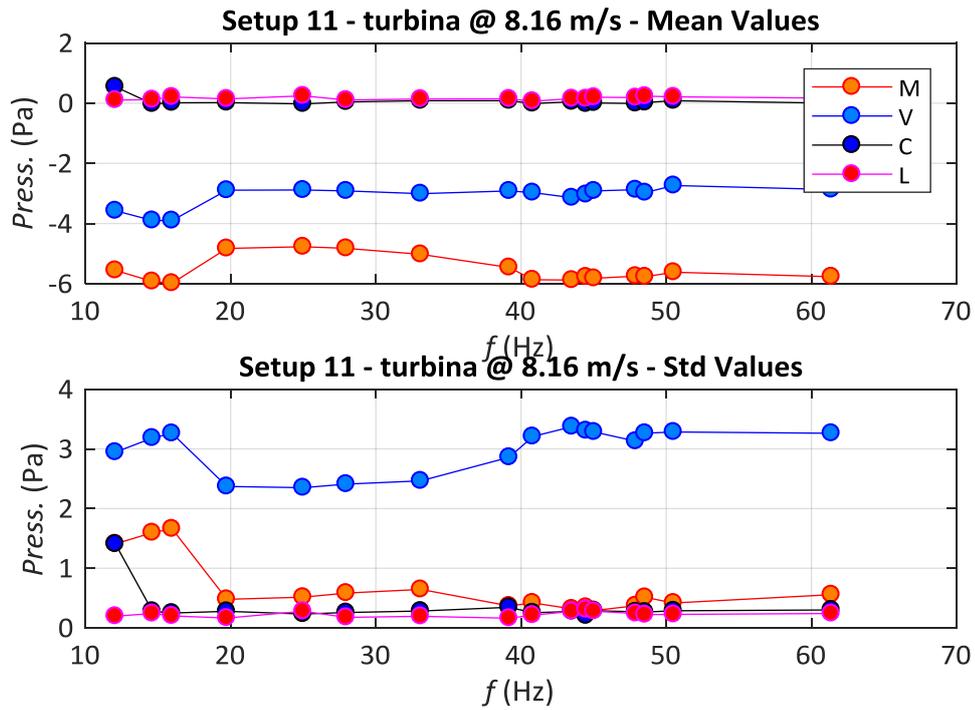


Fig. 5.28 - Pressioni setup11

In questo setup le pressioni sono fortemente disomogenee sul bordo di imbocco del cono a monte, in uscita sul cono corto, e a valle della girante.

Gli unici valori delle pressioni meno variabili sono quelli a monte della girante che si confermano ancora una volta di segno negativo.

Ciò si traduce in forti turbolenze che influiscono negativamente sul rendimento della turbina, come è stato dimostrato nell'analisi delle potenze.

La prova con il setup 11 è stata effettuata per poter scartare questo tipo di geometria su tutti i fronti.

6 - Conclusioni

Dai dati sopra riportati si può evincere che una turbina eolica con flusso convogliato, studiata nell'ambito di questa tesi, aumenta notevolmente la produzione energetica. Un altro punto fondamentale è che la turbina in oggetto non risente dell'inclinazione che subisce rispetto al vento, ma che anzi, in presenza di un angolo di 45° ha il picco di produzione massima.

Dalle diverse prove in galleria del vento la geometria che risulta produrre di più è quella con il diffusore lungo a valle e il cono corto a monte.

Sebbene i risultati ottenuti siano stati soddisfacenti, rispecchiando le previsioni effettuate, un'analisi più approfondita sugli angoli e su altri tipi di convogliatori non è da scartare; nello studio qui riportato tale analisi supplementare non è stata possibile a causa di tempistiche ristrette relative alla disponibilità della galleria del vento.

Bisogna inoltre ricordare che l'intera analisi del progetto è stata effettuata su un modello che, sebbene sia in tutto e per tutto una copia in scala dell'originale, non può caratterizzare compiutamente le condizioni di impiego reali.

