

Generazione eolica

CONVERSIONE AERODINAMICA

Ing. Claudio Rossi

Dip. Ingegneria Elettrica

Via risorgimento, 2

40136 Bologna

Tel. 0512093564

Email

claudio.rossi@unibo.it

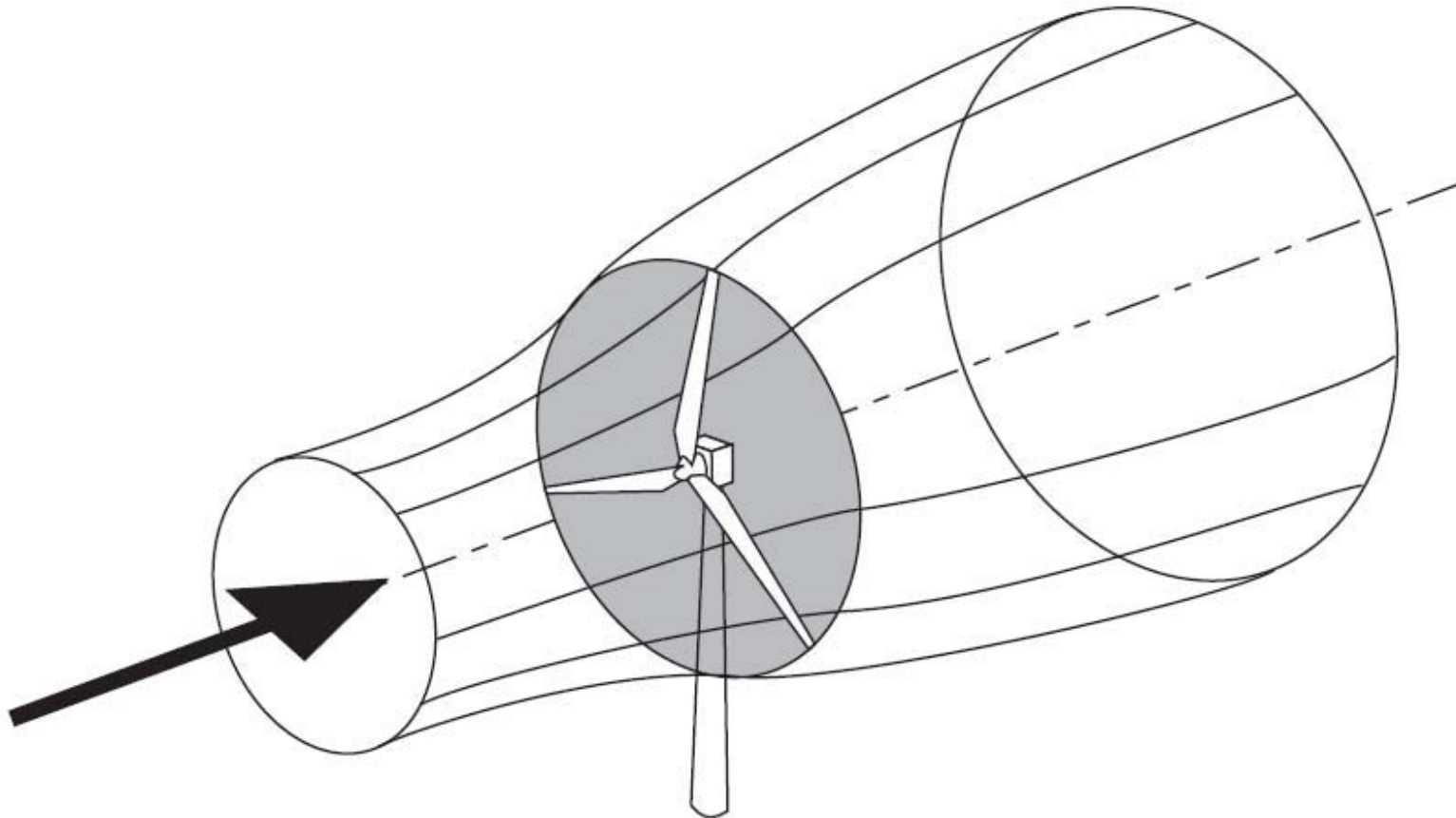




1. Contenuto

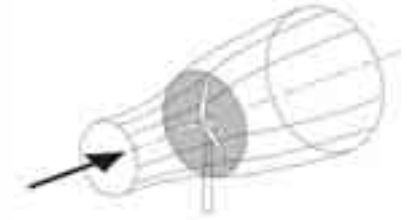
- 1. Teoria unidimensionale e legge di Betz**
- 2. Analisi aerodinamica della pala**
- 3. Controllo**

1. Teoria unidimensionale e legge di Betz



Disco attuatore e tubo di flusso

1. Teoria unidimensionale e legge di Betz



Disco attuatore e tubo di flusso

Ipotesi semplificative:

1. L'insieme delle pale è assimilabile ad un disco 'poroso' di spessore nullo
2. Il disco sottrae energia cinetica al vento, rallentando la massa d'aria che lo investe
3. La massa d'aria che investe il disco rimane separata da quella che la circonda (*tubo di flusso*)
4. La massa d'aria fluisce solamente in direzione longitudinale

1. Teoria unidimensionale e legge di Betz

Principio di conversione - *lungo il tubo di flusso*

densità dell'aria
COSTANTE



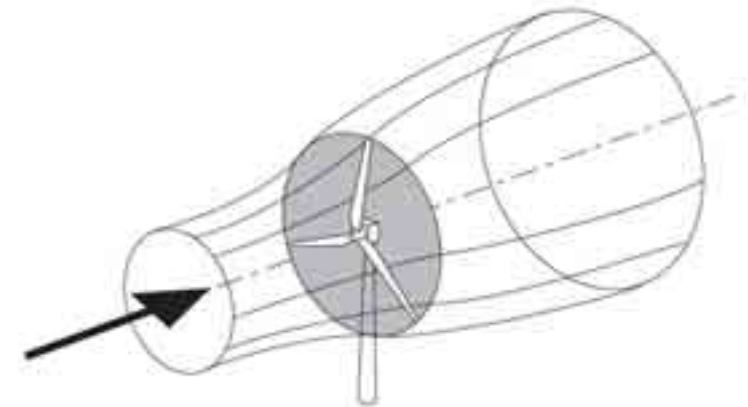
portata d'aria in ogni sezione
COSTANTE



La velocità della massa d'aria
DIMINUISCE

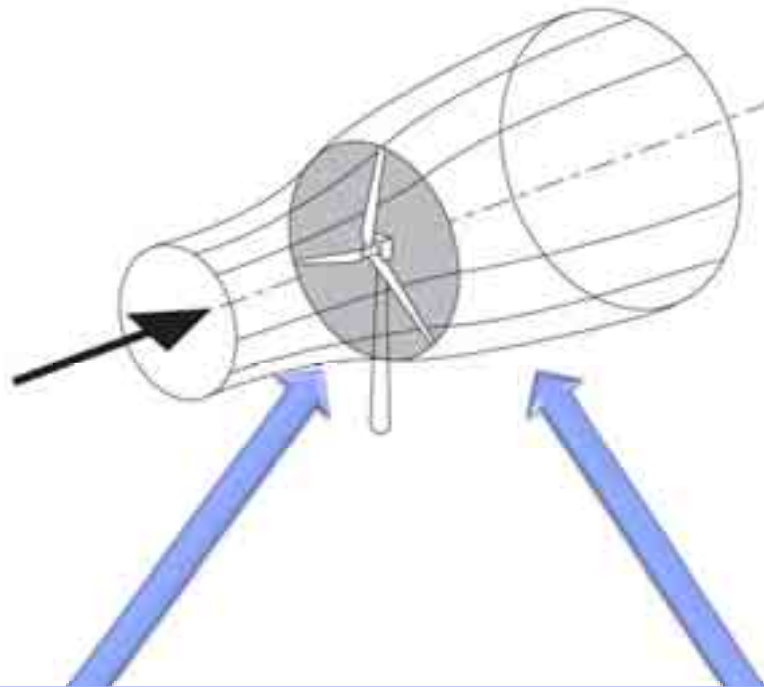


La sezione del tubo
AUMENTA



1. Teoria unidimensionale e legge di Betz

Principio di conversione – **VELOCITA'**



L'aumento della sezione del tubo di flusso determina una graduale **DIMINUIZIONE** della velocità dell'aria lungo il tubo di flusso



1. Teoria unidimensionale e legge di Betz

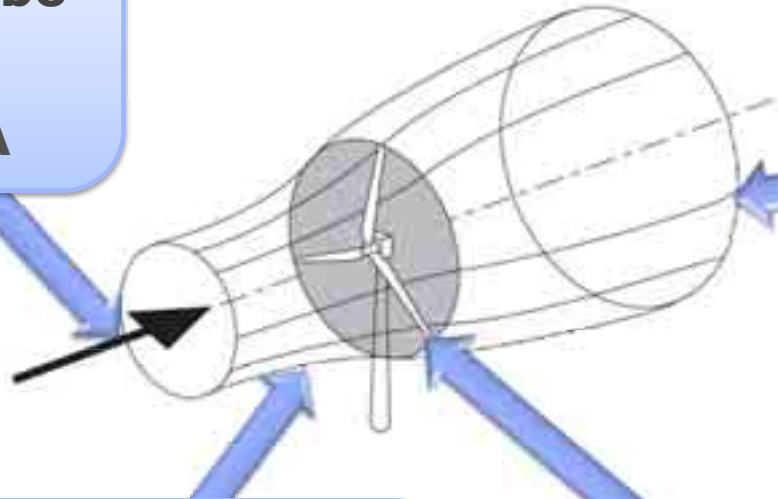
Principio di conversione - **PRESSIONE**

in ingresso al tubo

**PRESSIONE
ATMOSFERICA**

in uscita al tubo

**PRESSIONE
ATMOSFERICA**



prima del disco

la diminuzione della velocità
(senza la produzione di lavoro)
determina un

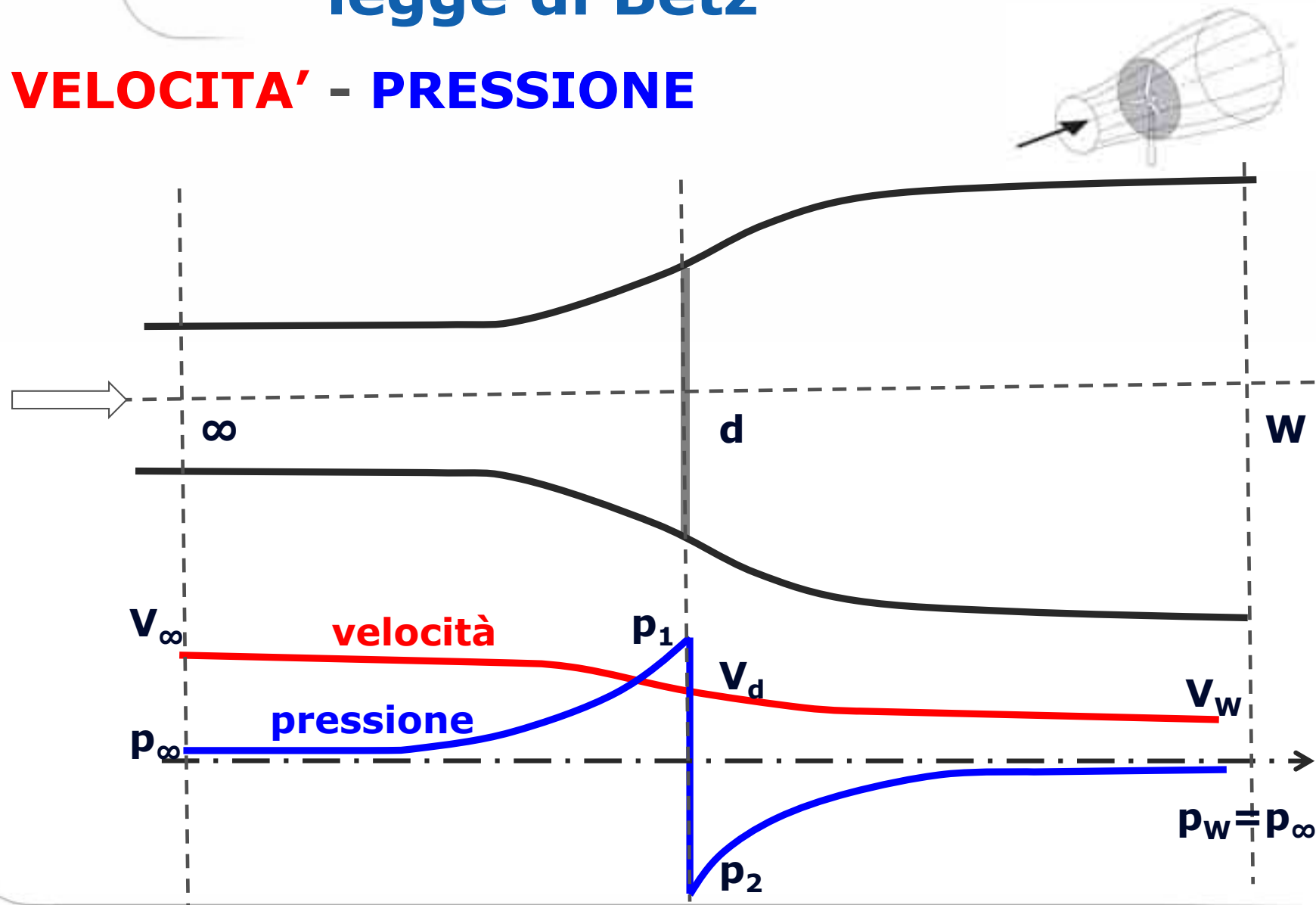
AUMENTO DI PRESSIONE

sul disco

**PRESSIONE CALA
BRUSCAMENTE**

1. Teoria unidimensionale e legge di Betz

VELOCITA' - PRESSIONE





1. Teoria unidimensionale e legge di Betz

Equazioni

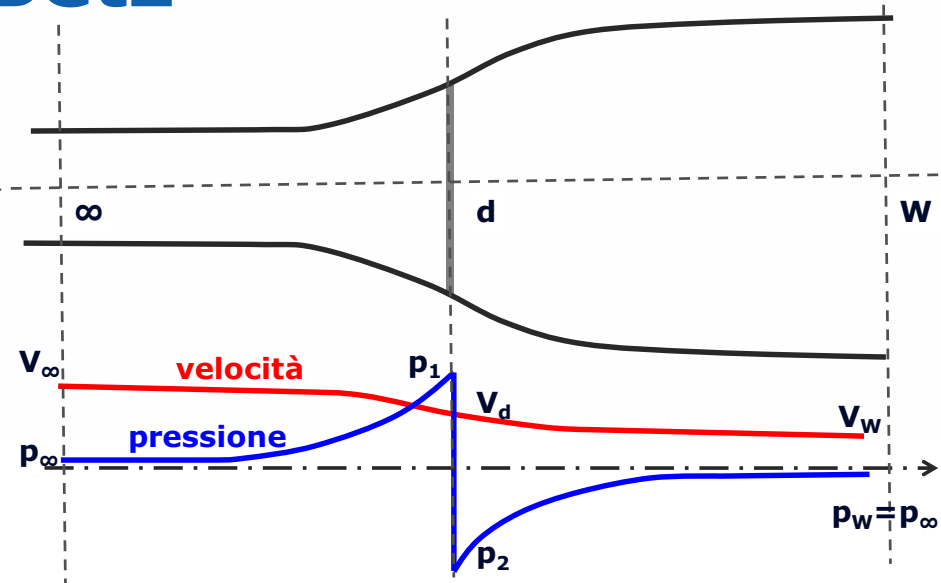
Equazione di continuità

$$\dot{m} = \rho A_{\infty} V_{\infty} = \rho A_d V_d = \rho A_w V_w$$

La variazione della quantità di moto tra ingresso e uscita

$$F = \dot{m}(V_{\infty} - V_w) \left[\frac{Kg}{s} \frac{m}{s} \right] = [N]$$

è pari alla spinta assiale F sul disco



ρ : densità dell'aria
 $\rho = 1.22 \text{ [kg/m}^3\text{]}$

A_{∞}, A_d, A_w : sezioni del tubo di flusso $[\text{m}^2]$

\dot{m} : portata in massa $[\text{kg/s}]$

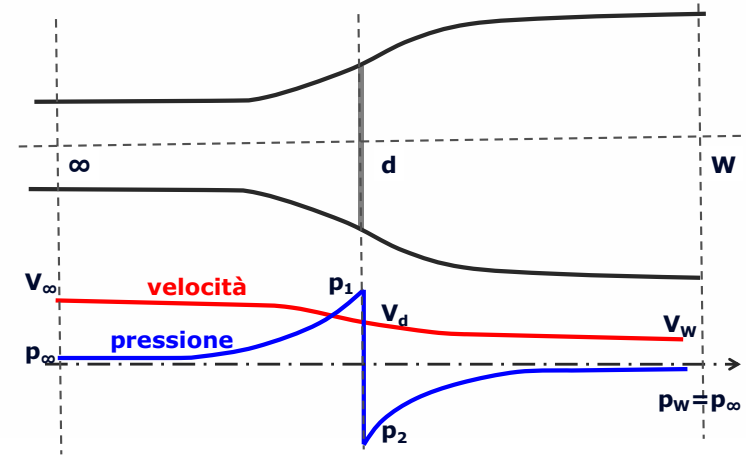
F : spinta assiale sul disco $[\text{N}]$



1. Teoria unidimensionale e legge di Betz

Equazioni

La spinta assiale può essere espressa come variazione di pressione sulle facce del disco



$$F_R = \dot{m}(V_\infty - V_W) = (p_1 - p_2)A_d$$

$$a = \frac{V_\infty - V_d}{V_\infty}$$

$$V_d = V_\infty(1 - a)$$

$$\dot{m} = \rho A_d V_d$$

$$F_R = (p_1 - p_2)A_d = (V_\infty - V_W)\rho A_d V_\infty(1 - a)$$

$$p_1 - p_2 = (V_\infty - V_W)\rho V_\infty(1 - a)$$

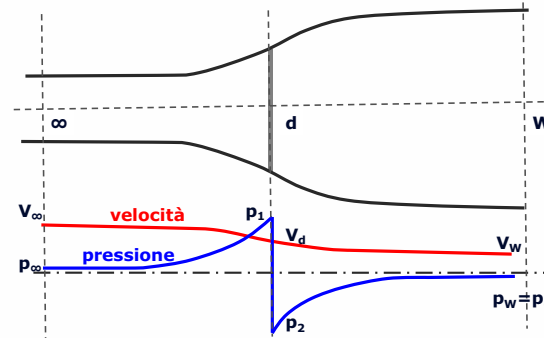
a: fattore di interferenza. Rappresenta la riduzione di velocità davanti al disco (*a*: inflow factor)



