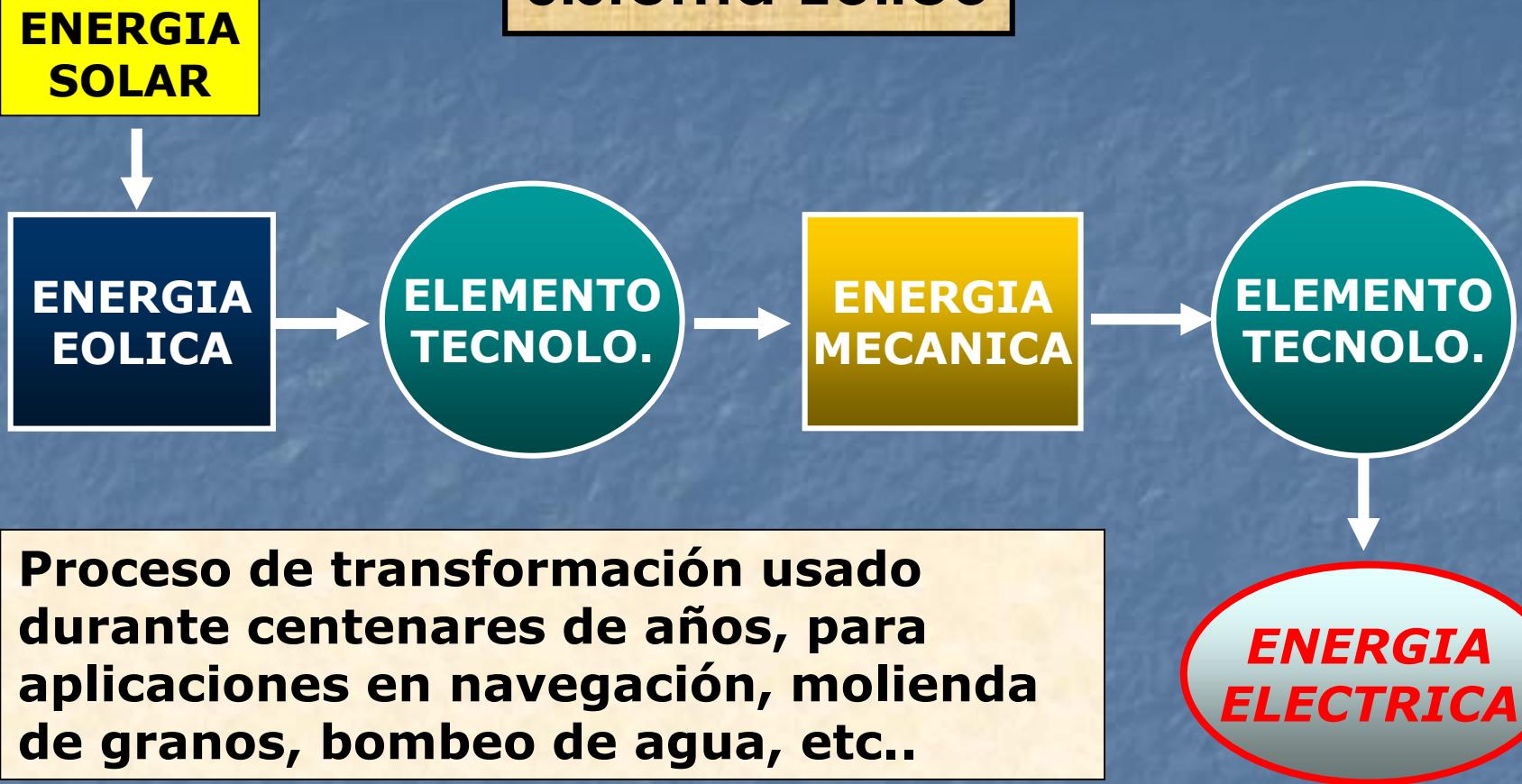


# Sistema Eólico

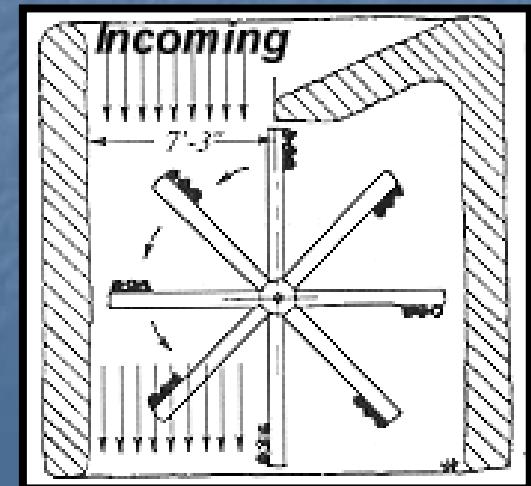
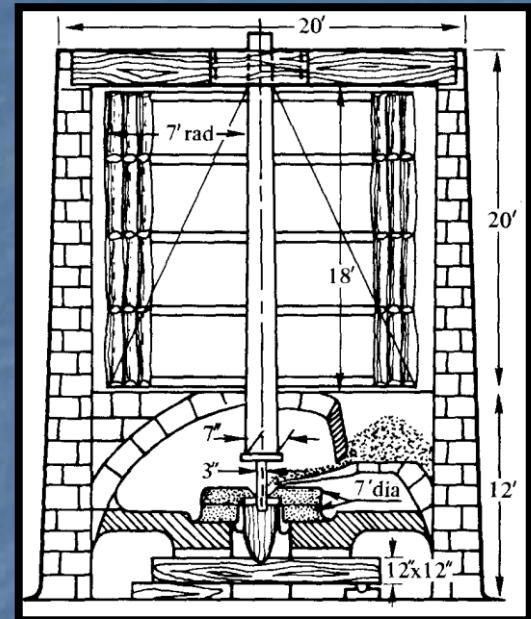


En la actualidad, este proceso tiene como fin principal la **Generación de Energía Eléctrica**, vinculándose diversas áreas del conocimiento: meteorología, aerodinámica, electricidad, electrónica, mecánica, civil.

# UN POCO DE HISTORIA



**Molino Persa  
(900-500 A.C.)**



## Drakkar Vikingo (800 D.C.)



## Molino Europeo (1300 - 1875 D.C.)



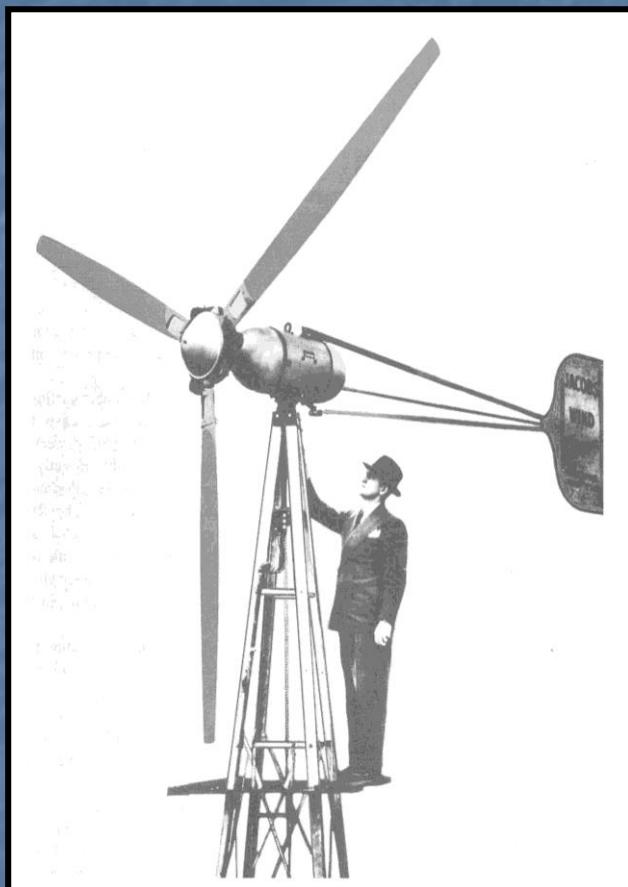
## Molino Europeo (1300 - 1875 D.C.)



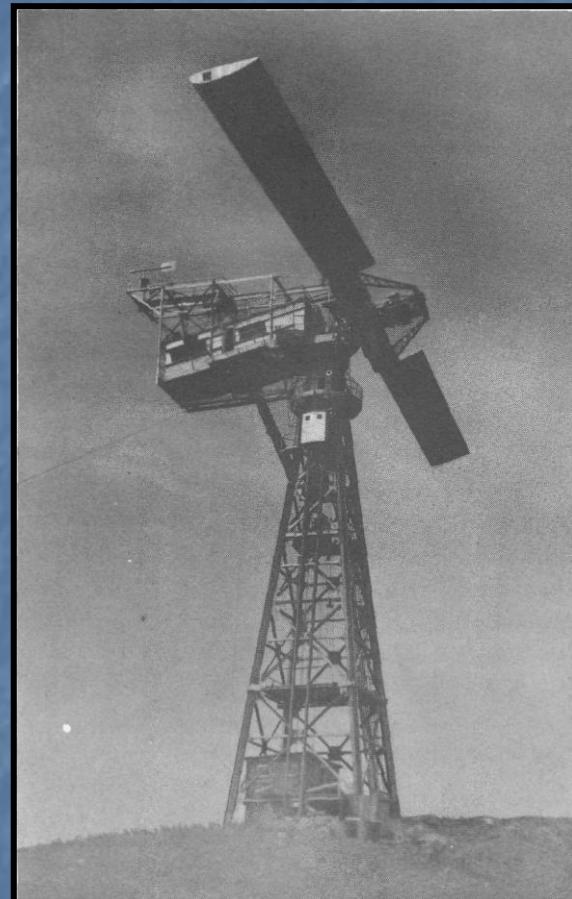
## Molino Americano (1850 D.C.)



# TE para Producción de Electricidad



**TE Jacobs**  
**2,5 e 3 kW, 1926-1957**



**TE Smith-Putnam**  
**1250 kW, 1941**

# TE modernas para Producción de Elect.

Las TE de eje horizontal son las que se impusieron comercialmente para generación eléctrica de baja y alta potencia



**TE aislada de la red**  
**100-5000 W**



**TE para Parques**  
**-orden de los MW-**

## TE de Eje Vertical

También existen TE de eje vertical, que no llegaron al mercado comercial. Algunas se están instalando en zonas urbanas de altura.



## TE aisladas de la Red (baterías)



**TE a barlovento**  
-orden de los kW-

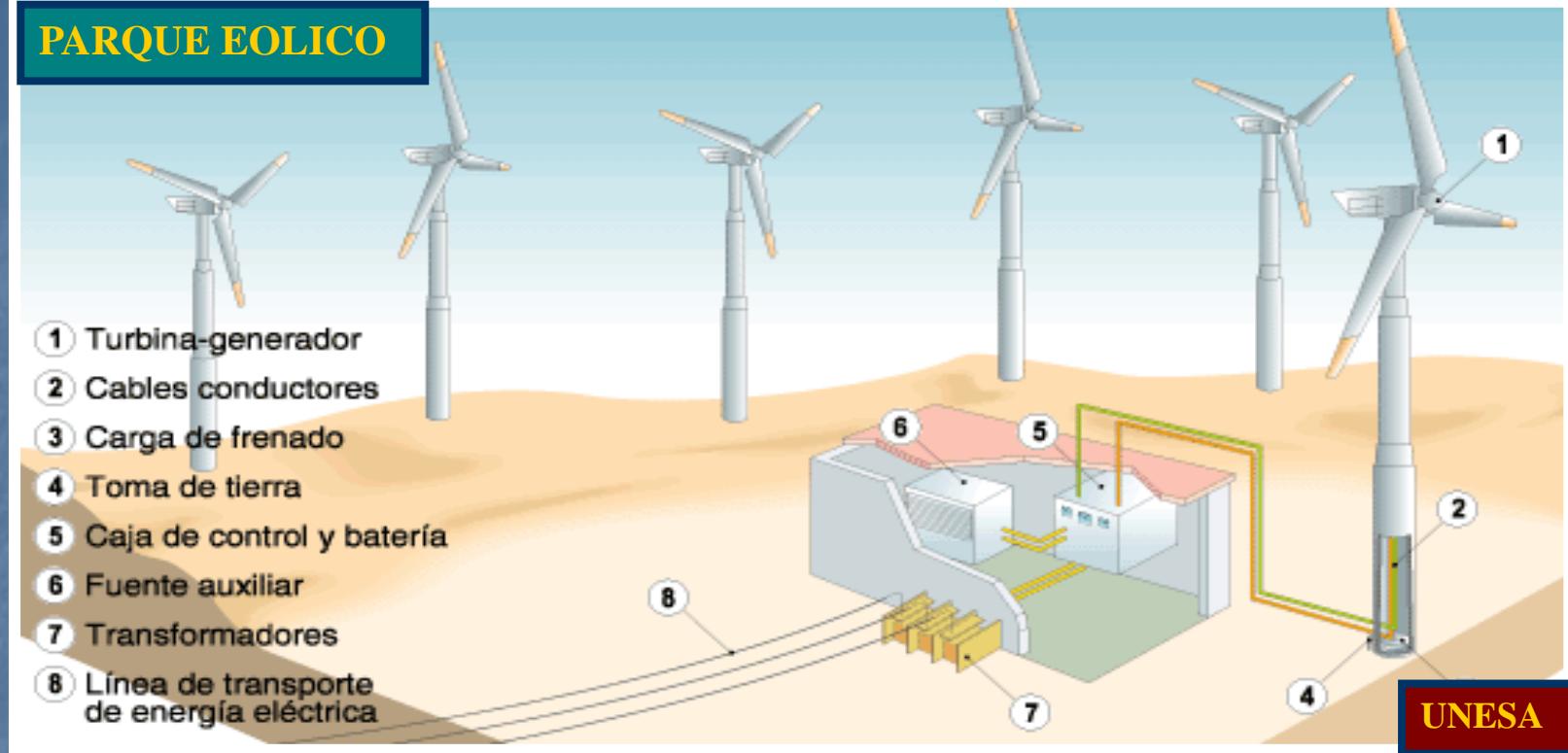


**TE a sotavento en las Islas Malvinas**  
- orden de los kW-

## TE formando Parques Eólicos: on y offshore



## PARQUE EOLICO



Factor de Capacidad =  $FC = E \text{ real año} / E \text{ máx año}$

$FC > 30\%$  (muy buena producción)

