



Attribuzione - Non commerciale -
Condividi allo stesso modo 4.0
Internazionale (CC BY-NC-SA 4.0)

GALLERIA DEL VENTO

A STEP AHEAD



OF THE FUTURE

Indice:

- 1. Introduzione
- 1.1 Storia della Galleria del Vento e Sensori
- 1.2 Spiegazione delle leggi utilizzate



OF THE FUTURE

2. Misurazioni

3. Green Energy

3.1 Spiegazione generale

3.2 Esperimenti

Materiali:

- Tubo in Plexiglass lunghezza = 1 m;
diametro interno = 19,4 cm;
diametro esterno = 20 cm
- Rotaie Lima
- 2 sostegni in legno
- 2 schede Arduino uno e 1 scheda Elegoo uno r3
- Cavi MF, MM, FF e jumper wires ponticelli
- 3 sensori di pressione, altitudine e temperatura BMP180
- 1 sensore di temperatura e umidità DHT11
- Computer e software Arduino
- Scotch carta, isolante e trasparente
- 6 Ventose con gancio
- 2 Phon con diametro e potenza differenti
- Base di appoggio per il Phon
- Modellino di ala fatto con polistirolo, plexiglass, due cannucce, cartone e scotch
- 1 ventola per raffreddamento computer, 1 pala a 2 ali e 1 mini girandola
- Un cubo di plexiglass
- Magneti
- Carrellino
- App Phypox e un telefono

Per Green Energy:

- 1 turbina verticale con collegato un led
- 1 pala eolica di altezza 30 cm

Obbiettivo:

Costruire una Galleria del vento per effettuare studi sul moto di un fluido in una sezione cilindrica, sull'aerodinamica e l'efficienza di molteplici modellini (sezione alare, una ventola, un aerogeneratore a 2 eliche e uno a 3 eliche, una macchinina) e



OF THE FUTURE

sulla formazione di vortici con l'ausilio di sensori per la pressione, temperatura e umidità.

Introduzione: un po' di storia

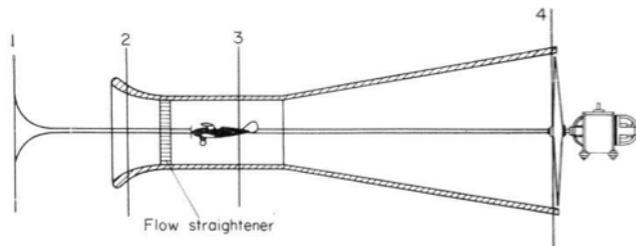
La Galleria del Vento

Una **galleria del vento** è un'apparecchiatura che viene utilizzata in laboratorio per studiare l'andamento di un flusso di un fluido (tipicamente aria) attorno ad un corpo, simulando l'interazione con buona approssimazione alla realtà.

Le misure che si effettuano sono tipicamente misure di: velocità globali e locali, misure di pressione, di temperatura e forze esercitate dal fluido sul corpo.

La nostra galleria del vento è a **ciclo aperto**, di tipo **NPL** (ciclo aperto e camera di prova chiusa)

Es.



Applicazioni di questa tecnologia:

Alcuni esempi di applicazione della galleria del vento sono riportati nella sezione apposita nel sito del Politecnico di Milano

(<https://www.polimi.it/ricerca/la-ricerca-al-politecnico/laboratori/grandi-infrastrutture/galleria-del-vento>):

- risposta al vento turbolento di modelli aeroelastici



OF THE FUTURE

- misura delle distribuzioni di pressione spazio-temporale e dei carichi aerodinamici su modelli rigidi
- studio dei fenomeni fluidodinamici associati al distacco di vortici
- ottimizzazione di piani velici per imbarcazioni
- studio del comportamento aerodinamico di veicoli ferroviari e stradali
- studio della distribuzione e della concentrazione di sostanze inquinanti sul territorio
- applicazione di tecniche di visualizzazione del flusso

Sensori e Arduino

Arduino è una piattaforma hardware composta da una serie di schede elettroniche dotate di un microcontrollore.

È stata ideata e sviluppata nel 2005 da alcuni membri dell'Interaction Design Institute di Ivrea come strumento per la prototipazione rapida e per scopi hobbistici, didattici e professionali.

BMP180:

Il BMP180 è un sensore di pressione atmosferica della Bosch.

Può essere utilizzato come sensore barometrico, di temperatura o altimetro di precisione.

La calibrazione è fatta durante la produzione e i valori sono salvati nella memoria del sensore.

Per facilitare l'uso del sensore, questo si trova di solito già montato su una piccola basetta (come per esempio la Breakout Board GY-68), dove oltre al sensore, trovano posto i pochi altri componenti necessari al suo funzionamento.

Le principali caratteristiche sono:

- Alimentazione: 3.3V – 5V
- Assorbimento: 0,5 uA
- Logica: 3.3V
- Pressione rilevata: 300 ~ 1100 hPa (-500 ~ 9000 mt rispetto al livello del mare)
- Risoluzione: 0,02 hPa (17cm)
- Interfaccia: I2C 7 bit con indirizzo 0x77 (non modificabile)



DHT11:

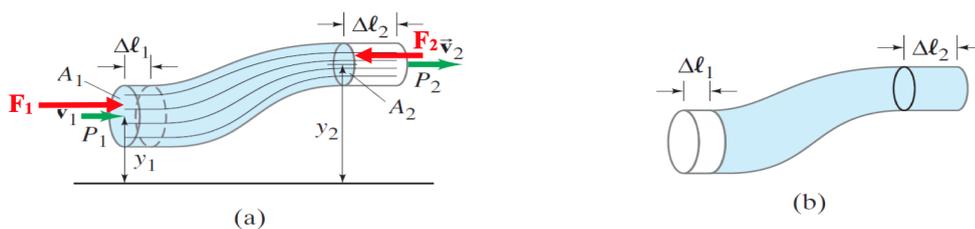
Il sensore DHT11 è un sensore di temperatura e umidità con uscita dei dati in formato digitale.

Ecco le gamme e la precisione del DHT11:

- Alimentazione: 3-5.5V DC
- Elemento sensibile: Resistenza in Polimero
- Campo di misura umidità: 20-90% di umidità relativa, temperatura di 0-50 gradi Celsius
- Gamma di umidità: 20-90% di umidità relativa
- Precisione umidità: $\pm 5\%$ RH
- Intervallo di temperatura: 0-50 ° C
- Precisione della temperatura: $\pm 2\%$ ° C
- Tensione di funzionamento: da 3 V a 5,5 V

LEGGI UTILIZZATE:

1. LEGGE DI BERNOULLI



Consideriamo un fluido ideale in moto stazionario e non vorticoso in un tubo di flusso di sezione trasversale non uniforme e a differente altezza rispetto a un dato riferimento.



OF THE FUTURE

Riferiamoci ad un punto 1, dove la sezione è A_1 , l'altezza y_1 , la pressione p_1 e la velocità v_1 , e ad un punto 2 dove la sezione è A_2 , l'altezza y_2 , la pressione p_2 e la velocità v_2 .

La porzione di flusso compresa fra le sezioni A_1 e A_2 è soggetta alle forze di pressione F_1 e F_2 sulle rispettive sezioni e alla forza peso che ne determinano la dinamica spostandolo, in un tempo Δt , nella posizione rappresentata in *fig.b*.