1. Teoria unidimensionale e legge di Betz

Equazioni

$$\frac{1}{2} \rho_{\infty} V_{\infty}^2 + \rho_{\infty} g h_{\infty} + p_{atm} = \frac{1}{2} \rho_d V_d^2 + \rho_d g h_d + (p_{atm} + p_1)$$



$$\frac{1}{2} \rho_d V_d^2 + \rho_d g h_d + (p_{atm} + p_2) = \frac{1}{2} \rho_w V_w^2 + \rho_w g h_w + p_{atm}$$

Dall'equazione di Bernoulli

$$\frac{1}{2} \rho (V_{\infty}^2 - V_d^2) = p_1$$

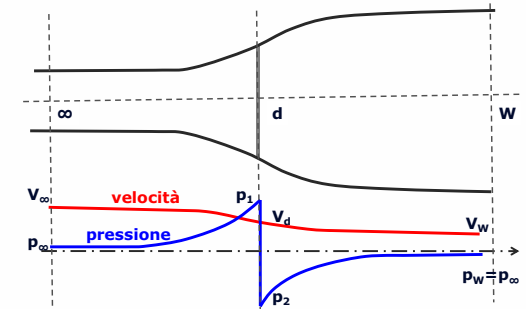
$$\frac{1}{2} \rho (V_w^2 - V_d^2) = p_2$$

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho (V_{\infty}^2 - V_w^2)$$



1. Teoria unidimensionale e legge di Betz

Equazioni



Uguagliando la differenza di pressione $(p_1 - p_2)$ calcolata dalla conservazione della quantità di moto e da Bernoulli:

$$\frac{1}{2} \rho (V_\infty^2 - V_w^2) = (V_\infty - V_w) \rho V_\infty (1 - a)$$

$$V_w = V_\infty (1 - 2a)$$

La riduzione della velocità dell'aria avviene quindi:

per metà davanti al disco

$$V_d = V_\infty (1 - a)$$

e per metà dietro al disco

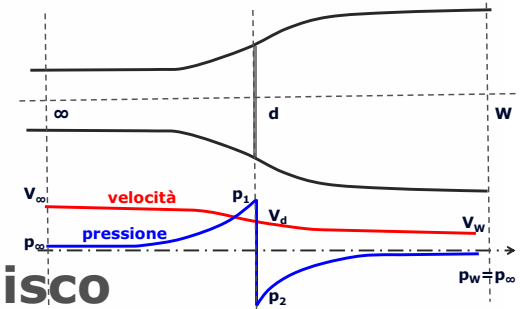
$$V_w = V_\infty (1 - 2a)$$



1. Teoria unidimensionale e legge di Betz

Equazioni

Calcolo della potenza estratta P_R al vento dal disco



$$P_R = F_R V_d$$

$$P_R = (V_\infty - V_W) \rho A_d V_\infty (1 - a) V_d$$

$$P_R = 2 \rho A_d V_\infty^3 a (1 - a)^2$$

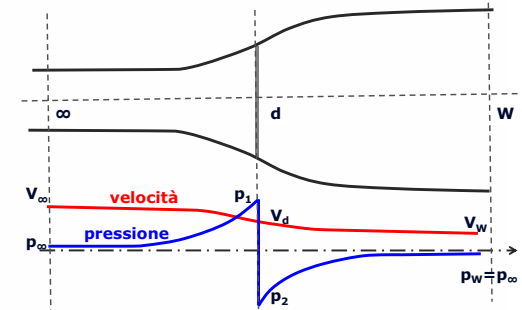
La potenza estratta dipende:

- dal cubo della velocità del vento
- dal fattore di interferenza a (rallentamento del vento)



1. Teoria unidimensionale e legge di Betz

Equazioni



Calcolo della potenza P_d disponibile dal vento

$$P_{disp} = \frac{1}{2} \dot{m} V_{\infty}^2 = \frac{1}{2} \rho A_{\infty} V_{\infty} V_{\infty}^2 = \frac{1}{2} \rho A_{\infty} V_{\infty}^3 \quad \left[\frac{\text{kg m}^2}{\text{s s}^2} \right] = \left[\text{N} \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] = [\text{W}]$$

Visto che non si conosce A_{∞} , per convenzione ci si riferisce ad A_d

$$P_d = \frac{1}{2} \rho A_d V_{\infty}^3$$



1. Teoria unidimensionale e legge di Betz

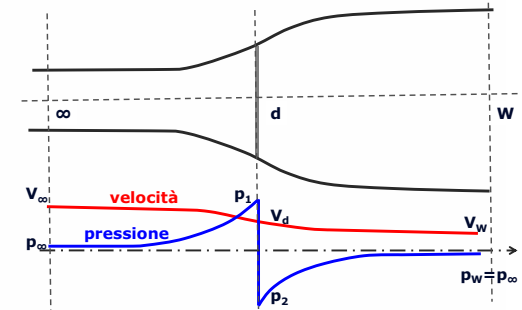
Equazioni

Calcolo del coefficiente di potenza C_P

$$C_P = \frac{P_R}{P_d} = \frac{2\rho A_d V_\infty^3 a(1-a)^2}{\frac{1}{2}\rho A_d V_\infty^3}$$



$$C_P = a4(1-a)^2$$



Calcolo del massimo di C_P

$$\frac{dC_P}{da} = 0$$

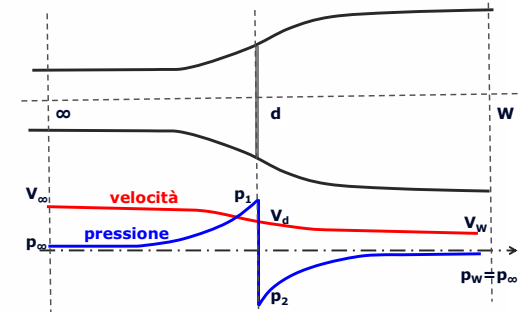
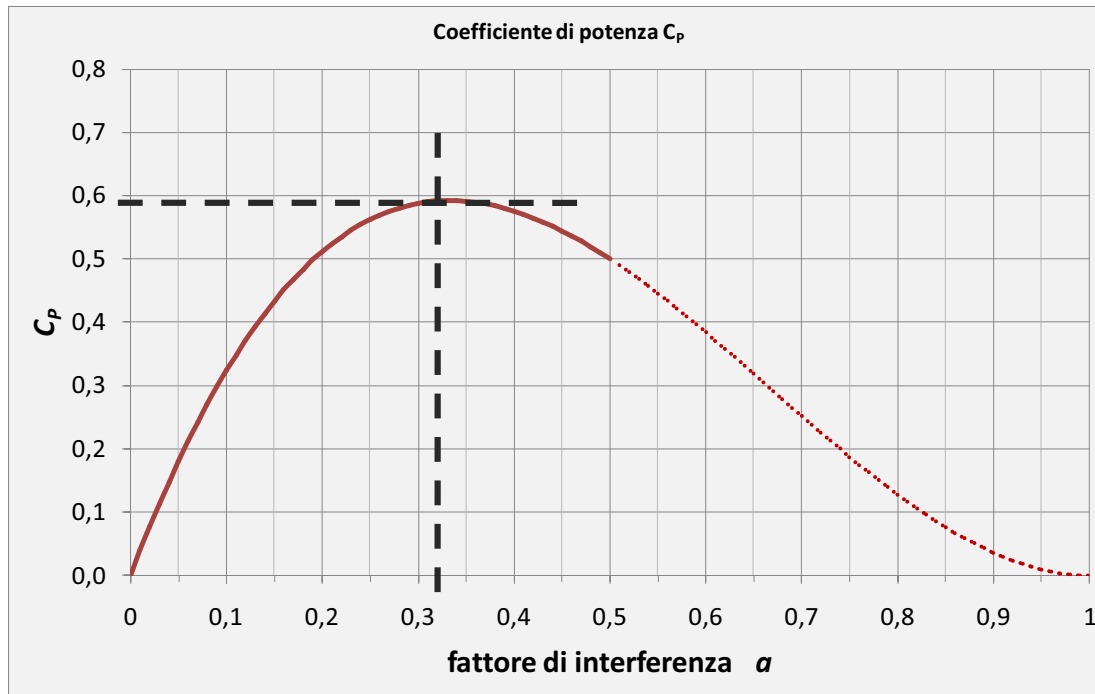
$$a|_{C_P^{MAX}} = \frac{1}{3}$$

$$C_P^{MAX} = \frac{16}{27} \cong 0.593$$



1. Teoria unidimensionale e legge di Betz

Coefficiente di potenza C_p



Attenzione!

$$V_W = V_\infty (1 - 2a)$$

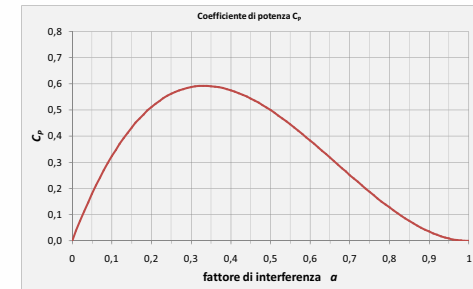
- $a > 0.5$ non ha senso fisico. Poiché significherebbe aria con velocità negativa nella sezione d'uscita.



1. Teoria unidimensionale e legge di Betz

Limite di Betz

$$C_P^{MAX} \cong 0.59$$



Significato di C_P^{MAX}

1. La velocità dell'aria in uscita dal tubo deve essere non nulla altrimenti non vi è trasporto di materia (*effetto muro*)
2. Solo per $a=1/3$ si massimizza l'estrazione di potenza. Per questo valore si ha che la velocità d'uscita vale

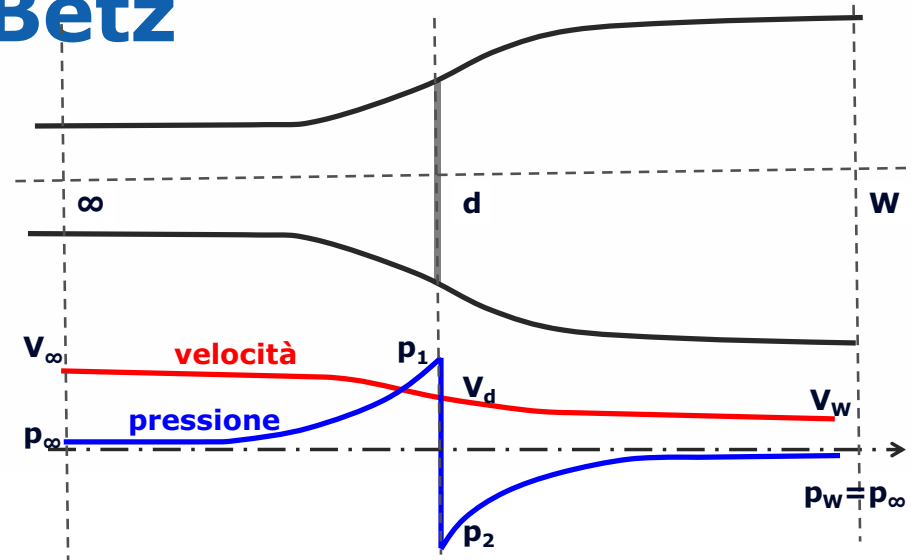
$$V_W \Big|_{C_P^{MAX}} = V_\infty \left(1 - 2 \frac{1}{3} \right) \Rightarrow V_W \Big|_{C_P^{MAX}} = \frac{V_\infty}{3}$$



1. Teoria unidimensionale e legge di Betz

Limite di Betz

$$C_P^{MAX} \cong 0.59$$



Significato di C_P^{MAX}

3. Il tubo di flusso si espande davanti al disco e quindi la sezione di vento utilizzato A_∞ alla velocità massima V_∞ è inferiore a quella che raggiunge il disco A_d



1. Teoria unidimensionale e legge di Betz

Forza di spinta assiale

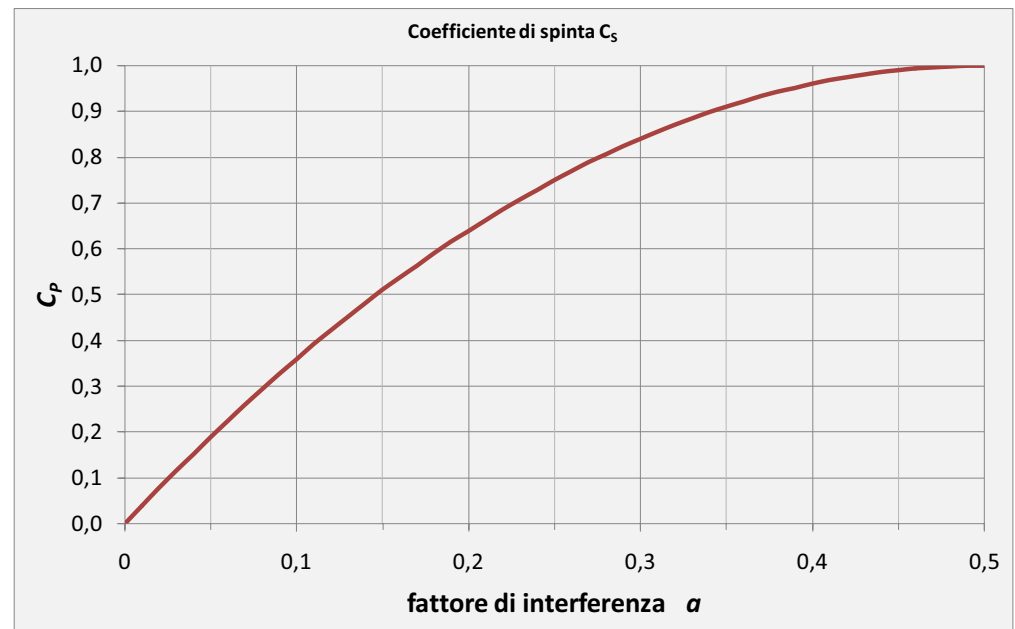
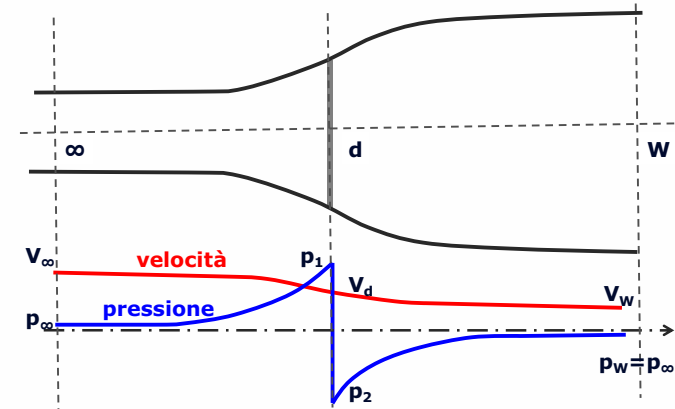
Calcolo del coefficiente di spinta C_S

F_R : forza esercitata sul disco

F_d : forza disponibile nel vento

$$C_S = \frac{F_R}{F_d} = \frac{P_R/V_d}{P_d/V_\infty} = \frac{2\rho A_d V_\infty^2 a(1-a)}{\frac{1}{2}\rho A_d V_\infty^2}$$

