

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale  
Corso di Laurea in Ingegneria dell'Energia

*Relazione per la prova finale*

**<< CONVERTITORI EOLICI PRIVI DI PALE >>**

Tutor universitario: Prof. Giuseppe Zollino

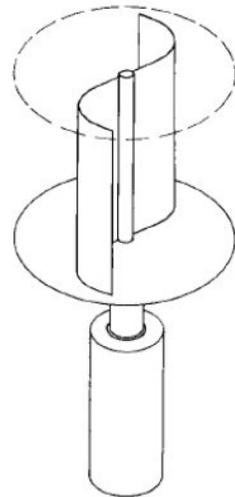
Laureando: Marco Tullio Ravazzolo

Padova, 22/09/2022

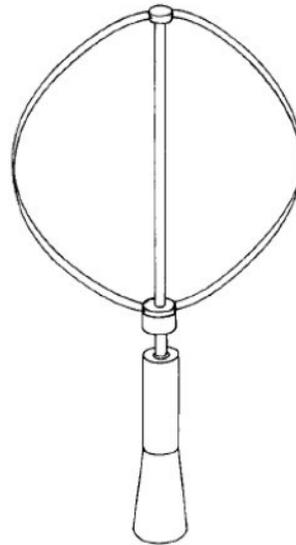
## Turbine ad asse verticale (VHWT)

Sono l'1% delle turbine in esercizio e trovano applicazione in impianti di bassa potenza

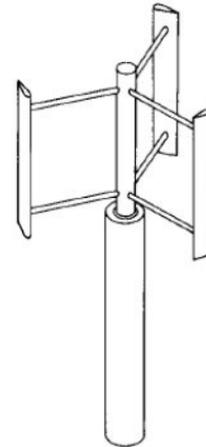
Savonius-Rotor



Darrieus-Rotor



H-Rotor



### VANTAGGI:

1. Non richiedono orientazione
2. Producono poco rumore
3. Non richiedono fondazioni profonde
4. Rispetto alle OHWT hanno un minor costo