Calcoliamo il lavoro fatto in questo tempo dalle singole forze osservando che se il moto avviene nel verso in figura, il lavoro fatto da F_1 è positivo (F_1 concorde allo spostamento Δl_1), il lavoro fatto da F_2 è negativo (F_2 opposto allo spostamento Δl_2),

$$W_1 = F_1 \cdot \Delta l_1 = p_1 \cdot A_1 \cdot \Delta l_1 \quad W_2 = - F_2 \cdot \Delta l_2 = - p_2 \cdot A_2 \cdot \Delta l_2.$$

Posta m la massa che cambia posizione nel tempo Δt ossia quella relativa al volume

$$A_1 \cdot \Delta l_1 = A_2 \cdot \Delta l_2 \quad \text{cioè} \quad m = \rho A_1 \cdot \Delta l_1 = \rho A_2 \cdot \Delta l_2,$$

ricordiamo che il lavoro della forza peso W_g può essere calcolato come:

$$W_g = -\Delta U = -mg(y_2 - y_1)$$

Il lavoro totale fatto dalle forze sul fluido è

$$W_{Tot} = W_1 + W_2 + W_g$$

che per il teorema della energia cinetica è anche

$$W_{Tot} = \Delta K = K_2 - K_1.$$

Osservando che la massa che ha cambiato la velocità è solo e sempre la stessa m , segue:

$$\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = \rho A_1 \cdot \Delta l_1 - \rho A_2 \cdot \Delta l_2 - mgy_2 + mgy_1$$



OF THE FUTURE

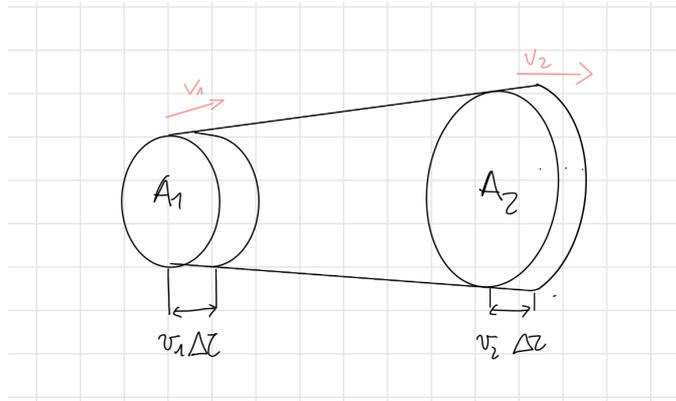
Introducendo l'espressione di m e dividendo per $A_1 \cdot \Delta l_1 = A_2 \cdot \Delta l_2$ e riordinando, si ottiene:

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g y_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g y_2$$

Poiché i punti 1 e 2 sono due punti qualsiasi del tubo di flusso segue che

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g y = \text{costante}$$

2. Equazione di continuità



Definiamo la portata volumica (Q) come $\frac{\Delta V}{\Delta t}$, ovvero è il rapporto tra il volume di fluido che oltrepassa la sezione in un dato periodo di tempo.

Tuttavia, nell'ipotesi che la velocità del fluido sia la stessa in tutti i punti della sezione considerata, Q è uguale al prodotto dell'area S della sezione per il modulo v della velocità.

$$Q = Sv$$

Se all'entrata, nel punto 1, la velocità del fluido è v_1 e la sezione del condotto è A_1 , nell'intervallo di tempo Δt sarà passato un volume di fluido

$$\Delta V_1 = A_1 v_1 \Delta t$$



Nel punto 2 la velocità del fluido non sarà necessariamente la stessa del punto 1 : sarà una certa velocità v_2 corrispondente ad una sezione A_2 del tubo. Nello stesso intervallo Δt di tempo uscirà quindi dal punto 2 un volume di fluido

$$\Delta V_2 = A_2 v_2 \Delta t$$

Poiché il fluido è incomprimibile e per la legge di conservazione della massa, questi volumi saranno uguali e quindi :

$$A_1 v_1 \Delta t = A_2 v_2 \Delta t$$

Questa equazione è detta $A_1 v_1 = A_2 v_2$ equazione di continuità.

La grandezza Av è detta *portata in volume* Q_v e dall'equazione di continuità si deduce che ***in una corrente stazionaria di un fluido incompressibile la portata in volume ha lo stesso valore in ogni punto del fluido.***

Nel caso di fluidi viscosi, poiché la velocità varia sulla sezione del condotto, v sarà la velocità media e varrà:

$$Q = Av = Sv = \text{costante}$$

L'equazione indica che, nella corrente di un liquido:

- la portata è uniforme lungo il condotto, cioè non varia da una sezione trasversale all'altra;
- l'area della sezione trasversale e la velocità del liquido sono inversamente proporzionali.

L'equazione di continuità vale in modo rigoroso per un fluido ideale che soddisfa le seguenti condizioni:

1. il fluido è incomprimibile;
2. la velocità del fluido è la stessa in tutti i punti di una stessa sezione trasversale.



OF THE FUTURE

- 1 richiede che la densità del fluido sia uniforme nello spazio e costante nel tempo;
- 2 equivale a trascurare gli attriti, che in realtà tendono a rallentare in misura diversa i vari volumetti di fluido a seconda della loro distanza dalle pareti del condotto.

Nel nostro caso, dopo aver trovato sperimentalmente la portata del phon, possiamo calcolare la velocità di uscita dalla bocchetta e poi nel centro della galleria del vento.

3. La portanza e l'effetto Venturi

Per andare ad analizzare il nostro modello di ala e capire come si può alzare in volo, bisogna introdurre alcuni concetti importanti, ovvero L'effetto Venturi e la portanza.

L'EFFETTO VENTURI

L'effetto Venturi, riguarda i fluidi che scorrono lungo un condotto orizzontale.

Si nota che nei punti in cui la sezione del condotto si restringe, la velocità aumenta (per l'equazione di continuità) mentre la pressione diminuisce.

Viceversa nei punti dove la sezione diventa più grande, la velocità diminuisce mentre la pressione aumenta.

Se il liquido potesse scorrere in condotti verticali posti in corrispondenza delle strozzature o dei punti in cui la sezione si allarga, noteremo un livello di fluido minore nei primi e un livello superiore nei secondi

Questo perché la pressione è proporzionale all'altezza raggiunta in un tubo verticale (legge di Stevino).

Per spiegare le ragioni dell'effetto Venturi, bisogna ricorrere alla legge di Bernoulli riferita al caso di un condotto orizzontale, quindi quando la quota non varia $h_1 = h_2$.

La legge di Bernoulli assume una formulazione più semplice in questo caso di quota costante per cui essa si riduce a:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = \text{costante}$$



OF THE FUTURE

Ciò vuol dire che se la velocità aumenta, affinché la somma dei due addendi P_1 e $\frac{1}{2}\rho v_1^2$ possa mantenersi costante allora la pressione dovrà necessariamente diminuire.

Ora sappiamo che per l'equazione di continuità la velocità può aumentare se esiste una strozzatura lungo il condotto che fa diminuire la sezione di scorrimento. In prima istanza si potrebbe pensare che la pressione in tale strozzatura aumenti invece essa diminuisce come diretta conseguenza della legge di Bernoulli.

LA PORTANZA

La portanza è la componente della forza aerodinamica globale calcolata in direzione perpendicolare alla direzione del vento relativo.

Un esempio pratico per capirla è mettere la mano fuori dal finestrino di un veicolo in corsa, se si mette la mano parallela al livello stradale si noterà come questa si alza, questa può essere definita portanza.



Le due superfici ventre, esse possono stessa altezza rispetto percorre.

dell'ala sono dette dorso e essere approssimate alla al flusso di aria che le

Per cui dette P_1 , e P_2 , le due pressioni del fluido (aria) sulle due superfici, v_1 , e v_2 le due velocità e ρ la densità dell'aria, possiamo scrivere ricordando la legge di Bernoulli, che:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

Ora lo spazio che il flusso di aria deve percorrere sul dorso dell'ala è maggiore di quello sul ventre.

Perciò, la velocità del fluido sulla parte superiore dell'ala sarà maggiore rispetto alla velocità dell'aria che scorre a contatto col ventre:



Tenendo conto dell'effetto Venturi, la pressione di una corrente di un fluido aumenta col diminuire della velocità mentre essa diminuisce se la velocità aumenta.

Di conseguenza, si viene a creare tra il dorso e il ventre dell'ala una differenza di pressione e detta S la superficie dell'ala, tale differenza genera una forza diretta verso l'alto che è appunto la portanza pari a:

$$F = S \times (P_2 - P_1) = S \times \frac{1}{2} \rho (v_1^2 - v_2^2)$$

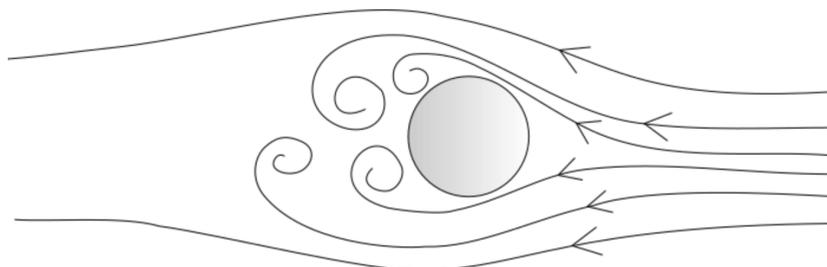
4. L'ATTRITO

Nel nostro esperimento consideriamo all'interno della galleria del vento un fluido ideale, ovvero incompressibile, omogeneo e con una velocità sempre uguale nella sezione analizzata.