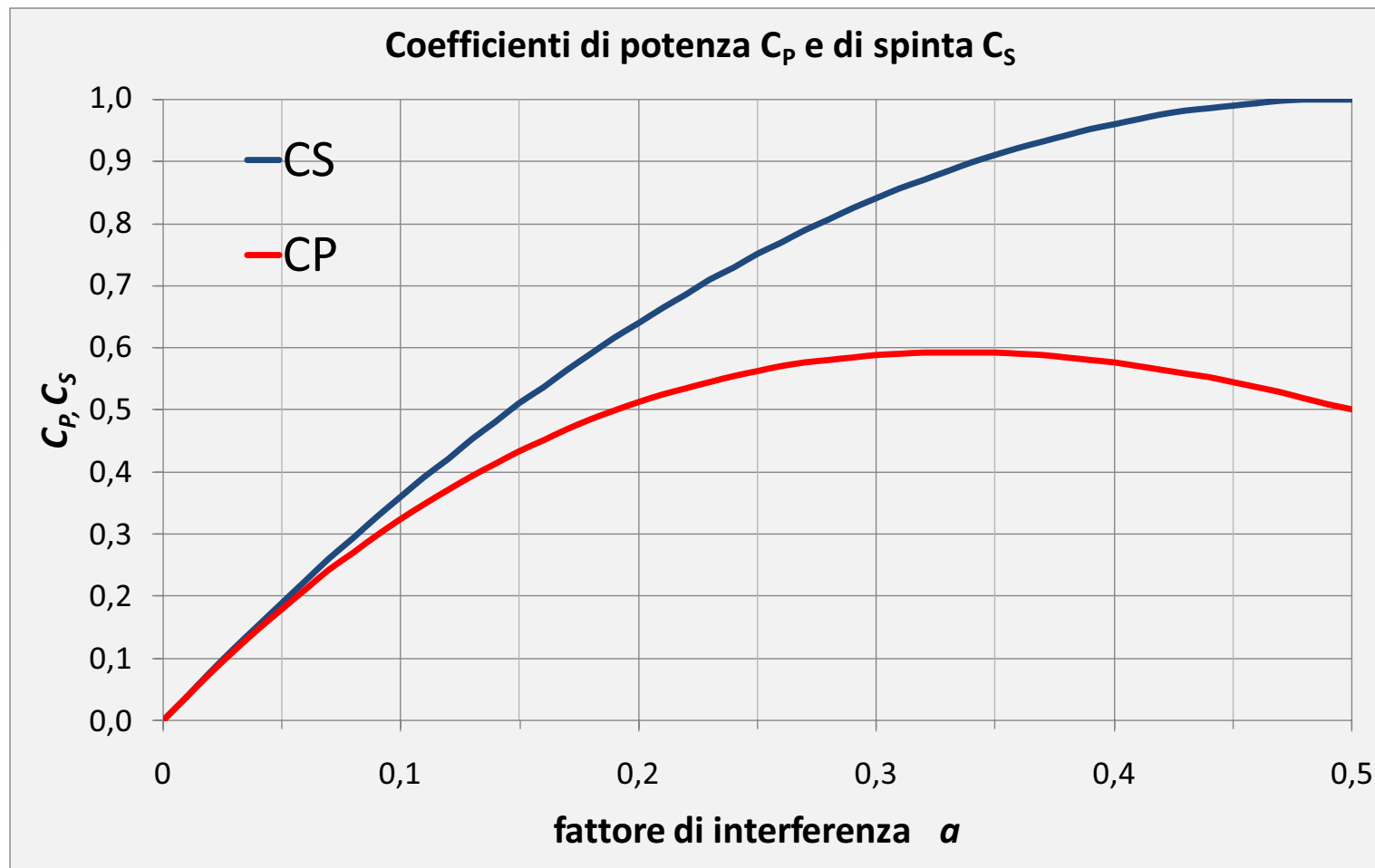
$$C_S = 4a(1-a)$$





1. Teoria unidimensionale e legge di Betz

Legge di Betz





2. Aerodinamica della pala

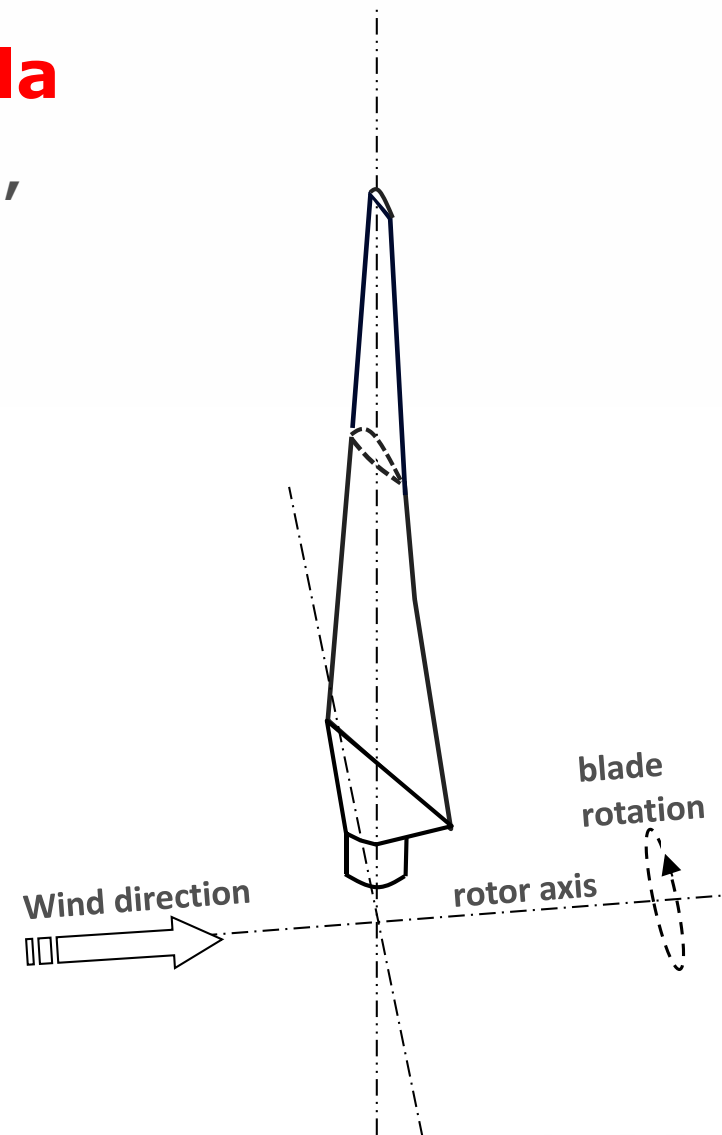
Flussi d'aria agenti sulla pala

Sulla pala agiscono due flussi d'aria, che dipendono da:

1. vento
2. rotazione della pala

1. vento

- L'aria entra nel tubo di flusso solo con una componente assiale di velocità
- Per effetto della rotazione della pala si determina anche una componente di vento tangenziale





2. Aerodinamica della pala

Flussi d'aria agenti sulla pala

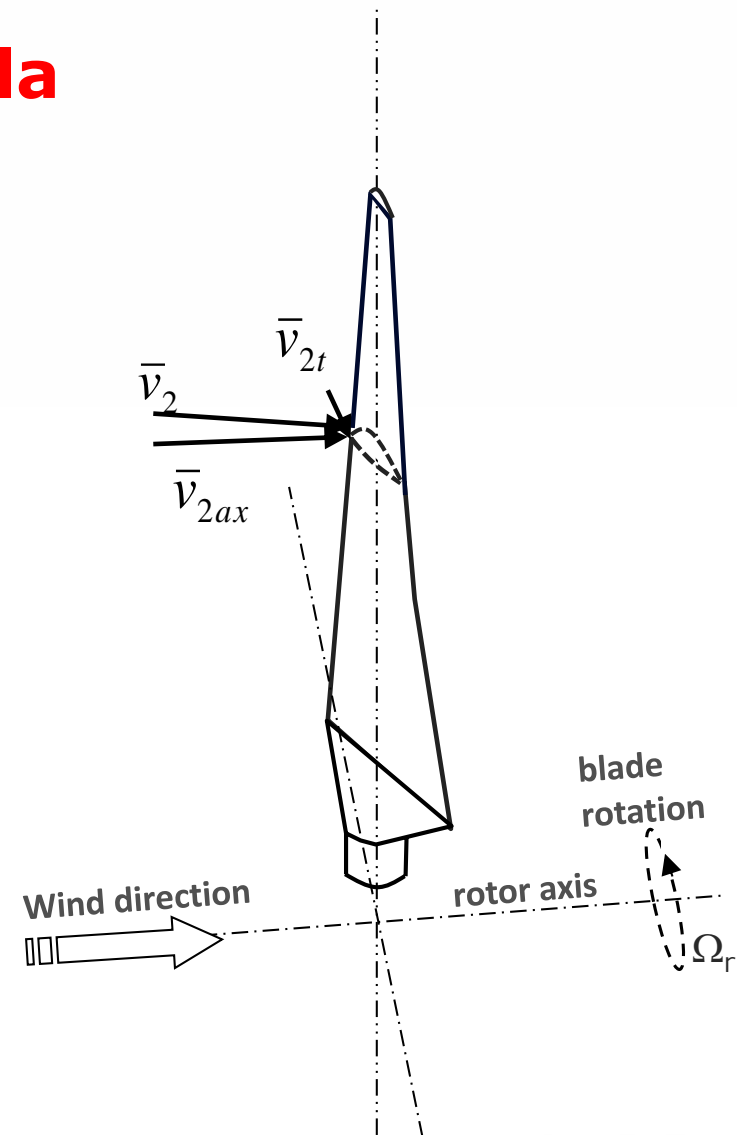
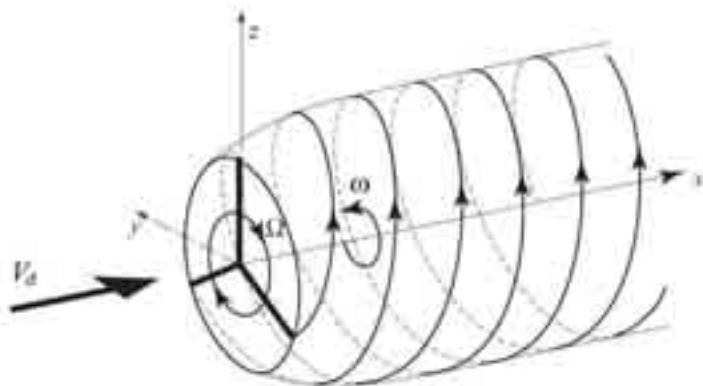
1. Componente di vento alla turbina

$$\bar{v}_2 = \bar{v}_{2ax} + \bar{v}_{2t}$$

\bar{v}_2 velocità risultante

\bar{v}_{2ax} componente assiale

\bar{v}_{2t} componente tangenziale





2. Aerodinamica della pala

Flussi d'aria agenti sulla pala

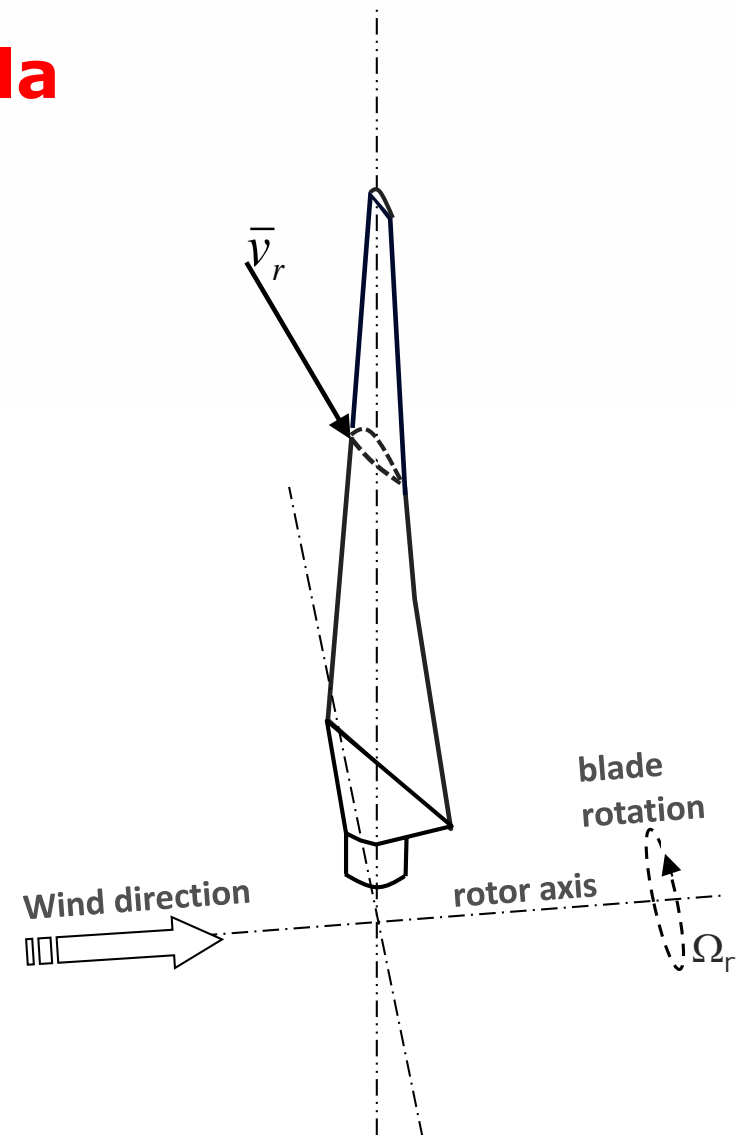
2. Componente di rotazione

$$\bar{v}_r = -\bar{\Omega}_r \times r$$

\bar{v}_r componente di rotazione [m/s]

$\bar{\Omega}_r$ velocità di rotazione [rad/s]

r raggio della sezione [m]





2. Aerodinamica della pala

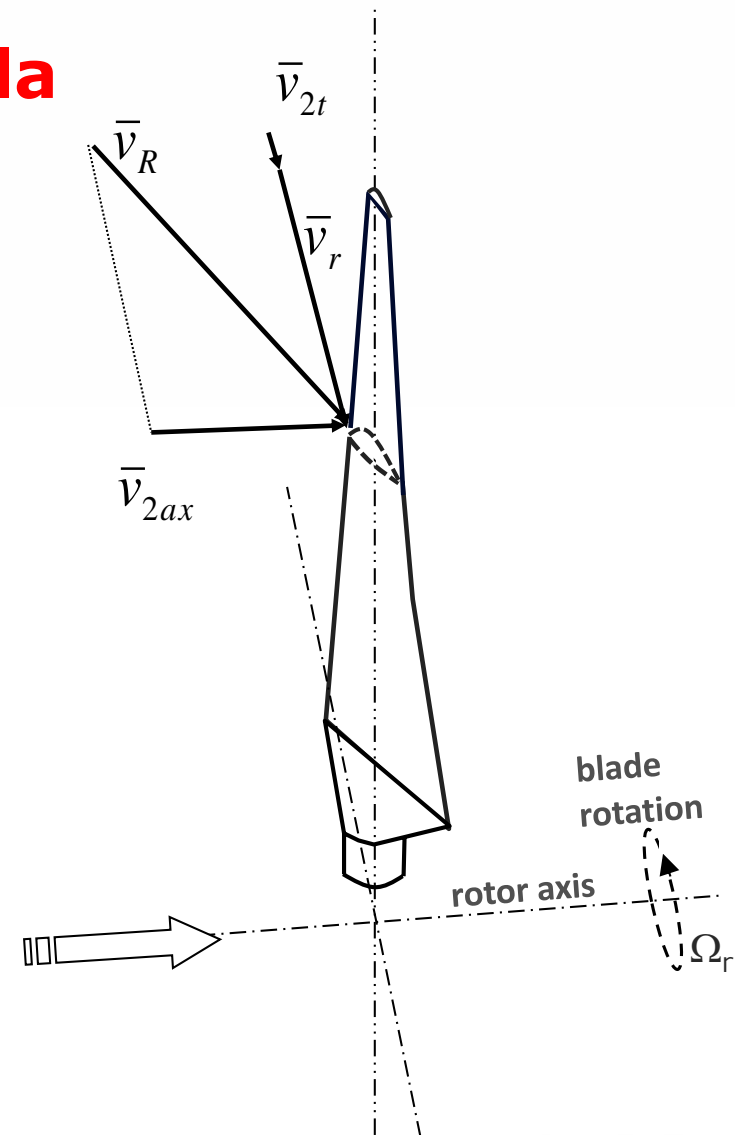
Flussi d'aria agenti sulla pala

Componente risultante

$$\bar{v}_R = \bar{v}_2 + \bar{v}_r$$

\bar{v}_R componente risultante [m/s]

$$v_R = \sqrt{v_{2ax}^2 + (v_{2t} + \Omega_R r)^2}$$





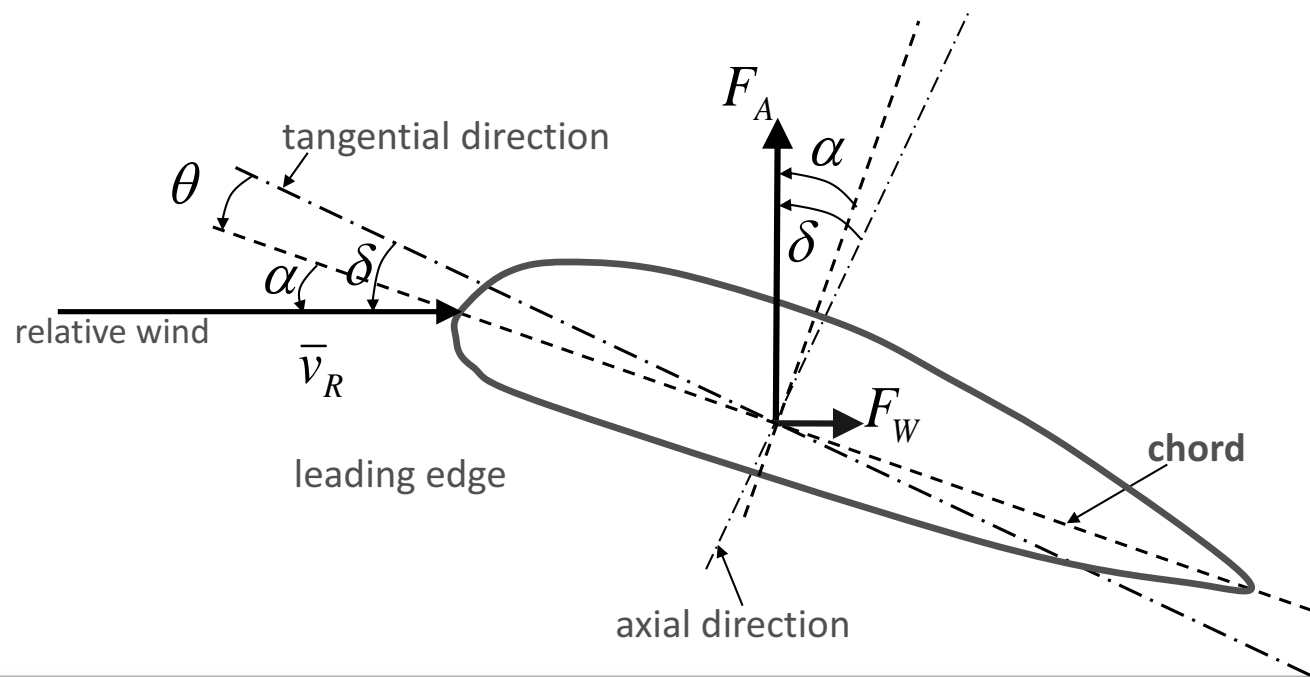
2. Aerodinamica della pala

Forze agenti sulla pala

Effetto risultante di un flusso d'aria su un profilo alare

\bar{F}_A : forza di sollevamento (PORTANZA, perpendicolare al vento relativo)

\bar{F}_W : forza di trascinamento (RESISTENZA, in direzione del vento relativo)





