

ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Potencia disponible del viento:

La energía cinética de una masa m de aire moviéndose a una velocidad V es:

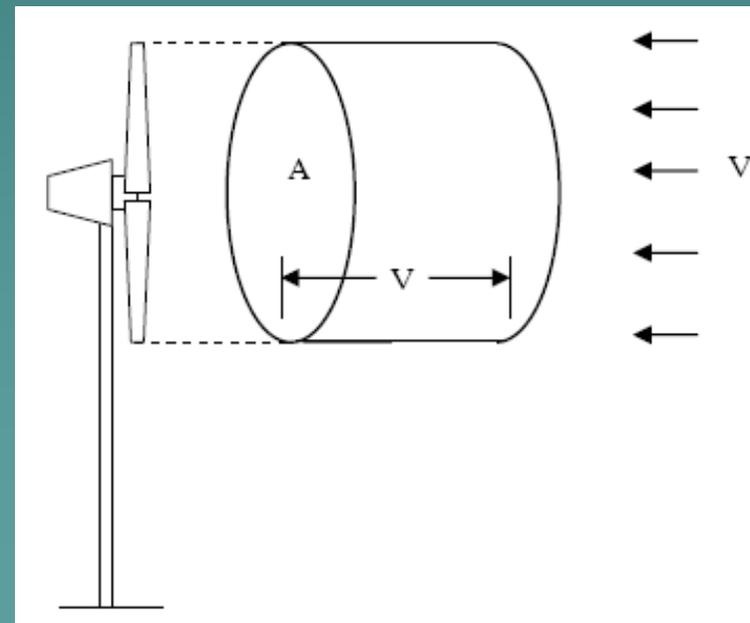
$$E = \frac{1}{2}mV^2$$

Se considera un rotor de una sección transversal A expuesta a una masa de aire en movimiento. La energía cinética disponible para la turbina de viento se puede expresar como:

$$E = \frac{1}{2}\rho_a vV^2$$

ρ_a es la densidad del aire

v es el volumen de aire disponible



ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Potencia disponible del viento:

El aire interactuando con el rotor por unidad de tiempo tiene una sección transversal igual a la del rotor (A_T) y un espesor igual a la velocidad del viento (V); con lo que la energía por unidad de tiempo (potencia P) se puede expresar como:

$$P = \frac{1}{2} \rho_a A_T V^3$$

En la última se ven los 3 factores que determinan la disponibilidad de potencia.

La densidad del aire es influenciada por: temperatura, presión atmosférica, elevación y sus componentes.

El aire seco puede considerarse un gas ideal:

$$pV_G = nRT$$

p , es la presión, V_G , es el volumen, n , es el número de kilo moles, R , es la constante universal de los gases y T , la temperatura.

ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Potencia disponible del viento:

La densidad del aire es la relación entre la masa de un Kilo mol de aire por unidad de volumen:

$$\rho_a = \frac{m}{V_G}$$

De las dos últimas:

$$\rho_a = \frac{mp}{RT}$$

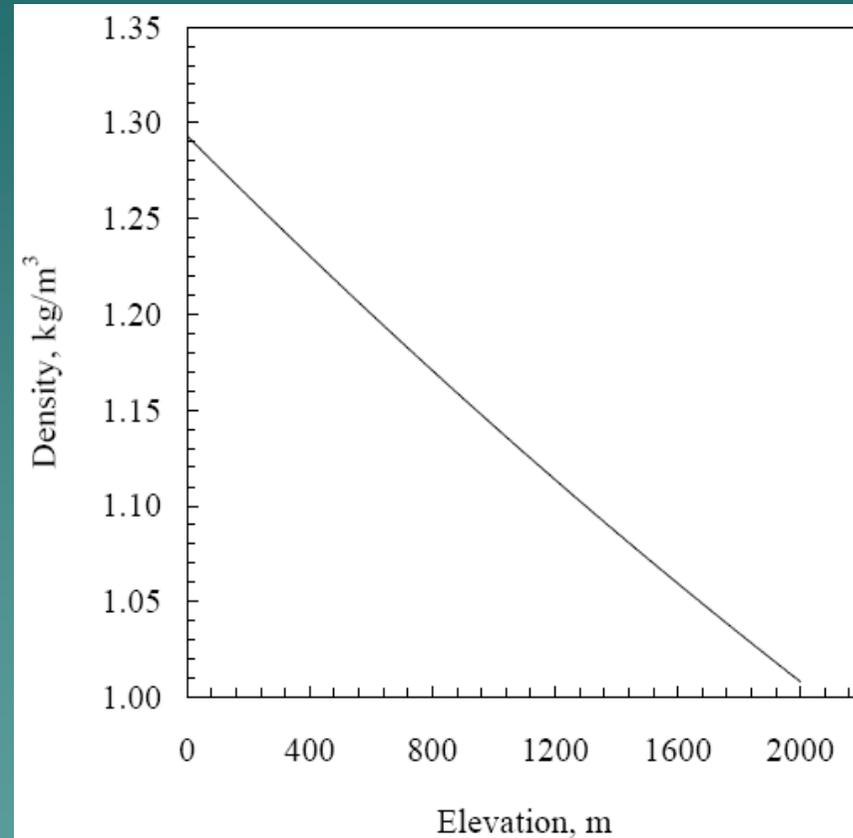
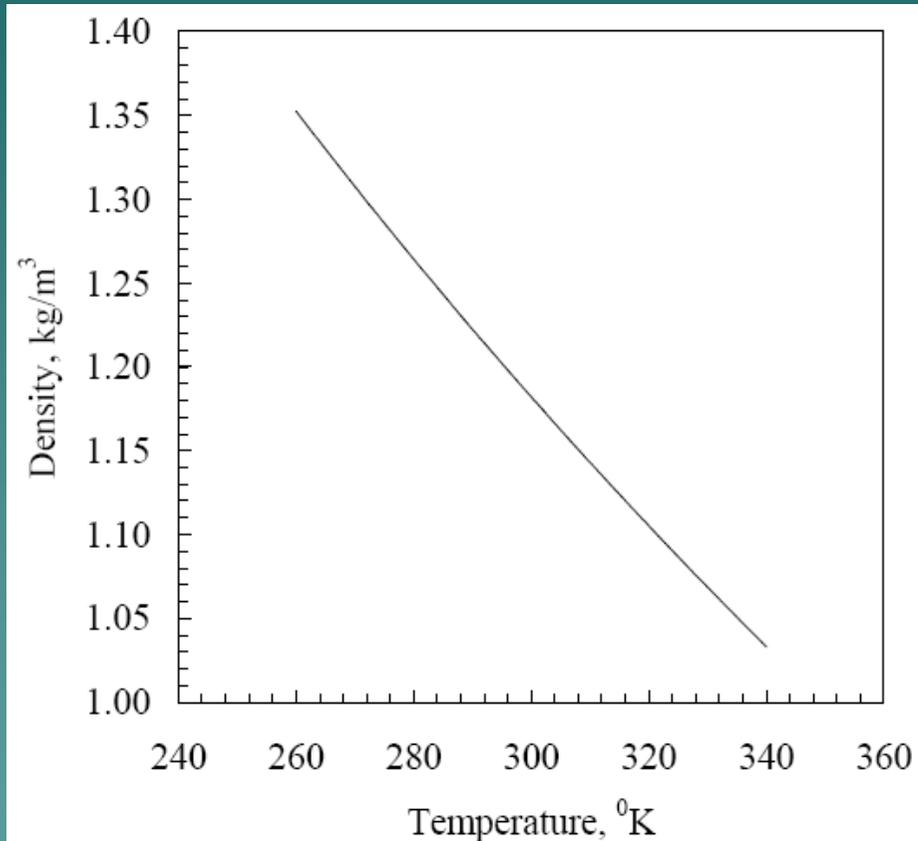
Por otro lado, para cualquier elevación Z y temperatura T, la densidad del aire se puede calcular mediante:

$$\rho_a = \frac{353,049}{T} e^{\left(-0,034 \frac{Z}{T}\right)}$$

ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Potencia disponible del viento:



Es claro que el factor dominante es la velocidad....duplicar la velocidad significa incrementar 8 veces la disponibilidad de potencia....

ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Potencia y Torque de la Turbina de viento:

No es posible extraer toda la potencia que dispone el viento....

La potencia que extrae la turbina será:

$$P_T = \frac{1}{2} (\text{velocidad del flujo de masa por segundo}) \{V^2 - V_0^2\}$$

P_T = potencia mecánica extraída por el rotor, potencia de salida de la turbina

V = velocidad del viento antes de pasar por las palas del rotor

V_0 = velocidad del viento a la salida de las palas del rotor

La tasa del flujo de masa del aire a través de las palas rotantes es obtenida multiplicando la densidad por la velocidad media:

$$\text{taza del flujo de masa} = \rho_a A_T \frac{V + V_0}{2}$$

ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Potencia y Torque de la Turbina de viento:

La potencia mecánica extraída por el rotor:

$$P_T = \frac{1}{2} \left[\rho_a A_T \frac{(V + V_0)}{2} \right] (V^2 - V_0^2)$$

$$P_T = \frac{1}{2} \rho_a A_T V^3 \frac{\left(1 + \frac{V_0}{V}\right) \left[1 - \left(\frac{V_0}{V}\right)^2\right]}{2}$$

Si se hace:

$$C_p = \frac{\left(1 + \frac{V_0}{V}\right) \left[1 - \left(\frac{V_0}{V}\right)^2\right]}{2}$$

C_p es la fracción de potencia del viento capturada por el rotor y se le denomina *coeficiente de potencia del rotor o eficiencia del rotor*

ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Potencia y Torque de la Turbina de viento:

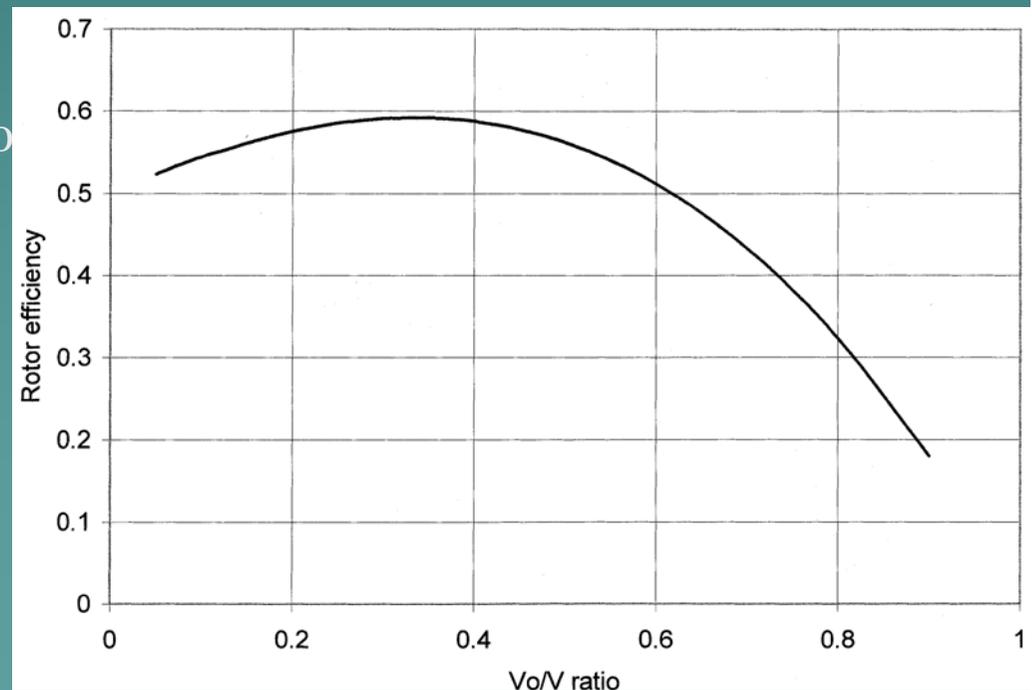
La potencia extraída por el rotor:

$$P_T = \frac{1}{2} \rho_a A_T V^3 C_p$$

De donde:

$$C_p = \frac{2P_T}{\rho_a A_T V^3}$$

Para determinada velocidad del viento C_p depende de la velocidad del viento antes y después del rotor



ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Potencia y Torque de la Turbina de viento:

La Fuerza experimentada por el rotor:

$$F = \frac{1}{2} \rho_a A_T V^2$$

Y el Torque:

$$T = \frac{1}{2} \rho_a A_T V^2 R$$

R es el radio del rotor

La anterior es la expresión del Torque máximo posible que se puede desarrollar.

La relación entre tal máximo y el que se este desarrollando (T_T) se denomina Coeficiente de Torque C_T :

$$C_T = \frac{2T_T}{\rho_a A_T V^2 R}$$

ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Potencia y Torque de la Turbina de viento:

La potencia desarrollada por el rotor para determinada velocidad del viento depende en gran medida de la velocidad relativa entre las palas y el viento.

