

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA
DEL LITORAL ESPOL

“ENERGÍA EÓLICA”

PROFESOR: ING. MSC. DOUGLAS AGUIRRE H.

2009

INTRODUCCIÓN

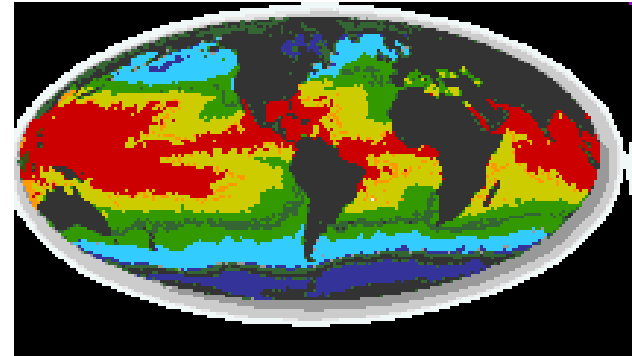
¿De dónde viene la energía eólica?

Todas las fuentes de energía renovables (excepto la maremotriz y la geotérmica), e incluso la energía de los combustibles fósiles, provienen, en último término, del sol. El sol irradia 174.423.000.000.000 kWh de energía por hora hacia la Tierra. En otras palabras, la Tierra recibe $1,74 \times 10^{17}$ W de potencia.



INTRODUCCIÓN

Las diferencias de temperatura conllevan la circulación de aire



Las diferencias de temperatura conllevan la circulación de aire

Temperaturas oceánicas Las regiones alrededor del ecuador, a 0° de latitud, son calentadas por el sol más que las zonas del resto del globo. Estas áreas calientes están indicadas en colores cálidos, rojo, naranja y amarillo, en esta imagen de rayos infrarrojos de la superficie del mar (tomada de un satélite de la NASA, NOAA-7, en julio de 1984).

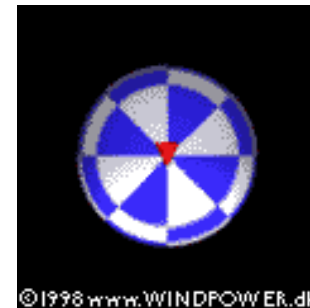
El aire caliente es más ligero que el aire frío, por lo que subirá hasta alcanzar una altura aproximada de 10 km y se extenderá hacia el norte y hacia el sur. Si el globo no rotase, el aire simplemente llegaría al Polo Norte y al Polo Sur, para posteriormente descender y volver al ecuador.

INTRODUCCIÓN

La fuerza de Coriolis

Debido a la rotación del globo, cualquier movimiento en el hemisferio norte es desviado hacia la derecha, si se mira desde nuestra posición en el suelo (en el hemisferio sur es desviado hacia la izquierda). Esta aparente fuerza de curvatura es conocida como fuerza de Coriolis (debido al matemático francés Gustave Gaspard Coriolis 1792-1843).

Puede no resultarle obvio que una partícula moviéndose en el hemisferio norte sea desviada hacia la derecha.



INTRODUCCIÓN

El viento geostrófico

Los vientos que han sido considerados en las páginas precedentes como vientos globales son en realidad los vientos geostróficos.

Los vientos geostróficos son generados, principalmente, por las diferencias de temperatura, así como por las de presión, y apenas son influenciados por la superficie de la tierra. Los vientos geostróficos se encuentran a una altura de 1.000 metros a partir del nivel del suelo.

La velocidad de los vientos geostróficos puede ser medida utilizando globos sonda.

Vientos de superficie

Los vientos están mucho más influenciados por la superficie terrestre a altitudes de hasta 100 metros. El viento es frenado por la rugosidad de la superficie de la tierra y por los obstáculos, como veremos seguidamente. Las direcciones del viento cerca de la superficie serán ligeramente diferentes de las de los vientos geostróficos debido a la rotación de la tierra (ver fuerza de Coriolis).

Tratándose de energía eólica interesará conocer los vientos de superficie y cómo calcular la energía aprovechable del viento.

INTRODUCCIÓN

Brisas marinas

Brisas marinas Durante el día la tierra se calienta más rápidamente que el mar por efecto del sol.

El aire sube, circula hacia el mar, y crea una depresión a nivel del suelo que atrae el aire frío del mar. Esto es lo que se llama brisa marina. A menudo hay un periodo de calma al anochecer, cuando las temperaturas del suelo y del mar se igualan.

Durante la noche los vientos soplan en sentido contrario. Normalmente durante la noche la brisa terrestre tiene velocidades inferiores, debido a que la diferencia de temperaturas entre la tierra y el mar es más pequeña.

El conocido monzón del sureste asiático es en realidad un forma a gran escala de la brisa marina y la brisa terrestre, variando su dirección según la estación, debido a que la tierra se calienta o enfría más rápidamente que el mar.

Viento de
Montaña



SIMBOLOGÍA

La energía en el viento

Un aerogenerador obtiene su potencia de entrada convirtiendo la fuerza del viento en un par (fuerza de giro) actuando sobre las palas del rotor. La cantidad de energía transferida al rotor por el viento depende de la densidad del aire, del área de barrido del rotor y de la velocidad del viento. Aerogenerador.