### SVANTAGGI:

1. Coefficiente di conversione basso
2. Profilo aerodinamico fisso
3. Necessità di un sistema frenante

## Turbina ad asse orizzontale (OHWT)

Utilizzate per gli impianti di media e grande taglia

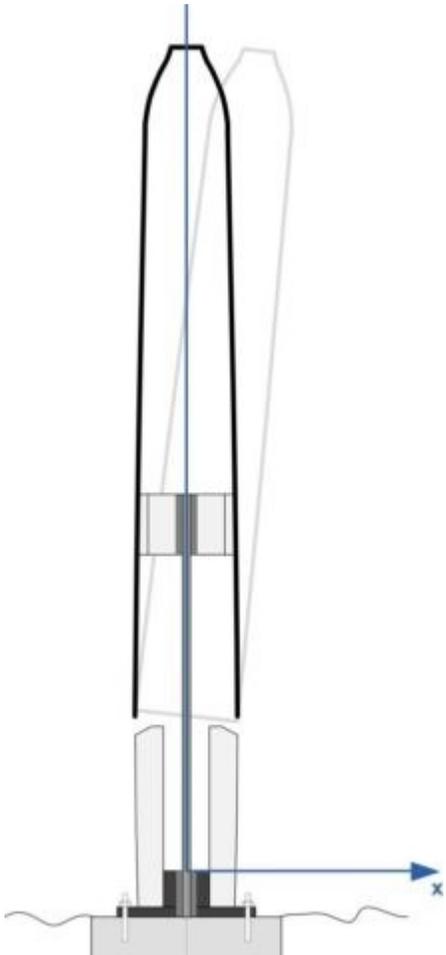


### VANTAGGI:

1. Elevata efficienza
2. Geometria variabile (variazione angolo di incidenza del vento)
3. Messa in bandiera

### SVANTAGGI:

1. Costo elevato
2. Sistema per l'orientazione elettroattuato



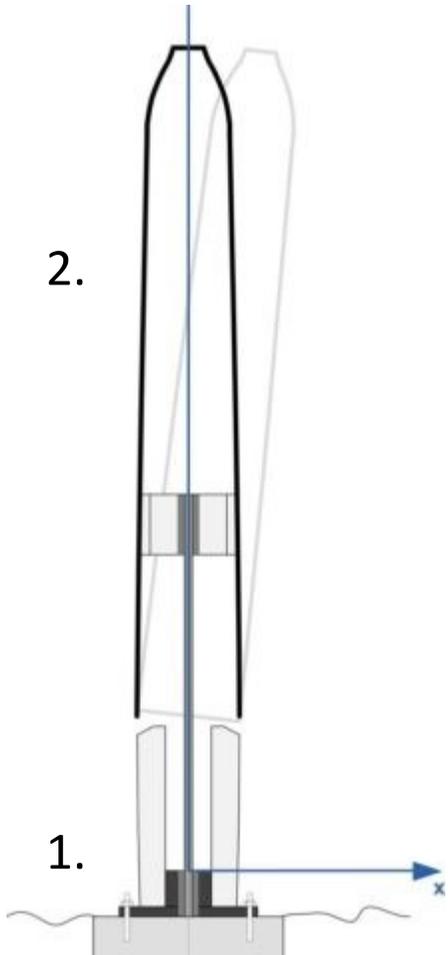
## I generatori Vortex Bladeless:

1. Trasformano il moto oscillatorio in energia elettrica
2. Il fenomeno fisico che sfruttano è il Vortex Shedding
3. Sono una tecnologia ancora in fase di sviluppo
4. Si collocano nella microgenerazione (Pot. Nom. 100 W cadauno)
5. Nell'ambito della microgenerazione sembrano avere delle peculiarità che permettono un confronto con le classiche turbine eoliche

## Alcune peculiarità:

1. Potenza nominale bassa
2. Bassi costi di produzione
3. Fondazioni ridotte
4. Assenza componenti in rotazione (manutenzione ridotta)
5. Elevata conversione con velocità del vento basse e/o con moti turbolenti

## Geometria e Materiale:



1. Base cilindrica ancorata alle fondazioni
2. Elemento simil conico (d. max pari a 40 cm in prossimità della base ) così da ottenere una risonanza uniforme
3. Costruito con fibre di vetro e carbonio in modo da ottenere leggerezza e resistenza meccanica, ideale per un macchinario soggetto a fenomeni di affaticamento meccanico

## Vortex Shedding e Conversione Energetica:

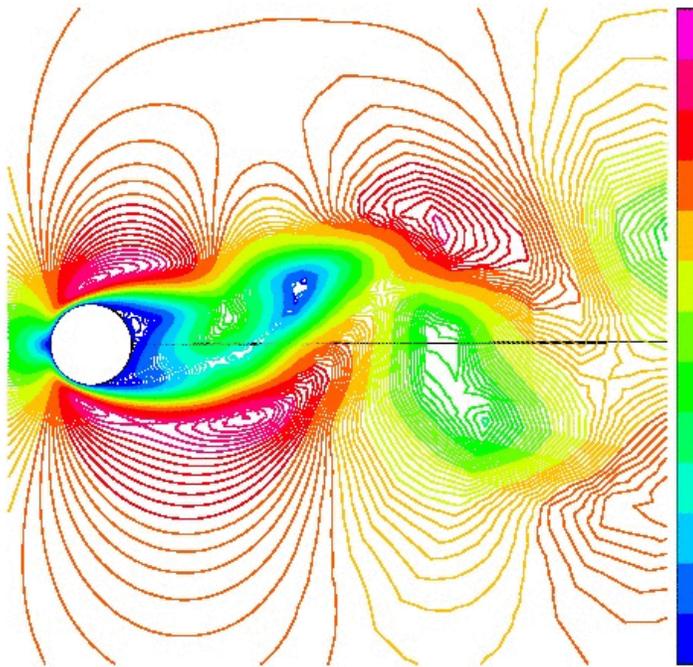
### Vortex Shedding:

Quando un fluido investe un corpo oblungo, si modifica il flusso del fluido generando a valle un pattern di vortici.