2. Aerodinamica della pala

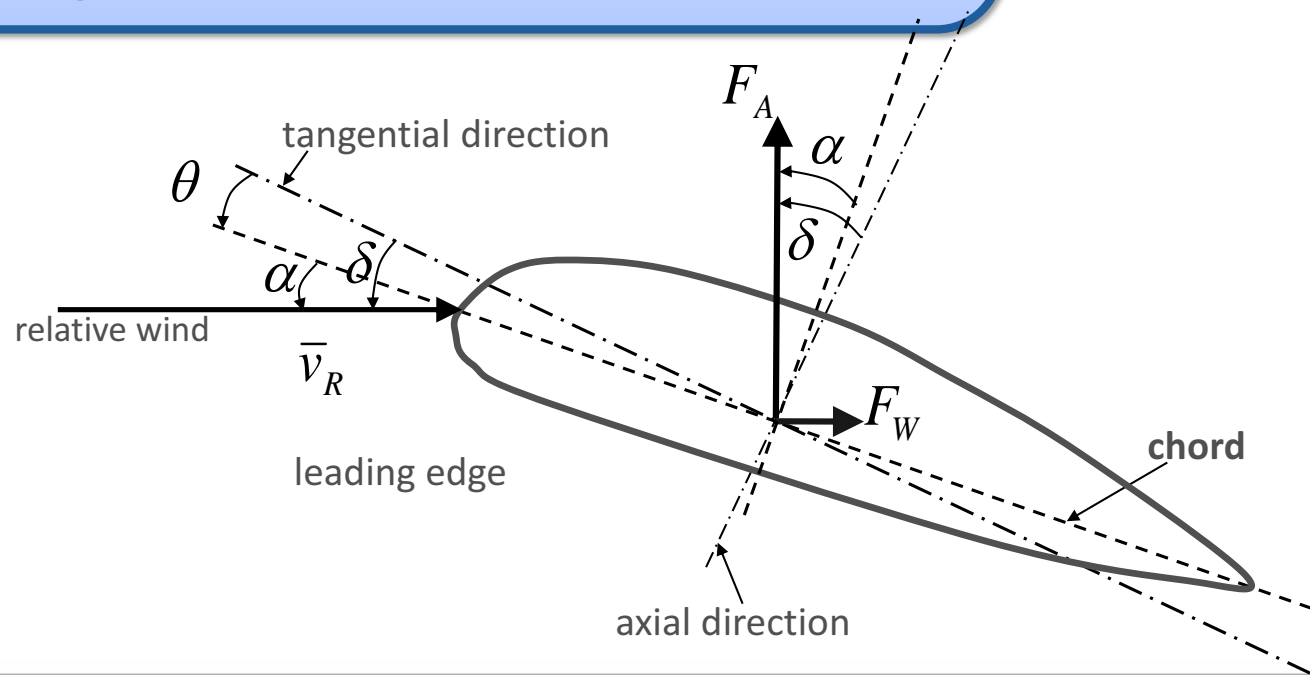
Forze agenti sulla pala

Definizione degli angoli

α angolo di *attacco o incidenza*

δ angolo di *costruzione*

θ angolo di *calettamento*





2. Aerodinamica della pala

Forze agenti sulla pala

Effetto risultante di un flusso d'aria su un profilo alare

\vec{F}_W : forza di trascinamento (nella stessa direzione del vento relativo)

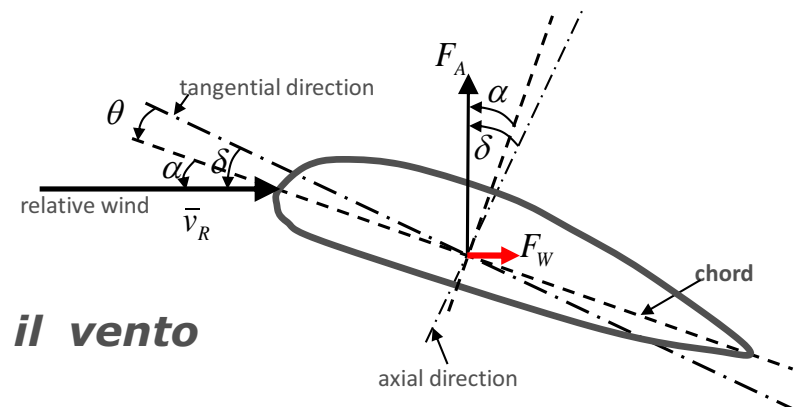
Si consideri un segmento di pala di spessore d_r ,

$$dF_W = \frac{\rho}{2} t_B v_r^2 c_W(\alpha) dr$$

t_B spessore della pala

$c_W(\alpha)$ coefficiente di trascinamento (*drag*)

α angolo tra la corda del profilo ed il vento relativo al bordo d'attacco



RESISTENZA: in un aereo è la forza che si oppone al movimento dell'ala in direzione contraria all'aria.....



2. Aerodinamica della pala

Forze agenti sulla pala

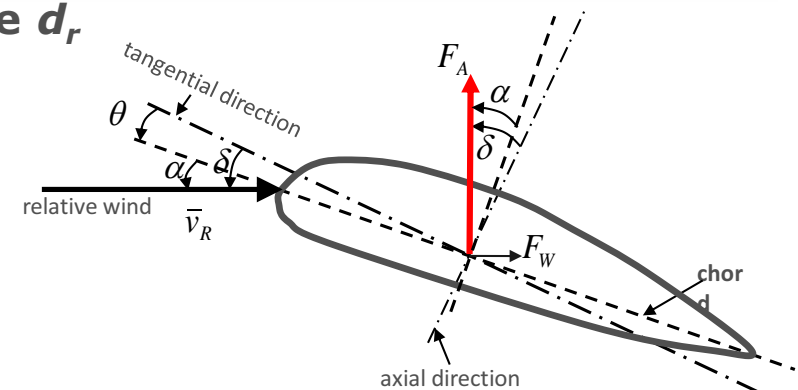
Effetto risultante di un flusso d'aria su un profilo alare

\vec{F}_A : forza di sollevamento (perpendicolare al vento relativo)

Si consideri un segmento di pala di spessore d_r

$$dF_A = \frac{\rho}{2} t_B v_r^2 c_A(\alpha) dr$$

$c_W(\alpha)$ coefficiente di sollevamento (*lift*)



PORTANZA: in un aereo F_A è la forza che solleva l'ala.....

Come in ogni altro profilo alare, maggiore è la forza di sollevamento F_A rispetto alla forza di trascinamento F_W e migliore è l'efficienza E dell'ala ($E=c_A/c_W$)

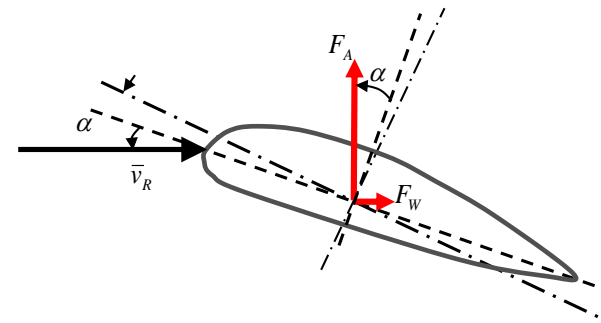
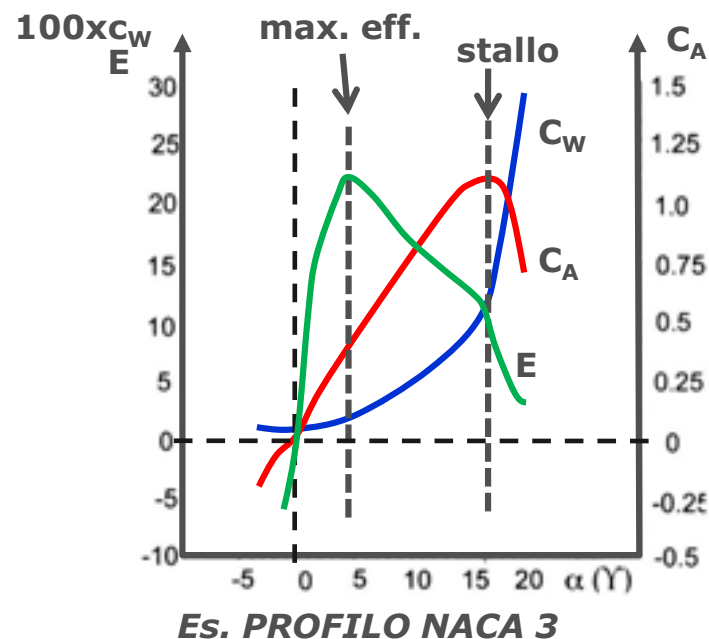


2. Aerodinamica della pala

Forze agenti sulla pala

Effetto risultante di un flusso d'aria su un profilo alare

Mentre la PORTANZA \bar{F}_A può essere rivolta da una parte o dall'altra in funzione dell'angolo di incidenza α , la RESISTENZA \bar{F}_W ha sempre il verso di \bar{v}_R .



MAX. EFF: condizione di funzionamento in cui l'efficienza E del profilo alare è massima

STALLO: condizione di funzionamento in cui l'efficienza del profilo alare si riduce di molto ed il comportamento aerodinamico diventa instabile.



2. Aerodinamica della pala

Forze agenti sulla pala

Moto laminare



© 1998 www.WINDPOWER.dk

STALLO



© 1998 www.WINDPOWER.dk



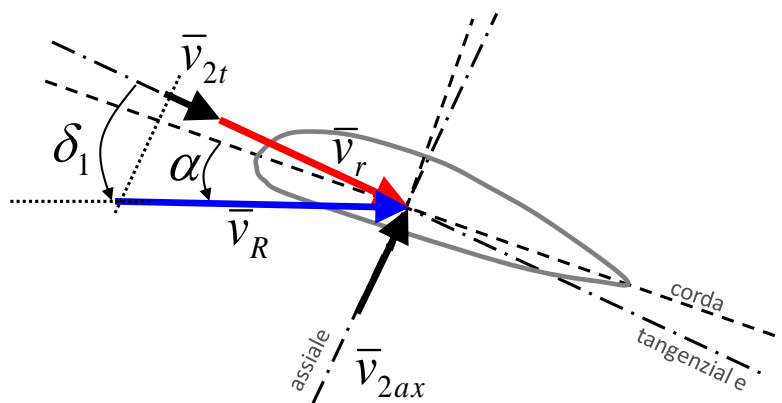
2. Aerodinamica della pala

Forze agenti sulla pala

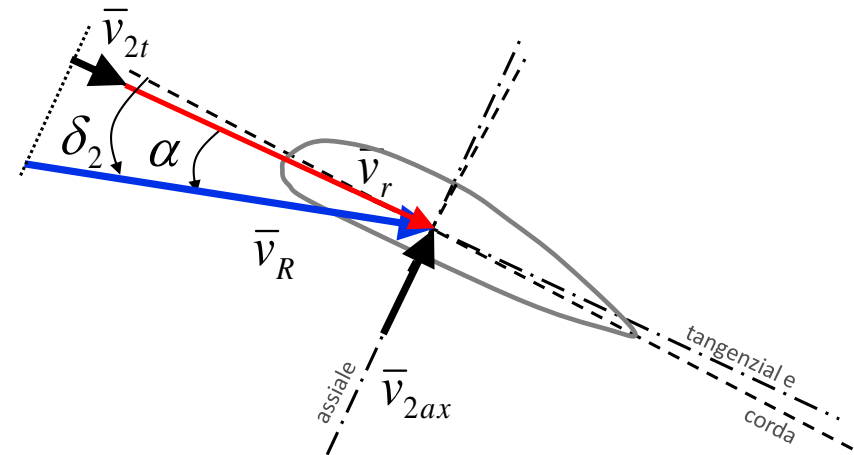
Svergolamento (*twist*)

Al crescere del raggio r aumenta la velocità di trascinamento $v_r = \Omega r$.

Per mantenere l'angolo di incidenza costante lungo tutta la pala (nel punto di efficienza massima) è necessario che **l'angolo δ diminuisca al crescere di r** .



sezione di pala al raggio r_1



sezione di pala al raggio r_2

$$r_2 > r_1 \Rightarrow \delta_1 > \delta_2$$



2. Aerodinamica della pala

Forze agenti sulla pala

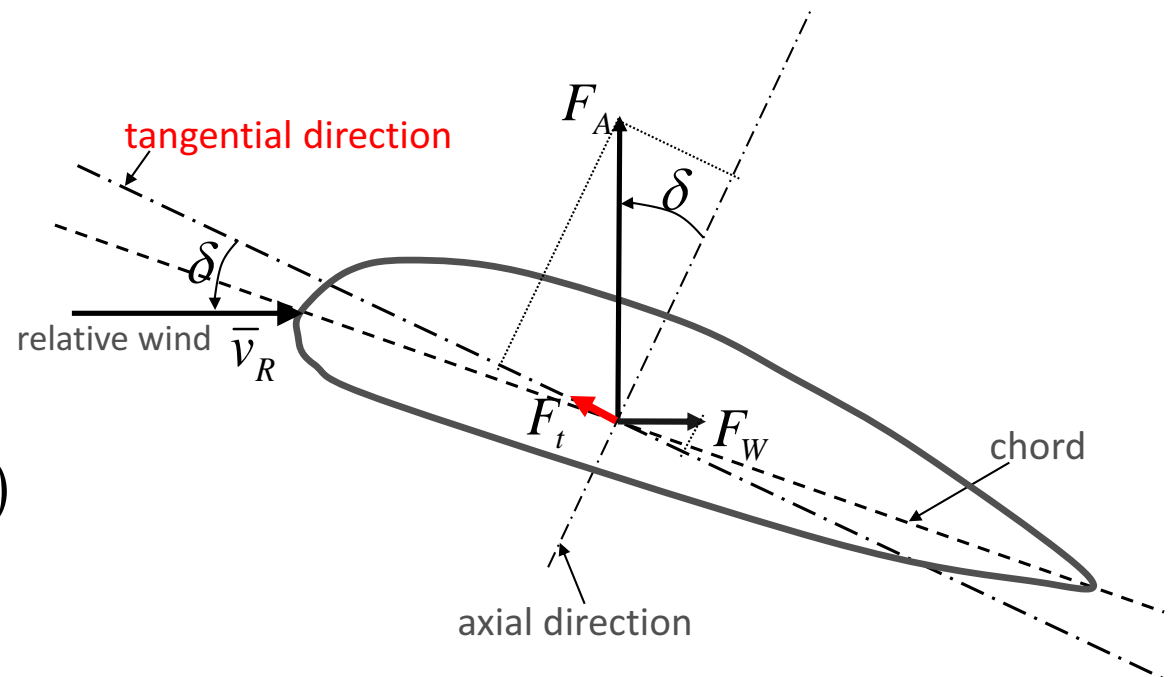
Effetto utile – Forza tangenziale

\vec{F}_t La componente di forza utile ai fini della **generazione di coppia** all'albero del rotore è quella in **direzione tangenziale** alla velocità di rotazione della pala.

$$dF_t = dF_A \sin \delta - dF_W \cos \delta$$



$$dF_t = \frac{\rho}{2} t_B v_r^2 (c_a \sin \delta - c_w \cos \delta)$$





2. Aerodinamica della pala

Forze agenti sulla pala

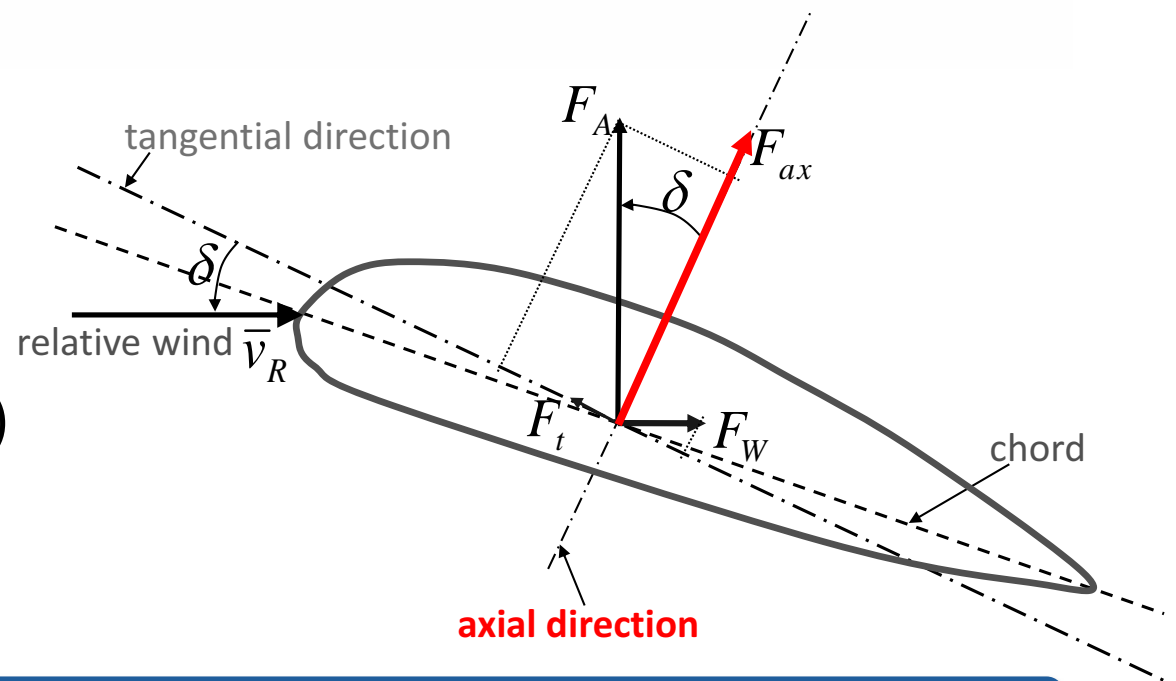
Forza assiale

\vec{F}_{ax} componente di forza in direzione assiale

$$dF_{ax} = dF_A \cos \delta + dF_W \sin \delta$$



$$dF_{ax} = \frac{\rho}{2} t_B v_r^2 (c_a \cos \delta + c_w \sin \delta)$$



La forza assiale è quella che sollecita il sostegno del rotore



2. Aerodinamica della pala

Coppia sul rotore

Integrando d_{Ft} su tutta la lunghezza della pala e moltiplicando per il numero delle pale si ha la coppia trasmessa all'albero del rotore.

Il problema principale nell'utilizzo pratico di queste espressioni è che occorre conoscere la velocità del vento v_2 in ogni sezione di turbina ed i coefficienti c_a e c_w .