Inoltre, è bene sottolineare che trascuriamo i vari attriti.

Moto laminare e i vortici

In fluidodinamica si parla di **flusso laminare** o di **regime laminare** quando un fluido si muove come se fosse formato da sottili lamine che scivolano l'una sull'altra.



Resistenza di un fluido e legge di Stokes.

Il flusso è governato dalle forze viscosive ed è costante nel tempo.



Alla velocità più bassa, viene chiamato flusso di Stokes, ed è governato dalle equazioni di Stokes. Inoltre, in questi casi, non si formano i vortici e possiamo parlare di attrito viscoso.

Legge di Stokes:

$$F = 6\pi\eta Rv$$

η : viscosità del fluido

v : velocità relativa della sfera

R : raggio della sfera

- a parità di velocità e di raggio, la resistenza del fluido è direttamente proporzionale alla viscosità: un fluido più viscoso oppone una resistenza maggiore

Più in particolare, la legge per calcolare **la velocità di scorrimento di un fluido reale nel moto laminare è:**



Fluido ideale

Fluido reale

Velocità di scorrimento nel moto laminare di un fluido ideale e di un fluido reale.

$$v(r) = \frac{p_1 - p_2}{4\eta l} (R^2 - r^2)$$

Tuttavia nella nostra galleria del vento è molto facile che il moto diventi turbolento, ovvero con la presenza di molteplici vortici.

Una delle ragioni è la spiegata alla domanda 6, ma sicuramente anche la differenza di aree di sezioni tra il phon e la galleria.



OF THE FUTURE

Inoltre, andando più in dettaglio nell'analisi dei moti turbolenti, bisognerebbe introdurre anche il numero di Reynolds.

QUALCHE CURIOSITA'

2. I sensori sono posizionati in luoghi precisi o i dati risultano uguali anche in altre posizioni?

I sensori sono posizionati in posti diversi, in specifico ci sono tre sensori di pressione che sono posti in maniera differente per andare ad analizzare le differenze di pressione in diversi punti, due fissi (a lato e in alto) e uno mobile.

3. Perché non inserire un flussometro o usare un anemometro?

Non usiamo nessuno dei due perché non erano compatibili con la nostra galleria del vento, ma abbiamo fatto un esperimento per calcolare la velocità di uscita del phon.

4. Che cos'è la Portanza?

(Spiegata approfonditamente nella sezione sopra a p. 8)

La portanza è la componente della forza aerodinamica globale calcolata in direzione perpendicolare alla direzione del vento relativo.

Un esempio pratico per capirla è mettere la mano fuori dal finestrino di un veicolo in corsa, se si mette la mano parallela al livello stradale si noterà come questa si alza, questa può essere definita portanza.

5. Come si determina l'efficienza di una turbina eolica o il coefficiente aerodinamico di un'auto?

L'efficienza di una turbina eolica è stata calcolata nella parte degli esperimenti di Green Energy.

Per quanto riguarda il coefficiente aerodinamico di un'auto, quest'ultimo **serve a misurare la resistenza aerodinamica** che un corpo solido incontra attraversando un fluido (come, appunto, quella di un veicolo nell'aria).

Si calcola con questa formula:



OF THE FUTURE

$$C = \frac{DA}{\frac{1}{2}\rho V^2 A}$$

quindi dividendo la resistenza dell'aria per la metà della densità dell'aria stessa, moltiplicata per la velocità al quadrato per la superficie del veicolo esposta all'aria.

Una formula non semplicissima, ma il concetto alla base è chiaro: in linea di massima **più il CX è basso**, più facilmente l'auto fende l'aria e di conseguenza **minori saranno i consumi e i fruscii aerodinamici**.

6. Dove si possono formare più vortici? C'è un modo per ridurli? Influiscono sulle misurazioni?

La zona della galleria dove si possono formare più vortice è all'inizio, soprattutto se si posiziona il phon addentro all'imboccatura.

Per evitare ciò, abbiamo posizionato il phon con una copertura per farlo aderire al meglio all'imboccatura di Plexiglass.

È molto importante ridurre al minimo le zone vorticose perché già contando gli attriti trascurati, possono influire sulle misurazioni, restituendo dati della pressione fallaci.

7. Che leggi si trovano dietro ai dati analizzati? Quali principi?

Dietro alla nostra Galleria del Vento si possono riconoscere principi fondamentali della fluidodinamica, ovvero l'equazione di continuità (utilizzata nell'appendice C), il principio di Venturi e l'equazione di Bernoulli.

Inoltre, gli studi che si possono svolgere all'interno variano da aerodinamici persino a fisiologici (Poiseuille).

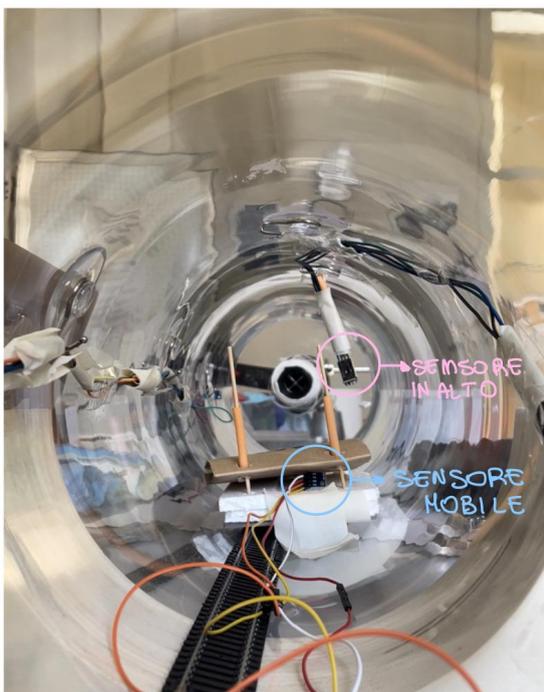
Misure nella nostra Galleria del vento

1 Sommario e Obiettivo



Le misurazioni effettuate all'interno della galleria del vento contribuiscono allo studio del moto di un fluido all'interno di un condotto cilindrico e all'efficienza aerodinamica dei modellini testati.

2 Preparazione dell'esperimento



TEST SENSORI:

1. DHT11 senza phon
2. DHT11 con phon
3. BMP180 senza phon
4. BMP180 con Phon

! I sensori di pressione sono stati calibrati con l'altitudine di 249 m, ovvero quella della città di Bergamo !



Prove generali:

CP: Con Phon

ESPERIMENTO	Sensore in alto	Sensore mobile
Senza Phon	BMP180	BMP180
CP	BMP180	BMP180
CP Ala Davanti	BMP180	BMP180
CP Ala Dietro	BMP180	BMP180
CP Macchina avanti	BMP180	BMP180
CP Macchina dietro	BMP180	BMP180
CP Ventola nera	BMP180	BMP180
CP Ventola rosa	BMP180	/

