

Recursos energéticos de la biomasa y del viento

**Parques eólicos terrestres:
cálculos, definiciones....**

LUGO – 7 de Mayo del 2009

Dr. José Luis del Valle-Inclán



Universidad Nacional de
Educación a Distancia

DIEEC/UNED



Departamento de Ingeniería
Eléctrica, Electrónica y de Control

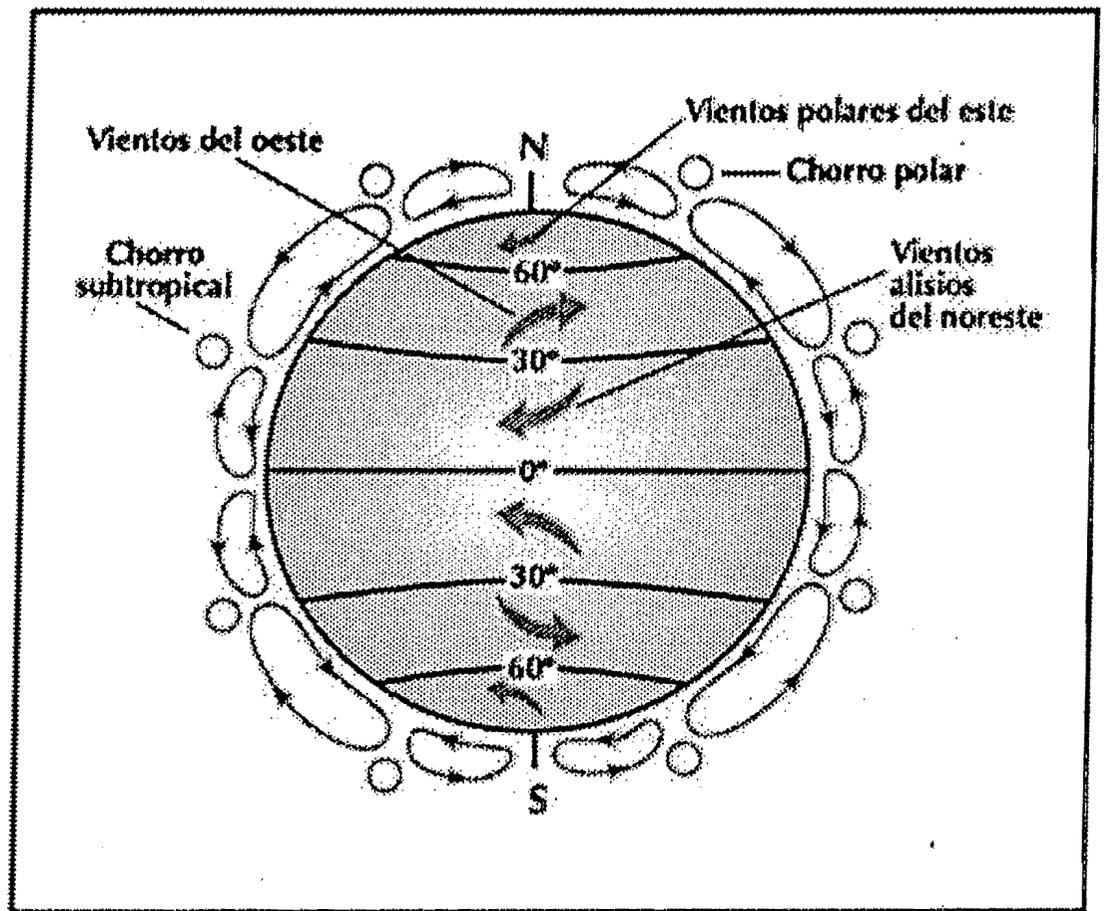
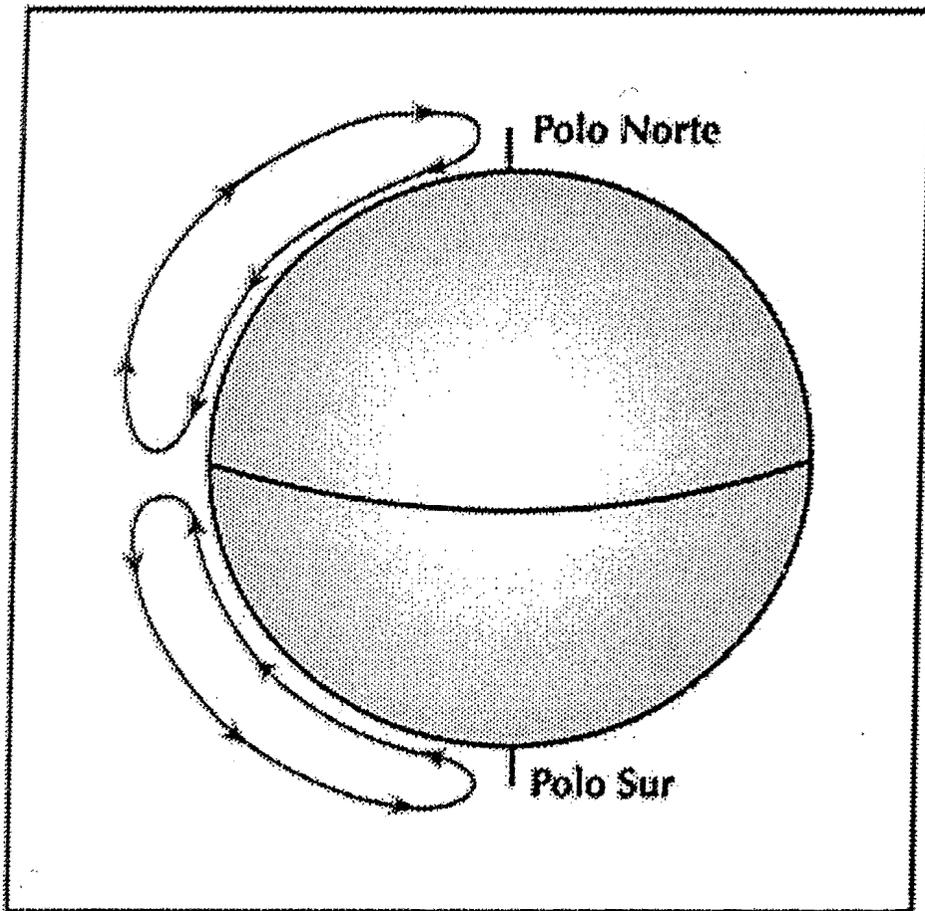
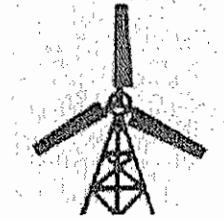
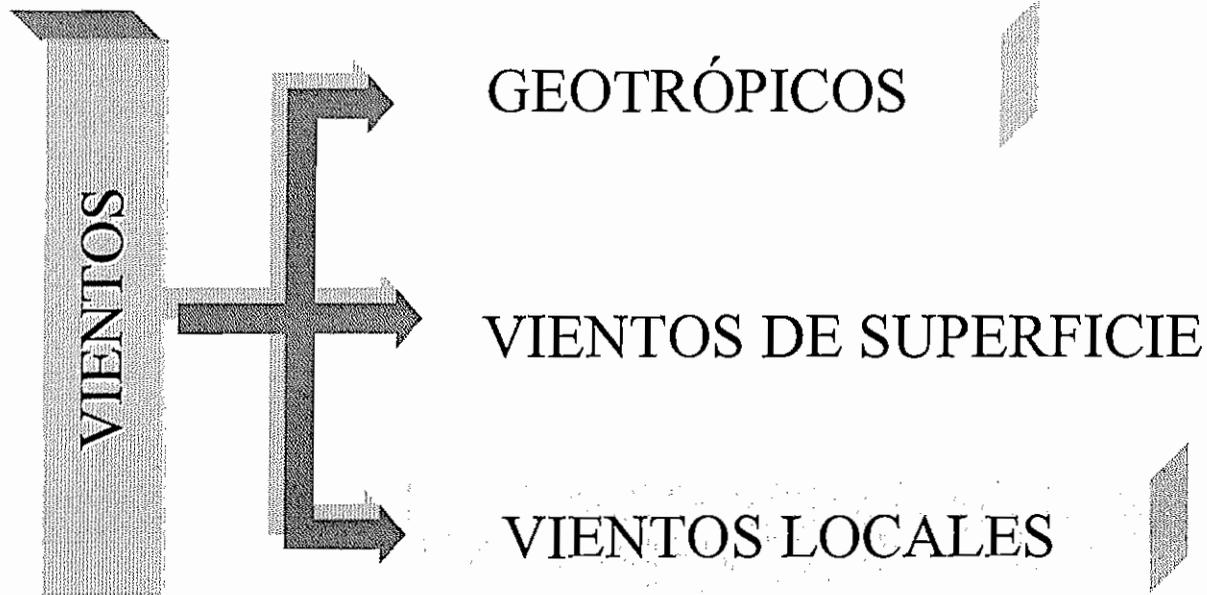


Figura 2. Movimiento convectivo en la atmósfera

Energía Eólica



Clasificación de los vientos



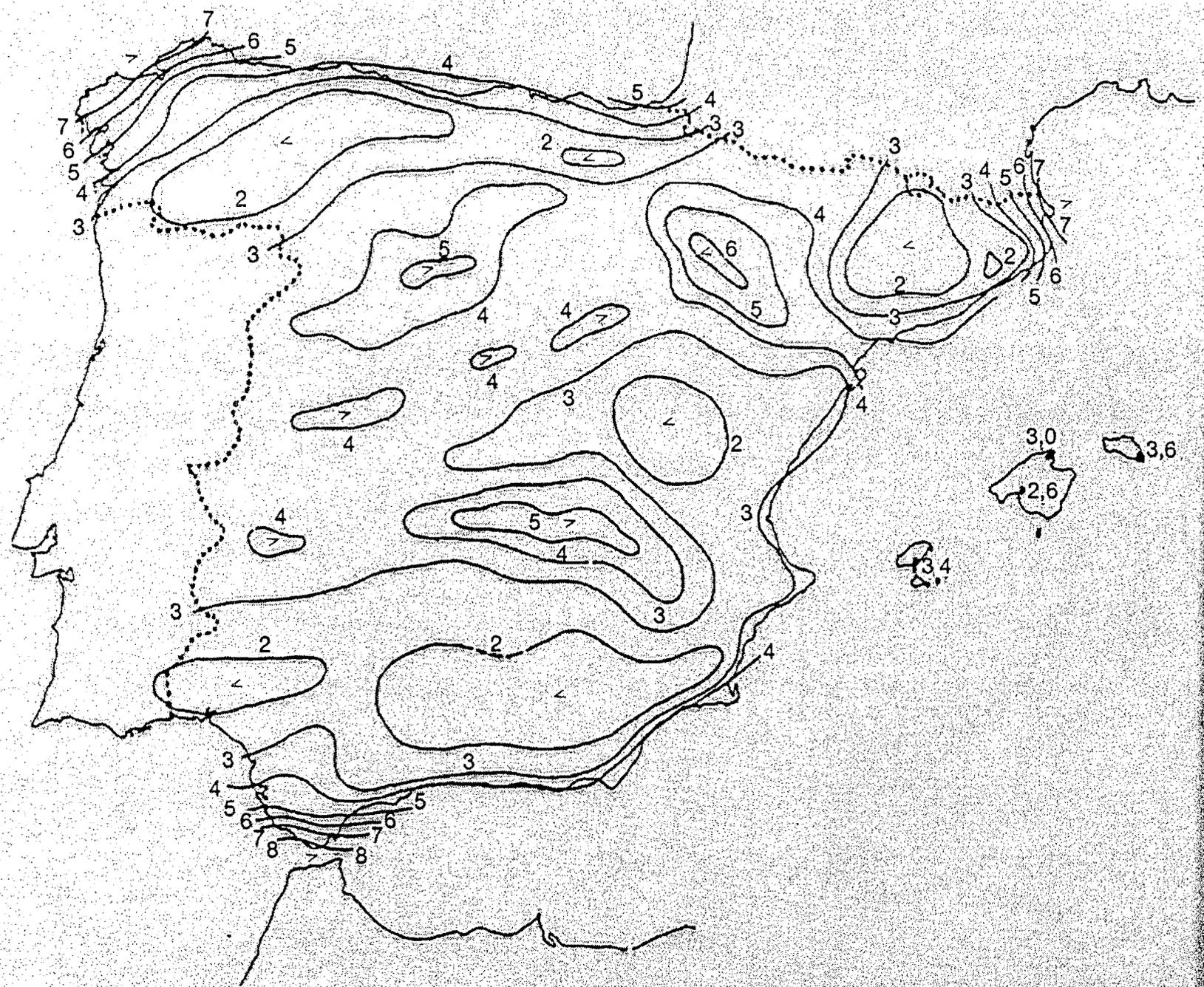
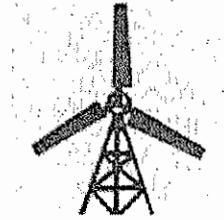
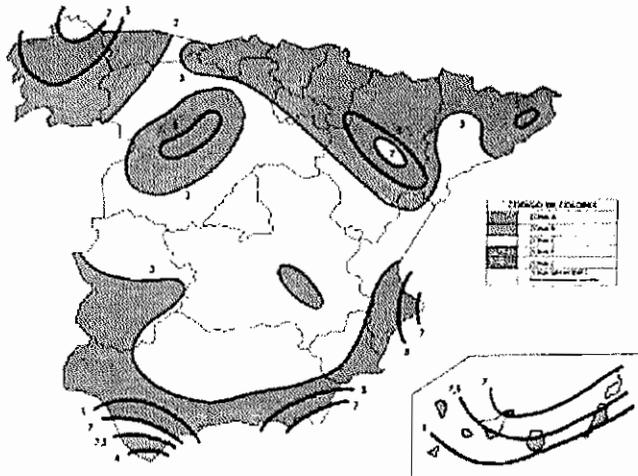


Figura 3.16. Mapa eólico correspondiente a la España peninsular (incluidas las Baleares). La velocidad media anual (m/s) corresponde a mediciones a 10 metros de altura sobre el suelo

Energía Eólica



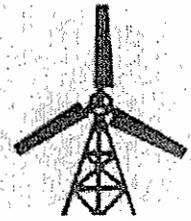
- Zonas eólicas: $> 5\text{m/s}$



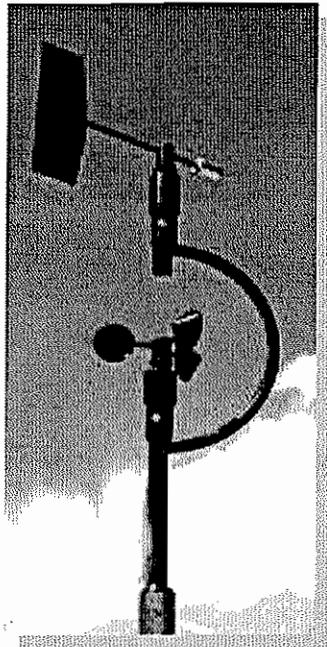
ZONA (código de colores)	POTENCIAL EÓLICO	DURACIÓN (Horas/año)	POTENCIAL ENERGÉTICO (kWh/kW-a)
A	muy alto	>5.250	3.100 a 4.750
B	alto	4.380 a 5.250	1.820 a 3.200
C	medio	3.500 a 4.380	1.250 a 2.480
D	medio- bajo	2.600 a 3.500	700 a 1.750
E	bajo	1.750 a 3.500	350 a 1.060
SIN INTERÉS	Emplazamien- tos concretos		

Principios de energía eólica. Aerogeneradores

Energía Eólica

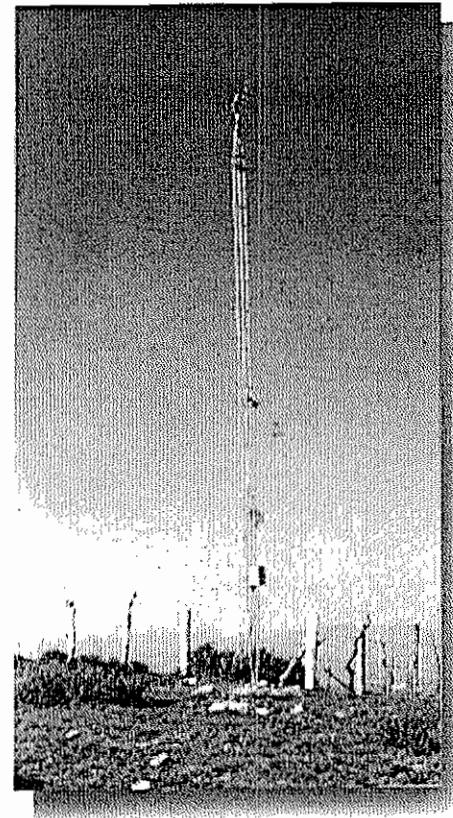


❖ Medida del viento: Sensores

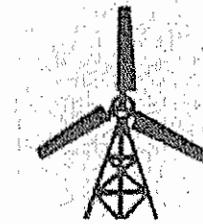


➤ Veleta

➤ Anemómetro



Energía Eólica



❖ Variación de la velocidad del viento con la altura

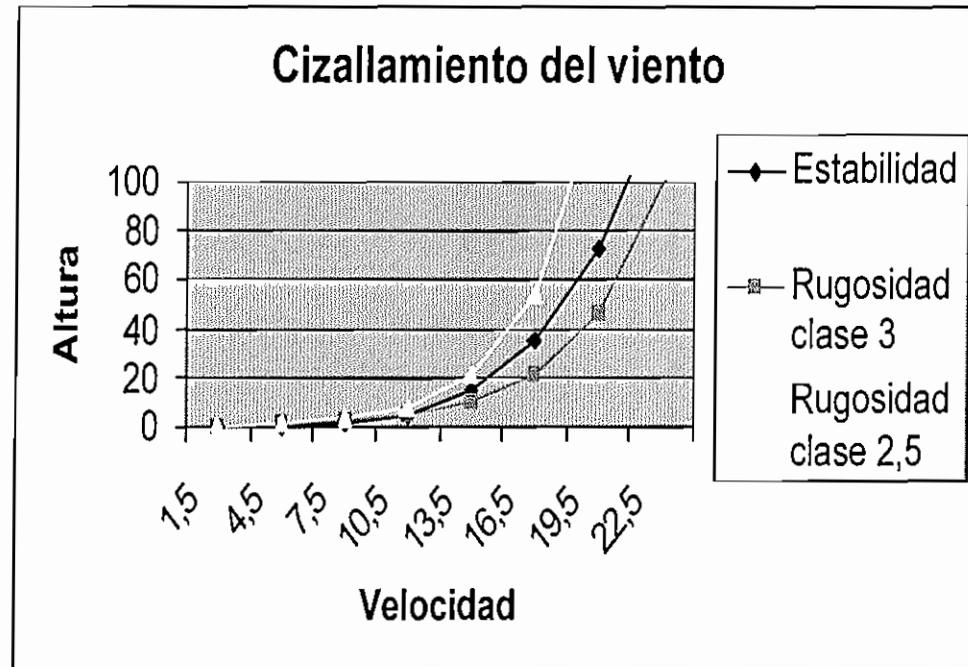
▪ Perfil de velocidades:

▪ Estabilidad atmosférica

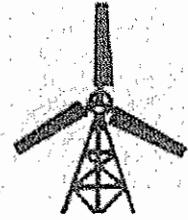
$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{h}{h_0} \right)^n$$

▪ Rugosidad (rg)

$$\frac{V}{V_0} = \frac{\text{Ln} \left(\frac{h}{rg} \right)}{\text{Ln} \left(\frac{h_0}{rg} \right)}$$



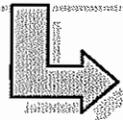
Energía Eólica



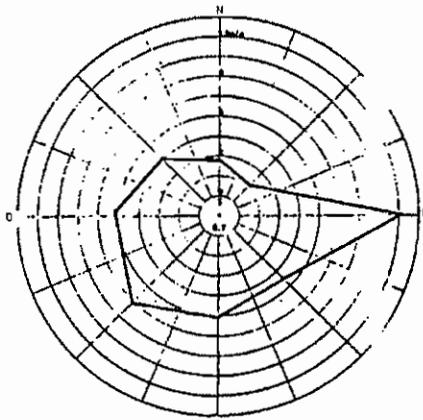
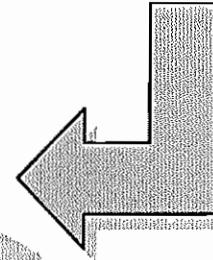
❖ Tratamiento de datos

- Velocidad
 - Módulo
 - Dirección y sentido

🕒 Frecuencia

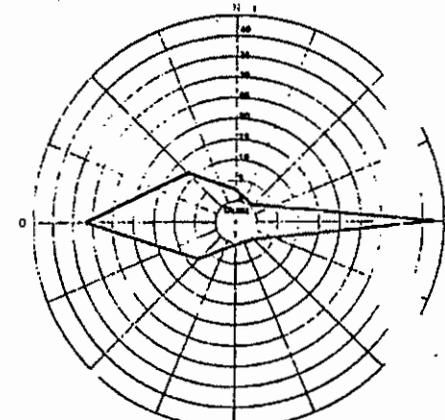


Rosas de los Vientos



Velocidades medias (m/s)

Zona del Estrecho



Frecuencias (%)

Fuente: D.M.C.

