

## VI.- ANTECEDENTES DE LOS AEROGENERADORES EUROPEOS

### VI.1.- FINLANDIA

En 1924 el ingeniero Sigurd Savonius diseñó un rotor cuya principal ventaja consistía en trabajar con velocidades del viento muy bajas; estaba formado por dos semicilindros dispuestos alrededor de un eje vertical. El sistema presentaba además buenas características aerodinámicas para el autoarranque y la autorregulación. Las aeroturbinas Savonius son muy adecuadas para bombeo de agua en aplicaciones de riego.

La sencillez de su diseño y la posibilidad de construir bombas eólicas con buenos rendimientos utilizando los típicos bidones de petróleo convierten estas turbinas en las más adecuadas para regiones poco industrializadas.

### VI.2.- RUSIA

En la Tabla VI.1 se presentan las características principales de algunos aerogeneradores construidos en la Unión Soviética, dentro de la gama de bajas potencias. Las tres primeras de estas máquinas estaban equipadas con un regulador de desenganche aerodinámico, mientras que el aerogenerador Sokol, Fig VI.1, estaba equipado con un regulador centrífugo de resorte.

Tabla VI.1.- Características de algunos aerogeneradores rusos de baja potencia

Modelo	BE 2M	VIESKH 4	UVEU D6	Sokol D12
Diámetro m	2	4	6	12
Número de palas	2	2	2	3
n rev/min	600	280	186	88
Potencia nominal kW	0,15	1,6	3,4	15,2
Viento nominal m/seg	6	8	8	8
Viento utilizado m/seg	3 - 25	4 - 40	4 - 40	4,5 - 40

Una de las primeras experiencias en el campo de los grandes aerogeneradores fue la llevada a cabo por los rusos en 1931, en Crimea (Balaclava, cerca de Yalta), donde se construyó un aerogenerador de 100 kW que generaba una producción anual del orden de 200000 kWh-año, Fig VI.2.

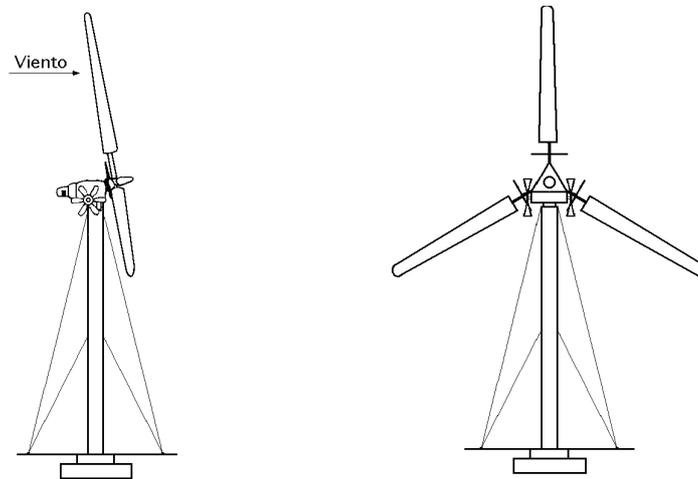


Fig VI.1.- Aerogenerador Sokol

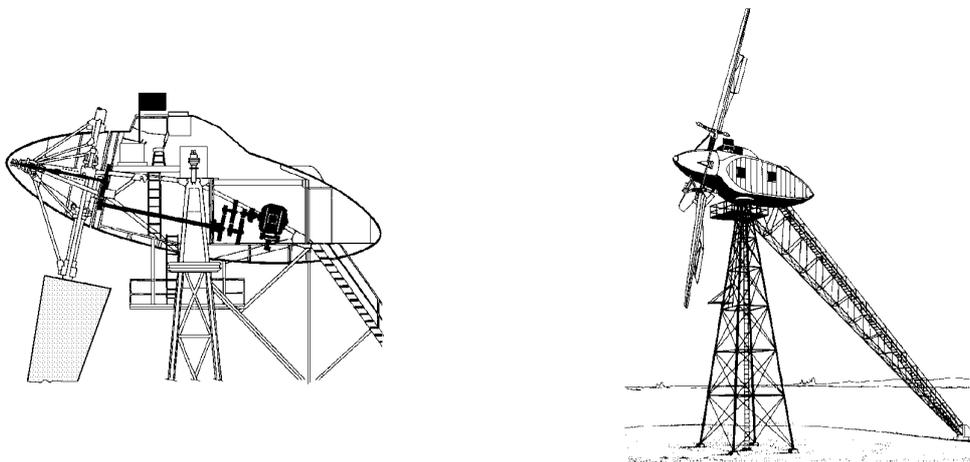


Fig VI.2.- Aerogenerador de 100 kW de Balaclava (1931) y vista interior de la góndola

La planta funcionó durante 10 años en combinación con una central térmica para generar electricidad y aparentemente dió buen resultado a pesar de los problemas operacionales que surgieron debido a la baja calidad de los materiales empleados en su construcción; los ejes y engranajes estaban fabricados en madera. Sus principales características eran:

- *Diámetro de las palas: 30 m.*
- *Potencia nominal: 100 kW para un viento de 10,5 m/seg y 50 kW para un viento de 8 m/seg.*
- *Potencia máxima: 130 kW para un viento de 11 m/seg.*
- *Velocidad de rotación: 25 rev/min para un viento de 8 m/seg y 30 rev/min para un viento de 10 m/seg.*
- *Generatriz asíncrona triásica de velocidad aproximada a 600 rev/min.*
- *Altura de la torre: 25 m.*
- *Hélice tripala de metal ligero de paso variable, de 2 m de ancho en la base (entronque con el cubo) y 1 m en el extremo del ala (periferia).*
- *Longitud útil: 11 m.*
- *Dispositivo de regulación automática de velocidad por alerón y mazarota.*
- *La hélice colocada en la parte superior del soporte está provista de un brazo de orientación.*
- *La extremidad inferior de cada brazo que descansaba sobre un rail circular, era arrastrada automáticamente por un motor cuando el viento cambiaba de dirección. La potencia del motor de orientación era de 1,1 kW.*

Después de tres años de pruebas ininterrumpidas, se proyectó la construcción de otras dos aeroturbinas paralelas de 100 kW, y más tarde otra de 5 MW. La guerra impidió que tales proyectos se llevaran a cabo y la que estaba construida fue destruida durante la invasión alemana.

Después de la guerra, Rusia construyó otra planta de características semejantes a la de Balaclava, aerogenerador Zwei D-30, en lo que se refiere a la forma de las hélices, las dimensiones y los rendimientos.

Se diferenciaba solamente en la torre, y en el dispositivo de orientación, ya que la hélice tripala situada en la parte inferior del soporte se orientaba por medio de dos rotores auxiliares.

Sin embargo, el interés por las grandes máquinas parecía haber declinado en favor de pequeñas aeroturbinas de 30 kW, destinadas a explotaciones agrícolas.

En los años sesenta, a la vista de la experiencia acumulada, redujeron la potencia a 15 kW, considerando que estas turbinas se adaptaban mejor a las necesidades de las pequeñas granjas. A lo largo de esta década se fabricaron millares de estas máquinas. El modelo más típico tenía un rotor tripala con regulación de paso variable.

### **VI.3.- HUNGRÍA**

En la Europa del Este, solamente Rusia se interesó en alguna medida por este tipo de energía, salvo en el caso aislado de una planta de 200 kW que se construyó en Hungría (1960), bajo la dirección de M. Ledacs Kiss. La instalación ofrecía las siguientes características:

- *Diámetro: 36,6 m.*
- *Aeroturbina de ataque frontal de 4 palas de 2.800 kg cada una y paso fijo.*
- *Constitución de las palas: estructura de sostén de acero, recubierta de chapa de aluminio; perfil Göttingen.*
- *Velocidad específica óptima:  $TSR = 5$ ; Velocidad de rotación de la hélice, 17,85 rev/min.*
- *Generador asíncrono de 200 kW a 1000 rev/min.*
- *Multiplicador de dos pasos. Primer paso de cadena (relación de multiplicación, 4/1)  
Segundo paso de engranajes (relación de multiplicación, 4/1).*
- *Velocidad nominal del viento: 10,4 m/seg.*
- *Potencia suministrada: 100 kW para vientos de 8 m/seg, y 200 kW para vientos de 10,4 m/seg.*
- *Torre de hormigón armado reforzado de 36 m de altura.*

Este aerogenerador se construyó para funcionar con vientos de débil intensidad. Cuando la velocidad del viento alcanzaba 3 m/seg, la hélice giraba en sincronismo con la red y el generador asíncrono comenzaba a proporcionar energía.

La orientación de la eólica era accionada por un sistema totalmente electrónico. El servomotor orientaba al aerogenerador frente al viento en el intervalo, 3 m/seg a 10,4 m/seg. y le separaba de la dirección del viento cuando la intensidad se elevaba, de forma que la potencia suministrada permanecía igual a la potencia nominal. La máquina no llevaba freno aerodinámico sino solamente un freno mecánico. El sistema de orientación sólo intervenía si la dirección del eje de la máquina se separaba de la dirección del viento un ángulo superior a 15°. Para velocidades del viento inferiores a 3 m/seg, el sistema de control aislaba el generador de la red.

### **VI.4.- DINAMARCA**

A principios de siglo, Dinamarca era el país líder en el aprovechamiento del viento como recurso energético, con una potencia instalada de 30 MW que abastecían el 25% de sus necesidades. El parque eólico danés era aproximadamente de 2.500 turbinas industriales, y 4.600 más de pequeña potencia para uso rural.

En los años veinte, después de la guerra, se fabricaban unos aerogeneradores de 20 kW diseñados por P. Vinding, y en la década siguiente la compañía Lykegard comercializó otro modelo de 30 kW, en la misma línea que los anteriores y de diseño similar a los fabricados por el profesor Lacour. La pri-

mera turbina con diseño aerodinámico que se fabricó y comercializó en Dinamarca fue el F5L-Aeromotor de la compañía FL-Smidth, capaz de generar potencias entre 30 y 70 kW y del que se llegaron a instalar 18 unidades durante la última guerra, Fig VI.3. A partir de entonces el parque eólico empezó a reducirse rápidamente.

De los 16.000 pequeños aerogeneradores que había a principios de la guerra no quedaban más de 1.500 al final de ella. Las plantas eólicas se incrementaron de 16 a 88 durante ese período, pero su número descendió a 57 en el año 1.947, desapareciendo completamente durante los años cincuenta.

Después de una breve experiencia a cargo del South Jutland Electricity Laboratory, en la que se instalaron en las islas Sealand y Bogo dos pequeños aerogeneradores de 13 y 45 kW diseñados por M. J. Juul, Fig VI.4, se creó en 1952 una comisión de energía eólica que en adelante se encargaría de dirigir los trabajos.

Se elaboró el mapa eólico, y en 1957 se instaló en Gedser un aerogenerador de 200 kW, con una hélice tripala de 24 m de diámetro, que se regulaba mediante alerones en sus extremos Fig VI.5. La planta funcionó durante ocho años, fue reconstruida en 1977 dentro del programa de desarrollo eólico del Ministerio de Energía danés, y se utilizó como banco de pruebas hasta 1979. Generó una media anual de 450.000 kWh, o 900 kWh/año/m<sup>2</sup> de superficie barrida.

Sus características técnicas eran:

- Diámetro: 24 m; Superficie barrida: 450 m<sup>2</sup>; Altura del soporte: 25 m.
- Hélice tripala: colocada bajo la góndola.
- Velocidad nominal: 17 m/seg; Potencia nominal: 200 kW; Velocidad de rotación: 30 rev/min.
- Generatriz asíncrona: 200 kW con 8 polos.
- Deslizamiento de: 0 a 1% plena carga.
- Velocidad de arranque: 5 m/seg.
- Relación de multiplicación:  $k = 25$  (doble tren de cadenas).
- Freno aerodinámico en el extremo del ala accionada por servomotor.
- Longitud útil de las palas: 9 m; Anchura de las palas: 1,54 m.

La hélice era de palas alabeadas de paso fijo, ángulo de calado 16°. La construcción de las palas se inspiró en las técnicas utilizadas en los molinos de viento. Llevaban una armadura de madera sujeta por placas de acero de 10 y 16 mm; las estructuras de madera, estaban cubiertas por una chapa de aleación ligera adaptada a la forma aerodinámica de los perfiles.

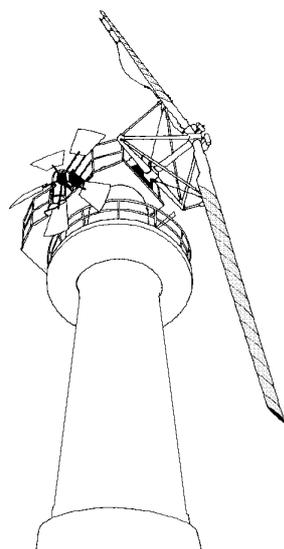


Fig VI.3.- Aeroturbina danesa de diseño aerodinámico capaz de generar entre 30 y 70 kW

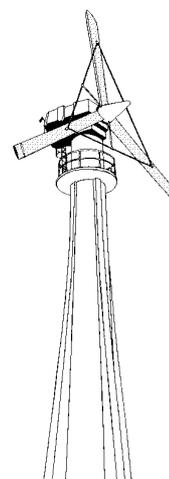


Fig VI.4.- Aerogenerador danés de 45 kW (J. Juul), que se instaló en la isla de Bogo