$\eta = Cp \times \eta \text{ tren} \times \eta \text{ gener} \approx 0,4 \times 0,90 \times 0,90 \rightarrow 32\%$

**Costo de Potencia Instalada onshore = 1700 [U\$S/kW]**  
**offshore → 3000 [U\$S/kW]**

**Con  $v$  promedio de 5[m/s] → 5-11 [cU\$S/kWh].**

## Parque Eólico do Alto Minho, Portugal



$P = 240 \text{ MW}$   
 $E \text{ producida} = 667 \text{ [GWh/año]}$

120 aerogeneradores con capacidad  
de 2MW cada uno, repartidos en  
cinco grupos, a lo largo de 30 km

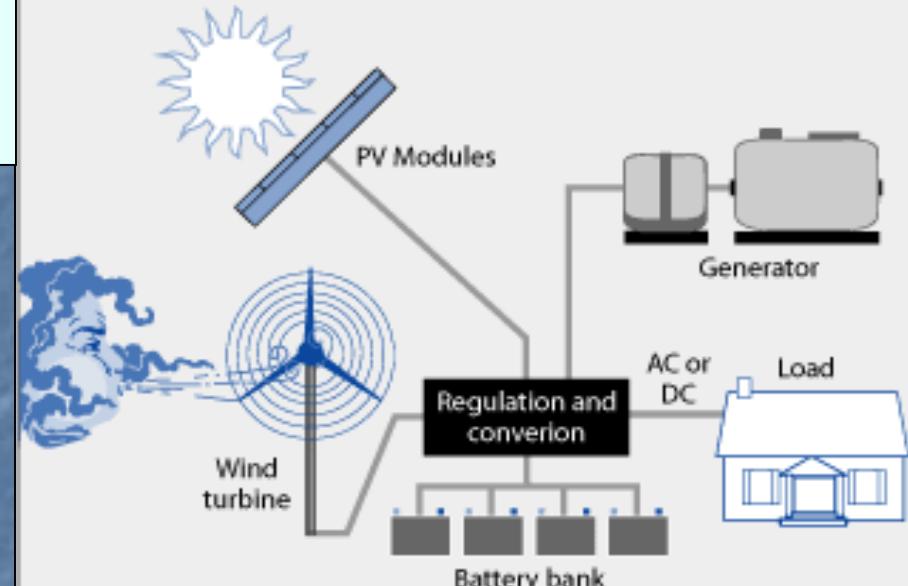
Inversión = 343 10E6 euros

# Sistemas Híbridos:

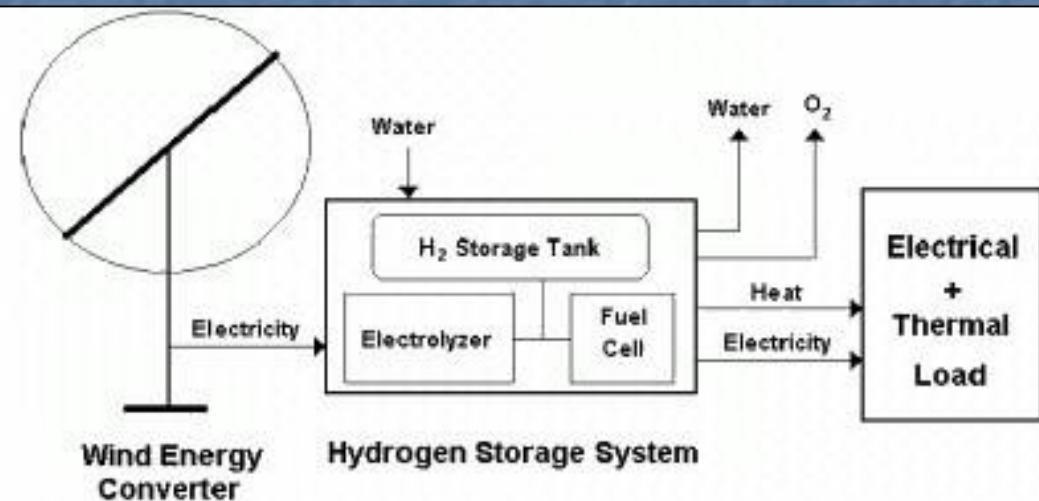
## Diferentes sistemas tecnológicos que aprovechan diferentes energías para producir electricidad

### Hybrid Power Systems

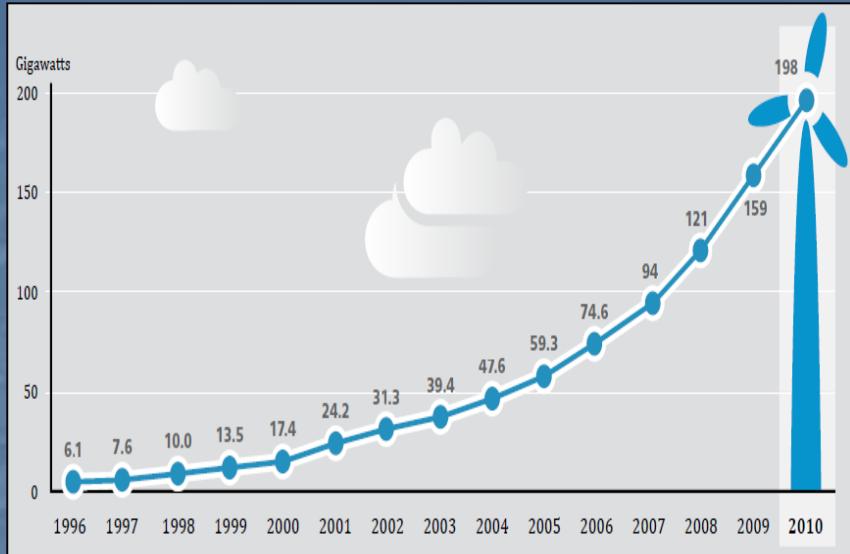
Combine multiple sources to deliver non-intermittent electric power



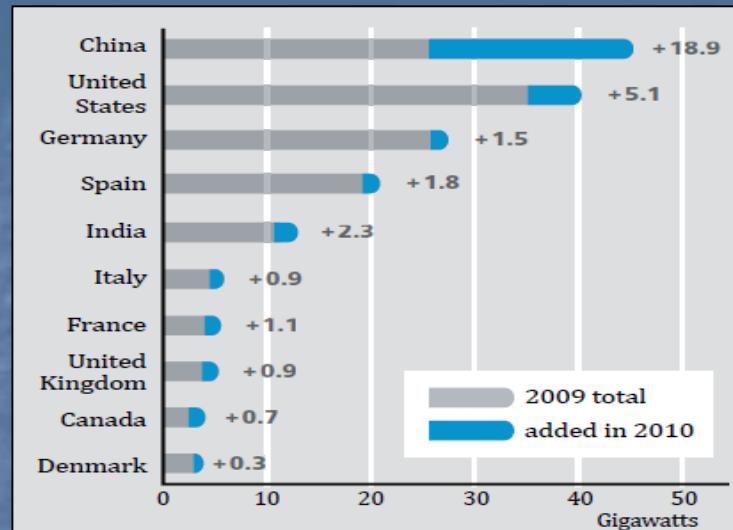
## Aprovechamiento de la Energía Eólica para producir Hidrógeno



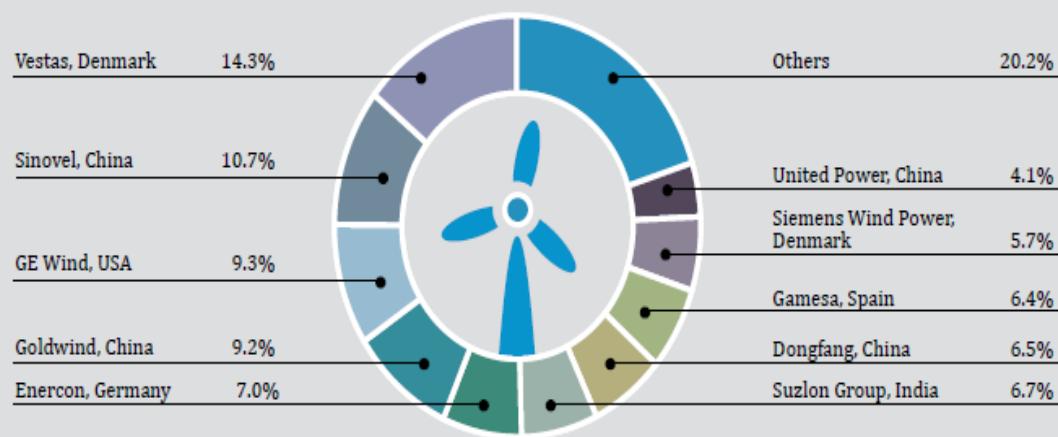
## Evolución de la Potencia Eólica Instalada Mundial hasta 2010



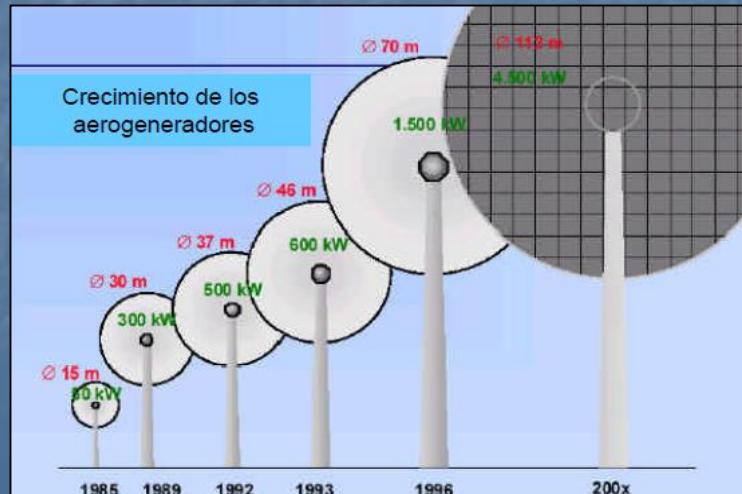
## Potencia Eólica Instalada en países líderes, 2010



## Empresas Líderes, 2010



## Evolución del tamaño



# **DESCRIPCION DE LA TURBINA EOLICA PARA PRODUCCION DE ELECTRICIDAD**

# COMPONENTES PRINCIPALES DE UNA TURBINA EOLICA



**Fundación:** Realizada de hormigón armado. Garantiza la estabilidad estática y dinámica de la TE. Depende del tipo de suelo.

**Torre:** Para capturar > energía. Las más comunes son las cónicas tubulares de acero de 3 tramos,  $L \approx 20$  m c/u con bridas y unidas entre sí mediante pernos. Las de celosía son más baratas pero de > impacto visual. También las hay de hormigón.

**Pala:** Elemento que convierte la energía del viento en energía mecánica rotante. Su perfil es el del ala de avión. De fibra de vidrio o de carbón, con epoxy o poliéster, mixto.

**Buje:** elemento central de acero o fe, que une el rotor con el eje principal de baja v.

**Rotor:** Buje + Palas

**Góndola:** Espacio que soporta la maquinaria (caja multiplicadora, generador, frenos, cojinetes, protecciones, sistemas de control)

## **Algunas Características de este tipo de TE**

- Se utilizan para la generación de energía eléctrica en sistemas aislados (orden de kW) o conectados a la red (orden de MW).
- número de palas → 1-4
- V rotación → 15-50 rpm, V tang. en punta de pala → 65-75 m/s
- [tn/MW] de potencia < que las eólicas lentas → construirse de > tamaño y situar a los rotores a elevadas alturas.
- Par de arranque < que las eólicas lentas.
- Arranque → V viento 4-5 m/s (> que las eólicas lentas).  
P nominal → V viento 12-15 m/s.  
Parada del rotor → V viento 25-30 m/s
- El valor máximo del coeficiente de potencia (eficiencia de la conversión eólica) →  $C_p \approx 0,4-0,5$ .
- TE más común → 1.5 MW-2MW. Aumentó la conexión directa (sin caja multiplicadora), y ya tiene el 14 % del mercado.
- El precio de llave en mano de un parque eólico es de unos 1700 U\$S/kW on shore (75% es costo de la turbina), y 3000 off shore (un poco menos de la mitad es el costo de la turbina).