2. Aerodinamica della pala

Tip Speed Ratio – TSR, λ

$$\lambda = \frac{v_u}{v_1}$$

λ : rapporto tra la velocità periferica delle pale e velocità del vento libero.

v_u velocità lineare della pala nella sua sezione più estrema ($v_u = \Omega_r r_{out}$)

v_1 velocità lineare del vento indisturbato a monte del generatore

Le **caratteristiche aerodinamiche di una pala** sono assegnate come legame **$TSR-C_p$**

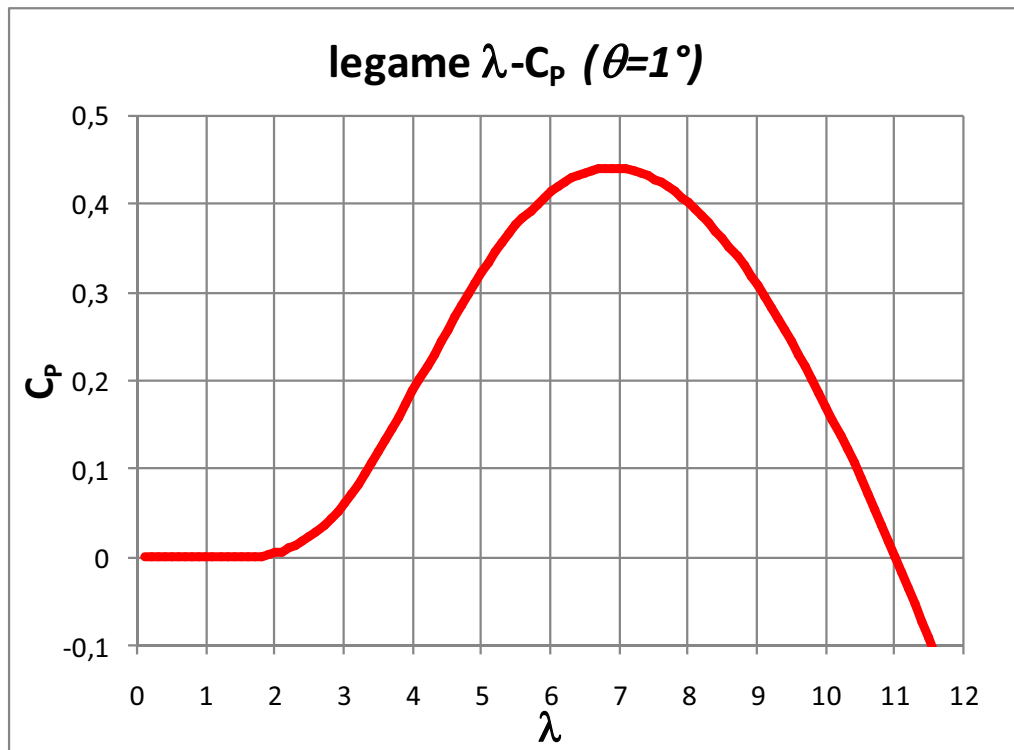
Per una data pala, il legame **$TSR-C_p$** dipende **dall'angolo di calettamento θ**



2. Aerodinamica della pala

Tip Speed Ratio – TSR, λ

Esempio di legame $\lambda - C_p$



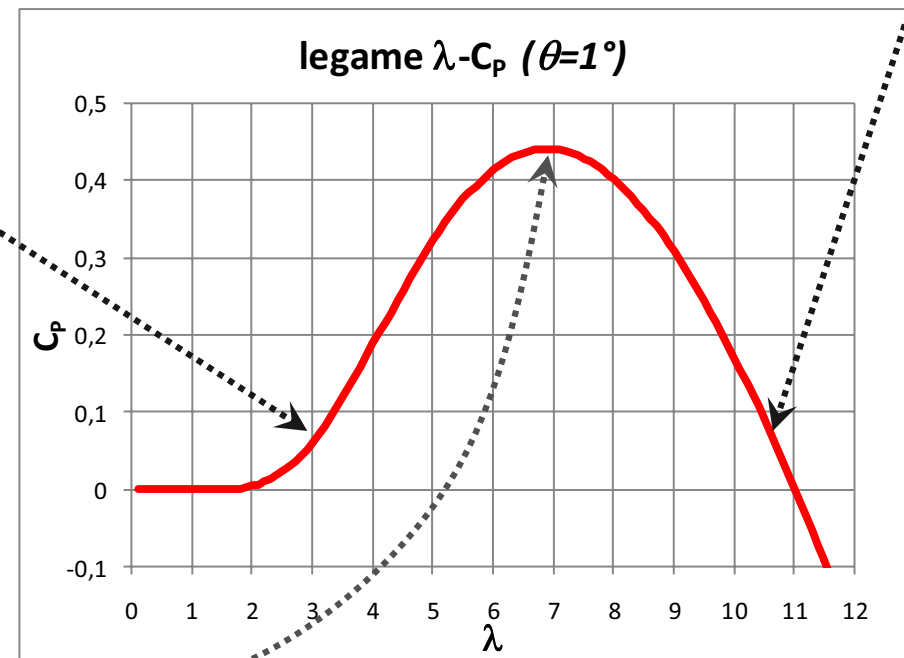
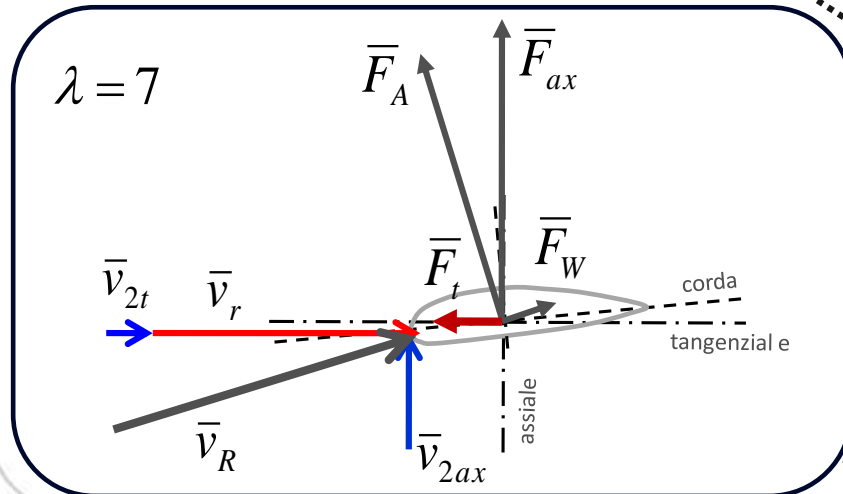
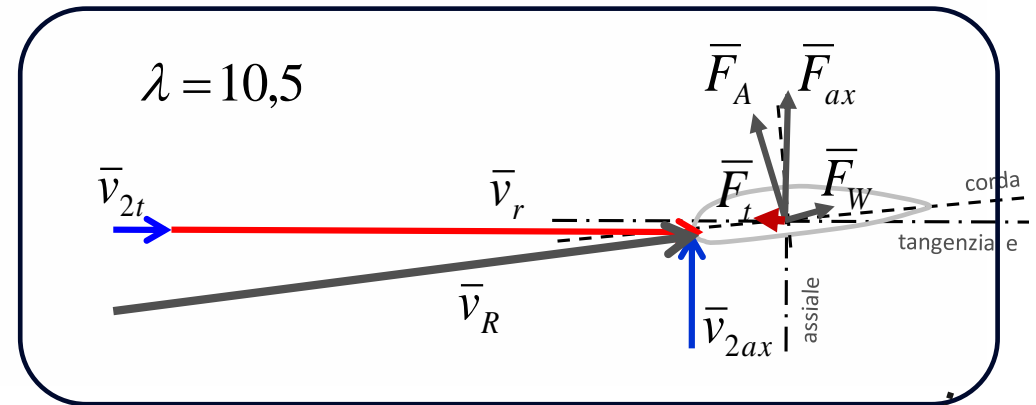
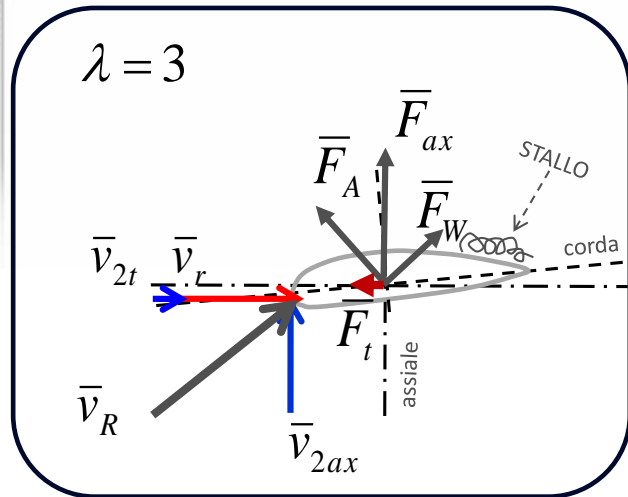
$$c_p(\lambda, \theta) = 0.73 \left(\frac{151}{\lambda_i} - 0.58\theta - 0.002\theta^{2.14} - 13.2 \right) e^{-18.4/\lambda_i}$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda - 0.02\theta} - \frac{0.003}{\theta^3 + 1}}$$



2. Aerodinamica della pala

Tip Speed Ratio

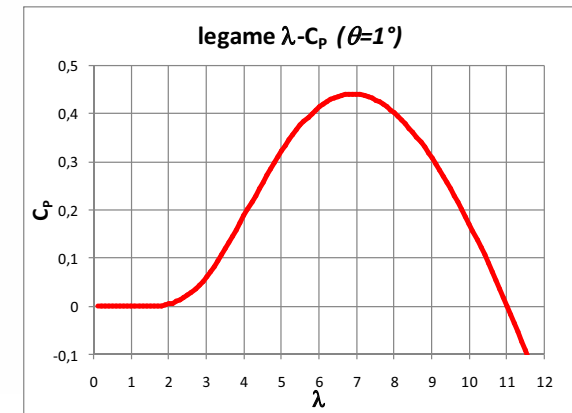




2. Aerodinamica della pala

Tip Speed Ratio – TSR, λ

Considerazioni a θ costante



1. Esiste un **unico valore** di *tip speed ratio* λ per il quale **l'efficienza di conversione è massima ($C_{P\text{MAX}}$)** che dipende dalla forma della pala.
2. Al **variare della velocità del vento v_1** occorre **variare la velocità di rotazione** delle pale per mantenere λ **costante** e pari al valore in cui si ha $C_{P\text{MAX}}$

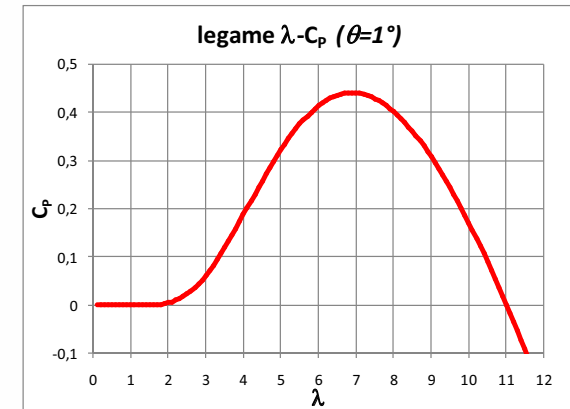
$$\left. \begin{aligned} \lambda &= \frac{v_u}{v_1} \\ v_u &= \Omega_r r_{out} \end{aligned} \right\} v_1 \uparrow \Rightarrow \Omega_r \uparrow$$



2. Aerodinamica della pala

Tip Speed Ratio – TSR , λ

Considerazioni a θ costante



3. Per valori di λ **bassi** si ha una riduzione di portanza ed un aumento della resistenza fino al raggiungimento della condizione di **STALLO** (distacco dei filetti fluidi)
4. Per valori di λ **alti** si ha una riduzione di portanza e di resistenza, la componente tangenziale tende ad annullarsi, è detta condizione di **FUGA**.

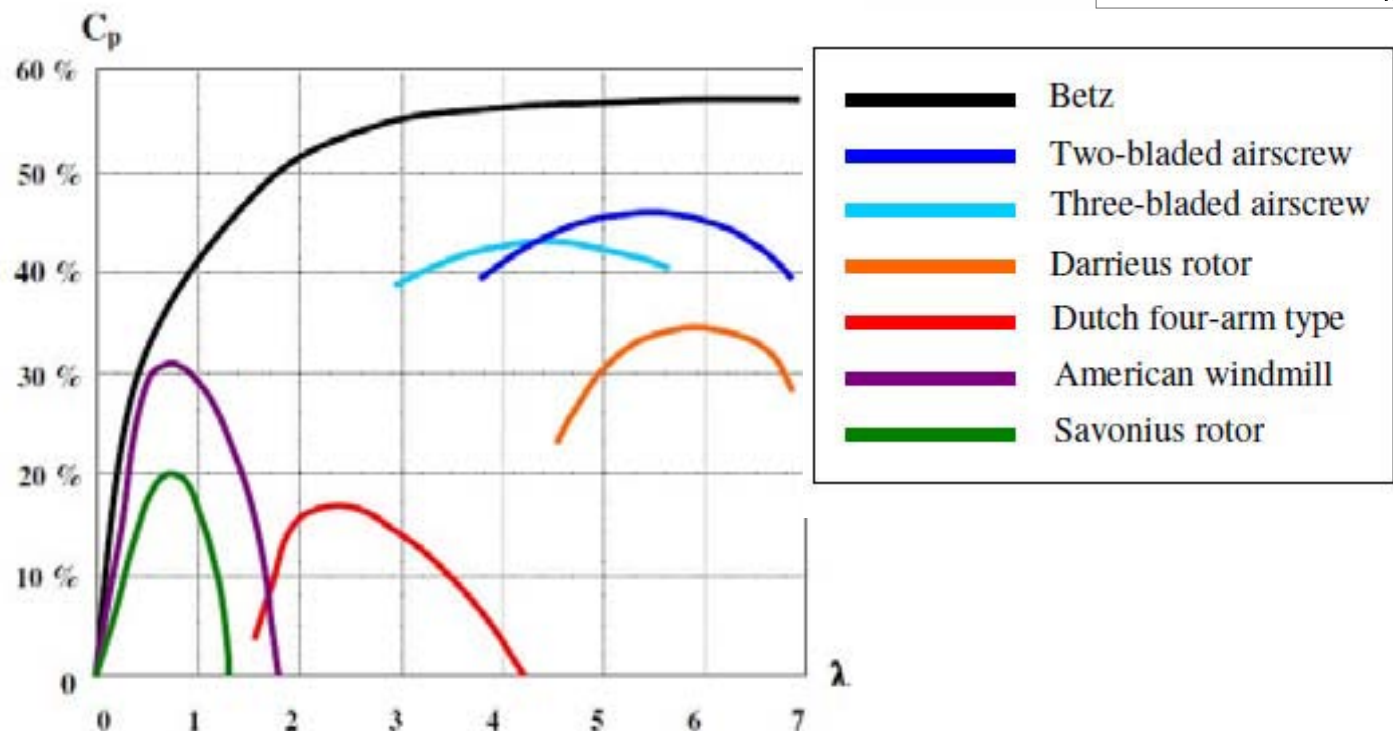
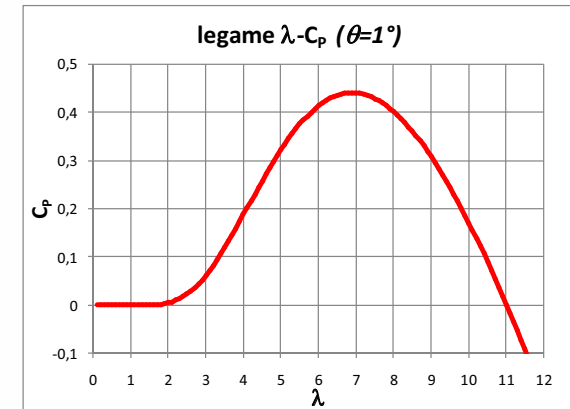
In altre parole, per λ **elevati** le pale ruotano tanto velocemente che costituiscono una **parete solida** rispetto al flusso del vento, che lo scavalca, per cui **l'energia raccolta è nulla**.



2. Aerodinamica della pala

Tip Speed Ratio – TSR, λ

Il valore **massimo di C_p** , e la **forma caratteristica della curva $C_p(\lambda)$** dipendono dal **tipo di turbina**





2. Aerodinamica della pala

TSR e coppia

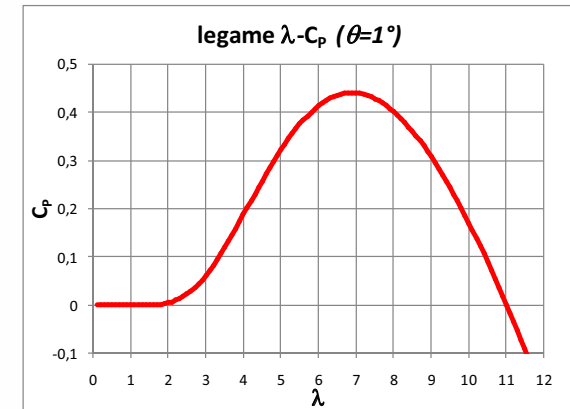
Coefficiente di coppia C_T

$$C_R = \frac{P_R}{\Omega_r} = \frac{P_d C_P}{\Omega_r} = \frac{1}{2} \dot{m} v_\infty^2 \frac{C_P}{\Omega_r}$$

$C_{MAX} = F_d \cdot r_m = \dot{m} v_\infty r_m$...se tutta la forza disponibile dal vento fosse trasformata in coppia sul raggio medio della turbina $r_m = r_{out}/2$

$$C_T = \frac{C_R}{C_{MAX}} = \frac{\frac{1}{2} \dot{m} v_\infty^2 C_P}{\dot{m} v_\infty \frac{r_{out}}{2} \Omega_r} = \frac{v_\infty}{r_{out} \Omega_r} C_P = \frac{C_P}{\lambda}$$

I valori massimi di C_T e il λ a cui si ottengono consentono di classificare la turbina