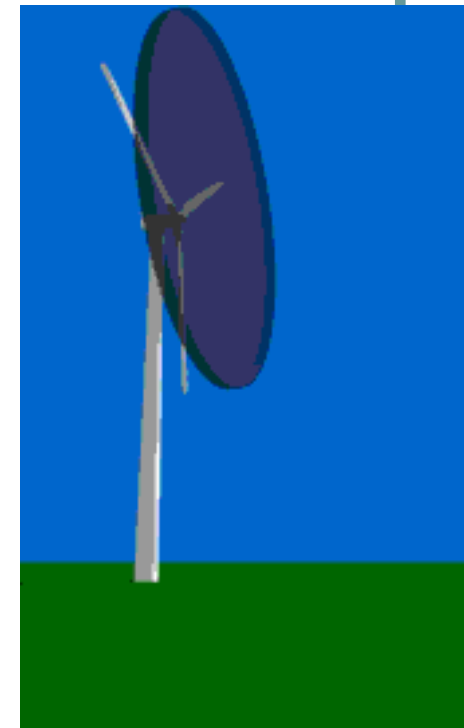
Densidad del aire

La energía cinética de un cuerpo en movimiento es proporcional a su masa (o peso). Así, la energía cinética del viento depende de la densidad del aire, es decir, de su masa por unidad de volumen.

En otras palabras, cuanto "más pesado" sea el aire más energía recibirá la turbina.

A presión atmosférica normal y a 15° C el aire pesa unos 1,225 kilogramos por metro cúbico, aunque la densidad disminuye ligeramente con el aumento de la humedad.

Además, el aire es más denso cuando hace frío que cuando hace calor. A grandes altitudes (en las montañas) la presión del aire es más baja y el aire es menos denso



© 1998 www.WINDPOWER.org

POTENCIA DEL VIENTO

Potencia de la fórmula del viento

La potencia del viento que pasa perpendicularmente a través de un área circular es:

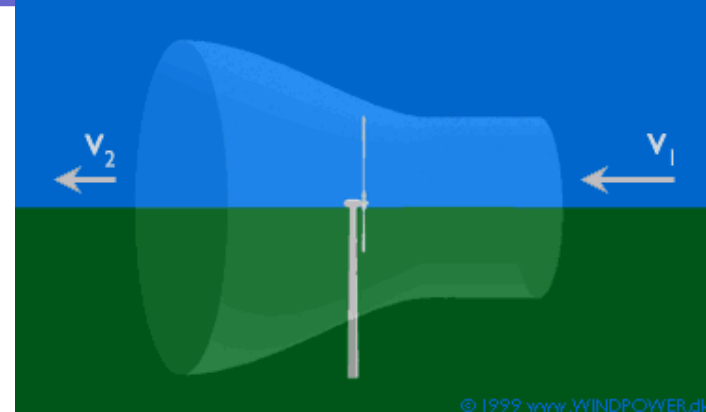
$$P = \frac{\rho * v^3 * \Pi * r^2}{2}$$

Donde P = potencia del viento medida en W (vatios).

ρ = (rho) = densidad del aire seco = 1.225 medida en kg/m³ (kilogramos por metro cúbico, a la presión atmosférica promedio a nivel del mar y a 15° C).

v = velocidad del viento medida en m/s (metros por segundo). =
(pi) = 3.1415926535...

r = radio (esto es, la mitad de un diámetro) del rotor medido en m (metros).



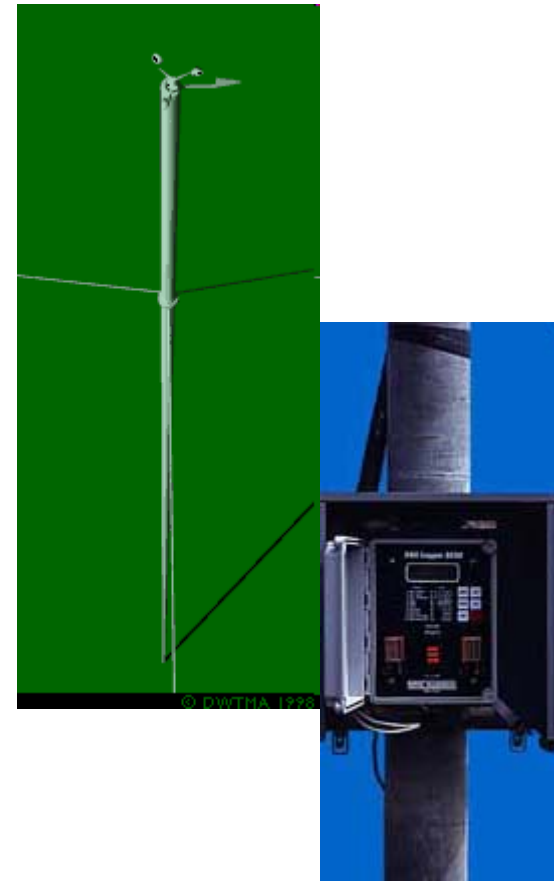
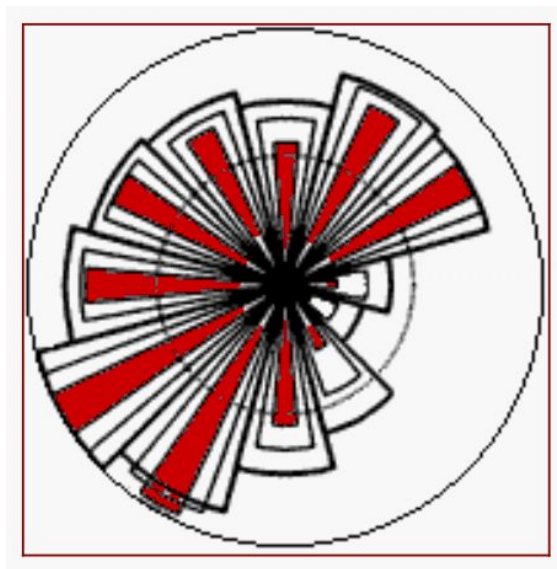
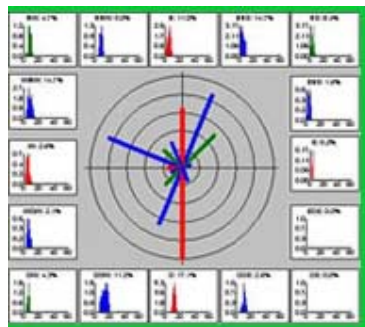
ENERGÍA EÓLICA

Medición del Viento:

Se utiliza Anemómetros y sus valores se registran en los data loggers.