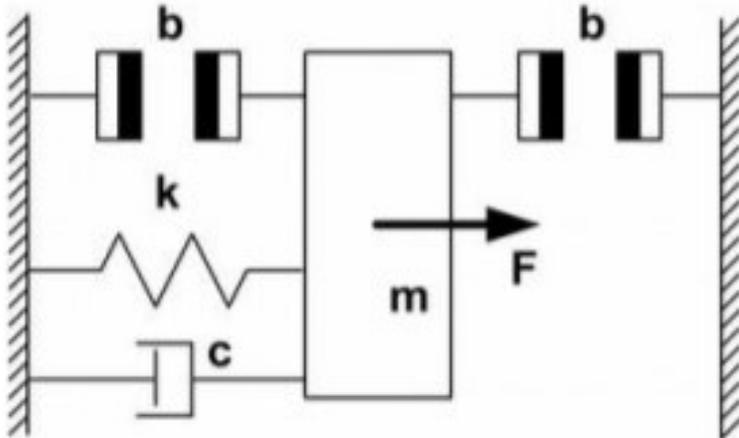
Se questo pattern ha una frequenza prossima alla frequenza di risonanza della struttura, si indurrà nel corpo un moto oscillatorio.

Per massimizzare l'effetto oscillatorio indotto, devo prevedere che la frequenza di risonanza della struttura si accordi alla frequenza del pattern di vortici.

Questo è possibile grazie ad uno smorzatore magnetico (oscillatore armonico smorzato magneticamente), che varia la rigidità strutturale del generatore in base alla velocità del vento, ottenendo così risonanza per diverse velocità.



## Vortex Shedding e Conversione Energetica:



### Vortex Shedding:

Uno smorzatore di questo tipo si ottiene attraverso due magneti permanenti, di forma cilindrica e toroidale, posti coassialmente, uno vincolato al basamento, l'altro libero di oscillare con la parte superiore del generatore.

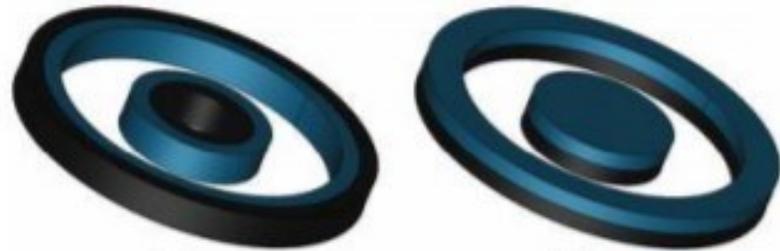
La forza magnetica generata è inversamente proporzionale al quadrato della distanza media tra i loro poli, che a sua volta dipende dall'oscillazione indotte dal vento.

Ottengo così l'equivalente di una molla con coefficiente elastico variabile.

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{(k + k'(x))}{m} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2\right)}$$

A bassa velocità il cilindro avrà elevata libertà di oscillazione, una bassa rigidità, quindi bassa frequenza di risonanza; con alta velocità del vento, l'azione dello smorzatore diventa più incisiva, aumentando la rigidità e riducendo l'oscillazione, innalzando così la frequenza di risonanza.

## Vortex Shedding e Conversione Energetica:



### Conversione Energetica:

Questo moto oscillatorio viene poi trasformato in energia elettrica attraverso un alternatore, formato da magneti permanenti nella parte oscillante del generatore e bobine statiche vincolate alla porzione inferiore. Le oscillazioni della parte superiore del generatore andranno a indurre della corrente negli avvolgimenti statorici.

Questo tipo di conversione di energia non consente di avere frequenze costanti, per cui sarà necessario convertire la corrente alternata in continua e poi in caso riconvertirla in AC con le necessarie caratteristiche imposte dalla rete (raddrizzatore e inverter).

## Caratteristiche del modello Tacoma:

1. Potenza Nominale pari a 100 W, altezza dal suolo di 2.75 m
2. Lo smorzatore magnetico consente di ottenere un generatore autoregolante
3. La geometria assialsimmetrica non richiede studi di orientazione
4. Le peculiarità permettono bassi costi di produzione e manutenzione
5. Arriva a produrre la potenza nominale con velocità ridotte del vento (cut-in a 3 m/s, cut-off a 12 m/s)
6. Basso effetto schermante tra generatori vicini (distanza minima di installazione pari alla metà dell'altezza)
7. Per quanto detto può essere valutata come soluzione eolica ad un impianto fotovoltaico oppure in un impianto misto fotovoltaico/eolico (eventuale produzione notturna; condivisione dell'elettronica di potenza)
8. Per il comportamento oscillatorio è soggetto ad affaticamento meccanico, ma il dimensionamento garantisce la vita del generatore (oscillazione non superiore a tre gradi)

## Premessa:

Andremo a confrontare le tecnologie eoliche già presenti sul mercato (HAWT e VAWT) con la tecnologia prototipale del Vortex Bladeless.