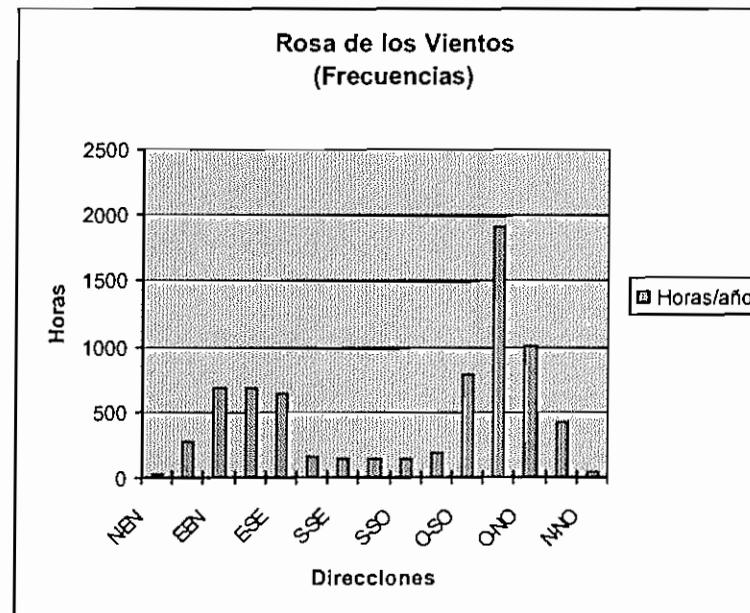
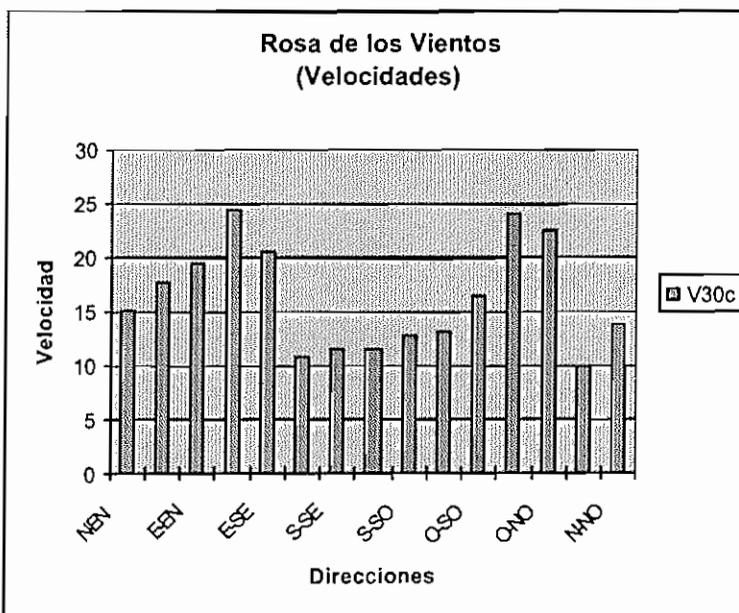
Energía Eólica



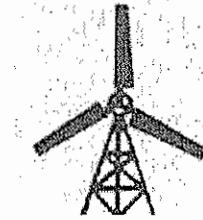
❖ Tratamiento de datos

➤ Velocidad

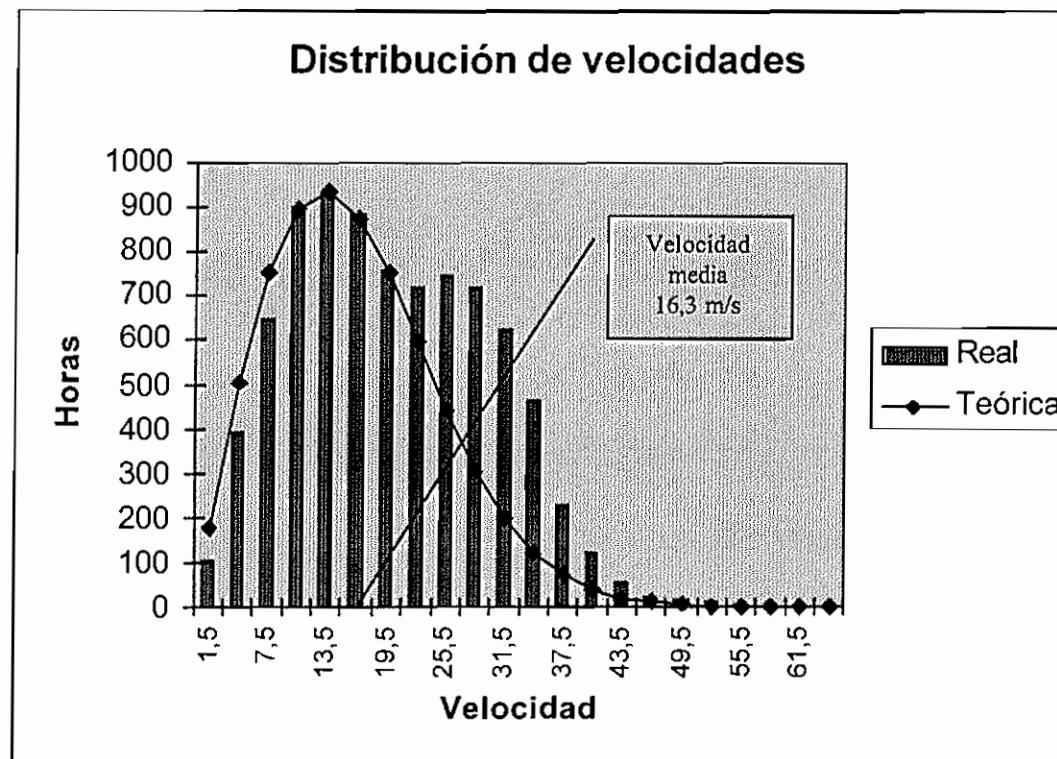
🕒 Frecuencia



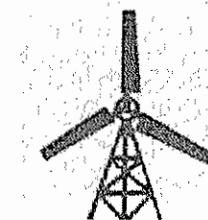
Energía Eólica



- Distribución de la velocidad del viento
 - Función de distribución: Weibull (Rayleigh)



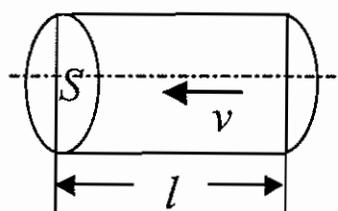
Energía Eólica



➤ Energía del viento

- Energía cinética de una masa de aire

$$E_c = \frac{1}{2} \rho S l v^2$$



- Densidad de energía (Julio/ m²)

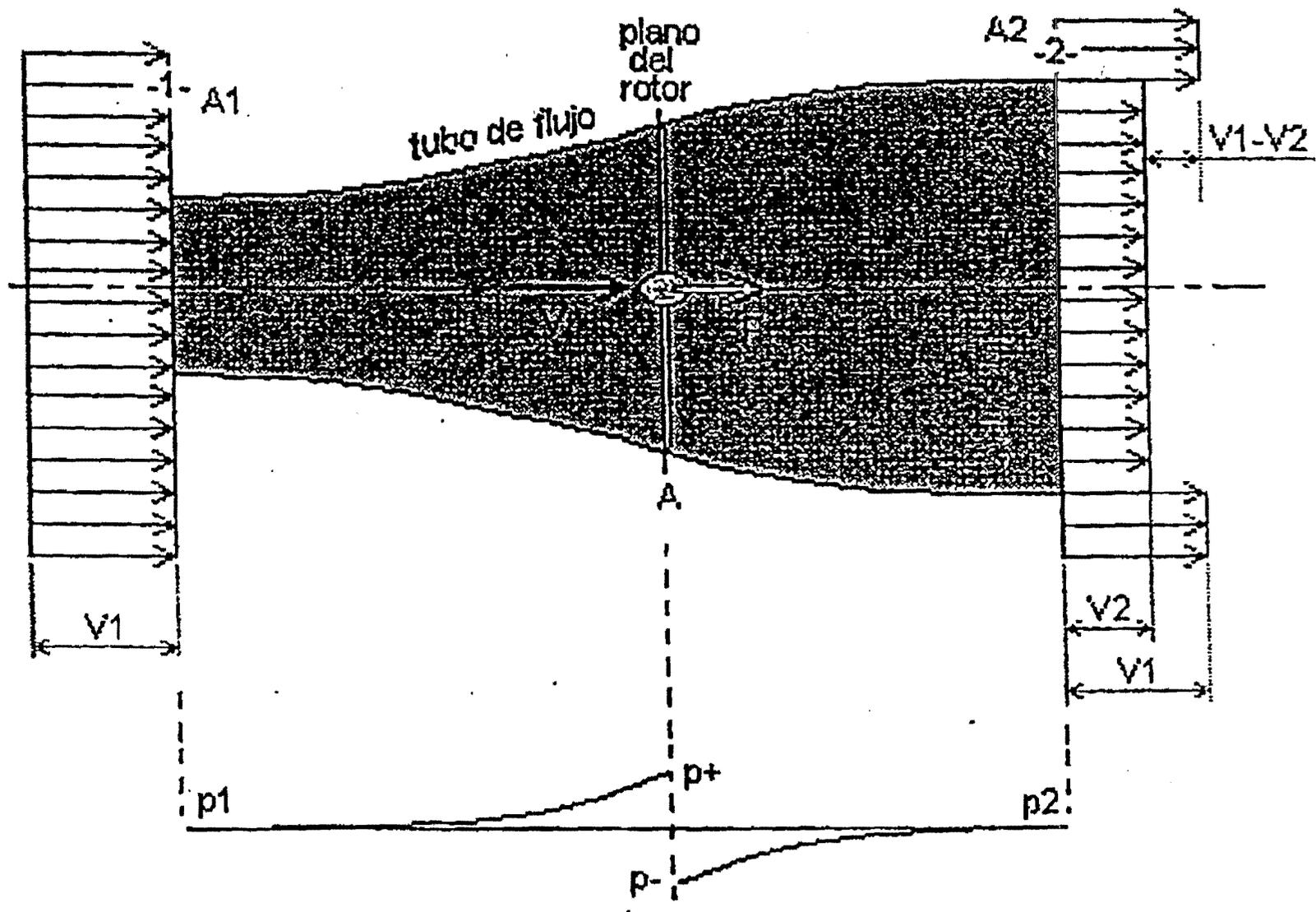
$$e_c = \frac{E_c}{S} = \frac{1}{2} \rho l v^2$$

➤ Potencia generada por el viento

$$P = \frac{1}{2} \rho S v^3$$

- Densidad de potencia (W/m²)

$$p = \frac{P}{S} = \frac{1}{2} \rho v^3$$



Teoría del límite de Betz

1) ECUACIÓN DE LA CONTINUIDAD:

$$Q = \text{constante.} \quad V_1 \cdot A_1 = V \cdot A = V_2 \cdot A_2 \quad (1)$$

2) TEOREMA DE LA CONSERVACIÓN DE LA CANTIDAD DE MOVIMIENTO (TEOREMA DE EULER)

$$F = \rho \cdot Q (V_1 - V_2) = \rho \cdot A \cdot V (V_1 - V_2) \quad (2)$$

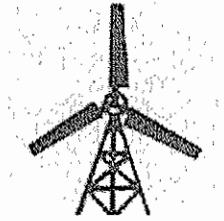
También podemos calcular esta fuerza como: $F = A (p^+ - p^-)$ (3)

3) ECUACIÓN DE LA CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA (TEOREMA DE BERNOUILLÍ)

$$p_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_1^2 = p^+ + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2$$

$$p_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_2^2 = p^- + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2$$

Energía Eólica



- Energía captada
 - Límite de Betz

$$\frac{E_{\text{Captada(máx.)}}}{\frac{1}{2} \rho S l v^2} = \frac{16}{27}$$

- Potencia máxima captada

$$P_{\text{Captada(máx.)}} = \frac{16}{27} \times \frac{1}{2} \rho S v^3$$

- Potencia máxima recuperada (Wattios)

$$P_{\text{captada(máx.)}} = 0,285 D^2 v^3$$



Wind Turbine Power Basics

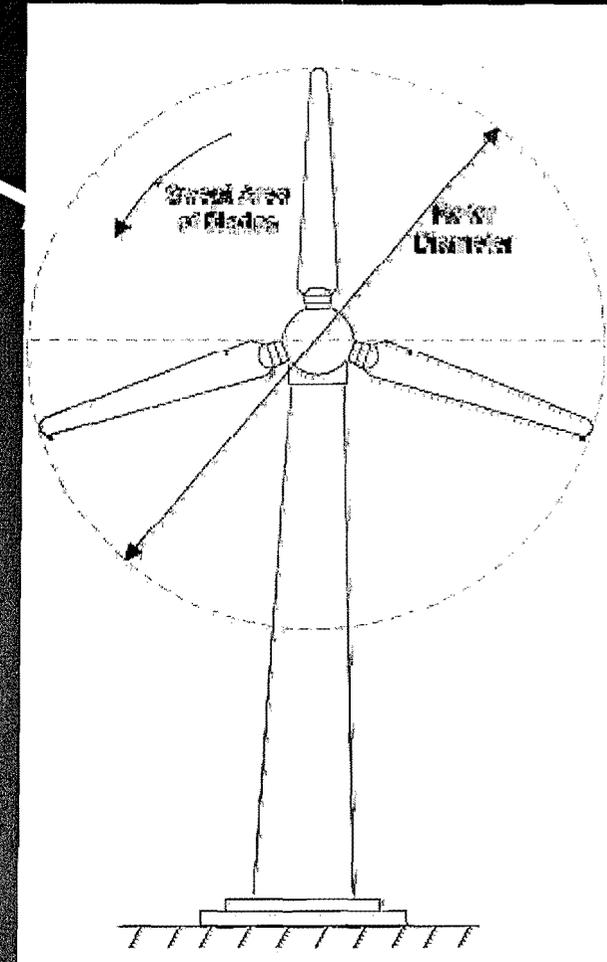
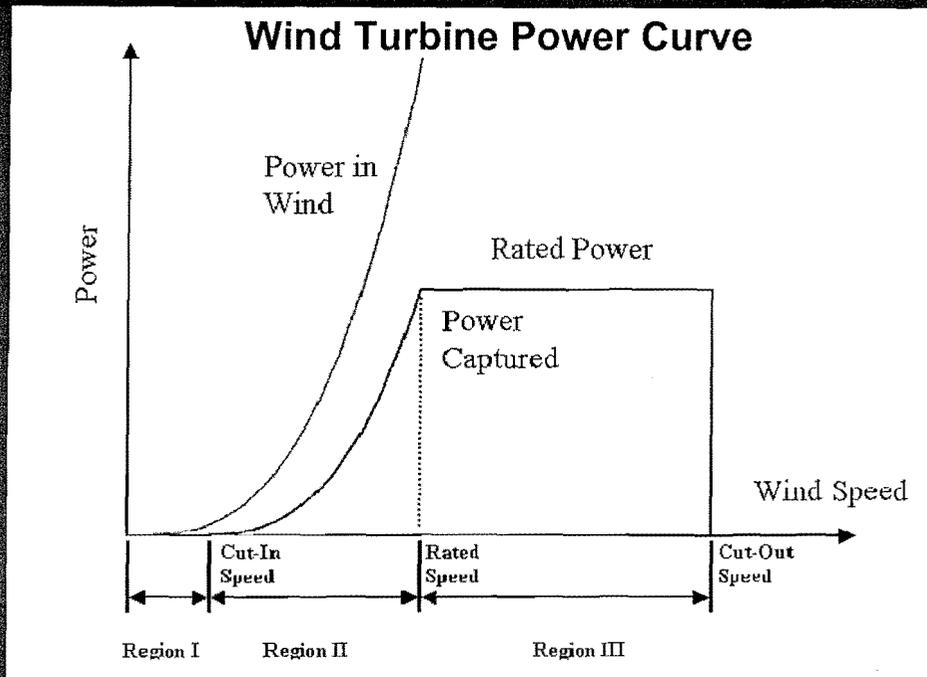


$$\text{Power in the Wind} = \frac{1}{2}\rho AV^3$$

A - Area of the circle swept by the rotor

ρ = Air density

V = Wind Velocity



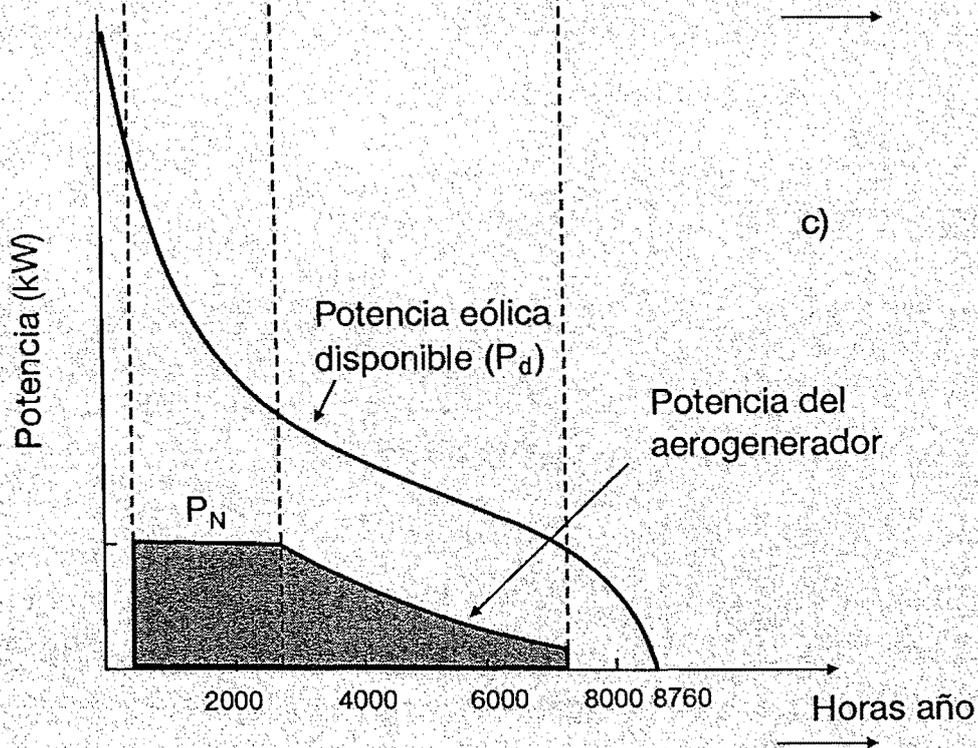
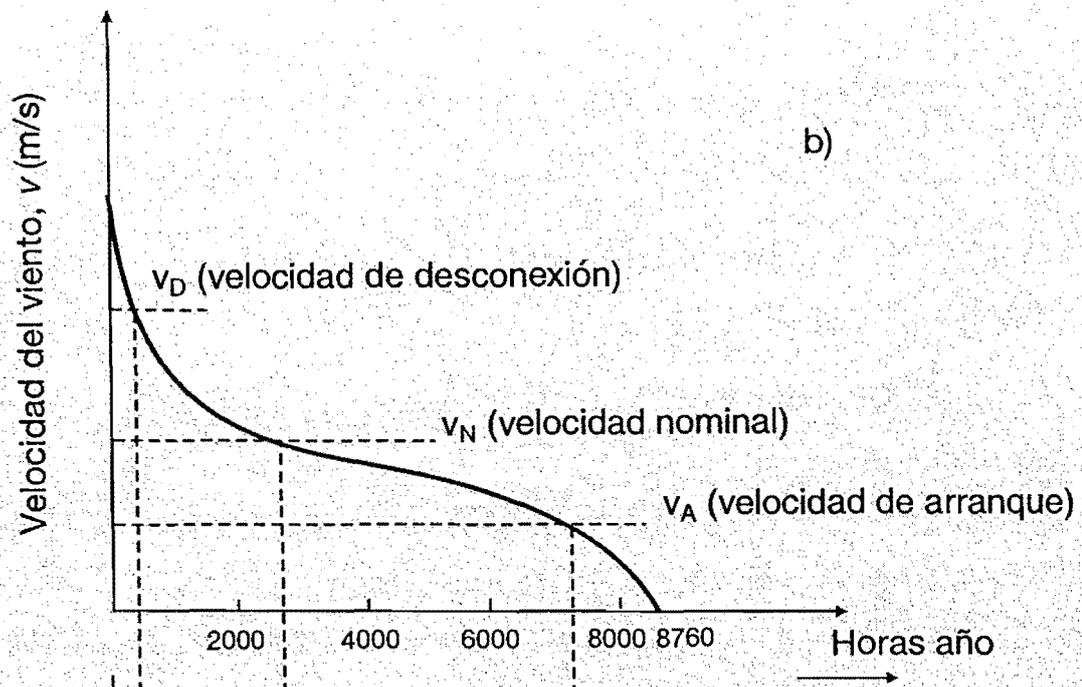
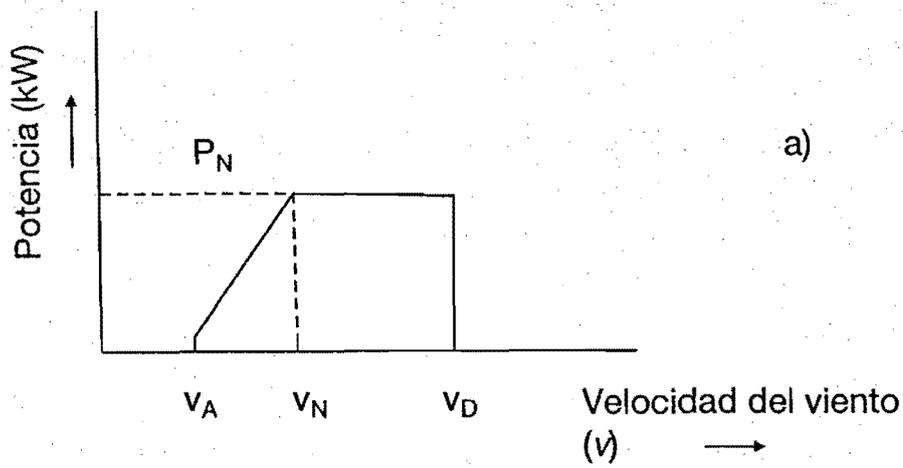
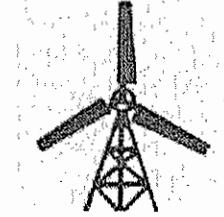
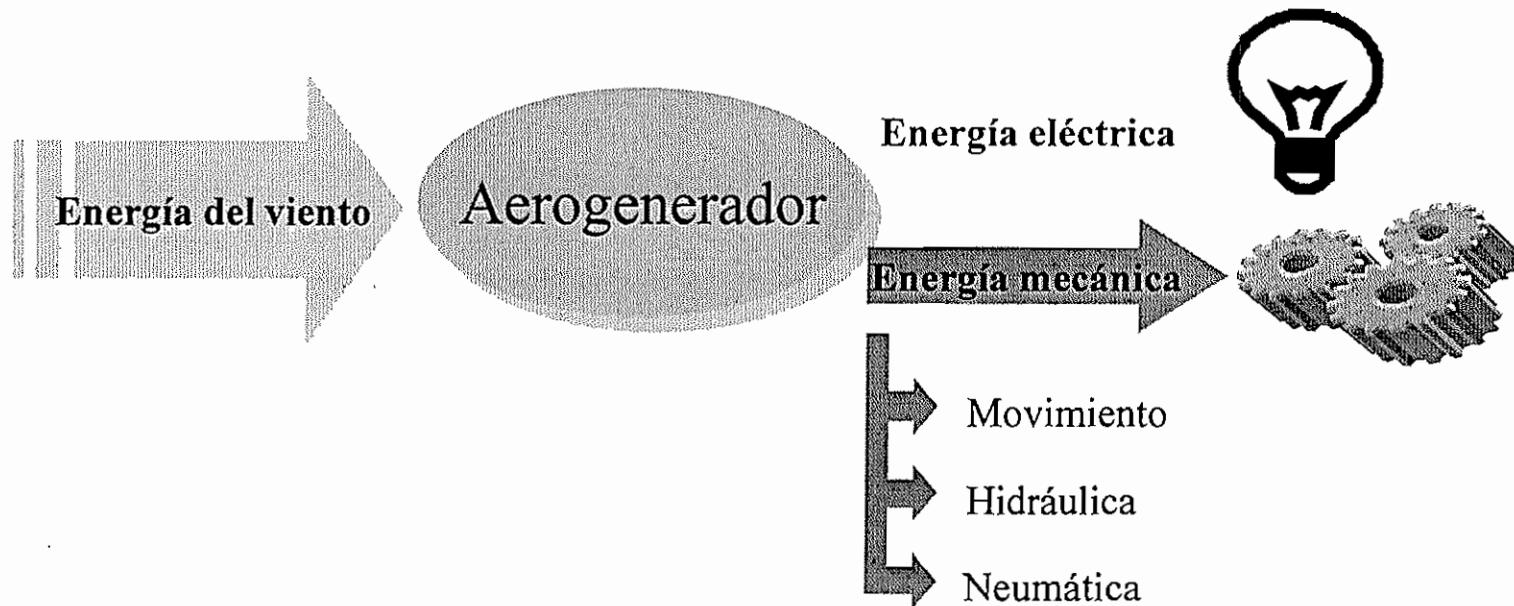