## Diferentes tipos de Torres



**Cónicas Tubulares  
de Acero**

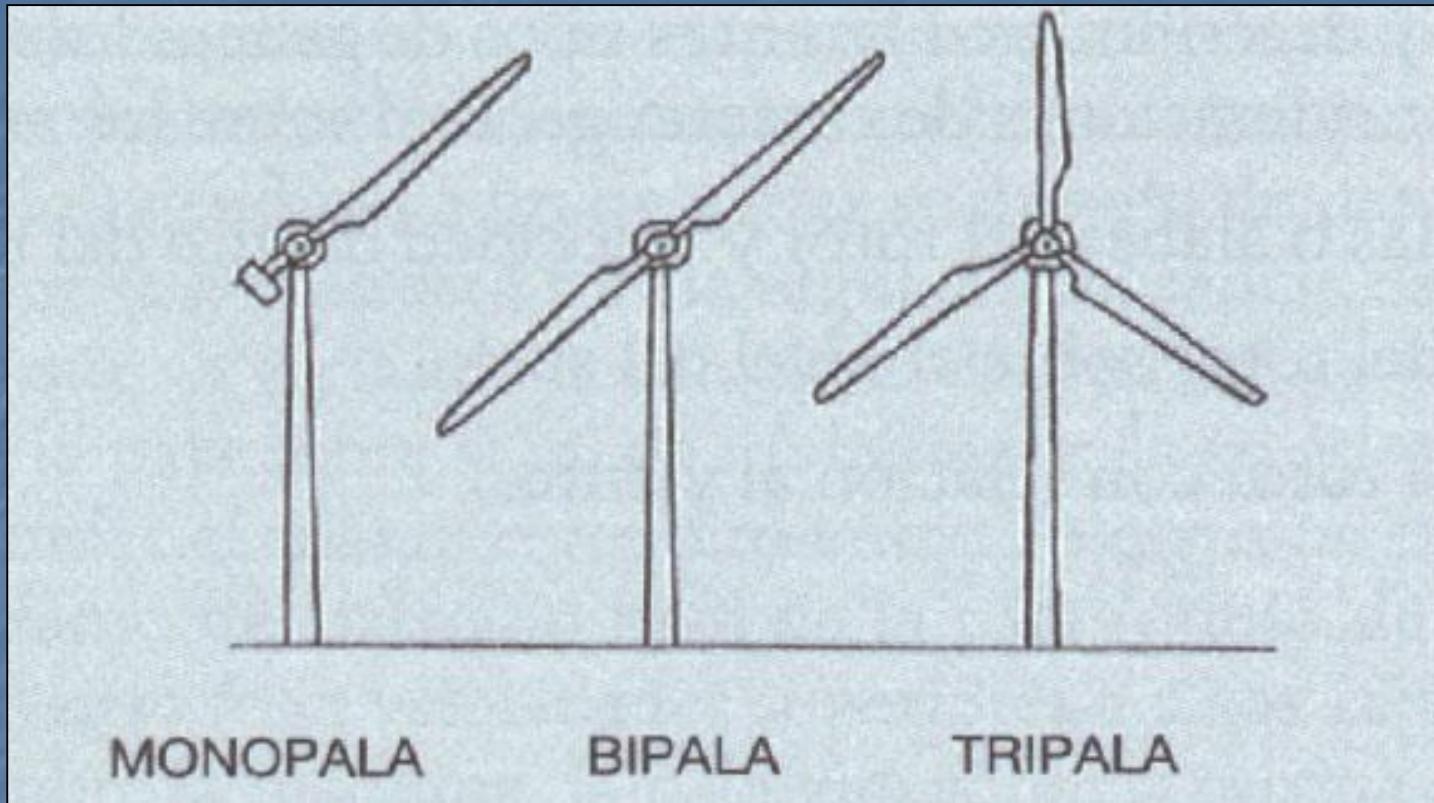


**Celosía**



**Hormigón**

## Diferentes tipos de Rotores



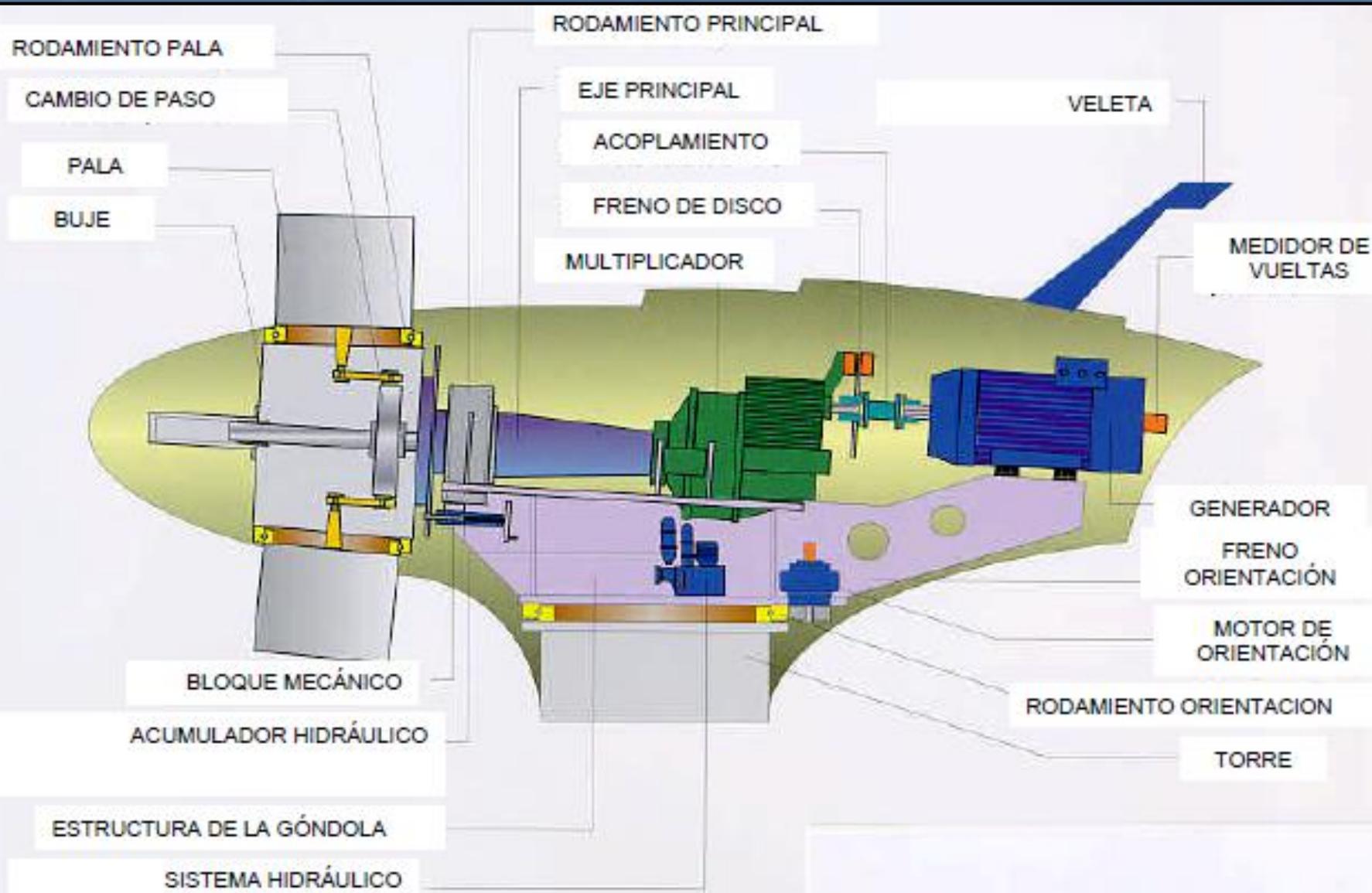
MONOPALA

BIPALA

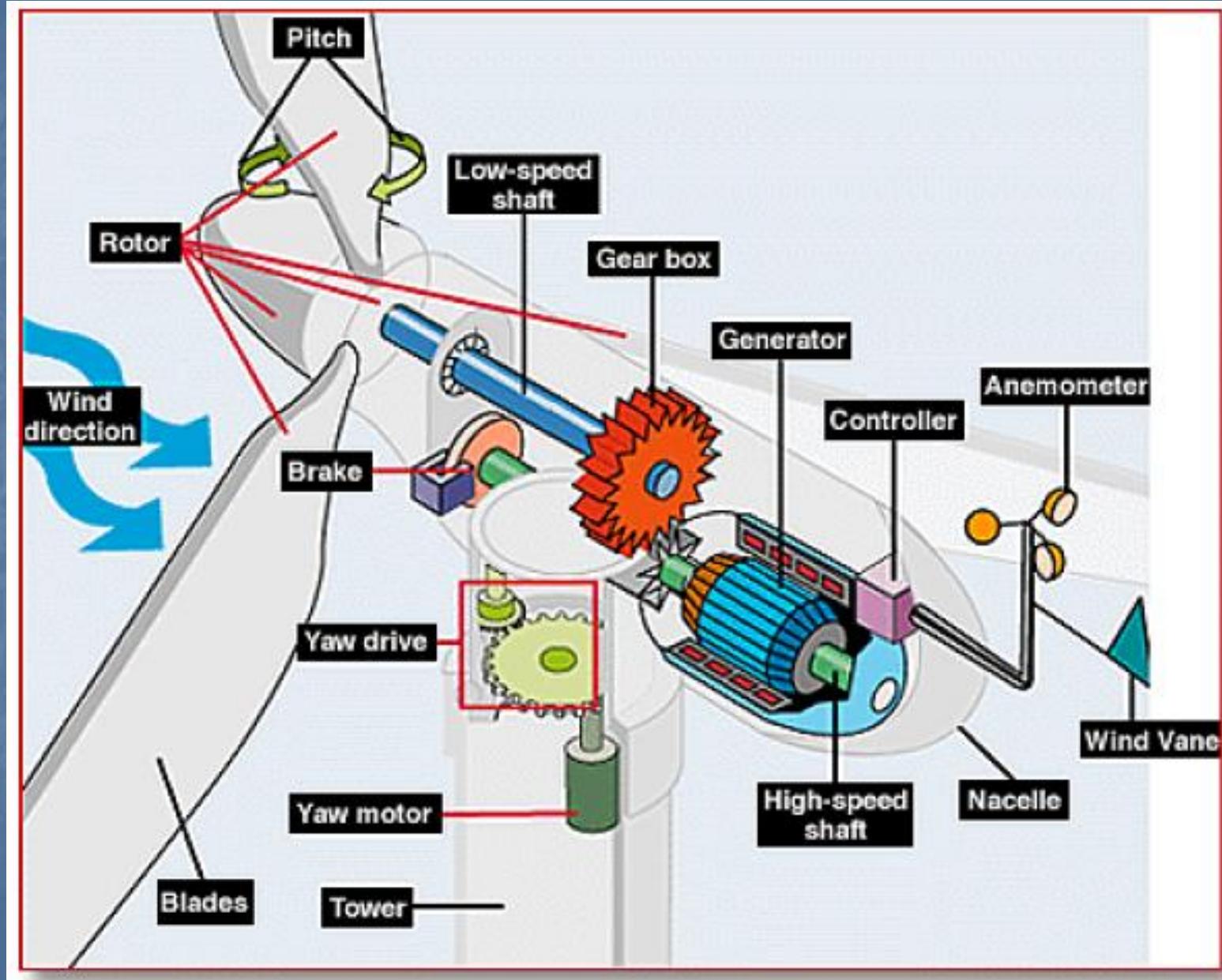
TRIPALA

**De las TE rápidas para generación de electricidad, la configuración tripala es la más usada.**

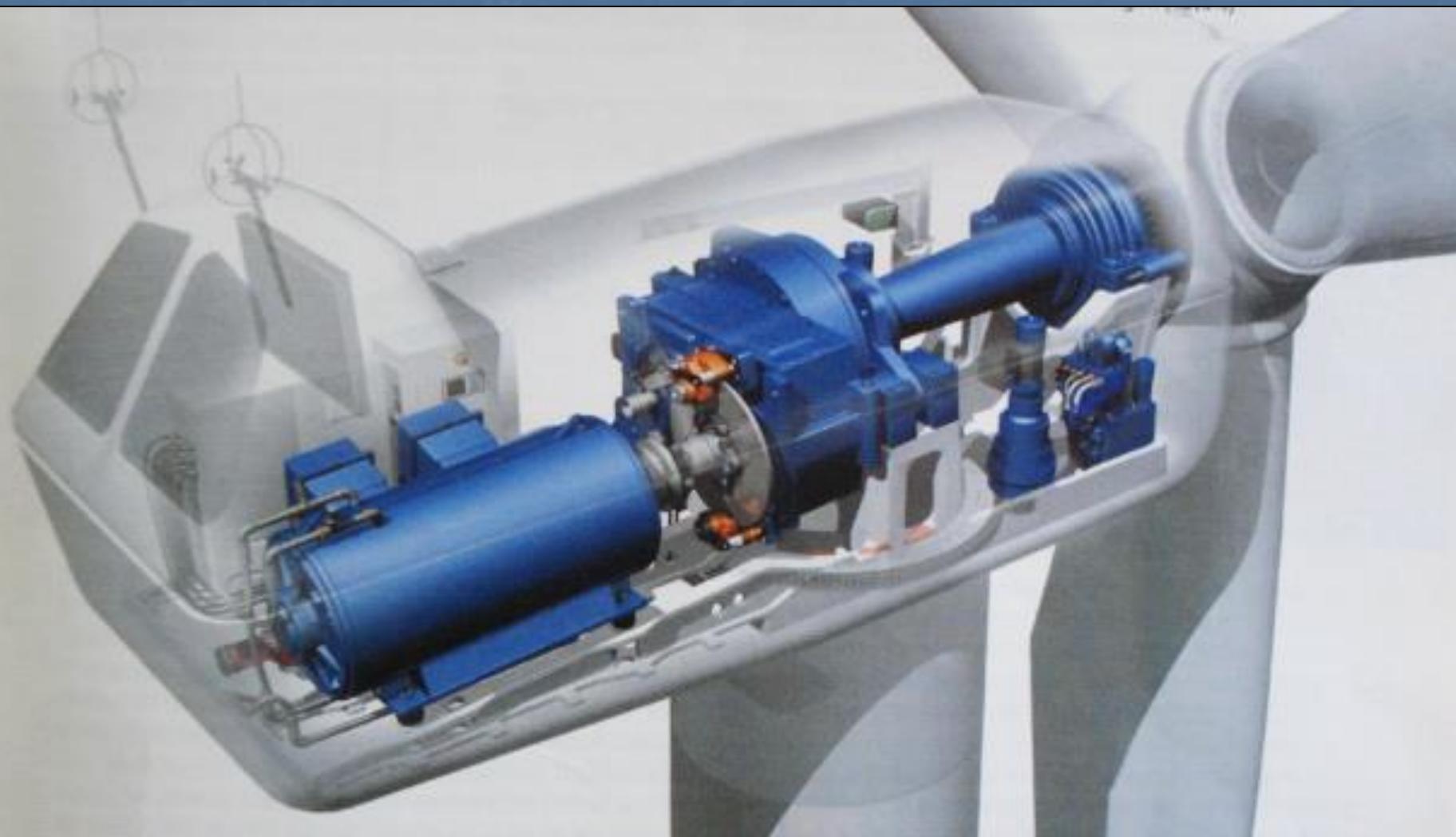
# Elementos en la Góndola de una TE



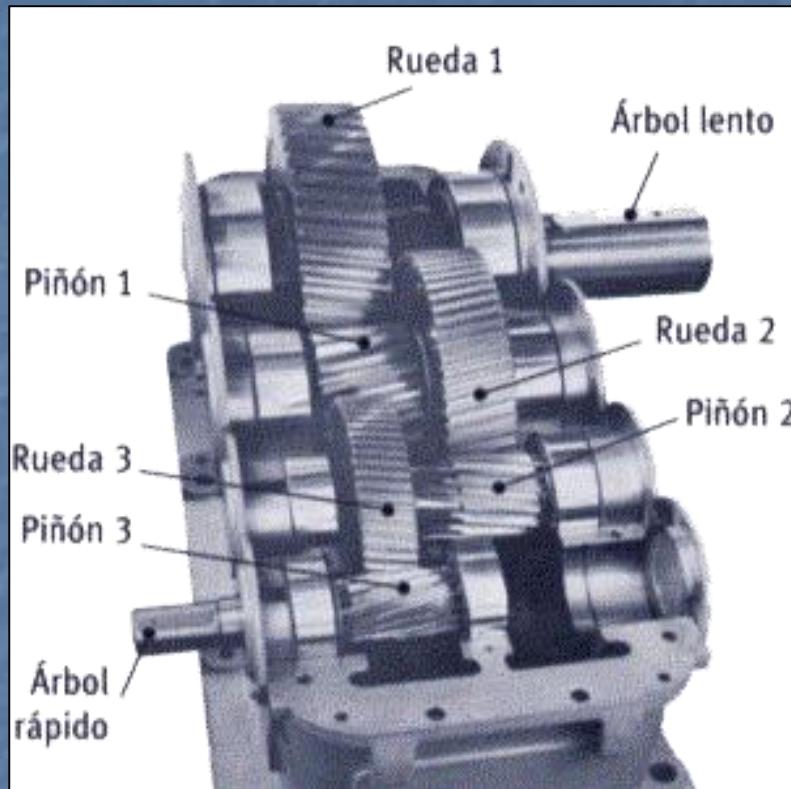
# Elementos en la Góndola de una TE (en inglés)



## Vista en perspectiva del interior de una góndola



## Caja Multiplicadora

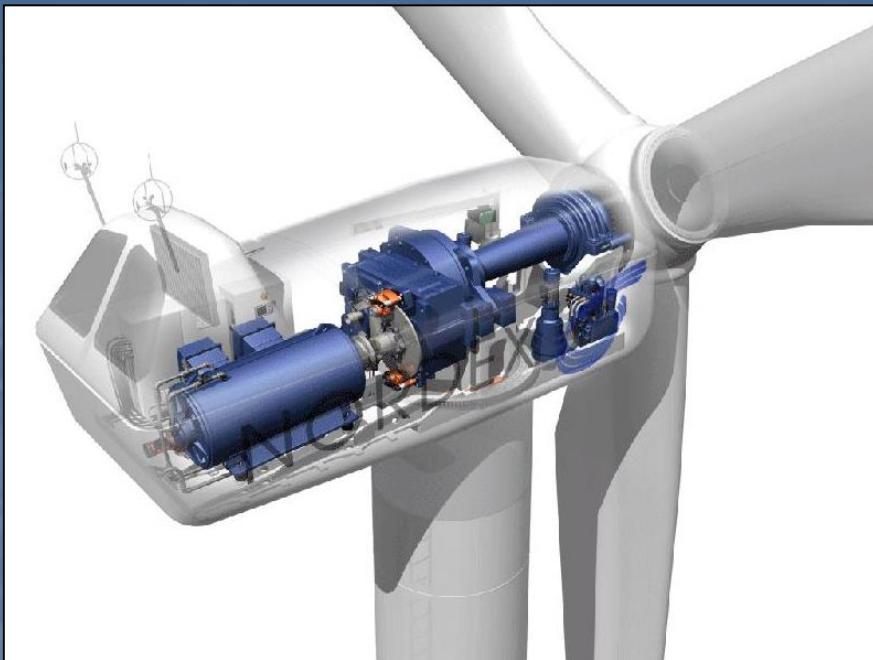


**Es un multiplicador de velocidad que convierte el movimiento rotacional de unos 15-50 rpm del rotor en  $\approx$  1500 rpm con que rota el G. La velocidad de giro del G depende de la f eléctrica y del nº de pares de polos de la máquina.**

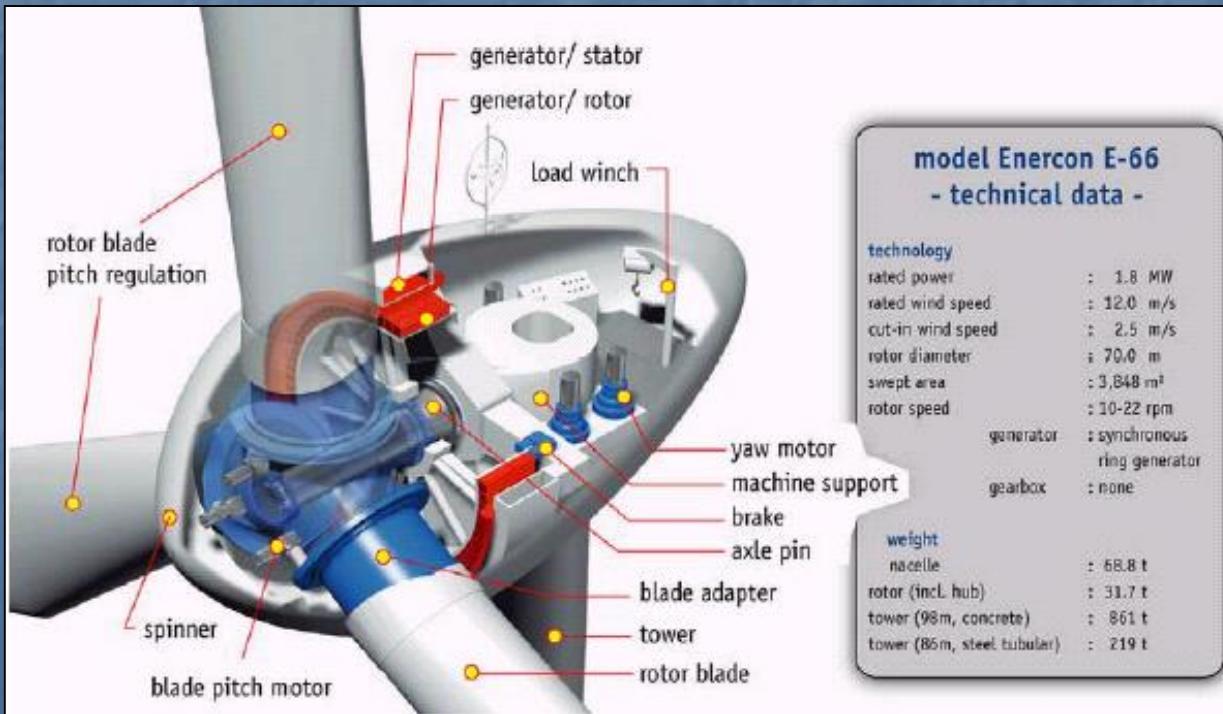
**Si se emplea un generador de anillo multipolo, no se requiere de caja multiplicadora.**

# Generador Eléctrico

- **Convierte la energía mecánica en energía eléctrica.**
- **Los hay de diferentes tipos:**