Il fatto che sia una tecnologia ancora poco sviluppata porta a fare molte ipotesi su quest'ultima che solo lo sviluppo tecnologico ci permetterà di verificare o smentire.

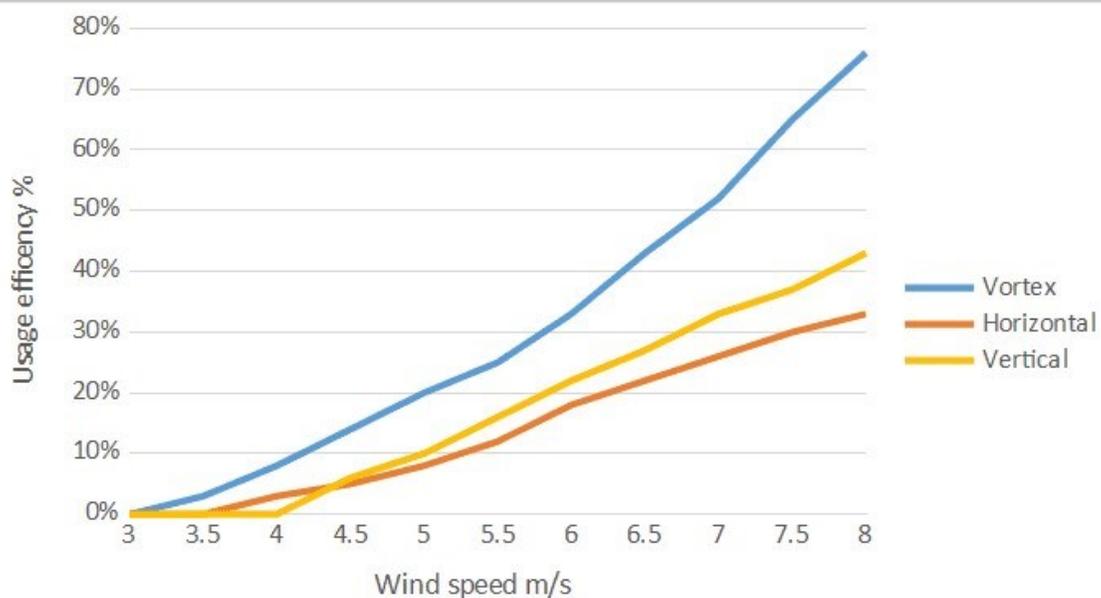
Cercheremo di fare un confronto tra un Tacoma e un generatore eolico di dimensioni e potenze paragonabili, in modo da facilitare l'analisi.

## Velocità d'Esercizio:

I Generatori Vortex Bladeless presentano un cut-in di 3 m/s e un cut-off di 11-12 m/s, con il raggiungimento della potenza nominale per velocità del vento intorno agli 8 m/s.

Le turbine eoliche hanno un cut-in di 4-4.5 m/s e un cut-off di 25 m/s, con la generazione della potenza nominale per velocità del vento superiore ai 12 m/s.

## Velocità d'Esercizio:



Possiamo vedere dai dati sperimentali ottenuti sui Tacoma e dalle curve di produzione dei Generatori Eolici che:

1. I Tacoma raggiungono la potenza nominale per velocità del vento inferiori rispetto alle turbine eoliche
2. Tra le due tecnologie non c'è competizione, in quanto dove una mostra alte efficienze, l'altra è svantaggiata

Questo ultimo punto mette in evidenza come lo sviluppo della tecnologia Tacoma potrà consentire di innalzare il Potenziale Eolico.

## Condizioni d'Esercizio:

Per il corretto esercizio di un Generatore Eolico (sia HAWT che VAWT) bisogna che:

1. Ci sia un flusso laminare della vena di vento
2. Ci sia una distanza minima tra i generatori per evitare perturbazioni della vena dopo il passaggio
3. Per i HAWT serve un sistema di orientazione (pinne direzionali o attuatori meccanici)

## Condizioni d'Esercizio:

Per un corretto esercizio di un Vortex Bladeless bisogna che:

1. La vena di vento sia laminare ma va bene anche turbolento
2. Ci sia una distanza minima tra i generatori, ma questa non è elevata come per i generatori a pale
3. Per la geometria non necessitano di un sistema di orientazione

Da quanto detto prevedo di avere installazioni con una densità di generatori superiore rispetto ai generatori tradizionali (2.) e la possibilità di installarli in ambito cittadino, grazie anche al basso impatto acustico.