A la relación entre la velocidad de la punta de la pala y la velocidad del viento se le denomina λ (o *TSR, Tip Speed Ratio*):

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V} = \frac{2\pi NR}{V}$$

Donde Ω es la velocidad angular y N las rpm

Relacionando C_p y C_T :

$$C_p = \frac{2P_T}{\rho_a A_T V^3} = \frac{2T_T \Omega}{\rho_a A_T V^3}$$

$$\frac{C_p}{C_T} = \frac{R\Omega}{V} = \lambda$$

ENERGÍA EÓLICA (EE)

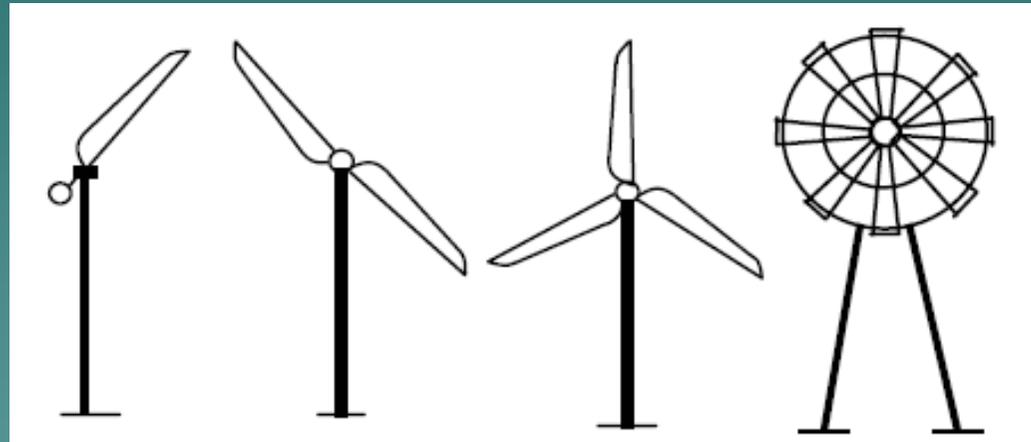
PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Clasificación de las turbinas de viento

Turbinas de eje horizontal

Eje paralelo a la dirección del viento

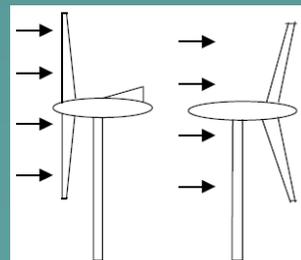
- ◆ Baja velocidad de cut-in
- ◆ Relativamente alto C_p
- ◆ Subir todo a la torre
- ◆ Hay que orientarla



Relación de solidez: área de las palas/área barrida

Tal relación tiene que ver con el torque de arranque y el torque de funcionamiento

Upwind y Downwind



ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Clasificación de las turbinas de viento

Turbinas de eje vertical

Ventajas:

El viento se recibe de cualquier dirección

El generador y accesorios a nivel de tierra

Desventajas:

No tiene par de arranque

Zonas muertas

Riendas de sostenimiento

ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Clasificación de las turbinas de viento

Turbinas de eje vertical

Darrieus



Savomius



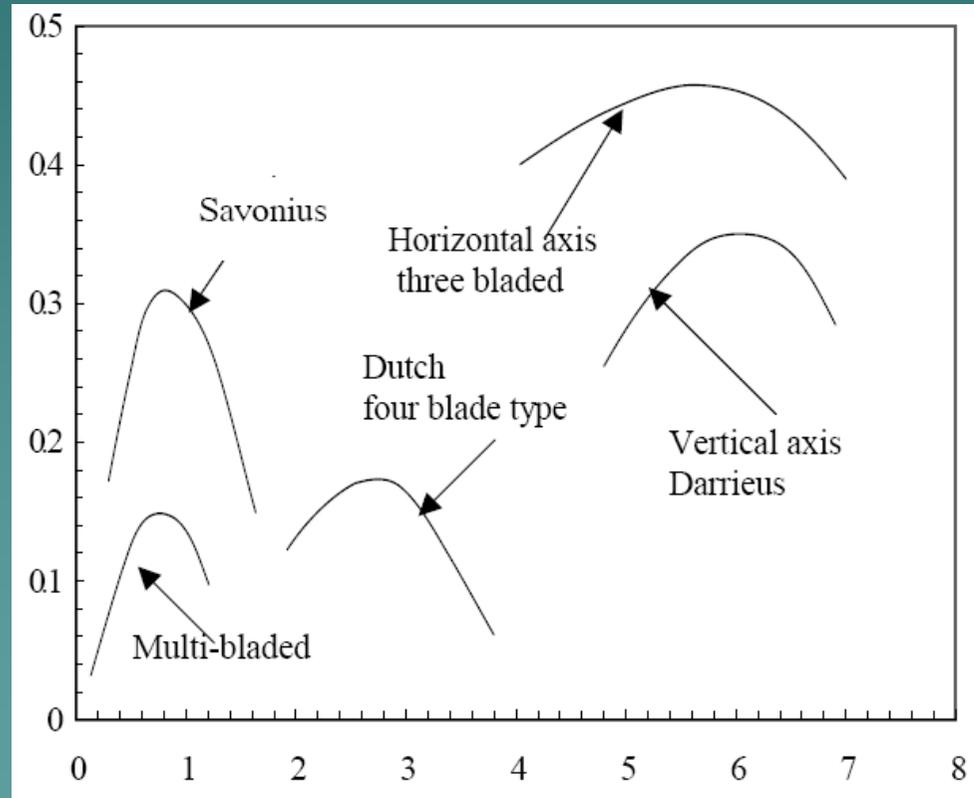
ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Características de los rotores

La eficiencia de la extracción de potencia depende de la dinámica entre el rotor y el viento

Eficiencia del rotor vs TSR



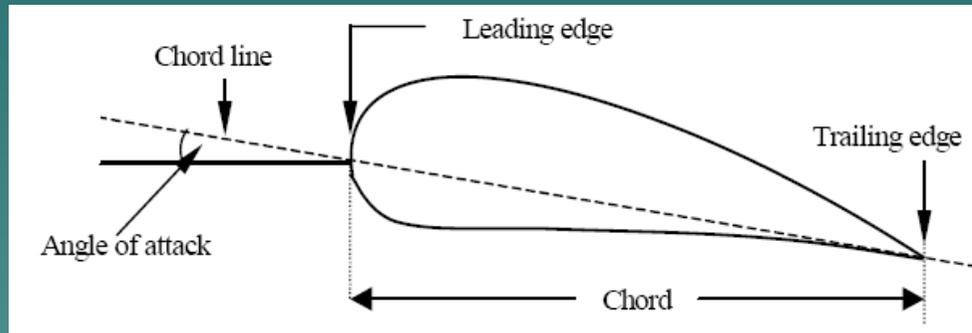
ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Aerodinámica de las turbinas de viento

Originalmente se emplearon las teorías típicas de la aeronavegación

Sin embargo ya se han desarrollados teorías mas refinadas para las turbinas de viento

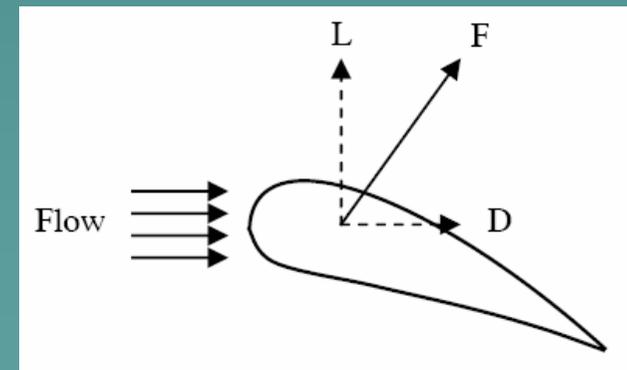


Una fuerza de “sustentación” o “empuje” perpendicular a la dirección del flujo de aire:

$$L = C_L \frac{1}{2} \rho_a AV^2$$

Y una fuerza de “arrastre”:

$$D = C_D \frac{1}{2} \rho_a AV^2$$



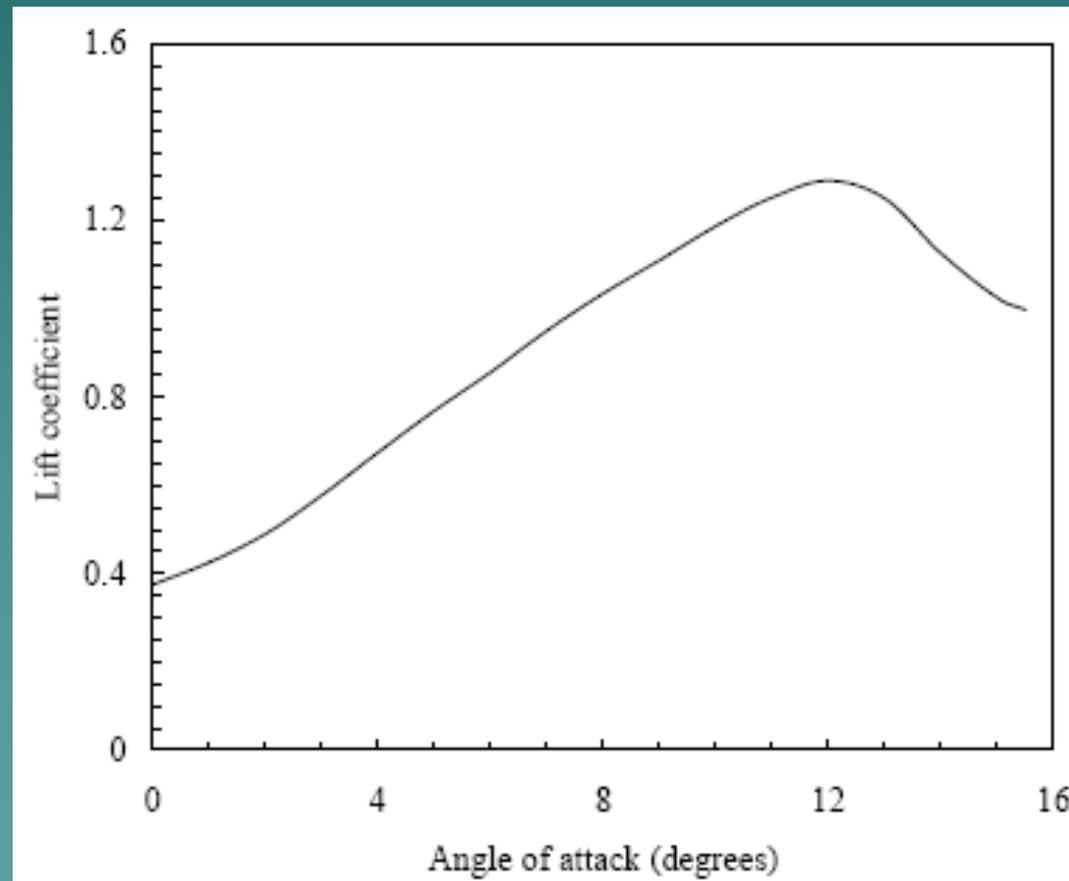
C_L y C_D , coeficientes de sustentación y arrastre, respectivamente

ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Aerodinámica de las turbinas de viento

Efecto del ángulo de ataque



ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Aerodinámica de las turbinas de viento

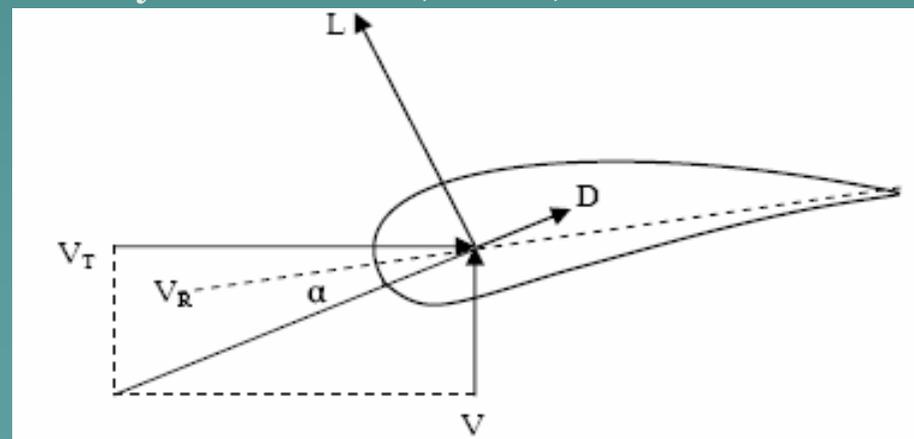
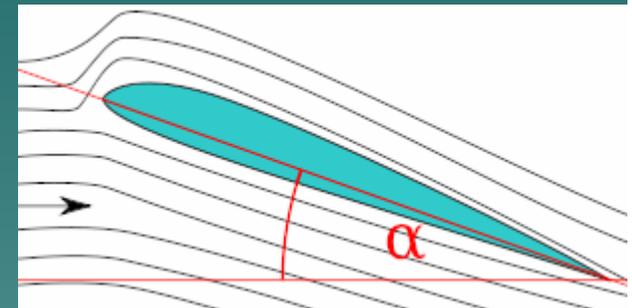
La dirección del viento con la cuerda (chord) se conoce como ángulo de ataque α

Existe un α para el cual se alcanza la máxima sustentación

C_L y C_D se obtienen, para distintos perfiles, en túneles de viento en donde se miden ambas fuerzas para distintos ángulos, y luego se emplean las expresiones anteriores

El ángulo óptimo será aquel que maximice L y minimice D ; o sea, la mínima relación C_D/C_L

Tal ángulo de ataque es variable a lo largo de la longitud de la pala



ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Aerodinámica de las turbinas de viento

Otro factor que afecta las fuerzas de empuje y arrastre es el número de Reynolds

El número de Reynolds es la relación entre la fuerza gravitacional y la fuerza viscosa.