3, 4 Acquisizione dei dati e Elaborazione Matematica

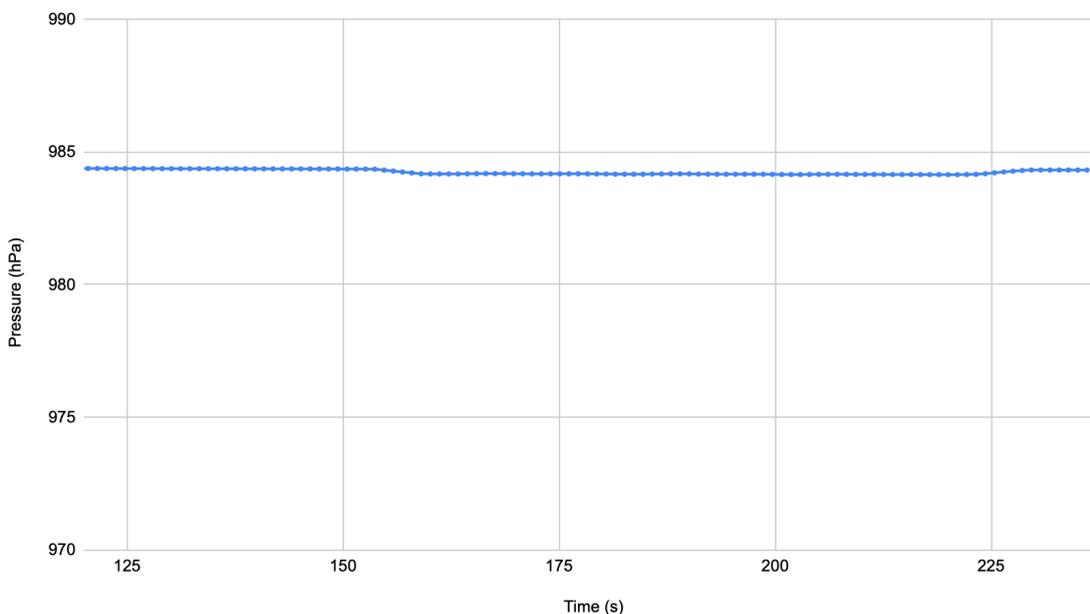
I dati sono stati acquisiti mediante i sensori di arduino precedentemente analizzati e i codici trascritti nelle Appendici A e B.

I test dei sensori restituiscono dati costanti se senza Phon, che ci permettono di analizzare la qualità di questi ultimi.

Tuttavia, azionando il phon, oltre ad un aumento di temperatura e umidità, si registra un abbassamento di pressione.



Pressure (hPa) rispetto a Time (s)



CP, dimostrazione della legge di Bernoulli

Tramite la misurazione del valore della pressione all'interno della Galleria del vento con il phon acceso alla massima potenza, possiamo dimostrare che vale la legge di Bernoulli.

Consideriamo l'altezza, fuori e all'interno della galleria uguale, perciò si semplificano:

$$h_1 = h_2$$

$$\delta: 1,3 \frac{kg}{m^3}$$

$$P_1 = \text{pressione fuori dalla galleria} = P_0 = 101325 Pa$$

$$P_1 + \frac{1}{2} \delta v_1^2 + g \delta h_1 = \text{costante?}$$

Teorico, usando la velocità del Phon (APPENDICE C):

$$P_1 + \frac{1}{2} \delta v_1^2 + g \delta h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \delta v_2^2 + g \delta h_2$$



OF THE FUTURE

$$P_1 + \frac{1}{2} \delta v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \delta v_2^2$$

$$P_1 + \frac{1}{2} \delta (v_1^2 - v_2^2) = P_2 = 1,01755 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 101755 \text{ Pa}$$

Resa sperimentale

<i>Ore</i>	<i>Pressione Relativa con Sensore Anteriore (mb)</i>
11:55:54.264	1019.84 mb
11:55:55.687	1019.90 mb
11:56:00.848	1019.65 mb
11:56:05.997	1019.73 mb
11:56:11.136	1019.53 mb
11:56:16.313	1019.56 mb
11:56:21.469	1019.71 mb
11:56:26.595	1019.55 mb
11:56:31.787	1019.55 mb
11:56:36.934	1019.65 mb
MEDIA PRESSIONE RELATIVA	1020.0642 mb= 102064 Pa

I risultati teorici e sperimentali coincidono con un piccolo margine di errore, perciò la legge di Bernoulli è rispettata.

CP Ala Davanti e Dietro

Questo esperimento all'interno della Galleria del Vento permette di comprendere il concetto di Portanza e quindi come può volare un aereo.

Quando l'ala è posizionata *davanti*, ovvero con la parte sottile rivolta verso il getto non si solleva.

Può essere invece notata la presenza di vortici o più precisamente turbolenze, che fanno tremare l'ala.



OF THE FUTURE

Osservando i dati, la pressione assoluta rimane sempre maggiore sopra all'ala, non consentendole di alzarsi in volo ma data la piccola differenza di pressione va in stallo, muovendosi continuamente su e giù.

Ore	Pressione S.M.	Pressione S.A.
11:23:25.060	986.05 mb	989.17 mb
11:23:26.471	986.00 mb	989.05 mb
11:23:31.640	985.91 mb	988.87 mb
11:23:36.797	985.85 mb	988.68 mb
11:23:41.956	985.82 mb	988.53 mb
11:23:47.107	985.80 mb	988.49 mb
11:23:52.276	985.76 mb	988.58 mb
11:23:57.418	985.68 mb	988.60 mb
11:24:02.600	985.70 mb	988.61 mb
11:24:07.736	985.71 mb	988.63 mb
11:24:12.900	985.65 mb	988.62 mb

Quando l'ala è posizionata *dietro*, ovvero la parte rialzata è rivolta verso il getto, si solleva.

Osservando i dati è possibile vedere nettamente la differenza di pressione, maggiore sotto l'ala (*sensore mobile*) e minore sopra l'ala (*sensore in alto*), consentendo l'alzarsi del prototipo.

Ore	Pressione S.A.	Pressione S.M.
11:52:15.801	986.62 mb	989.74 mb
11:52:20.954	986.58 mb	989.78 mb
11:52:26.093	986.59 mb	989.74 mb
11:52:31.262	986.60 mb	989.78 mb
11:52:36.406	986.56 mb	989.75 mb



OF THE FUTURE

11:52:41.569	986.50 mb	989.76 mb
11:52:46.735	986.56 mb	989.80 mb
11:52:51.904	986.51 mb	989.79 mb
11:52:57.046	986.54 mb	989.76 mb
11:53:02.201	986.56 mb	989.80 mb
11:53:07.375	986.61 mb	989.72 mb
11:53:12.511	986.61 mb	989.72 mb
11:53:17.693	986.64 mb	989.68 mb
11:53:22.823	986.57 mb	989.75 mb
11:53:27.991	986.57 mb	989.76 mb
11:53:33.157	986.52 mb	989.77 mb
11:53:38.306	986.56 mb	989.74 mb
11:53:43.473	986.54 mb	989.76 mb
11:53:48.610	986.58 mb	989.78 mb
11:53:53.794	986.62 mb	989.77 mb

In entrambi i casi bisogna tener conto della distanza dal getto e degli attriti che si possono formare.



Appendici

A Codice BMP180

```

#include <SFE_BMP180.h>
#include <Wire.h>

// You will need to create an SFE_BMP180 object, here called "pressure":
SFE_BMP180 pressure;

#define ALTITUDE 249.0 // Altitude of SparkFun's HQ in Boulder, CO. in meters

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("REBOOT");

  // Initialize the sensor (it is important to get calibration values stored on the device).

  if (pressure.begin())
    Serial.println("BMP180 init success");
  else
  {
    // Oops, something went wrong, this is usually a connection problem,
    // see the comments at the top of this sketch for the proper connections.

    Serial.println("BMP180 init fail\n\n");
    while(1); // Pause forever.
  }
}

status = pressure.getTemperature(T);
if (status != 0)
{
  // Print out the measurement:
  Serial.print("temperature: ");
  Serial.print(T,2);
  Serial.print(" deg C, ");
  Serial.print((9.0/5.0)*T+32.0,2);
  Serial.println(" deg F");

  // Start a pressure measurement:
  // The parameter is the oversampling setting, from 0 to 3 (highest res, longest wait).
  // If request is successful, the number of ms to wait is returned.
  // If request is unsuccessful, 0 is returned.