## Potenze Nominali:

Wind speed (m/s)	Small HAWT	Small VAWT	Vortex Bladeless
3	0 W	0 W	3 W
6	72 W	44 W	35 W
7	104 W	66 W	60 W
8	135 W	86 W	80 W
9	160 W	105 W	93 W
Nominal speed	400 W	200 W	100 W

Confrontando i Generatori per caratteristiche geometriche simili possiamo notare che la tecnologia Vortex Bladeless abbia una potenza nominale nettamente inferiore.

Questo svantaggio può essere ridotto in quanto:

1. Per il ridotto effetto schermante posso mettere molti più generatori sulla medesima superficie
2. Per i regimi di vento in cui risulta adatta l'installazione del Vortex Bladeless posso prevedere più ore di funzionamento e quindi una maggior produzione rispetto alle altre tecnologie

## Ipotesi di Costo:

Dalle informazioni in possesso proveremo a fare una previsione del costo di generazione al kWh per una generica pala eolica e per un Tacoma. Andremo a fare delle ipotesi che solo lo sviluppo della tecnologia Vortex Bladeless potrà confermare o smentire.

	Unit	2013	2020	2030	2040	2050
<b>Technical</b>						
Net electrical power	MW	2.15	3	3.5	4	4.5
Max. capacity factor	%	40	50	60	65	65
Avg. capacity factor	%	23	30	35	40	45
Technical lifetime	years	20	22	25	25	25
<b>Costs</b>						
CAPEX ref	€ <sub>2013</sub> /kW	1400	1350	1300	1200	1100
CAPEX low	€ <sub>2013</sub> /kW	1200	1100	1000	900	800
CAPEX high	€ <sub>2013</sub> /kW	2300	2000	1800	1700	1700
Quality of CAPEX estimate		medium				
CAPEX learning rate	%	10	10	10	10	10
FOM	% CAPEX ref.	2.7	2.4	2.2	1.9	1.7
<b>Environmental</b>						
Direct GHG emissions	tCO <sub>2</sub> (eq)/GWh	0	0	0	0	0
Indirect GHG emissions	tCO <sub>2</sub> (eq)/GWh	10	9	8	7	6
Water consumed	l/kWh	0	0	0	0	0
Water withdrawn	l/kWh	0	0	0	0	0
<b>Evolution</b>						
Max. potential	GW	85	230	300	350	400

Tabella ENTRI 2014

$$ce = \frac{CAPEX\ ref}{Na} \times \frac{a(1+a)^n}{(1+a)^n - 1} + \frac{FOM}{Na}$$

**Generatore con Pale:** CAPEX=1350 €/kW      a= 5%  
FOM= 2.4% CAPEX      n= 20 anni  
Na= 2000 ore

Otteniamo un costo di generazione ce= 0.07 €/kWh

**Tacoma:** CAPEX=1100 €/kW      a= 5%  
FOM= 2.2% CAPEX      n= 20 anni  
Na= 2000 ore

Otteniamo un costo di generazione ce= 0.056 €/kWh

Come detto le ipotesi richiedono conferme, ma quanto meno possiamo intuire il potenziale di questa tecnologia.

Le reali potenzialità della tecnologia Vortex Bladeless potranno essere osservate solo nel momento in cui ci sarà l'ingresso nel mercato.

Le valutazioni fatte con le informazioni in possesso evidenziano come i Vortex Bladeless non saranno concorrenti alle tradizionali pale eoliche, per le differenti caratteristiche di produzione, e quindi potranno contribuire ad innalzare il potenziale eolico nei territori dove le velocità medie del vento non sono elevate.

Un confronto più attento deve essere fatto con la tecnologia fotovoltaica che presenta caratteristiche simili, motivo per cui potrebbe essere in competizione con i generatori Vortex Bladeless nel caso in cui l'irraggiamento medio non sia troppo elevato. Non è comunque da escludere la possibilità di impianti che abbiano fotovoltaico e Vortex Bladeless come sistema di generazione.