V.- PROTOTIPOS HISTÓRICOS DE AEROGENERADORES AMERICANOS Y EUROPEOS

pfernandezdiez.es

V.1. EL PROGRAMA AMERICANO

Las primeras realizaciones importantes llevadas a cabo en USA corresponden a Marcellus Jacobs, quien en los años veinte se dedica a estudiar la posibilidad de adaptar los antiguos molinos de bombeo como aerogeneradores. El resultado de sus trabajos fue el modelo Jacobs, de diseño completamente nuevo, al que acopló un rotor de tres palas para evitar problemas de vibraciones, que en pruebas realizadas con rotores bipala habían resultado de consideración.

Los aerogeneradores diseñados por la casa Jacobs trabajaban en el campo de la baja potencia; el modelo más corriente tenía un rotor de 5 m de diámetro, generaba 1 kW con velocidades de viento de 18 km/h, Fig V.1, y llevaba un sistema de regulación por paso variable, accionado por masas centrífugas, que demostró su fiabilidad después de afrontar tifones en el Caribe y tormentas en la Antártida.

A partir de 1928, la compañía Jacobs Wind Electric fabricó cientos de miles de aerogeneradores de 1 kW, sobre torres de 20 m de altura, que se exportaron a gran número de países. Al final de la década de los treinta, la producción disminuyó a causa de la expansión de las redes de electrificación rural, llevada a cabo durante la administración Roosevelt. La empresa siguió funcionando hasta 1957, pero el aerogenerador Jacobs fue recuperado a principios de los ochenta por la North Wind Energy.

En el período anterior a la guerra aparecieron otros aerogeneradores de pequeña potencia, Fig V.2, como el Windcharger que tenía dos palas y un sistema de regulación mediante freno aerodinámico que actuaba por acción centrífuga, y otros que se describen a continuación.

El aerogenerador Windstream 33, Fig V.3, utilizaba un dispositivo hidráulico para variar el paso del rotor y regular la potencia, estando normalmente conectado a la red; fueron estudiados para funcionar en estado de abandono.

Los aerogeneradores MP 20, Fig V.4c estaban conectados a la red y funcionaban sin vigilancia. Utilizaban el efecto de descolgamiento aerodinámico cuando la velocidad del viento era superior a la

nominal. En caso de una excesiva velocidad de rotación, los alerones de frenado situados en las extremidades de las palas giraban alrededor de sus ejes y frenaban la máquina