  - **Generadores Síncronicos (GS)**
  - **Generadores Asíncronicos (G.AS) o de inducción (jaula de ardilla o rotor bobinado)**
  - **Generadores de Corriente Continua (casi ya no se usan)**
- **El G adoptado, será función del diseño de la TE, en cuanto a velocidad de rotación (Velocidad Fija o Velocidad Variable) y a su Potencia (kW a MW).**
- **Velocidad Fija → G directamente conectado a la Red Eléctrica**
- **Velocidad Variable → G conectado a la Red Eléctrica a través de un Convertidor AC-DC-AC**



## Turbina Eólica, Velocidad de Rotación Fija con caja multiplicadora (GAS)



## Turbina Eólica, Velocidad de Rotación Variable sin caja (GS con imanes permanentes)

# Frenos

Hay dos tipos de frenos independientes:



**1.- *Sistemas de freno aerodinámico:*** Es un freno que se produce en el caso de pala fija, cuando un alerón (ubicado en la punta de las palas) gira. En el caso de una pala móvil, se logra el frenado cambiando su ángulo de paso.

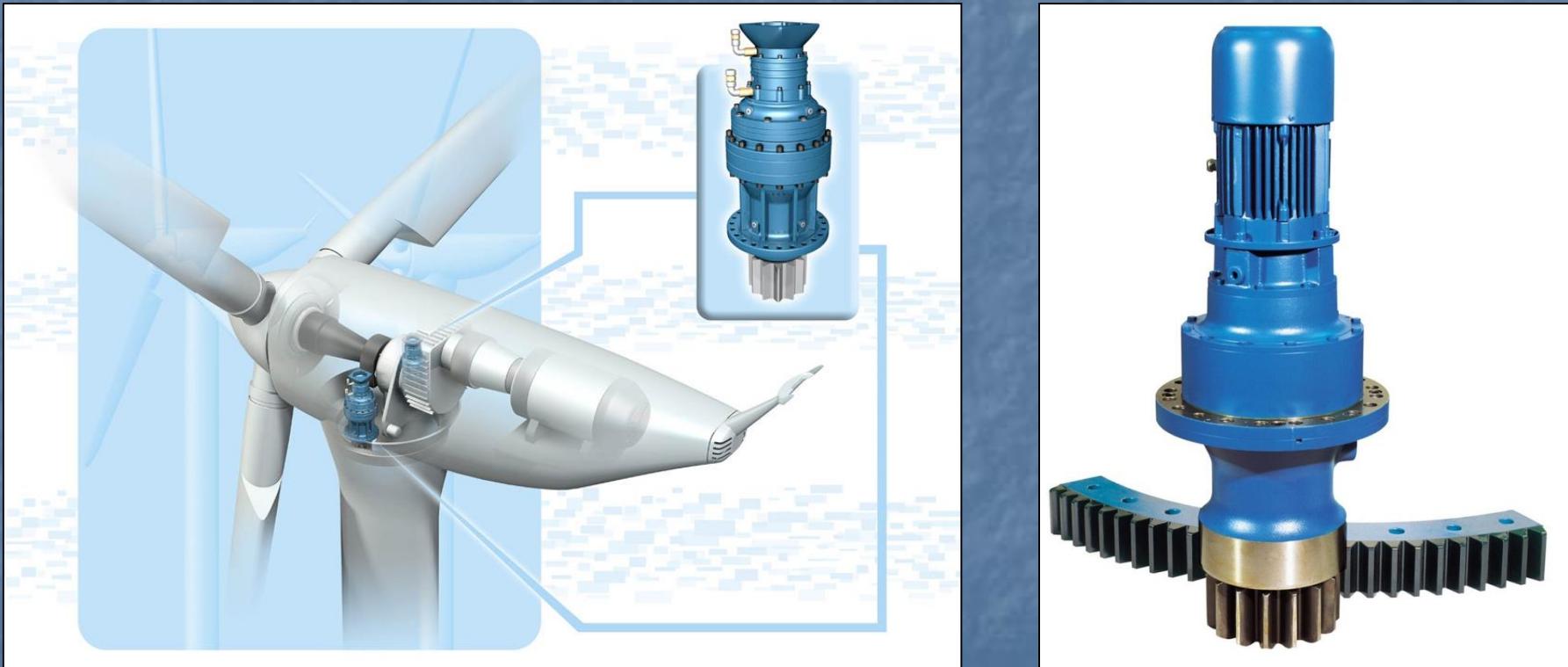


**2.- *Sistemas mecánicos:*** Es un freno de disco mecánico que se emplea principalmente cuando el aerodinámico falla o la turbina está en reparación. Depende del tipo de control.