Rosa de Vientos

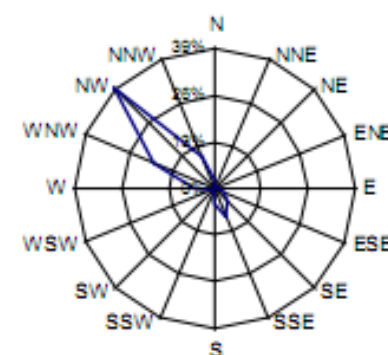
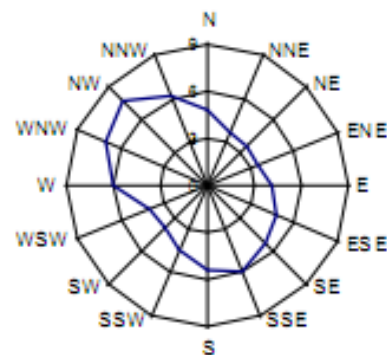
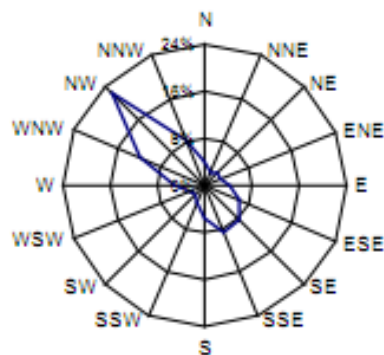


Rosa de Vientos

Representa para cada sector la velocidad promedio de todas las direcciones pertenecientes al mismo. Permite de disponer de información sobre :

→ a cerca de las direcciones en las que el viento sopla más y es más fuerte (sector de mayor magnitud en la rosa de energía)

→ de las direcciones más frecuentes (sector de mayor magnitud en la rosa de frecuencias).

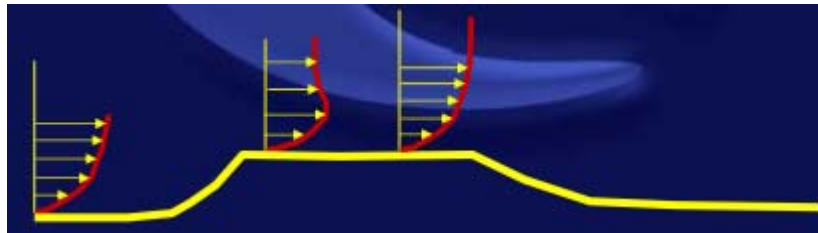
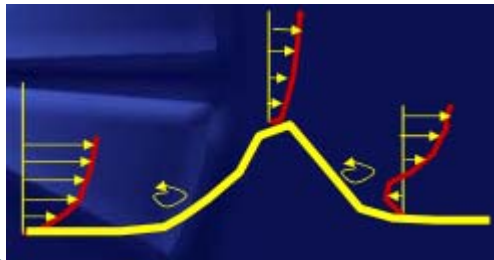
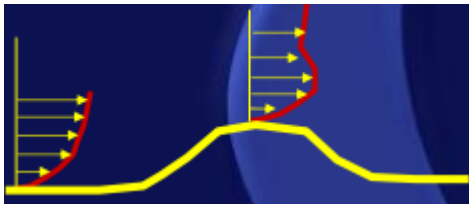


ENERGÍA EÓLICA

Rugosidad

En general, cuanto más pronunciada sea la rugosidad del terreno mayor será la ralentización que experimente el viento.

Obviamente, los bosques y las grandes ciudades ralentizan mucho el viento, mientras que las pistas de hormigón de los aeropuertos sólo lo ralentizan ligeramente. Las superficies de agua son incluso más lisas que las pistas de hormigón, y tendrán por tanto menos influencia sobre el viento, mientras que la hierba alta y los arbustos ralentizan el viento de forma considerable.

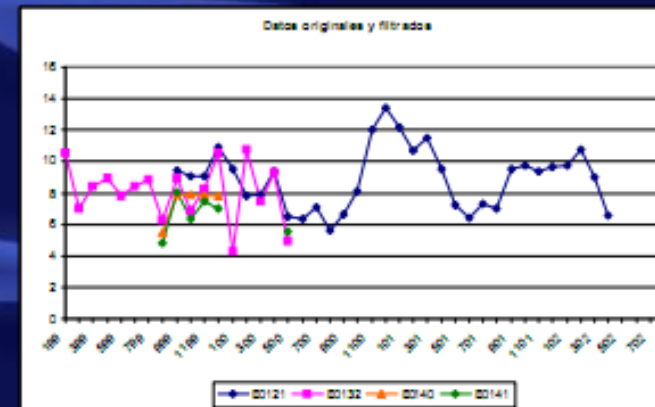
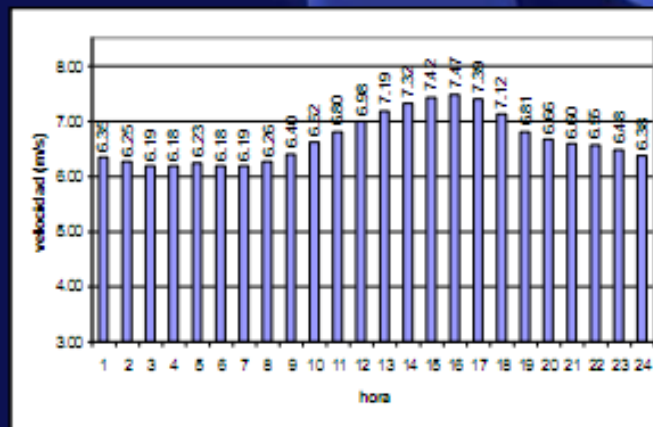


ENERGÍA EÓLICA

Variabilidad del Viento en el largo plazo

Una de las características más destacables del viento es su variabilidad tanto espacial como temporal, en un amplio rango de escalas.