Per concludere, la turbina "Ghibli" rappresenta un miglioramento significativo delle classiche turbine ad asse orizzontale, sebbene tale miglioramento sia riferito unicamente al campo delle microturbine per via degli ingombri elevati dei diffusori.

Bibliografia

- [1] Y.Cengel, M.Boles. Thermodynamics. An Engineering Approach, McGraw-Hill, 2006.
- [2] Appunti del corso di Sistemi Energetici del Prof. Ing. Alberto Traverso, AA 2013/2014.
- [3] Appunti del corso di Energie Rinnovabili del Prof. Ing. Marco Fossa, 13/12/07.
- [4] https://it.wikipedia.org/wiki/Effetto_Venturi.
- [5] <http://www.anev.org/>
- [6] <https://www.legambiente.it/temi/energia/fonti-rinnovabili>
- [7] Appunti del corso di Matlab dell'Ing. Andrea Freda, 10/2013.

Appendice A

La Galleria del Vento DICCA

La galleria del vento della scuola Politecnica dell'Università di Genova, situata presso il laboratorio del DICCA, è un impianto a circuito chiuso (Figura 1) realizzato in carpenteria metallica, il cui ingombro in pianta è di $8 \times 21 \text{ m}^2$. La tipologia a circuito chiuso (Figura 2) ha l'effetto di migliorare la qualità del flusso (rispetto agli impianti a circuito aperto) e il vantaggio di operare con una camera di prova a pressione ambiente. La galleria presenta alcuni aspetti innovativi per quanto concerne lo schema generale e i parametri dimensionali e prestazionali. La Tabella 1 e la Tabella 2 riportano sinteticamente le dimensioni principali e le prestazioni dell'impianto. I paragrafi seguenti illustrano i componenti dell'impianto suddivisi per tipologia.

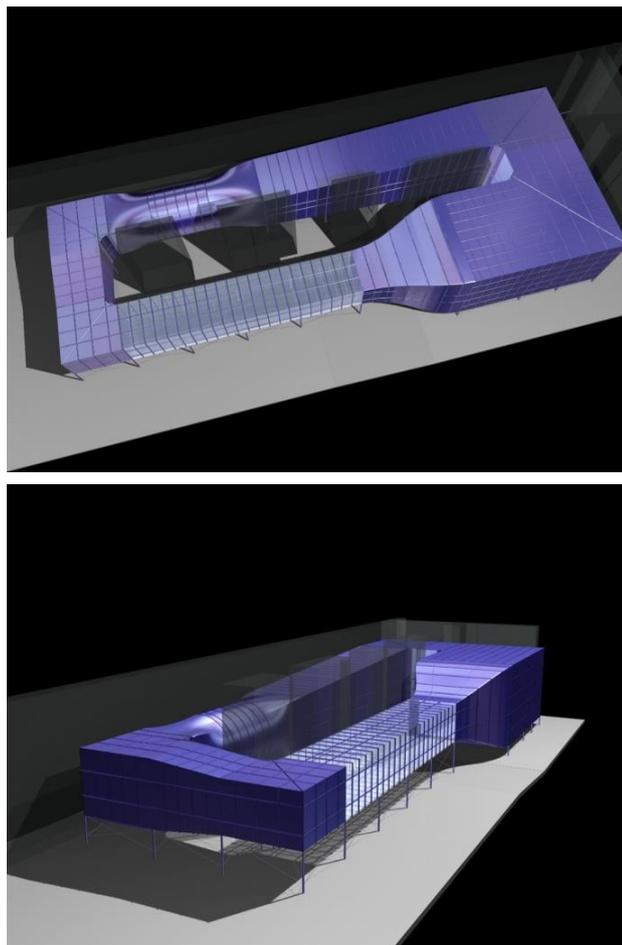


Figura 1 Schema dell'impianto; vista dall'alto (a) e vista laterale (b).