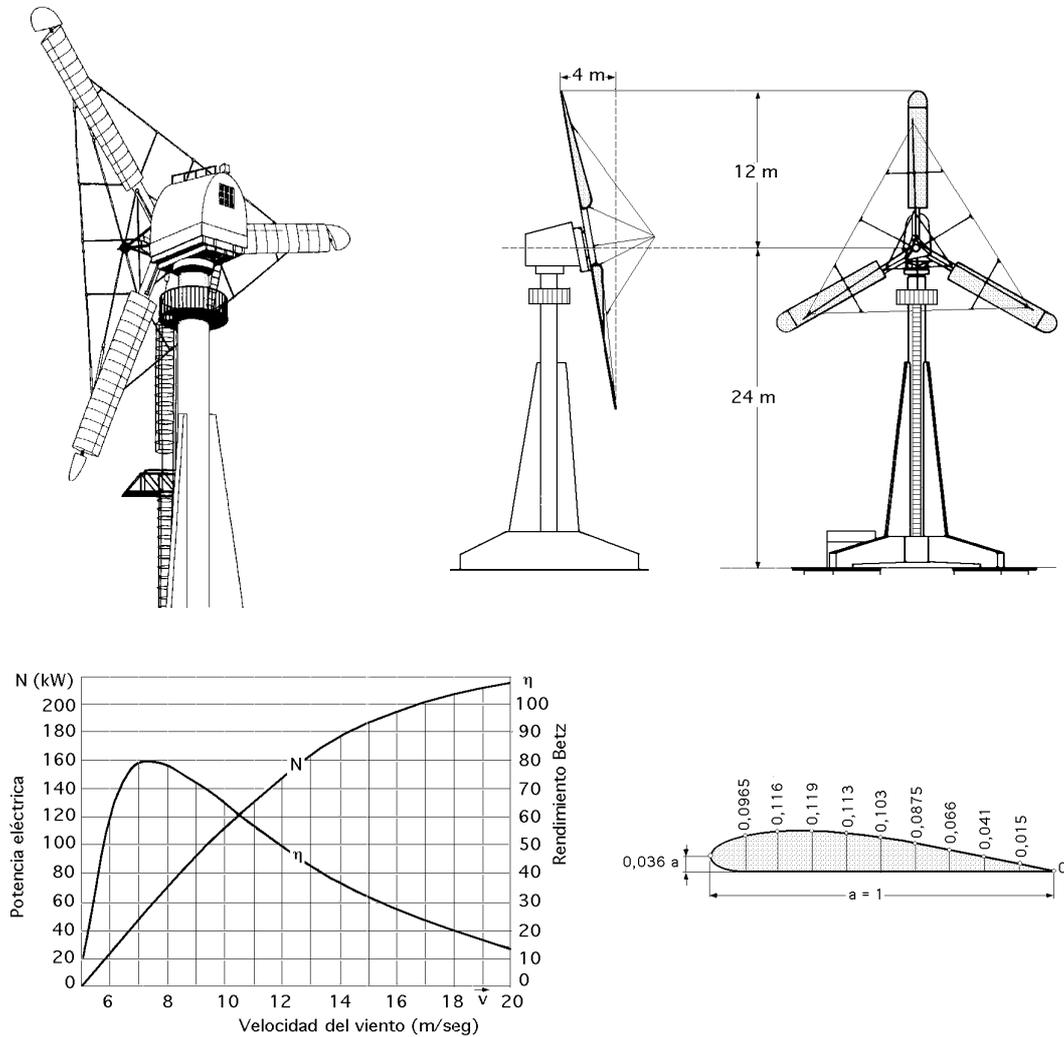


Fig VI.5.- Aerogenerador Gedser de 200 kW

La generatriz asíncrona unida a la red regional mantenía la velocidad de rotación en un valor casi constante. La regulación de la velocidad se facilitaba al disminuir el rendimiento aerodinámico de las palas con el aumento de la velocidad del viento.

En caso de exceso de velocidad debido a la ruptura de la conexión eléctrica con la red, los alerones móviles situados en el 12% de la superficie útil de las palas giraban  $60^\circ$  bajo la acción de un servomotor accionado por un regulador de bolas provocando así el frenado aerodinámico del conjunto. La parada de la máquina se obtenía por la intervención de un freno mecánico.

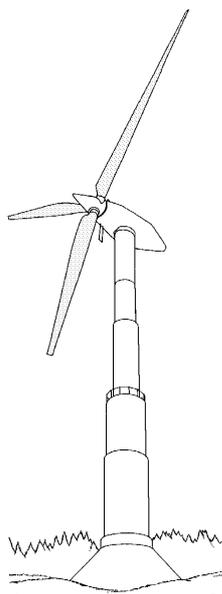


Fig VI.6.- Aerogenerador de Tvind de 2 MW

**Aerogenerador de Tvind.-** En 1978 se llevó a cabo una original planta eólica de 2 MW; los maestros de las escuelas de Tvind, cerca de Ulfborg, en el oeste de Jutlandia (Noroeste de Dinamarca), decidieron generar la energía que se consumía en su comunidad, de alrededor de un millar de personas. Con la ayuda de otras instituciones del país, diseñaron y construyeron esta aeroturbina, que era la de mayor potencia que se había construido hasta entonces Fig VI.6.

El aerogenerador Tvind fue el primero de gran potencia diseñado para operar con la máxima eficiencia con cualquier condición de

viento inferior a 54 km/h; consta de un rotor tripala, compuesto por palas de fibra de vidrio con un perfil NACA 23035 en el entronque con el cubo, 2,13 m de cuerda, hasta un perfil 23012 en la periferia, 0,7 m de cuerda.

La potencia eléctrica generada se utilizaba parcialmente para calefacción y el resto en forma de corriente continua, como suministro de energía eléctrica. La planta ha funcionado desde entonces, aunque con ciertos problemas de tipo operacional, proporcionando electricidad a la comunidad de Tvind.

Sus características eran las siguientes:

- Hélice tripala de plástico armado de fibra de vidrio de paso variable.
- Perfil NACA 23035, 23024 y 23012.- Diámetro: 54 m.
- Velocidad de rotación: 40 rev/min.
- Potencia nominal: 2 MW, para una velocidad del viento de 15 m/seg.
- Velocidad del viento máxima de servicio: 20 m/seg.
- Generador: alternador trifásico.- Velocidad de rotación: 760 rev/min.
- Relación de multiplicación: 19.
- Peso del multiplicador de velocidad: 18 toneladas.
- Peso de cada pala: 4 toneladas.
- Altura de la torre de hormigón: 53 m.

**Aerogeneradores NIBE.-** Animado por esta experiencia y por las presiones de los grupos ecologistas, el gobierno danés elaboró en 1977 un programa de desarrollo de dos años de duración, que incluía la reconstrucción del aerogenerador Gedser y la puesta en marcha de otros dos, (concebidos por Helge Petersen), de 630 kW, los NIBE A y B que entraron en funcionamiento en 1979 y 1980 respectivamente; la separación entre uno y otro era de 220 metros, Fig VI.7.

**Primera máquina:** El aerogenerador A utilizaba un dispositivo de regulación basado en la reducción de la fuerza aerodinámica alrededor del descolgamiento aerodinámico. La reducción de la potencia se provocaba por la variación del ángulo de asiento de las extremidades móviles de las palas; el ángulo de asiento podía tomar valores de  $-6^\circ$ . Las partes de las palas situadas cerca del cubo eran fijas y estaban unidas con obenques.

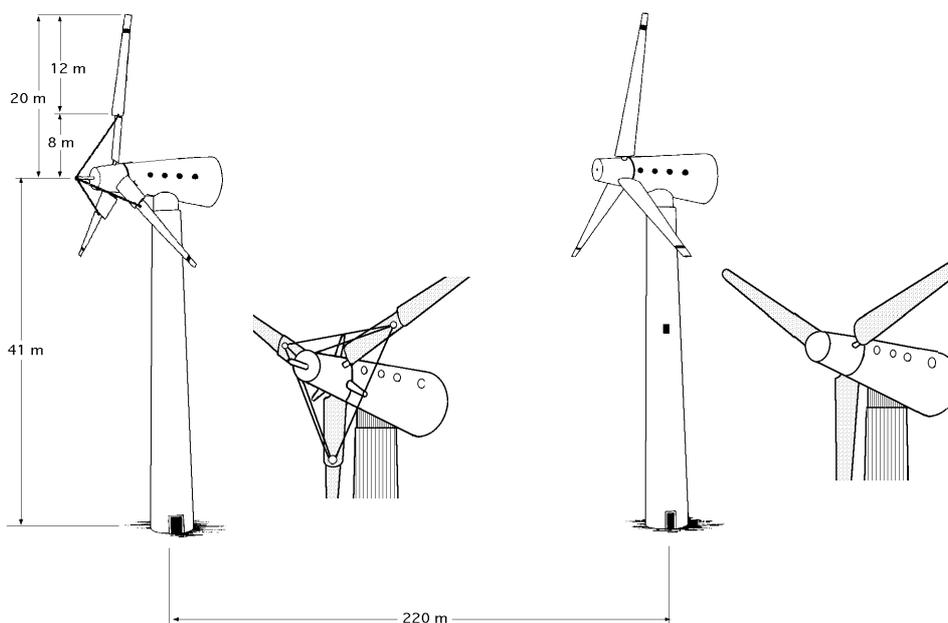


Fig VI.7.- Aerogeneradores NIBE A y B de 630 kW

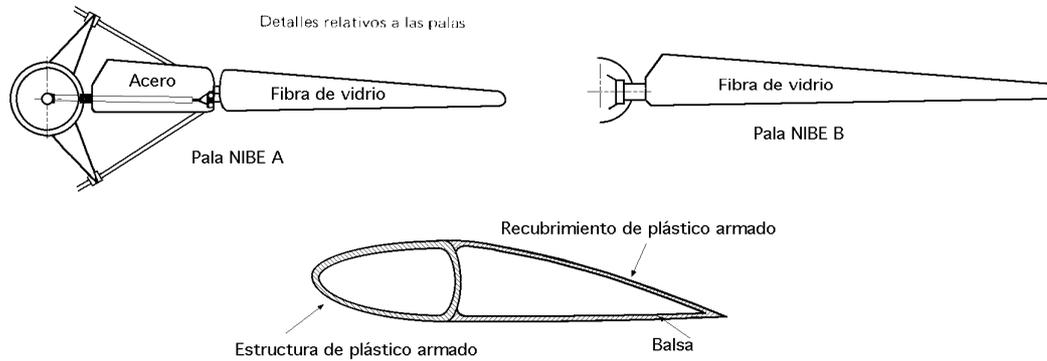


Fig VI.8.- Palas de los aerogeneradores NIBE A y B

**Segunda máquina:** El aerogenerador B utilizaba un sistema de regulación de paso variable sobre toda la longitud de las palas. Con vientos muy fuertes, las palas tomaban una posición paralela a la dirección del viento. Ambos rotores tenían 40 m de diámetro, y estaban fabricados en poliéster con refuerzo de fibra de vidrio.

Las características comunes de los dos aerogeneradores eran las siguientes:

- Rotores de 40 m de diámetro
- Las palas eran de acero y de poliéster con refuerzo de fibra de vidrio.
- Hélices tripala delante de la torre.
- Las palas presentaban una torsión (alabeo) de 11° desde el entronque en el cubo hasta las extremidades.
- Los perfiles utilizados fueron: NACA 4412, 4434.
- Cubo rígido.
- Ángulo de cono: 7°
- Inclinación del eje de rotación sobre el plano horizontal: 6°.
- Velocidad de rotación: 34 rev/min.- Velocidad nominal del viento: 13 m/seg.
- Velocidad específica: TSR = 5,4.- Velocidad máxima del viento en servicio: 25 m/seg.
- Generatriz eléctrica asíncrona: 4 polos, 6 kV, 630 kW.
- Velocidad mínima del viento para generación: 6 m/seg
- Producción anual estimada: 1,5 GWh.
- Regulación con paso variable y calculador.
- Orientación con servomotor hidráulico (velocidad de rotación: 0,4 grados/seg).
- Torres cilíndricas de baja frecuencia, de hormigón armado y 41 m de altura
- Masa y longitud de la parte móvil de las palas del aerogenerador A: 900 kg; 12 m.
- Masa de cada pala del aerogenerador B: 3.500 kg.
- Masa total (barquilla + palas): 80 Tm

Tenían entre sí algunas diferencias, como el arriostamiento de las palas y el control de regulación de potencia por entrada en pérdida de la pala en la serie A; los rotores eran tripala, y en la serie A estaban arriostradas entre sí.

La regulación de la hélice en el A se realizaba variando al ángulo de ataque de toda la pala, y en el B, el paso variable afectaba a 2/3 de la pala.

**Aerogenerador Volund.-** Describiremos solamente el modelo de 28 m de diámetro, concebido por Helge Petersen, Fig VI.9.

Sus características principales eran las siguientes:

- Hélice tripala- Diámetro: 28 m.- Palas de plástico armado de fibra de vidrio. Alabeo: 7,8°
- Anchura de las palas: junto al cubo: 1 800 mm.; en sus extremidades: 600 mm.
- Perfiles: NACA 4412, 4420; Cubo rígido; Ángulo de cono: 4°
- Potencia: 265 kW.- Velocidad nominal del viento: 13 m/seg
- Velocidad de rotación: 42 rev/min para viento fuerte y moderado. 28 rev/min para viento suave

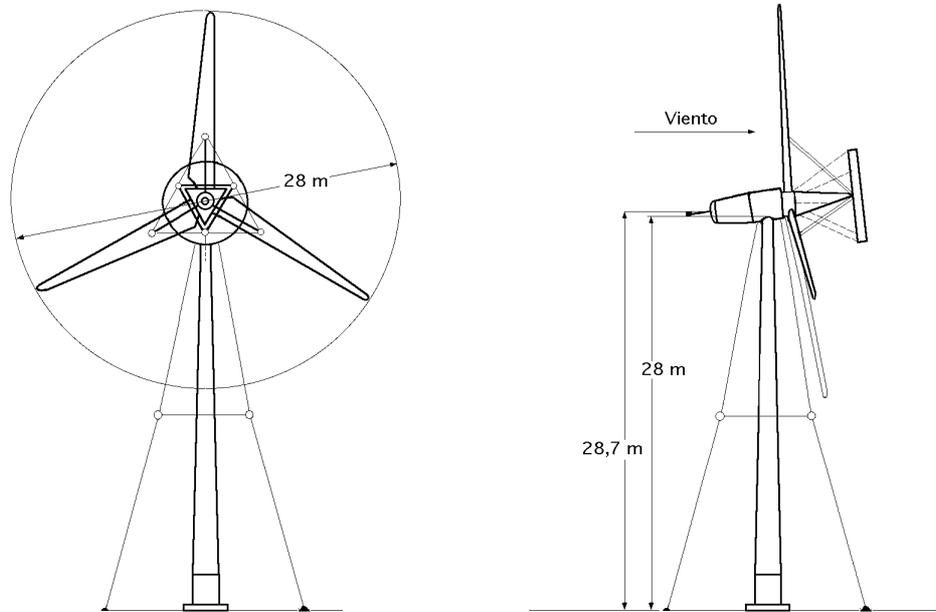


Fig VI.9.- Aerogenerador Volund de 265 kW

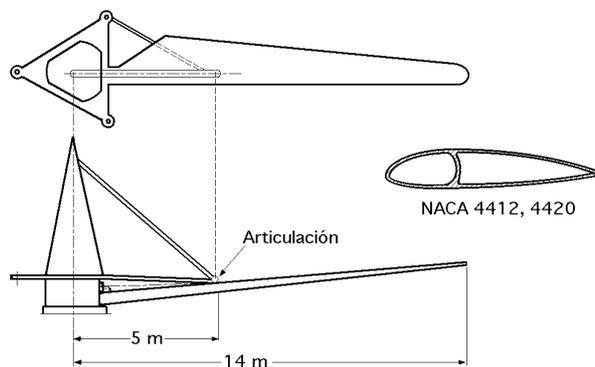


Fig VI.10.- Pala del aerogenerador Volund de 265 kW

- - *Inclinación del eje de rotación sobre el plano horizontal: 6°.*
- *Regulación con paso variable y regulador centrífugo.*
- *Torre troncocónica de acero de 28 m de altura, con diámetro de 0,80 m en la cima y 1,4 m en la base.*
- *Autoorientable por rotor auxiliar.*
- *Dos generadores asíncronos: el primero de 6 polos, 58 kW, 1000 rev/min para vientos de velocidad baja; el segundo de 4 polos, 265 kW, 1512 rev/min para vientos moderados y fuertes.*
- *Producción anual estimada: para una velocidad media de 5,35 m/seg: 450.000 kWh/año; para una velocidad media de 7 m/seg: 800.000 kWh/año.*
- *Peso de cada pala: 700 kg.- Peso del rotor con palas: 4000 kg.*
- *Barquilla + rotor: 14 000 kg. - Torre: 6 000 kg. - Peso total: 20 000 kg.*
- *La máquina puede resistir vientos de 70 m/seg (250 km/hora). Su duración se estimó en 30 años.*

A finales de 1991 las estadísticas operativas para ambos generadores indicaban más de 6.000 horas de funcionamiento para el A y más de 25.000 para el B.