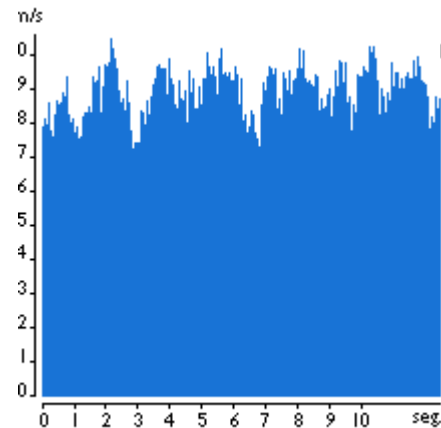
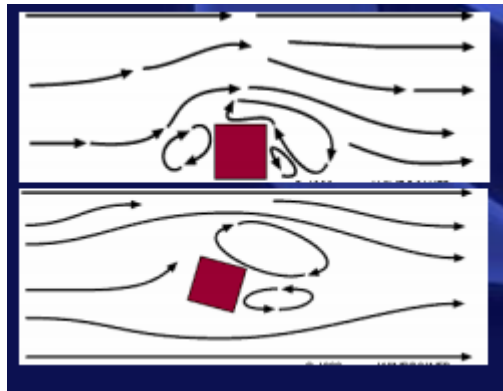
- Desde periodos correspondientes a 0,1 s (10 Hz) hasta varios años.
- Variaciones estacionales o mensuales de viento.
- Variaciones anuales (importantes en la rentabilidad de un parque eólico).



ENERGÍA EÓLICA

Variabilidad del Viento en el corto plazo

- Durante el periodo de 10 minutos, el comportamiento del viento no es, supuestamente, constante.
- Fenómeno debido al movimiento atmosférico a micro-escala.
- Se caracteriza por la presencia de remolinos, vórtices,...
- Origen de las perturbaciones: obstáculos, edificios, colinas, montículos, estelas de los aerogeneradores,...etc...



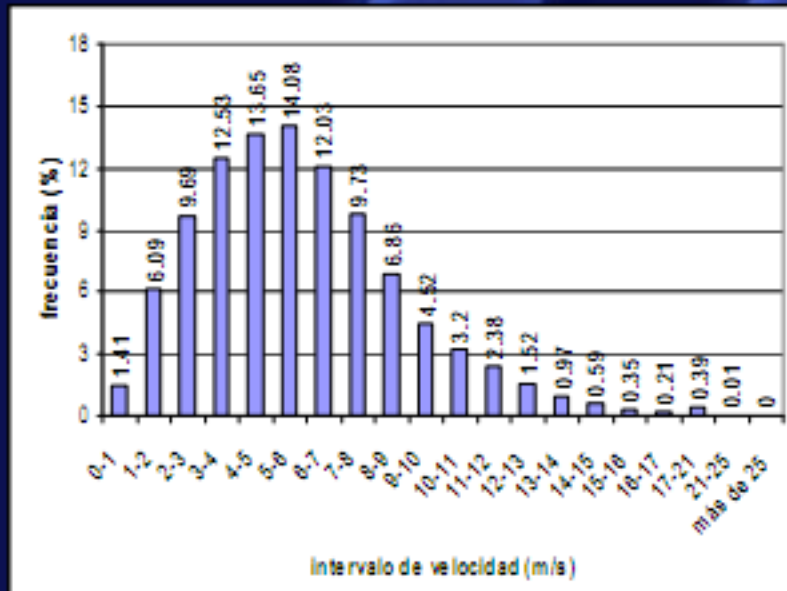
© 1998 www.WINDPOWER.org



ENERGÍA EÓLICA

Distribución del Viento

La velocidad del viento cambia continuamente y por eso para obtener estimaciones significativas de largo plazo se utilizan métodos estadísticos.



- Frecuencia proporcional a las medidas de viento dentro en cada Bin.

→ Probabilidad de obtención de una medida dentro de un determinado Bin.

→ Distribución de la frecuencia de velocidades puede representarse por la función de densidad de probabilidad de dos parámetros de Weibull.

ENERGÍA EÓLICA

Curvas del Distribución del Viento

La probabilidad de que la velocidad de viento sea U viene dada por:

Con :

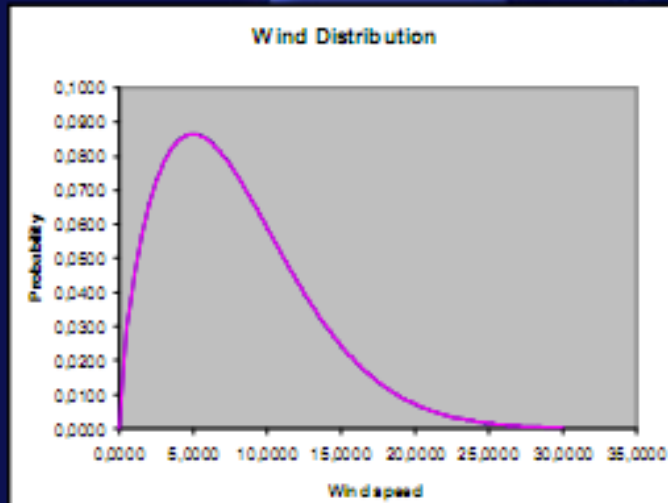
- K : factor de forma
- C : factor de escala

$$p(U) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right]$$

La distribución de probabilidad acumulada se obtiene integrando la función entre cero y un determinado valor V .