```



B Codice DHT11

```
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <DHT.h>
#include <DHT_U.h>

#define DHTPIN 2    // Digital pin connected to the DHT sensor
// Feather HUZZAH ESP8266 note: use pins 3, 4, 5, 12, 13 or 14 --
// Pin 15 can work but DHT must be disconnected during program upload.

// Uncomment the type of sensor in use:
// #define DHTTYPE DHT11    // DHT 11
#define DHTTYPE DHT22    // DHT 22 (AM2302)
// #define DHTTYPE DHT21    // DHT 21 (AM2301)

// See guide for details on sensor wiring and usage:
// https://learn.adafruit.com/dht/overview

DHT_Unified dht(DHTPIN, DHTTYPE);

void loop() {
  // Delay between measurements.
  delay(delayMS);
  // Get temperature event and print its value.
  sensors_event_t event;
  dht.temperature().getEvent(&event);
  if (isnan(event.temperature)) {
    Serial.println(F("Error reading temperature!"));
  }
  else {
    Serial.print(F("Temperature: "));
    Serial.print(event.temperature);
    Serial.println(F("°C"));
  }
  // Get humidity event and print its value.

  dht.humidity().getEvent(&event);
  if (isnan(event.relative_humidity)) {
    Serial.println(F("Error reading humidity!"));
  }
  else {
    Serial.print(F("Humidity: "));
    Serial.print(event.relative_humidity);
    Serial.println(F("%"));
  }
}
```



C Dimostrazione Velocità del phon

Obiettivo:

Calcolare la velocità del Phon utilizzato per la Galleria Del Vento

Materiali:

- phon
- sacchetto spazzatura (103 x 64) cm
- bilancia
- dinamometro
- telefono per cronometrare

Procedimento:

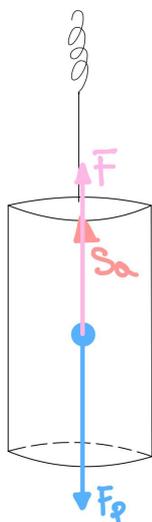
Per l'esperimento sono necessarie due persone:

La prima riempie il sacchetto con il phon sigillato con scotch/elastico/laccio emostatico;

la seconda cronometra il tutto.

Molto rapidamente, quando il sacchetto raggiunge il pieno volume, si stoppa il cronometro e chiuso ermeticamente il sacchetto si può procedere con la pesatura.

Un primo metodo è mediante l'utilizzo della bilancia, precedentemente tarata, oppure con il dinamometro, al quale bisogna appendere delicatamente il sacchetto.





Risultati e Dati:

Bilancia: $6,46 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$

Tara: $5,98 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$

Dinamometro: 0,04 N

Volume teorico: 70 L

Sacchetto compresso come cilindro :

H: 15,5 cm,

R: 15 cm

Tempo: 1,69 s

R: 2,25 cm = $2,25 \cdot 10^{-2} \text{ m}$

Considerando il volume del phon di 70 L

$$Qv = \frac{70 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}{1,69 \text{ s}} = 0,041 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\text{Area phon} = \pi (2,25 \cdot 10^{-2})^2$$

UTILIZZO EQUAZIONE DI CONTINUITÀ:

$$Qv = A \cdot v$$

$$v_{\text{phon}} = \frac{Qv}{A_{\text{phon}}} = \frac{0,041 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\pi (2,25 \cdot 10^{-2})^2} = 25,78 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

PHON = TUBO

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2$$

$$v_{2, \text{interno galleria}} = \frac{S_1 \cdot v_1}{S_2} = \frac{(2,25 \cdot 10^{-2} \text{ m})^2 \pi \cdot 25,78 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{(10 \cdot 10^{-2} \text{ m})^2 \pi} = 1,31 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$



Conclusioni:

Contando alcune incertezze ed errori dato l'esperimento compiuto con strumenti e materiali molto sensibili, l'esperimento è tuttavia accettabile, poiché una velocità di $1,31 \text{ m/s}$ dalla nostra galleria del vento è ragionevole.

Inoltre, questa soluzione è la migliore tra quelle provate, perché consente di rimanere in una scala di ordine di grandezza delle varie misure, ottimale.

Infatti, utilizzando nella misura della portata volumica, il volume compresso preso sperimentalmente o con l'utilizzo della densità dell'aria ($\frac{m}{d}$, con d approssimata a $1,3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ e non considerata quella dell'aria calda), l'errore si propaga per i calcoli delle velocità, portando a risultati poco attendibili.

GREEN ENERGY

INTRODUZIONE SULL'ENERGIA EOLICA

L'energia eolica è la cosiddetta energia del vento, ovvero un'energia cinetica, di una massa di aria in movimento.

Più precisamente, l'energia cinetica di correnti di aria che successivamente viene convertita, con l'uso di specifiche macchine eoliche, in altre forme di energia (elettrica o meccanica).

È una fonte di energia rinnovabile e a sostegno dell'economia, pulita, che non produce emissioni di alcun tipo di gas serra durante il funzionamento ma richiede una superficie di terra vasta.

È una fonte mediamente stabile di anno in anno, ma con una variazione significativa su scale di tempo più brevi: l'intermittenza del vento crea raramente problemi quando





OF THE FUTURE

essa viene utilizzata per fornire fino al 20% della domanda totale di energia elettrica, ma se la richiesta è superiore vi è necessità di particolari accorgimenti alla rete di distribuzione e una capacità di produzione convenzionale. Alcuni metodi per la gestione della potenza prodotta, come quello di possedere sistemi di stoccaggio (come stazioni di pompaggio), turbine geograficamente distribuite, fonti alternative e un'attenzione per le previsioni metereologiche.

In questa ricerca ci concentreremo sui parchi eolici, non analizzando in dettaglio le altre applicazioni dell'eolico, come ad alta quota, minieolico e microeolico.

PARCHI EOLICI E PALE EOLICHE

Un **parco eolico** è un sito designato per la generazione di energia eolica. È costituito da un gruppo di **generatori eolici** con taglie che vanno dai 600 kW fino ai 5 MW, disposte sul territorio in modo da sfruttare al meglio la risorsa eolica del sito.

Esistono tre tipologie di parchi eolici:

- l'eolico **on-shore** (su terraferma, ad almeno 3 km dalle coste) è il più diffuso,
- ❖ **near-shore** (distante meno di 3 km dalle coste) e
- ❖ **off-shore** (in mare aperto o nei laghi, a diverse miglia di distanza dalle coste)

Gli ultimi due sono meno diffusi e ubicati lì dove la presenza dei parchi eolici non costituisce intralcio ad attività preesistenti o importanti rotte di navigazione.

PALE EOLICHE

La tipologia più diffusa è la classica pala eolica **ad asse orizzontale**, composta da torre, navicella e rotore, alla cui estremità sono poste solitamente 3 pale (anche chiamate lame).



Meno diffuse sono le pale eoliche **ad asse verticale**, poco utilizzate per problemi di resistenza all'aria.

IN DETTAGLIO:

La **torre**, di altezza compresa tra i 30 e i 120 metri, innalza verso il cielo la **navicella** all'interno della quale sono riposti i vari meccanismi che consentono di convertire il vento in elettricità. L'altezza deve essere così grande perché la velocità del vento cresce con la distanza dal suolo. All'estremità della navicella è presente un **rotore** - diametro tra i 20 e i 170 metri - composto da un mozzo su cui sono fissate le pale eoliche (lunghezza tra i 10 e gli 85 metri circa).

COME FUNZIONA:

1. UN PARCO EOLICO

L'energia rinnovabile prodotta da ogni pala eolica viene convogliata al suolo attraverso cavi elettrici.

Sempre al suolo vengono inviati, mediante opportuni cavi, i segnali necessari per il controllo del corretto funzionamento dell'aerogeneratore.

Gli aerogeneratori del parco eolico sono connessi tra loro attraverso un **cavidotto interrato**. All'impianto eolico è assegnata una **cabina-stazione di consegna**: l'energia rinnovabile prodotta viene convogliata lì, per essere a sua volta immessa nella rete elettrica per i fabbisogni energetici di famiglie e aziende.



OF THE FUTURE

A differenza di quello che si potrebbe immaginare, un parco eolico occupa una porzione di suolo molto ridotta in proporzione all'energia rinnovabile che è in grado di produrre.

2. PALA EOLICA

Il rotore - attivato dal vento - trasmette la sua rotazione a un **albero veloce**, che a sua volta alimenta il generatore elettrico. I cosiddetti **sistemi di imbardata** permettono l'orientamento della navicella a seconda della direzione del vento.

Il rotore entra in funzione solo quando il vento raggiunge **una velocità superiore ai 10 Km/h**, mentre oltre i 90 Km/h l'aerogeneratore si arresta per motivi di sicurezza.