Figura 5.29. Procedimiento gráfico para el cálculo de la energía anual producida por un aerogenerador

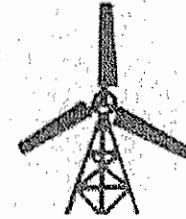
Aerogeneradores



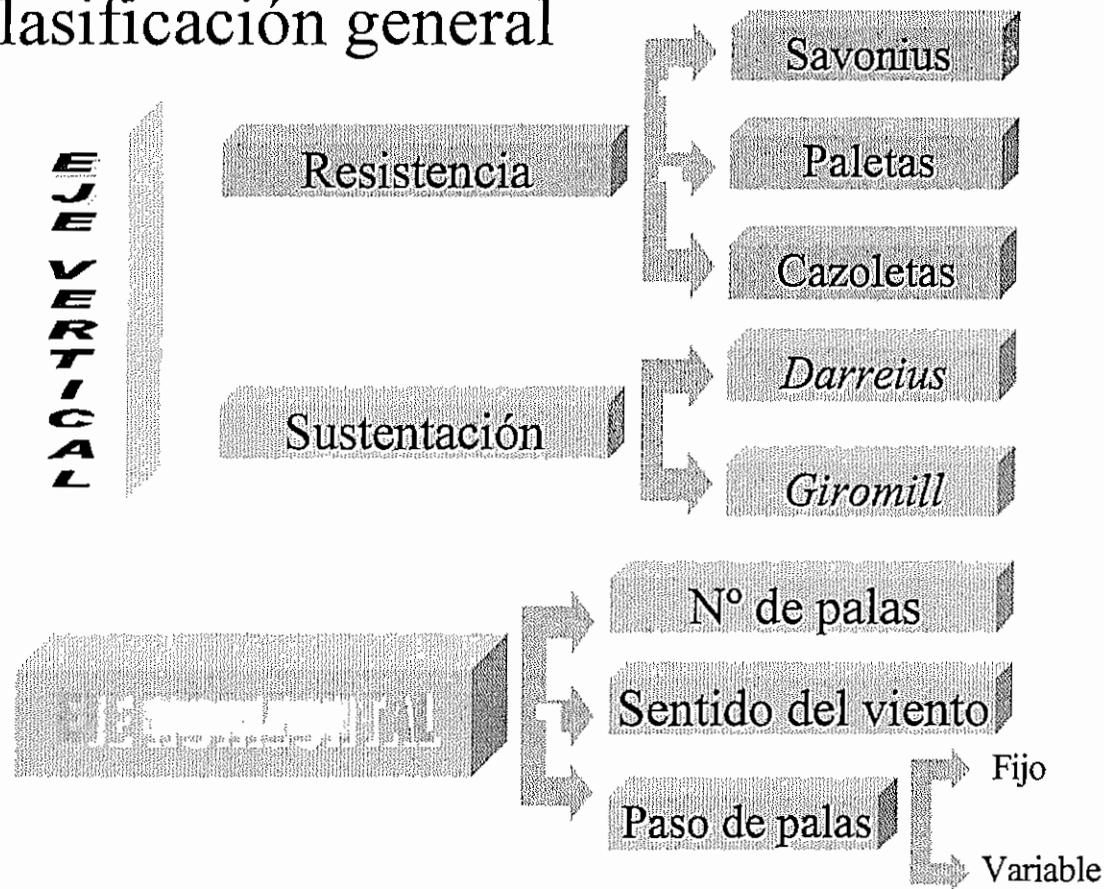
- Concepto de aerogenerador



Aerogeneradores



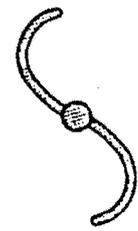
- Clasificación general



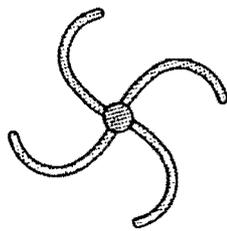
Sistemas de captación eólica

EJE VERTICAL

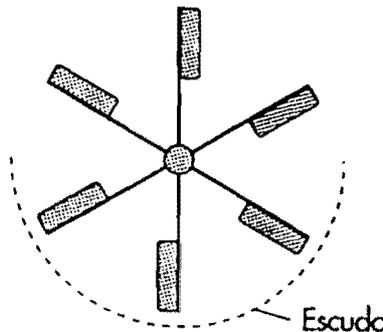
ACCIONAMIENTO POR RESISTENCIA



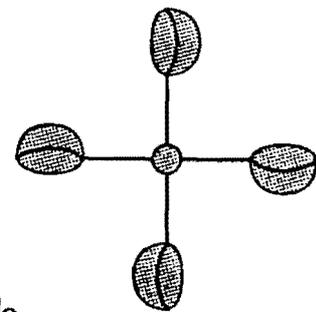
SAVONIUS



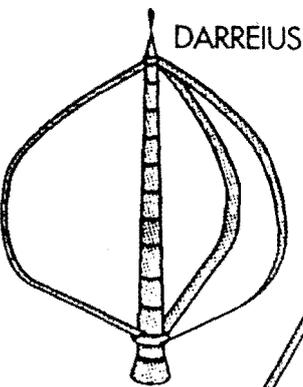
SAVONIUS
MULTIPALA



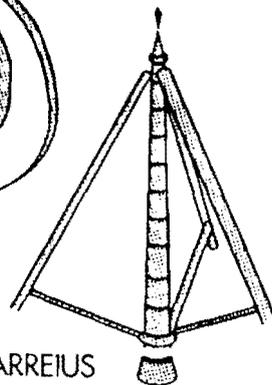
PALETAS



CAZOLETA

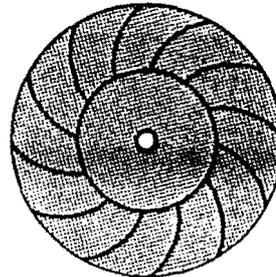


DARREIUS

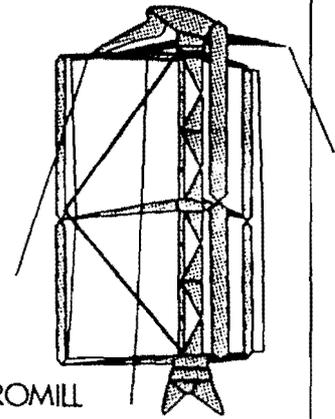


D-DARREIUS

ACCIONAMIENTO POR SUSTENTACION

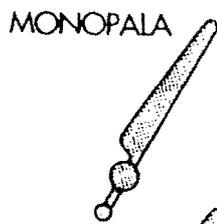


TURBINA

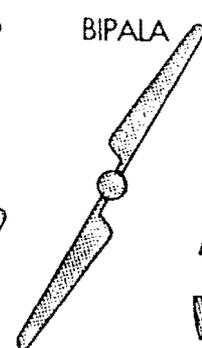


GIROMILL

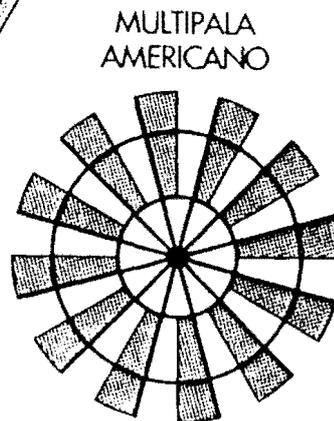
EJE HORIZONTAL



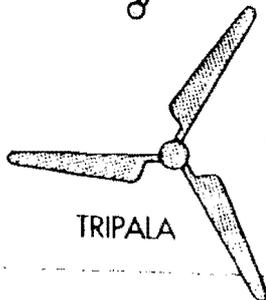
MONOPALA



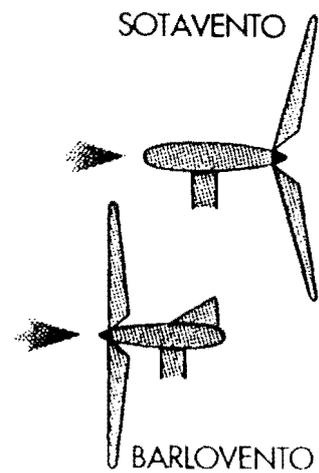
BIPALA



MULTIPALA
AMERICANO



TRIPALA



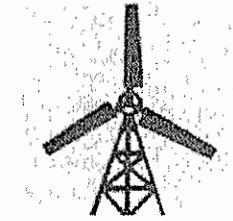
SOTAVENTO

BARLOVENTO

Figura 4.6

Principios de energía eólica. Aerogeneradores

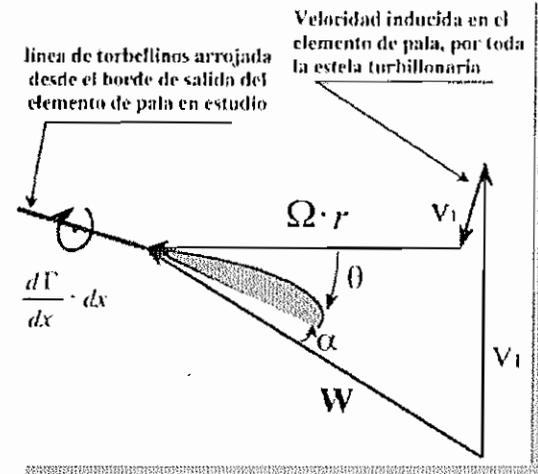
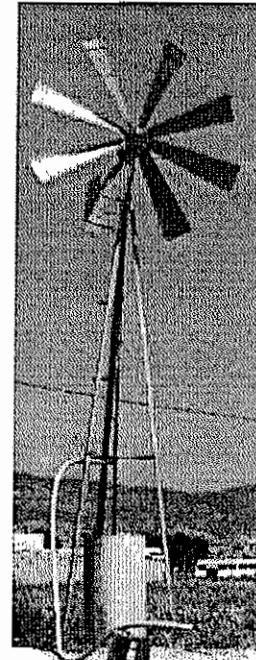
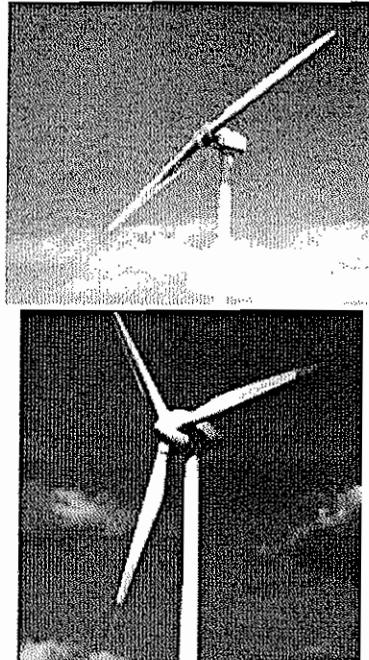
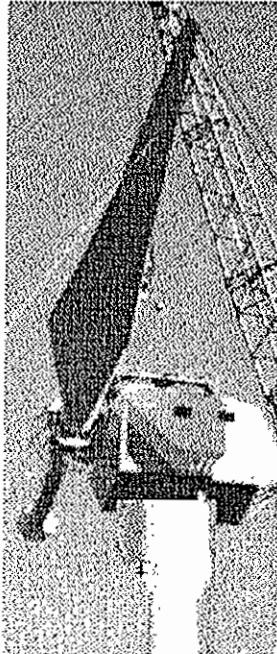
Aerogeneradores



Nº de palas

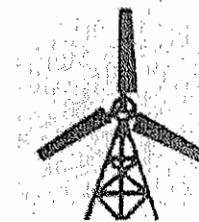
Prototipos

Principio de funcionamiento



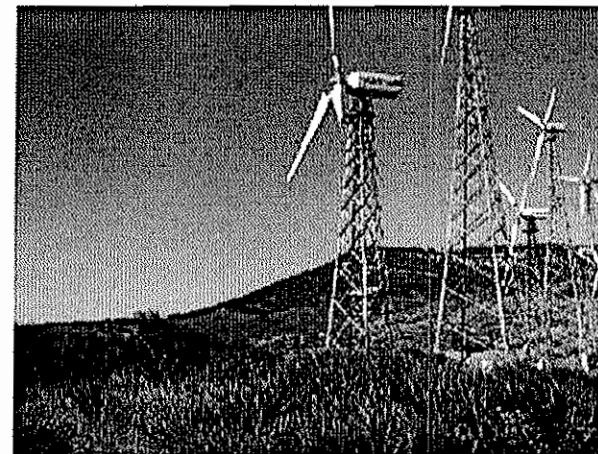
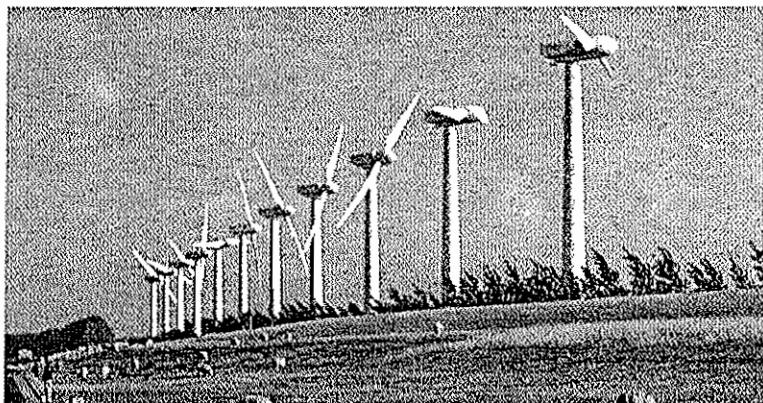
Principios de energía eólica. Aerogeneradores

Aerogeneradores



Barlovento

Sotavento



Upwind

Downwind

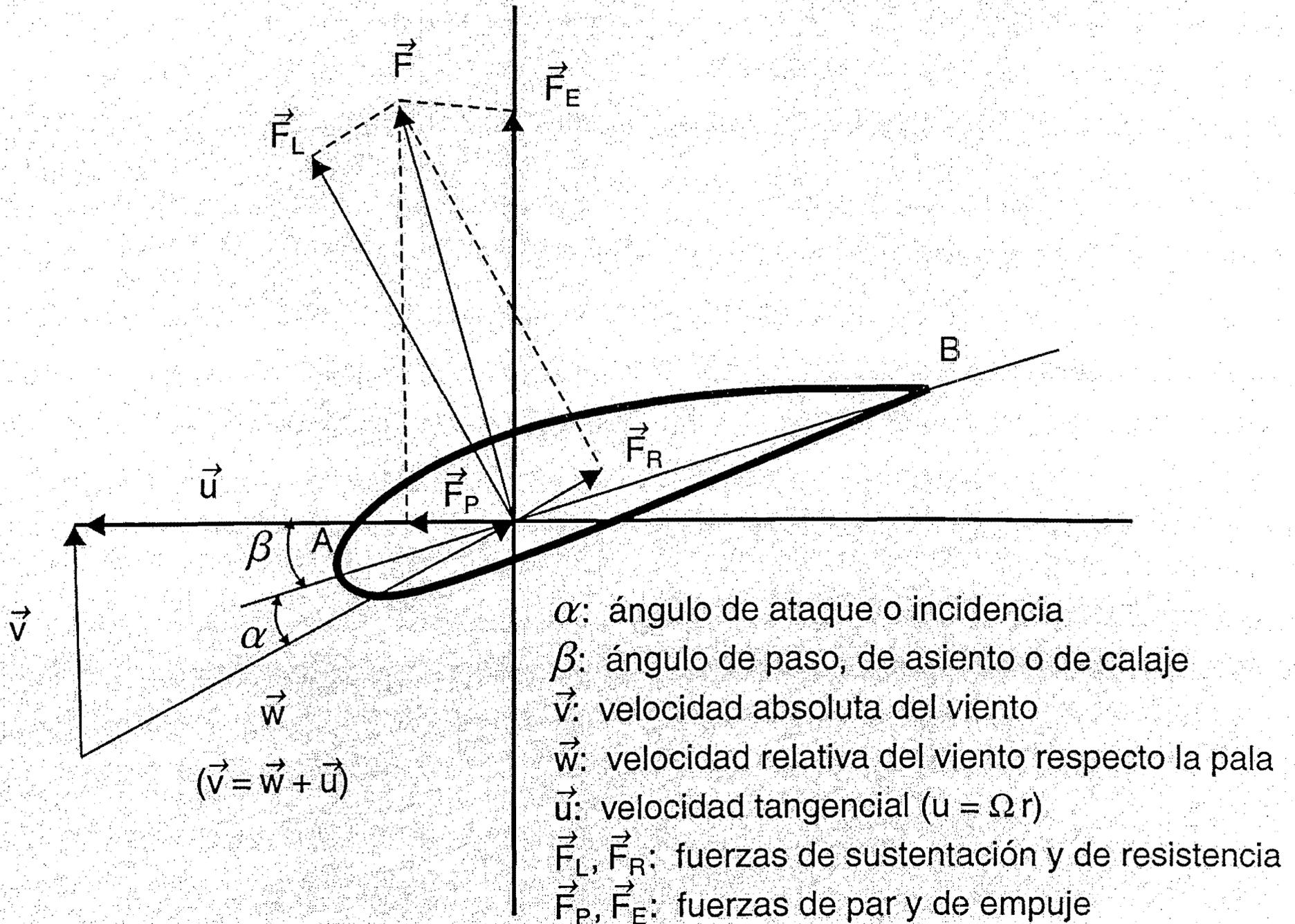
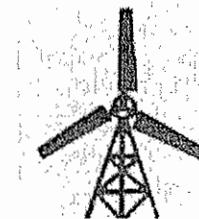


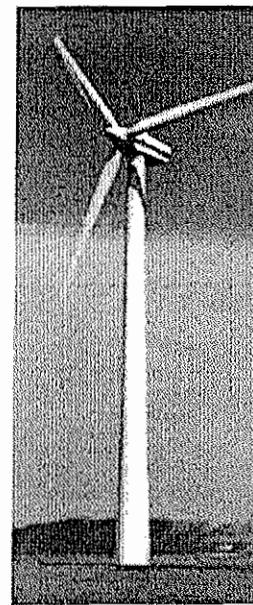
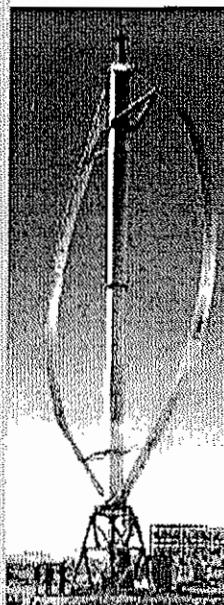
Figura 4.13. Perfil de la sección transversal de la pala o álabe de una hélice

Aerogeneradores



Aeroturbinas Eje Vertical vs Eje Horizontal

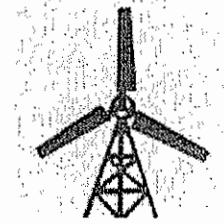
1. Sistema de orientación no necesario
2. Generador y multiplicador en tierra
3. Palas sujetas en dos puntos
4. Las palas entran en pérdidas a altas velocidades de viento



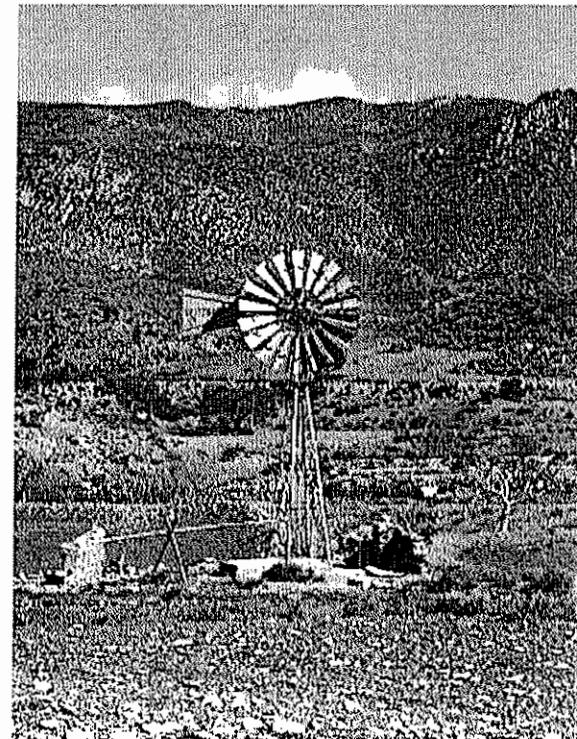
1. Tecnología más desarrollada
2. Mayor coeficiente de potencia
3. Velocidades de giro más altas
4. Área de palas más pequeñas para una misma superficie de barrido
5. Mayor aprovechamiento del viento por mayor altura
6. No necesita ser arrancada para dar potencia útil

Principios de energía eólica. Aerogeneradores

Aerogeneradores



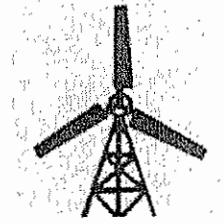
- Baja velocidad (alrededor de 5m/s)
- Alto Par y baja Potencia



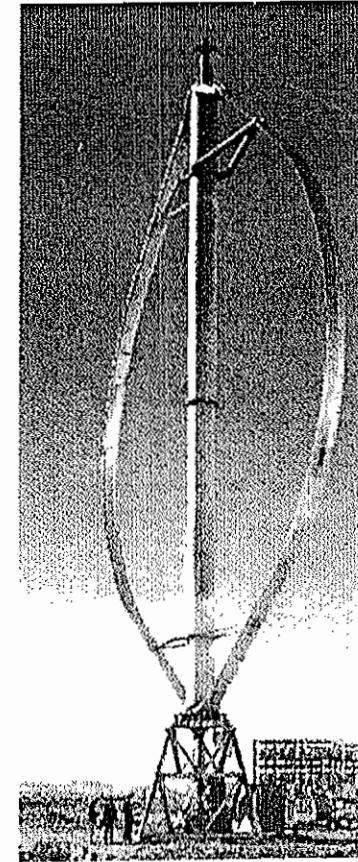
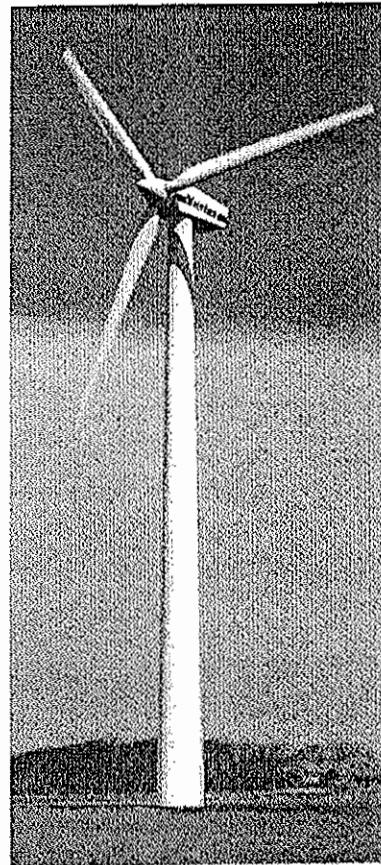
Fuente: DMI