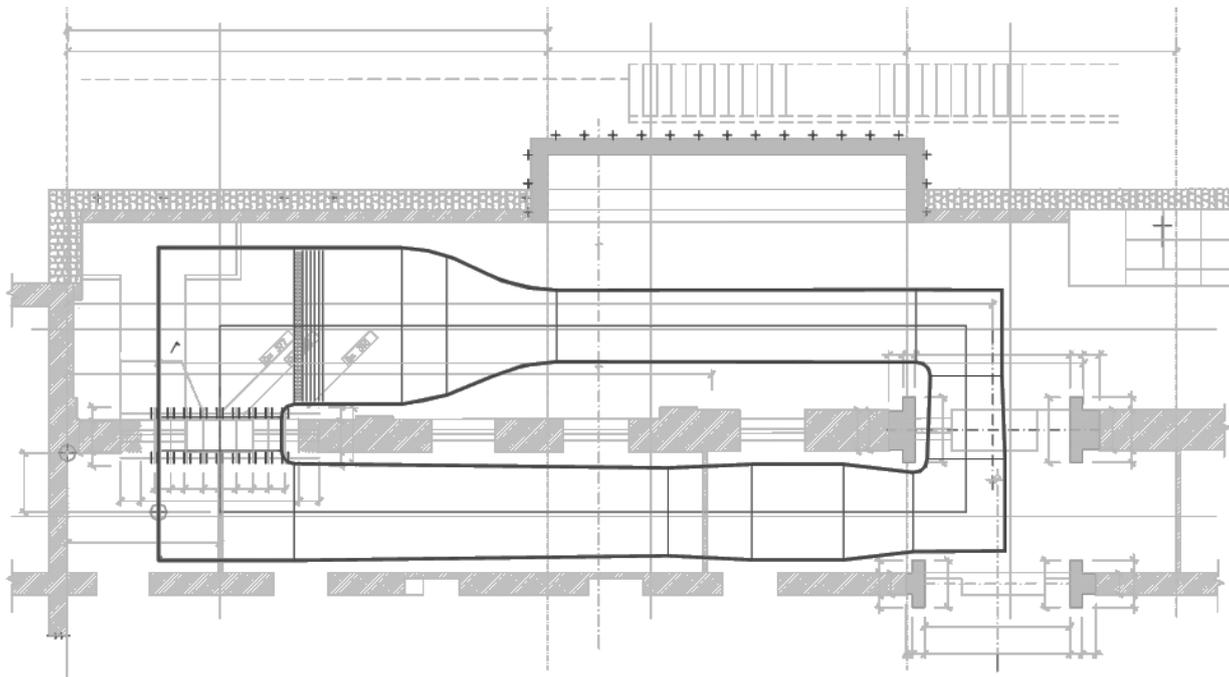


Figura 2 Planimetria dell'impianto e sua collocazione all'interno del laboratorio.

Tabella 1 Dimensioni principali dell'impianto.

<i>Dimensioni</i>	
Larghezza (m)	8
Lunghezza (m)	21
Altezza (m)	3.5
Sezione camera di prova (m)	1.7 x 1.35
Lunghezza camera di prova (m)	8.8
Rapporto di contrazione	5
Diametro del Ventilatore (m)	2.2

Tabella 2 Prestazioni dell'impianto.

<i>Prestazioni</i>	
Velocità di progetto camera di prova (m/s)	30
Velocità massima camera di prova (m/s)	40
Potenza necessaria a 40 m/s (kW)	100
Potenza installata (kW)	132
Perdita di potenza dell'impianto (Power factor)	0.774

1 Camera di prova e sezioni di misura

La camera di prova è lunga 8.8 m (Figura 1-1). La sezione trasversale della camera di prova è di $1.7 \times 1.35 \text{ m}^2$. Al suo interno si collocano due distinte sezioni di misurazione.



Figura 1-1 Camera di prova; particolare del telaio di contrasto nella prima sezione di misura (a) e vista dall'interno (b).

La prima sezione di misura, situata all'imbocco della camera, 1.5 m a valle del convergente, è rivolta a misure in flusso omogeneo. Di base, essa è caratterizzata da valori ridottissimi dell'indice di turbolenza; è comunque previsto l'impiego di griglie per creare, se necessario, flussi turbolenti. La sezione è utilizzata soprattutto per prove aerodinamiche e aeroelastiche su modelli sezionali di elementi e porzioni strutturali quali impalcati da ponte, conci di torre o componenti di costruzioni industriali.