Si se considera el flujo alrededor de una pala:

$$R_e = \frac{VC}{\gamma}$$

V es la velocidad del flujo

C es la longitud de la cuerda

γ es la viscosidad cinemática del fluido

Para el aire a 20°C, γ es $15 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; y para una C de 0,33m en un flujo de 7 m/s el $R_e = 1,54 \times 10^5$

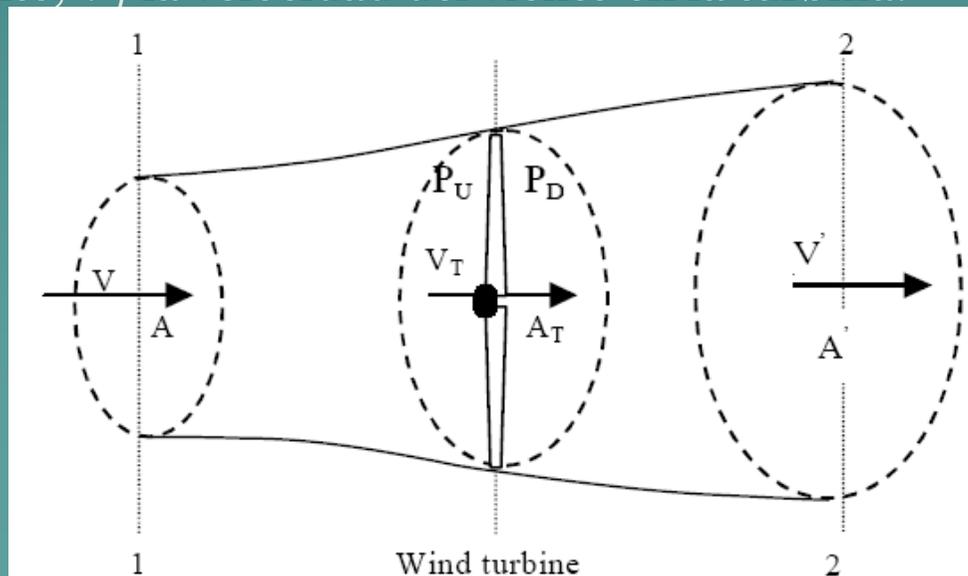
ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Teorías aerodinámicas: Teoría del momento axial

- ◆ Se asume condiciones de flujo ideal: incompresible y homogéneo
- ◆ El rotor tiene infinitas palas
- ◆ La presión a la entrada y a la salida del rotor es la atmosférica
- ◆ Se desprecia la fricción

Una turbina con un rotor de área A_T se encuentra en un túnel de viento en el cual A y A' son las respectivas áreas en las secciones 1 y 2 y las velocidades del viento V y V' respectivamente; V_T la velocidad del viento en la turbina:



ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Teorías aerodinámicas: Teoría del momento axial

Ley de conservación de la masa:

$$\rho_a AV = \rho_a A_T V_T = \rho_a A' V'$$

La fuerza de empuje F sobre el rotor es la diferencia entre el momento del viento entrante y el saliente:

$$F = \rho_a AV^2 - \rho_a A' V'^2$$

Como se cumple que:

$$AV = A'V' = A_T V_T$$

Entonces:

$$F = \rho_a A_T V_T (V - V')$$

Esta fuerza también se puede expresar en función de la diferencia de presión antes (p_U) y después (p_D) del rotor:

$$F = (p_U - p_D) A_T$$

Aplicando Bernoulli a las secciones 1 y 2 y suponiendo que las presiones estáticas en 1 y 2 es la presión atmosférica p :

$$p + \frac{\rho_a V^2}{2} = p_U + \frac{\rho_a V_T^2}{2}$$

$$p + \frac{\rho_a V'^2}{2} = p_D + \frac{\rho_a V_T^2}{2}$$

ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Teorías aerodinámicas: Teoría del momento axial

Restando las dos anteriores:

$$p_U - p_D = \frac{\rho_a (V^2 - V'^2)}{2}$$

Sustituyendo esto en la expresión de F en función de las presiones:

$$F = \frac{\rho_a A_T (V^2 - V'^2)}{2}$$

De esta última y de $F = \rho_a A_T V_T (V - V')$ se obtiene:

$$V_T = \frac{(V + V')}{2}$$

O sea, la velocidad del viento en la sección del rotor es el promedio de velocidades antes y después.

Para indicar el grado de disminución de la velocidad del viento por la turbina desde su ingreso define el “*factor axial de inducción*” a :

$$a = \frac{(V - V_T)}{V}$$

ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Teorías aerodinámicas: Teoría del momento axial

Es posible escribir V_T y V' en términos de a :

$$V_T = V(1 - a) \quad V' = V(1 - 2a)$$

La potencia absorbida por la turbina se debe a la transferencia de energía cinética del aire al rotor. El flujo de masa por unidad de tiempo a través del rotor es:

$$m = \rho A_T V_T$$

La potencia desarrollada por la turbina debido a esa transferencia de energía cinética es:

$$P_T = \frac{1}{2} \rho_a A_T V_T (V^2 - V'^2)$$

Si se sustituyen V_T y V' se tendrá:

$$P_T = \frac{1}{2} \rho_a A_T V^3 4a(1 - a)^2$$

Si se compara esta ecuación con la ya presentada anteriormente:

$$C_p = \frac{2P_T}{\rho_a A_T V^3}$$

ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Teorías aerodinámicas: Teoría del momento axial

Se llega a que:

$$C_p = 4a(1-a)^2$$

Para que C_p sea máximo:

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

Si esto se hace, se llega a $a = 1/3$

Si este valor de a se introduce en la expresión de C_p , se obtiene el máximo coeficiente de potencia teórica de una turbina de eje horizontal que será $16/27$, con lo que la máxima potencia producida será:

$$P_{TMAX} = \frac{1}{2} \rho_a A_T V^3 \frac{16}{27}$$

Tal límite del coeficiente de potencia se denomina ***límite de Betz***

ENERGÍA EÓLICA (EE)

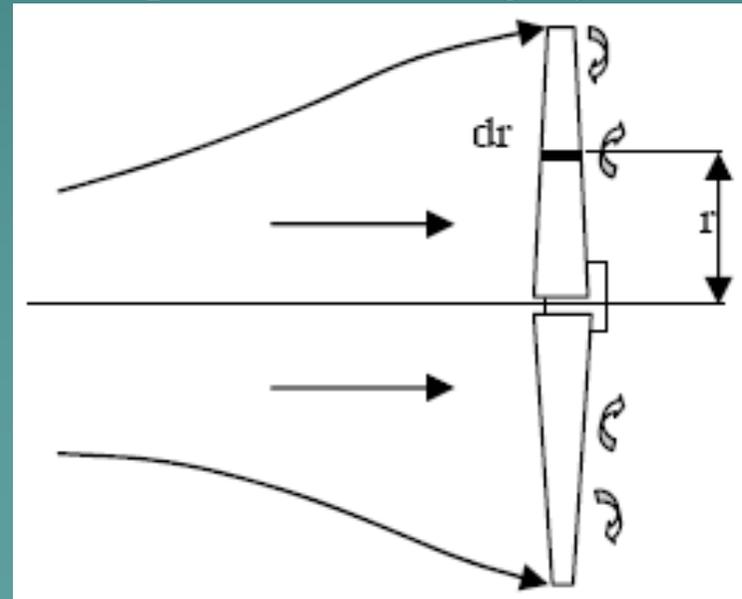
PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Teorías aerodinámicas: Teoría del momento axial

El flujo real es distinto del ideal que se está considerando:

- ◆ El rotor real no tiene infinitas palas
- ◆ No se puede despreciar las pérdidas por empuje
- ◆ El flujo delante y detrás de la turbina no es completamente axial

Cuando el fluido produce un torque sobre el rotor, como una reacción, se genera una estela rotacional detrás del rotor que produce pérdidas de energía y reduce por lo tanto el coeficiente de potencia máximo



ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Teorías aerodinámicas: Teoría del momento axial

Considerando el flujo tangencial saliente del rotor se introduce otro factor llamado factor de inducción tangencial a' :

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega}$$

ω es la velocidad angular tangencial inducida del flujo y Ω es la velocidad angular del rotor

Si se toma un anillo del tubo de espesor dr a una distancia r del centro de la pala, el área del tal elemento será:

$$dA = 2\pi r dr$$

La fuerza de empuje desarrollada en tal elemento:

$$dF = 4a(1-a)\frac{1}{2}\rho_a V^2 2\pi r dr$$

Y el torque sobre tal elemento:

$$dT = 4a'(1-a)\frac{1}{2}\rho_a V 2\pi r dr \Omega r$$

ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Teorías aerodinámicas: Teoría del momento axial

La potencia es el torque por la velocidad angular integrada a los largo de la pala:

$$P = \int_0^R \Omega 4a'(1-a) \frac{1}{2} \rho_a V 2\pi r dr \Omega r$$

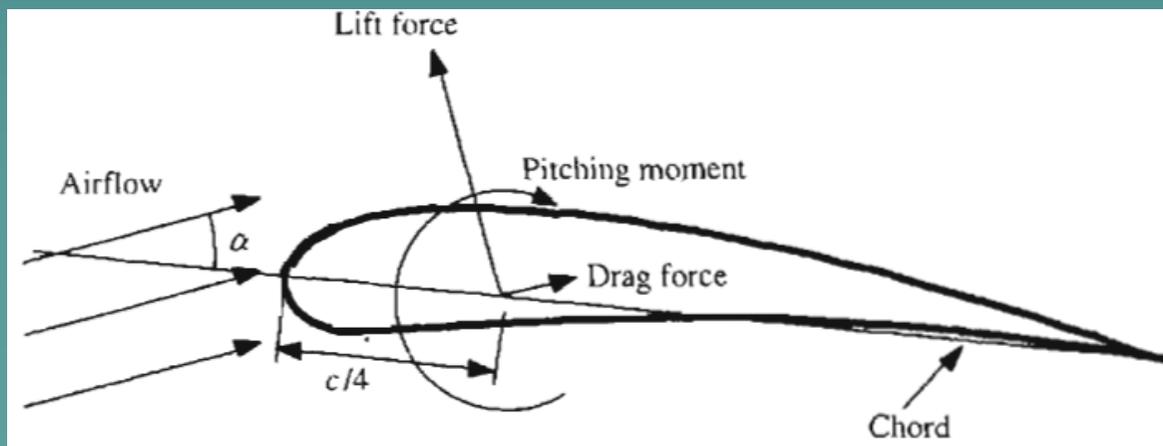
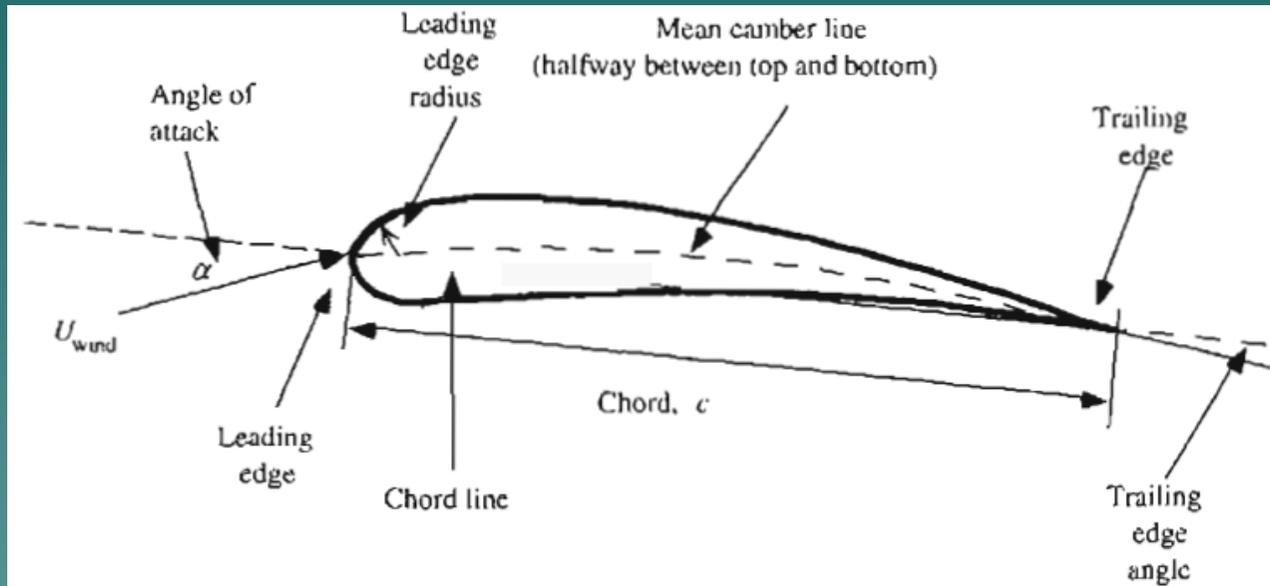
Y el coeficiente de potencia:

$$C_p = \frac{2}{\rho_a A_T V^3} \int_0^R \Omega 4a'(1-a) \frac{1}{2} \rho_a V 2\pi r dr \Omega r$$

ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Teorías aerodinámicas:



$$C_L = \frac{L/l}{\frac{1}{2}\rho V^2 c}$$

$$C_D = \frac{D/l}{\frac{1}{2}\rho V^2 c}$$

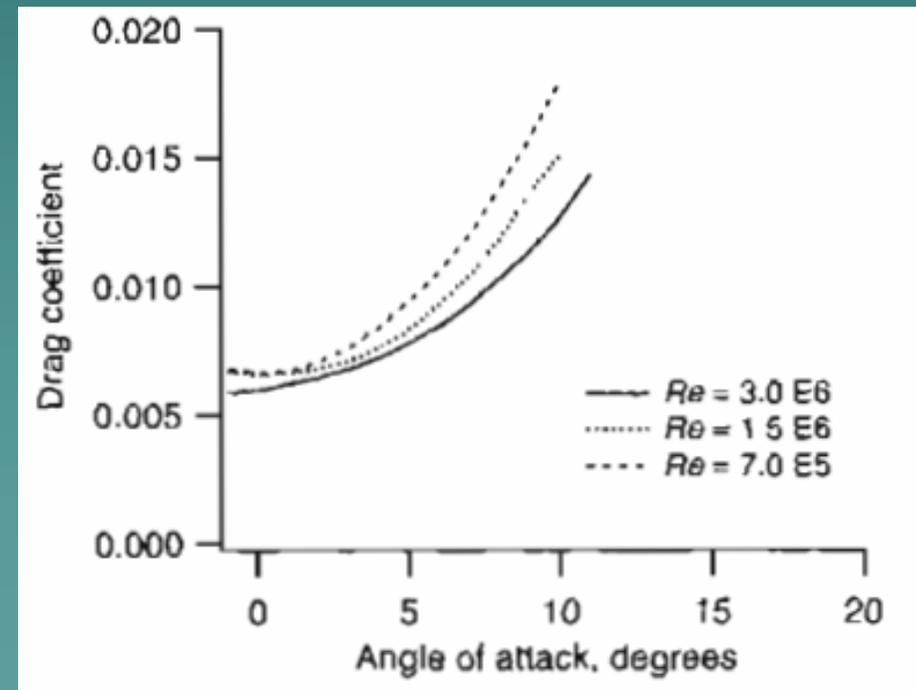
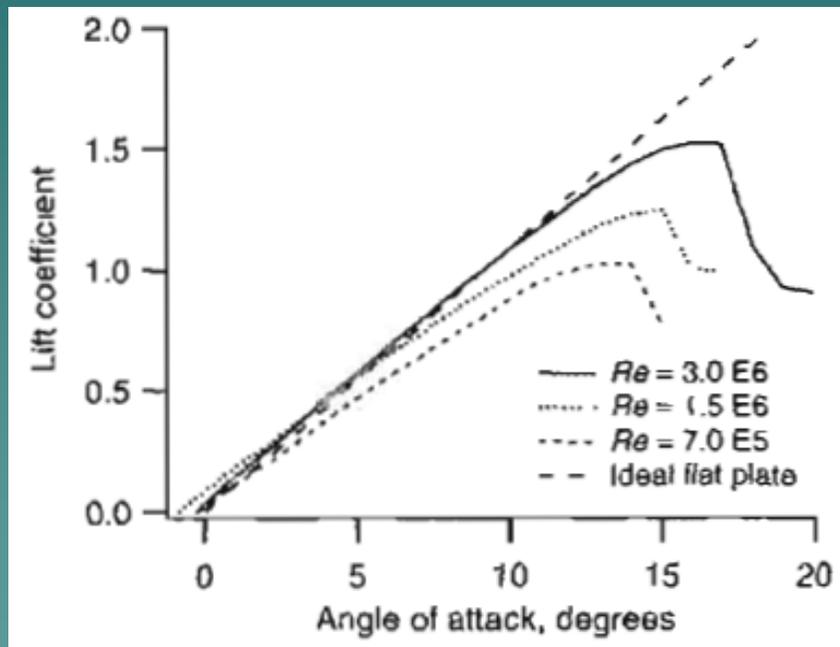
$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho V^2 A c}$$

ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Teorías aerodinámicas:

Comportamiento de un perfil simétrico en función del ángulo de ataque

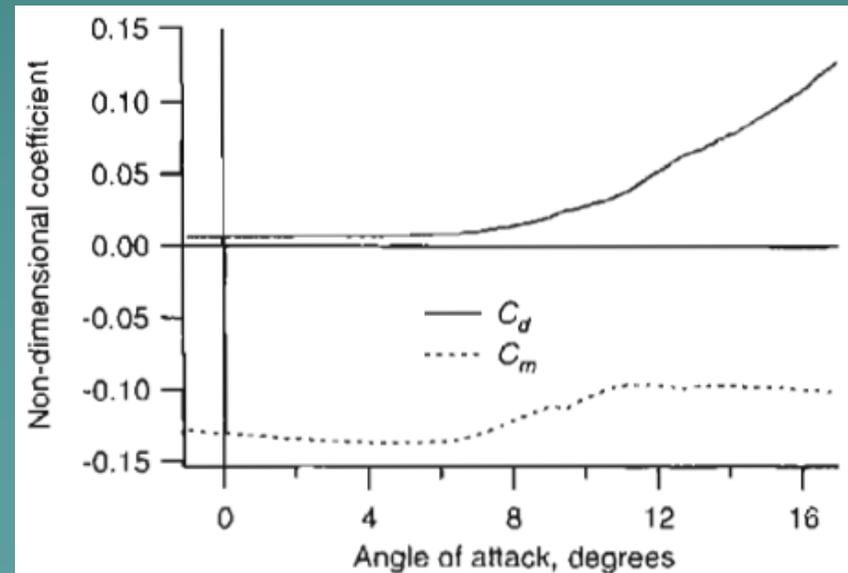
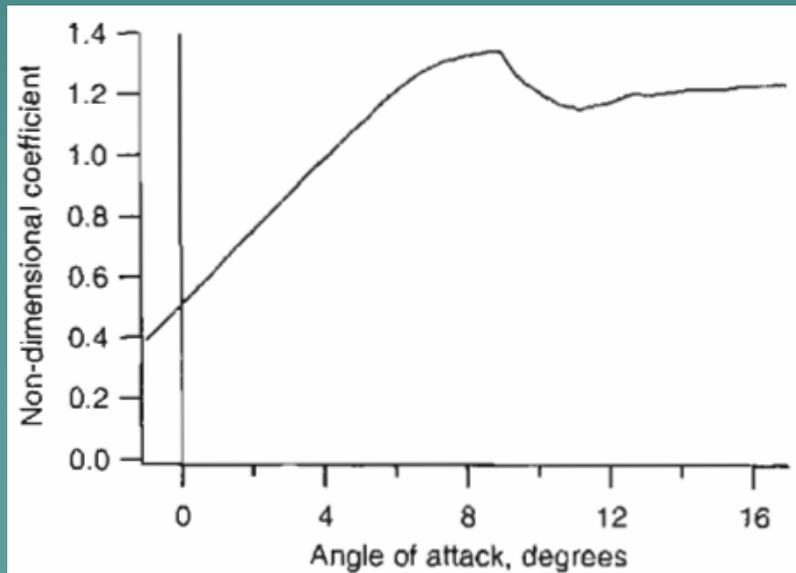
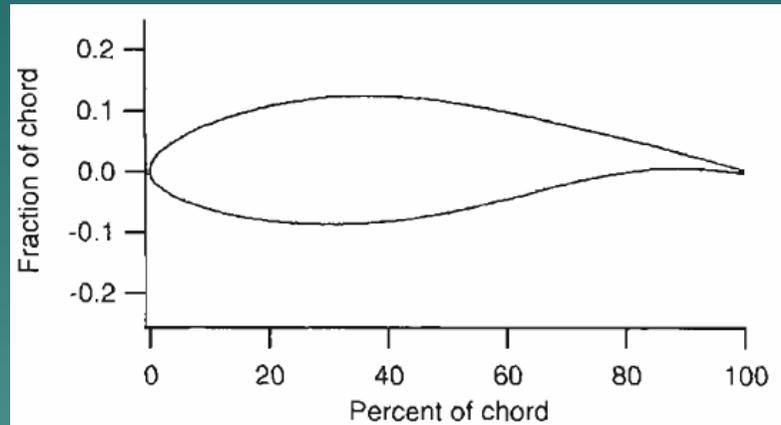


ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Teorías aerodinámicas:

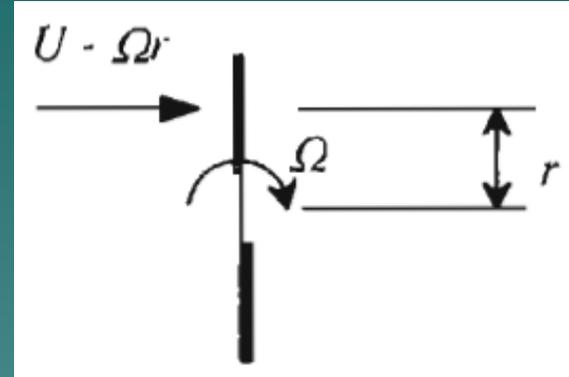
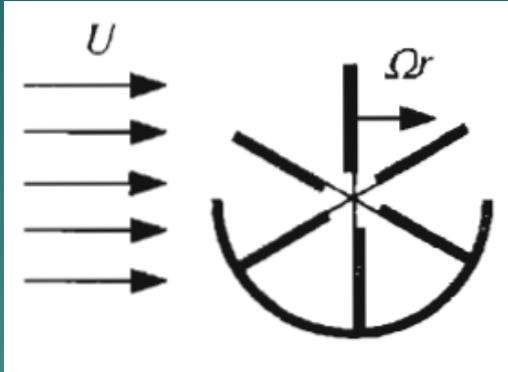
Otro perfil:



ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Teorías aerodinámicas: Máquinas de sustentación vs. máquinas de empuje



$$F_D = C_D \left[\frac{1}{2} \rho (V - \Omega r)^2 A \right] \quad \lambda = \frac{\Omega r}{V}$$

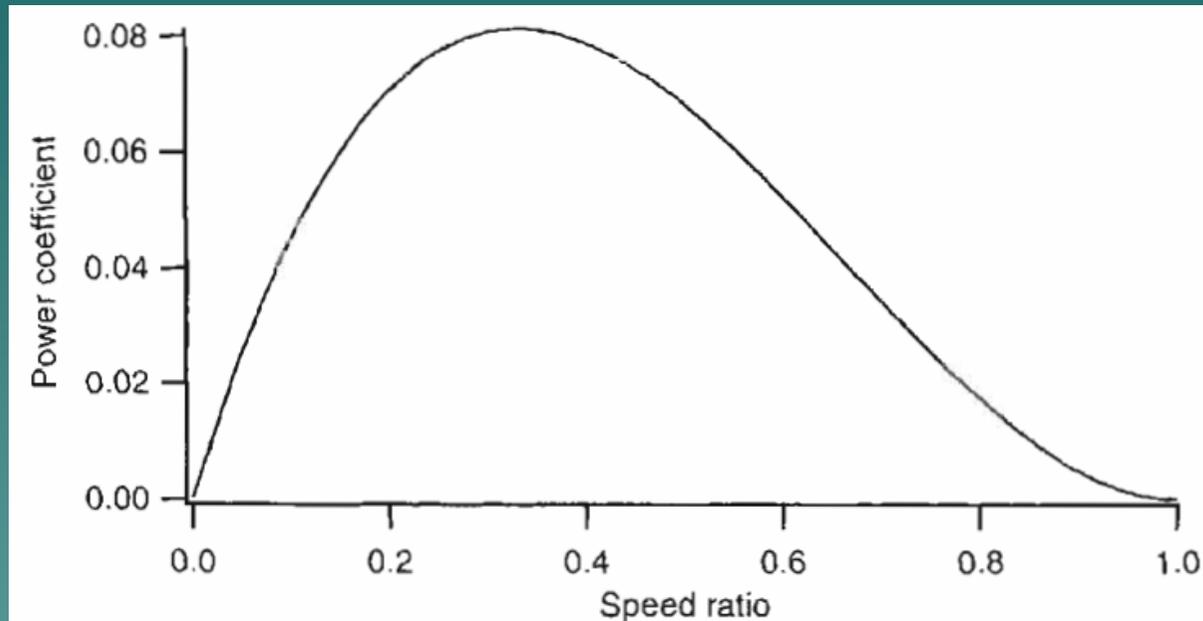
$$P = C_D \left[\frac{1}{2} \rho A (V - \Omega r)^2 \right] \Omega r = (\rho A V^3) \left[\frac{1}{2} C_D \lambda (1 - \lambda)^2 \right]$$

$$C_P = \left[\frac{1}{2} C_D \lambda (1 - \lambda)^2 \right]$$

ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Teorías aerodinámicas: Máquinas de sustentación vs. máquinas de empuje



Compárese este C_p con el visto anteriormente

La gran desventaja de las máquinas de empuje....el rotor no puede moverse más rápido que el viento.....

ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Teorías aerodinámicas: Máquinas de sustentación vs. máquinas de empuje
La gran diferencia entre las de sustentación y empuje es la más alta velocidad relativa del viento que se puede alcanzar con las de sustentación...

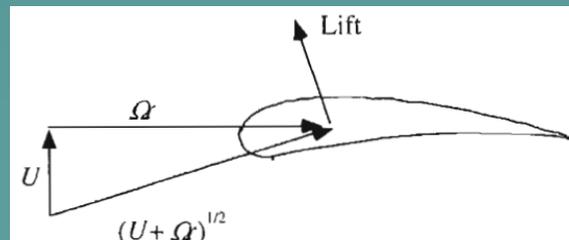
Por otro lado, la fuerza de sustentación F_L :

$$F_L = C_L \left(\frac{1}{2} \rho A V_{rel}^2 \right)$$

Las velocidades relativas en las de sustentación son más altas que la del viento:

$$V_{rel} = \sqrt{V^2 + (\Omega r)^2} = V \sqrt{1 + \lambda^2}$$

Si en las de sustentación se puede trabajar con λ de hasta 10, las fuerzas posibles de alcanzar son mucho más grandes en sustentación que arrastre para una misma área..... Si las fuerzas son mayores, mayores serán los coeficientes de potencia....



ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Teorías aerodinámicas: Teoría de la pala o ala

Esta teoría considera que la pala es un conjunto continuo de palas de espesor infinitesimal.

Son aerodinámicamente independientes y no se interfieren entre ellas.

Las fuerzas de *empuje* o *sustentación* y la de *arrastre* se determinan integrando sobre a lo largo de la pala en términos de velocidad para obtener el torque y la potencia total.