Dinamarca desarrolló también aerogeneradores de baja potencia durante los años 1980-81, y así fueron instaladas 500 máquinas de potencias entre 10 y 55 kW. Entre ellas podemos citar:

**Aerogenerador Kuriant.**- El aerogenerador Kuriant, Fig VI.11a, tenía las siguientes características técnicas:

- *Tres palas fijas de plástico armado con fibra de vidrio.*
- *Diámetro: 10,90 m.*

- Velocidad de rotación: 68 r.p.m.

- Potencia nominal: 15 kW con una velocidad del viento de 9 m/seg.

- Velocidad específica:  $TSR = 4,2$ .

- Relación de multiplicación:  $k = 15$ .

- Dos generadores asíncronos, uno de 4 kW para vientos débiles y otro de 15 kW, a 1000 r.p.m. y velocidades del viento hasta 25 m/seg.

Los dos aerogeneradores están acoplados por poleas y correas.

- Altura del soporte: 12 m ó 18 m, según el lugar.

En caso de una excesiva velocidad de rotación, los alerones situados al final de las palas frenaban el rotor. La instalación estaba protegida también contra las vibraciones anormales y la sobrecarga. La máquina estaba orientada al viento por un motor eléctrico.

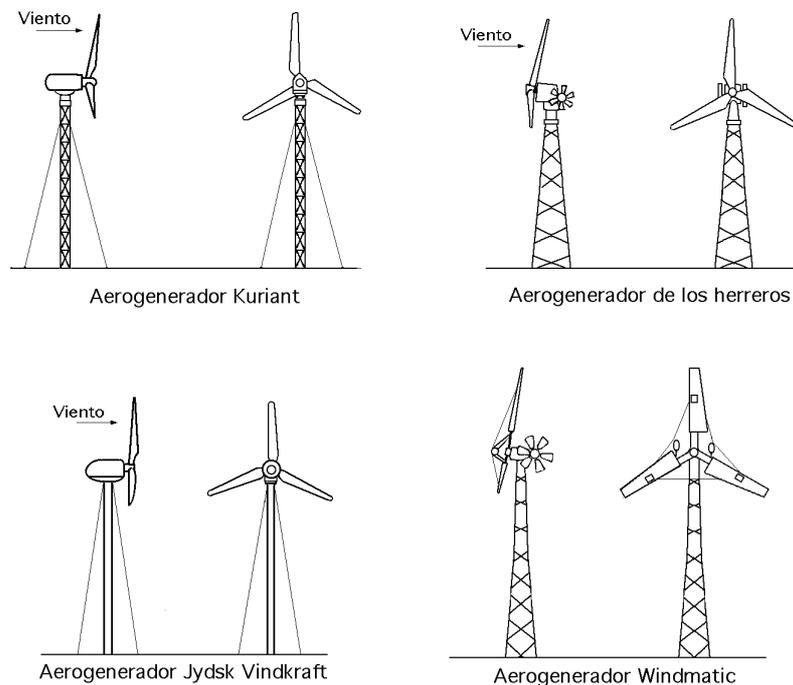


Fig VI.11.- Algunos aerogeneradores daneses

**Aerogenerador Holger Danske.-** El aerogenerador Holger Danske, era un tripala de palas de plástico armado de fibra de vidrio y tenía un diámetro de 11 m; los alerones colocados en el extremo exterior de las palas podían girar 60°; cuando el aerogenerador sobrepasaba en un 5% la velocidad nominal de rotación, actuaban frenando la máquina y volvían de nuevo a su posición cuando la velocidad caía al 30% de su valor nominal.

**Aerogenerador Herborg.-** El aerogenerador Herborg semejante al anterior, estaba equipado con dos generadores asíncronos de 30 y 5 kW.

**Aerogenerador Sonebjerg.-** Los aerogeneradores Sonebjerg, tripala, utilizaban rotores de diámetros que variaban entre 10 y 14 m, acoplados a generadores asíncronos de 22 a 55 kW; las palas eran de madera y estaban cubiertas de plástico armado.

**Aerogenerador Jydk.-** El aerogenerador Jydk arrastra un generador asíncrono de 15 kW, Fig VI.11c; el rotor de paso variable tiene un diámetro de 8,4 m.

**Aerogenerador Windmatic.-** La compañía Windmatic fabricó máquinas de diámetro 10, 12 y 14 m y potencias que variaban entre 10 y 55 kW. Las palas de las máquinas Windmatic eran fijas y arriostradas y estaban equipadas con frenos aerodinámicos colocados sobre las palas, Fig VI.11d. Las características del aerogenerador Windmatic de 22 kW eran las siguientes:

- Tres palas fijas de plástico armado.
- Diámetro: 10 m.
- Velocidad de rotación: 68 r.p.m.
- Potencia: 10 kW con viento de 8 m/seg, y 22 kW con viento de 12 m/seg.
- Velocidad específica:  $TSR = 4,4$ .
- Velocidad del viento = 20 m/seg.
- Relación de multiplicación.:  $k = 14,83$ .
- Generador de 22 kW a 1000 r.p.m.
- Soporte de acero
- El aerogenerador está orientado por dos rotores auxiliares colocados a cada lado de la barquilla.

**Aerogenerador Erini.**- El aerogenerador Erini era semejante al precedente, excepto en que sus palas estaban soldadas.

**Aerogenerador Poulsen.**- El aerogenerador Poulsen era muy particular; el eje de rotación estaba inclinado  $30^\circ$  respecto al plano horizontal. El rotor, de palas fijas, arrastraba dos generadores eléctricos asíncronos: uno de 5 kW, 6 polos, a 60 r.p.m. con viento débil, y otro de 30 kW, 4 polos, a 120 r.p.m. con viento moderado y fuerte.

**Aerogenerador Dansk Vindkraft.**- El aerogenerador Dansk Vindkraft estaba conectado a un generador de 15 kW; el paso de las palas era variable.

En 1988 se puso en marcha en la localidad de Tjaereborg, en la costa oeste de Jutlandia, el aerogenerador ELSAN 2.000 de 2 MW de potencia nominal, con un rotor de 3 palas, 60 m de diámetro, y control por cambio de paso. Otra experiencia interesante realizada en Dinamarca fue un aerogenerador de 1 MW, diseñado con el objetivo concreto de reducir costes, y que entró en funcionamiento en 1992. Su rotor de 50 m de diámetro puede funcionar tanto con paso fijo como variable.

En la actualidad, los daneses construyen modelos comerciales de gran potencia, como una máquina eólica con un rotor tripala de 28 metros de diámetro con palas de perfiles NACA de la serie 44-XX y velocidad nominal de 13 m/seg. Una de las variantes de esta máquina consiste en una multipala coaxial con la que se pone en funcionamiento y genera energía para velocidades de viento menores. Otras características son: *Posición de la torre a sotavento, palas de acero y fibra de vidrio, potencia 650 kW, altura de la torre 45 metros, velocidad de conexión 6 m/seg, velocidad nominal 13 m/seg, velocidad de desconexión 25 m/seg, y un alternador por inducción, (asíncrono).*

A comienzos de 1985, Dinamarca tenía instaladas 1.400 aeroturbinas con una potencia total de 50 MW que suministran 28 millones de kWh. En 1984 se exportaron aeroturbinas cuya suma de potencias fue de 100 MW y por un valor de 100 millones de dólares; en California existen instaladas una gran cantidad de máquinas eólicas danesas.

## VI.5.- ALEMANIA

En la década de los años veinte, el ingeniero alemán Kumme diseña una de las primeras turbinas que utilizaba palas con perfil aerodinámico. El aerogenerador Kumme llevaba un rotor de cinco palas que transmitía la fuerza motriz a un generador situado en la base de la torre, mediante un sistema de engranajes y ejes. La máquina se orientaba con la ayuda de dos rotores auxiliares, Fig VI.12.

Años más tarde, Flettner construye un modelo basado en el efecto Magnus, que consistía en superponer dos campos de velocidades, uno producido por el viento y el otro por un cilindro con movimiento rotatorio, generando una diferencia de presiones que provocaba la aparición de fuerzas aerodinámicas. Flettner había atravesado el Atlántico en un barco impulsado por dos cilindros giratorios. La turbina Flettner tenía cuatro palas cilíndrico-cónicas, que giraban accionadas por unas pequeñas hélices

situadas en sus extremos. El efecto Magnus que aparece sobre las palas generaba su fuerza motriz. Aunque su rendimiento era más bajo que el de los sistemas convencionales, esta máquina llegó a alcanzar 30 kW de potencia con velocidades de viento de 35 km/h, Fig VI.13.

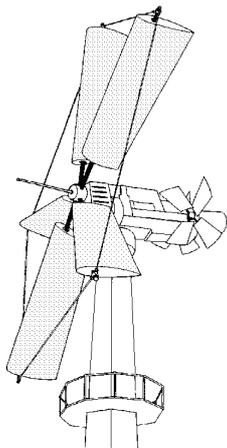


Fig VI.12.- Aerogenerador alemán Kumme

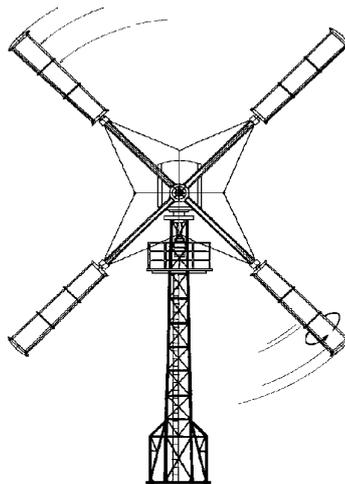


Fig VI.13.- Aerogenerador alemán de palas giratorias (Flettner)

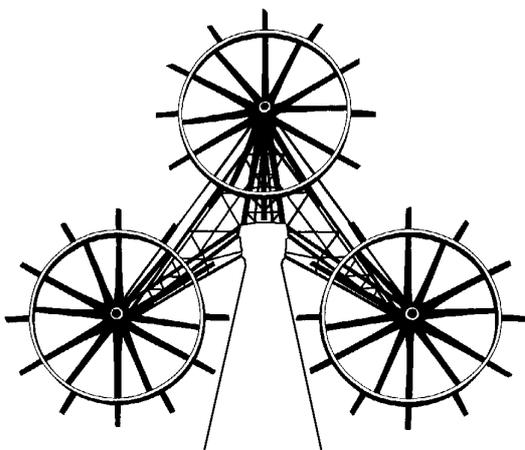
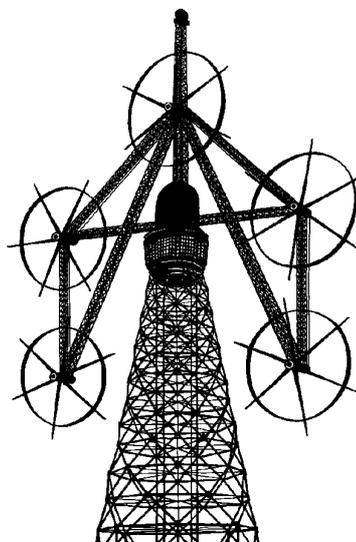


Fig VI.14.- Turbinas eólicas Honnef de 75 MW y 120 MW



El interés por las máquinas eólicas de gran potencia se incrementa en los años 30, en los que el profesor Hönnef proyecta una planta eólica, que nunca llegó a construirse, capaz de generar 75 MW. La turbina estaba formada por 3 rotores de 160 m de diámetro cada uno, dispuestos en una torre de 300 m de altura; posteriormente proyectó otra de 120 MW con 5 rotores, Fig VI.14.

Después de la guerra, el protagonista del programa eólico alemán fue el profesor Hütter, autor de numerosas obras teóricas, quien utilizó por primera vez materiales plásticos en la fabricación de las palas, consiguiendo con ello reducir su precio de forma apreciable; bajo su dirección, la compañía Allaier fabricó y comercializó un modelo tripala de 8 kW regulado por paso variable mediante un sistema mecánico de contrapesos que actuaban por efecto de la fuerza centrífuga. La aeroturbina de mayor potencia diseñada por Hütter alcanzó 100 kW con vientos de 30 km/hora. El rotor de 33 m de diámetro, estaba fabricado con resina “epoxi” y refuerzo de fibra de vidrio. La planta funcionó en perfectas condiciones durante diez años, siendo desmantelada en 1968, Fig VI.15. También se realizaron grandes esfuerzos en la construcción de un aerogenerador de 3 MW, con un rotor de 100 m de diáme-

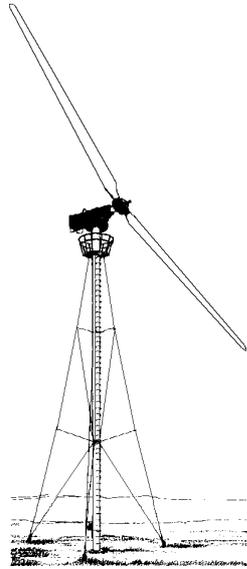


Fig VI.15.- Aerogenerador de Hütter de 100 kW, con palas de plástico

tro, diseñado por la Messerschmitt Bolkow Blohm, MBB, que empezó a funcionar en 1983 en la costa del Mar del Norte. El proyecto fracasó debido a la aparición de grietas en el buje durante las primeras horas de funcionamiento, provocando un replanteamiento en los criterios de diseño de futuros desarrollos.

Los nuevos modelos dieron lugar a una serie de turbinas de 1 MW, la primera de las cuales, el modelo WKA-60 de 1,2 MW, está funcionando en la isla de Helgoland y constituye junto con los modelos desarrollados por Dinamarca, Holanda y España, una de las experiencias más interesantes de las realizadas en grandes aerogeneradores. Algunos de los aerogeneradores de baja potencia experimentados en la isla de Pellworm, donde se encuentra el centro alemán de energía eólica, fueron:

- El aerogenerador Brümer de tres palas de aluminio, era de paso variable. El rotor que giraba detrás del soporte es autoorientable.

- El aerogenerador Aeroman tenía un rotor de plástico armado, de paso variable. El rotor que giraba detrás del soporte estaba orientado por un rotor auxiliar.