Esto da la probabilidad Q de que la velocidad de viento sea menor que V en ese emplazamiento:

$$Q(U < V) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V}{C}\right)^k\right]$$



ENERGÍA EÓLICA

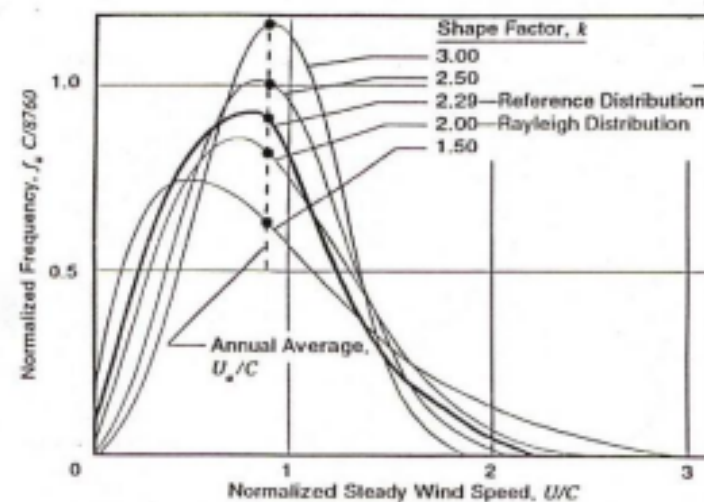
Evolución de la curva de densidad de velocidad en función de los parámetros de escala y de forma :

- $K = 2$ distribución de Rayleigh

- Si los parámetros k y C son conocidos para un determinado emplazamiento, la velocidad media del viento U puede calcularse

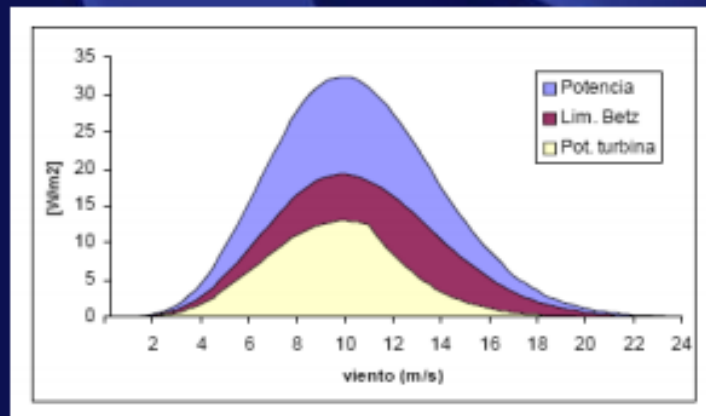
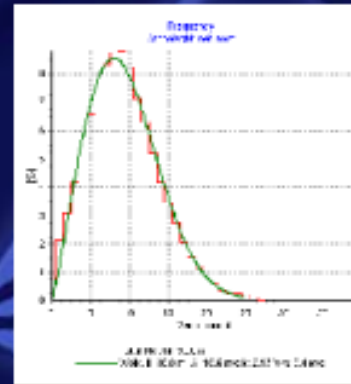
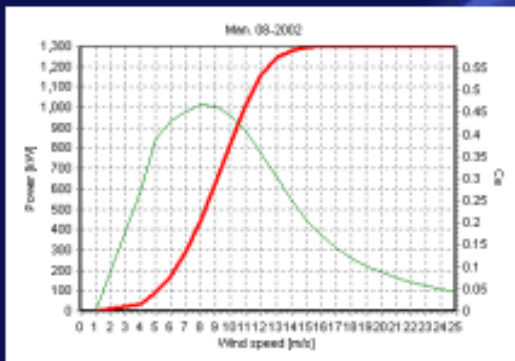
$$\rightarrow U = C \Gamma(1 + 1/k)$$

donde Γ es la función gamma.



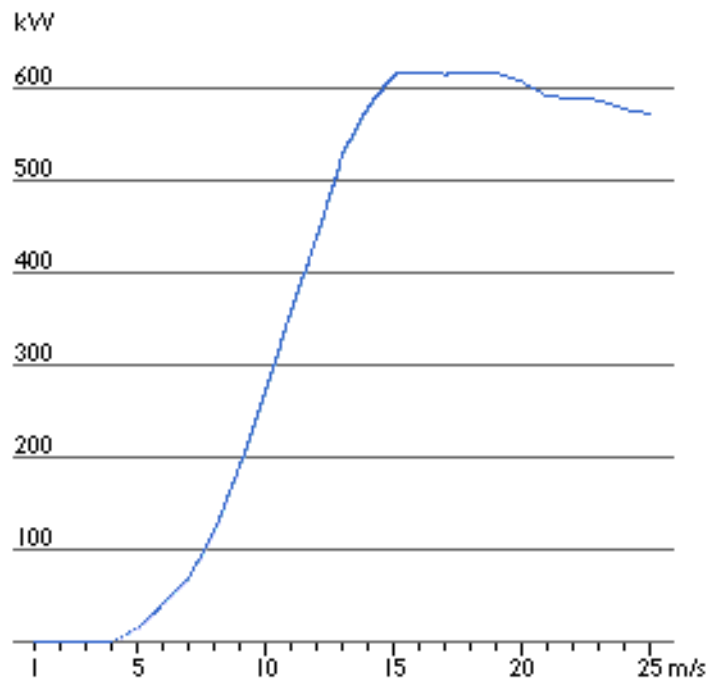
Wind speed frequency distributions in dimensionless form, based on the Weibull duration curves. Annual average wind speeds are indicated.