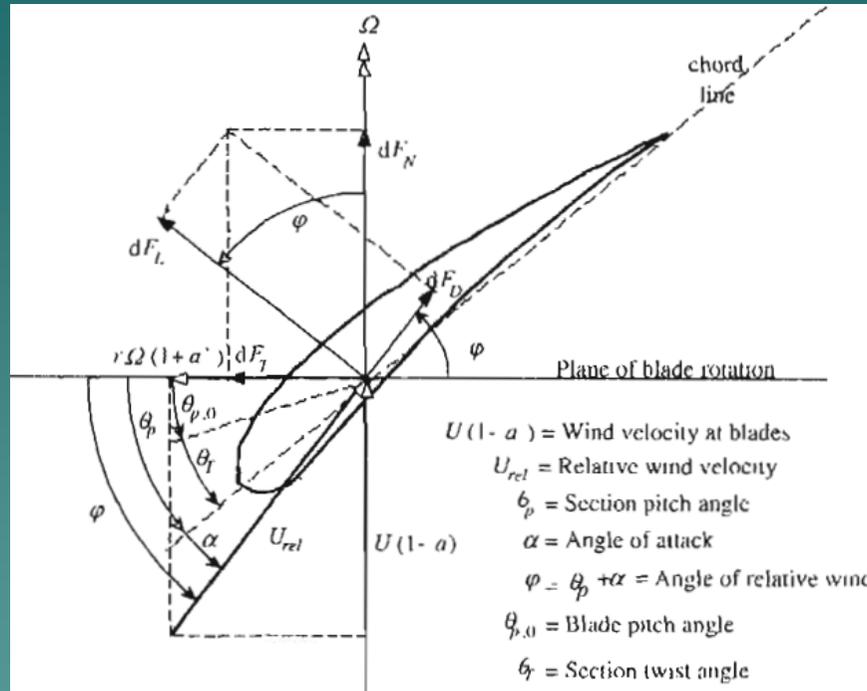
Esto luego se multiplica por el número de palas para obtener el torque y la potencia total sobre el rotor.

Esta teoría permite un mejor entendimiento de la relación entre las propiedades del aire, el empuje experimentado por el rotor y la potencia asociada

ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Teorías aerodinámicas: Teoría de la pala o ala



La velocidad no perturbada V es reducida a $(1-a)V$

La componente de velocidad $\Omega r (1+a')$ es la velocidad debido a la rotación de la pala y a' es el factor de inducción axial.

W es la velocidad resultante de las dos anteriores (V_{rel})

ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Teorías aerodinámicas: Teoría de la pala o ala

La fuerza de sustentación sobre un elemento infinitesimal será:

$$dF_L = \frac{1}{2} \rho_a C_d r W^2 C_L$$

C es la longitud de la cuerda

dr es el espesor de la sección considerada

C_L es el coeficiente de sustentación

La fuerza de arrastre:

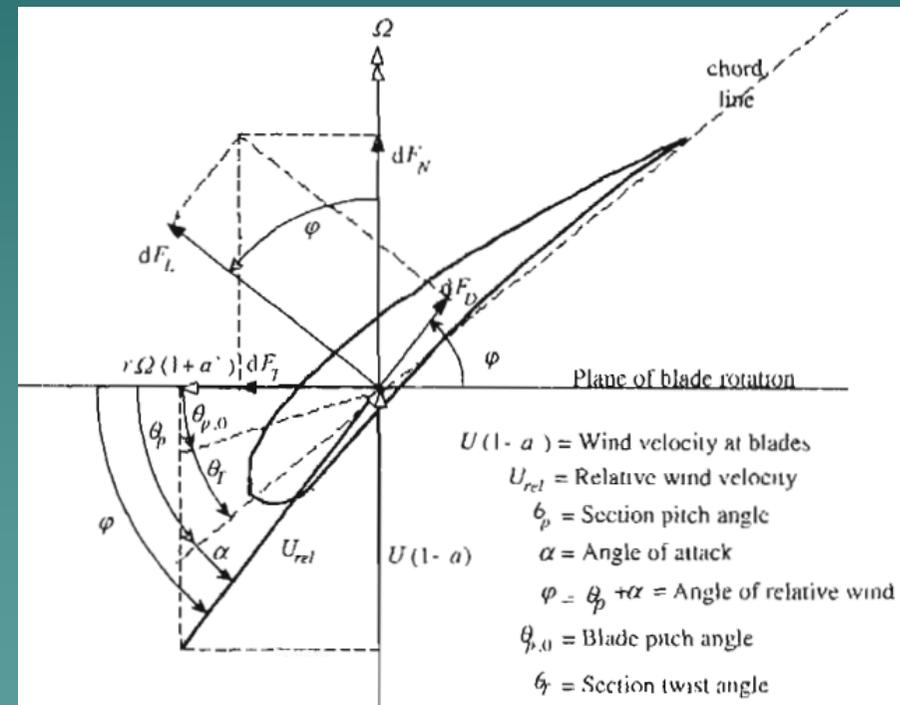
$$dF_D = \frac{1}{2} \rho_a C_d r W^2 C_D$$

C_D es el coeficiente de arrastre

Con lo cual:

$$dF_N = dF_L \cos \varphi + dF_D \sin \varphi$$

$$dF_T = dF_L \sin \varphi - dF_D \cos \varphi$$



ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Teorías aerodinámicas: Teoría de la pala o ala

El diferencial de Torque debido a la fuerza tangencial a una distancia r

Para el número total de palas (B):

$$dT = BrdF_T$$

$$dT = \frac{1}{2} \rho_a B W^2 [C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi] Crdr$$

De la figura se puede ver que:

$$\sin \varphi = \frac{V(1-a)}{W}$$

$$\cos \varphi = \frac{\Omega r(1+a')}{W}$$

Y también:

$$W = \left[V^2 (1-a)^2 + \Omega^2 r^2 (1+a')^2 \right]^{1/2}$$

El torque total se puede calcular integrando el torque sobre este elemento desde el centro al extremo de la pala y la potencia multiplicando tal torque por la velocidad angular

ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Teorías aerodinámicas: Una combinación de las dos anteriores

De acuerdo a la teoría del momento axial, la fuerza axial sobre un anillo será:

$$dF = 4a(1-a)\frac{1}{2}\rho_a V^2 2\pi r dr$$

Por otro lado, según la teoría de la pala:

$$dF = \frac{1}{2}\rho_a BC dr W^2 [dL \cos \varphi + dD \sin \varphi]$$

Y la velocidad resultante:

$$W = \frac{(1-a)V}{\sin \varphi}$$

De la combinación de las tres anteriores:

$$\frac{a}{(1-a)} = \frac{BC}{8\pi r} \frac{[dL \cos \varphi + dD \sin \varphi]}{\sin^2 \varphi}$$

Se define la solidez local como $\sigma_r = \frac{BC}{2\pi r}$ y entonces $\frac{a}{(1-a)} = \frac{\sigma_r}{4} \frac{[dL \cos \varphi + dD \sin \varphi]}{\sin^2 \varphi}$

ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Teorías aerodinámicas: Una combinación de las dos anteriores

Por otro lado, según la teoría del momento, el torque:

$$dT = 4a'(1-a)\frac{1}{2}\rho_a V 2\pi r dr r \Omega r$$

Y según la teoría de la pala:

$$dT = \frac{1}{2}\rho_a B C r dr W^2 [C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi]$$

De la figura puede deducirse:

$$W = \frac{(1-a)V}{\sin \varphi} = \frac{(1+a')\Omega r}{\cos \varphi}$$

De la combinación de las tres anteriores se llega a una expresión para el factor de inducción tangencial:

$$\frac{a'}{(1+a')} = \frac{\sigma_r [dL \sin \varphi + dD \cos \varphi]}{4 \sin \varphi \cos \varphi}$$

Y la potencia y el coeficiente de potencia:

$$P = \int_0^R \Omega dT \quad C_p = \frac{2}{\rho_a A_T V^3} \int_0^R \Omega dT$$

ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Diseño del rotor

La potencia esperada P_D en el punto de diseño es:

$$P_D = \frac{1}{2} C_{PD} \eta_d \eta_g \rho_a A_T V_D^3$$

C_{PD} es el coeficiente de potencia de diseño del rotor (0,4-0,45)

η_d , es la eficiencia del mecanismo de conversión

η_g , es la eficiencia del generador

V_D , es la velocidad del viento de diseño

De allí el radio del rotor:

$$R = \left[\frac{2P_D}{C_{PD} \eta_d \eta_g \rho_a \pi V_D^3} \right]^{\frac{1}{2}}$$

ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Diseño del rotor

Si el diseño se basa en la energía requerida para una aplicación específica (E_A):

$$R = \left[\frac{2E_A}{\eta_S \rho_a \pi V_M^3 T} \right]^{\frac{1}{2}}$$

η_S , es la eficiencia del conjunto del sistema

V_M , es la velocidad media del viento en determinado período

T , es la cantidad de horas en el período

El λ (o *TSR, Tip Speed Ratio*) de una turbina para generación de electricidad deberá ser relativamente alto ya que tendrá una relativamente alta velocidad de funcionamiento (puede ser mayor que 5)

Esta muy relacionado el número de palas con λ :

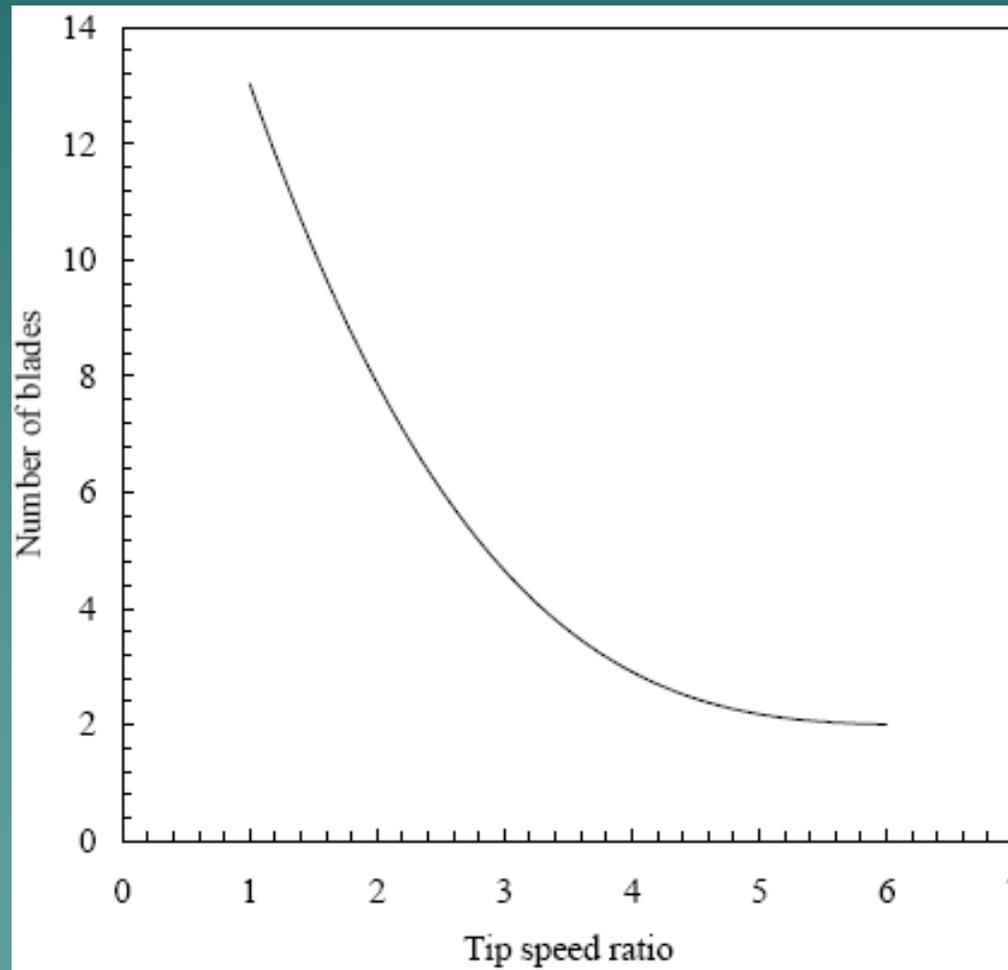
Alto λ , menor número de palas

ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Diseño del rotor

Número de palas (B) y λ de diseño



ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Diseño del rotor

Se ha mostrado que el máximo coeficiente de potencia se obtiene para un factor de inducción axial de $1/3$.

Una alternativa es aplicar a las ecuaciones de momento axial y a la de la teoría de la pala esa condición ($a = 1/3$)

Sería una forma de pala para la obtención de máxima potencia para un λ de diseño dado

Se supondrá:

- ◆ No hay rotación del aire ($a' = 0$)
- ◆ No hay arrastre ($C_D = 0$)
- ◆ No hay pérdidas debido al número finito de palas
- ◆ Por el rotor óptimo de Betz, se cumple $a = 1/3$ para cada tubo anular

ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Diseño del rotor

Primero se selecciona un λ de diseño, un número de palas B , un radio R de pala (puede ser determinado por la potencia necesaria) y un perfil de pala con C_L y C_D conocido en función de α .