Nel dettaglio, dal rotore l'energia cinetica del vento viene quindi convertita in energia meccanica. Un **moltiplicatore di giri** trasforma la rotazione lenta delle pale (tra i 18 e i 25 giri al minuto) in una rotazione più veloce (fino a 1800 giri al minuto) in grado di far funzionare il **generatore di elettricità**. Il generatore elettrico converte l'energia meccanica ricevuta in energia elettrica. Un **trasformatore** provvederà a trasferire l'energia elettrica da un circuito a un altro (la rete elettrica in questo caso), modificando le caratteristiche.

Sulla navicella della pala eolica sono presenti vari **sistemi di controllo**, per monitorare in continuazione i parametri di funzionamento della pala eolica e consentire di produrre energia rinnovabile in totale sicurezza, massimizzando l'efficienza all'interno del parco eolico. La massima potenza estraibile da una turbina eolica (asse orizzontale) è pari al 59% della densità di potenza. (*avanti esplicitato più in dettaglio*)

Le regolazioni meccaniche sono: il controllo del passo delle pale, il controllo di imbardata. Il controllo del passo regola la coppia motrice per avere una certa velocità



OF THE FUTURE

delle pale. Il controllo di imbardata, facendo ruotare la gondola rispetto alla torre, consente di orientare la turbina nella direzione del vento.

L'ENERGIA EOLICA E I SUOI LIMITI:

La potenza del vento è una funzione della densità dell'aria, dell'area spazzata dal vento e della velocità istantanea del vento.

Questo significa che l'aumento di ognuno di questi fattori aumenta la potenza estraibile dal vento.

- **La velocità del vento:** la potenza del vento aumenta in maniera proporzionale al cubo della sua velocità. In altre parole, raddoppiando la velocità del vento, la sua potenza aumenta di otto volte.

- **La densità dell'aria:** la potenza del vento è proporzionale anche alla densità dell'aria. La densità è maggiore alle basse temperature, ad esempio in inverno, e in condizioni di alta pressione. La densità del vento influisce positivamente sulla sua potenza, in percentuali stimabili attorno al 10-20%.

- **L'area spazzata dal vento:** la potenza che il vento trasmette a un generatore eolico è direttamente proporzionale all'area spazzata, cioè al raggio delle pale. Piccoli aumenti del diametro del rotore assicurano notevoli aumenti nella resa energetica.

Il vento è per definizione una **fonte** di energia **incostante** e **aleatoria**, che rende difficile una previsione esatta dell'elettricità ricavabile da un impianto eolico.

Tuttavia, conoscendo da una parte le caratteristiche del vento in un determinato sito e dall'altra le caratteristiche tecniche del generatore eolico, è possibile arrivare a una **stima realistica** della producibilità elettrica in un intervallo di tempo, ad esempio su base annua.

L'energia estraibile dal vento: la legge di Betz



Esiste un **limite fisico** alla quantità di energia dal vento intercettabile dalle pale eoliche. Questo limite è stato individuato dalla legge di Betz e viene espresso col **Coefficiente di potenza C_p** .

La legge di Betz individua l'efficienza massima teoricamente raggiungibile da un impianto eolico, dimostrando che una turbina può estrarre non più del **59,3%** dell'energia cinetica contenuta in una massa d'aria.

- La legge di Betz esprime un concetto facilmente intuibile: se tutta l'energia del vento potesse essere assorbita dal rotore eolico trasformandosi in energia rotazionale e quindi elettrica, per assurdo il vento dovrebbe completamente "fermarsi" tra le pale della turbina.

Ma la legge di Betz individua un valore di **efficienza teorica** che, da solo, è insufficiente per comprendere le concrete potenzialità dell'energia eolica.

Dobbiamo quindi confrontarci con le **reali prestazioni** dei generatori alle diverse velocità del vento.

DIMOSTRAZIONE DELLA LEGGE DI BETZ

In generale, maggiore è l'energia cinetica che la turbina riesce ad estrarre dal vento, maggiore è la diminuzione di velocità del vento a valle della turbina. Una turbina eolica ideale rallenta il vento di un fattore $2/3$ rispetto alla velocità a monte della turbina.



Questo dato è il risultato della legge di Betz, secondo la quale si può convertire al massimo 16/27 (o il 59.3%) dell'energia cinetica del vento in energia meccanica usando una turbina eolica.

la potenza P_0 della vena di fluido indisturbata è data da:

$$P_0 = \frac{1}{2} A \rho V_1^3$$

mentre quella P estraibile da un flusso eolico secondo la teoria di Betz è data dall'espressione:

$$P = \frac{1}{2} A \rho V_1^3 4a(1 - a)^2$$

Indici:

- A : area spazzata dal rotore (m²);
- ρ : densità dell'aria (Kg/m³);
- v_1 : velocità del vento a monte della turbina (m/s);
- a : fattore di interferenza, dato da: $(v_1 - v_m)/v_1$, che rappresenta la misura in cui il flusso viene rallentato a monte della turbina.

Definendo il coefficiente di potenza c_p come rapporto tra la potenza P e la potenza P_0 valutata nella vena di fluido indisturbata, si ha:

$$c_p = \frac{P}{P_0} = \frac{\frac{1}{2} A \rho V_1^3 4a(1-a)^2}{\frac{1}{2} A \rho V_1^3}$$



OF THE FUTURE

L'interferenza ottimale, ossia quella per cui si ha l'estrazione della *massima potenza*, risulta pari ad $\frac{1}{3}$. Sostituendo questo valore nell'equazione precedente, si ottiene il massimo valore del coefficiente di potenza, ossia:

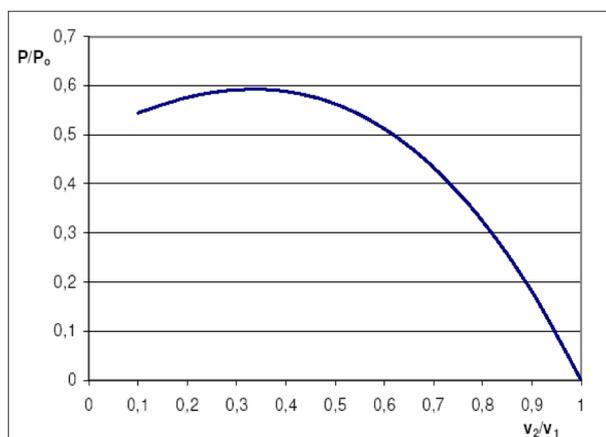
$$C_p \max \cong 0.593$$

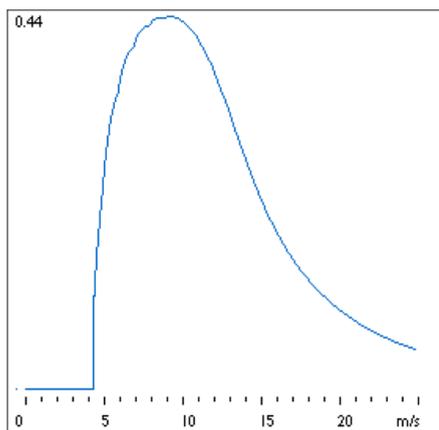
Si può dunque sottrarre al massimo il 59.3% della potenza associata alla vena fluida.

Indicando con v_2 la velocità del vento a valle del rotore, il coefficiente di potenza si può infatti scrivere in funzione del rapporto di velocità $\frac{v_2}{v_1}$:

$$C_p = \frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right] \left[1 + \frac{v_2}{v_1} \right]$$

L'andamento grafico di tale funzione è riportato nel grafico e come si vede, presenta il suo massimo per $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$: il massimo della potenza estraibile è quindi circa il 59.3% della potenza totale del vento.





- Andamento del coefficiente di potenza di una turbina eolica in funzione della velocità del vento.

Come si può osservare dal grafico sovrastante, il valore massimo che realmente può essere ottenuto si discosta di molto da quello teorico di 0.593 della legge di Betz. Il coefficiente di potenza di un aerogeneratore è infatti funzione della velocità angolare del rotore, del profilo delle pale e delle dimensioni della macchina, e solo nei casi ottimali raggiunge valori dell'ordine di $0.45 \div 0.50$.