- El aerogenerador Böwe tenía una sola pala de plástico armado y de paso variable. Cuando la velocidad de rotación era excesiva, una cuña axial colocaba la pala paralela a la dirección del viento.

- El aerogenerador Hüllman tenía un rotor de tres palas, de plástico armado y de paso variable como los precedentes. Estas máquinas arrastraban alternadores de potencia superior a 10 kW conectados a la red de frecuencia 50 Hz.

Un prototipo de aerogenerador muy interesante fue el Noah de hélices coaxiales que giraban en sentido contrario, y así se suprimía el multiplicador de velocidad. Construido por W. Schoenball, consistía en una aeroturbina de 12 m de diámetro con dos hélices de 5 palas coaxiales que giran en sentido contrario. Una de las hélices arrastraba el rotor del generador y la otra el estator. Como las velocidades de rotación del rotor y del estator se suman, no era necesario un multiplicador de velocidad. La velocidad de rotación de cada rotor se mantenía constante e igual a 71 rev/min gracias a un dispositivo eléctrico. Una hélice auxiliar orientaba las hélices principales cara al viento. Si el viento superaba los 20 m/seg, un dispositivo especial aislaba los rotores principales del efecto del viento.

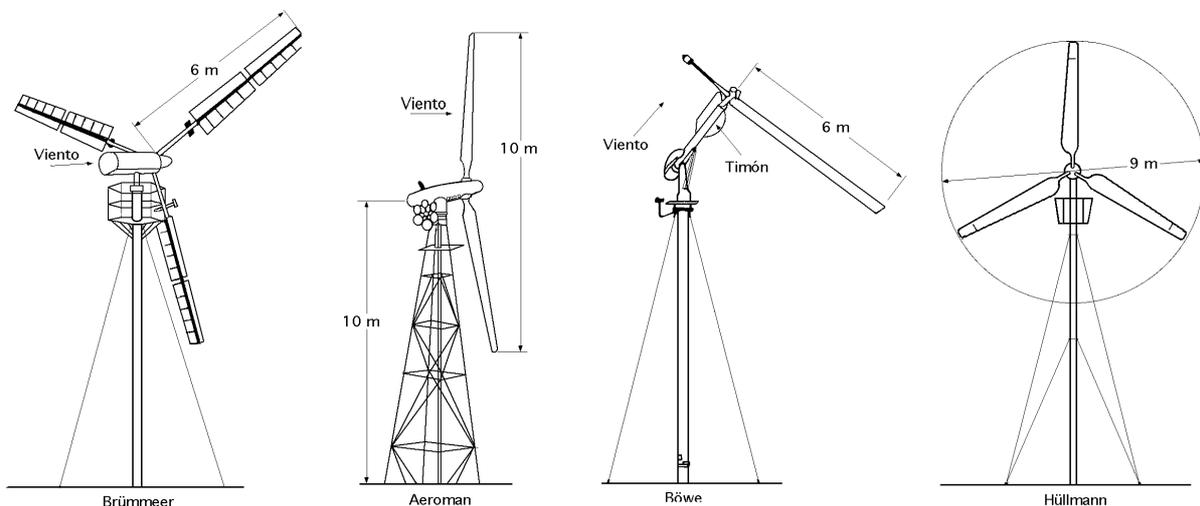


Fig VI.16.- Aeroturbinas alemanas

El prototipo construido en la isla de Sylt, Alemania, suministraba una potencia de 70 kW.

La ventaja del dispositivo residía en la supresión del multiplicador de velocidad, que se veía contrarrestada por una mayor complejidad, lo que constituía un problema para la máquina.

A estos proyectos se sumaron otras dos turbinas monopalas de tipo experimental, el modelo MON-400 de 400 kW y el MON-650 de 650 kW. Estos aerogeneradores entraron en funcionamiento en 1982 y 1989 e incorporaron importantes innovaciones en el diseño de palas, realizadas con los nuevos materiales en fibra de carbono.

Un nuevo proyecto de aerogenerador de 3 MW, el AEWS II, entró en funcionamiento en 1993.

Tabla VI.2.- Características geométricas y mecánicas de las diferentes máquinas

Modelo	Brümer	Aeroman	Böwe	Hüllman
Diámetro m	12	11	12	9
Palas	3	2	1	3
Potencia kW	10	11	10	10
Velocidad nominal m/seg	8	8	8 flecha</td <td>9</td>	9
n, r.p.m.	40	100	115	100
TSR	3,14	7,2	9	5,9
Relación de multiplicación k	37,5	15	13	15
Altura del soporte m	9	10	11	12

**Aerogeneradores Growian de 265 kW y 3 MW.-** En la actualidad, el Growian I, situado cerca de la desembocadura del Elba, Fig VI.17a, es una aeroturbina con un rotor bipala de 100,4 metros de diámetro, situado a sotavento de una torre de 100 metros de altura. Lleva un perfil de la serie FX-77-W y un alternador asíncrono con una potencia prevista de 3 MW para una velocidad nominal de 11,8 m/seg.

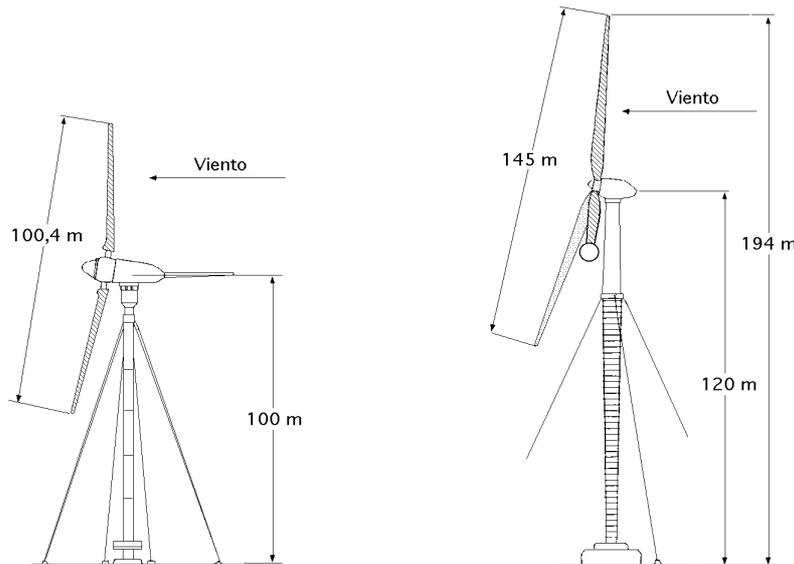


Fig VI.17.- Aerogeneradores Growian de 265 kW y 3 MW

Las características técnicas del Growian I eran:

- Hélice bipala de 100,4 m de diámetro, construida de acero
- Palas de paso variable sobre toda la longitud; su anchura: varía de 4,25 m en el cubo hasta 1,30 m en el extremo.
- Perfiles: FX-77-W. Cubo articulado.
- Velocidad de rotación: 18,5 rev/min  $\pm$  15 %.- Velocidad específica: TSR = 8.
- Potencia: 3 MW.
- Velocidad nominal del viento: 11,8 m/seg.- Velocidad mínima de generación: 6,3 m/seg.
- Velocidad del viento máxima en servicio: 24 m/seg.

- El rotor está calculado para resistir un viento de 60 m/seg (220 km/hora).
- Generador asíncrono: 1500 rev/min  $\pm$  15 %; 6,3 k.
- Relación de multiplicación:  $k = 81$ .
- Torre cilíndrica de 100 m de altura, constituida por cilindros soldados de acero de 3,50 m de diámetro, mantenida verticalmente con tirantes.
- Peso de la góndola y del rotor: 310 Tm.
- Producción estimada: 12 GWh.

El modelo Growian II, Fig VI.17b, está previsto con un rotor de una sola pala (con contrapeso) y un diámetro de 145 metros. La potencia de esta máquina será de 5 MW, con una velocidad nominal del viento de 11 m/seg y una altura de torre de 120 m. Dentro del campo de las grandes máquinas est-UVO en estudio el proyecto EOLO con un nuevo aerogenerador de 3 MW.

## VI.6.- FRANCIA

A principios de los años veinte, el ingeniero Andreau-Enfield diseña un original modelo de aerogenerador de 8 kW. El rotor estaba formado por dos palas huecas en su interior y agujereadas en los extremos. El giro de las palas bajo el impulso del viento y por acción de la fuerza centrífuga, generaba una corriente de aire que se transmitía a través de las palas y de la torre, moviendo una turbina situada en su base.

Por esta misma época, Darrieux desarrolla su turbina de eje vertical que, aunque en su momento no despertó demasiado interés, posteriormente ha sido objeto de numerosos estudios, convirtiéndose en una de las opciones de interés dentro del campo de los modernos aerogeneradores. La mayor ventaja de este tipo de turbinas era que las palas se apoyaban en los dos extremos, por lo que estructuralmente resultaban mucho más sólidas que las hélices convencionales.

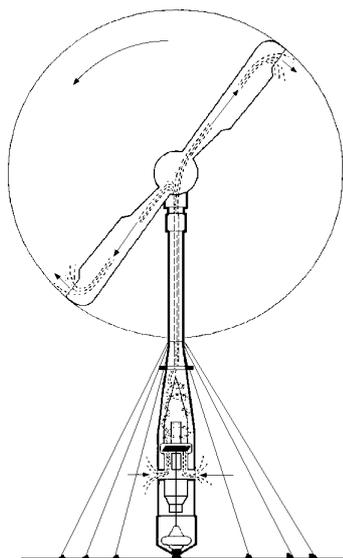


Fig VI.18.- Aerogenerador Andreu-Enfield

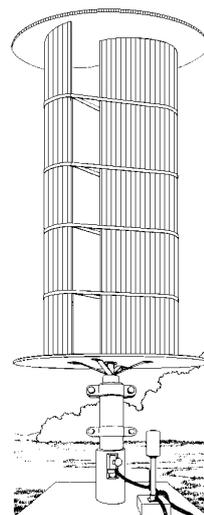


Fig VI.19.- Aerogenerador Savonius

En cambio tenían el inconveniente de funcionar a impulsos intermitentes puesto que en cada período rotacional las palas estaban sometidas a empuje aerodinámico, sólo cuando atravesaban por determinadas posiciones. Por otra parte resultaban difíciles de regular, por lo que el control de velocidad debía realizarse desde los elementos mecánicos (frenos, alternadores...), produciendo inevitables desgastes en los mismos.

Darrieux diseñó también tres turbinas experimentales de tipo convencional por encargo de la

Compagnie Electromécanique, que se construyeron entre 1929 y 1931 y se instalaron en Le Bourget, cerca de París. Estas turbinas tenían unos rotores provistos de unas palas con curvatura, fabricadas mediante la yuxtaposición de dos alas, con el fin de soportar mejor las tensiones estructurales.

En el año 1947 se elaboró en Francia un amplio programa eólico, que se desarrolló durante la década de los cincuenta, y en el que se realizaron gran cantidad de mediciones de viento, no sólo encaminadas a la elaboración de un mapa eólico, sino también para determinar el comportamiento de las capas bajas de la atmósfera debido a las interferencias del terreno.

**Aerogenerador Andreau Enfield.-** Este aerogenerador fue construido en 1950 por la sociedad británica Enfield para la British Electricity Authority. La máquina fue instalada primero en St-Alban (Inglaterra), pero al ser un lugar muy boscoso, la circulación del viento se perturbaba mucho, por lo que la experiencia no fue aprovechable. La máquina fue utilizada de nuevo en 1957 por Electricity y Gaz d'Algerie para ser experimentada en Grand Vent (Argelia).

El aerogenerador era de un tipo particular, ya que al ser las palas huecas, al girar, la fuerza centrífuga expulsaba el aire por su extremo y la depresión que se originaba se utilizaba para accionar una turbina colocada en la base de la torre del aerogenerador.

Las características técnicas del aerogenerador Andreau Enfield eran:

- Potencia nominal de 100 kW para velocidades del viento comprendidas entre 13,5 y 29 m/seg.
- Velocidad del viento nominal: 13,5 m/seg
- Hélice bipala de paso variable colocada en la parte posterior de la torre.
- Gasto másico de aspiración: 1.655 m<sup>3</sup>/min.
- Alternador de 100 kW, 415 VI.
- Altura de la torre 30 m.
- Orientación por servomotor accionado por una veleta.

Como el rendimiento global de la instalación es el producto de las máquinas componentes (hélice bipala, soplante centrífuga, turbina de aire, y alternador), su rendimiento era bajo, 22%, viniendo influenciado ésto también por la entrada de aire en las juntas giratorias. Las palas tenían un rendimiento del 73%, pese a que sus perfiles eran defectuosos; una conclusión fue que hubiese sido preferible evitar las palas articuladas.

**Aerogenerador Best Romani de Noi-le-Régent de 800 kW.-** La Compañía de Electricidad de Francia, EDF, encargó a la Best-Romani la construcción del mayor aerogenerador del momento, Fig VI.20, que según los diseñadores era capaz de generar 800 kW con velocidades de viento de 60 km/h, que empezó a funcionar en abril de 1958 hasta el mes de abril de 1962, generando durante este periodo 221 000 kWh.

Sus características técnicas eran las siguientes:

- Rotor de 30,2 m de diámetro situado a sotavento, que facilitaba su orientación por efecto de conicidad.
- Potencia nominal 800 kW, para un viento de 16,7 m/seg.
- Velocidad de rotación de la hélice 47,3 rev/min.
- Generador: alternador con 6 poleas a 1 000 rev/min.
- Arranque, para una velocidad del viento de 7 m/seg.
- Altura del poste: 32 m sobre el suelo.
- Masa total (salvo la infraestructura): 160 toneladas.
- Unión entre hélice y alternador por dos multiplicadores de rueda planetaria de relación 7,5/1 y 3/1.

La hélice tripala, de palas fijas, estaba preparada para funcionar con un viento de 25 m/seg pero podía resistir ráfagas de 35 m/seg y soportar, parada, velocidades de 65 m/seg (250 km/h).

Las palas, de forma trapezoidal, estaban recubiertas con una chapa de aleación ligera (aluminio-

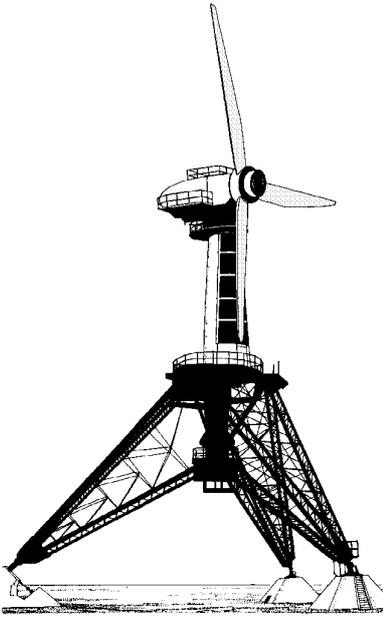


Fig VI.20.- Aerogenerador de 800 kW de Best-Romaní

cinc) remachada, que mantenía un buen equilibrio entre la resistencia mecánica, la resistencia a la corrosión, el peso y el precio. Su perfil era el de un ala de avión clásica NACA 230-15.