Fig V.1.- Aerogenerador Jacobs de 1 kW

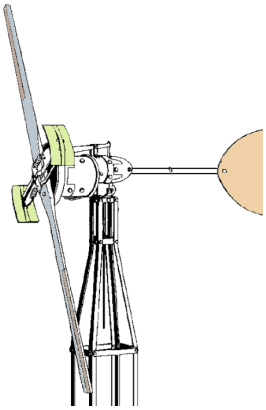


Fig V.2.- Aerogenerador Windcharger

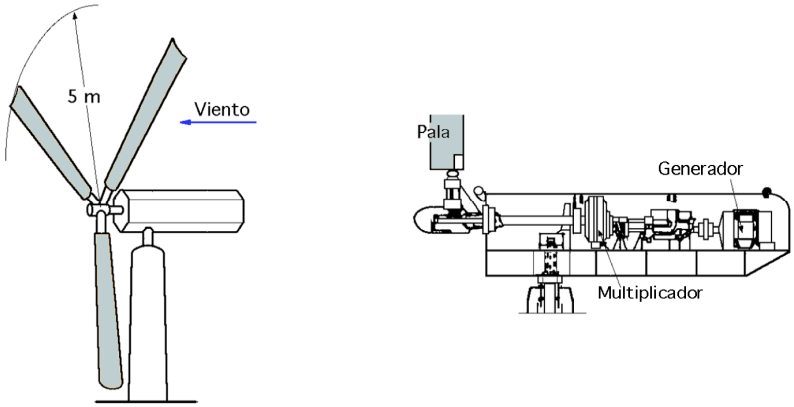


Fig V.3.- Aerogenerador Windstream 33

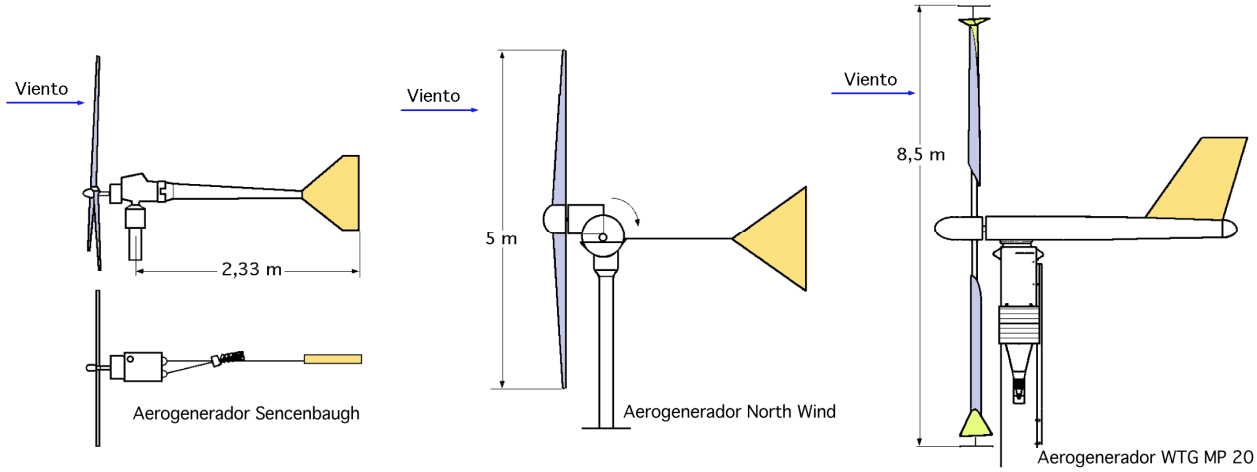


Fig V.4.- Pequeños aerogeneradores americanos

En el campo de las grandes máquinas, Fales diseñó un aerogenerador de una sola pala, que funcionaba con un contrapeso. No se llegó a construir por considerar que las masas del rotor se podrían desequilibrar en caso de funcionar en tiempo de helada, poniendo en peligro la integridad de la pala.

Aerogenerador Smith-Putnam de 1,25 MW.- Como caso un poco aislado, en el año 1941 se construye una máquina de 1,25 MW, a cargo de la Morgan Smith Company y diseñada por P.C. Putnan y J. B. Wilbur.

Tabla V.1.- Características de algunos aerogeneradores americanos de baja potencia

Marca	*Windcharger*	*Sencenbaugh*	*North wind*	*KTG*	*Grumman*
Modelo	*20 - 110*	*500-1 000*	*HR2*	*MP 20*	*Windstream 33*
Palas	*2, madera,*	*3, madera,*	*3, madera,*	*3, acero inox.*	*3, aleación de alum.*
Rotor (palas)	*Barlovento (fijas)*	*Barlovento (fijas)*	*Barlovento (fijas)*	*Barlovento (fijas)*	*Sotavento (variab.)*
Diámetro (m)	*2,30 a 3,35*	*i,80 a 3,60*	*5*	*8,5*	*10*
Potencia kW	*0,25-1*	*0,5-1*	*2,2*	*20 (m´xx 36)*	*15 (máx 20)*
Veloc. nominal (m/seg)	*8,5 a 9*	*11 a 10*	*9*	*13,5*	*10,8*
N r.p.m.	*400*	*1000 a 290*	*250*	*120*	*74,1*
Relación de multip. (k)	*1 1*	*1 3*	*1*	*15*	*25,1*
Generador	*c.c. c.c.*	*c.c. c.c.*	*c.c.*	*inducción*	*inducción*

Este aerogenerador, que se instaló en Grandpa´s Knob (Vermont), tenía un rotor de dos palas fabricadas en acero inoxidable y dispuestas a sotavento; la regulación se realizaba variando la conicidad de las palas, mediante un mecanismo que permitía variar el ángulo de conicidad reduciendo el área barrida por el viento; tal vez este sistema de regulación fue la causa de que en 1954 se rompiera una pala debido a un fallo estructural, Fig V.5**.**