Principios de energía eólica. Aerogeneradores

Aerogeneradores

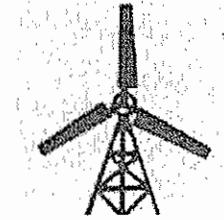


- Alta velocidad (superior a 5m/s)
- Bajo Par y alta Potencia

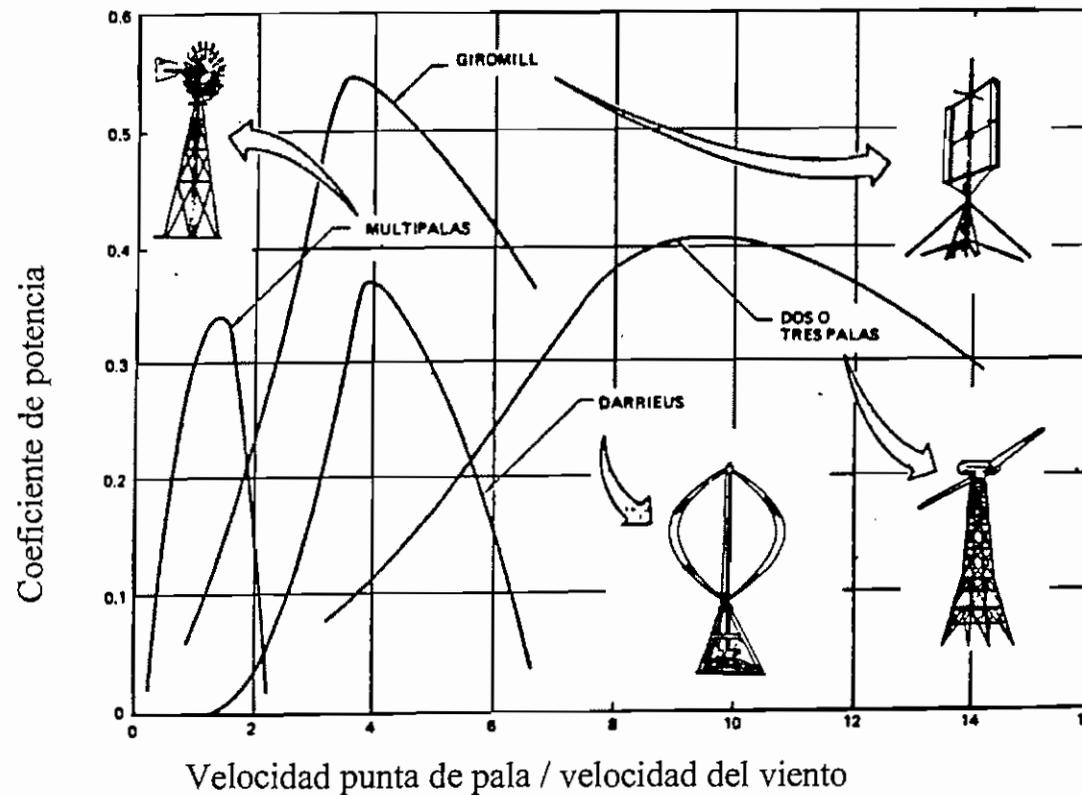


Luca: ID 11.

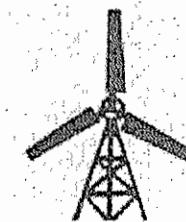
Aerogeneradores



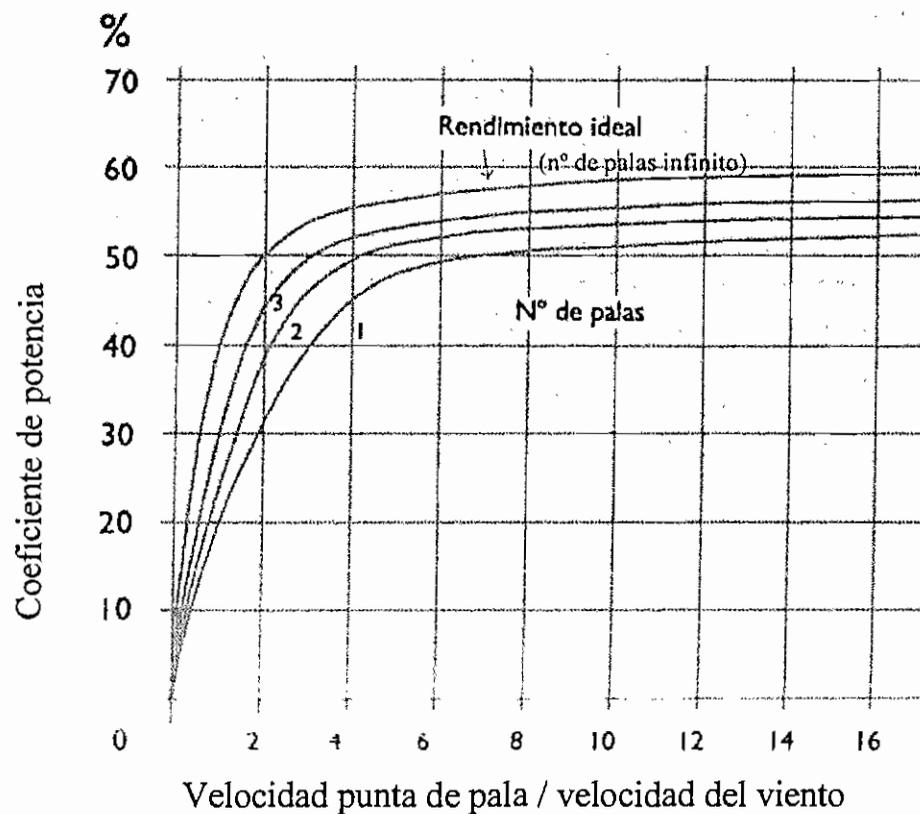
- Rendimiento de diferentes aeroturbinas



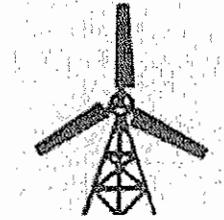
Aerogeneradores



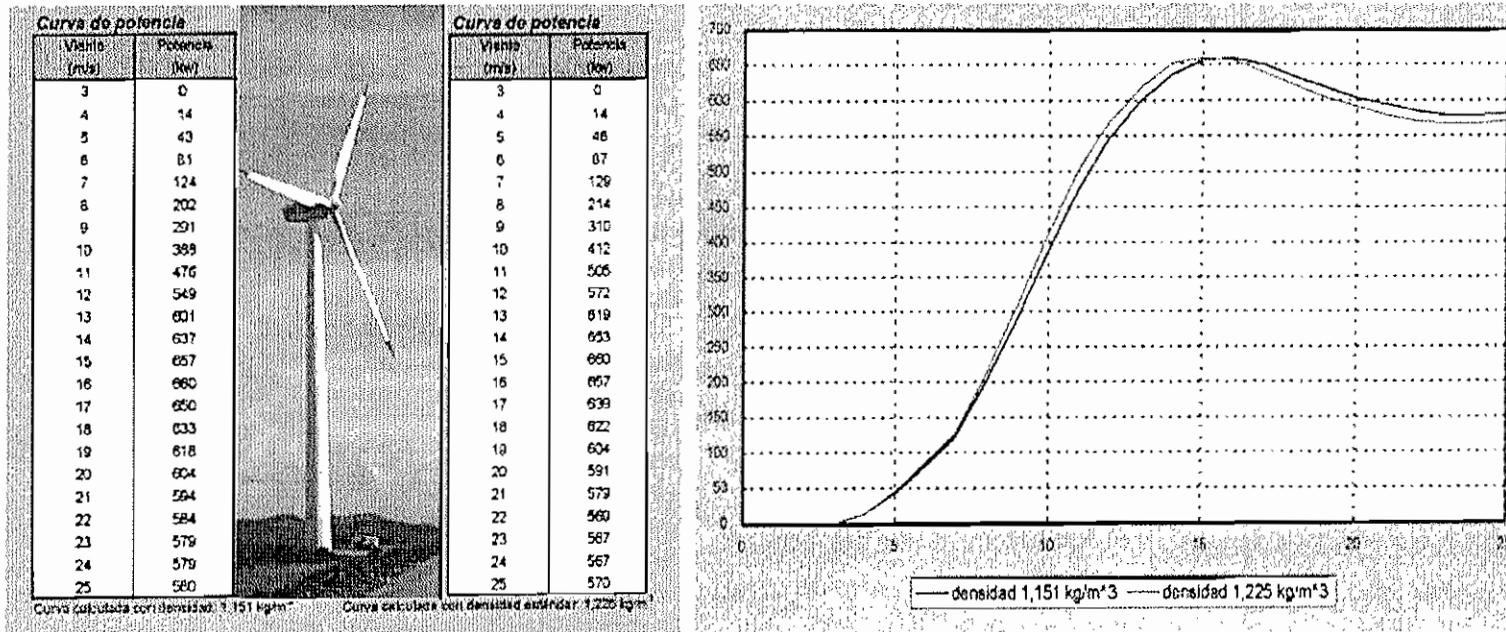
- Rendimiento en función del número de palas de aeroturbinas de eje horizontal.



Aerogeneradores



- Curva de potencia de un aerogenerador



EJERCICIO

- 1) Cálculo de la velocidad media del viento a una altura determinada a partir de otra altura.

$$V_h = V_0 (h/h_0)^n$$

datos: $h_0 = 10 \text{ m}$, $V_0 = 6 \text{ m/s}$, $n = 0,14$, $D = 30 \text{ m}$, $\rho = 1,27 \text{ kg/m}^3$

para $h = 70 \text{ m}$: $V_{70} = 6 (70/10)^{0,14} = 6 \cdot 7^{0,14} = 12 \text{ m/s}$

- 2) Cálculo de la potencia disponible.

$$P_{\text{viento}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 = \frac{1}{2} \cdot 1,27 \cdot \pi/4 \cdot 30^2 \cdot 12^3 = 748 \text{ kW}$$

para $c_p = 0,59$ (coeficiente de potencia, limite de Betz)

$$P_{\text{mecánica}} = 0,59 \cdot 748 = 441,32 \text{ kW}$$

$$P_{\text{eléctrica}} = \eta_{\text{eléctrico}} \cdot P_{\text{mecánica}} = 0,85 \cdot 441,32 = 374 \text{ kW}$$

3) Evaluación económica de la inversión.

Consideraciones:

- factor de capacidad: $f_c = 25 \%$, o número de horas equivalentes $(8.760 \times 0,25) = 2.190$ horas
- coste del kW instalado: **900 €/kW**
- vida útil: **20 años** ; interés: **7 %**

$$I_{\text{inversión inicial}} = 900 \cdot P_{\text{final}} = 900 \times 374 = 336.600 \text{ €}$$

- tasa interna de retorno (TIR):

$$\text{TIR} = r / [1 - (1 + r)^{-n}] = 0,07 / [1 - 1,07^{-20}] = 0,094$$

- coste del capital: $C_p = I_i / P_i [\text{TIR} / (f_c \times 8.760)]$

$$C_p = 900 [0,094 / (0,25 \times 8.760)] \cong 0,0386 \text{ €/kWh}$$

- mantenimiento y operativa: **2 %** .

$$\text{COSTE TOTAL} = 1,02 \times 0,0386 \cong 0,04 \text{ €/kWh}$$

“Teniendo en cuenta que el precio del kWh es de **0,079 €** “

“ la inversión es rentable ”

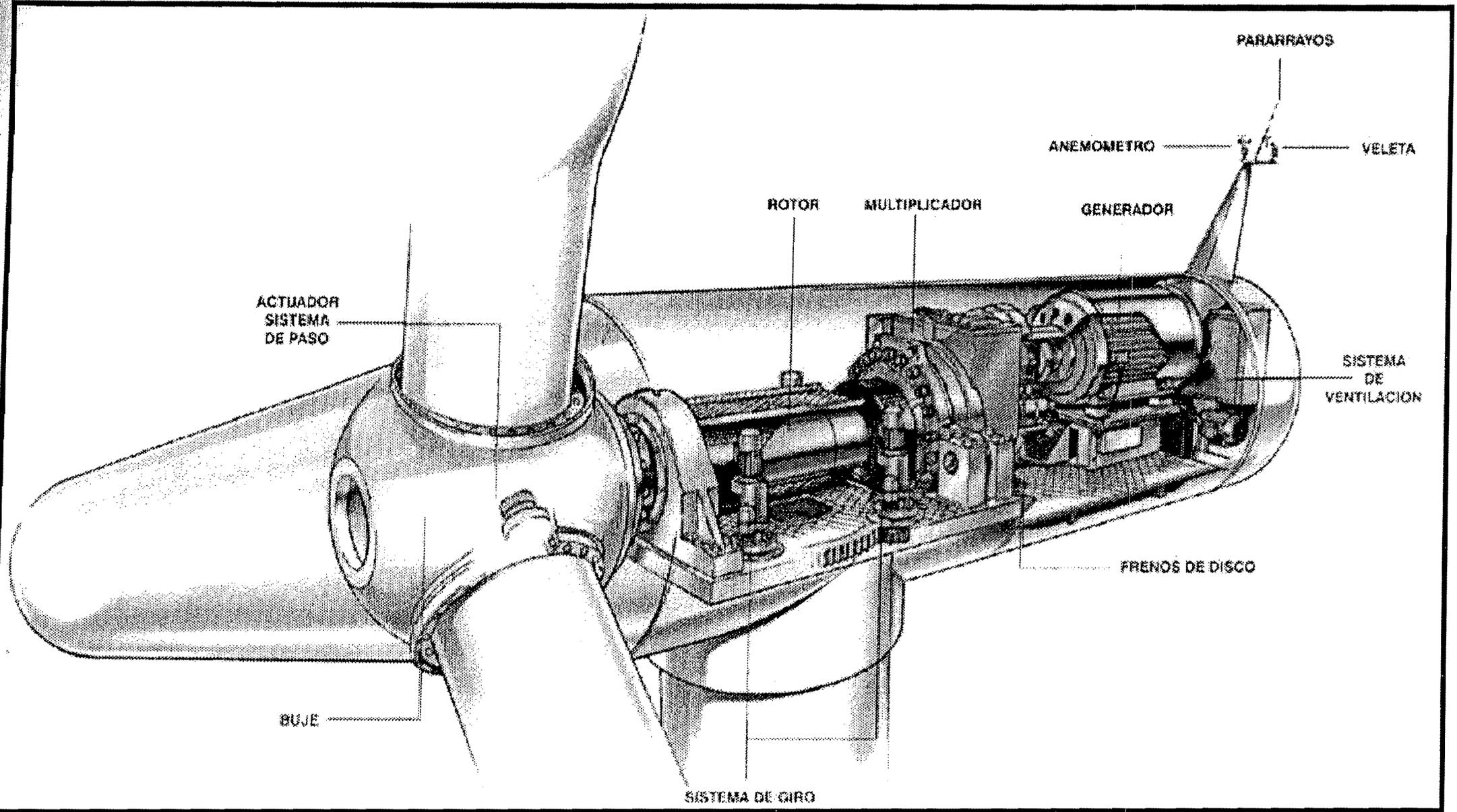
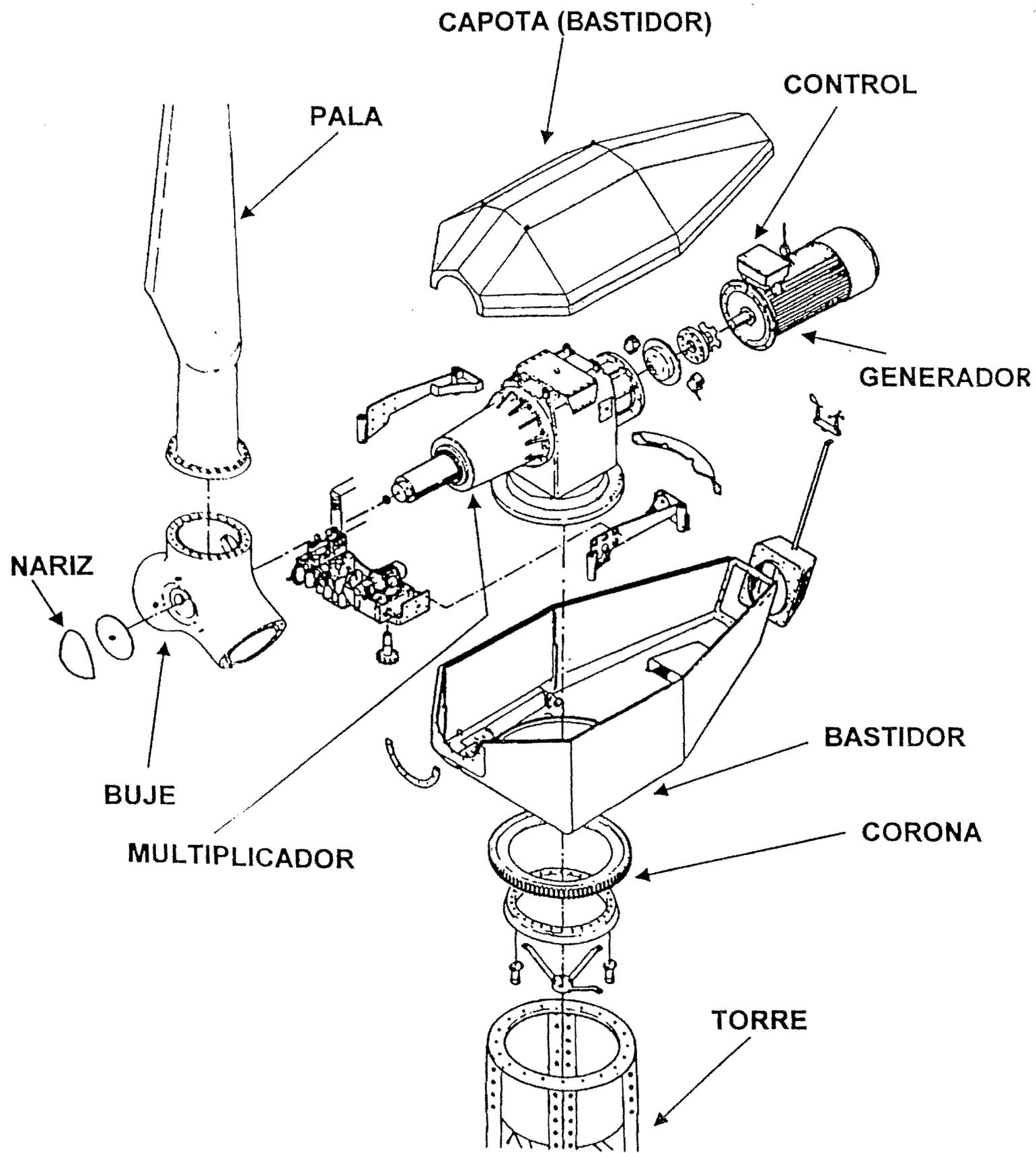
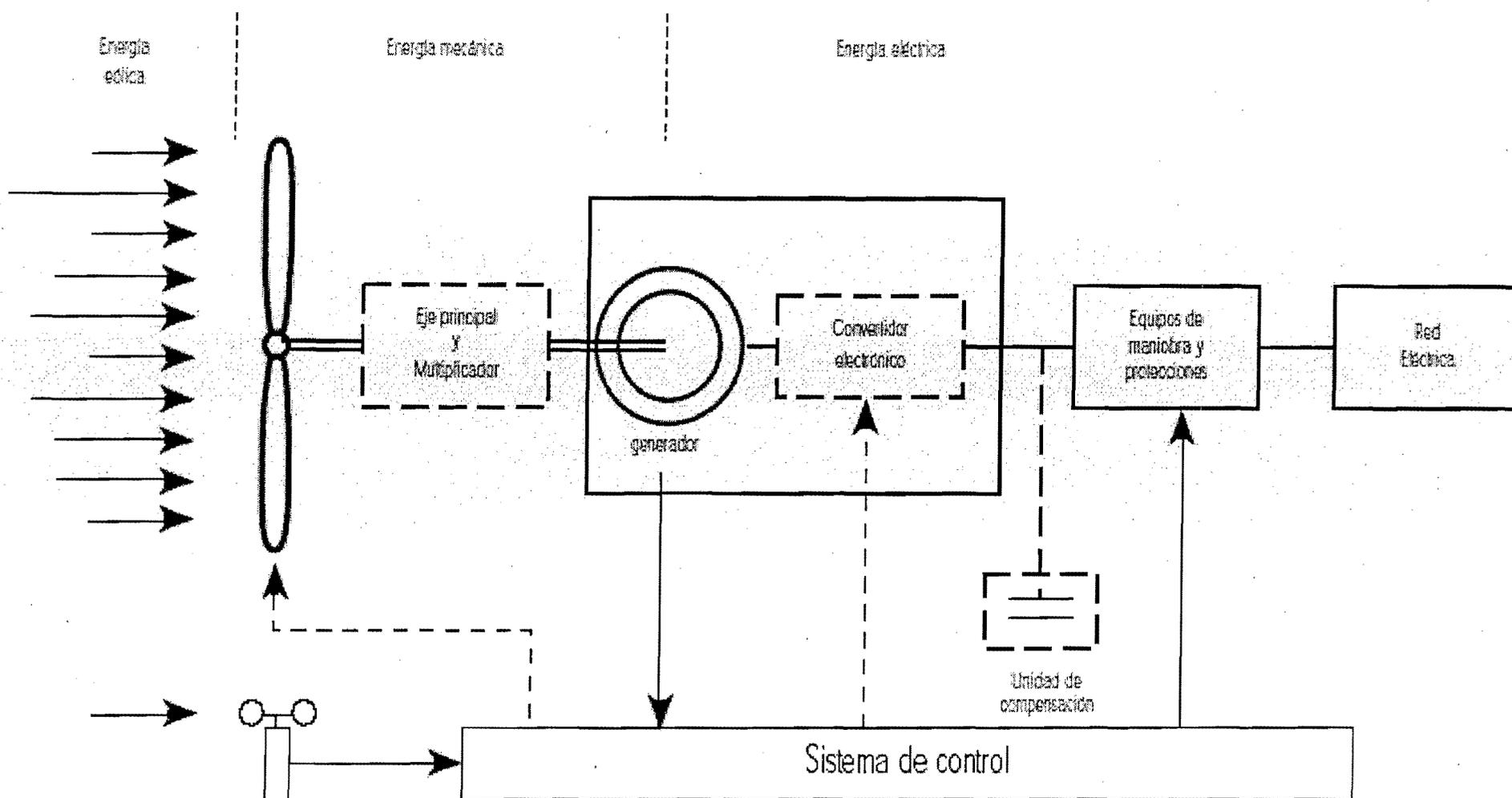