El aerogenerador iba colocado en el extremo de un mástil fijado en el centro de una plataforma sostenida por un trípode gigante.

Para la puesta en marcha, un embrague permitía desconectar la hélice del alternador, que arrancaba con motor asíncrono. En marcha normal, el alternador acoplado a la red por medio de dos transformadores, mantenía constante la velocidad de rotación.

Cuando la velocidad del viento era excesiva, para evitar la desconexión con el alternador, un dispositivo automático separaba éste de la red y se alimentaba una resistencia constituida por una línea de 60 m de longitud. El freno eléctrico así constituido y un freno mecánico con disco de 1,80 m de diámetro paraba la máquina en menos de dos vueltas de hélice.

El ruido era tan pequeño que se podía sostener una conversación a un nivel normal, bajo la plataforma, a 50 cm de las palas en

rotación.

El sistema de orientación era muy simple; la máquina se orientaba por sí misma sin ningún dispositivo en particular, estando la hélice en rotación cuando la velocidad del viento alcanzaba 3 m/seg.

Ese gran aerogenerador sirvió durante cinco años como banco de pruebas experimental. Durante una tempestad produjo 10.000 kWh en doce horas con una potencia de 1.025 kW. En régimen óptimo, el rendimiento de la hélice alcanzaba el 85% del límite de Betz. En uno de los ensayos, el 30 de agosto de 1960, la potencia pasó, en 2,85 segundos, de 300 kW a 900 kW.

Con el fin de eliminar un tren de engranajes y reducir el coste de las palas, en 1963 se diseña otra hélice que giraría a 71 rev/min (velocidad periférica 112 m/seg), que era demasiado rápida, por lo que la velocidad periférica se fija en 100 m/seg, valor que no se debía superar.

Como consecuencia de la rotura de la pala, la máquina fue desmontada y ya no se volvió a montar debido a los bajos precios del petróleo existentes en aquellos momentos.

**Aerogenerador Neyrpic de 132 kW de St. Rémy des Landes (Manche, Francia).**- En 1962 entró en funcionamiento el primer aerogenerador Neyrpic, proyectado por Louis Vadot, Fig VI.21, de 132 kW con velocidad nominal de 45 km/h, que se instaló en St. Remy-des Landes; la planta estuvo en operación durante cuatro años, hasta marzo de 1966; durante este periodo su producción alcanzó los 700.000 kWh. El aerogenerador se orientaba con ayuda de rotores auxiliares, cuyas pruebas de autoorientación dieron resultados positivos. Sus características técnicas eran:

- Diámetro: 21,2 m.
- Potencia nominal: 132 kW.
- Velocidad nominal del viento: 12,5 m/seg
- Velocidad de rotación: 56 rev/min.
- Potencia máxima: 150 kW para un viento de 10 a 13,5 m/seg.
- Rendimiento máximo: 0,5 a 0,6 para un viento de 10 a 13 m/seg.
- Hélice tripala de paso variable, de aluminio soldado, y estructura metálica con revestimiento plástico.
- Doble tren multiplicador.
- Generatriz eléctrica asíncrona a 1530 rev/min.

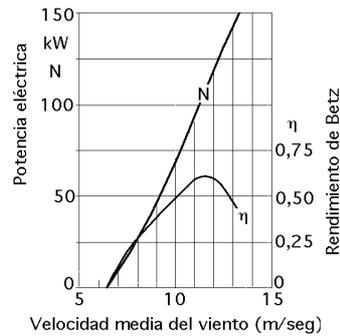
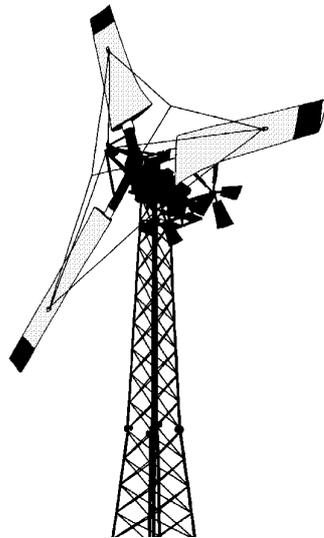


Fig VI.21.- Aerogenerador Neyrpic de 132 kW de St. Remy-des Landes y curva de variación de la potencia y del rendimiento con relación al límite de Betz

**Aerogenerador Neyrpic de 800 kW de St. Rémy des Landes (Manche, Francia).**- El segundo aerogenerador Neyrpic, diseñado por Louis Vadot, Fig VI.22, empezó a funcionar en 1.963; el rotor, fabricado en plástico reforzado, era un tripala regulable de 35 m de diámetro, con paso variable.

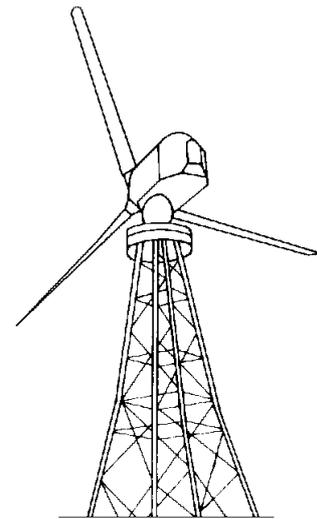
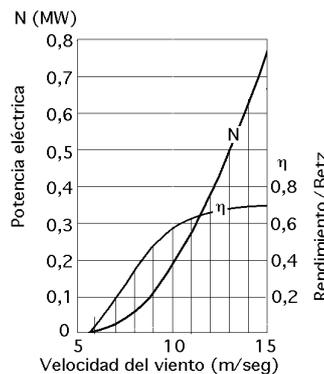
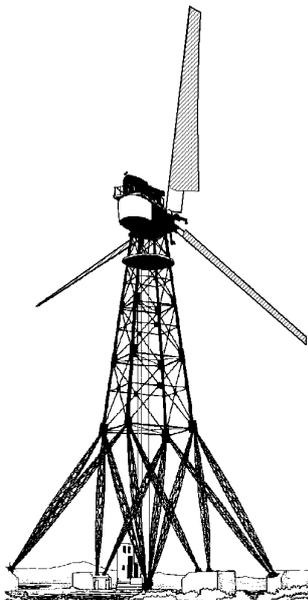


Fig VI.22.- Aerogenerador Neyrpic de 0,8 MW

La planta, instalada en St. Remy des Landes, tuvo un funcionamiento muy satisfactorio durante un año, pero hubo de pararse al cabo de 2.000 horas de funcionamiento a causa de una avería producida en el multiplicador de velocidad. A pesar del dinero empleado y el poco tiempo de funcionamiento, no se reparó nunca debido también a los bajos precios del petróleo. Fue desmontado en junio de 1966. Sus características técnicas eran:

- Diámetro: 35 m.- Masa total : 96 toneladas.- Altura de la torre: 61 m.
- Potencia nominal: 1 MW para un viento de 17 m/seg (60 km/hora).
- Rendimiento máximo: 0,6 ÷ 0,7 para un viento de 13 a 15 m/seg.
- Parada por alerones para una velocidad del viento inferior a 6 m/seg.
- Hélice tripala de plástico, autoorientabl y palas de paso variable.

- Calaje fijo hasta 650 kW, y variable en adelante.
- Generatriz eléctrica asíncrona: 1.015 rev/min, 3.000 VI.

**Aerogeneradores Aerowatt .-** En los años cincuenta se comercializaron una serie de aerogeneradores de baja potencia y dentro de ellos los *Aerowatt*, Fig VI.23, con potencias comprendidas entre 25 W y 4 kW, que dieron muy buen resultado. Estos aerogeneradores utilizaban al máximo los vientos de débil velocidad, lo que reducía la capacidad de los acumuladores a instalar para la regulación.

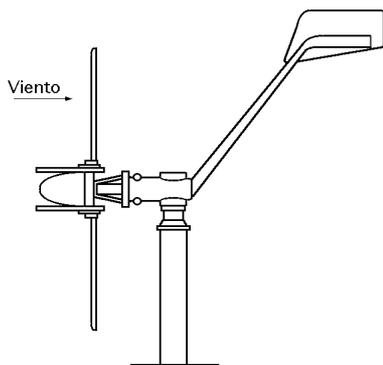


Fig VI.23.- Generador Aerowatt

Las hélices, bipalas de paso variable, estaban accionadas por un regulador centrífugo que actuaba por la acción de dos masas centrífugas, y utilizaban veletas para su orientación.

Las palas eran de perfil constante, estrechas y de gran diámetro, construidas con una aleación de aluminio y calculadas para resistir velocidades del viento entre 56 y 90 m/seg. Los alternadores utilizados eran del tipo de imán permanente.

Sólo las unidades más potentes llevaban multiplicadores de velocidad de planetarios. Las pequeñas unidades eran de acoplamiento directo. La constructora clasificó sus máquinas en las gamas FP-5 y

FP-7 según que sus velocidades nominales fuesen de 5 ó 7 m/seg, o en las gamas 24-FP a 4000-FP, en función de la potencia.

Tabla VI.3.- Características técnicas del aerogenerador Aerowatt

Modelo Aerowatt	24 FP	150 FP	200 FP	300 FP	1100 FP
Diámetro, m	1	2	3,2	3,2	5
Potencia, W	24	140	200	350	1125
Velocidad del viento m/seg	7	7	5	7	7
n, r.p.m.	1200	525	380	420	178

Existen diversos modelos de estas máquinas, con diámetros de 1 m a 9 m; las máquinas más pequeñas generan energía eléctrica en forma de corriente continua, y las de mayor potencia en forma de corriente alterna.

En Francia, existen varios faros equipados con aerogeneradores Aerowatt, como el faro de Sept Iles cerca de Perros Guirec (Bretaña) cuya generatriz compound de corriente continua 110 V, puede desarrollar 5 kW a 300 rev/min, estando sometida a vientos que sobrepasan a veces los 40 m/seg, presentando una estanqueidad perfecta. Se ha acoplado a hélices tripala de 4 m y 5,70 m de diámetro, de paso fijo, suministrando anualmente una media de 7.000 kW, y posteriormente se la dotó de una hélice de paso variable de 9,20 m de diámetro, generando una media anual de 20.000 kW.

**Aerogeneradores Enag.-** La sociedad Enag de Quimper puso a punto aerogeneradores de hélice de aleación de aluminio inoxidable, ligeros, de paso variable y enteramente automáticos. Las hélices iban montadas directamente en el árbol de la generatriz sin interposición de engranajes multiplicadores. Las dinamos utilizadas, tipo de excitación shunt, alimentaban unos acumuladores de plomo con placas espesas con una capacidad mínima de baterías de 250 a 350 A.h.

Tabla VI.4.- Características técnicas del aerogenerador Enag

Modelo	Rotor bipala	Rotor tripala	Rotor tripala
Diámetro	2,35 m	2,55 m	4,40 m
Potencia	650 W	1 000 W	3 000 W
Velocidad nominal	9 m/seg	9 m/seg	9 m/seg
Velocidad de conjunción	4 m/seg	4 m/seg	4 m/seg

**Aerogenerador "Aeroturbine".-** La hélice era de una aleación de aluminio extrusionado, y tenía tres palas de anchura constante (perfil NACA 64-225 de doble curvatura: intradós y extradós). Un multiplicador de velocidad de relación 14,3/1 unía el eje de la hélice con el alternador.

El prototipo fue instalado en Plevenon cerca del cabo Frehel (Bretaña, Francia).

Sus características eran las siguientes:

- *Diámetro: 8 m.- Hélice autoorientable situada detrás del soporte, de paso variable.*
- *Potencia nominal: 10 kW, con un viento de 10 m/seg.*
- *Velocidad nominal de rotación de la hélice: 105 rev/min.*
- *Alternador Unelec Alsthom sin anillos ni escobillas de 10 kW, que gira a 1.500 rev/min.*
- *Tensión: 220/380 VI.*
- *Altura de la torre: 15 m.*

Un elevador hidráulico telescópico colocado al pie del mástil permitía inclinarlo hasta el suelo para la verificación y mantenimiento de la instalación.

Después de las experiencias de Noi Le Régent, la EDF proyectó la construcción de un multitor con dos hélices de 32 m de diámetro, con una potencia de 1 MW. La planta debería haberse instalado en Porspoder (Finisterre), pero el proyecto no se consideró rentable, y no se llegó a construir. Todavía se llegaron a proyectar turbinas de mayor potencia; una con dos rotores y una potencia de 4 MW, y otra de cuatro rotores de 10 MW.

## VI.7.- HOLANDA

En Holanda se abordó en 1986 el proyecto NEWECS-45 de 1 MW y 45 m de diámetro, que se encuentra operativo desde 1990. Otras turbinas de 500 y 700 kW se encuentran en fase de desarrollo y otro modelo de 1 MW entró en funcionamiento en 1993.

## VI.8.- GRAN BRETAÑA

Aunque Inglaterra se unió un poco más tarde al desarrollo de este tipo de tecnología, contaba desde 1.920 con la British Electrical & Allied Industries Research Association, creada por E.W. Golding con el fin de promover el aprovechamiento de los recursos eólicos.

Después de la Segunda Guerra, se inició un programa de medición de vientos, con más de 100 estaciones a lo largo de todo el país, con la intención de elaborar un mapa eólico que permitiera evaluar los recursos potenciales.

En el año 1950, la North Scotland Hydroelectric Board encargó a la compañía John Brown el diseño y construcción de un aerogenerador de 100 kW, hélice tripala y paso de pala variable. Las palas estaban aguzadas y no eran alabeadas; la velocidad de diseño era de 56 km/h; suministró energía eléctrica en las islas Orkney (Costa Hill), Fig VI.24. La turbina se instaló acoplada a un generador Diesel y a lo largo de cinco años funcionó durante cortos períodos, cerrándose después definitivamente debido a problemas operacionales.



Fig VI.24.- Aerogenerador de 100 kW en las islas Orkney(North Scotland Hydroelectric Board)

Enfield Cable Company la construcción de otro aerogenerador de 100 kW, que se diseñó siguiendo el modelo desarrollado por el francés Andreu-Enfield en los años veinte y se instaló en St. Albans. La experiencia no resultó muy positiva y el sistema Andreu-Enfield mostró una eficacia inferior a la de los sistemas eólicos convencionales, ya que giraba lentamente; accionaba directamente un generador eléctrico trifásico.

Por otra parte, al inconveniente de tener que mover la totalidad de la máquina, incluyendo la torre de 26 m de altura, para orientar el rotor en la dirección del viento, había que añadir la debilidad estructural de las palas huecas.

Tampoco el emplazamiento en el que se instaló la planta fue muy acertado, debido al comportamiento irregular de los vientos; la instalación se cerró por problemas de vibraciones en las palas, vendiéndose posteriormente a la Compañía de Electricidad de Argelia en 1957.