La seconda sezione di misura, nella parte terminale della camera di prova, è dotata di una tavola rotante ed è rivolta a misure in condizioni di flusso tali da riprodurre le proprietà dello strato limite atmosferico mediante generazione artificiale del profilo della velocità media e della struttura della turbolenza, compatibilmente con le dimensioni della sezione e i rapporti di scala che si renderanno di volta in volta opportuni. Lo sviluppo dello strato limite, favorito mediante dispositivi passivi (blocchi di rugosità e guglie), è favorito dalla lunghezza della camera di prova. La parte terminale, prima del primo angolo, è posta in

comunicazione con l'ambiente mediante un setto poroso che ha il compito di equalizzare la pressione statica. Il riequilibrio della pressione statica è inoltre favorito dalla presenza di una fessura longitudinale, anch'essa porosa, lungo tutto il soffitto della camera di prova.

2 Gruppo motore

Immediatamente dopo il primo divergente e il secondo angolo, a valle del cambio di forma da sezione rettangolare a sezione circolare, si trova il ventilatore (Figura 2-1). Il ventilatore (assiale) ha una girante di 2.2 m ed è alimentato da un motore asincrono da 132 kW collocato in posizione anteriore e protetto da un'ogiva (Figura 2-1a). La potenza installata è stata dimensionata in base alla valutazione delle perdite di carico dell'impianto (Punto 6), con lo scopo di attuare in camera di prova una velocità superiore a 40 m/s, assumendo un rendimento complessivo del ventilatore pari a 0.7.

Il ventilatore, il motore ed il raddrizzatore di flusso (statore), sono collocati su un basamento in acciaio mediante *silent-blocks* (Figura 2-1b); il basamento è ancorato mediante tirafondi a una fondazione rigida in calcestruzzo armato, isolata dal resto della pavimentazione.



Figura 2-1 Vista del ventilatore dal cambio di forma a monte (a) e del basamento su fondazione rigida (b).

Il ventilatore, la cui velocità massima è di 900 giri/minuto, è comandato da un convertitore in frequenza che permette di regolare con continuità la velocità in camera di prova con precisione pari a ± 0.1 m/s; il suo raffreddamento è ad aria, ed è affidato a un ventilatore centrifugo ausiliario collocato all'esterno della galleria. Il blocco motore è meccanicamente isolato dai cambi di forma, tanto a monte quanto a valle, mediante giunti elastici che impediscono la trasmissione di vibrazioni alle altre sezioni della galleria del vento.

3 Divergenti

Per aumentare la lunghezza della camera di prova, non è stato collocato alcun divergente a valle della seconda sezione di misura. Il primo diffusore, della lunghezza di 1.65 m, è

successivo al primo angolo ed è realizzato con un divergente bidimensionale con un angolo massimo di 3° , ottenuto con un setto orizzontale divisorio (Figura 3-1a). A valle del ventilatore, dopo il raddrizzatore di flusso e il cambio di forma, si trova il secondo canale di espansione (Figura 3-1b/c) di lunghezza pari a 8.9 m; esso è completamente foderato di materiale fonoassorbente ed è caratterizzato da un angolo di divergenza massimo di 3.3° . Tra il terzo e il quarto angolo si trova infine un modesto diffusore che funge principalmente da elemento di raccordo tra gli angoli.