Fig. 12 - Aerogenerador

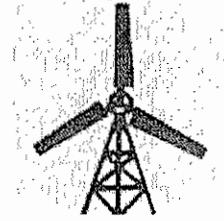


EVOLUCIÓN TECNOLÓGICA DE LOS SISTEMAS EÓLICOS

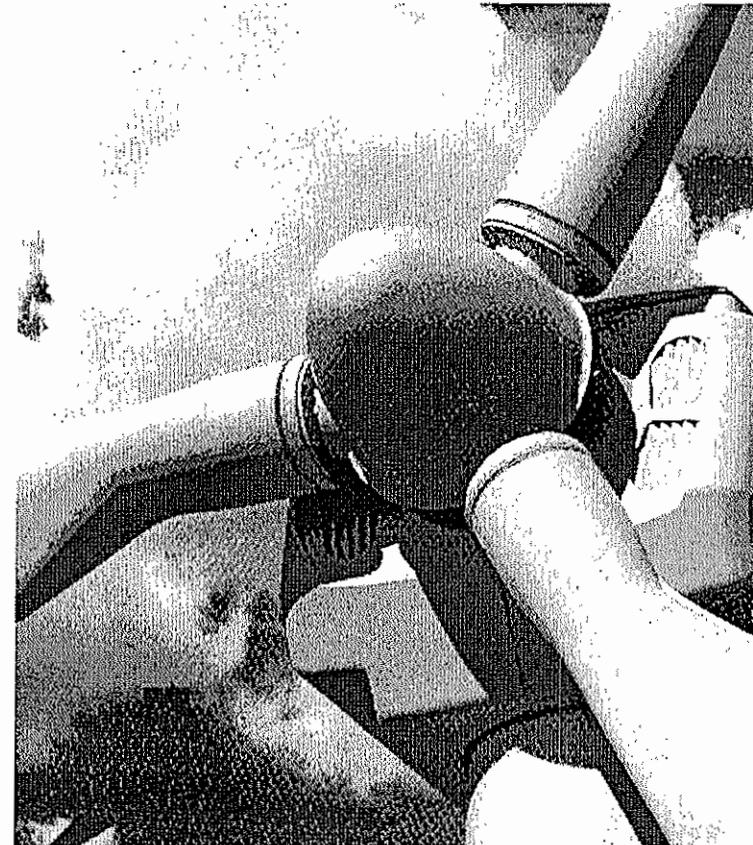
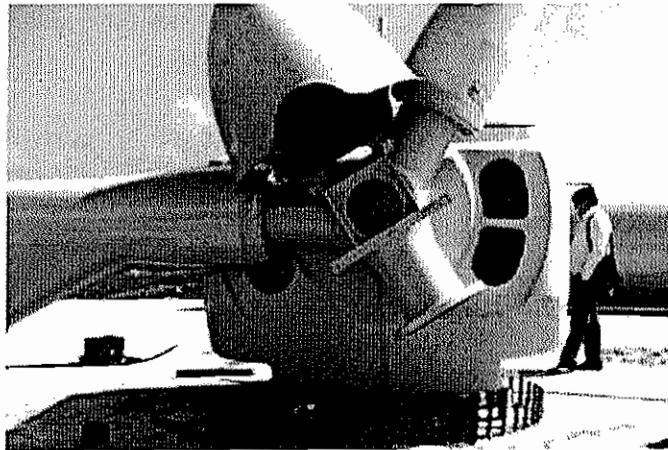
ESQUEMA GENERAL DE UN AEROGENERADOR



Partes de un aerogenerador

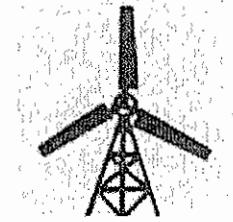


- Aeroturbina o rotor
 - Palas
 - Buje

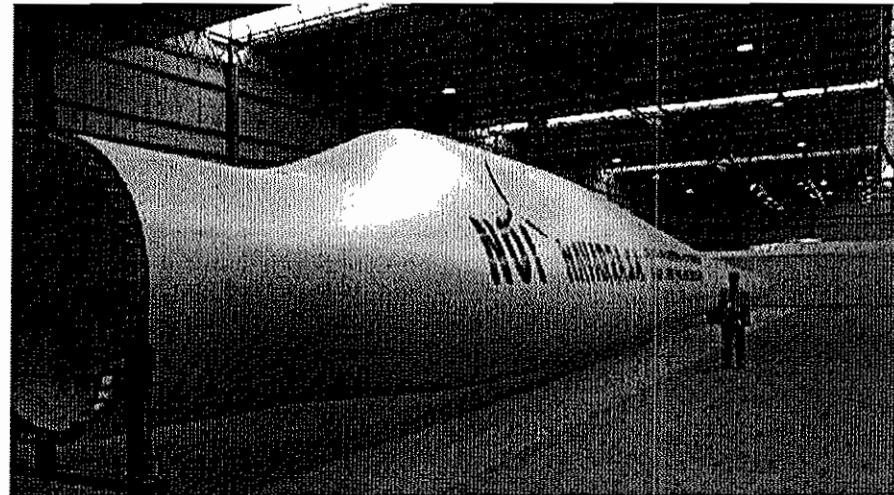
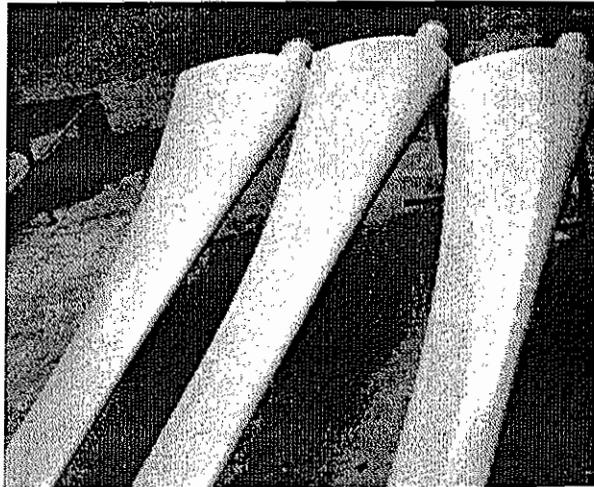


Principios de energía eólica. Aerogeneradores

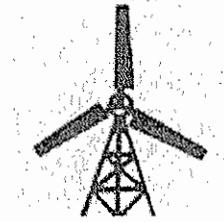
Partes de un aerogenerador



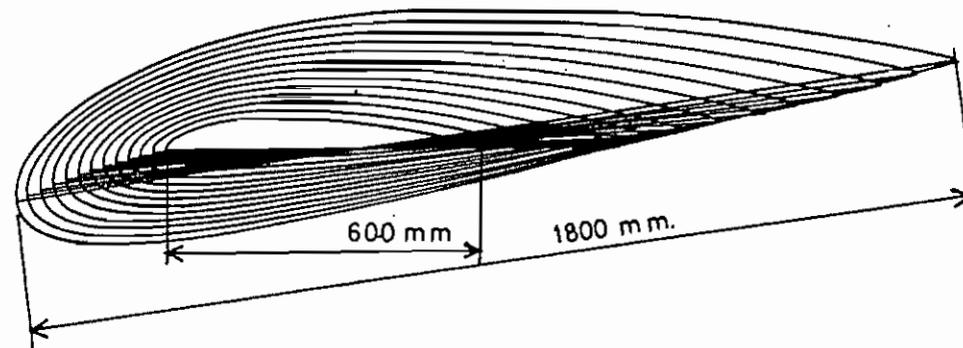
- Palas



Partes de un aerogenerador



- Palas: perfiles y estructura

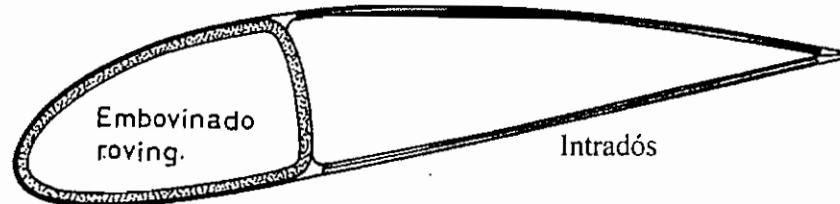


Fibra de vidrio

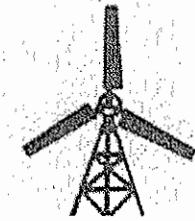
Extradós

Embovinado
roving.

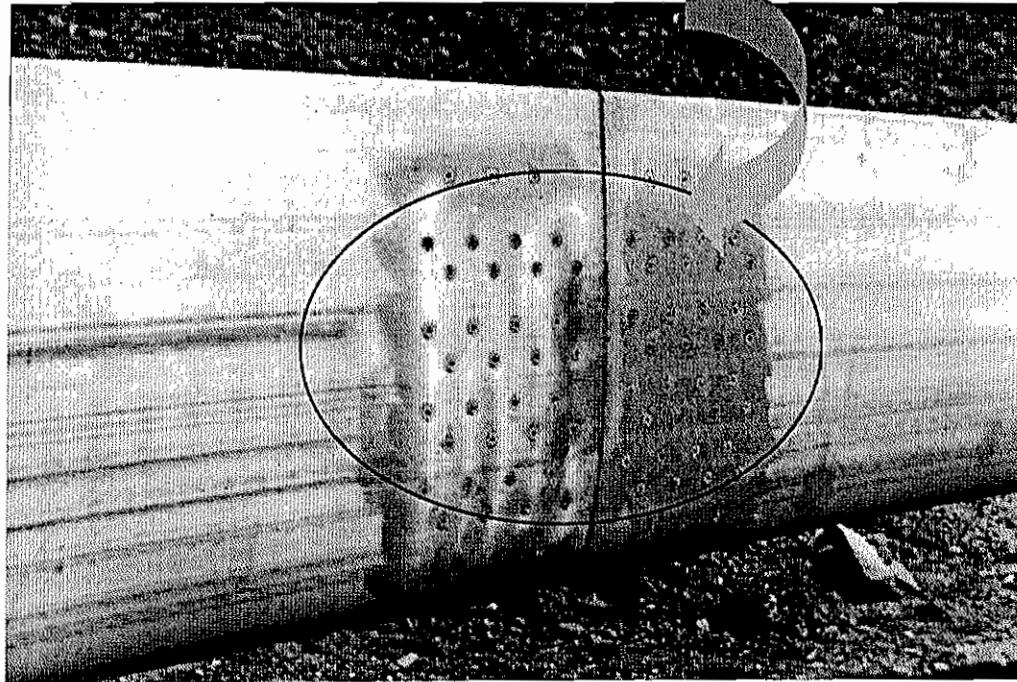
Intradós



Partes de un aerogenerador



- Palas: perfiles y estructura
 - Pala de aluminio
 - Técnica aeronáutica de remaches



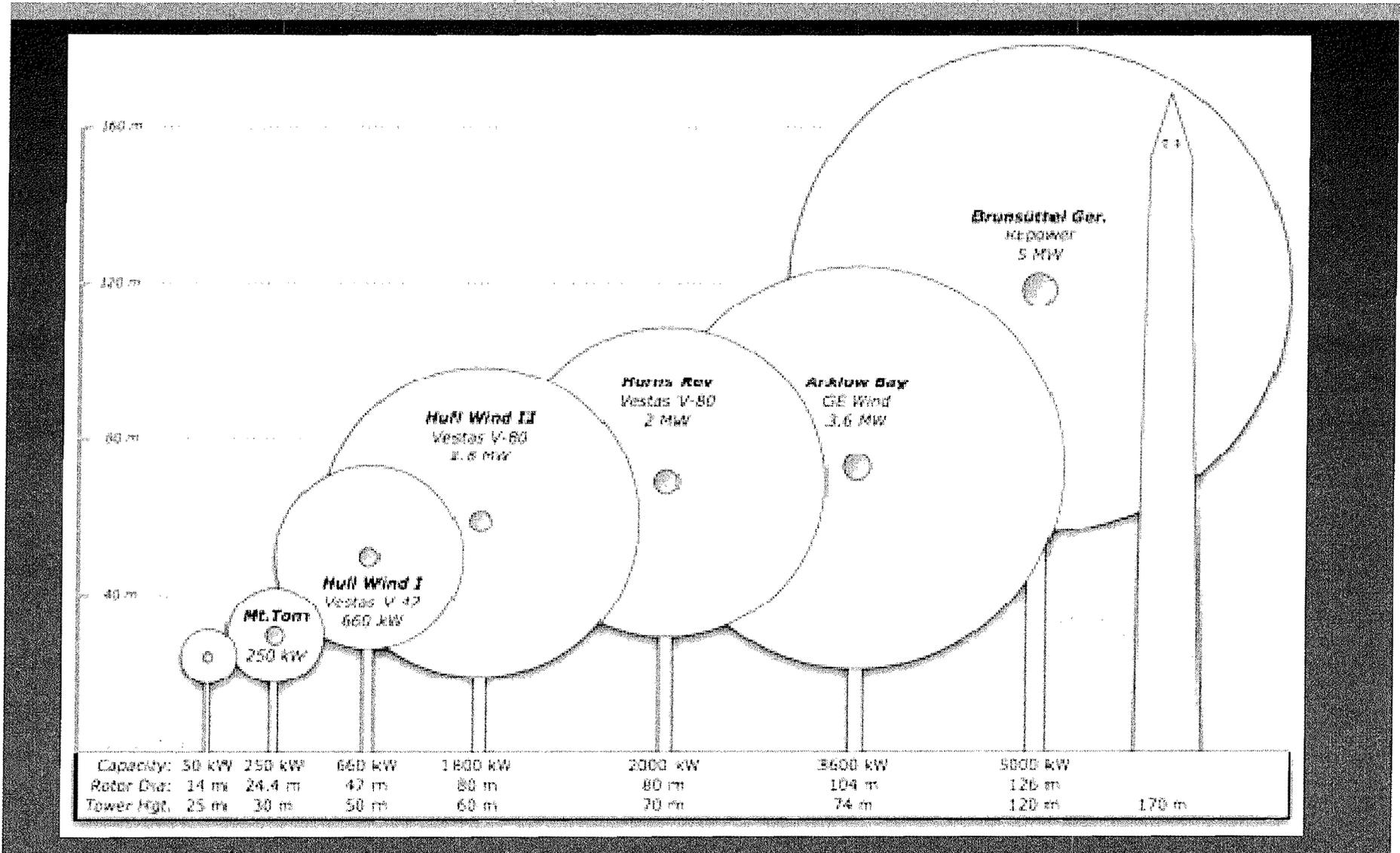
EVOLUCIÓN TECNOLÓGICA DE LOS SISTEMAS EÓLICOS

MATERIAL DE LAS PALAS

- La mayoría de las modernas palas de rotor de grandes aerogeneradores están fabricadas con plástico reforzado con fibra de vidrio ("GRP").
- Utilizar fibra de carbono como material de refuerzo es otra posibilidad, pero normalmente estas palas son antieconómicas para grandes aerogeneradores.
- Los materiales compuestos (composites) de madera, madera-epoxy, o madera-fibra-epoxy aún no han penetrado en el mercado de las palas de rotor, aunque existe un desarrollo continuado en ese área.
- Las aleaciones de acero y de aluminio tienen problemas de peso y de fatiga del metal, respectivamente. Actualmente sólo son utilizados en aerogeneradores muy pequeños.

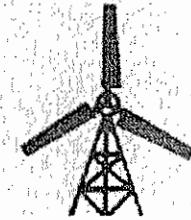


Wind Turbine Size

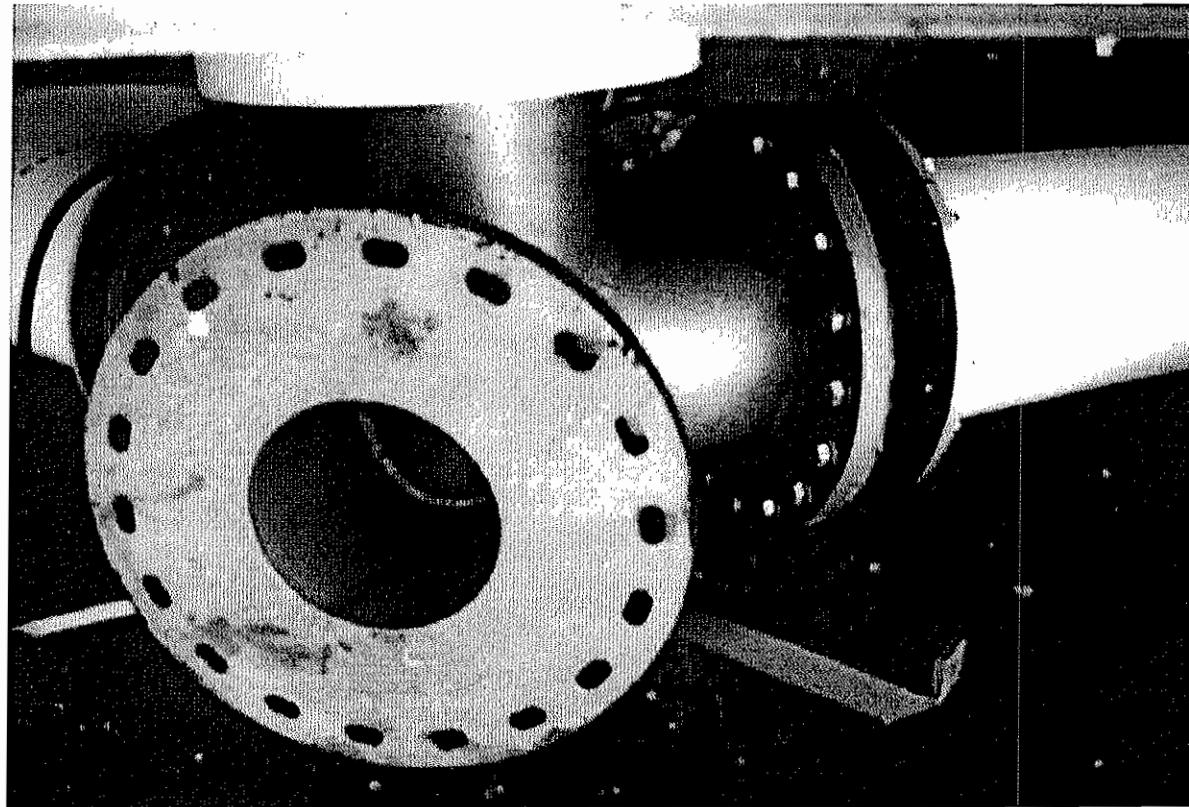


Principios de energía eólica. Aerogeneradores

Partes de un aerogenerador

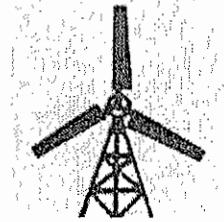


- Buje

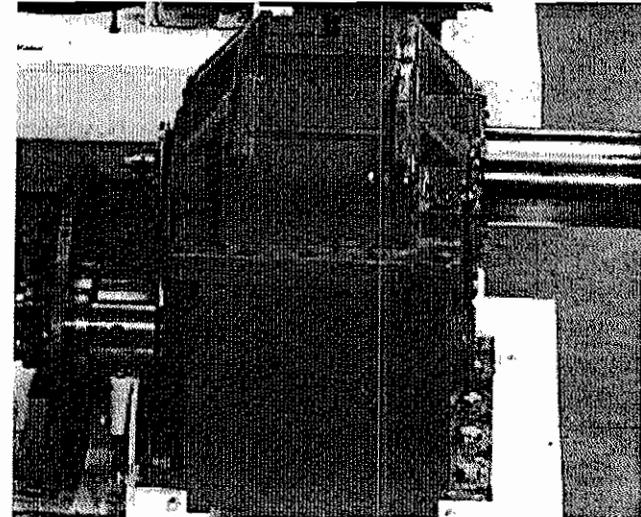
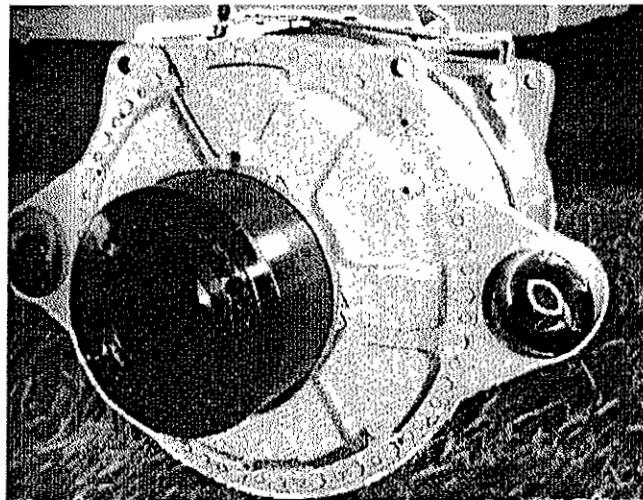


Principios de energía eólica. Aerogeneradores

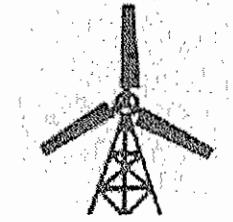
Partes de un aerogenerador



- Multiplicador
 - Ejes paralelos
 - Sistema planetario



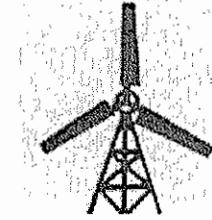
Partes de un aerogenerador



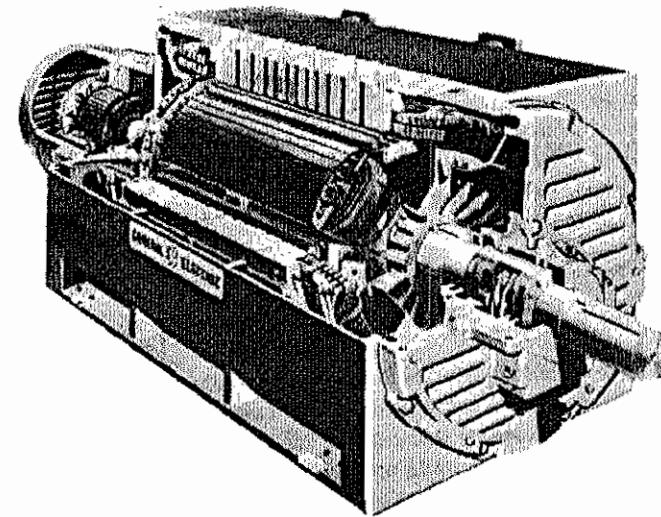
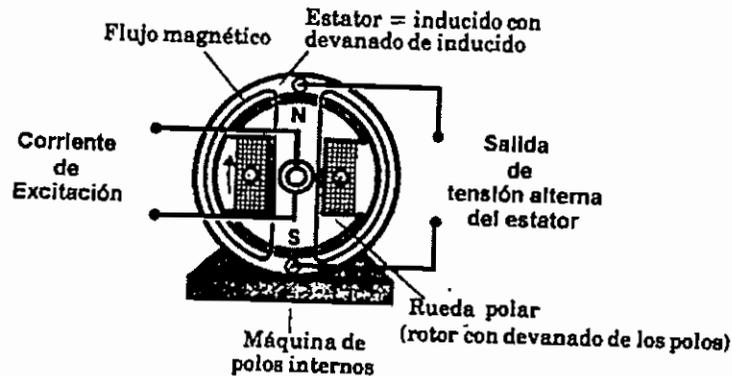
- Generador eléctrico
 - Síncrono
 - Autoexcitación estática
 - Excitación con diodos giratorios
 - Excitación auxiliar
 - Asíncrono