ENERGÍA EÓLICA



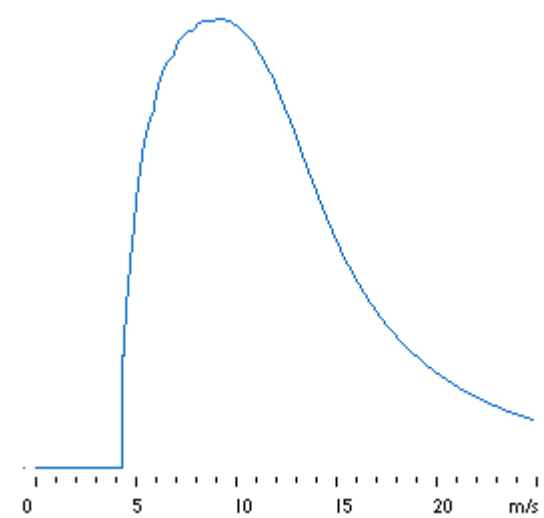
$$P = \int_{u=0}^{\infty} p(U)P(U)dU$$

CURVA DE POTENCIA DE UN AEROGENERADOR Y COEFICIENTE



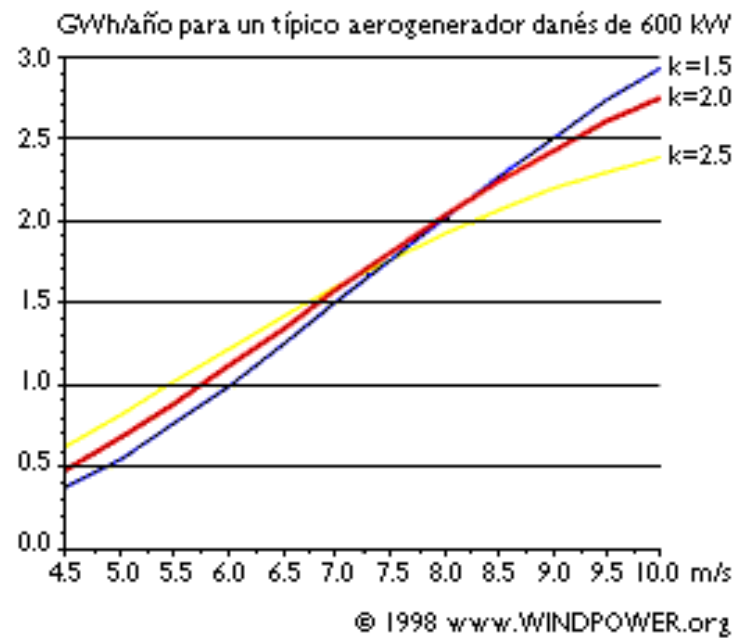
© 1998 www.WINDPOWER.org

Cp : Coeficiente de Potencia



© 1998 www.WINDPOWER.org

ENERGÍA EÓLICA

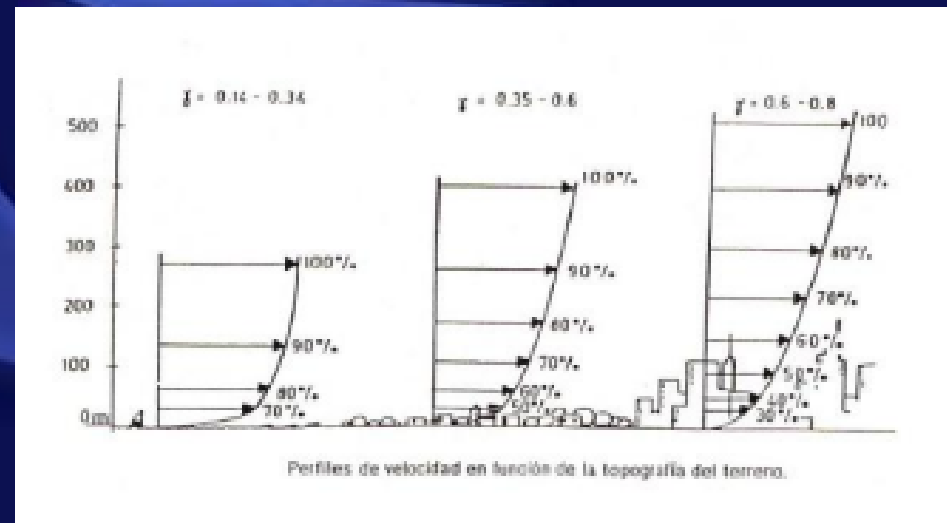


ENERGÍA EÓLICA

- Para condiciones neutras, se ha encontrado una ley simplificada :

$$U(z) = U(z_r) \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha$$

- Donde α depende de la rugosidad de la superficie.



Estimación del valor α para distintos terrenos

Tipo de terreno	α
Liso (mar, arena, nieve)	0,10-0,13
Rugosidad moderada (hierba, cultivos)	0,13-0,20
Rugoso (bosques, edificaciones)	0,20-0,27
Muy rugoso (ciudades)	0,27-0,40

ENERGÍA EÓLICA

$$\frac{v(z)}{v(z')} = \frac{\ln z' - \ln z_0}{\ln z - \ln z_0}$$

En la siguiente tabla, aparecen los valores de rugosidad asociados a cada una de las distintas superficies.

Zo (m)	
1.00	Ciudad
	Bosque
0.50	Suburbios
0.30	Cinturones verdes
0.20	Arbolado abundante
0.10	Campo
0.05	Campo abierto
0.03	campo sin construcciones sin arbolado
0.01	Pistas de aeropuertos hierba cortada
5.10 ⁻³	Terreno descubierto
10 ⁻³	Superficies nevadas
3.10 ⁻⁴	Superficies de arena
10 ⁻⁴	Agua (lagos, mar)

ENERGÍA EÓLICA

Existe varias maneras de obtener los valores de los parámetros de Weibull :

- Método Analítico (Justus, 1978) :

$$k = \left(\frac{\sigma_U}{U} \right)^{-1.086}$$

$$C = \left(\frac{U}{\Gamma(1 + \frac{1}{k})} \right)$$

- Método empírico (Lysen 1983) :

$$\frac{C}{U} = \left(0,568 + \frac{0,433}{k} \right)^{-\frac{1}{k}}$$

- Método de integración de la función de probabilidad acumulada :

- Regression linear : $\text{Ln} (-\text{Ln} (1 - Q)) = f (\text{Ln} (U))$

ENERGÍA EÓLICA

La ley de Betz

La ley de Betz fue formulada por primera vez por el físico alemán Albert Betz en 1919.