In definitiva, noto il coefficiente di prestazione di una turbina, la potenza elettrica erogata dal generatore P_g è espressa da:

$$P_g = \eta_g \eta_m c_p \frac{1}{2} A \rho V_1^3$$

Indici:

- η_g : rendimento del generatore elettrico;
- η_m : rendimento delle componenti meccaniche;
- c_p : coefficiente di potenza;
- A : area spazzata dal rotore (m^2);
- ρ : densità dell'aria (Kg/m^3);
- v : velocità del vento a monte della turbina (m/s).



OF THE FUTURE

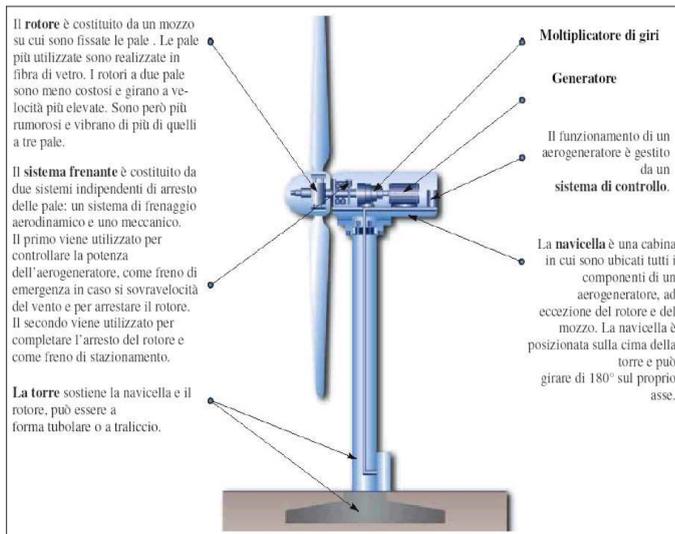


Fig. 13 - Schema costruttivo di un aerogeneratore.

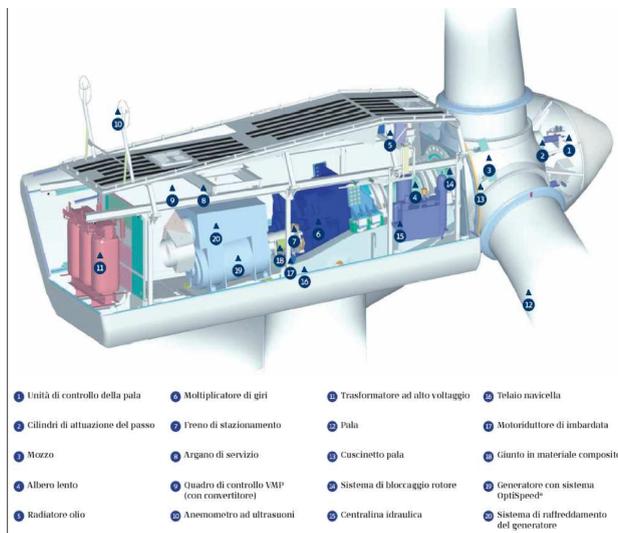


Fig. 14 - Schema costruttivo della navicella di un aerogeneratore.

IMPORTANTI ELEMENTI DI ANALISI

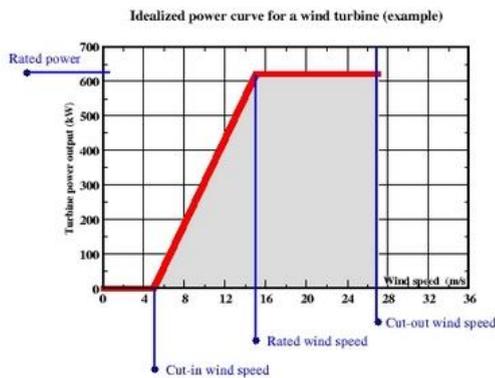


OF THE FUTURE

La curva di potenza

Ogni turbina ha una propria caratteristica curva di potenza.

La curva di potenza di una macchina eolica mostra il rapporto tra la velocità del vento e la **potenza elettrica istantanea** erogata dal generatore.



La soglia minima (*cut-in wind speed*) di velocità del vento richiesta per l'avvio della turbina è in questo caso di 5 m/s. La velocità nominale (*rated wind speed*), cioè la velocità del vento nella quale la macchina raggiunge la potenza nominale di targa, è pari a 15 m/s.

La potenza erogata rimane costante sul valore nominale fino al raggiungimento della soglia massima (*cut-out wind speed*) di velocità del vento, che nel caso di questa turbina è realisticamente localizzata in 27 m/s. Oltrepassata la soglia massima tollerata, l'aerogeneratore si mette in sicurezza e interrompe la produzione di elettricità, per evitare il rischio di danneggiamenti.

Il Capacity factor

Il *Capacity factor* (o "Fattore di utilizzo") è un indicatore che individua il rapporto tra l'energia prodotta in un intervallo di tempo e quella che avrebbe potuto essere prodotta se l'impianto avesse funzionato, nello stesso intervallo, **alla potenza nominale**.

In altre parole, il *Capacity factor* ci mostra **l'efficienza reale** di un impianto, individuando le **ore equivalenti** (solitamente su base annuale) di funzionamento alla potenza nominale.



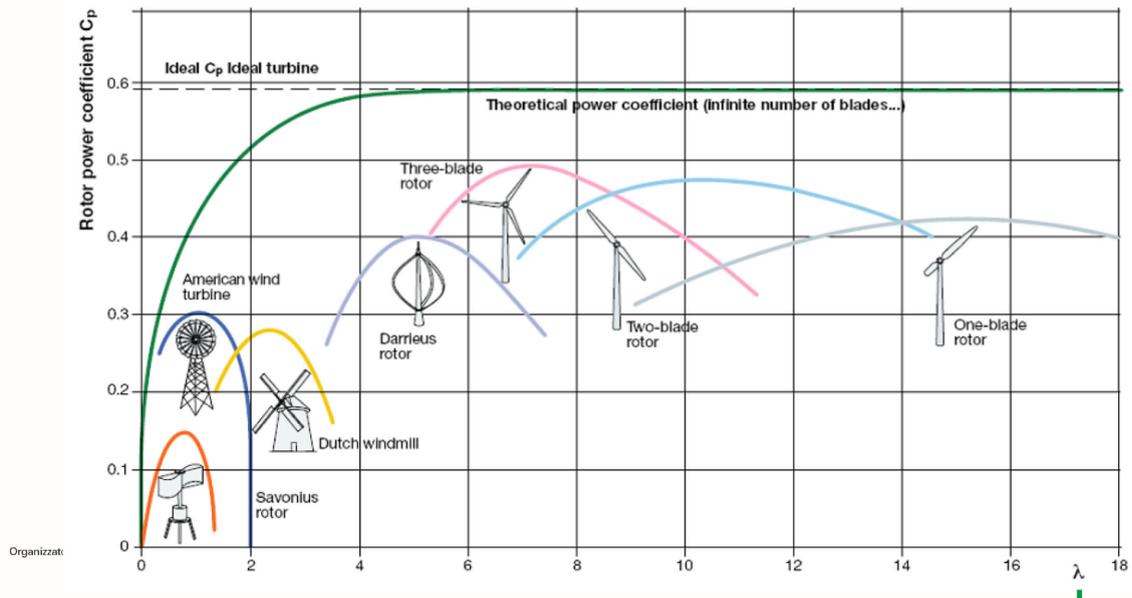
OF THE FUTURE.

In Italia l'attuale *Capacity factor* dell'intero parco eolico nazionale è del 25%, corrispondente a circa 2.200 ore annue di funzionamento degli impianti alla potenza nominale.

In terms of statistics in fact the real reachable Power coefficient is:

$$\text{Power coefficient: } C_p = \frac{\text{Real Power extracted}}{\text{Wind Power available}}$$

$$\text{Tip speed ratio } (\lambda) = \frac{U_{\text{tip}}}{V_{\text{wind}}}$$



Le turbine eoliche utilizzate sono all'interno della galleria del vento la savonius rotor e all'esterno, per questioni di grandezza, la Three-blade rotor.