Otras turbinas eólicas de baja potencia fueron las siguientes:

**Aerogenerador de Dowsett.-** Este aparato llevaba una hélice tripala de paso variable y arrastraba un generador asincrono de 25 kW; estaba orientada por dos rotores auxiliares.

**Aerogenerador de Smith (Isla de Man).-** La hélice de aluminio extrusionado estaba conformada por tres palas fijas de anchura constante. La potencia del generador eléctrico alcanzaba 100 kW, y estaba orientada por un rotor auxiliar.

Un proyecto que no llegó a construirse fue el realizado por la sociedad Folland Aircraft Ltd., por encargo del Ministerio de Energía. La planta, que se tenía que haber instalado en Costa Hill, en las islas Orkney, tenía una hélice alabeada de 68,5 m de diámetro, perfil NACA 0015, de paso variable; estaba accionada por un alerón, y arrastraba por medio de multiplicadores de engranajes una generatriz asíncrona prevista para proporcionar 3,5 MW a una velocidad del viento de 15,5 m/seg. La máquina se apoyaba sobre un trípode de 41 m de altura, construido con tres patas de estructura metálica, dos de las cuales se desplazaban sobre un carril de forma circular, en cuyo centro geométrico se apoyaba la tercera y sobre la que pivotaba toda la turbina.

El aerogenerador se orientaba por una eólica auxiliar accionando un motor que arrastraba los *bog-gies* colocados bajo el pie del trípode.

Tabla VI.5.- Características técnicas de algunos aerogeneradores ingleses

Aerogenerador	Enfield	Dowsett	Smith	J. Brown
Palas	2	3	3	15
Diámetro m	10	128	15,2	100
Potencia kW	10	25	100	15,2
Velocidad nominal m/seg	8,3	11	18,5	130
n r.p.m.	103	65	75	
Altura del soporte m	12	10	10,5	12

Un segundo proyecto de construcción de un aerogenerador gigante se estudió en 1978 por una agrupación de sociedades británicas bajo la dirección de D.F.Warne, de la Electrical Research Association.

Las características de la instalación prevista eran las siguientes:

- Aerogenerador bipala de 60 m de diámetro colocado en la parte superior del poste para evitar los efectos de interferencias.
- Palas de paso fijo de acero.
- Perfiles utilizados: NACA 4412 en el extremo de las palas; NACA 4414 en el centro de las palas; NACA 4421 cerca del cubo.
- Las palas estaban curvadas hacia las extremidades para compensar los momentos flectores por la acción de la fuerza centrífuga.
- Un freno aerodinámico formado por alerones colocados sobre el borde de salida en la extremidad de las palas: éste sistema estaba

reforzado por otro freno, mecánico, que inmovilizaba la hélice si era necesario.

- Potencia nominal: 3,7 MW.

- Velocidad nominal del viento: 22 m/seg.- Velocidad del viento máxima tolerable para el funcionamiento de la máquina: 27 m/seg.

- Velocidad de rotación constante: 34 rev/min.

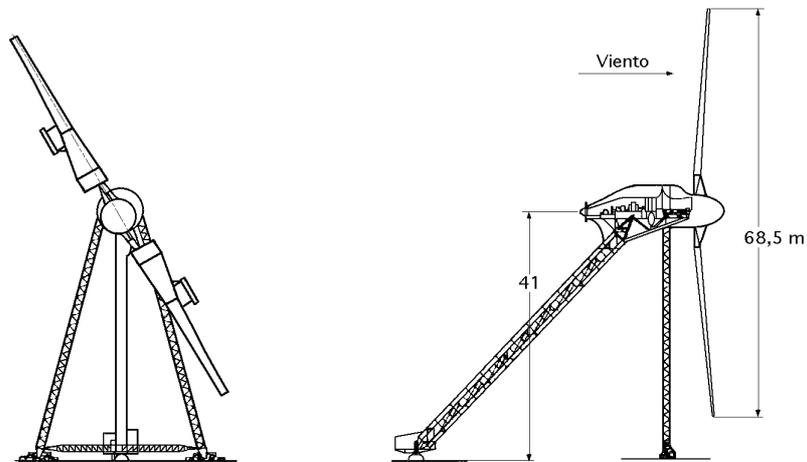


Fig VI.25.- Primer aerogenerador de 3,5 MW en las islas Orkney (No se construyó)

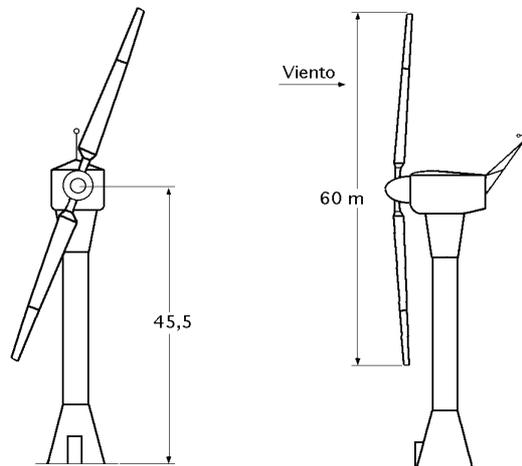


Fig VI.26.- Segundo aerogenerador de 3,7 MW en las islas Orkney

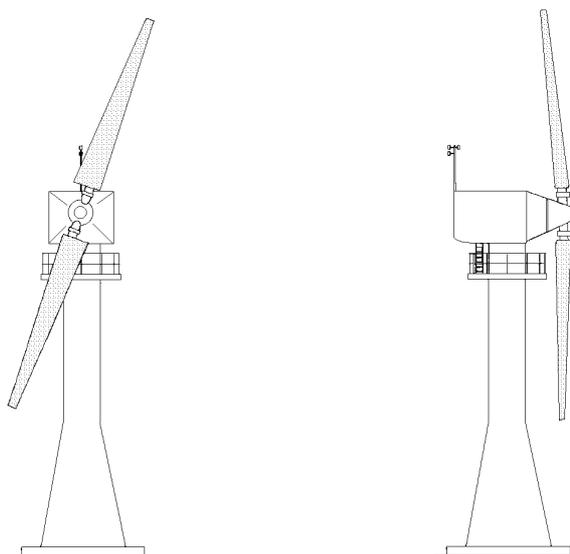


Fig VI.27.- Aeroturbina de 3 MW desarrollada por la North Scotland Hydroelectric

Cuando se alcanzaba esta velocidad entraba en funcionamiento el freno aerodinámico, el generador se desconectaba de la red y el servomotor de orientación colocaba el eje de la máquina perpendicularmente al viento. Utilizaba un generador asíncrono trifásico de 8 polos girando a 750 rev/min con una frecuencia de la red de 50 Hz y una tensión entre fases de 3,3 kV. Cuando la intensidad del viento era débil, del orden de 7 m/seg, el arranque se aceleraba merced a la acción del par proporcionado por el generador que funcionaba en estas circunstancias como motor asíncrono. Cuando la intensidad del viento era suficiente, la máquina podía arrancar sola.

La unión del eje de la aeroturbina con el del generador se hacía mediante un multiplicador de engranajes helicoidales coaxial de relación de multiplicación 35/1. La altura de la torre alcanzaba los 45 m, y consistía en un cilindro de acero de 3,5 m de diámetro y 2,5 cm de espesor.

La máquina, que aprovechaba vientos de velocidad comprendida entre 7 y 27 m/seg, fue instalada en la costa Noroeste de Escocia en las islas Orkney.

Gran Bretaña también trabajó sobre un amplio plan de desarrollo eólico desde mediados de la década de los setenta. Dentro de este programa, las autoridades energéticas encargaron a la North Scotland Hydroelectric Board la construcción de dos turbinas, una de 250 kW y otra de 3 MW, Fig VI.27, que entraron en funcionamiento en 1982 y 1984.

Se eligió para su emplazamiento las islas Orkney (Escocia), debido a sus ventajosas características para el aprovechamiento eólico: vientos fuertes y constantes, limitado consumo de energía, sistemas de generación de electricidad a base de motores Diesel, centros de consumo dispersos, etc.

## VI.9.- ITALIA

Las aportaciones de Italia en el campo de las grandes máquinas eólicas se concretan en el aerogenerador GAMMA-60 que entró en funcionamiento en 1992; tiene un rotor de dos palas, de 60 m de diámetro, y adopta como soluciones de diseño la velocidad variable, el paso fijo, y el control de potencia por desalineación del rotor. Se encuentra actualmente en desarrollo otra turbina, el modelo M-55, con una sola pala y 800 kW de potencia.

## VI.10.- SUECIA

En 1975 Suecia elaboró un plan de desarrollo eólico de diez años de duración, con el objetivo de poner en marcha dos aerogeneradores de gran potencia.

Tabla VI.6.- Características técnicas de los aerogeneradores suecos de Marglap y Gotland

Aerogenerador	de Marglap	de Gotland
Rotor	bipala con paso variable	bipala con paso variable
Posición	en aval de la torre	delante de la torre
Diámetro, m	78	75
Potencia, MW	3	2,5
Velocidad de rotación r.p.m.	25	25
Velocidad nominal, m/seg	13	13
Velocidad mínima, m/seg	3	6
Velocidad máxima, m/seg	21	21
Generador	alternador	G. asíncrono
Cubo	articulado	rígido
Torre	acero	hormigón
Altura, m	80	80
Constructor	Karlskronavarvet	Karlstads Mekaniska Werkstad

El primero, de 2 MW y 75 m de diámetro, diseñado por la compañía sueca Karlstads Mekaniska Werkstad y la alemana ERRO, fue instalado en Nasudden, en la costa oeste de la Isla de Gotland, dentro del Báltico en 1983 y estuvo funcionando hasta 1991.

El segundo, de 3 MW y 78 m de diámetro, fue una colaboración entre la Karlskronavaret y la americana Hamilton Standard, y se instaló en las inmediaciones de Marglap, cerca de Trelleborg, al sur de Suecia.

A finales de 1991 esta planta había funcionado durante 21.000 horas produciendo 30.000 MWh, siendo la turbina eólica que más energía había generado hasta ese momento.

Los dos rotores bipalas están contruidos en acero y plástico armado de fibra de vidrio.

Estas instalaciones fueron experimentales; el objetivo de las experiencias fue el definir el mejor modelo para la continuación del programa energético.

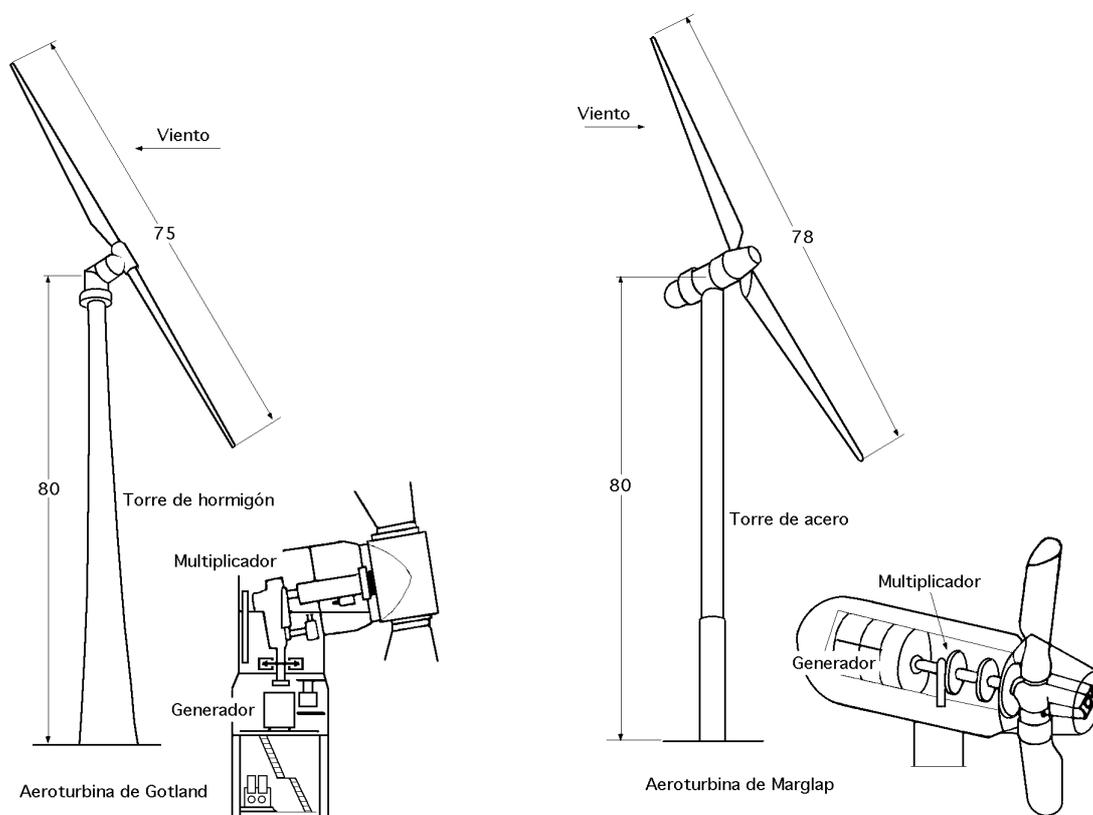


Fig VI.28.- Aeroturbinas suecas

## VI.11.- ESPAÑA

En España, en el año 1979, el entonces Centro de Estudios de la Energía promovió una serie de estudios encaminados a la construcción de una planta experimental de 100 kW. El proyecto se inició con un preestudio de los recursos eólicos, que se realizó en el Instituto de Técnica Aeroespacial con datos del Instituto Nacional de Meteorología y de la extinguida Comisión de Energías Especiales, que en los años sesenta realizó cierto número de mediciones eólicas encaminadas a la localización de posibles emplazamientos de plantas aerogeneradoras.

El Plan de Energías Renovables analizó los recursos eólicos propios, racionalizó los existentes e identificó algunas zonas de elevado potencial eólico, completando el mapa eólico nacional. A finales de la década de los setenta y principios de los ochenta varias pequeñas empresas iniciaron el diseño e instalación de aerogeneradores. Como consecuencia de estos trabajos previos, se decidió construir una

planta experimental en Punta de Tarifa (Cádiz) que constituyó la primera experiencia española en el campo de los modernos aerogeneradores. La instalación entró en funcionamiento en 1982, completando su programa de ensayos hasta el año 1990 en que fue desmantelada

En 1985 se inició un programa conjunto hispano-alemán para el diseño y fabricación de aerogeneradores en el rango de 1 MW. El AWEC-60 de 1,2 MW y 60 m de diámetro, entró en funcionamiento en Cabo Villano (La Coruña) en 1989. Este aerogenerador introducía ciertas innovaciones en las máquinas de gran potencia, tales como un sistema eléctrico que permitía el funcionamiento de la turbina con una variación en la velocidad de giro del 10%, y la puesta a punto de un nuevo proceso de fabricación de palas, Fig VI.29.