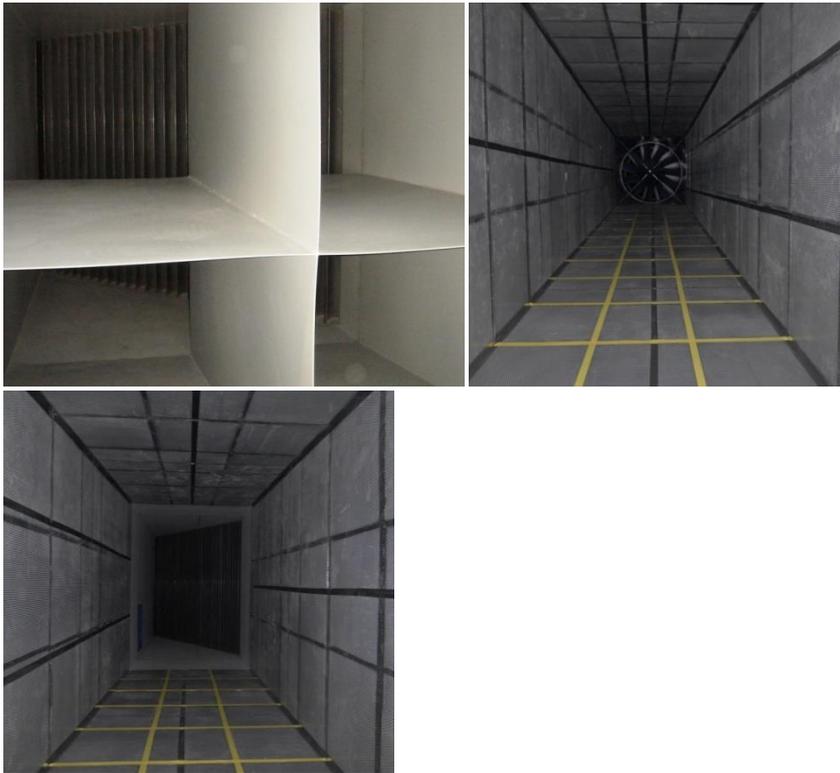


Figura 3-1 Primo divergente e sullo sfondo il secondo angolo (a), vista del ventilatore (b) e del terzo angolo (c).

4 Angoli

Per ottimizzare gli ingombri e massimizzare la lunghezza della camera di prova, non sono stati posti in opera divergenti rapidi, tanto a monte della camera di ristagno, quanto a valle della camera di prova. Gli angoli sono stati quindi progettati in modo innovativo, dando luogo a un'espansione del flusso. In ciascuno dei quattro angoli si trova una batteria di alette (Figura 3-1°/c) con interasse di 81 mm. Per minimizzare la separazione e ridurre quanto più è possibile le perdite di carico, le alette sono state realizzate con profili alari studiati appositamente per l'uso in galleria del vento; essi sono caratterizzati da un'elevata curvatura e da una rifinitura a spigolo vivo al bordo d'uscita. L'interasse tra le alette è il compromesso ottimale tra la necessità di evitare la separazione (alette troppo distanziate potrebbero indurre lievi separazioni al bordo d'uscita) e di non aumentare eccessivamente la resistenza di attrito (legata alla superficie bagnata delle alette).

5 Camera di calma e convergente

All'uscita del quarto angolo, nella camera di calma, sono alloggiati una struttura a nido d'ape e un sistema di cinque reti. Essi attuano una progressiva riduzione delle scale della turbolenza concorrendo, assieme agli accorgimenti utilizzati nel dimensionamento dei divergenti e degli angoli, a garantire un'elevata qualità del flusso prima del suo ingresso in camera di prova. L'*honeycomb* e le reti, realizzate senza alcuna discontinuità, sono state calate dall'alto attraverso una botola nel soffitto (Figura 5-1a). La maglia dell'*honeycomb* ha dimensione M pari a 6.35 mm; la batteria di reti è a maglia decrescente, variabile da 3.2 a 0.7 mm. La Tabella 3 riporta le dimensioni principali caratterizzanti gli schermi: d è il diametro degli elementi, M è la dimensione caratteristica della maglia, $\square = (1-d/M)^2$ è il rapporto di solidità.



Figura 5-1 Installazione del pannello a nido d'ape e delle reti (a); vista del convergente e della prima sezione di misura (b).