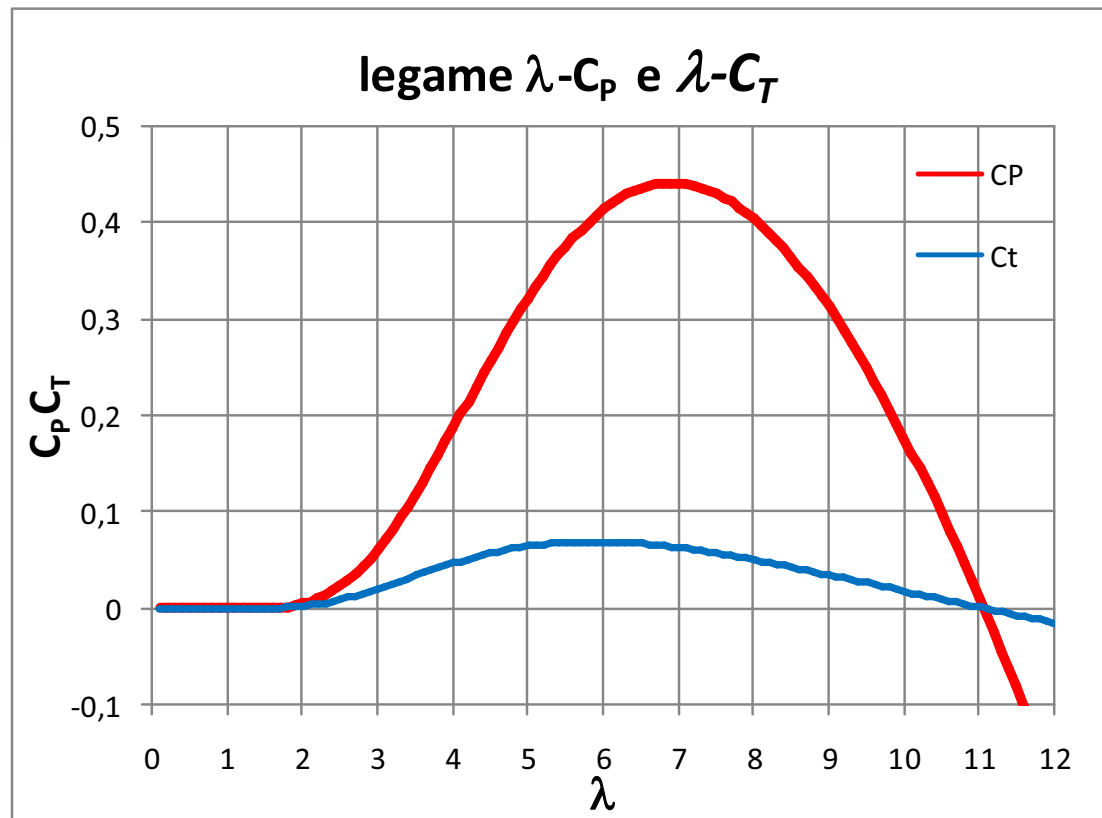


2. Aerodinamica della pala

TSR e coppia

Coefficiente di coppia C_T

$$C_T = \frac{C_P}{\lambda}$$

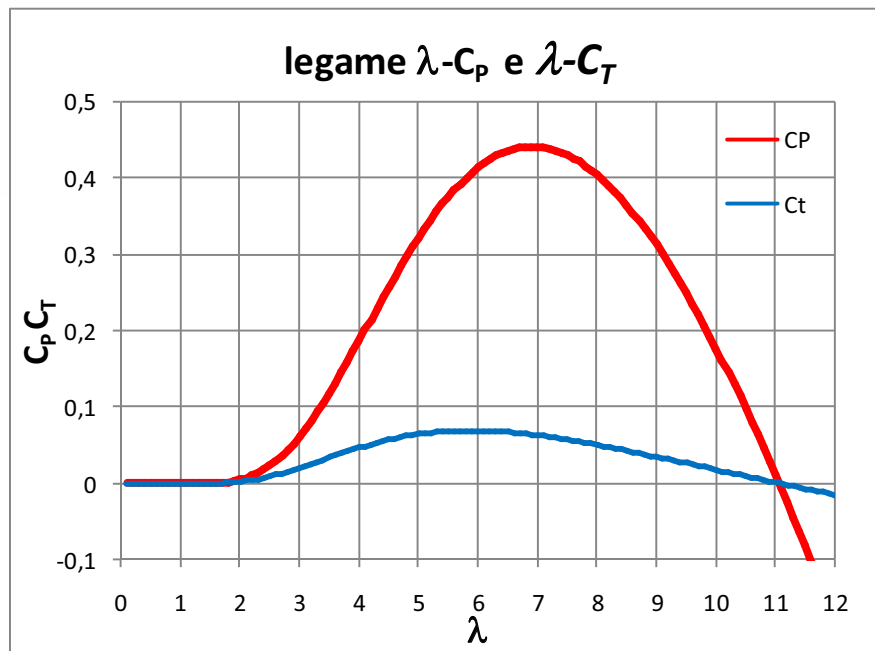




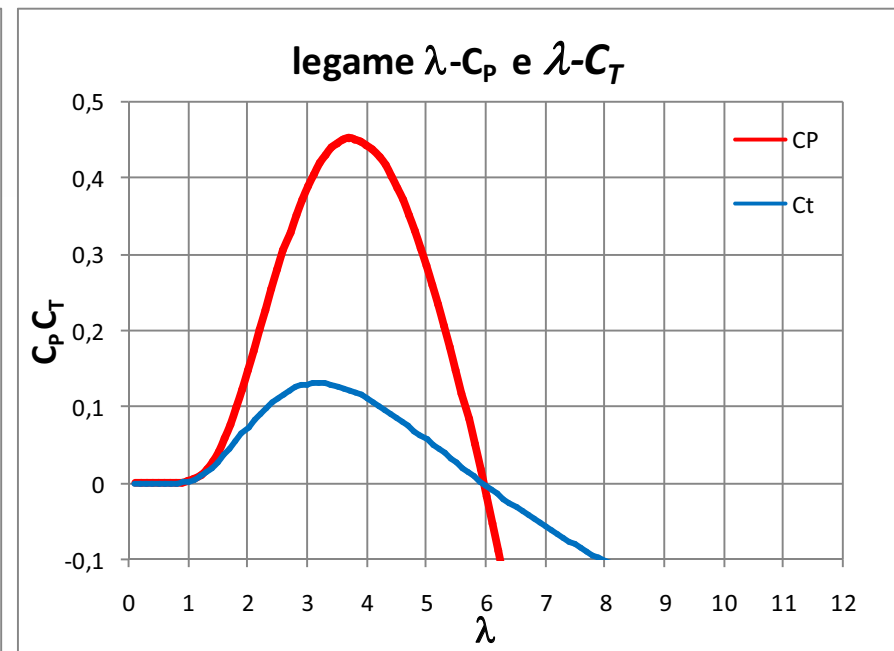
2. Aerodinamica della pala

TSR e coppia

turbina veloce $\lambda_{PMAX}=7$



turbina lenta $\lambda_{PMAX}=3,5$



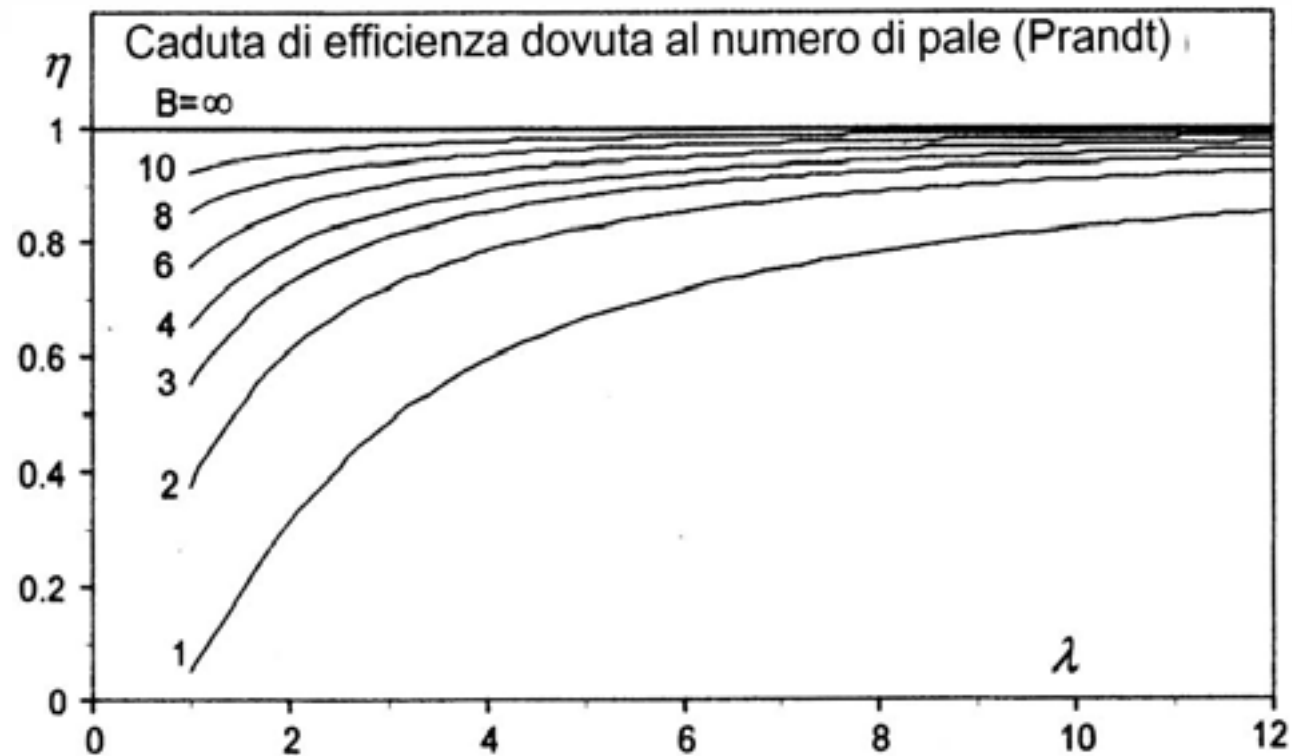
Turbine veloci e lente possono estrarre la stessa potenza dal vento (stesso C_p), ma sono soggette a coppie diverse (diverso C_T)



2. Aerodinamica della pala

Numero di pale

Lo sfruttamento dell'energia sul disco attuatore dipende anche dal numero di pale



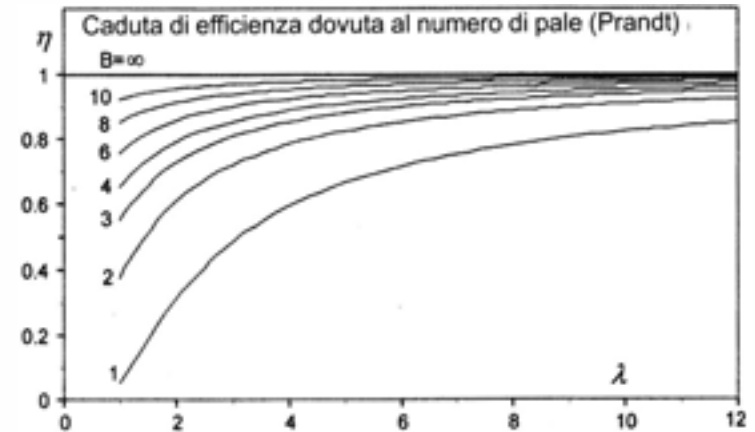


2. Aerodinamica della pala

Numero di pale

In generale:

**Maggiore è il numero di pale
maggiore è il rendimento η**



OSSERVAZIONI

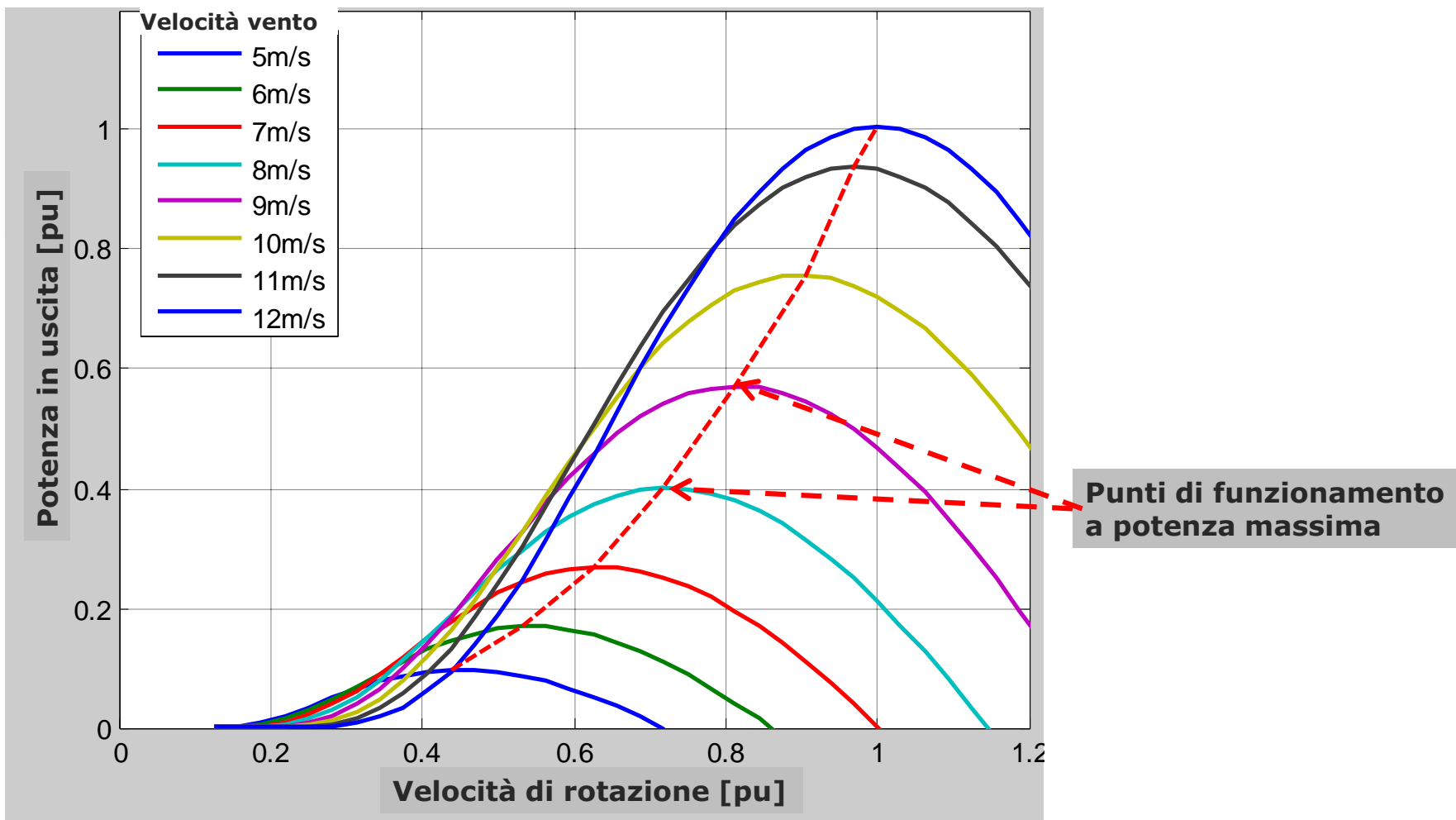
Le turbine 'lente' (basso λ), hanno efficienza η elevata se realizzate con un elevato numero di pale

Nelle turbine 'veloci' (alto λ), il numero di pale non incide fortemente sul rendimento



3. Controllo

3.1 Regolazione della velocità di rotazione

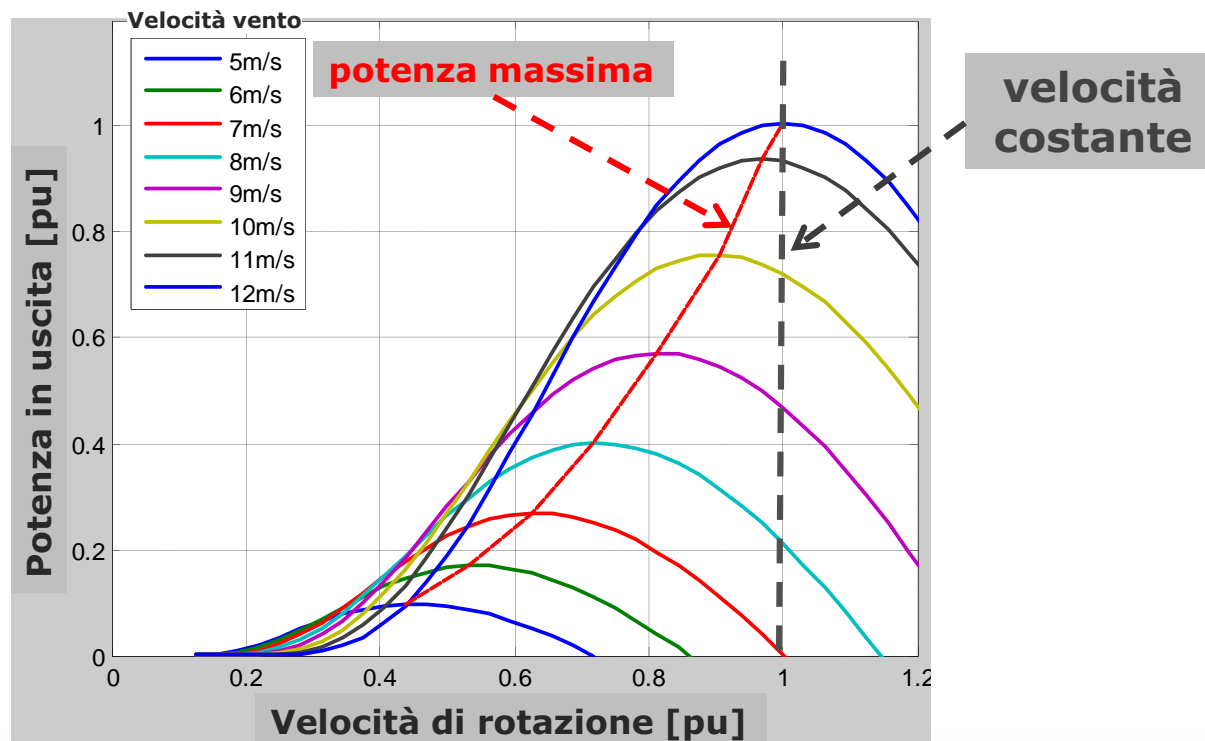




3. Controllo

3.1 Regolazione della velocità di rotazione

La **regolazione di velocità** è **indispensabile** per massimizzare l'estrazione di potenza per **velocità** di vento **inferiori** alla nominale