El Programa Energético UNESA-INI, PEUI, se creó en 1982, e inició su actividad con un prototipo de aeroturbina tripala de baja potencia, de las siguientes características:

*Material de construcción de las palas: fibra de vidrio*

*Diámetro del rotor: 10 m. Velocidades nominales de rotación: 55 y 75 r.p.m.*

*Potencia nominal: 5,5 kW y 22 kW*

*Palas en posición fija: limitación de la potencia por entrada en pérdida de las palas.*

*Orientación de la góndola: mediante dos rotores auxiliares en la cola de la góndola.*

*Situación del rotor: barlovento; Freno hidráulico; Torre reticular de 12 m de altura.*

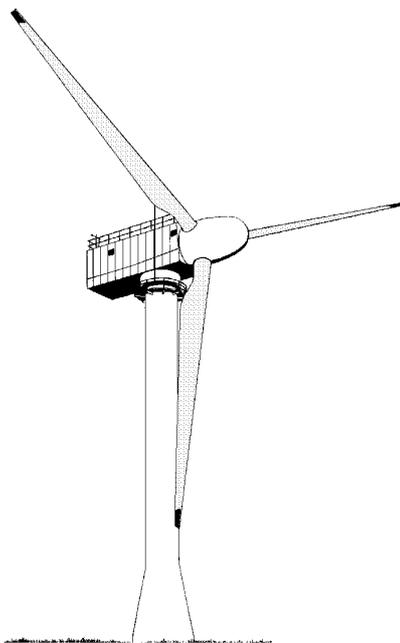


Fig VI.29.- Aerogenerador AWEC de 1 MW  
(Cabo Villano)

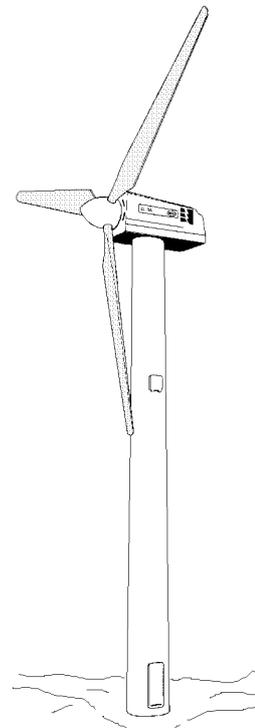


Fig VI.30.- Aerogenerador de 350 kW (Endesa-Made)

En base a este prototipo, en el año 1984 fueron construidos cinco aerogeneradores de 24 kW que se instalaron en el parque eólico del Ampurdán, Gerona, que generaban 50.000 kW anuales por unidad; actualmente este parque histórico está fuera de servicio. La experiencia adquirida en el funcionamiento de los aerogeneradores de 24 kW en este parque condujo al desarrollo de un nuevo prototipo cuyas diferencias e innovaciones más notables fueron:

*Potencia nominal: 30 kW a 12 m/seg de velocidad del viento.*

*Orientación de la góndola: Mediante veleta y motorreductor.*

*Torre tubular de 12 m de altura.*

*Simplificación de los mecanismos instalados en la góndola.*

**Parque eólico de La Muela (Zaragoza).- Reseña histórica.-** Este parque eólico instaló en 1987, 12 aerogeneradores de 30 kW de potencia, conectados a la red general mediante una estación transformadora. Posteriormente se instalaron en este parque eólico otros prototipos de 75 kW y 110 kW, donde operan junto a los 12 aerogeneradores de 30 kW, siendo sus características:

*Diámetro del rotor: 15,5 m el de 75 kW de potencia, y 18 m el de 110 kW.*

*Potencia nominal: 75 y 110 kW a 14 m/seg de velocidad del viento.*

*Palas en posición fija: limitación de la potencia generada por entrada en pérdida de las palas*

*Orientación de la góndola: Mediante veleta y motorreductor.*

*Torre tubular: Altura 18 m, 75 kW ; 21 m , 110 kW*

El viento predominante, el conocido cierzo del valle del Ebro, es de dirección NO y su velocidad media anual de 6,8 m/seg con una producción media de 800 MW anuales.

En la actualidad está considerado como la primera instalación eólica a nivel mundial.

**Parque eólico de Granadilla (Tenerife).- Reseña histórica.-** Este parque eólico, conectado a la red eléctrica de las islas Canarias, está ubicado en el Polígono Industrial de Granadilla; fue realizado en el año 1986 e inicialmente constaba de cuatro aerogeneradores de 30 kW. En 1991 se desarrolla el proyecto de un prototipo de 300 kW, de eje horizontal, rotor tripala situado a barlovento y paso fijo, diseñado para conexión directa a la red eléctrica general, que se instala en 1992.

Las características principales de este aerogenerador MADE AE26 son:

*Potencia nominal: 300 kW*

*Velocidad de viento nominal: 15 m/seg.- Velocidad de viento de arranque: 5 m/seg.- Velocidad de viento de desconexión: 24 m/seg*

*Número de palas: 3.- Diámetro del rotor: 26 m*

*Velocidad de rotación: 43 rpm*

*Orientación: barlovento*

*Generador eléctrico: asíncrono*

*Sistema de control de potencia: pérdida aerodinámica*

*Tipo de torre: troncocónica de acero.- Altura de torre: 27,3 m*

*Pesos: Pala, 840 kg; Rotor (incluido buje), 4.500 kg; Góndola (equipada), 9.500 kg; Torre, 13.700 kg;*

El parque es uno de los puntos de mayor potencial eólico de la geografía española, en donde los vientos dominantes del NE tienen una velocidad media de 7 m/seg.

**Parque eólico de Estaca de Bares (La Coruña).- Reseña histórica.-** Este parque, situado en el municipio de Mañón junto al faro del cabo de Estaca de Bares, cuenta con 12 aerogeneradores de 30 kW, dispuestos paralelamente a la costa y perpendicularmente a las dos direcciones del viento predominante NO y SE, con una velocidad media anual de 7,8 m/seg y una producción media anual de 10<sup>6</sup> kW. La potencia unitaria de las máquinas se ha incrementado a 37,5 kW, implantándose un control a distancia desde la propia central.

El parque incluye asimismo una estación anemométrica de registro automático, que recoge la velocidad y dirección del viento. Actualmente está previsto su desmontaje.

**Parque eólico del Cabo Creus (Gerona).- Reseña histórica.-** Este parque consta de 4 aerogeneradores de 110 kW y 2 de 75 kW, con una potencia instalada total de 590 kW; entró en funcionamiento en el primer semestre de 1989.

**Parque eólico de Monte Ahumada (Cádiz).- Reseña histórica.-** Mediante diversos estudios meteorológicos que se realizaron en Andalucía, se llegó a la conclusión que la zona más apropiada desde el punto de vista eólico era la provincia de Cádiz, especialmente en el área del estrecho de Gibraltar. Los vientos dominantes son de Levante y Poniente, con unas velocidades medias de 12,1 y 6,7 m/seg, respectivamente. En 1985 se inicia el proyecto del parque eólico de Monte Ahumada, situado en el término

municipal de Tarifa, con 7 aerogeneradores a 470 metros de altura sobre el flanco Norte del estrecho de Gibraltar. Sobre la base del diseño y experimentación de estos aparatos, en 1988 se desarrolla un aerogenerador de potencia media de 150 kW con tecnología y fabricación española, que fue exhibido en la exposición España, 200 años de tecnología, instalada en el Parque del Retiro de Madrid en noviembre de 1988 con motivo del bicentenario de la muerte del Rey Carlos III, y otro de 300 kW.

La potencia total del conjunto se aproxima a los 2 MW; con la experiencia obtenida en estos años se han acometido otros dos proyectos en esta zona de Tarifa, como son la Planta Eólica del Sur y la sociedad Energía Eólica del Estrecho.

*La Planta Eólica del Sur PESUR* ubicada en Tarifa, tiene una potencia total de 20,5 MW y está formada por 34 aerogeneradores de 180 kW y 154 de 100 kW, instalados en siete alineaciones. Las obras se iniciaron en junio de 1991 y la puesta en marcha tuvo lugar el 12 de enero de 1993.

*La Planta Eólica del Estrecho*, ubicada en la Sierra de Enmedio, Tarifa, tiene una potencia de 10 MW. Estos dos parques se unieron en una empresa con 30,5 MW de potencia y un coste superior a los 3.000 millones de pesetas.

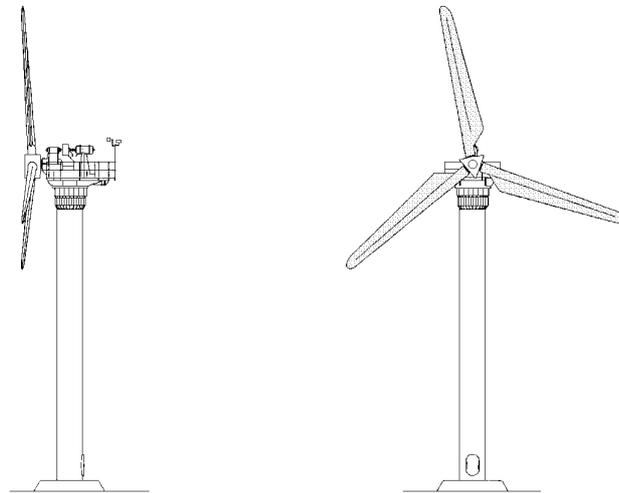


Fig VI.31.- Aeroturbina de 100 kW (Tarifa)

Las perspectivas de la energía eólica en el sur de España no pueden ser mejores; se calcula que la potencia eólica total disponible en esta zona, podría permitir instalar equipos eólicos que podrían alcanzar los 250 MW funcionando del orden de 2.000 a 2.500 horas anuales.

**Parque Eólico Cabo Villano.- Reseña histórica.-** Está situado en el Municipio de Camariñas (A Coruña), en línea de costa, próximo al faro que da nombre al parque. Consta de 20 aerogeneradores *AE20* de 180 kW, que totaliza 3,6 MW de potencia.

**Aerogenerador AE20.-** Este aerogenerador de eje horizontal, tiene un rotor tripala situado a barlovento y paso fijo, diseñado especialmente para conexión directa a la red eléctrica general. Sus características principales son:

*Potencia nominal: 180 kW*

*Velocidad de viento nominal: 14 m/seg*

*Velocidad de viento de arranque: 4 m/seg*

*Velocidad de viento de desconexión: 28 m/seg*

*Número de palas: 3; Diámetro del rotor: 23 m; Velocidad de rotación: 46 rpm*

*Sentido de rotación: sentido horario; Orientación: barlovento*

*Generador eléctrico: asíncrono*

*Sistema de control de potencia: pérdida aerodinámica*

Tipo de torre: troncocónica de acero; Altura de torre: 29 m (al eje del rotor)

Pesos: Pala: 840 kg; Rotor (incluido buje): 4.500 kg; Góndola (equipada): 9.500 kg; Torre: 13.700 kg

Este parque fue puesto en marcha a principios de 1992 y está conectado con la red de Eléctrica de Xallas, filial de Unión Fenosa. Existe también un aerogenerador de 1,2 MW, con el que en la actualidad se están dotando la mayoría de los parques de nueva generación.

### **CONDICIONES DE VENTA DE LA ENERGÍA A LA RED**

La Ley 54/97 del Sector Eléctrico y la Normativa que la desarrolla, establecen la obligación de la red eléctrica de comprar toda la energía generada en los parques eólicos a un precio, establecido anualmente, que en 1999 fue de 11,02 pta/kW y en 2000 de 10,42 pta/kW. Esta bajada del 5,5% sumada a una inflación del 2,5% ha supuesto una bajada del 8,0%. En el futuro es de preveer seguirá esta tendencia a bajar.

De igual modo que en el resto de las energías renovables, y con objeto de facilitar el desarrollo eólico, estos precios están primados sobre los costos medios de generación del sector eléctrico, que se pueden estimar entre 5 y 6 pta/kW. La justificación de estas primas es conseguir el objetivo de la Unión Europea de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y limitar los efectos sobre el cambio climático. Como la energía eólica tiene el inconveniente de que es una energía eventual, ya que se produce cuando hay viento, no sirve para cerrar centrales térmicas, sino para que éstas funcionen menos horas. En un planteamiento estrictamente económico los kW eólicos, al no tener garantía, deberían tener un precio marginal; sin embargo están primados porque ha prevalecido el criterio ambiental.

Esta situación de primar las energías renovables es probable que se mantenga, y aunque el sistema de primas puede cambiar, se acabará por aproximar los costos reales de las diferentes fuentes de energía. La obligación de la red de admitir todos los kW que se generan en los parques eólicos se posible se mantenga, siempre que la potencia total generada entre las centrales nucleares, hidráulicas, térmicas, cogeneración, y las renovables sea inferior a la demanda en horas valle. Cuando esta demanda se supere, habrá algún tipo de limitación, pudiendo ocurrir que en esas horas se limite la entrada en la red de la energía eólica, por lo que habrá que estudiar soluciones que den garantía a una energía eventual. Las máquinas que se han instalado en España son de 660, 750, 800, 1.000, 1250 y 1.500 kW. En algunos países se empiezan a instalar modelos de 1,7 a 2 MW y están en desarrollo máquinas de 3 y 5 MW.

La disponibilidad de las máquinas, es decir, las horas de funcionamiento supera el 99%, por lo que apenas tienen averías. El aumento continuado de la potencia y la fabricación en grandes series de los equipos hacen que esté bajando el precio unitario. Actualmente el costo total de los parques eólicos está en 140.000 ptas/kW y se prevé que baje a unas 120.000 ptas/kW e incluso a menos. La bajada del costo y la fiabilidad de las máquinas ha abarato los costos de generación. A ello se ha unido, en los últimos años, la bajada de los tipos de interés, que, en instalaciones de gran inversión y reducidos gastos de mantenimiento, son su principal carga.

Tabla VI.7.- Costo del kW generado según costo de inversión y horas de funcionamiento

Horas de funcionamiento	Precio del kW generado según costo de inversión		
	140000	120000	100000
3500	5,93	5,29	4,68
3000	6,63	5,93	5,19
2500	7,7	6,81	5,93
2000	9,25	8,14	7,03
1500	11,83	10,35	8,88

En la Tabla VI.7 se indica el costo del kW generado en diversas hipótesis de costo de inversión y de horas de funcionamiento, que dan una idea de la producción total anual funcionando las máquinas a plena potencia, y suponen, por tanto, un índice de la producción. El cálculo se ha realizado con un tipo de interés del 5,5%, una financiación con el 20% de capital propio, 15 años de vida útil de las máquinas y amortización, e incluyendo 1,50 ptas/kW como gasto de mantenimiento. A las cantidades indicadas en el cuadro habría que añadir los gastos de promoción, licencias, impuestos y canon de ocupación de terrenos.

Los costos de generación calculados resultan extraordinariamente bajos; en los casos de altas velocidades de viento, resultan inferiores a los valores medios de generación del sector eléctrico.