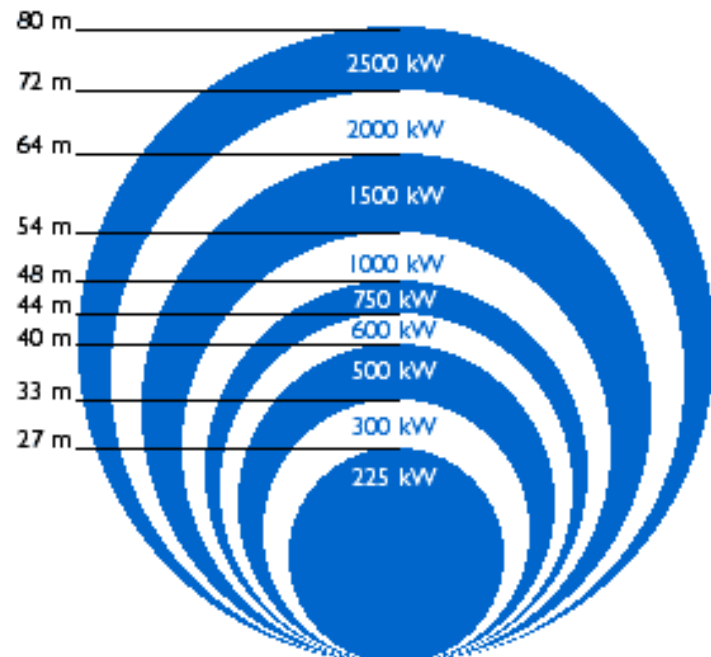
La ley de Betz dice que sólo puede convertirse menos de $16/27$ (el 59 %) de la energía cinética en energía mecánica usando un aerogenerador.

Tarea:

Traer para la siguiente clase, la demostración del límite de Betz, en una sola hoja a mano (no a computadora), por 2 puntos extras.

ENERGÍA EÓLICA

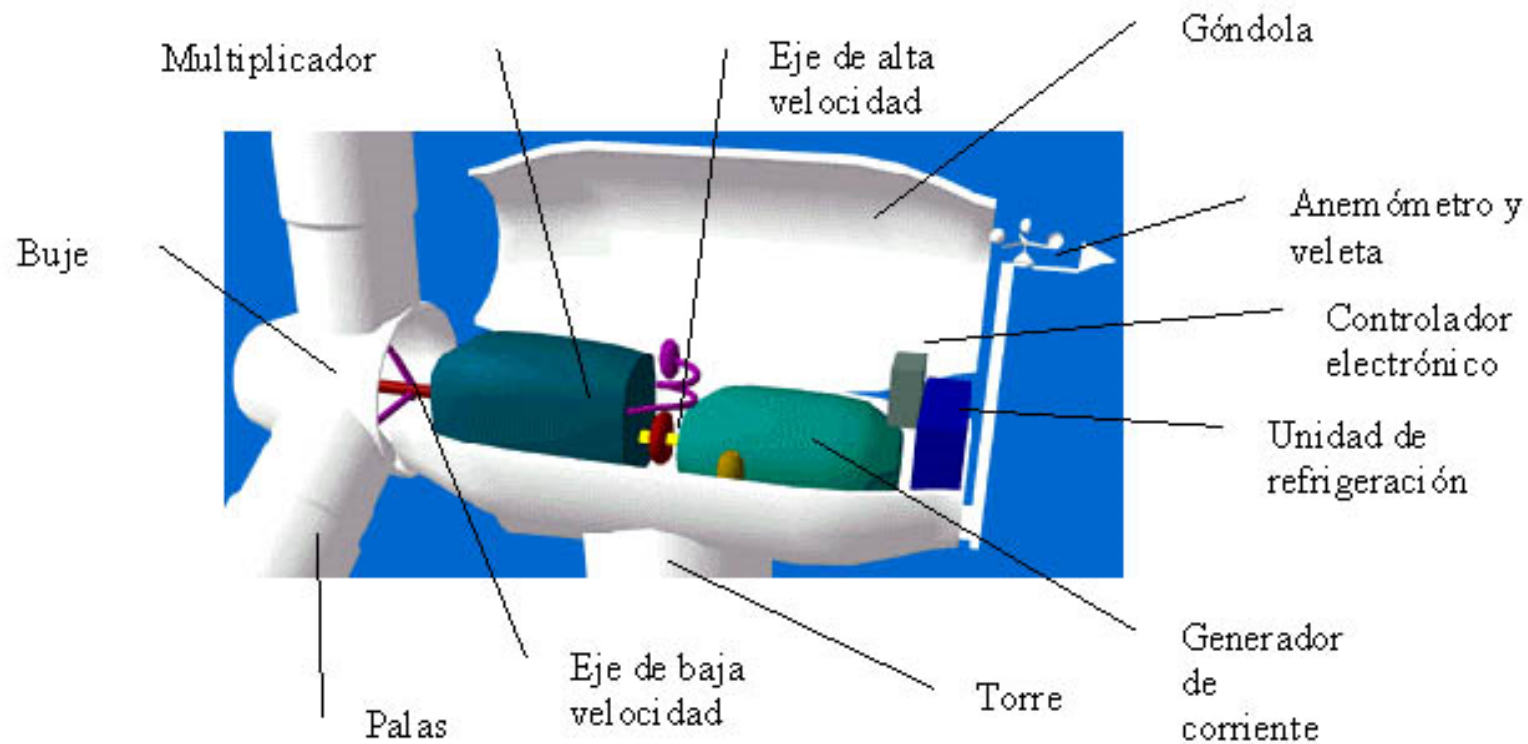
Potencia de los generadores eólicos en función del radio de las aspas