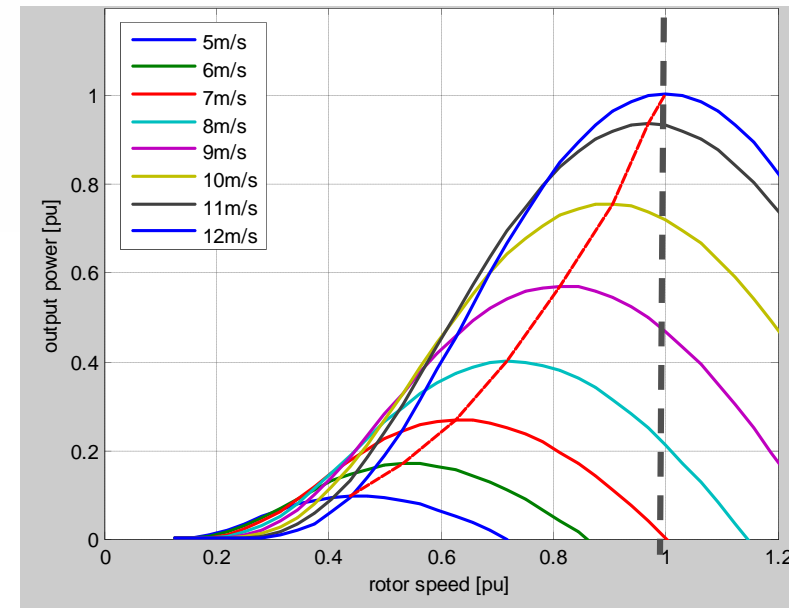




3. Controllo

3.1 Regolazione della velocità di rotazione

A **velocità costante**, si ha estrazione di potenza ottimale per una sola velocità di vento. Per velocità di **vento inferiori** si può avere anche una **notevole riduzione di potenza**



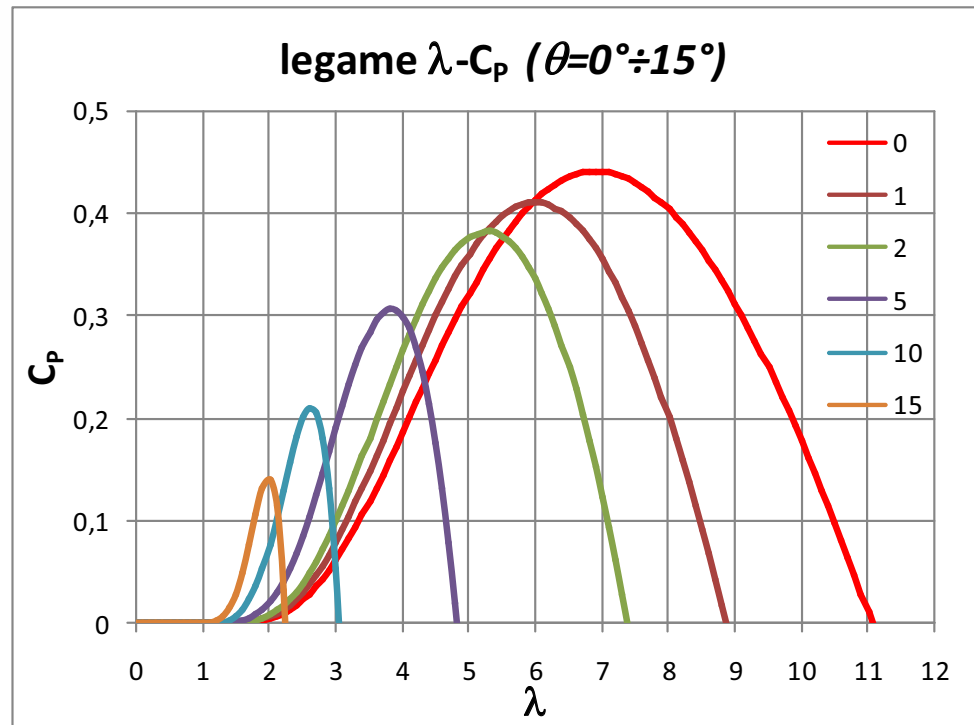
ESEMPIO

In genere, la regolazione di **velocità di rotazione nel range 40%÷100%** è sufficiente a massimizzare l'estrazione di potenza per **velocità di vento comprese tra 4m/s e 12m/s**



3. Controllo

3.2 Variazione dell'angolo di calettamento θ 'pitch'



Al variare dell'angolo di calettamento θ :

1. variano le curve λ - C_p

2. varia il C_{pMAX} e λ_{pMAX}



3. Controllo

3.2 Angolo di calettamento θ 'pitch' VARIABILE

Per velocità di vento maggiori della nominale

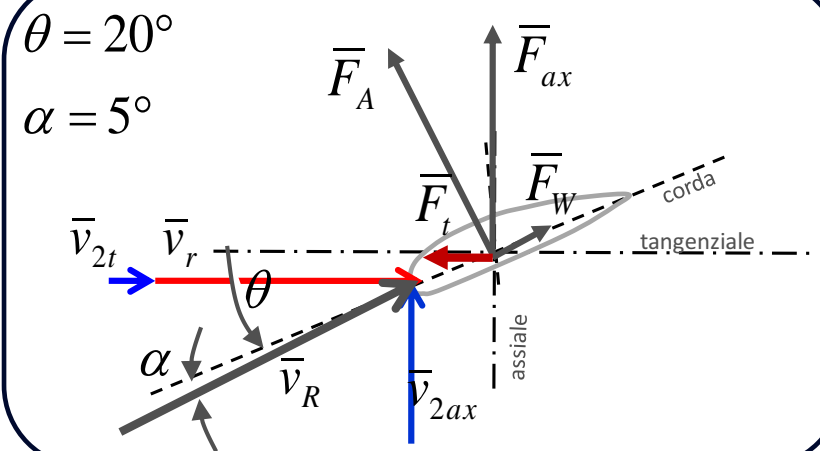
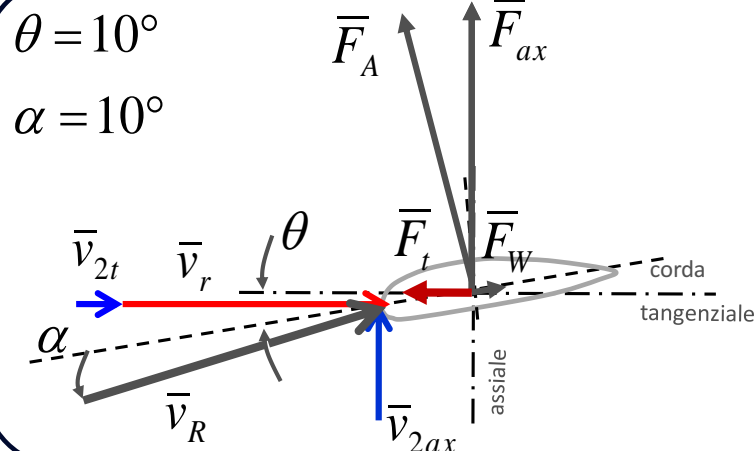
Regolazione '**PITCH TO FEATHER**'

velocità di rotazione
costante $\Omega_r = \text{cost}$
+
aumento dell'angolo di
calettamento θ

Si riduce l'angolo d'attacco α

Si riduce la PORTANZA F_A .

La forza tangenziale F_t e quindi la
coppia restano costanti



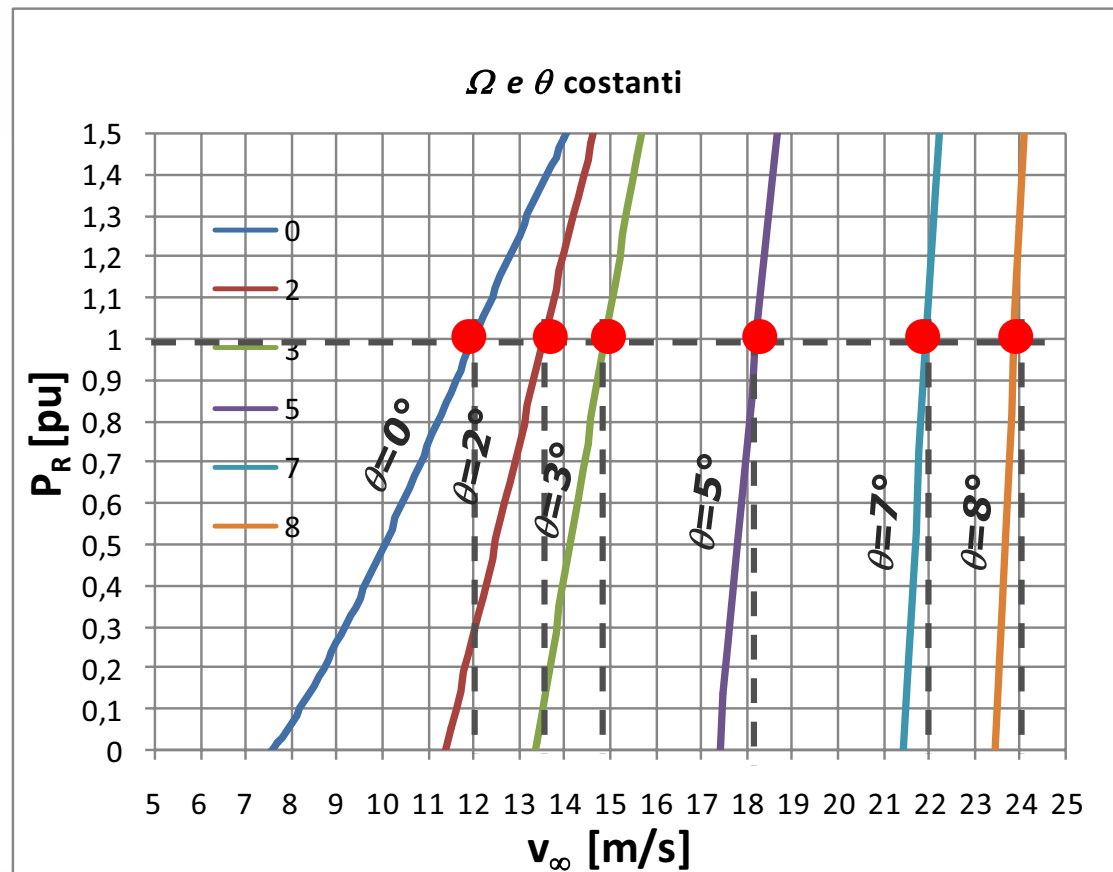


3. Controllo

3.2 Angolo di calettamento θ 'pitch' VARIABILE

Per velocità di vento maggiori della nominale

Regolazione 'PITCH TO FEATHER'





3. Controllo

3.2 Angolo di calettamento θ 'pitch' VARIABILE

Per velocità di vento maggiori della nominale:

Regolazione '**PITCH TO FEATHER**'

OSSERVAZIONI

Consente un buon controllo del flusso aerodinamico (i filetti fluidi non si staccano, si è sempre lontani dallo stallo)

Per ogni velocità di vento esiste un valore di *pitch* per il quale la pala è in grado di produrre la potenza nominale alla velocità nominale

Sono richieste ampie variazioni di *pitch*. Es $\theta = [0 \div 25^\circ]$

È una tecnica molto utilizzata



3. Controllo

3.2 Angolo di calettamento θ 'pitch' VARIABILE

Per velocità di vento maggiori della nominale:

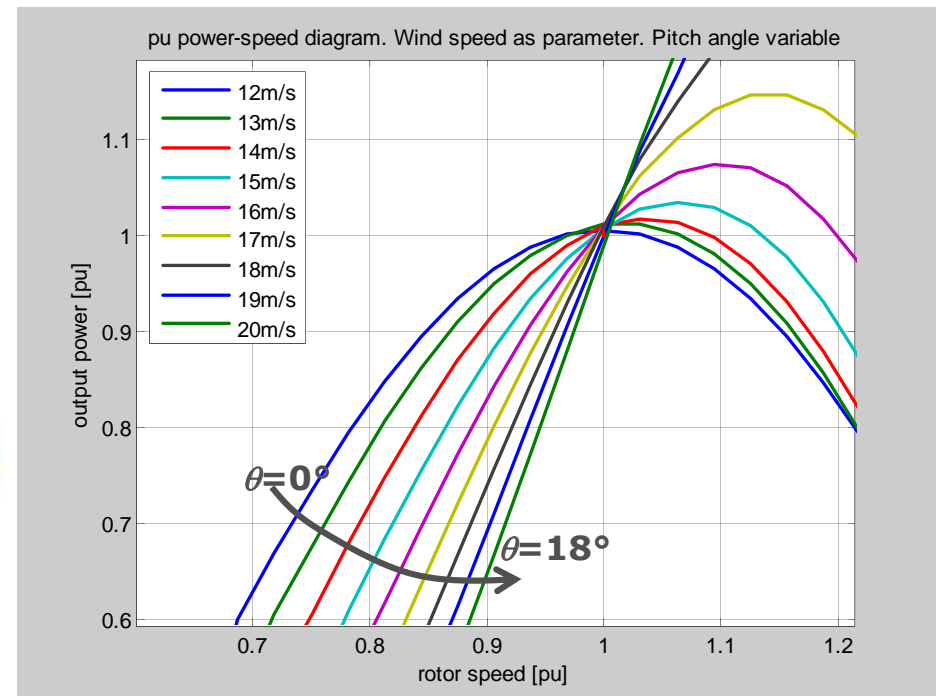
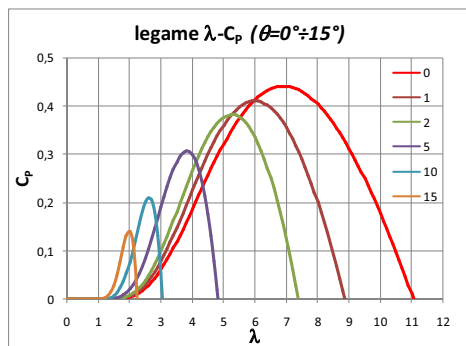
Regolazione '**PITCH TO FEATHER**'

velocità di rotazione
costante

+

controllo del pitch

Limitazione della
potenza estratta





3. Controllo

3.3 Angolo di calettamento θ 'pitch' VARIABILE

Per velocità di vento maggiori della nominale:

Regolazione 'PITCH TO STALL'

velocità di rotazione
costante $\Omega_r = \text{cost}$

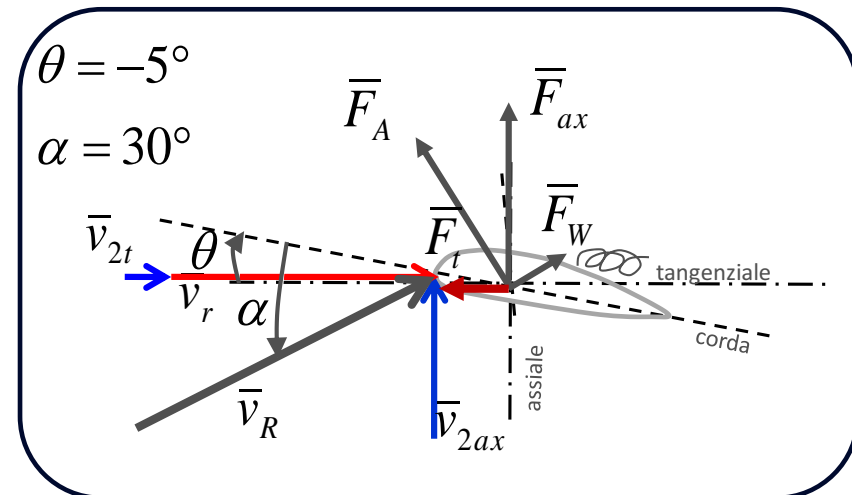
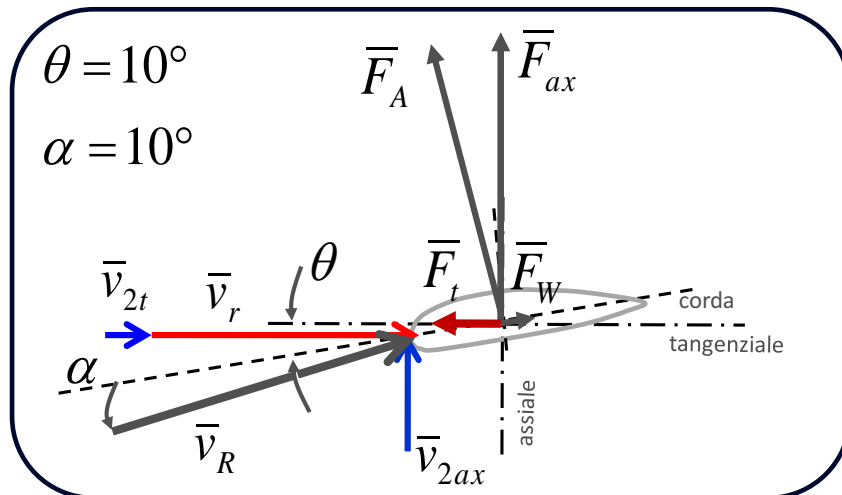
+

Diminuzione dell'angolo
di calettamento θ

Aumenta l'angolo d'attacco α

Si riduce la PORTANZA F_{A_r} aumenta
la resistenza F_W

La forza tangenziale F_t e quindi la
coppia restano costanti





3. Controllo

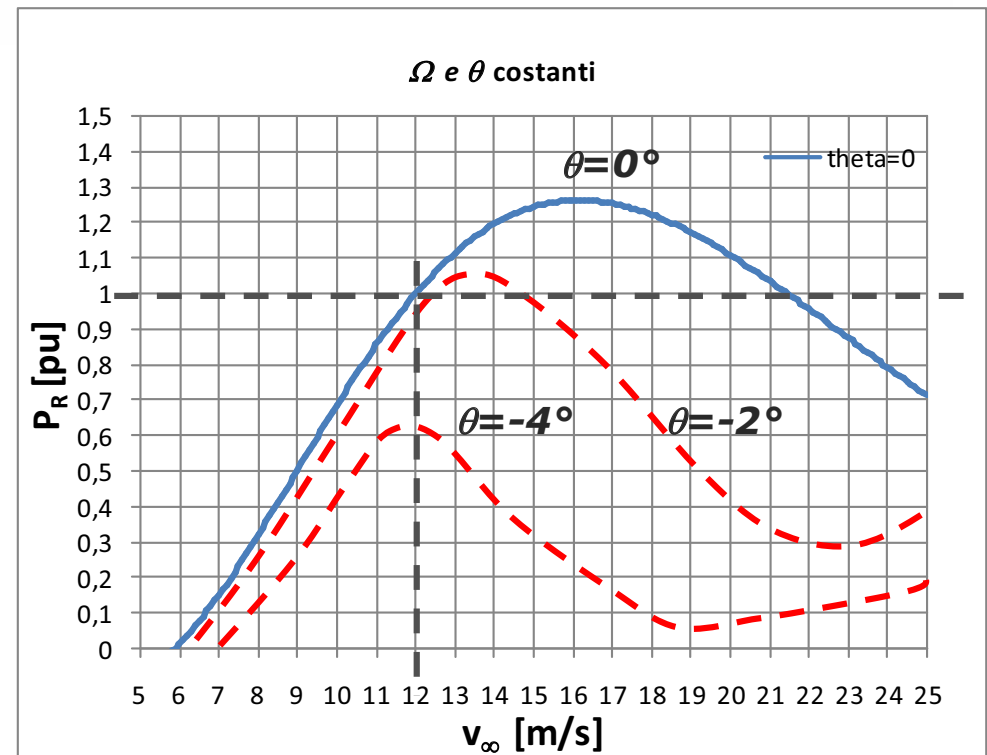
3.3 Angolo di calettamento θ 'pitch' VARIABILE