En TE con control por pérdida aerodinámica (stall control), el freno mecánico tiene que asimilar toda la energía generada por el rotor y el G en caso de emergencia, por lo que debe tener una alta potencia de frenado. Lo contrario sucede cuando el freno mecánico se usa en TE con rotor con paso variable (pitch control).

## Mecanismo de Orientación (yaw)

**Este mecanismo permite que el rotor enfrente permanentemente al viento y pueda extraerle la máxima potencia.**



## Refrigeración

**La temperatura dentro de una góndola puede ser alta por el calor desprendido de la caja multiplicadora y del G.**

**Por ello se instalan ventiladores especiales en la góndola para mantener una temperatura adecuada. Además de esto se instalan unidades de enfriamiento para componentes individuales de la turbina, como en la caja multiplicadora.**

## Pararrayo

**Es mayor la probabilidad de un rayo de impactar en las palas. La corriente producida, pasa a lo largo de la pala por su interior, a través de metales conductores. Luego circula sobre la góndola y es dirigida hacia abajo por la torre hasta el anclaje terrestre. La corriente es desviada de las áreas altamente sensibles.**

## Sensores para el control y monitoreo de la TE

La góndola posee sensores o instrumentos de medición que constantemente están midiendo los parámetros siguientes:

- velocidad del viento (anemómetro)
- dirección del viento (veleta)
- velocidad del rotor y del generador
- temperatura ambiente y de los componentes
- presión del aceite
- ángulo de paso (palas móviles) y acimut (ángulo del mecanismo de orientación basado en la dirección del viento)
- magnitudes eléctricas y vibraciones en la góndola

Estos parámetros son usados por el:

- **Sistema de Control de Potencia:** a) regula la Psalida en función de la Vv instantánea para que se cumpla  $P_{salida} = P_{nominal}$   
b) Manda señal de parada de la TE en caso de viento excesivo.
- **Sistema de Control de la Orientación:** posiciona al rotor enfrentando siempre al viento.

# Fases del Montaje de una TE



1.- Transportando las partes





undation for a tubular tower to support  
nd turbine. Note the positioning frame  
ensure alignment of the tower flange.



## 2.- Fundación

readed rebar used for tensioning of the rebar  
cost foundation design. Unlike traditional sys-  
of the excavation is only partially filled with



## 5.- Montaje Palas en tierra

Assembling the rotor. Note the  
the blade root.



## 3.- Colocación Torre



## 4.- Colocación Gondola



## 6.- Colocación del Rotor en la Gondola

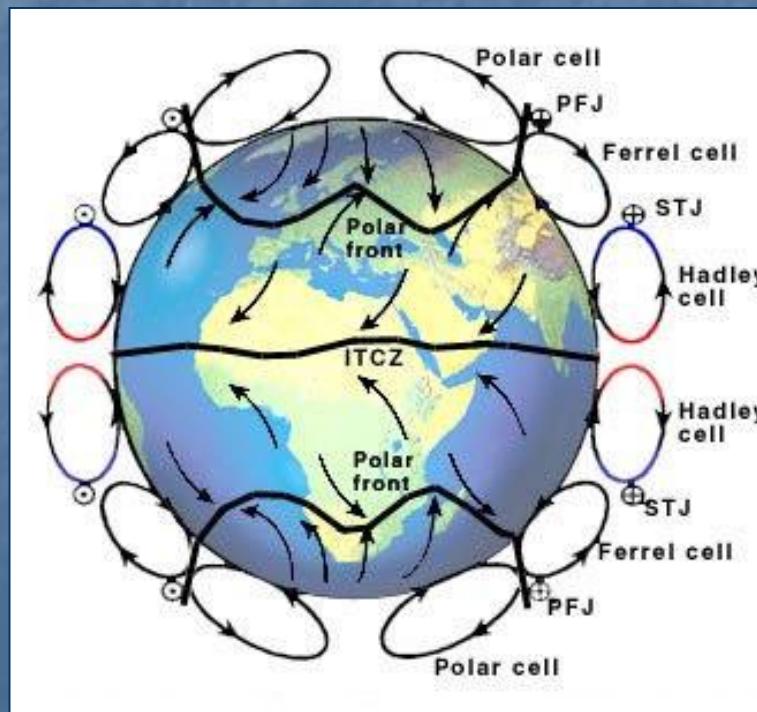


Cargo Container Facility Unit

## El Viento → Movimiento de masas de aire

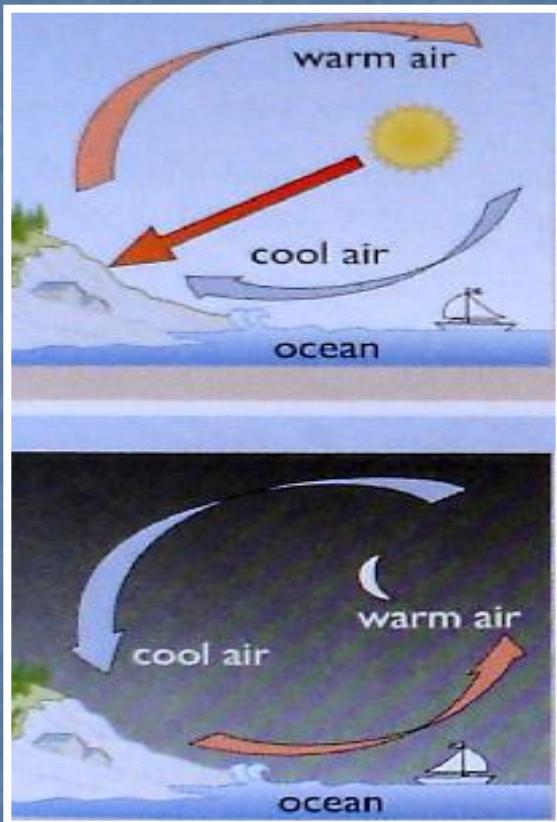
A escala global se produce por:

- **Calentamientos diferentes en el Ecuador y en los Polos** → diferencias de presiones atmosféricas.
- **Fuerza de Coriolis** → fuerza sentida por un cuerpo, en este caso la masa de aire, y que se suma a la centrífuga, relativa a un referencial en rotación (rotación terrestre).

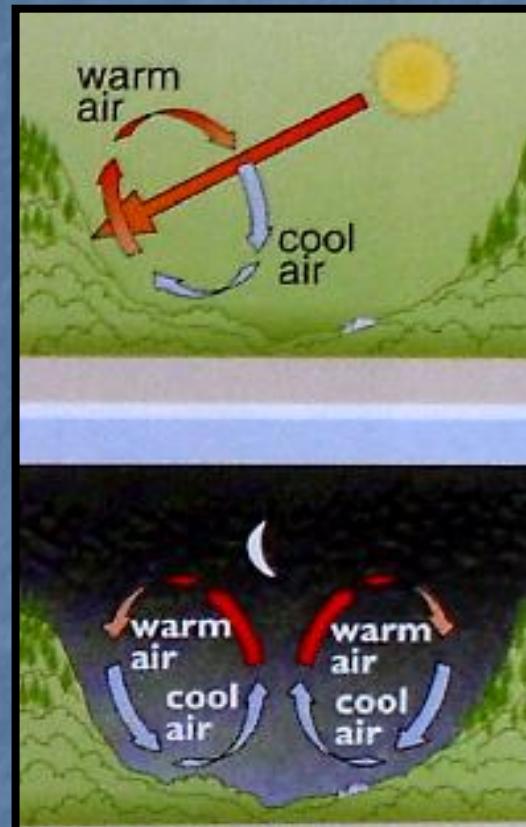


# Vientos Locales o Brisas

Brisa Marina



Brisa del Valle



Iner.térmica agua > Iner.térmica tierra  
→ agua se enfriá y se calienta más lentamente que la tierra

La parte superior de la montaña se calienta más que la parte inferior durante el día. A la noche se enfriá más rápido.

# Densidad de Potencia Eólica Disponible

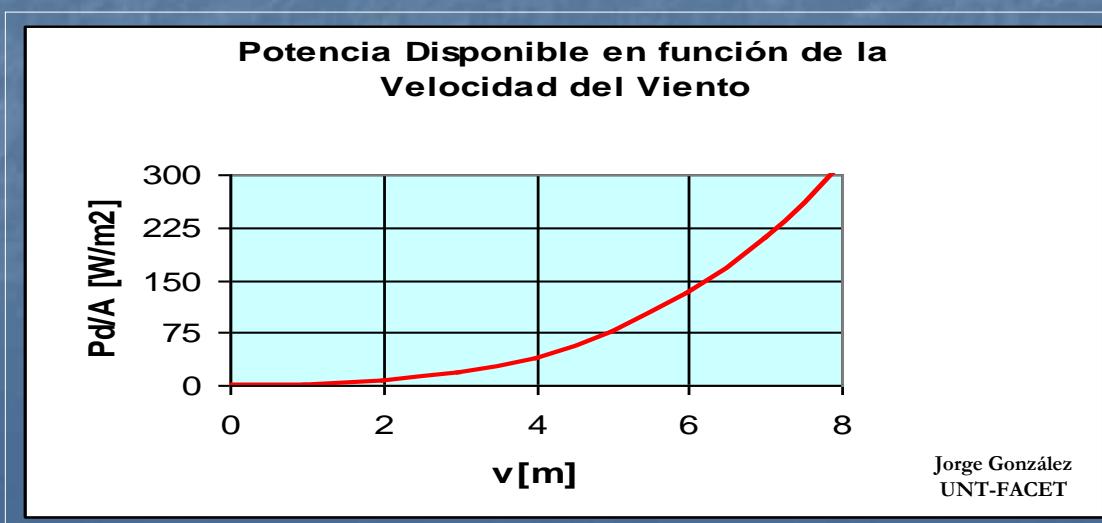
Se considera una masa de aire  $m$  de densidad  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] contenida en un cuerpo de base  $A$  [m<sup>2</sup>] y longitud  $l$  [m] que se mueve a una velocidad  $v$  [m/s].



Potencia disponible en el viento por unidad de área (densidad de potencia)

$$P_d / A [W/m^2] = \frac{1}{2} \rho \times v^3$$

→ Importancia de la velocidad



## Corrección de la densidad del aire por temperatura y altitud

$$\rho = \frac{P \times MW \times 10^{-3}}{RT} \quad [\text{Kg/m}^3]$$

P = presión absoluta [atm]

R = cte del gas ideal =  $8.2056 \times 10^{-5}$  [m<sup>3</sup> . atm . K<sup>-1</sup> . mol<sup>-1</sup>]

T = Temperatura absoluta [°K]

MW = peso molecular del aire = 28.97 [g/mol]

$$P = P_0 e^{-1.185 \times 10^{-4} H} = 1 \text{ (atm)} \cdot e^{-1.185 \times 10^{-4} H}$$

H = altura analizada [m]

P = presión a la altura analizada [atm]

P<sub>0</sub> = presión de referencia [1 atm]

## Impacto de la altura de la torre

Se puede caracterizar el impacto que produce la rugosidad de la superficie terrestre sobre la velocidad media del viento, a través de la expresión:

$$v_{buje} = v_{medición} \left[ \frac{H_{buje}}{H_{medición}} \right]^\alpha$$

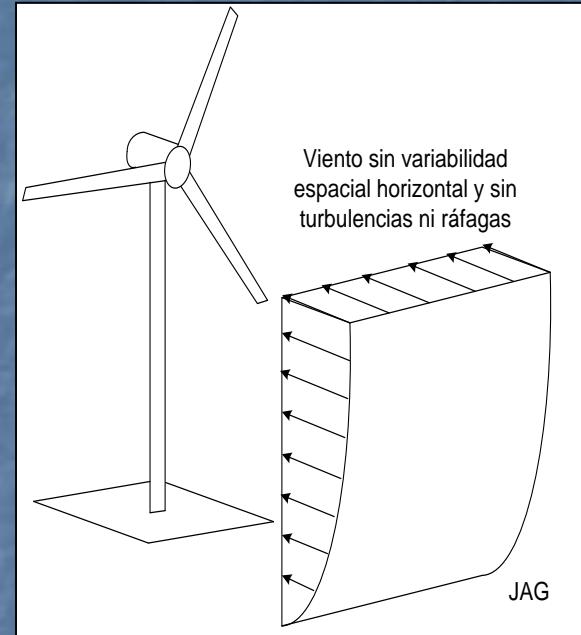
$\alpha$  = coeficiente de fricción

$H_{buje}$  = altura del buje

$V_{buje}$  = velocidad media del viento  
a la altura del buje

$H_{medición}$  = altura de medición (p.e. a 10 m).