Se observa que los costos, en parques de más 2.000 horas de funcionamiento, son inferiores al precio actual de compra por la red; esta situación es la causa del desarrollo tan rápido del sector.

Tabla VI.8.- Potencia instalada en España en los últimos años

1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
7,3	45,7	51,7	75,4	115,3	211	455,1	833,7	1400	2150

En la Tabla VI.8 se indica la potencia instalada en los últimos años en España. Si se mantiene el ritmo de crecimiento del sector en tres o cuatro años se podrían alcanzar los 9.000 MW previstos en el Plan de Fomento de las Energías Renovables, que, además, sería el límite de potencia en el que empiece a haber problemas para la incorporación de la energía a la red.

El precio actual de venta de energía a la red está motivando que se construyan parques con no muchas horas de funcionamiento y nada bien estudiados, y eso va a implicar que cuando llegue la saturación del sector ya no se puedan hacer otros de mayor rentabilidad, es decir que una prima elevada está provocando un desarrollo inadecuado, lo que ha provocado que en este sector aparezcan especuladores, sin intención de construir, sino de vender derechos, se abonen cánones excesivos a propietarios de terrenos, se hayan construido parques sin datos suficientes de viento (con algunos ejemplos muy significativos), se hagan parques con un porcentaje muy bajo de capital propio, confiando en que se mantengan los bajos tipos de interés, etc.

La limitación de entrada a la red, unida a la continuada bajada de precios, dará lugar a que algunos proyectos muy ajustados y con un porcentaje muy bajo de capital propio resulten menos rentables de lo que sus promotores hubieran estimado.

Este rápido desarrollo ha motivado la construcción de más fábricas de equipos que las que serían razonables, y que habrá que cerrar cuando se sature el mercado nacional, salvo que se vaya preparando la venta de aerogeneradores en el extranjero.

### **ACTUALIZACION AL AÑO 2000**

Un informe elaborado por la Asociación Americana de Energía Eólica (AWEA), señala a España como el segundo país en el ranking mundial de nuevas instalaciones eólicas en el año 2000, con 775 MW detrás de Alemania. Según este informe, en el citado año se instalaron en todo el mundo unos 3.500 MW, potencia suficiente para abastecer de electricidad a 3,5 millones de personas. Aunque la expansión de la energía eólica se ha ralentizado respecto a 1999, cuando se instalaron 3.900 MW en todo el mundo, la AWEA afirma que el futuro de esta energía renovable es bueno, ya que se espera que en el presente año se añadan 5.000 MW de potencia a los más de 17.000 que existen en la actualidad. Este descenso, según la AWEA, se ha debido a la espectacular caída del mercado en USA, donde sólo se instalaron 53 MW en comparación con los 732 MW de 1999. En el lado contrario de la balanza

se encuentra Europa, donde la energía eólica ha crecido tanto que la Asociación Europea de la Energía Eólica (EWEA) ha incrementado su objetivo para el 2010 de 40.000 MW instalados a 60.000 MW.

Durante el año 2000, los países europeos añadieron 3.200 MW a su capacidad eólica. Más de la mitad de esta cantidad, 1.668 MW se instalaron en Alemania, que era el líder mundial en generación eólica con 6.113 MW. El segundo país era USA con 2.554 MW, seguido de cerca por España que ya había alcanzado la cifra global de 2.235 MW. Les seguían Dinamarca 2.300 MW, India 1.167 MW, Holanda 446 MW, Italia 427 MW, Gran Bretaña 406 MW, China 265 MW y Suecia 231 MW.

Tabla VI.9.- Energía eólica instalada en Europa hasta 2002, (20.447 MW)

País	Instalado al final del año 2000 MW	Instalado al final del año 2001 MW	Instalado al final del año 2002 MW
Alemania	6113	8754	10650
España	2235	3337	4079
Dinamarca	2300	2417	2515
Italia	427	697	755
Holanda	446	493	563
Reino Unido	406	474	530
Suecia	231	290	304
Grecia	189	272	276
Portugal	100	125	171
Francia	66	78	131
Irlanda	118	125	125
Austria	77	94	100
Finlandia	10	39	39
Bélgica	13	31	31
Luxemburgo	10	15	15
Noruega	13	17	97
Polonia	5	22	29
Turquía	19	19	19
República Checa	12	12	12
Suiza	3	7	5
Rumanía	1	1	1
	12822	17319	20447

**Países en vías de desarrollo.-** El informe señala que Asia y América Latina continúan teniendo unos mercados de energía eólica muy débiles debido, principalmente, a que los gobiernos de estos países no tienen voluntad de promover los proyectos de energías renovables y prefieren acudir a las agencias de crédito que proporcionan financiación para proyectos basados en combustibles fósiles. Por ejemplo, en el caso de Honduras, el Banco Mundial aportará 75 millones de dólares para la construcción de un parque eólico de 60 MW en el cerro de Huía, al sur de la capital hondureña con un potencial de 450 MW. Si se consiguiera instalar la infraestructura, el viento aportaría el 70% de lo que Honduras requiere diariamente.

Por su parte, el Servicio Global Medioambiental (GEF), perteneciente al Banco Mundial, ha asegurado que los países en vías de desarrollo necesitarán más de 5 millones de MW en los próximos 40 años. Este crecimiento de la demanda ofrece, según el GEF, una gran oportunidad para la implantación de energía de fuentes renovables. Las inversiones en los países en vías de desarrollo podrían superar los 90 billones de pesetas al año. El informe hace referencia a los datos de la Agencia Internacional de la Energía que ha afirmado que las reservas de combustibles fósiles comenzarán a disminuir debido a que el crecimiento de la población y el desarrollo económico incrementarán la demanda.

**Inversiones en el Reino Unido.-** El Reino Unido es uno de los países de Europa con mayor potencial en

sus costas para triplicar sus necesidades energéticas. El Departamento de Comercio e Industria de este país está considerando inversiones de más de un billón y medio de pesetas para parques eólicos de plataformas marinas, al tiempo que agilizar el proceso para fomentar la instalación de esta fuente renovable de energía. El potencial de este tipo de energía ha llevado a la aparición de una nueva compañía, Offshore Wind Power, fruto de la unión entre la líder británica en este tipo de energías renovable, Renewable Energy Systems (RES), y la nuclear British Energy, cuyo objetivo es la creación de la segunda central eólica del país, con 30 turbinas que generarían 90 MW de potencia.

*Algunos proyectos en España.-* En nuestro país, diversas empresas han propuesto la construcción de diversos parques eólicos destacando el marino de 200 MW en Cabo Trafalgar, Cádiz. En una primera fase, que servirá de experiencia piloto, se planea instalar 20 MW con 10 aerogeneradores, y en una segunda fase se instalarían los 180 MW restantes con aeroturbinas de 2 MW. Otro proyecto de 150 MW dividido en 4 parques eólicos a instalar en la provincia de Albacete, está incluido en el Plan Estratégico eólico de más de 600 MW aprobado en abril de 2000.

## **BIBLIOGRAFIA**

R. Comolet.- MECANIQUE DES FLUIDES EXPERIMENTALE  
Masson & Cie 1969.- 120 Boulevard Saint-Germain, París,VI.

M. Sedille.- TURBO-MACHINES HYDRAULIQUES ET THERMIQUES  
Masson & Cie 1967.- 120 Boulevard Saint-Germain, París,VI.

F. de Matha Santanna.- LES MOULINS A VENT ET L' ENERGIE DE DEMAIN  
Ecole Polytechnique de Montréal, Canada, 1975

J. Park.- THE WIND POWER BOOK (ISBN 0-917352-05-X)  
Published by Cheshire Books, 514 Bryant Street, Palo Alto, CA 94301 USA

M. Hackleman.- WIND AND WINDSPINERS  
Culver City, California: Peace Press, 1974

C. G. Justus.- WINDS AND WIND SYSTEM PERFORMANCE  
Philadelphia: Franklin Institute Press, 1978

D. Le Gourières.- ENERGIA EOLICA (ISBN 84-311-0326-4)  
Ed. Masson S.A. Barcelona (1983)

P. F. Díez .- ENERGIA EOLICA  
Art. Revista Metalurgia y Electricidad 1980

M.G . Galludo.- ENERGIA EOLICA (ISBN 84-86505-05-4)  
Ed Artes Gráficas Gala S.L. Avda República Argentina, 1 (41011) Sevilla

G.G. Piepers.- EUROPEAN WINDFARM PROJECTS (ISBN 0-08-034315-5)  
Past Chairman EWEA. Het Vierkant 2, 1852 RA HEILOO, Holanda  
International Solar Energy Society. Congress (10 th 1987, Hamburgo, Alemania)  
Editado por W.H Bloss.-Pergamon Press

Wang Cheng Xu.- THE OPERATIONAL STUDY OF A DARRIEUS WIND TURBINE GENERATOR POR  
APPLICATION DEMONSTRATION (ISBN 0-08-034315-5)  
Dpto de Ingeniería Eléctrica, Tsinghua Univ. Beijing, China.  
International Solar Energy Society. Congress (10 th 1987, Hamburgo, Alemania)  
Editado por W.H Bloss.-Pergamon Press

J. Schlaich.- SOLAR CHIMNEYS, SOLAR ELECTRICITY FROM SOLAR RADIATION  
Schlaich und Parner, Beratende Ingenieure im Bauwesen Hohenzollernstr, 1, 7000 Stuttgart 1.  
International Solar Energy Society. Congress (10 th 1987, Hamburgo, Alemania)  
Editado por W.H Bloss.-Pergamon Press

DESARROLLO TECNOLOGICO EN LA ENERGIA EOLICA.- Grupo ENDESA

# INDICE

## I- LAS FUENTES EÓLICAS

Antecedentes históricos	1
Circulación general	4
Tipos de vientos	7
Velocidad del viento	10
Ley exponencial de Hellmann	12
Energía útil del viento	14
Curvas de potencia	14
Representación estadística del viento	15
Distribución de Rayleigh	16
Distribución de Weibull	17

## II- FUNDAMENTOS AERODINÁMICOS DE LAS MAQUINAS EÓLICAS

Fuerzas sobre un perfil	21
Polar de un perfil	23
Fuerzas de arrastre y ascensional en perfiles fijos	23
Acción del viento sobre el perfil, potencia y rendimiento	24
Nomenclatura de perfiles	24
Fuerzas de arrastre y ascensional en perfiles móviles	26
Fuerzas de par y axial	26
Par motor	28
Rendimiento aerodinámico de las hélices	28
Potencia y par motor máximos	29
Modelo teórico de Betz	30
Rotor multipala	33
Fuerza axial de una hélice multipala	33
Cálculo de la fuerza de par y del par motor	33
Teoría turbillonaria de hélices eólicas	36
Optimización de una central eólica	38

## III- MAQUINAS EÓLICAS: CARGAS, ORIENTACIÓN Y REGULACIÓN

Clasificación	41
Máquinas eólicas de eje horizontal	42
Máquinas eólicas de eje vertical	43
Aerogeneradores de eje horizontal	43
Cargas que actúan sobre el rotor	46
Vibraciones	47
Materiales de construcción	48
Dimensionado de las palas	49
Sistemas clásicos de regulación de la velocidad de giro	56
Mecanismos de orientación	49
Tendencias actuales en el diseño de la altura de la torre y diámetro del rotor	56
Torres flexibles y torres rígidas	57
Paso variable y paso fijo	57
Velocidad variable y velocidad fija	58

## IV- PARÁMETROS DE DISEÑO

Parámetros prácticos utilizados en el diseño de máquinas eólicas	61
--	----

Relaciones prácticas entre $C_x$ y $C_y$	61
Factor de actividad	62
Rendimiento aerodinámico	63
Coefficiente de par	63
Dimensionado de un rotor eólico	64
Área frontal barrida por la pala	64
Tamaño de las palas; coeficiente de solidez	66
Resistencia aerodinámica del rotor	67
Resistencia aerodinámica de la pala	68
Momento flector de la pala	69
Momento de torsión del eje de giro	69
Diseño y cálculo simplificado de aerogeneradores eólicos rápidos de eje horizontal	69
Diámetro del rotor	69
Acoplamiento rotor eólico-generator eléctrico	70
Solidez y número de palas	70
Perfil de la pala	71
Cálculo del coeficiente ascensional máximo	72
Longitud de la cuerda, y cálculo de la relación (R/L) de la pala	72
Corrección del ángulo de incidencia	72
Cálculo del ángulo de calaje	73
Diseño y cálculo simplificado de aerogeneradores eólicos lentos de eje horizontal.- Molinos multipala	73
Descripción y posibilidades de los aerogeneradores de eje vertical	76
Aerogenerador Savonius	77
Aerogenerador Darrieux	80
Otros tipos de máquinas eólicas	83
Proyectos utópicos, Heronemus, Edgar Nazare, Aurora, Heidmann, Valioukine, Obert, Herter	87
<b>V.- PARQUES EOLICOS Y ANTECEDENTES DE LOS AEROGENERADORES AMERICANOS</b>	
El parque eólico	89
Impacto ambiental de los aerogeneradores	92
El programa americano	94
Aerogenerador Smith-Putnam de 1,25 MW	96
Aerogenerador eólico de 6,5 MW de Percy Thomas	97
Aerogenerador experimental MOD 0 de 100 kW	98
Aerogenerador MOD 1 y MOD 2	99
Aerogeneradores experimentales de 4, 6,2 y 7,5 MW	101
<b>VI.- ANTECEDENTES DE LOS AEROGENERADORES EUROPEOS</b>	
Finlandia	103
Rusia	103
Hungría	105
Dinamarca	105
Aerogenerador de Tvind	107
Aerogeneradores NIBE	108
Aerogenerador Volund	109
Aerogenerador Kurian	110
Aerogenerador Holger Danske y otros	111
Aerogenerador Dansk Vindkraft	112
Alemania	112
Aerogeneradores Growian de 265 kW y 3 MW	115
Francia	122
Aerogenerador Andreau Enfield	117
Aerogenerador Best Romani de Noi-le-Régent de 800 kW	117
Aerogeneradores Neyrpic de 132 kW y de 800 kW de St. Rémy des Landes (Manche)	118
Aerogeneradores Aerowatt	120

Aerogeneradores Aerowatt	120
Aerogeneradores Enag y Aeroturbine	120
Holanda	121
Inglaterra	121
Aerogenerador de Smith (Isla de Man)	122
Aerogenerador de 3,7 MW en las islas Orkney	122
Italia	124
Suecia	124
España	125
Parque eólico de La Muela (Zaragoza).- Reseña histórica.	127
Parque eólico de Estaca de Bares (La Coruña)	127
Parque eólico del Cabo Creus (Gerona)	127
Parque eólico de Monte Ahumada (Cádiz).- Reseña histórica	127
Parque Eólico Cabo Villano	128
Aerogenerador AE20.	128
Condiciones de venta a la red	129
Actualización al año 2000	130
BIBLIOGRAFÍA	133
INDICE	135