Principios de energía eólica. Aerogeneradores

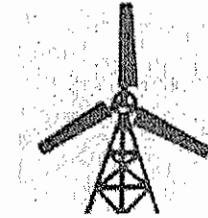
Partes de un aerogenerador



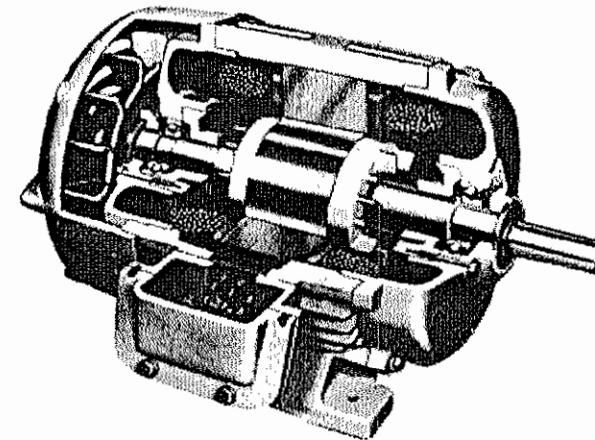
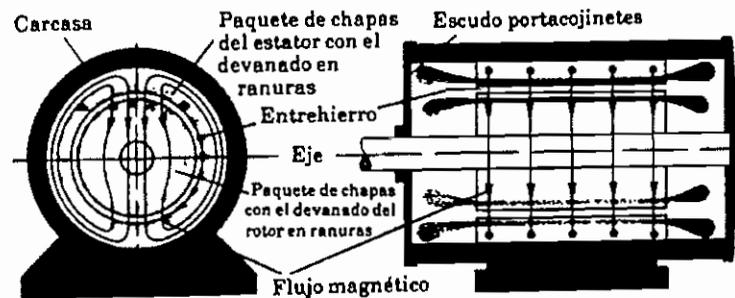
- Generador eléctrico
 - Síncrono



Partes de un aerogenerador



- Generador eléctrico
 - Asíncrono o de inducción
 - *Jaula de ardilla*

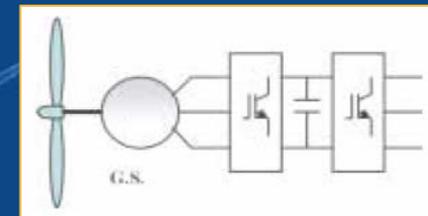


PRINCIPIOS TECNOLÓGICOS DE AEROGENERADORES

CARACTERÍSTICAS DE LOS GENERADORES ELÉCTRICOS

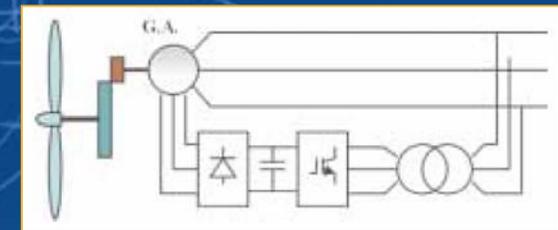
GENERADORES SÍNCRONOS:

- Velocidad y frecuencia variable generada depende de la velocidad de giro de la turbina eólica
- Necesidad de un sistema electrónico de conversión
- Adecuados para su utilización en emplazamientos aislados
- Posibilidad de suministrar energía activa y reactiva a la red
- Mayor eficiencia que los generadores asíncronos
- Mayor coste que los generadores asíncronos
- Mayor complejidad del sistema de excitación de la máquina y regulación



GENERADORES ASÍNCRONOS DOBLEMENTE ALIMENTADOS:

- El rotor de la máquina se alimenta con un convertidor de frecuencia (AC/DC-DC/AC)
- La velocidad de giro de la máquina puede variar en un amplio margen
- Permite regular el par electromagnético y el factor de potencia del generador en un amplio margen de velocidades de giro
- Permite un control de la energía activa y reactiva inyectada a la red similar al de los generadores síncronos,
- La potencia del convertidor electrónico necesario es reducida (20 – 30% nominal)



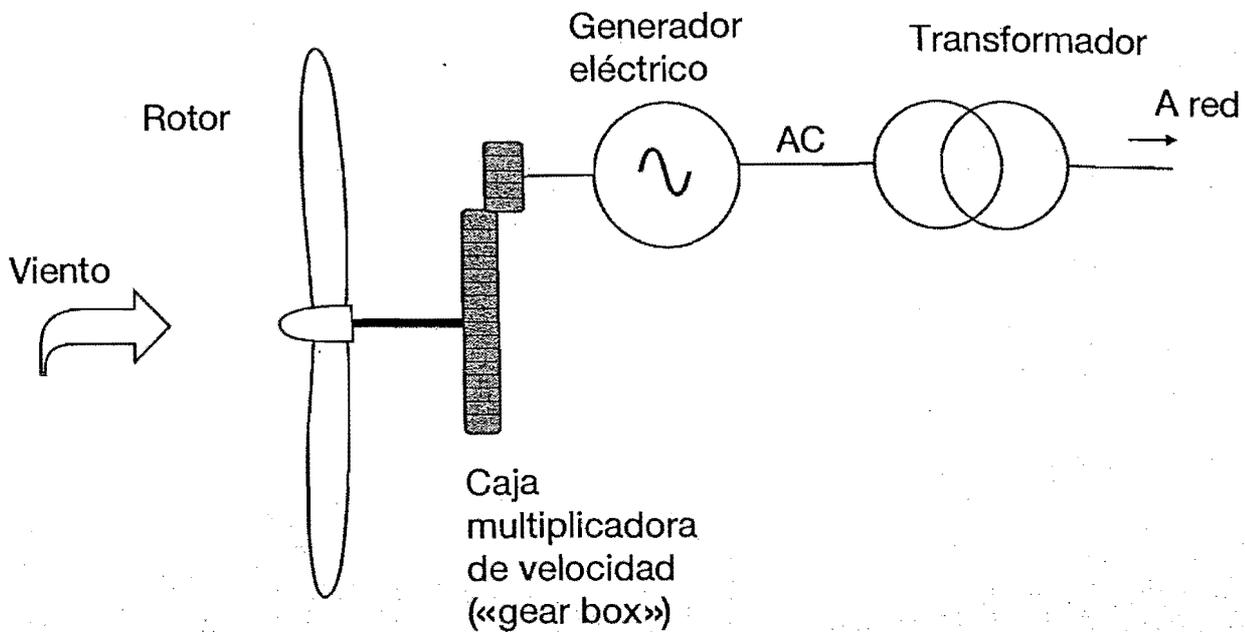


Figura 5.18. Sistema eólico con rotor a velocidad constante. El generador puede ser síncrono o asíncrono, y la interconexión con la red se realiza previa elevación de la tensión por medio de un transformador

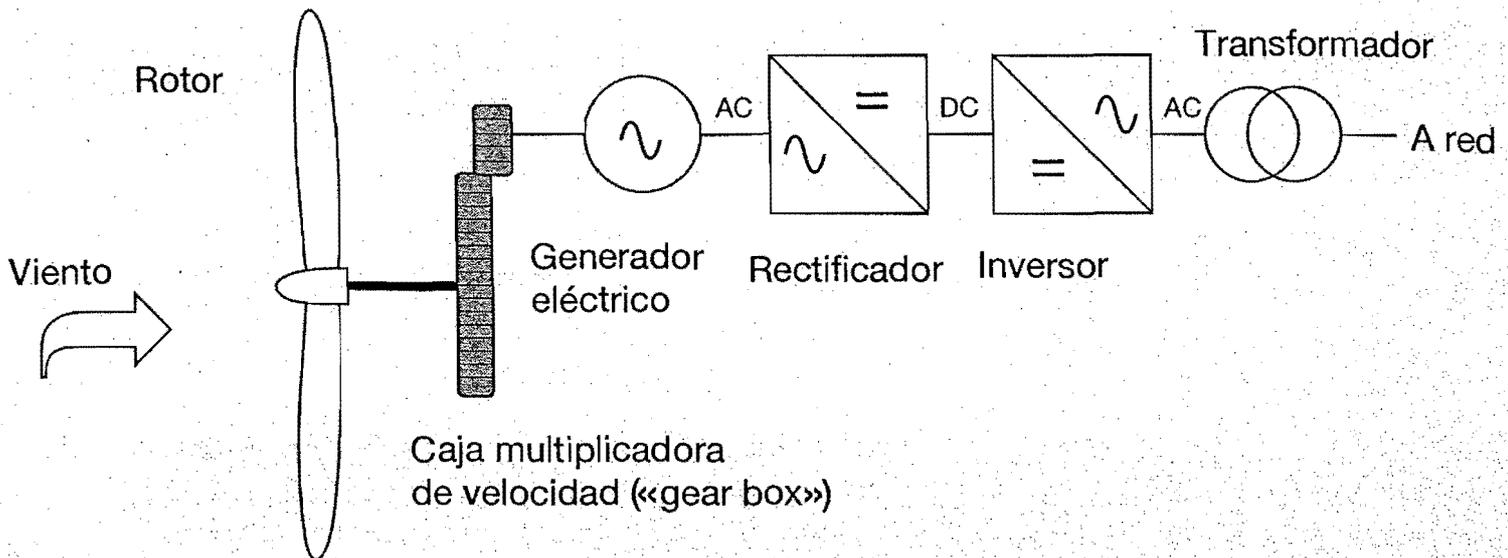


Figura 5.19. Sistema eólico con rotor a velocidad variable con caja multiplicadora de velocidad. El rotor gira a velocidad variable y el generador síncrono produce una corriente eléctrica de frecuencia variable. Esta corriente se rectifica para pasarla continua (DC) y posteriormente el inversor la vuelve a convertir en alterna (AC) pero a frecuencia constante (50 Hz Europa, 60 Hz América). Finalmente la interconexión con la red se hace a través de un transformador

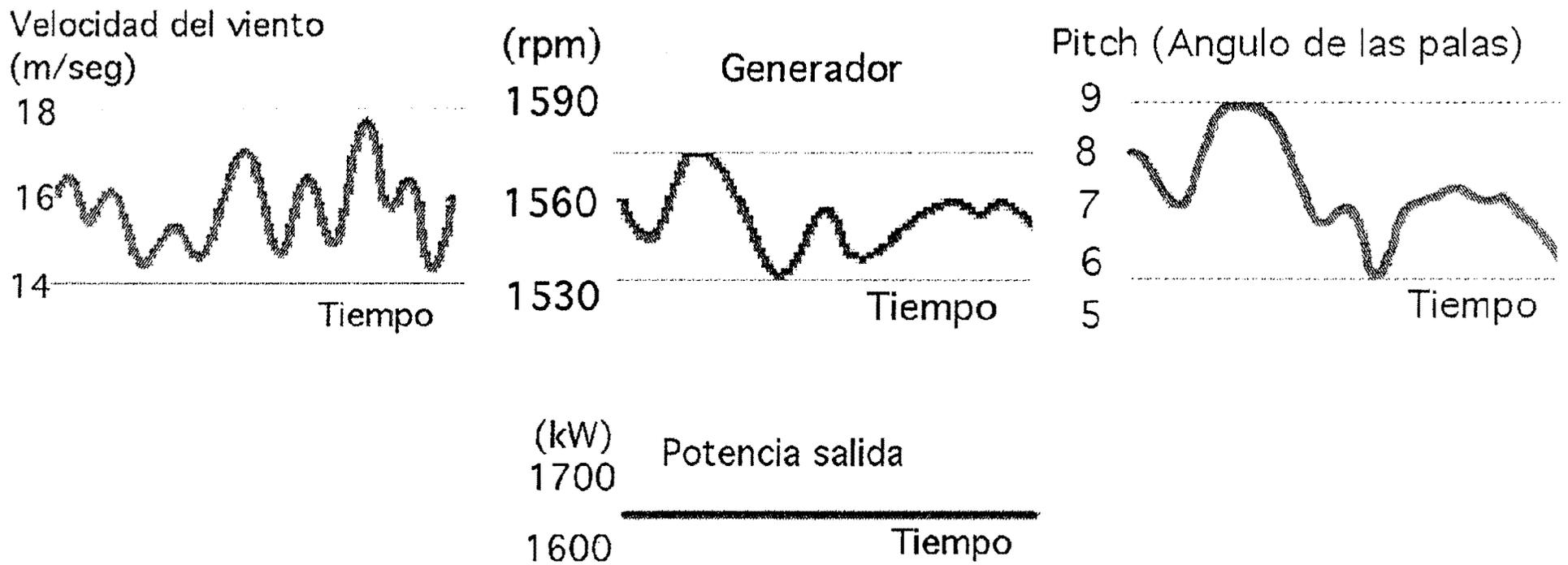
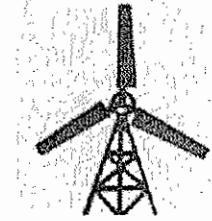


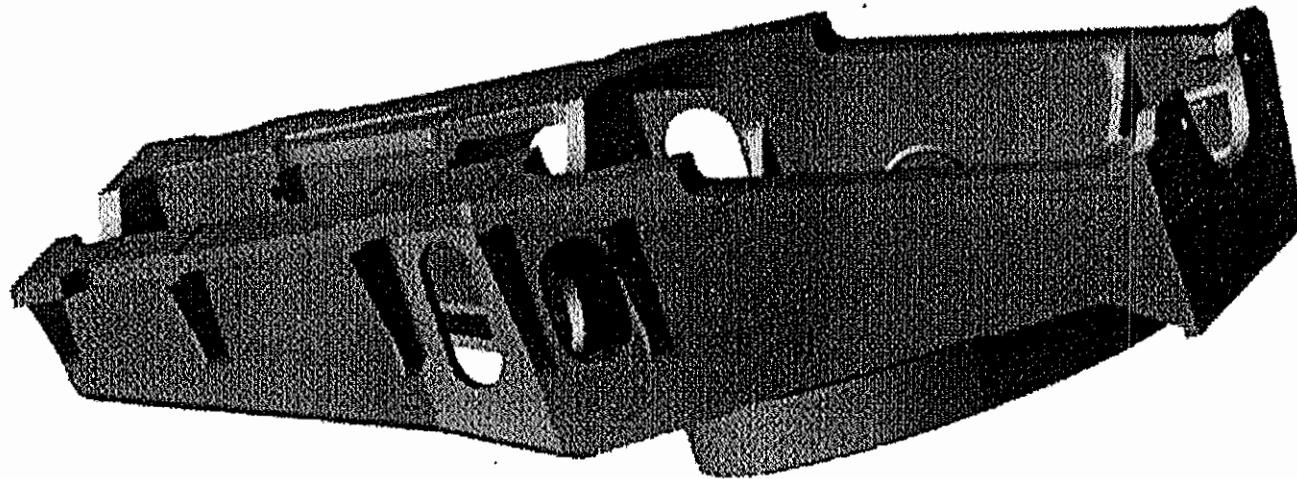
Fig VI.5.- Medidas de la velocidad del viento, velocidad del rotor, ángulo de las palas y potencia de salida

Principios de energía eólica. Aerogeneradores

Partes de un aerogenerador

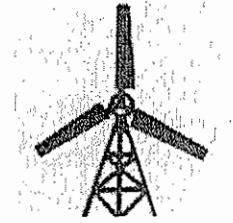


- Bastidor

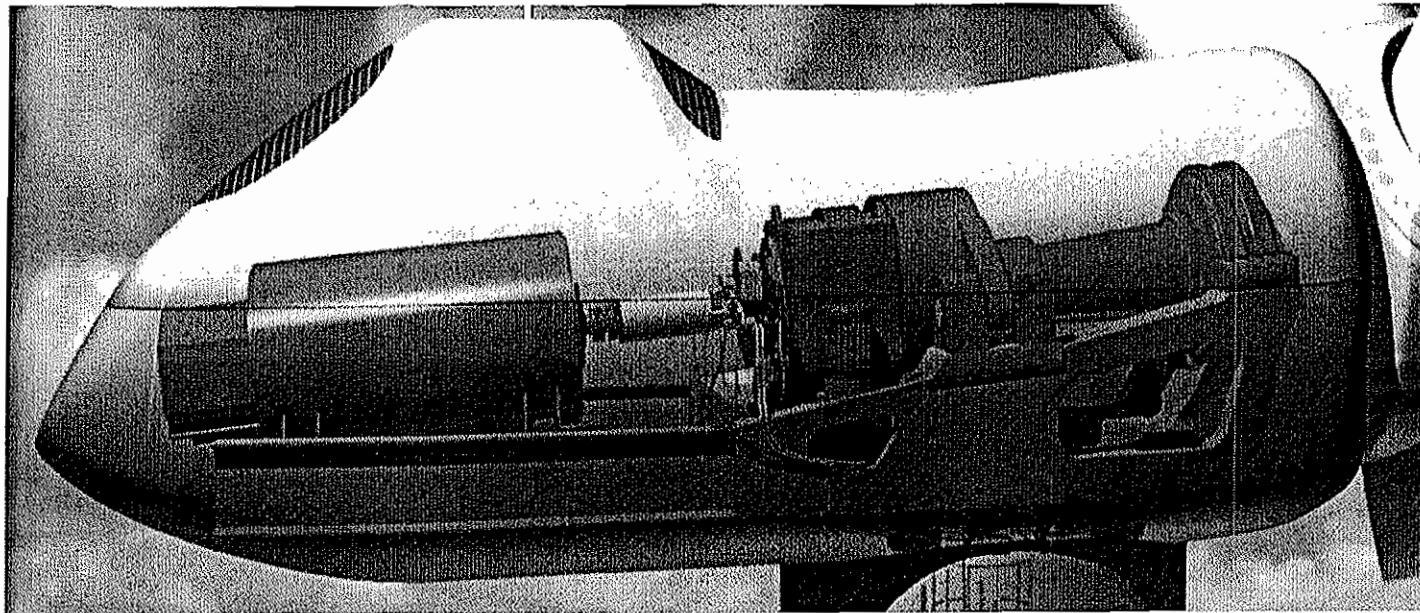


Principios de energía eólica. Aerogeneradores

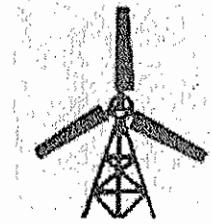
Partes de un aerogenerador



- Góndola

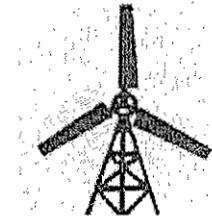


Partes de un aerogenerador

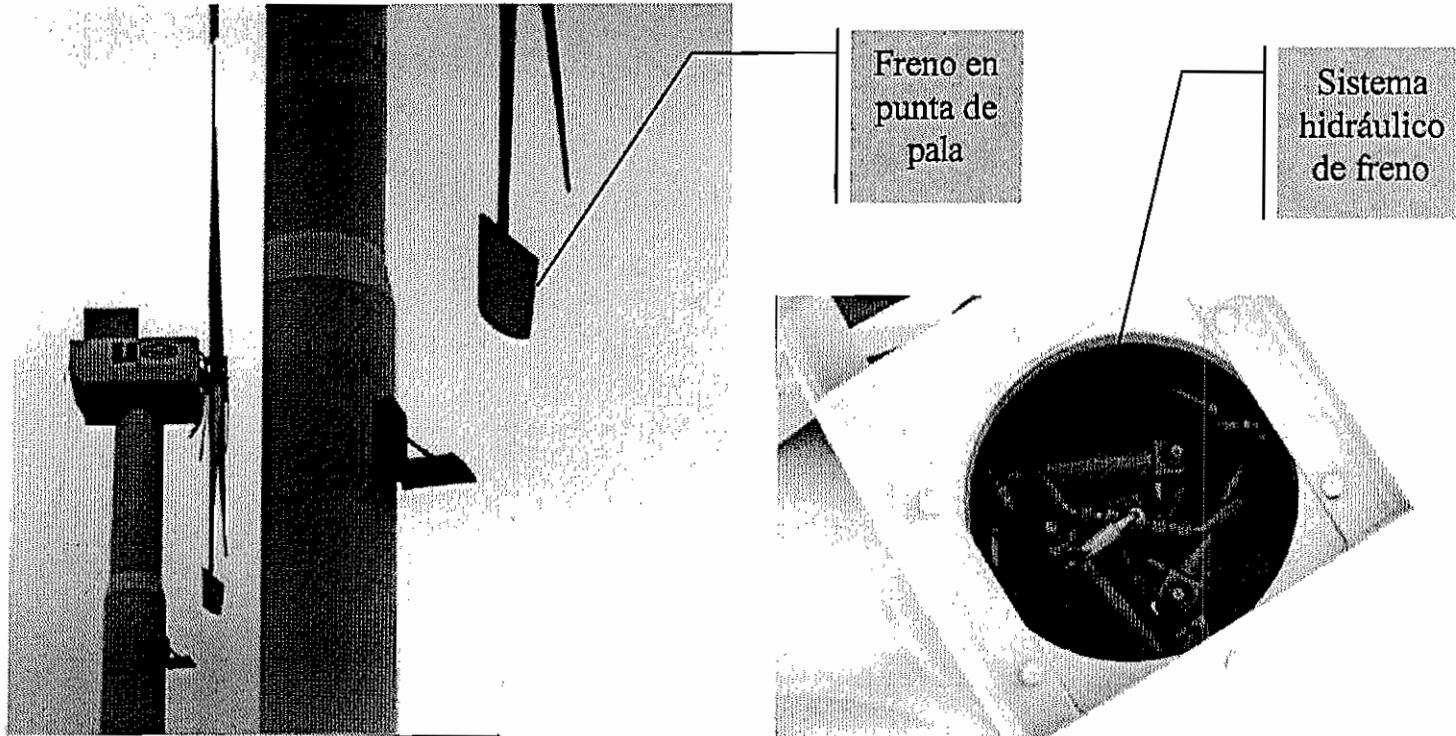


- Frenos
 - Aerodinámicos
 - punta de pala (paso fijo)
 - cambio de paso de pala (paso variable)
 - del rotor
 - antes del multiplicador
 - después del multiplicador
 - de la góndola