Se seleccionará para esta situación un α tan óptimo que $C_D = 0$

En esta condición se tratará de determinar la longitud de la cuerda y el ángulo de la pala (θ) que alcance el límite de Betz

Según la teoría del momento:

$$dT = 4a(1-a)\rho_a V^2 \pi r dr = \rho_a V^2 4\left(\frac{1}{3}\right)\left(1-\frac{1}{3}\right)\pi r dr = \rho_a V^2 \frac{8}{9}\pi r dr$$

Y de la teoría de la pala y con $C_D = 0$, se tendrá:

$$dF_N = B \frac{1}{2} \rho_a W^2 (C_L \cos \varphi) c dr$$

ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Diseño del rotor

La velocidad relativa (W o V_{rel}):

$$W = V_{rel} = V(1 - a) / \sin \varphi = \frac{2V}{3 \sin \varphi}$$

De la combinación de las 3 últimas:

$$\frac{C_L Bc}{4\pi r} = \tan \varphi \sin \varphi$$

De esta ecuación ya presentada, puede hacerse $a' = 0$ y $a = 1/3$

$$W = \frac{(1 - a)V}{\sin \varphi} = \frac{(1 + a')\Omega r}{\cos \varphi}$$

Con lo que se tendrá:

$$\tan \varphi = \frac{2}{3\lambda_r}$$

ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Diseño del rotor

A partir de lo anterior:

$$\frac{C_L Bc}{4\pi r} = \left(\frac{2}{3\lambda_r} \right) \sin \varphi$$

El lambda de punta se mantiene a lo largo de la pala,

$$\lambda_r = \lambda \left(\frac{r}{R} \right)$$

Con lo que el ángulo relativo del viento y la cuerda:

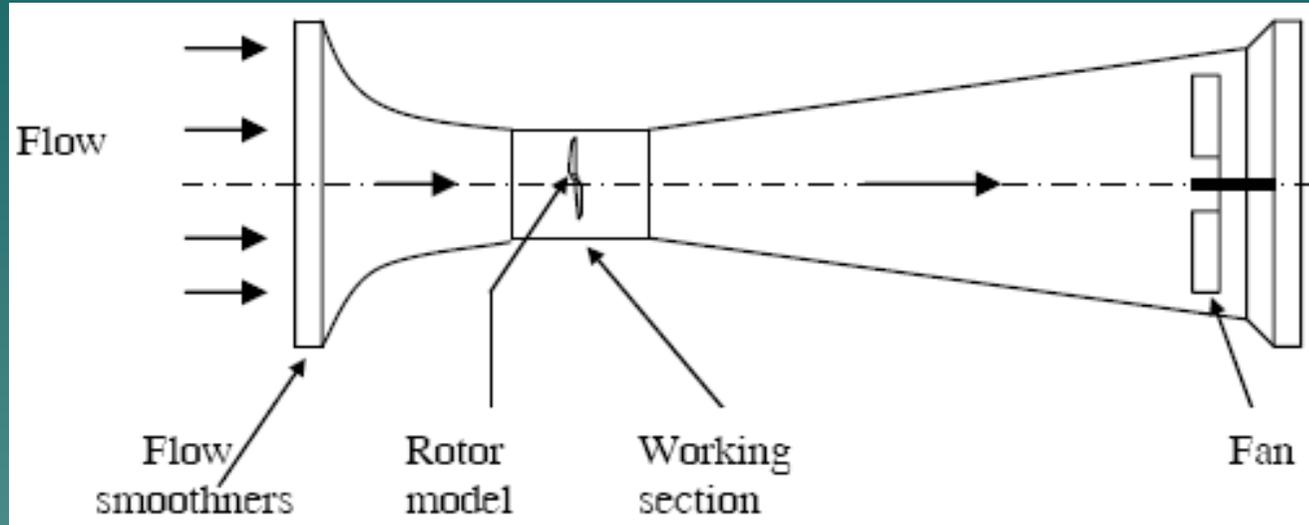
$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{2}{3\lambda_r} \right) \quad c = \frac{8\pi r \sin \varphi}{3BC_L \lambda_r}$$

Y por otro lado

$$\varphi = \theta + \alpha$$

ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE



El rotor se evalúa para **diferentes velocidades de viento y cargas en el eje**

Se generan **curvas potencia-velocidad y torque-velocidad**

A partir de esto último se puede estimar las relaciones C_p - λ del rotor

ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Ejemplo:

Observaciones medidas en el túnel de viento

4 m/s		6 m/s		8 m/s	
Rotor speed (r/min)	Power (W)	Rotor speed (r/min)	Power (W)	Rotor speed (r/min)	Power (W)
306	12.30	482	42.55	673	104.54
352	13.37	550	45.66	764	109.46
397	13.68	619	47.73	856	113.15
443	14.33	688	48.46	948	110.69
489	13.53	757	44.62	1039	100.85
535	11.99	768	43.58	1055	98.39

Sera posible determinar entonces los distintos coeficientes de potencia mediante:

$$C_p = \frac{8.P}{\pi \rho_a d^2 V^3}$$

Y los respectivos λ mediante:

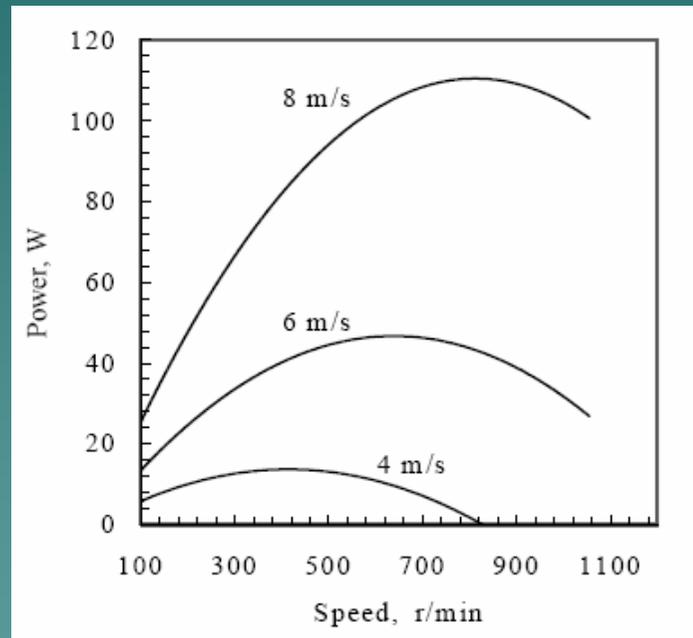
$$\lambda = \frac{\omega.r}{V}$$

ENERGÍA EÓLICA (EE)

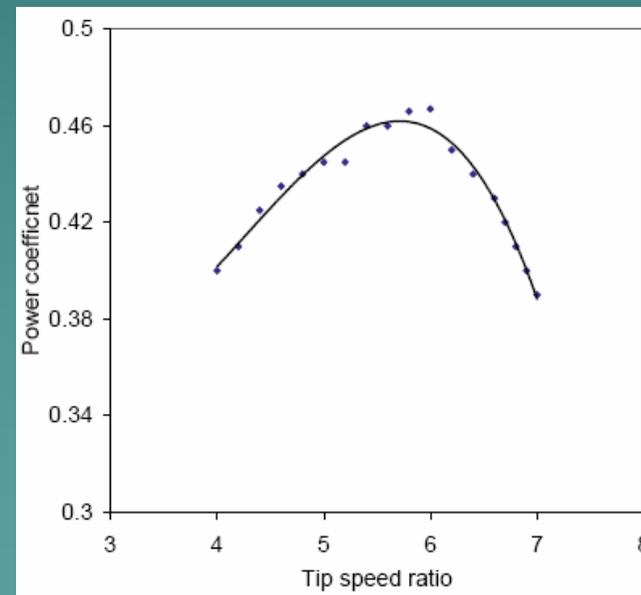
PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

Ejemplo:

Es posible construir la siguiente relación entre la potencia de salida y la velocidad de rotación



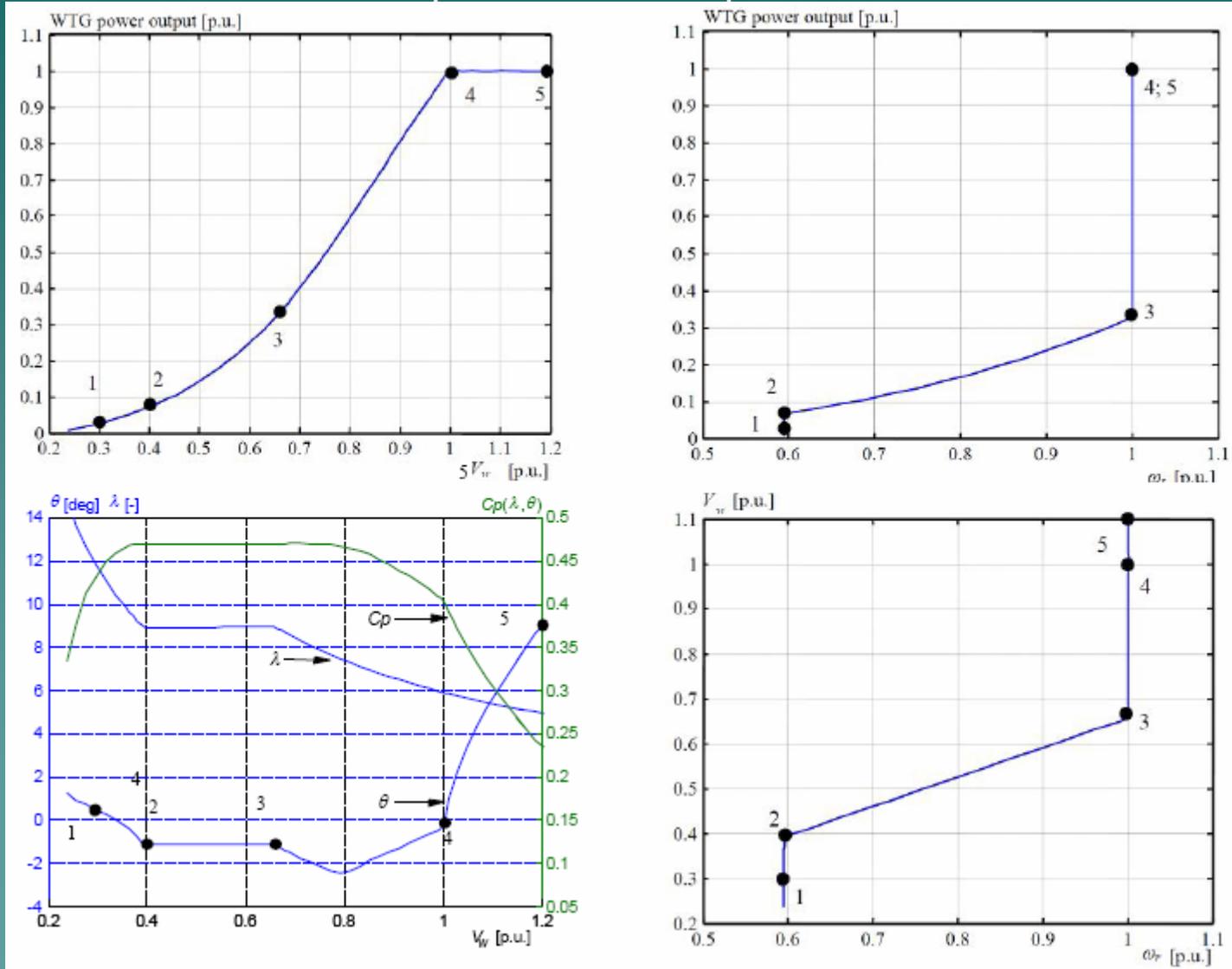
Y a partir de ello la siguiente relación entre el Coeficiente de Potencia y λ



ENERGÍA EÓLICA (EE)

PRINCIPIOS BÁSICOS DE CONVERSIÓN DE LA EE

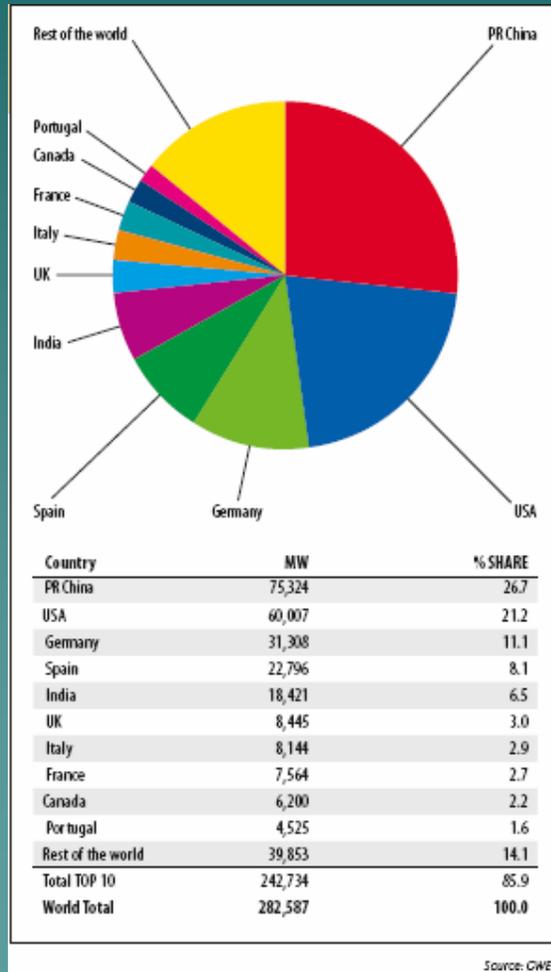
Curvas características de operación de maquina velocidad variable



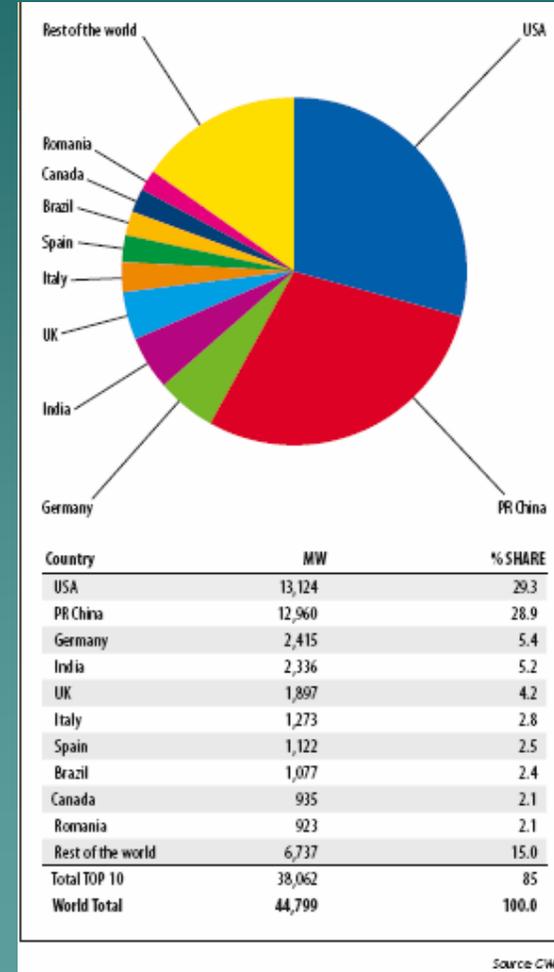
ENERGÍA EÓLICA (EE)