Tabella 5-1 Dimensioni dell'*honeycomb* e delle reti: diametro d , larghezza della maglia M , rapporto di solidità \square

<i>Elemento</i>	d (mm)	M (mm)	\square
honeycomb	0.1	6.35	0.97
Rete 1	0.71	3.2	0.61
Rete 2	0.56	2.4	0.58
Rete 3	0.56	2.4	0.58
Rete 4	0.16	0.7	0.61
Rete 5	0.16	0.7	0.61

A valle delle reti si colloca la camera di calma (tratto rettilineo); essa ha il compito di ristabilire nel flusso un regime di turbolenza isotropa, prima che questo giunga nel convergente. Il convergente (Figura 5-1b), dimensionato per evitare fenomeni di

separazione o ispessimento indesiderato dello strato limite, ha un fattore di contrazione pari a 5.

6 Caratterizzazione e modellazione dell'impianto

In fase progettuale, ogni singolo componente dell'impianto è stato oggetto di analisi finalizzate a verificarne il corretto dimensionamento.

Dal punto di vista fluidodinamico, particolare attenzione è stata posta nella verifica delle perdite di carico che si realizzano nelle diverse sezioni. La Tabella 6-1 riporta, per tutti i componenti dell'impianto, l'area della sezione, la velocità corrispondente a una velocità di 40 m/s in camera di prova, e i coefficienti di perdita locali e cumulativi; essi forniscono il valore della potenza installata necessari Al fine di evitare qualsivoglia sottodimensionamento, le perdite di carico sono state valutate ipotizzando la presenza di uno scambiatore di calore (non installato allo stato attuale).

Tabella 6-1 Proprietà delle sezioni dell'impianto, velocità relative alla velocità in camera di prova e coefficienti di perdita.

<i>Sezione</i>	<i>Area (m²)</i>	<i>Velocità ingresso (m/s)</i>	<i>Coefficiente di perdita</i>	
			<i>locale</i>	<i>Cumulativo</i>
<i>Camera di Prova</i>	2.375	40	0.0520	0.0520
<i>Primo angolo</i>	2.375	39.33	0.0480	0.1000
<i>Primo Diffusore</i>	3.222	39.33	0.0455	0.1455
<i>Secondo angolo</i>	3.222	28.99	0.0480	0.1935
<i>Ventilatore</i>	3.98	28.99	0.1520	0.3455
<i>Secondo diffusore</i>	6.716	23.47	0.0184	0.3639
<i>Scambiatore di calore</i>	6.716	-	0.1000	0.4639
<i>Terzo angolo</i>	8.662	13.92	0.0044	0.4683
<i>Terzo diffusore</i>	8.901	10.49	0.0005	0.4688
<i>Quarto angolo</i>	11.483	8.3	0.0025	0.4713
<i>Honeycomb</i>	11.483	-	0.0237	0.4950
<i>Rete 1</i>	11.483	-	0.0400	0.5350
<i>Rete 2</i>	11.483	-	0.0447	0.5797
<i>Rete 3</i>	11.483	-	0.0447	0.6244
<i>Rete 4</i>	11.483	-	0.0535	0.6779
<i>Rete 5</i>	11.483	8.3	0.0535	0.7314
<i>Camera di calma</i>	11.483	8.13	0.0004	0.7317
<i>Convergente</i>	2.295	41.4	0.0420	0.7737

7 Strumentazione

La velocità di riferimento del flusso all'interno della galleria è rilevata mediante un *tubo di Pitot-statico* (Figura 7-1) posto a circa 20 cm dal tetto della camera di prova, e posizionato a monte della sezione impegnata dal modello in una regione indisturbata dalla presenza dello stesso. La pressione cinetica è ottenuta come differenza tra la pressione totale e la pressione statica, ed è misurata attraverso un manometro differenziale con range 0-5 inWC. Il segnale elettrico è filtrato, digitalizzato e salvato alla frequenza di 100 Hz.

Il valore della densità dell'aria utilizzato per convertire la misura di pressione cinetica nel corrispondente valore di velocità è valutata sulla base della temperatura dell'aria misurata in camera di prova.