$V_{medición}$  = velocidad del viento medida a la  
altura de medición

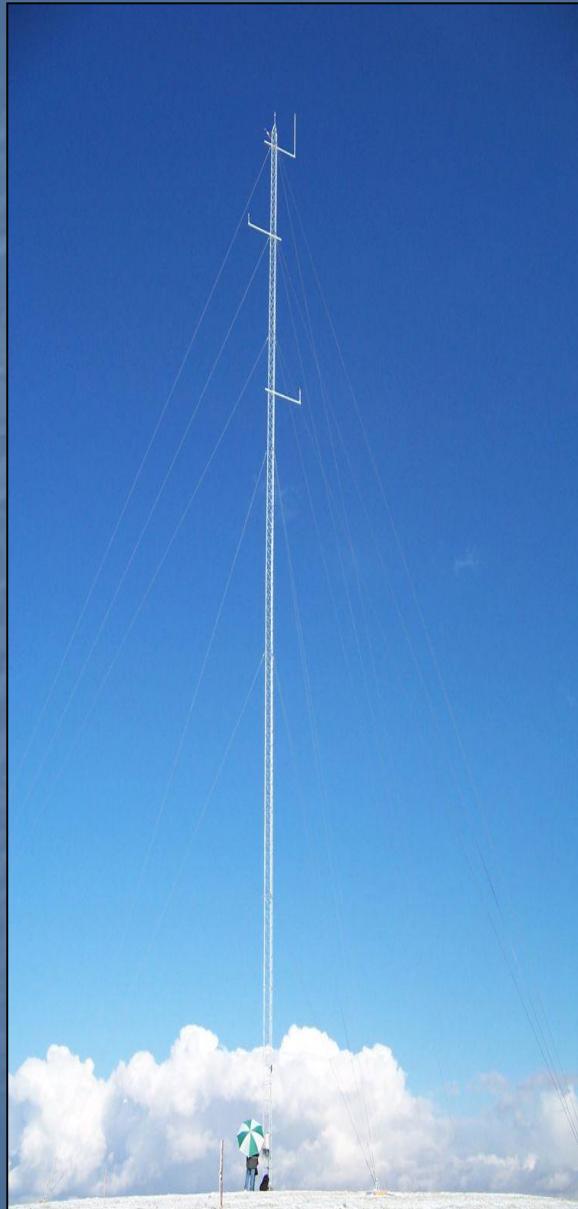


$\alpha$  se determina empíricamente y varía con la altura, temperatura, hora del día, estación del año, naturaleza del terreno.

$\alpha = 0.1$  para terrenos lisos, agua tranquila (sin obstác.)

$\alpha = 0.3$  terrenos y ciudades pequeñas, con árboles grandes

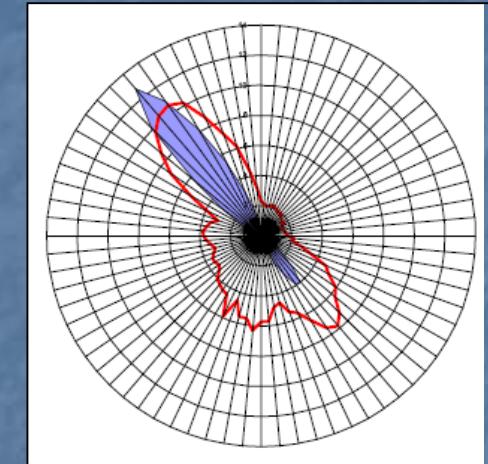
# Medición de algunas variables del viento



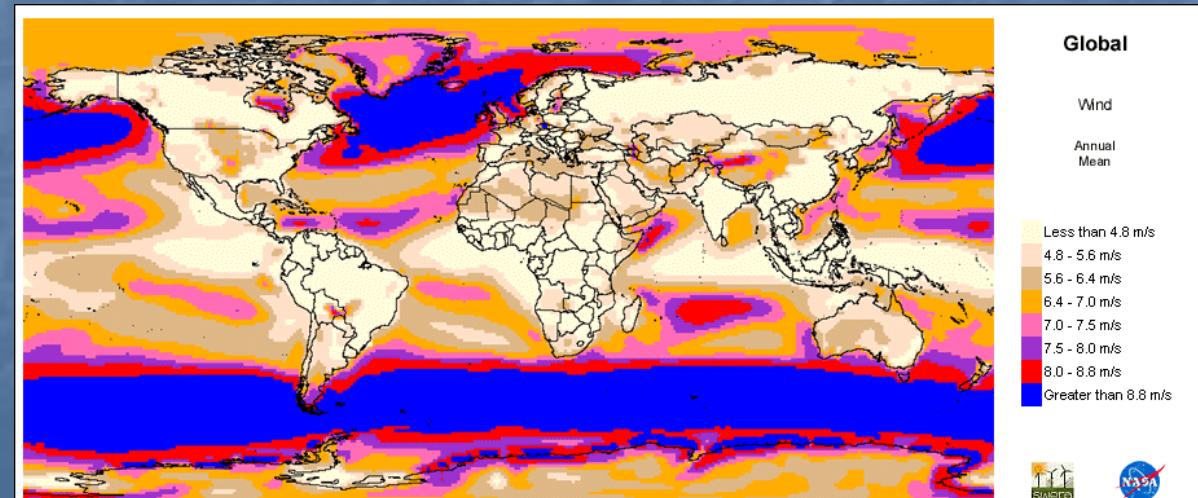
Antena, Anemómetro,  
Veleta, Procesador



Rosa de los Vientos



Velocidad Media Anual del viento  
a 50 metros de la superficie



**Ejemplo:** Un anemómetro marca a la altura de 10 metros, en un terreno con cultivos de maiz, una velocidad de 5 m/s. Estimar cual es la veloc. y potencia del viento a una altura de 50 m. Suponer 15°C y 1 atm de p

$$\alpha = 0.2$$

$$\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$$

$$v_{buje} = v_{medición} \left[ \frac{H_{buje}}{H_{medición}} \right]^\alpha \quad \rightarrow \quad v_{50} = 5 \cdot \left( \frac{50}{10} \right)^{0.20} = 6.9 \text{ m/s}$$

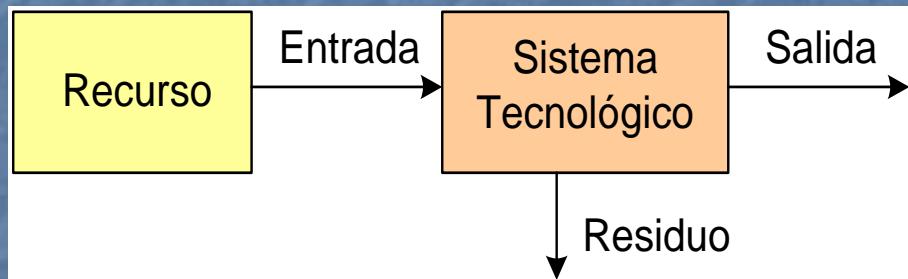
$$P_{50} = \frac{1}{2} \rho v^3 = 0.5 \times 1.225 \times 6.9^3 = 201 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

$$P_{10} = \frac{1}{2} \rho v^3 = 0.5 \times 1.225 \times 5^3 = 76.5 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

**En este caso, hay unas 2 veces y media más potencia a 50 m que a 10 m**

# Conversiones energéticas

En toda conversión energética se producen pérdidas.  
En otras palabras la eficiencia  $\eta$  nunca es del 100 %.



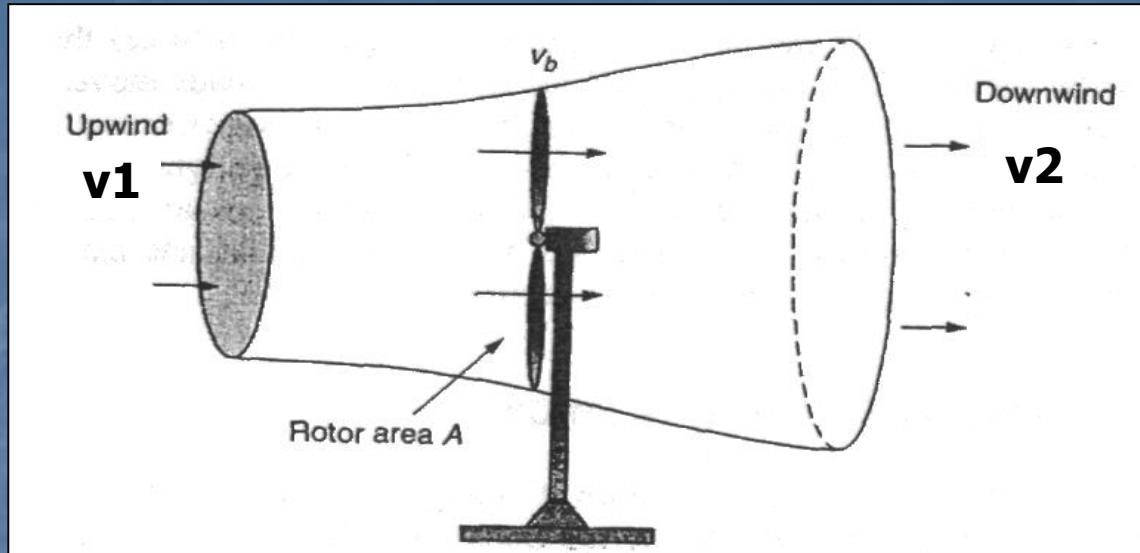
$$\eta = \frac{\text{Salida}}{\text{Entrada}} = \text{Eficiencia de conversión}$$

**Máquinas Térmicas:** La máxima  $\eta$  es la de Carnot. Da el máximo trabajo que puede entregar una máquina que trabaja entre una fuente caliente y una fría

**Sistema Fotovoltaico:** La conversión de la radiación solar en electricidad, está limitada por el ancho de banda del material FV, entre otras cosas.

**Turbinas Eólicas:** La máxima  $\eta$  es la de Betz. Da la máxima potencia del viento que se puede convertir en potencia mecánica en el rotor.

# El $\eta$ ideal de una Turbina Eólica: $\eta$ de Betz



La potencia mecánica en el rotor:

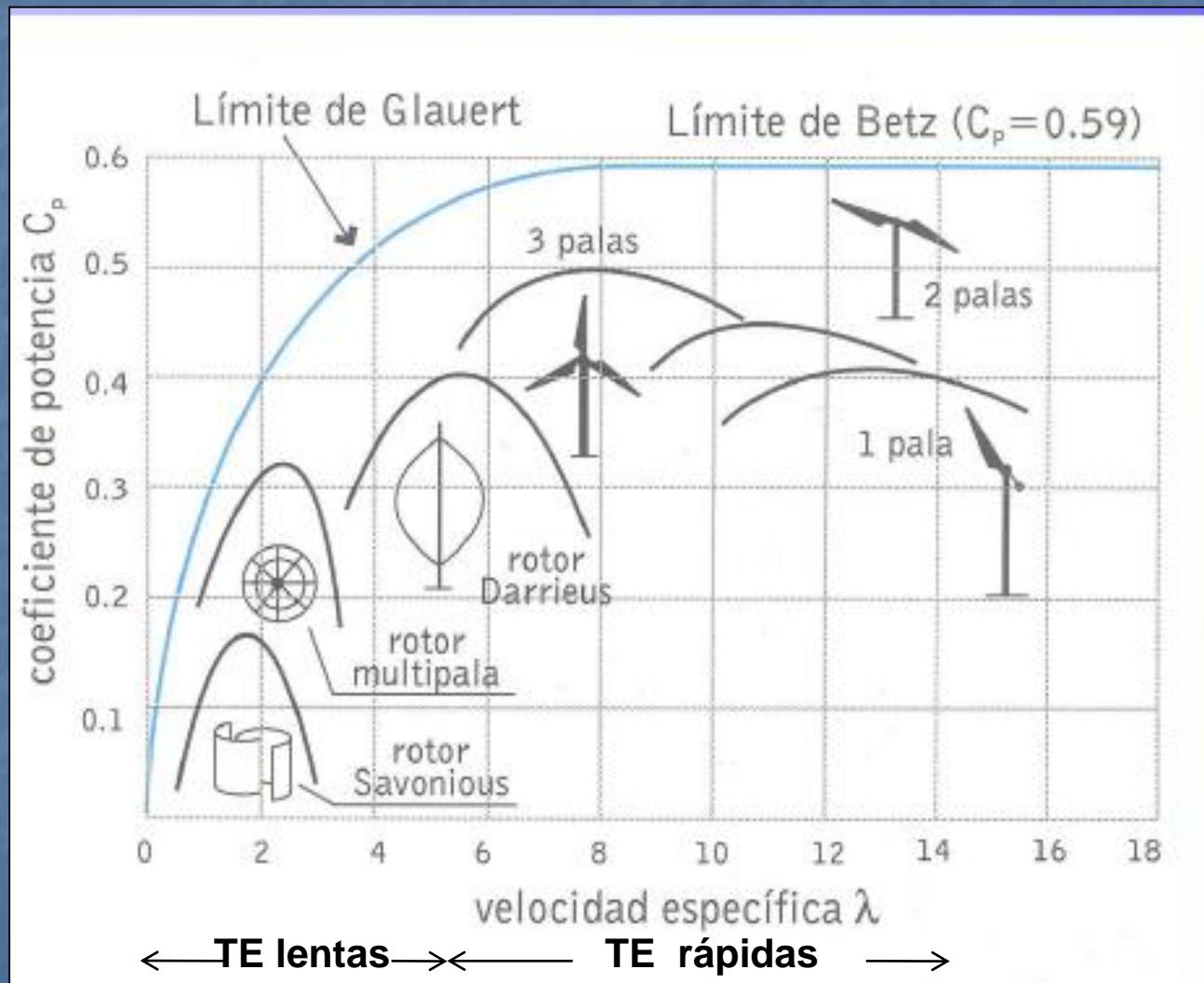
$$P_{rotor} = P_{viento} Cp = \frac{1}{2} \rho A v^3 \cdot Cp \quad Cp = \text{Coeficiente de Potencia}$$

$$k = \frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3} \rightarrow Cp_{\max} = \eta_{Betz} = \frac{16}{27} \rightarrow 59,3\% \rightarrow P_{rotorMaximo} = P_{viento} \eta_{Betz}$$