EVOLUCION Y SITUACION ACTUAL DE LA EE

Top 10 capacidad acumulada diciembre de 2012



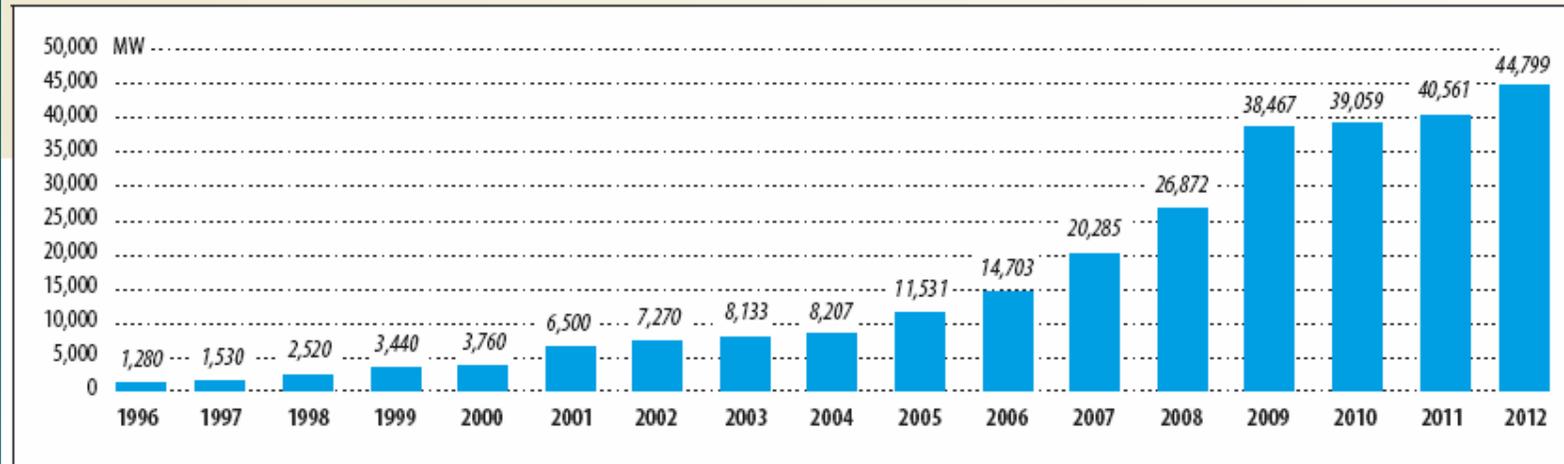
Top 10 capacidad instalada durante 2012



ENERGÍA EÓLICA (EE)

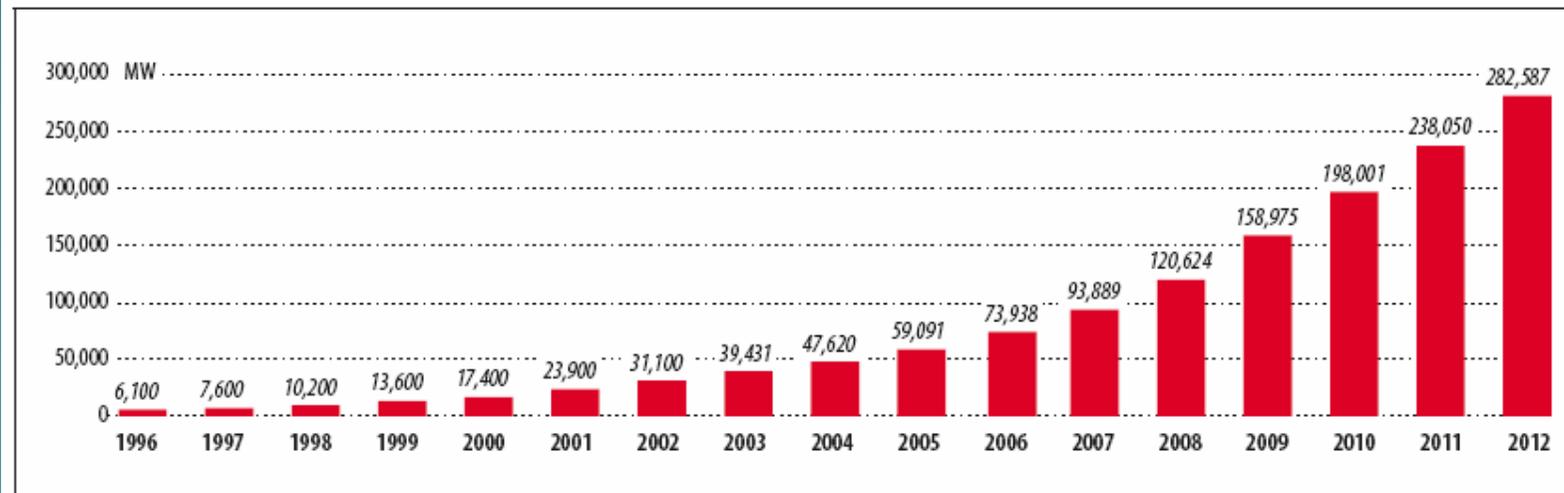
EVOLUCION Y SITUACION ACTUAL DE LA EE

Global Annual Installed Wind Capacity 1996-2012



Source: GWEC

Global Cumulative Installed Wind Capacity 1996-2012

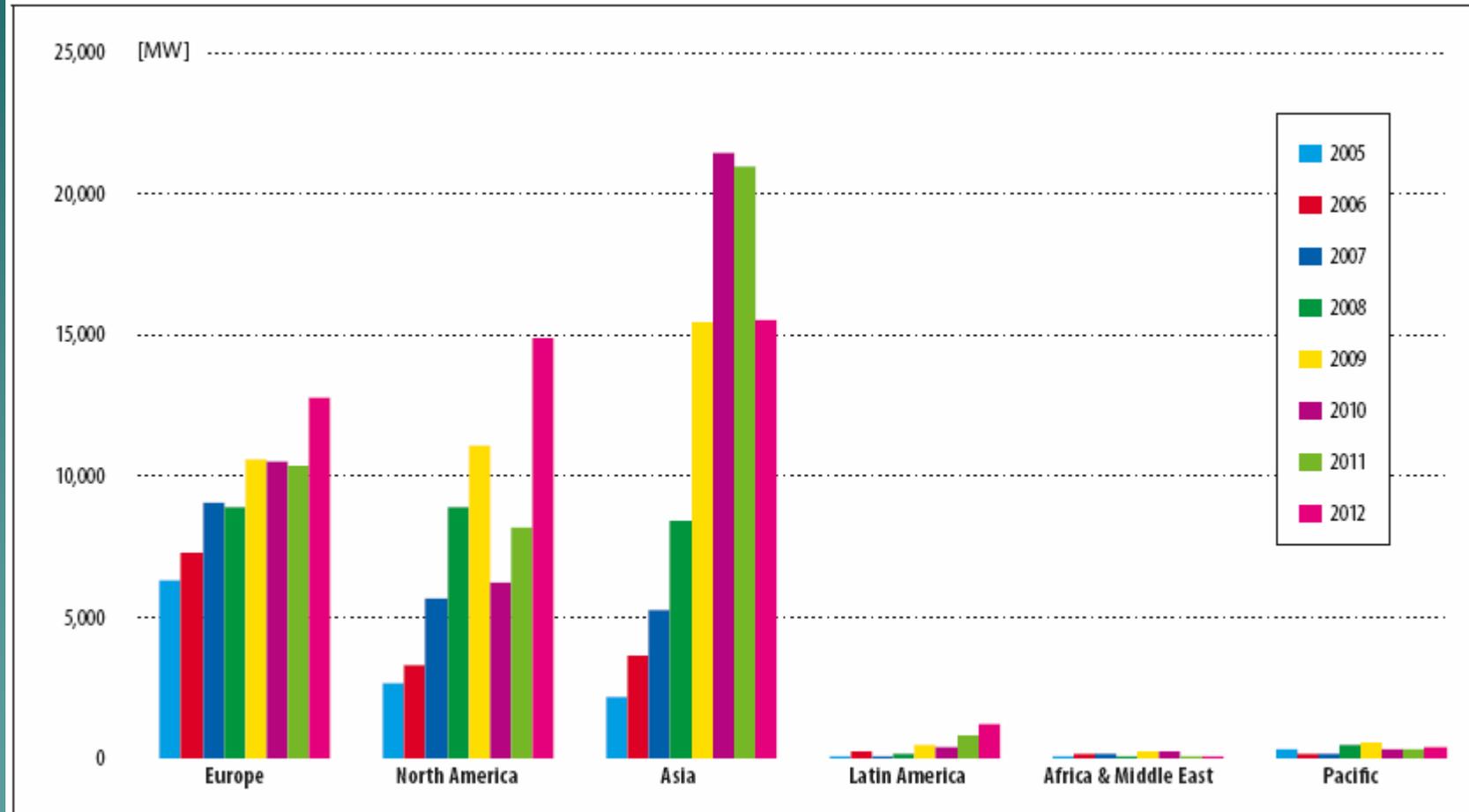


Source: GWEC

ENERGÍA EÓLICA (EE)

EVOLUCION Y SITUACION ACTUAL DE LA EE

Annual Installed Capacity by Region 2005-2012



Source: GWEC

ENERGÍA EÓLICA (EE)

EVOLUCION Y SITUACION ACTUAL DE LA EE

Latinoamérica en 2012 (según GWEC)

Brasil: 1.077 MW; 7.000 MW para 2016; 16.000 MW para 2021, según planes del gobierno. Se requerirían nuevos marcos regulatorios que den mayor certeza respecto del volumen de desarrollo esperado en el mediano y largo plazo...

Argentina: capacidad total instalada 167 MW; la situación crítica energética actual podría ser un importante disparador, muy alto potencial eólico... analistas (de la GWEC) dicen que el potencial eólico en argentina alcanzaría para satisfacer 7 veces la demanda de américa latina???......

Uruguay: sumo 9MW para disponer de 52 MW instalados en total

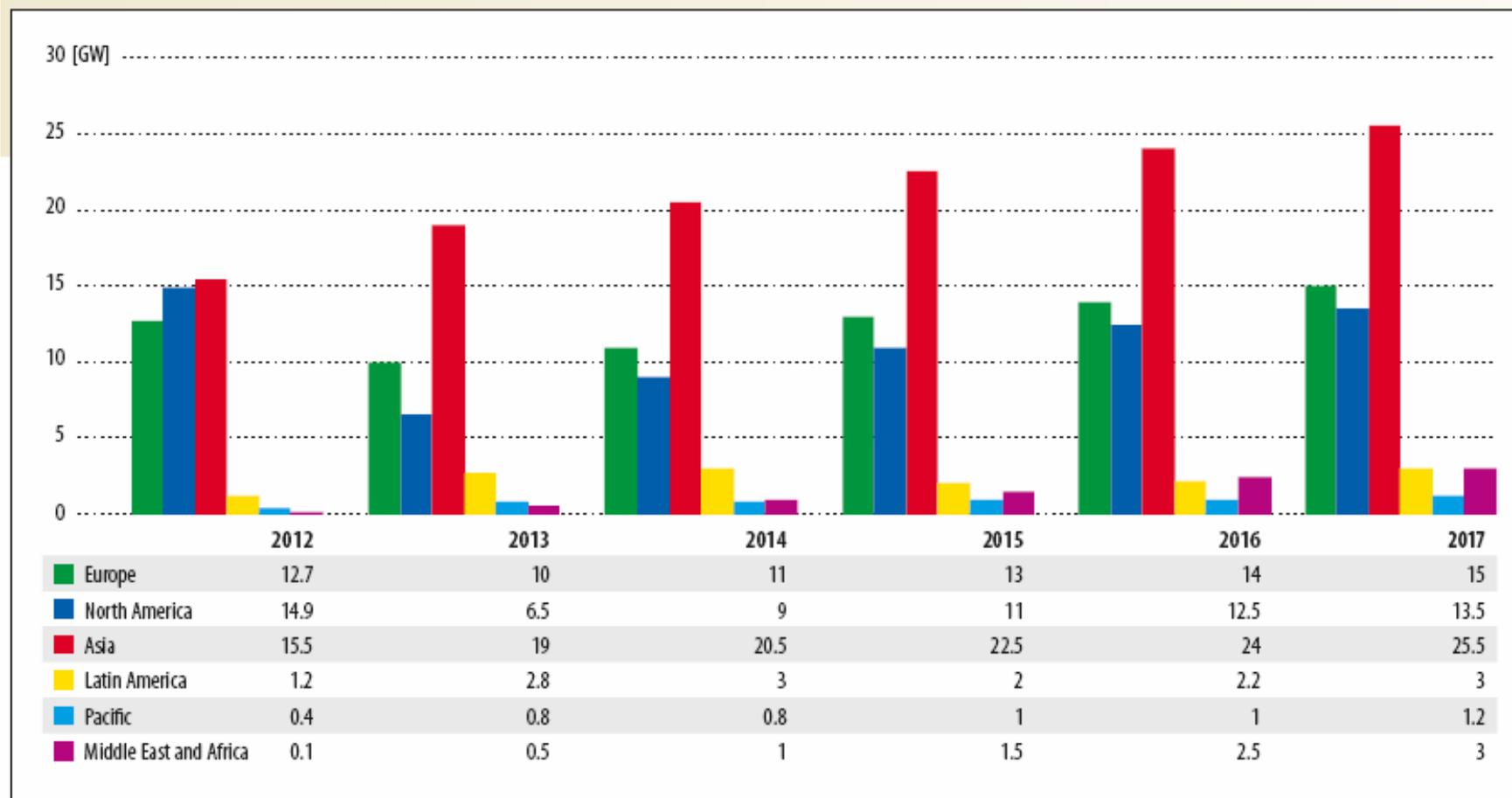
Venezuela: en 2012 otorgó sus primeros 30MW