© 1998 www.WINDPOWER.org

ENERGÍA EÓLICA

COMPONENTES DE UN AEROGENERADOR



ENERGÍA EÓLICA

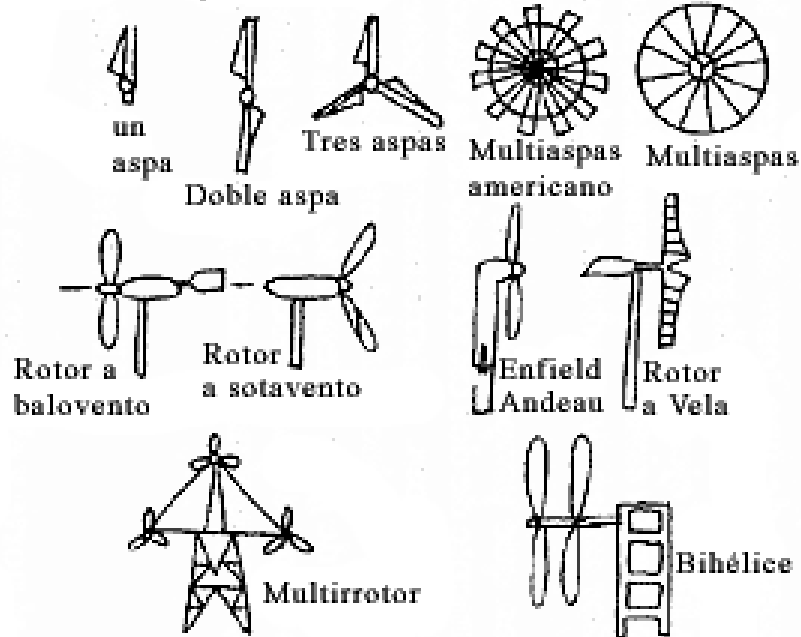
QUE HACE GIRAR A LAS PALAS?

Sustentación



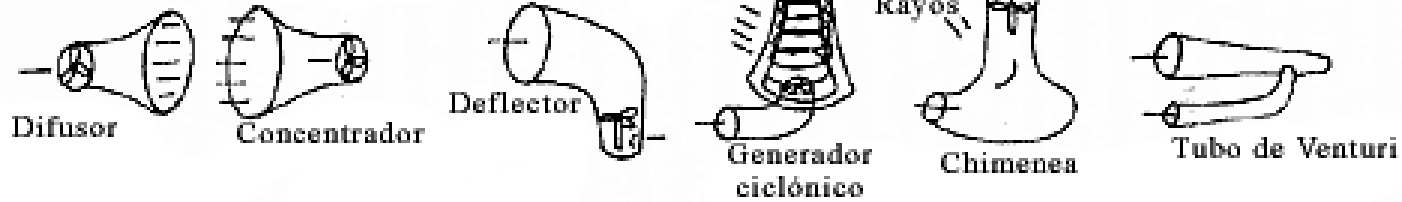
© 1998 www.WINDPOWER.dk

Eje horizontal

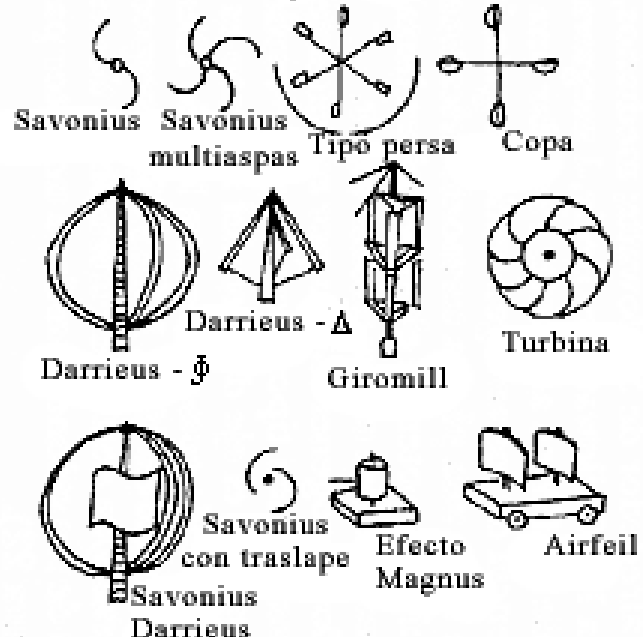


Multirrotor

Otros



Eje vartical



Clasificación de aerogeneradores de eje horizontal para producción eléctrica en función de su potencia

Denominación	P_N (kW)	R (m) ⁴	Aplicaciones
Muy baja ⁵	< 1	< 1	Embarcaciones, sistemas de comunicación, refugios de montaña, iluminación...
	1-10	1-3	Granjas, viviendas aisladas (sistemas EO-FV), bombeo...
Baja	10-100	3-9	Comunidades de vecinos, PYME's (sistemas mixtos EO-diésel), drenaje, tratamiento de aguas...
Media	100-1.000	9-27	Parques Eólicos (terreno complejo).
Alta	1.000-10.000	27-81	Parques Eólicos (terreno llano, mar adentro).
Muy alta	> 10.000	> 81	En fase de investigación y desarrollo, requieren nuevos diseños y materiales no convencionales. Suponen un salto tecnológico. No antes del año 2010.

⁴ Los valores de la dimensión característica radio de la circunferencia descrita por el rotor (R) son aproximados.

⁵ Esta clase se subdivide según la potencia nominal (P_N) en microaerogeneradores (< 1 kW) y miniaerogeneradores (1 < P_N < 10 kW).

Bibliografía:

Asociación danesa de la industria eólica, 2003.

<http://www.windpower.org/es/tour/>

Repasar material de esa dirección y del sidweb.