Partes de un aerogenerador



- Frenos aerodinámicos

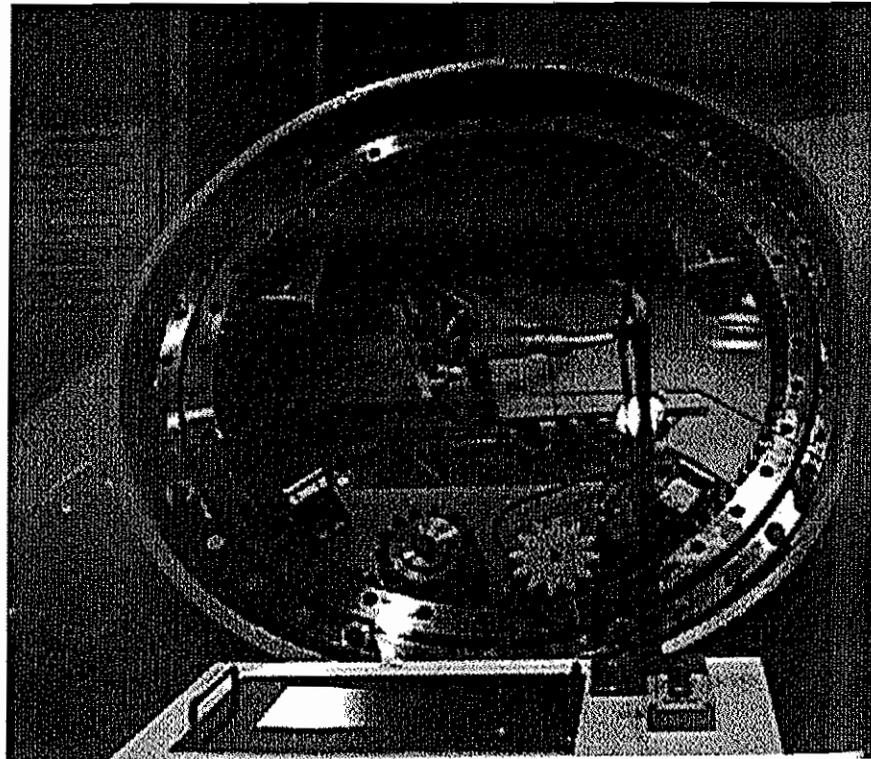


Principios de energía eólica. Aerogeneradores

Partes de un aerogenerador

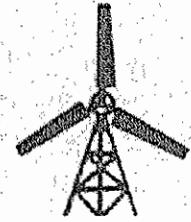


- Frenos aerodinámicos: cambio de paso de pala

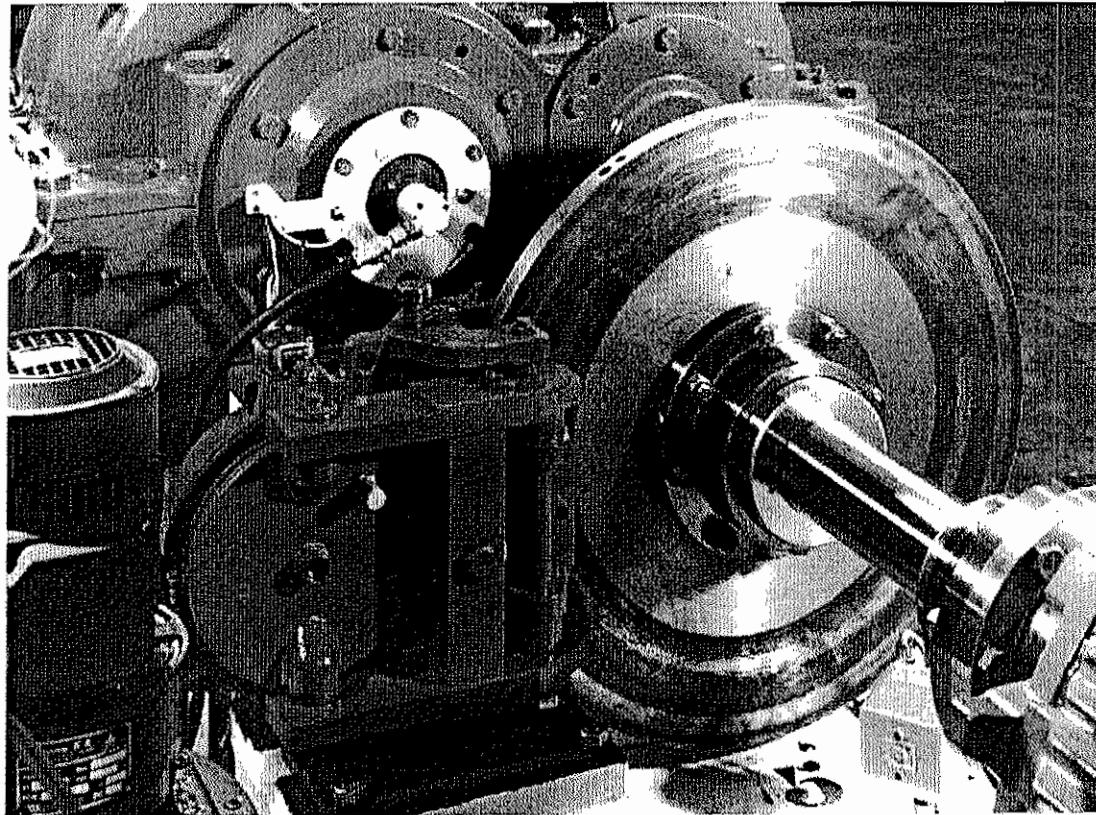


Principios de energía eólica. Aerogeneradores

Partes de un aerogenerador



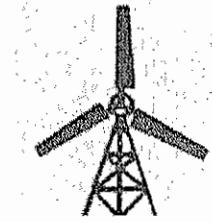
- Frenos del rotor



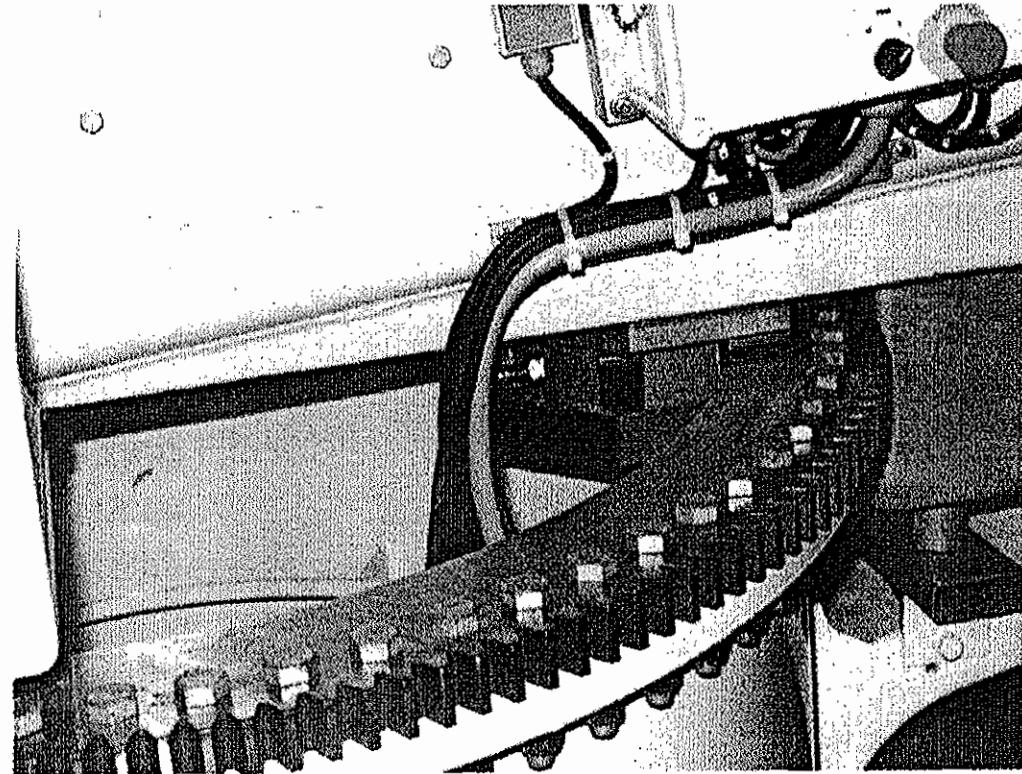
Fuente: AEPD

Principios de energía eólica. Aerogeneradores

Partes de un aerogenerador

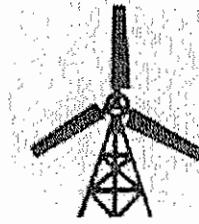


- Frenos de la góndola

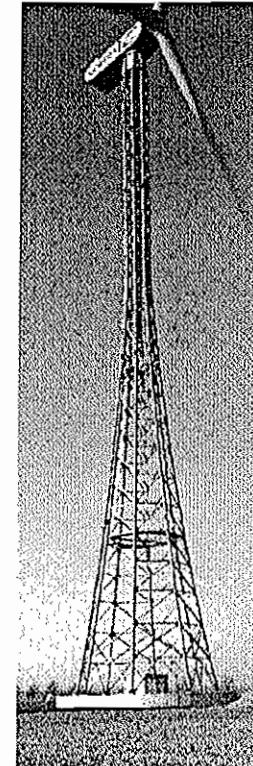
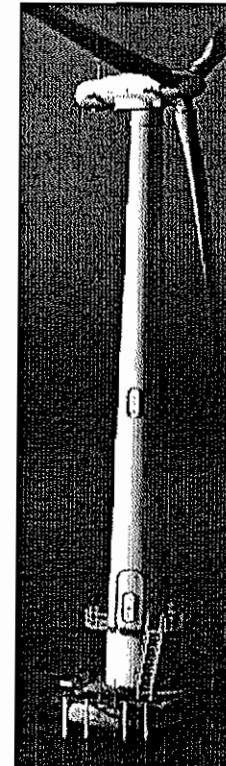


Principios de energía eólica. Aerogeneradores

Partes de un aerogenerador

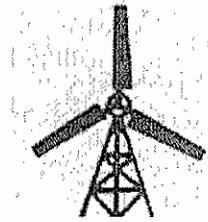


- Torre
 - Tubular
 - Reticular o de celosía

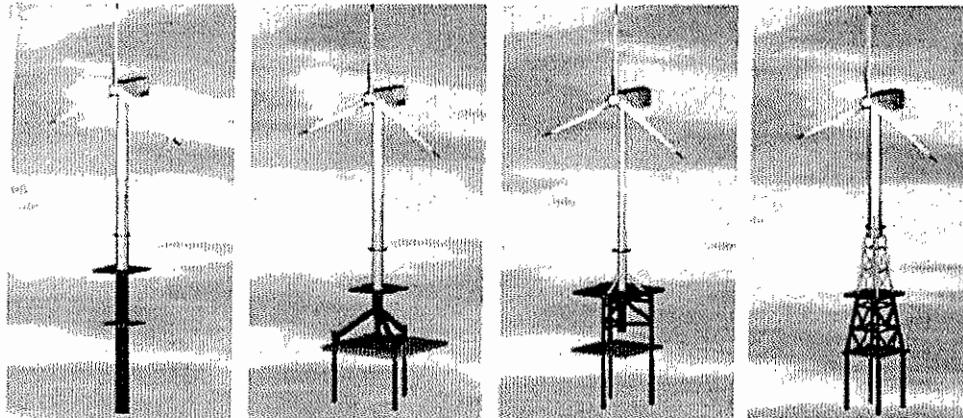
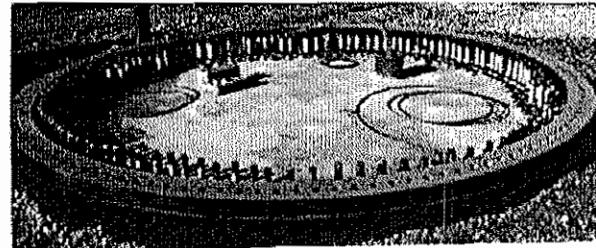


fuente: WIND Directions

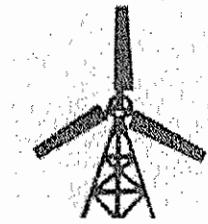
Partes de un aerogenerador



- Torre: Cimentación
 - Tierra
 - Offshore

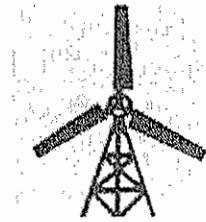


Partes de un aerogenerador



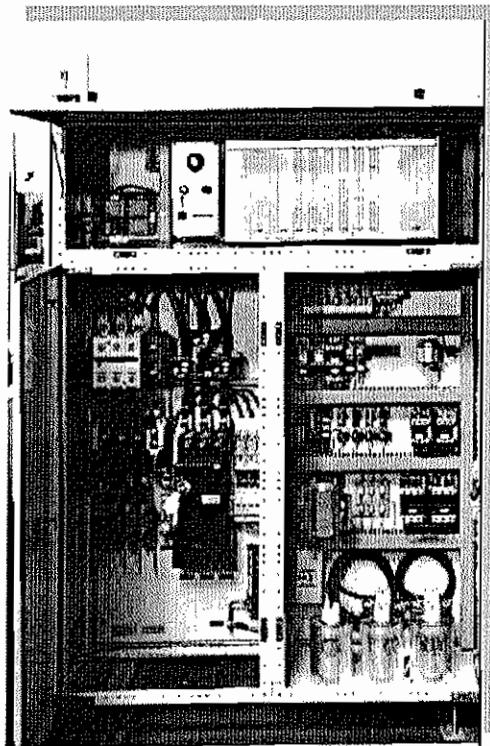
- Sistema de control
 - Control de orientación de la góndola
 - Sensores
 - Veleta
 - Actuadores
 - Moto reductores
 - Frenos de disco en góndola
 - Control de la aeroturbina
 - Sensores
 - Anemómetro
 - Actuadores
 - Sistema de cambio de *paso de palas*
 - Sistema de *puesta en bandera*
 - Freno aerodinámico (punta de pala)
 - Freno de disco en ejes

Partes de un aerogenerador

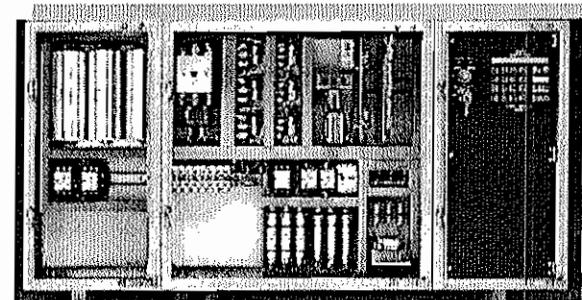


- Sistema de control: Armarios de instalación

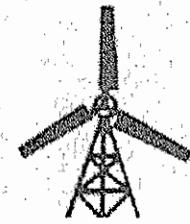
Potencia



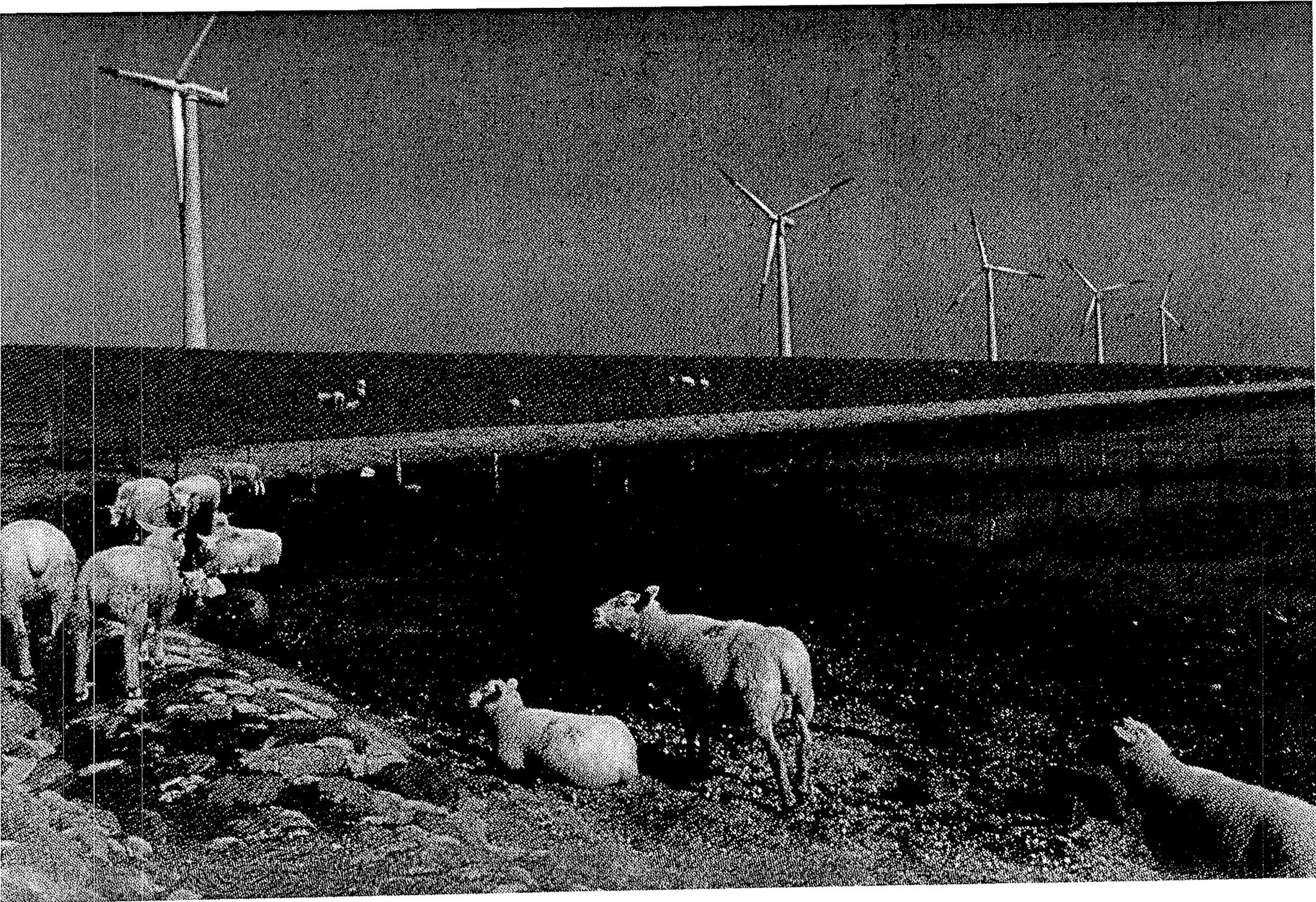
Control



Partes de un aerogenerador



- Instalación eléctrica
 - Interruptor automático
 - Transformadores de intensidad
 - Contactor de línea
 - Puente de tiristores
 - Contactor para inversión de orientación
 - Protectores de sobre tensión
 - Seccionadores de carga
 - Regletas, conectores, fuentes de alimentación, fusibles , pulsadores, etc...