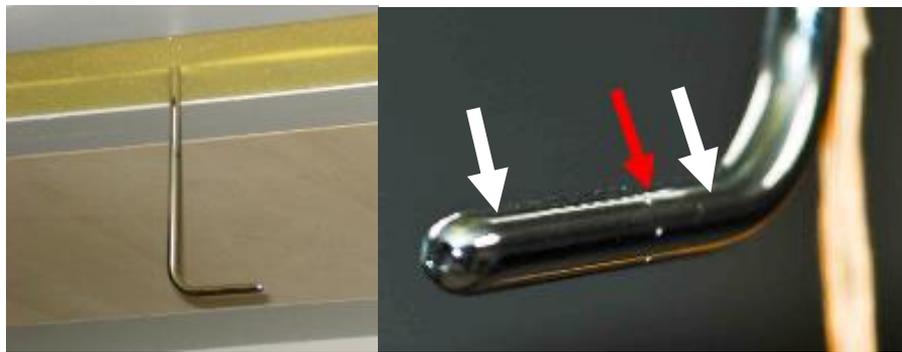


Figura 7-1 Tubo di Pitot posizionato in galleria del vento (a) e dettaglio con indicazione della misura della pressione totale e statica

Oltre ai tubi di Pitot-statici, la galleria del vento DICCA dispone di 2 sonde multiforo *TFI* (4 fori, Figura 7-2a) di tipo “cobra” in grado di misurare le tre componenti di velocità, e la pressione statica locale nella banda 0-4kHz all'interno di un cono di accettazione con apertura $\pm 45^\circ$, e di una sonda “omniprobe” a 12 fori avente un cono di accettazione di $\pm 150^\circ$. Le sonde multiforo possono essere posizionate in galleria del vento attraverso un supporto motorizzato a 3 gradi di libertà (Figura 7-3) posto al di sopra della seconda camera di prova.



Figura 7-2 Sonda multiforo “cobra” (a) e “omniprobe” (b).



Figura 7-3 Braccio movimentatore a 3 gradi di libertà.

Infine, per la valutazione della velocità del vento “a parete” la galleria del vento dispone di circa 50 *Irwin Probes* e di 8 sensori *Kanomax* (Figura 7-4), anemometri a filo caldo omni-direzionali, in grado di misurare la velocità del flusso in un dominio compreso tra 0.1 m/s a 25 m/s, con una risoluzione di 0.01 m/s e frequenza di campionamento fino a 10 Hz.

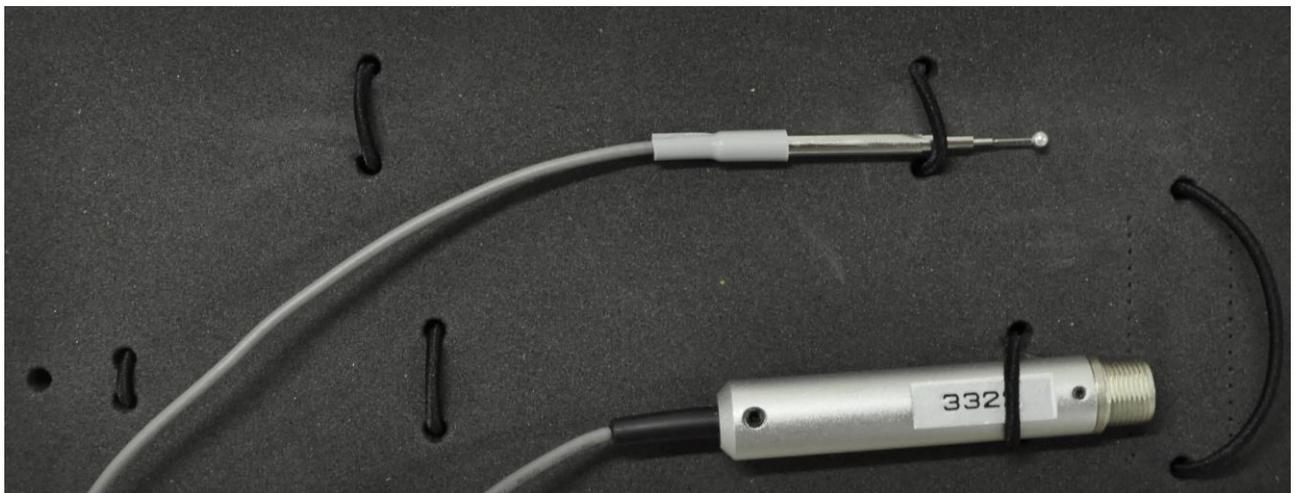


Figura 7-4 Anemometro Kanomax.