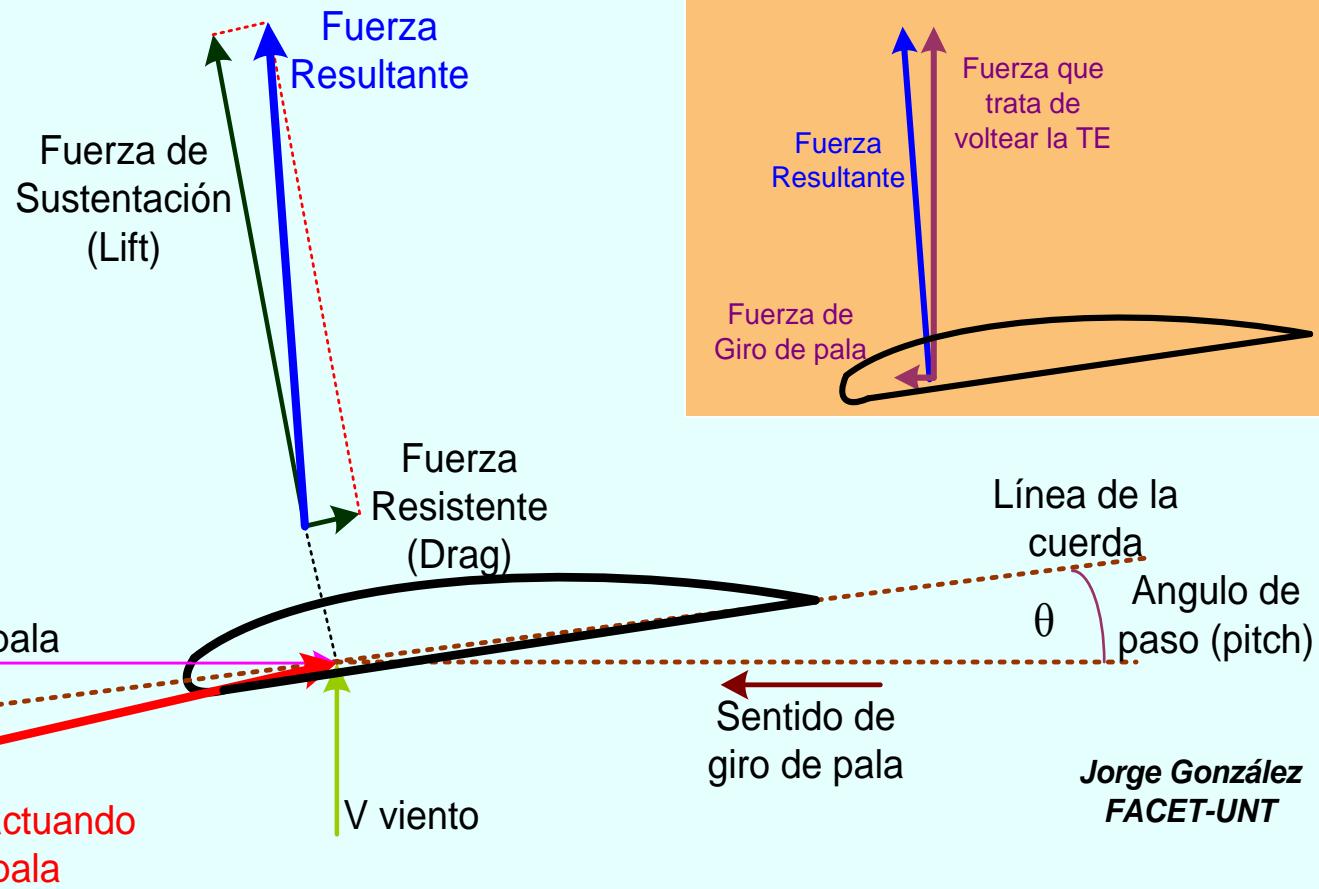
El mejor  $Cp$  en la práctica es del orden de 45-50 %

## Coeficiente de potencia $C_p$ en función de la Velocidad Específica

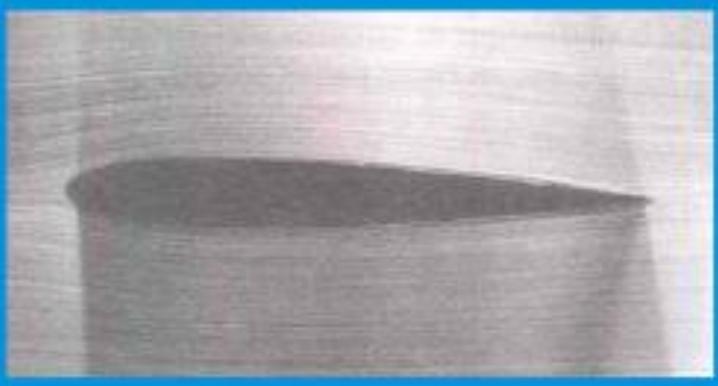
$$\lambda = \frac{\text{Velocidad Punta Pala}}{\text{Velocidad Viento}} = \frac{nx\pi D}{60V}$$



# Fuerzas sobre una Pala de la TE



## Pérdida aerodinámica en fn del ángulo de ataque



$$\alpha = 0^\circ$$



$$\alpha = 10^\circ$$



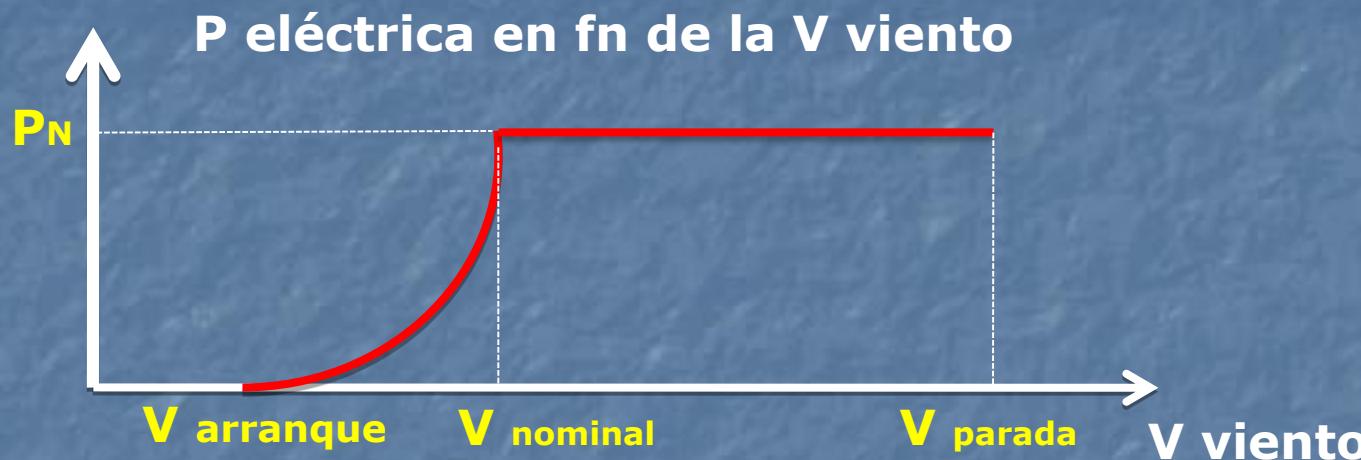
$$\alpha = 15^\circ$$



$$\alpha = 20^\circ$$

## CURVA DE POTENCIA DE UNA TE

Es una de las informaciones técnicas más importantes:



**V arranque** = mínima Vv para que el G venza pérdidas internas y comience a generar electricidad (3-5 m/s)

**V nominal** = Vv a la que el G comienza a entregar su Pnominal PN. Por encima de esa Vv se debe mantener la Potencia que entrega el G al valor **P<sub>N</sub>** (12-15 m/s)

**V parada** = máxima Vv permitida para que el G genere electricidad. Se debe frenar el rotor, porque por encima de esta Vv hay peligro real de destrucción de la TE (24-30 m/s).

# Regulación de la Potencia que entrega el Generador

## 1.- Entrada en pérdida aerodinámica pasiva (passive stall control)

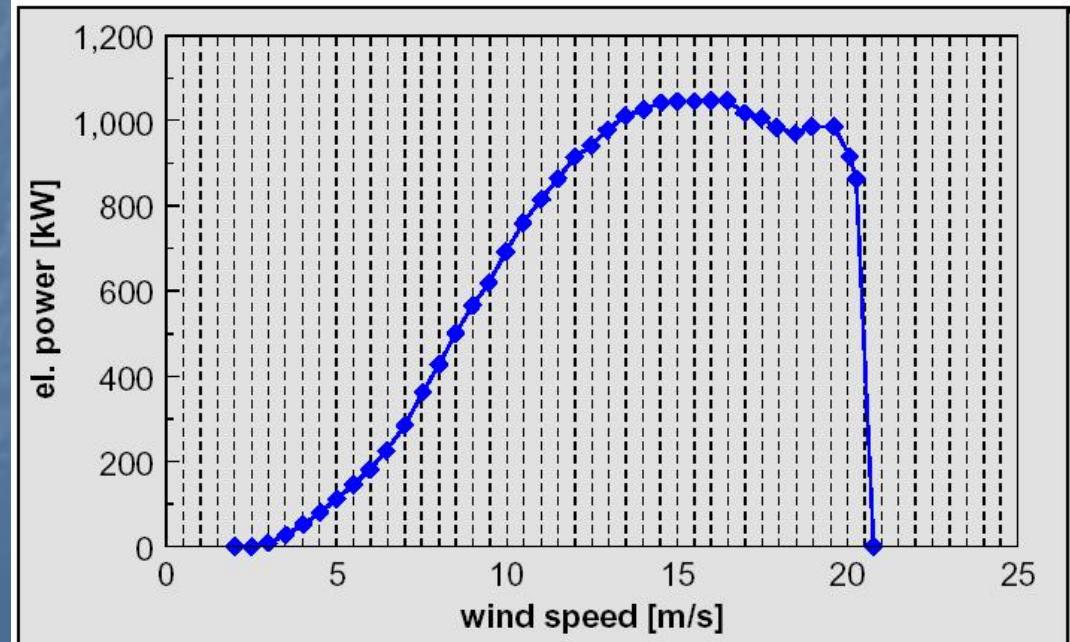
Palas fijas al buje → no pueden cambiar su ángulo de ataque.

Palas aerodinámicas diseñadas para reducir automáticamente su eficiencia cuando la  $V_v > V_{\text{Nominal}}$ .

Cuando  $V_v = V_{\text{parada}}$  → freno aerodinámico (spoiler) situado en la punta de las palas y freno mecánico de disco.

Esta regulación presenta:

- mucha simplicidad
- no tiene accionamientos
- no hay rodamientos.
- falta de precisión en controlar la  $P_n$



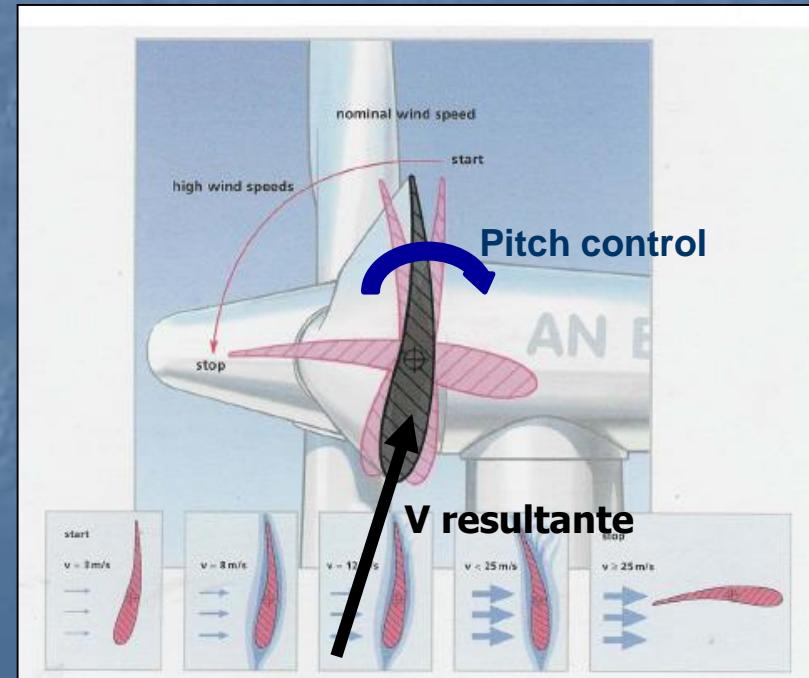
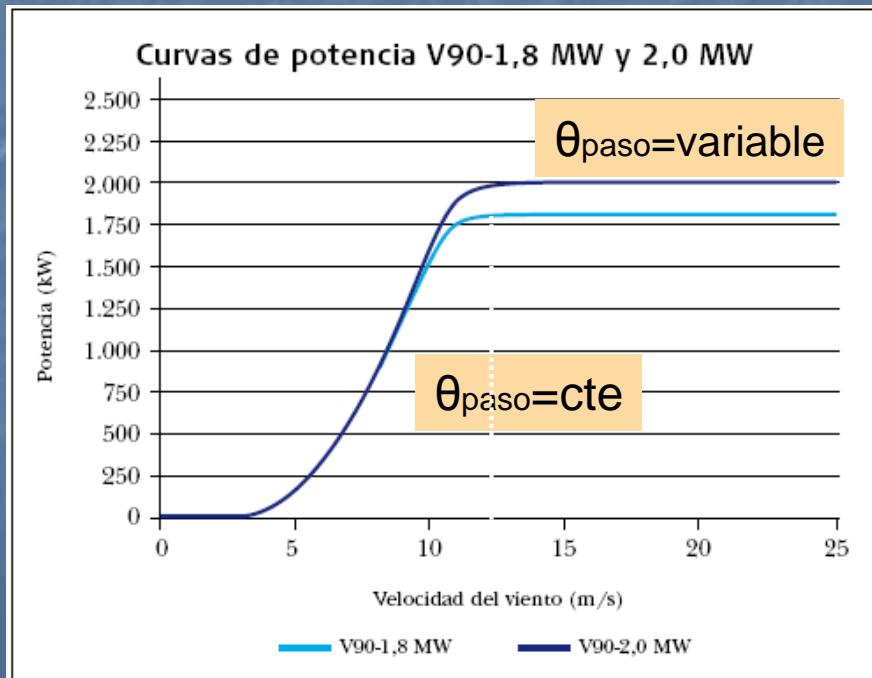
## 2.- Cambio de paso (active pitch control)

Palas rotan alrededor de su eje.