Modelo de distribución de líneas en un parque eólico

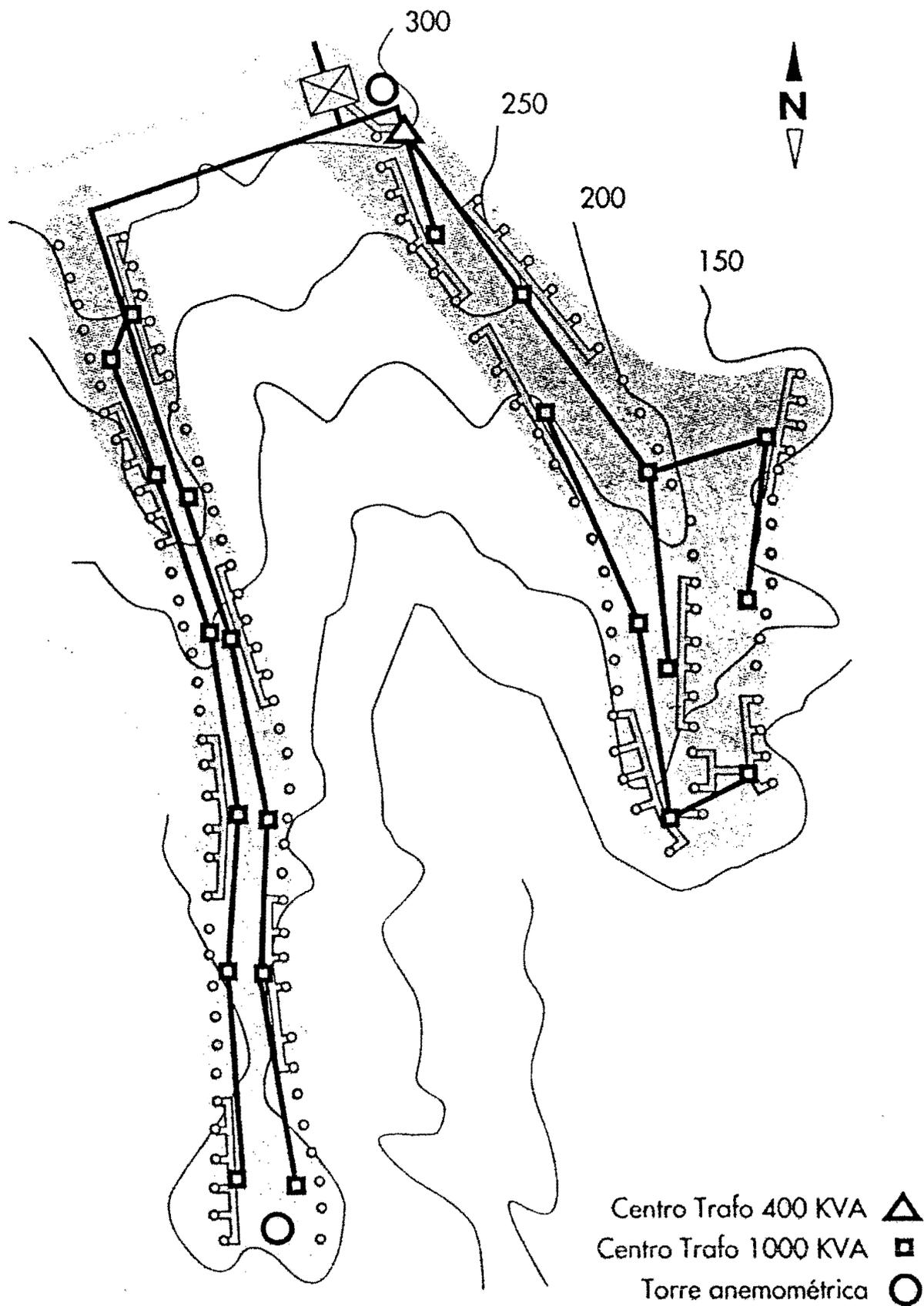


Figura 4.14

Equipo de monitorización y adquisición de datos

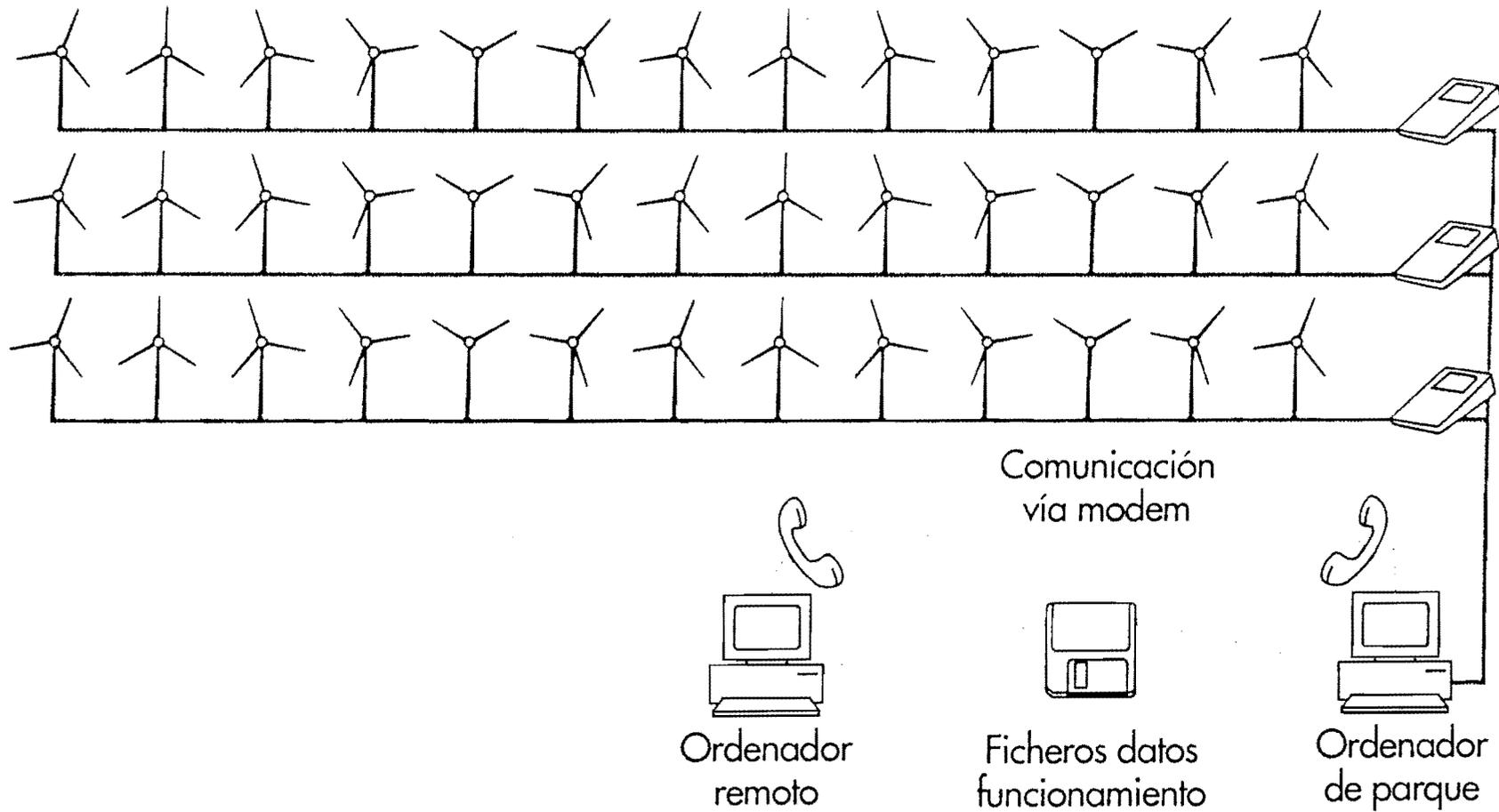
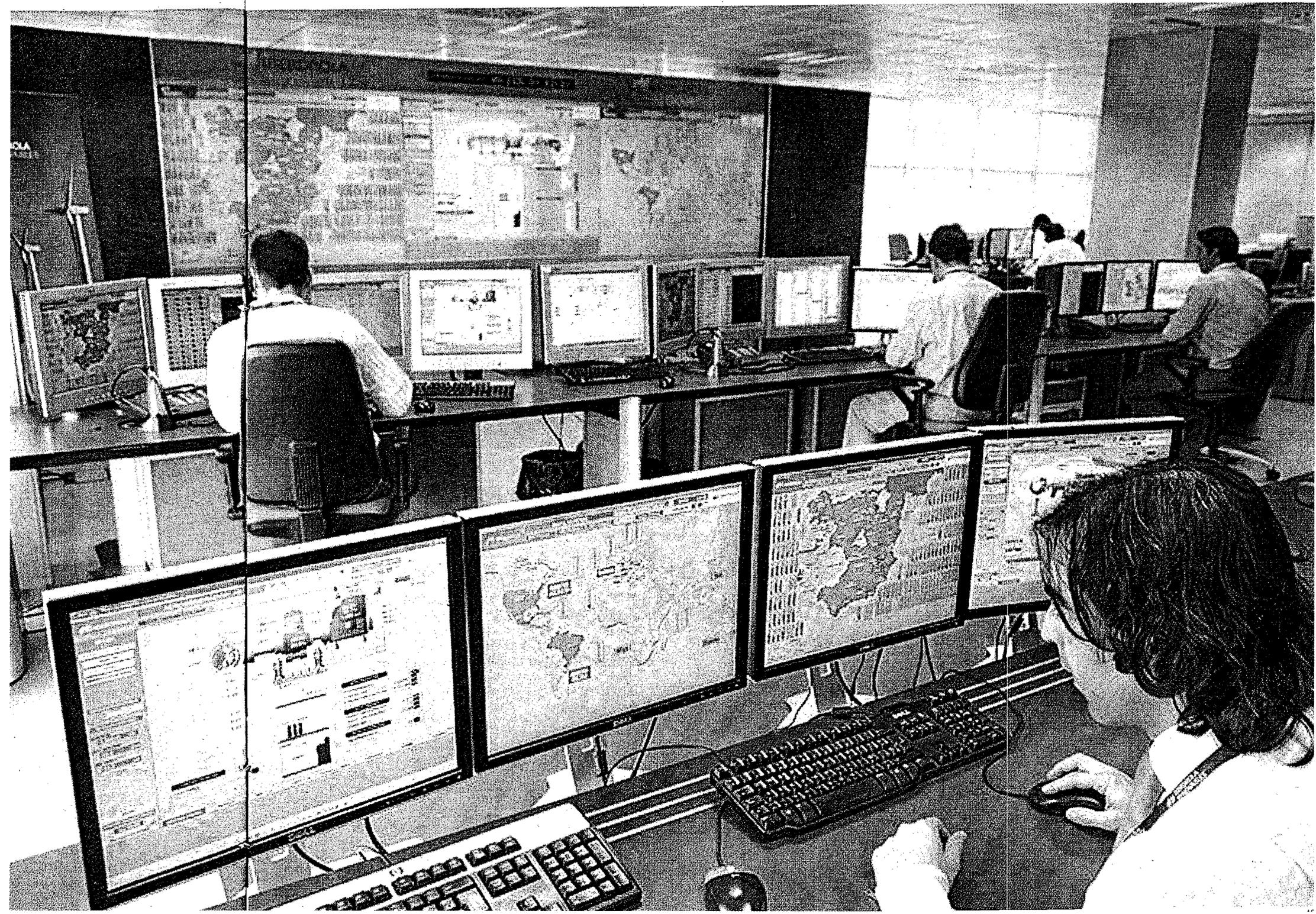
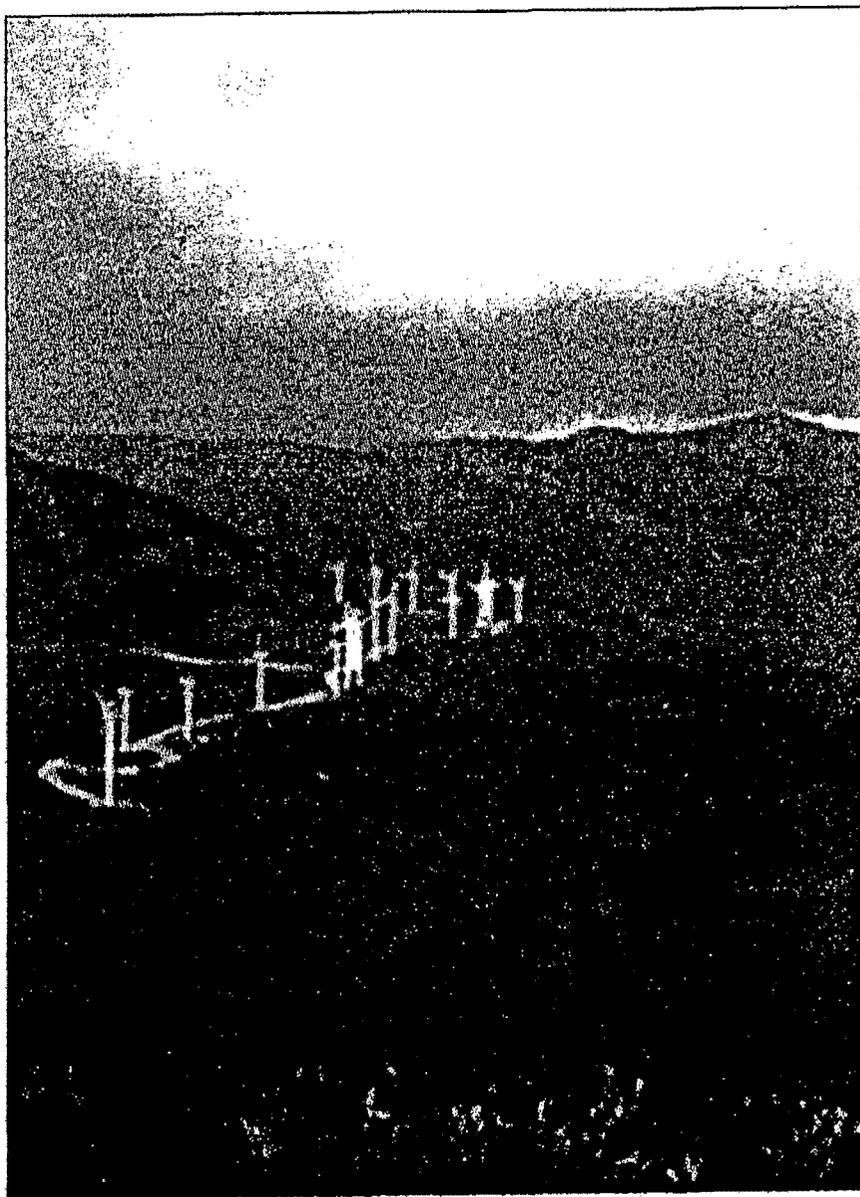
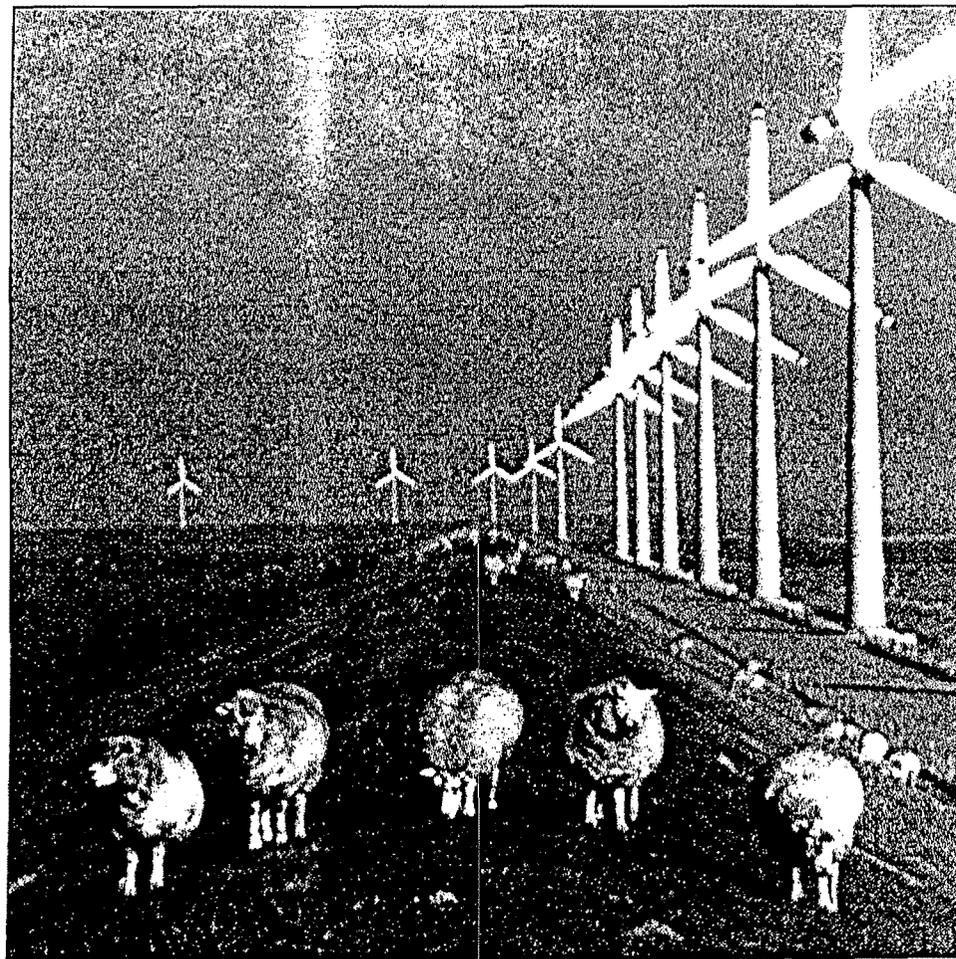


Figura 4.15





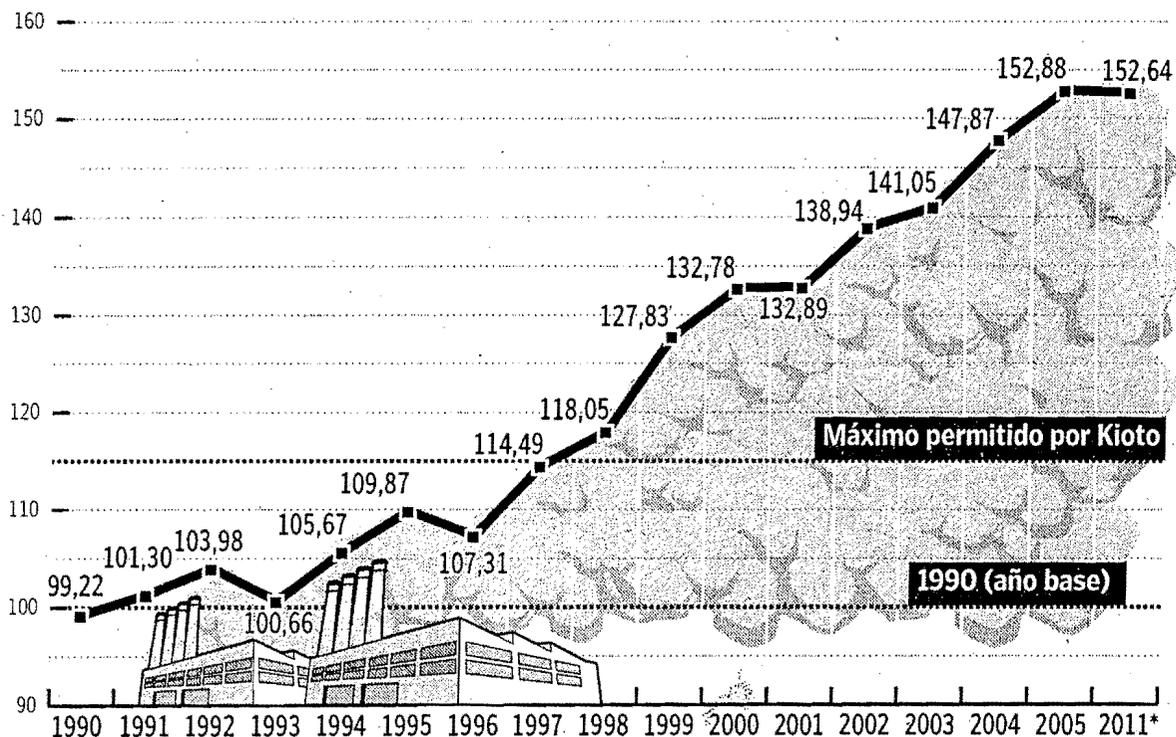
Impacto visual de un parque eólico.



Energía eólica y calidad de vida.

Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero en España

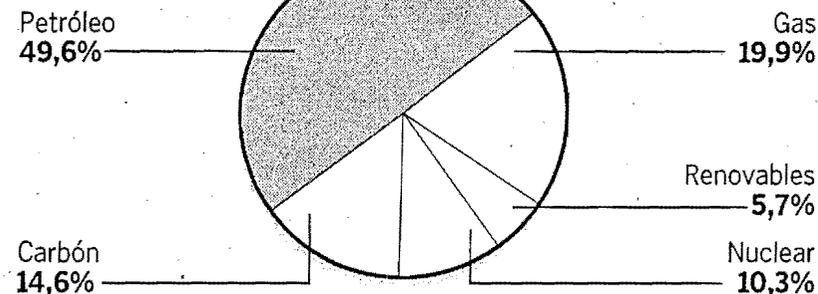
(Variación Porcentual respecto al año anterior)



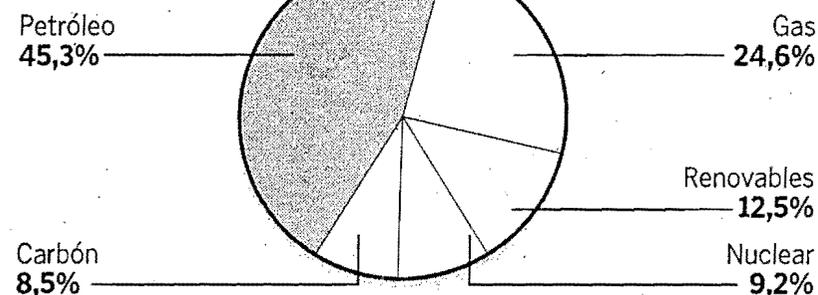
*Proyección de emisiones

Consumo de energía primaria en España

Año 2005



Año 2011

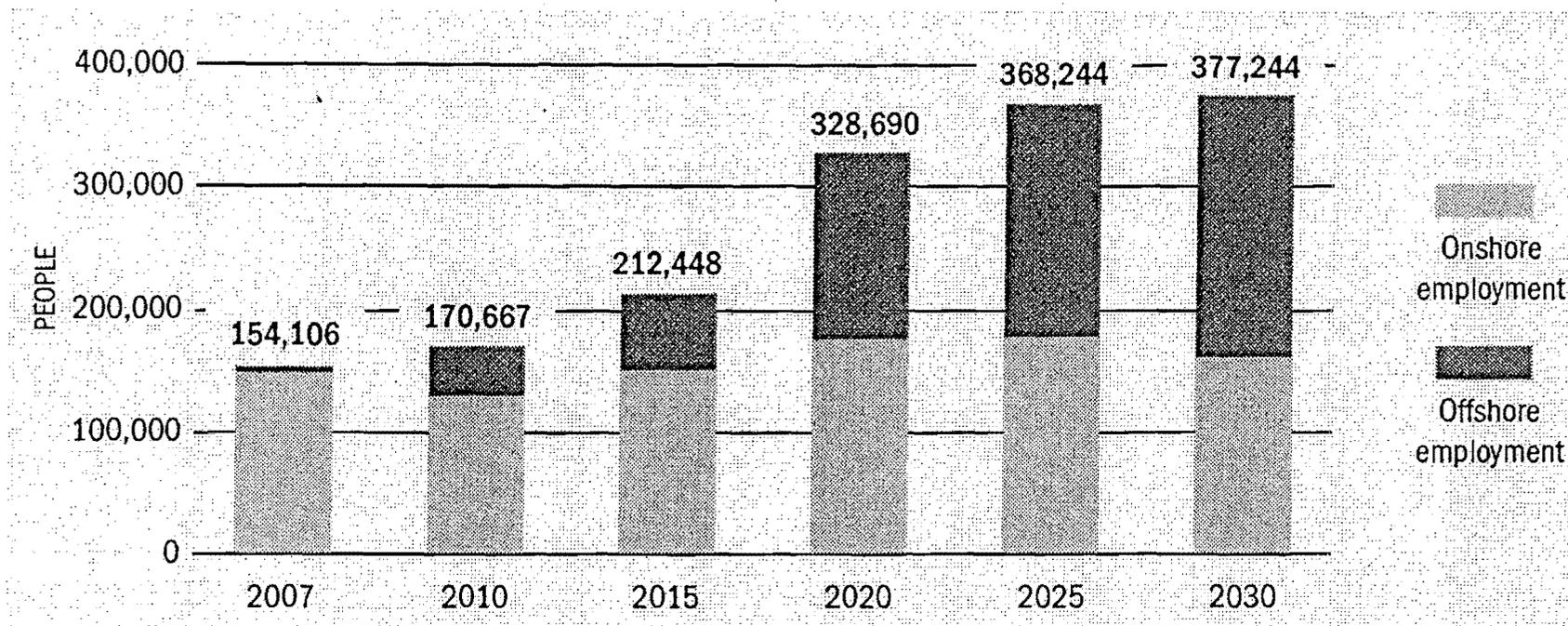


Infografía ABC

Las emisiones contaminantes de España superan en un 37% el límite de Kioto

Este desfase podría costar a nuestro país unos 6.000 millones de euros

FIGURE 04: Wind Energy Sector Employment (EU 2007-2030)



	Annual capacity (MW)			Cumulative capacity (MW)			Employment		
	Onshore	Offshore	Total	Onshore	Offshore	Total	Onshore	Offshore	Total
2007	8,344	210	8,554	55,500	1,100	56,535	147,736	6,370	154,106
2010	6,873	1,331	8,205	76,500	3,500	80,000	129,271	41,396	170,667
2015	8,086	2,300	10,386	112,500	12,000	124,500	151,047	61,401	212,448
2020	9,949	6,805	16,754	145,000	35,000	180,000	176,199	152,491	328,690
2025	10,519	8,504	19,023	164,800	74,500	239,300	177,194	191,744	368,938
2030	9,882	9,590	19,472	180,000	120,000	300,000	161,606	215,637	377,244