Per quanto riguarda la misure delle pressioni, la galleria del vento è dotata di 3 scanner di pressione tipo *PSI*, ciascuno dei quali a 32 canali, con range $\pm 1\text{KPa}$ (Figura 7-5).



Figura 7-5 Scanner di pressione PSI.

La misura delle azioni globali su modelli viene realizzata attraverso l'uso di celle di forza *SMT S-Type* prodotte dalla *Interface*, aventi un intervallo di misura di 100 N e una frequenza propria di 600 Hz. Le celle di carico possono essere assemblate per realizzare una bilancia dinamometrica a 6 componenti (Figura 7-6) .

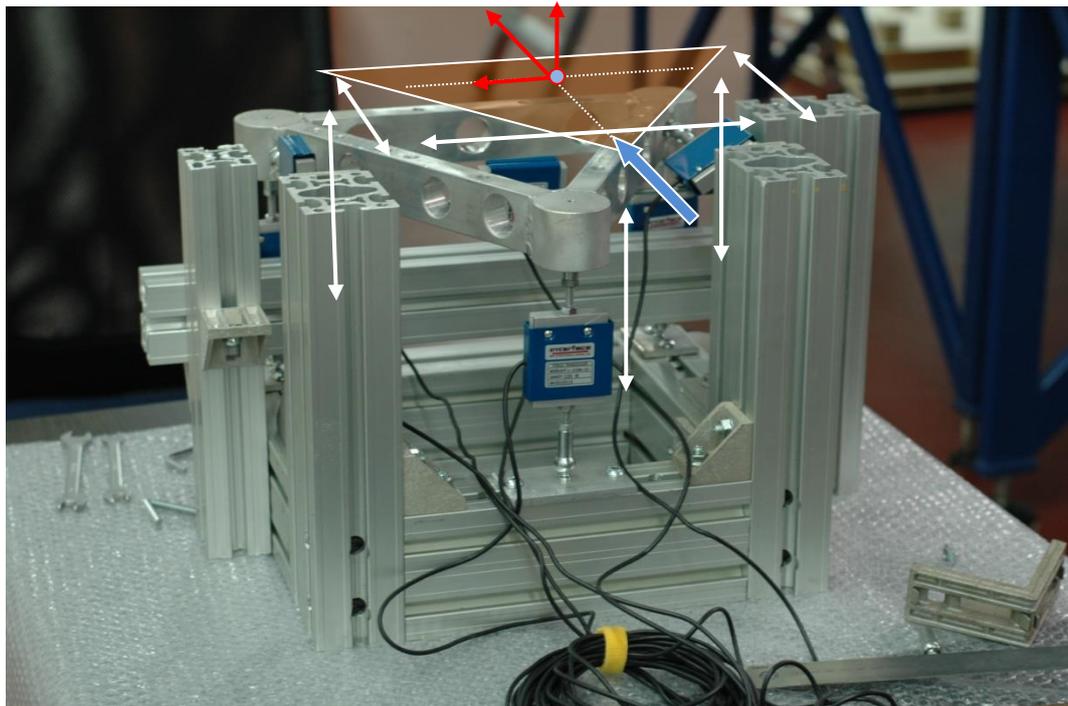


Figura 7-6 Celle di carico assemblate in bilancia dinamometrica

Per quanto riguarda le misure di spostamento, la galleria è dotata di 4 sensori laser il cui range di lettura è ± 25 mm, con lo zero a 120mm dal sensore, e di 1 sensore con range ± 2 mm.



Figura B.4 *Sensore di spostamento laser.*