Per velocità di vento maggiori della nominale

Regolazione 'PITCH TO STALL'

OSSERVAZIONI

1. **Minime** **variazioni**
negative del **pitch**,
portano la pala in
stallo, riducendo la
potenza estratta dal
vento
2. Difficile controllo della
potenza con la pala in
stallo
3. Richiede **minime**
variazioni di **pitch**. Es
 $\theta = [0 \div -4^\circ]$





3. Controllo

3.4 Regolazione combinata Ω_r - θ

CONTROLLO OTTIMALE

Velocità inferiore alla nominale:

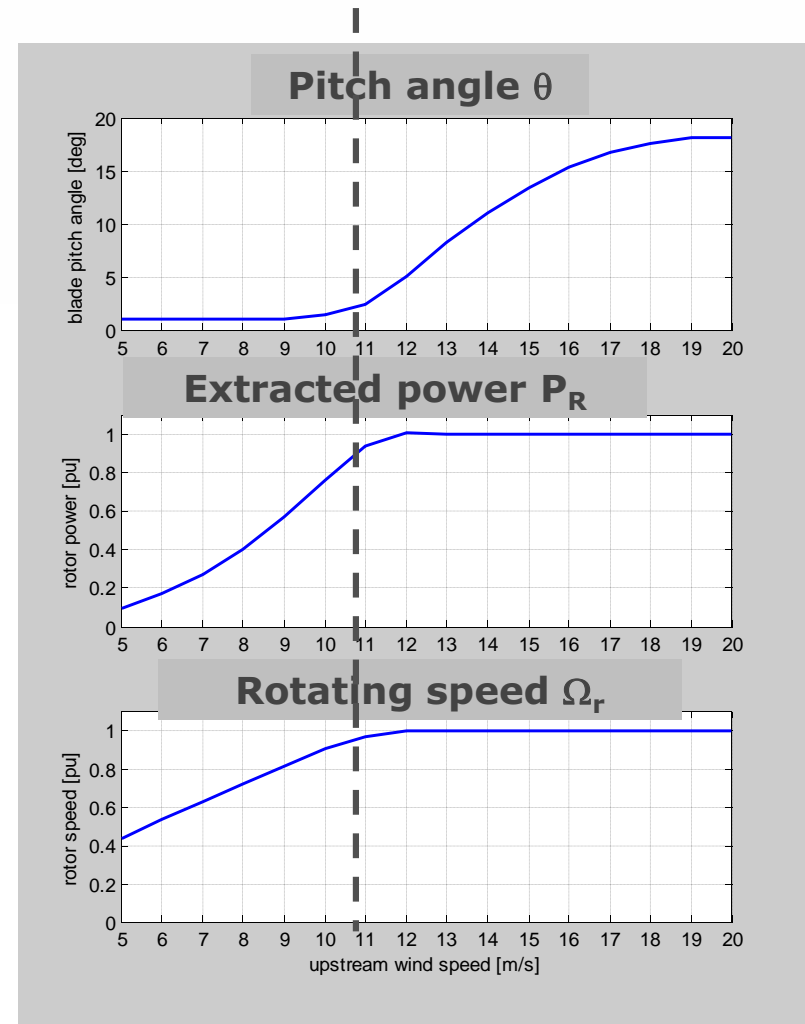
Variazione di velocità di rotazione

Velocità superiore alla nominale

Variazione di angolo di pitch

Velocità prossima alla nominale

Variazione sia di velocità che di pitch

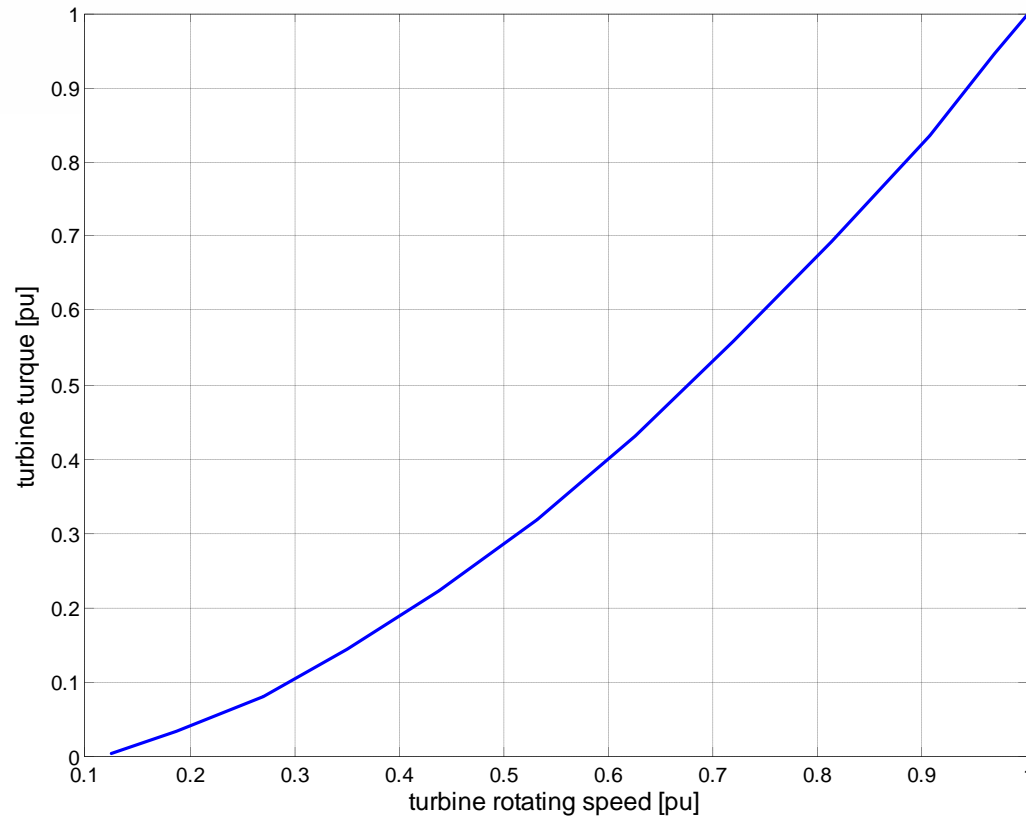




3. Controllo

3.4 Regolazione combinata Ω_r - θ

Legame **coppia-velocità**



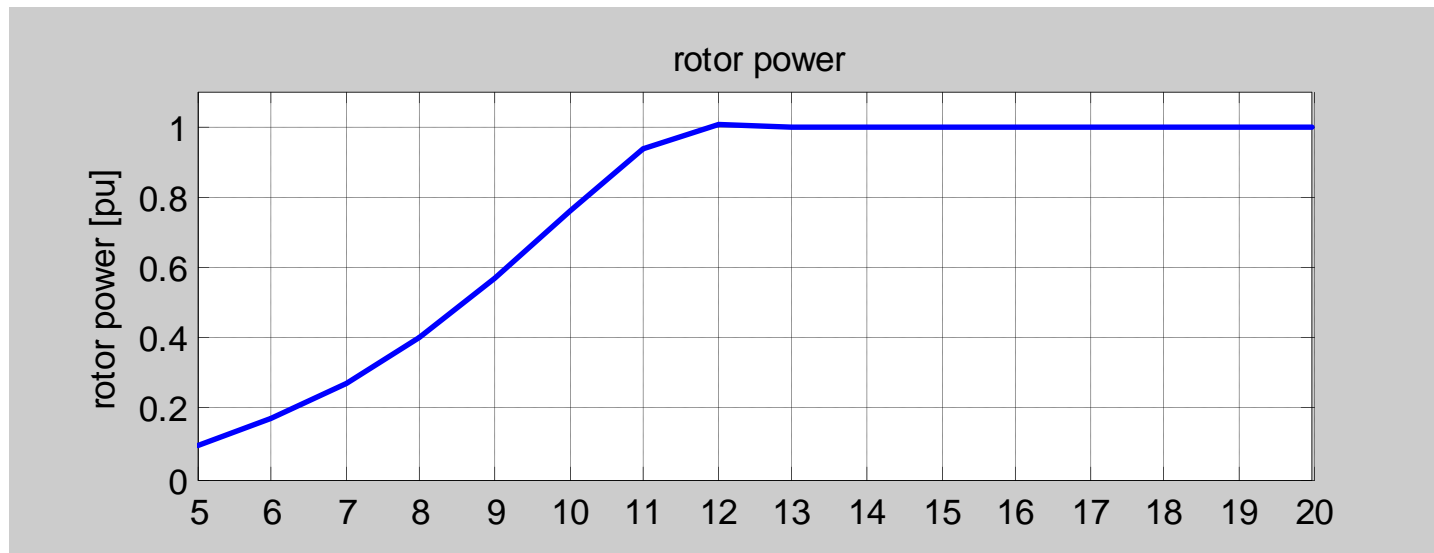


3. Controllo

3.4 Regolazione combinata Ω_r - θ

Consente

1. **Migliore** sfruttamento del vento a **velocità inferiori** alla nominale
2. **Mantenimento della potenza** al valore nominale per velocità di vento maggiori della nominale





3. Controllo

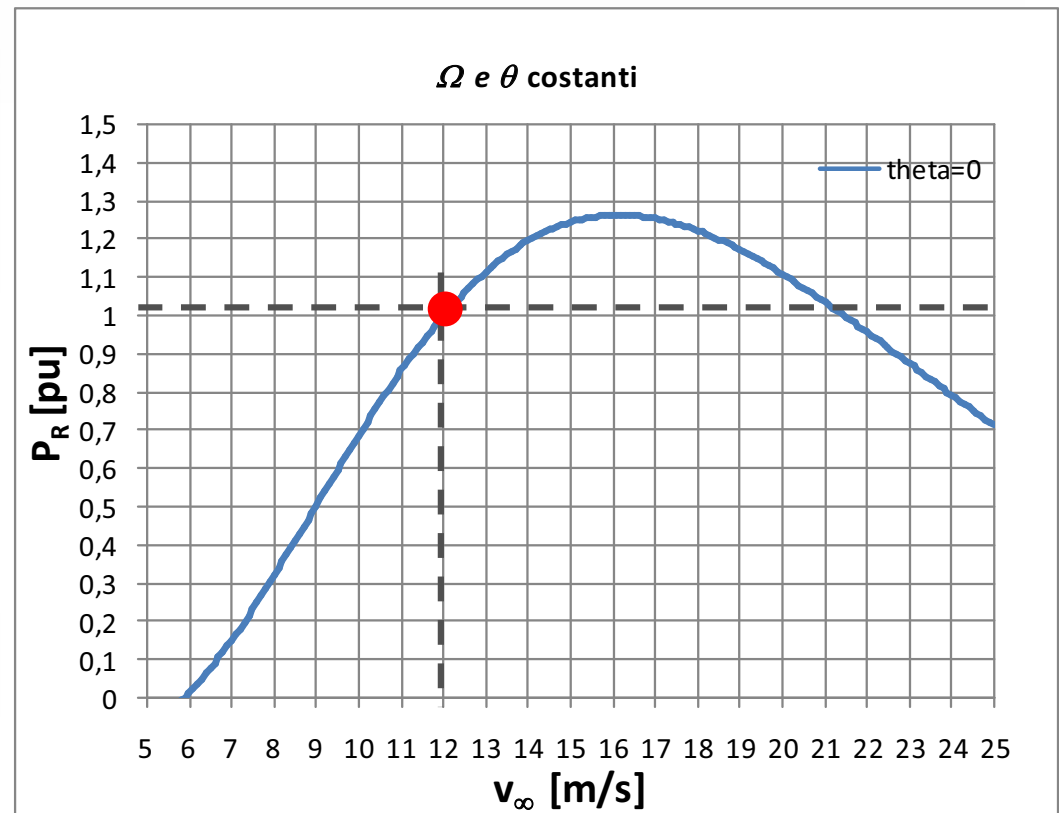
3.5 Angolo di calettamento θ 'pitch' FISSO

Per velocità di vento maggiori della nominale:

velocità di rotazione
costante $\Omega_r = \text{cost}$
+
pitch costante $\theta = \text{cost}$



potenza generata non
costante





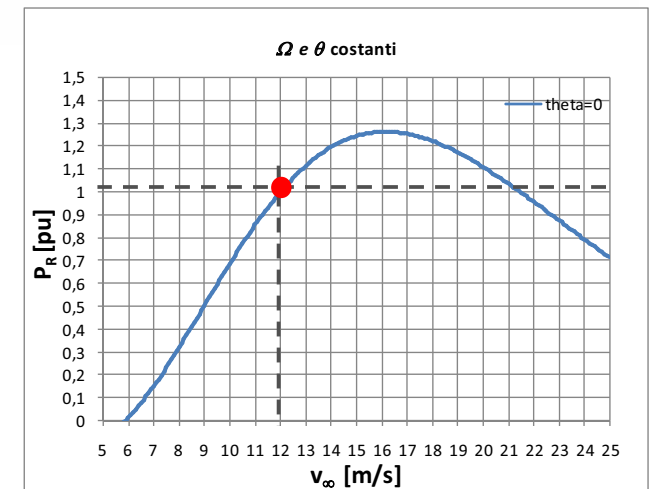
3. Controllo

3.5 Angolo di calettamento θ 'pitch' FISSO

Per velocità di vento maggiori della nominale:

OSSERVAZIONI

1. Non si utilizza il meccanismo di regolazione del pitch. **Semplicità costruttiva.**
2. La potenza generata non è costante
3. Utilizzabile per piccole turbine, piccoli impianti, senza problemi particolari di allaccio alla rete.



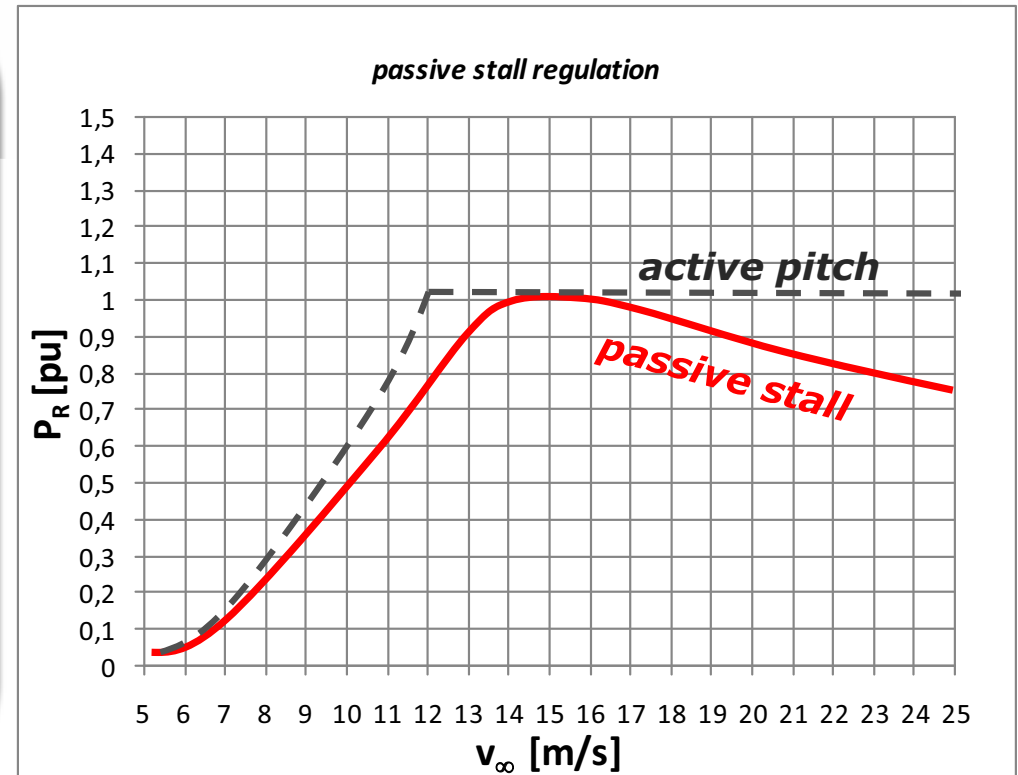


3. Controllo

3.5 Angolo di calettamento θ 'pitch' FISSO

Fixed pitch, passive stall regulation

1. La potenza generata è tagliata, per effetto dell'entrata in stallo della pala
2. Non si ha supero della potenza rispetto alla nominale
3. Lo stallo si manifesta dall'estremità della pala all'interno in modo graduale (per effetto dello svergolamento della pala)

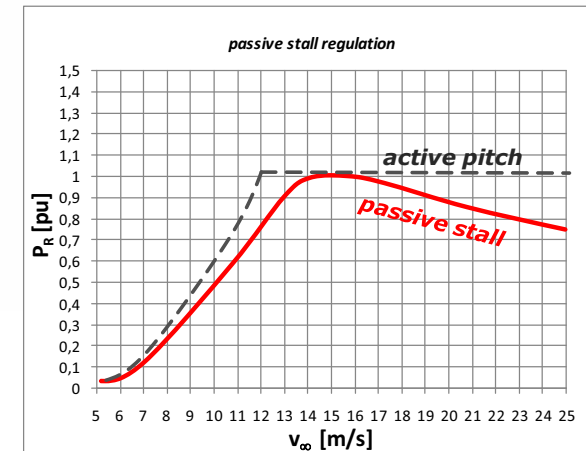




3. Controllo

3.5 Angolo di calettamento θ 'pitch' FISSO

Fixed pitch, passive stall regulation



INCONVENIENTI:

Difficilmente si riesce ad ottenere la potenza costante. Al crescere del vento la potenza diminuisce

Pitch fisso: espone un'elevata superficie al vento. Struttura molto sollecitata durante le raffiche di vento forte.

Grazie per l'attenzione

www.die.unibo.it
www.elettrica.ing.unibo.it



Generazione eolica