Sistema electrónico monitorea la Pe y aplica accionamiento (eléctrico o hidráulico)

$V_{\text{viento}} > V_{\text{nominal}} \rightarrow \text{si } Pe > P_n \rightarrow \text{reduce su ángulo de ataque en unos pocos grados} \rightarrow \text{reduce la sustentación} \rightarrow \text{reduce } Pe$

Esta regulación presenta: una mejor eficiencia aerodinámica, mayor producción, facilidad de arranque, mejor control de la  $P_n$ , menor carga

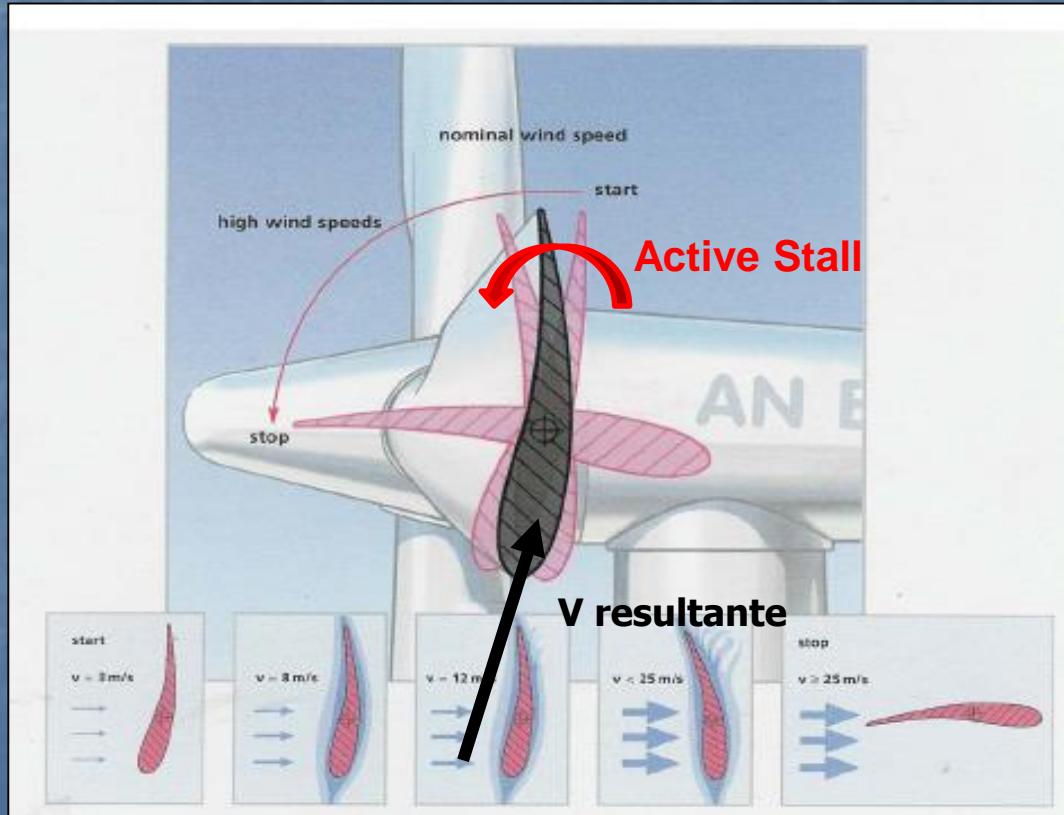


### 3.- Entrada en pérdida activa (active stall control)

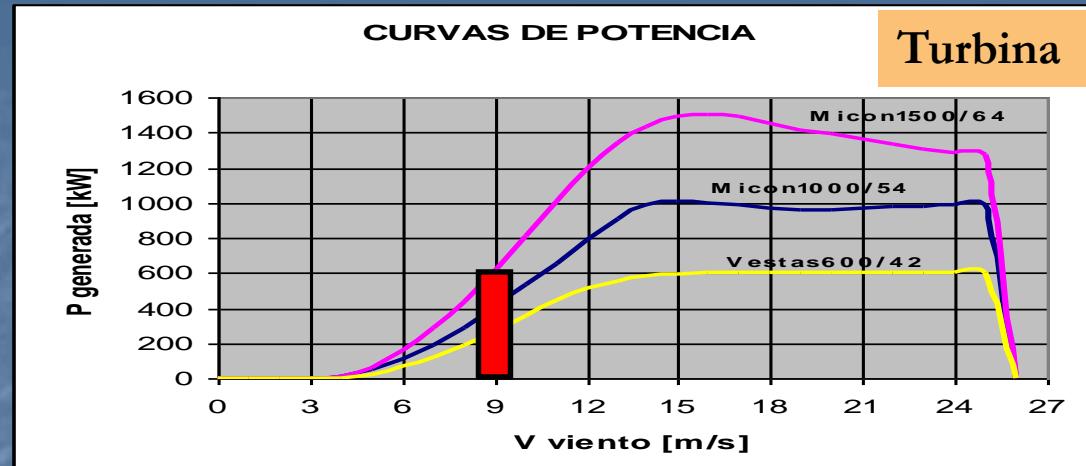
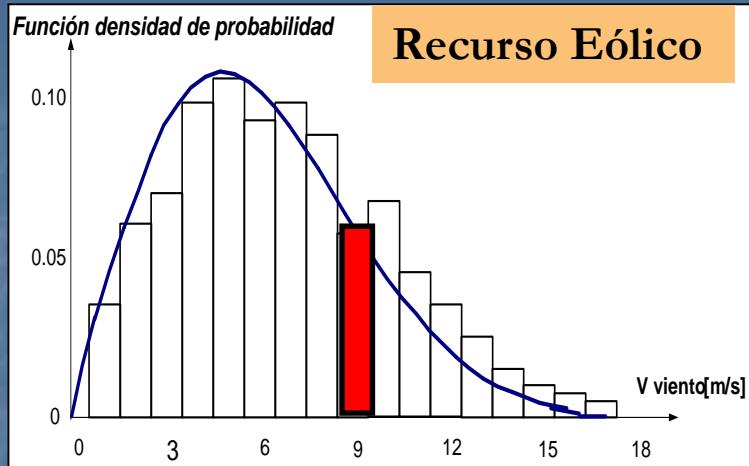
Combinación de los dos métodos anteriores. Para  $TE > 1\text{MW}$ .

Regula la potencia de salida del G con mayor precisión que la regulación por pérdida pasiva. Se disminuye el ángulo de paso (el ángulo de ataque crece) y se hace entrar en pérdida de manera controlada a la pala.

Es un movimiento en sentido contrario al sistema de control anterior.



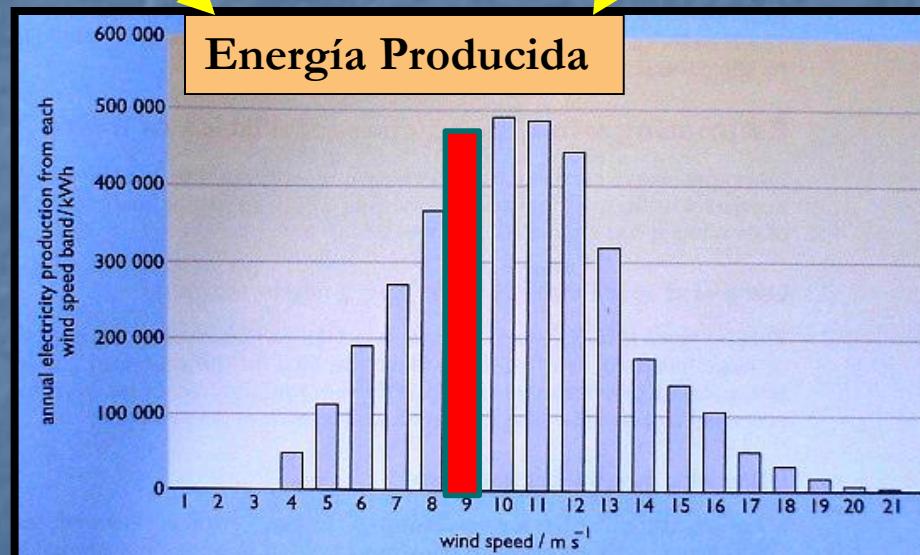
# ESTIMACION DE LA PRODUCCION ANUAL DE ENERGIA



histograma de Vv → fdp Weibull

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

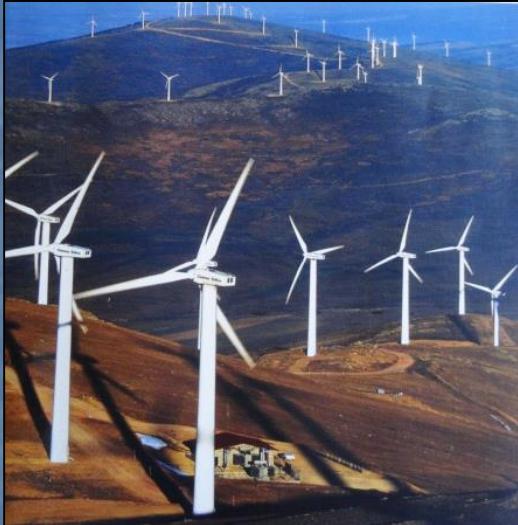
$k=2 \rightarrow$  fdp Rayleigh



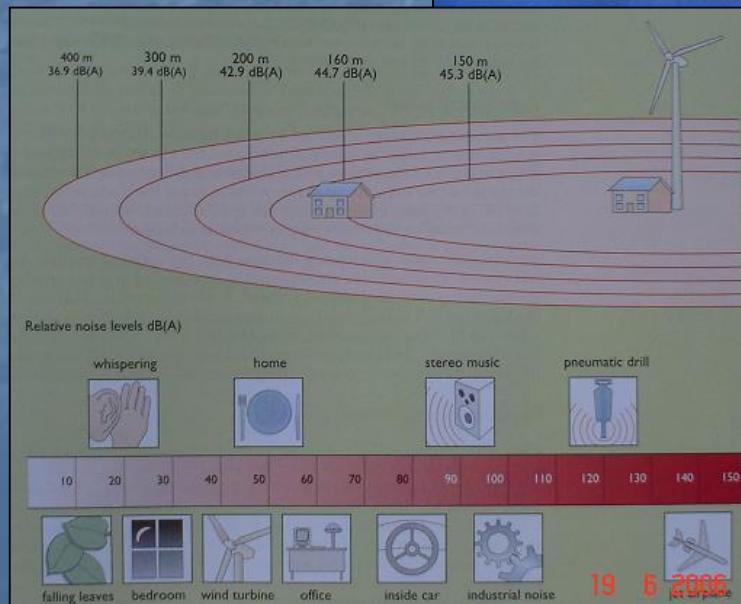
**E producida anual =  $\sum_i (h_i / \text{año}) \times P(v_i)$**

# Algunos Impactos Ambientales

## Visual (alteración del paisaje)



## Colisión de Aves



## Ruido Audible

# Algunas Areas de Investigación en Energía Eólica

- 1.- Modelos de Predicción de Vientos**
- 2.- Modelos que caractericen el flujo de viento y las estelas**
- 3.- Energía Eólica off shore**
- 4.- Aerodinámica de las palas y Ruido Aerodinámico**
- 5.- Materiales y Modelos estructurales de los Aerogeneradores**
- 6.- Diseño de nuevos generadores eléctricos**
- 7. Estudios de los Sistemas Eléctricos de Potencia con alta penetración de generación eólica**

AL FINAL DE CUENTAS, CHICHITA,  
LA CLASE PUDIENTE ES LA UNICA QUE  
PROCURA AHORRAR ENERGIA,  
APELANDO A ENERGIAS ALTERNATIVAS,  
COMO LA EOLICA.  
¡NENECO SE COMPRO OTRO  
VELEIRO!



# Programas Computacionales relacionados con EERR.

**Homer, Blade, Wasp, Pvsol, RETScreen, PVSys, etc.**

**Uno de ellos y de acceso libre →**

**Software RETScreen**  
[www.retscreen.net](http://www.retscreen.net)

- **Es una planilla de cálculos técnicos, económicos, financieros y de GEI. Permite realizar estudios de factibilidad de proyectos de EERR.**
- **Basado en modelos matemáticos de Tecnologías de EERR, cogeneración y eficiencia energética, integrados en un mismo software, así como la integración de tecnologías emergentes como la energía de corrientes oceánicas y la energía mareomotriz**
- **Contiene una base de datos climáticos que incluye 4 700 estaciones meteo. y la integración de datos satelitales de la NASA en el mismo soft de forma a cubrir la totalidad de la superficie habitada de la Tierra.**