ENERGÍA EÓLICA (EE)

EVOLUCION Y SITUACION ACTUAL DE LA EE

Instalaciones por año

Annual Market Forecast by Region 2012-2017



Source: GWEC

ENERGÍA EÓLICA (EE)

EVOLUCION Y SITUACION ACTUAL DE LA EE

Brasil:

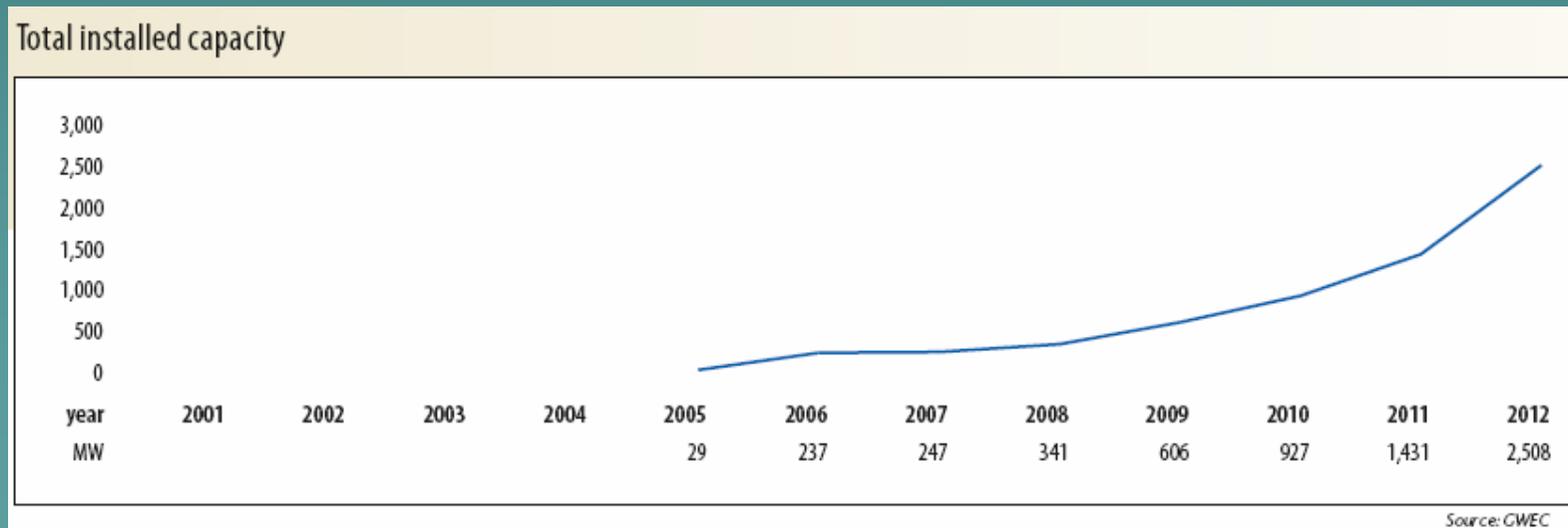
Potencia instalada actual (junio 2013): 2.788MW, suministrando el 2% del consumo total de energía.

Durante 2012 instala 1GW, 15.000 puestos de trabajo

La industria brasilera esta produciendo 2GW de equipamiento eólico por año, 1000 turbinas, 1000 torres y 3000 palas (para el mercado doméstico)

Se crean 15 nuevos puestos de trabajo por año por MW instalado... a ese ritmo, entre la creación directa e indirecta de mano de obra significarían 280.000 puestos de trabajo para el 2020

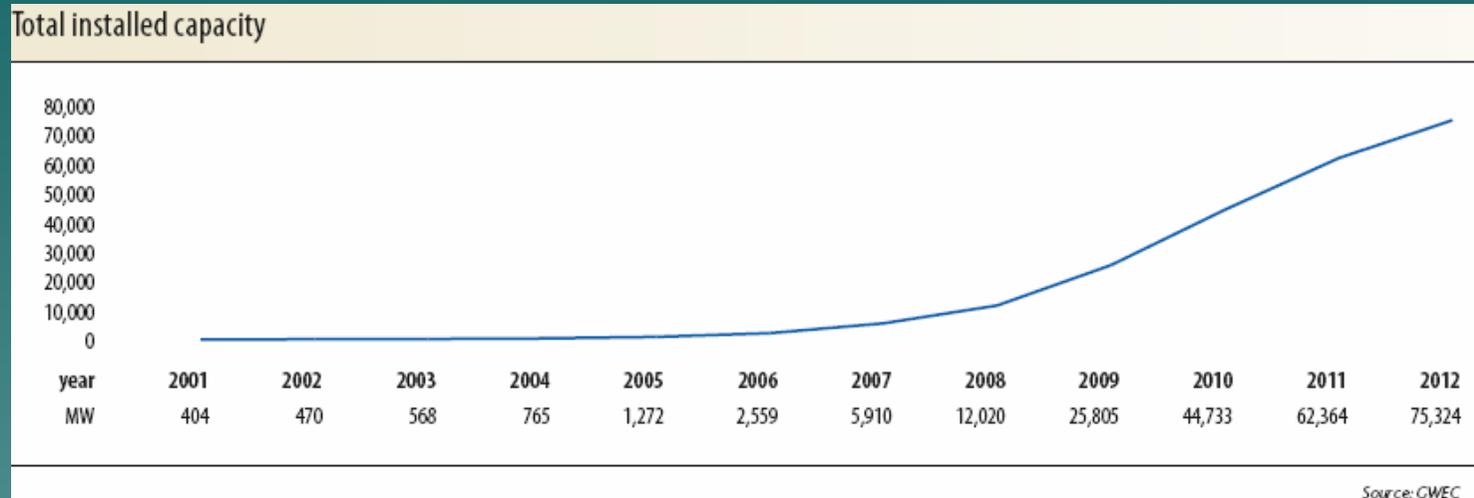
El plan de desarrollo eólico brasileño prevé 16 GW instalados para 2021 suministrando el 9% de la energía



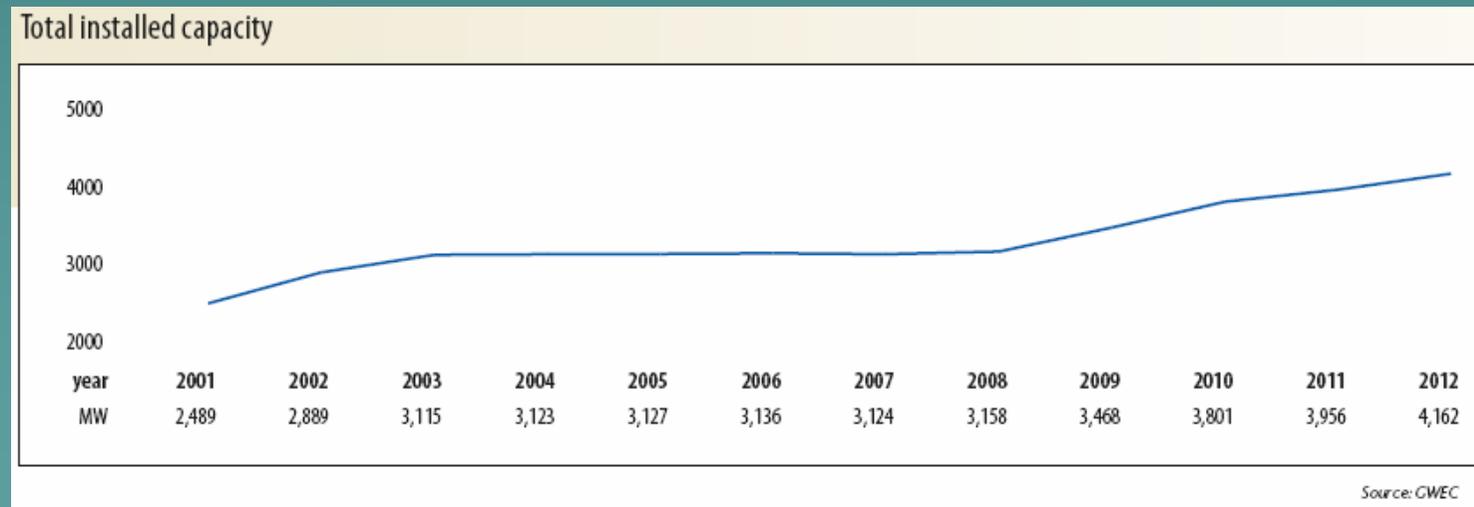
ENERGÍA EÓLICA (EE)

EVOLUCION Y SITUACION ACTUAL DE LA EE

Evolución China



Evolución Dinamarca

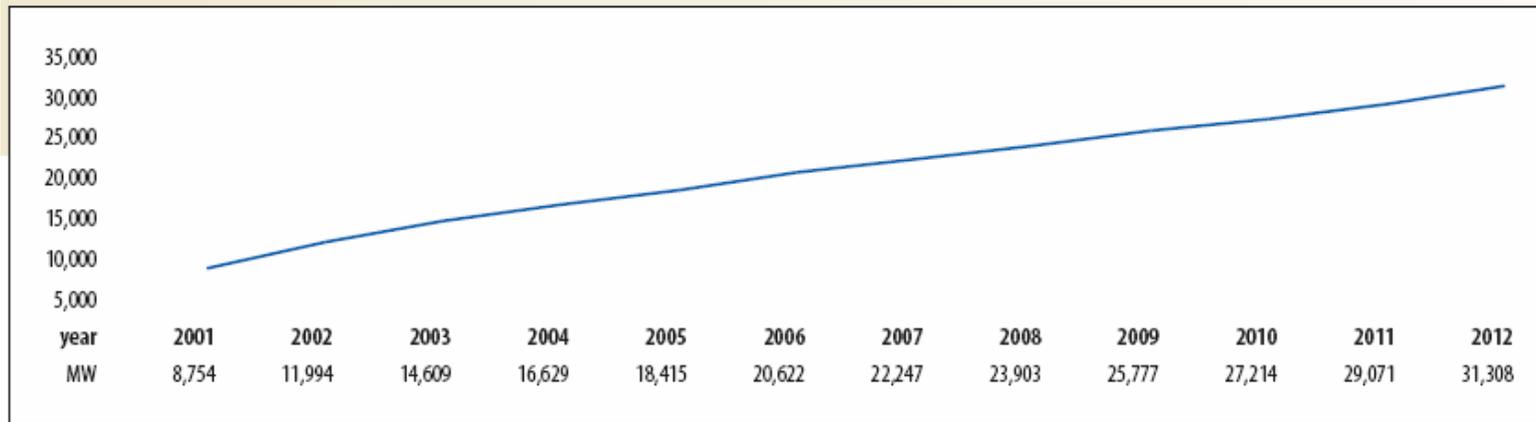


ENERGÍA EÓLICA (EE)

EVOLUCION Y SITUACION ACTUAL DE LA EE

Evolución Alemania

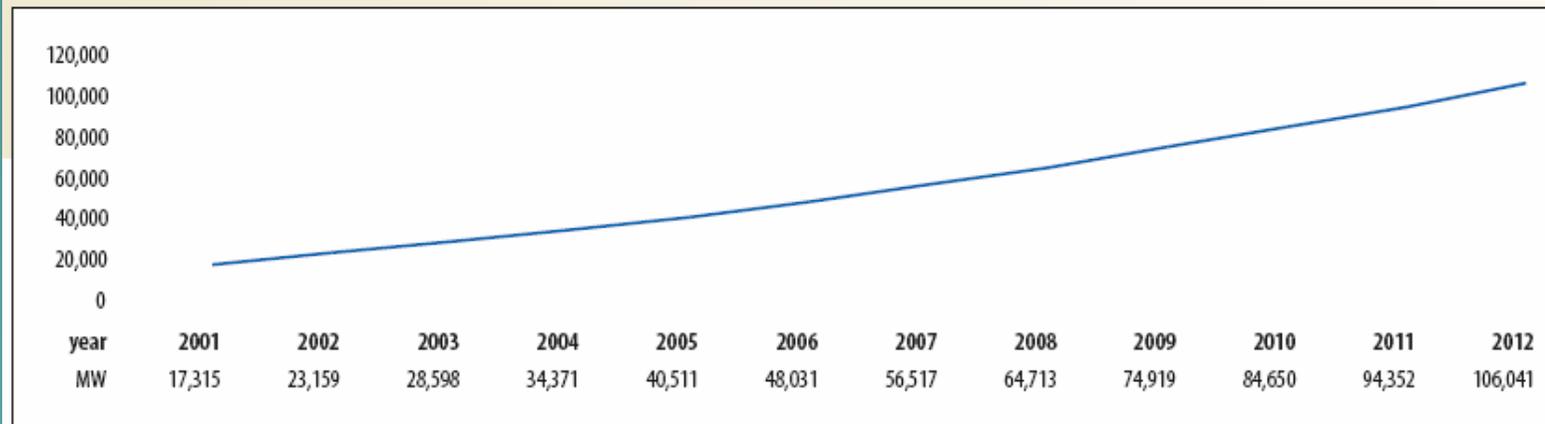
Total installed capacity



Source: GWEC

Unión Europea

Total installed capacity



Source: GWEC

ENERGÍA EÓLICA (EE)

EVOLUCION Y SITUACION ACTUAL DE LA EE

OffShore