OF THE FUTURE

Flow coefficient:

$$\phi = \frac{\text{Flow rate}}{\omega D^3}$$

work coefficient:

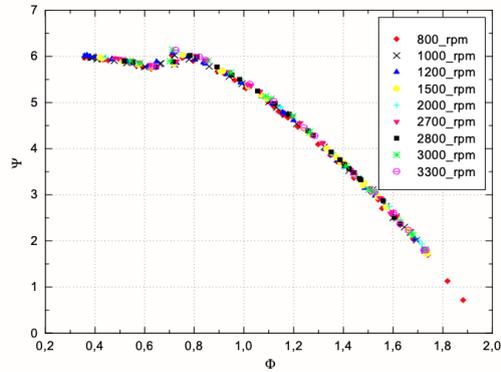
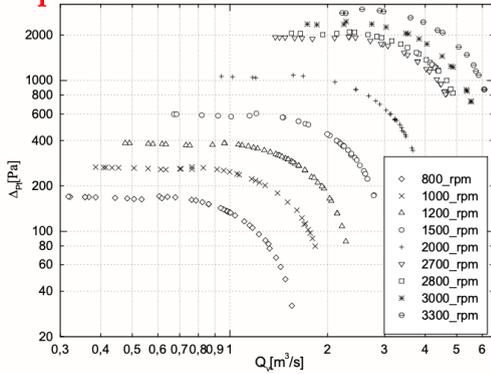
$$\lambda = \frac{\text{work}}{\omega^2 D^2}$$

head coefficient:

$$\psi = \frac{\text{head}}{\omega^2 D^2}$$

If pillars 1 & 2 are fulfilled, then: $\psi_{small} = \psi_{large}$ $\phi_{small} = \phi_{large}$

Example on a FAN:



Organizzato da



$$\eta = \psi / \lambda$$



$$\eta_{small} = \eta_{large}$$

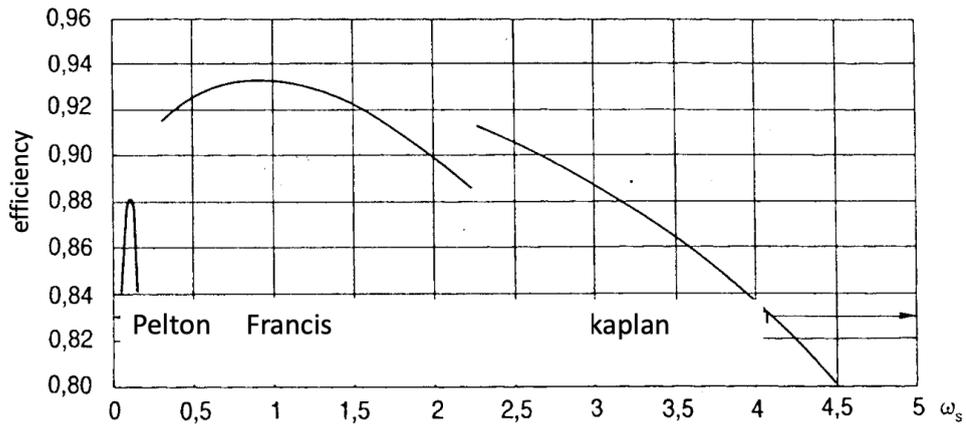
Specific speed
$$\omega_s = \omega \frac{\sqrt{Q}}{(gH)^{3/4}}$$

If pillars 1 and 2 are fulfilled

$$\omega_{s,small} = \omega_{s,large}$$

$$\eta_{small} = \eta_{large}$$

Turbines can be re-grouped in this statistical chart



Organizzato da



ESPERIMENTI GREEN ENERGY

Obiettivo:

Prendere un campione di dati significativo riguardante la pressione a valle dei rotori e l'efficienza delle pale eoliche usate.

Classificazione della tipologia e riscontro con la teoria sopra dimostrata.

Dati:

v_1 : velocità a monte turbina, all'inizio, che approssimiamo uguale a quella del phon

v_2 : velocità a valle rotore ovvero prima delle pale

R turbina bianca: 0,177 m

R turbina gialla: 0,01 m



MISURAZIONI DI PRESSIONE CON SENSORE MOBILE:

- Turbina 1, davanti
- Turbina 1, dietro
- Turbina 2, davanti

Procedimento:



La postazione utilizzata per la presa dei dati con la turbina bianca è sempre la stessa per tutta la durata degli esperimenti.

Ci sono 54 cm di distanza dalla pala eolica e il tavolo con il supporto mantenente il phon.

Il phon viene attivato alla massima velocità e leggermente inclinato per consentire al flusso di colpire le pale della turbina eolica.

Inoltre, le pale della turbina vengono piegate al massimo grado possibile (5°) perché costituiscono la migliore sistemazione.

Calcoli:

1 Turbina, asse orizzontale con 3 pale

- Approssimando la velocità iniziale a quella del Phon, il valore sarà:

$$v_{1,phon} = 25,78 \frac{m}{s}$$

- Calcolo velocità 2 mediante l'equazione di continuità:

$$Qv = A \cdot v$$

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2$$

$$v_2 = \frac{S_1 \cdot v_1}{S_2} = \frac{(2,25 \cdot 10^{-2} m)^2 \pi \cdot 25,78 \frac{m}{s}}{(0,177 m)^2 \pi} = 0,4165 \frac{m}{s}$$



$$C_p = \frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right] \left[1 + \frac{v_2}{v_1} \right] = 0,5079$$

$$C_p \% = 50,79 \approx 51 \%$$

2 Turbina, asse verticale con 4 pale

❖ I calcoli rimangono gli stessi del punto precedente

$$v_{1,phon} = 25,78 \frac{m}{s}$$

La velocità 2 è la stessa che si trova per tutta la galleria del vento, trascurando sempre eventuali attriti:

$$v_2 = \frac{S_1 \cdot v_1}{S_2} = \frac{(2,25 \cdot 10^{-2} m)^2 \pi \cdot 25,78 \frac{m}{s}}{(10 \cdot 10^{-2} m)^2 \pi} = 1,31 \frac{m}{s}$$

$$C_p = \frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right] \left[1 + \frac{v_2}{v_1} \right] = 0,5240$$

$$C_p \% = 0,5240 \approx 52 \%$$

PRESSIONE PRESE DI DATI

Turbina 1 davanti

TEMPO	Pressione relativa	Pressione assoluta
14:17:08.016	1026.95 mb	997.00 mb
14:17:18.353 -	1026.90 mb	996.95 mb



14:17:23.534	1026.92 mb	996.97 mb
14:17:28.705	1027.03 mb	997.07 mb
14:17:33.866	1026.84 mb	996.89 mb
14:17:39.010 -	1027.10 mb	997.14 mb
14:17:44.208	1027.10 mb	997.15 mb
14:17:49.353	1027.19 mb	997.23 mb

Turbina 1 dietro

TEMPO	Pressione relativa	Pressione assoluta
14:32:18.712	1027.32 mb	997.21 mb
14:32:54.031	1027.32 mb	997.36 mb
14:32:54	1027.28 mb	997.31 mb
14:33:04.391	1027.35 mb	997.39 mb
14:33:09.567	1027.31 m	997.35 mb
14:33:14.694	1027.22 mb	997.26 mb
14:33:19.893	1027.29 mb	997.32 mb
14:33:25.047	1027.31 mb	997.35 mb
14:33:30.199	1027.28 mb	997.32 mb

Turbina 2

TEMPO	Pressione Relativa	Pressione assoluta
14:47:11.253	1027.28 mb	997.48 mb
14:47:13.019	1027.28 mb	997.32 mb
14:47:18.174	1027.15 mb	997.19 mb
14:47:23.322	1027.03 mb	997.07 mb
14:47:28.488	1027.20 mb	997.24 mb

Ringraziamenti:

Si ringraziano il Professor Giuseppe Franchini dell'Università degli Studi di Bergamo per i consigli e gli approfondimenti sulla Fluidodinamica e l'ingegnere Luca Ronchi per la visita guidata alla Galleria del Vento del Politecnico di Milano.



OF THE FUTURE

Rigamonti e Pavone
Progetto Bergamo Scienza 2022: Galleria del vento



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI BERGAMO**



BERGAMOSCENZA



GVPM
POLITECNICO
MILANO 1863



POLITECNICO
MILANO 1863