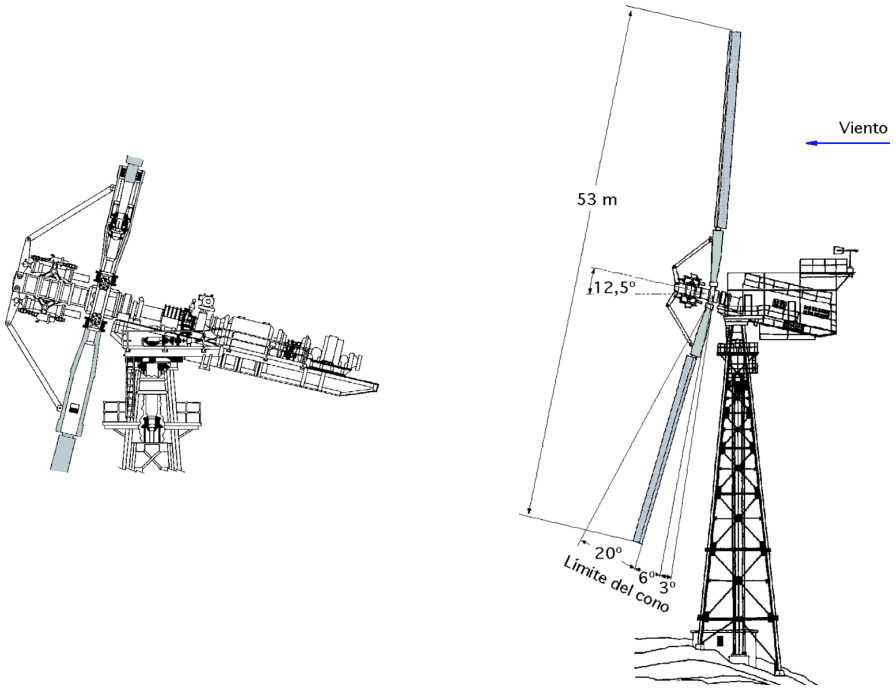


Fig V.5.- Aerogenerador Smith-Putnam de 1,25 MW (1941) Central Grandpa´s Knob (Vermont) (USA)

Las vibraciones producidas en las palas al variar casi continuamente su ángulo de conicidad, generaban tensiones dinámicas en los materiales, dando lugar a la aparición de fenómenos de fatiga, para los cuales no se había tomado ninguna precaución en el diseño.

La compañía no reparó la pala rota y abandonó el proyecto al comprobar que no resultaba competitivo el precio del kW respecto al obtenido por otras fuentes de energía. En el momento de su construcción supuso un importante avance en la construcción de las centrales eólicas.

Sus características técnicas eran las siguientes:

- Hélice bipala de acero inoxidable de paso variable.
- Palas de forma rectangular no alabeadas (planas); diámetro: 53 m.
- Longitud útil de las palas: 20 m., Anchura: 3,70 m., Perfil utilizado: NACA 4418.
- Peso de cada pala: 6,9 toneladas.

- Generador eléctrico: alternador a 800 rpm., Potencia nominal: 1,25 MW

- Velocidad nominal: 29 rpm.

- Peso total: 75 toneladas.

- Altura del poste soporte: 33 m.

- El coeficiente de potencia C_N alcanzaba un valor igual a 0,32, que se corresponde con un rendimiento energético máximo del 55% con relación al límite de Betz.

- La hélice podía resistir vientos de 62 m/seg

En caso de grandes vientos, la aeroturbina tenía la característica original de poder replegar parcialmente las dos palas, que describían entonces un cono de revolución de apertura más reducida. El alternador giraba a la velocidad de 600 rev/min igual a la velocidad sincrónica, suministrando a la red electricidad de frecuencia fija de 60 Hz.

Para evitar la desconexión de la unidad generadora durante las ráfagas de viento, la unión del aerogenerador con el alternador consistía en una transmisión eléctrica que permitía un cierto deslizamiento, por lo que la velocidad de rotación de la hélice no era en todo momento igual a la del generador. La regulación de la velocidad de rotación de la aeroturbina y la del par producido, estaban aseguradas por un regulador centrífugo que accionaba el paso de la hélice por medio de un servomotor de aceite.

Debido a la dirección de los vientos dominantes y a la inclinación de las líneas de corriente, el eje de rotación del aerogenerador formaba un ángulo de 12º con el plano horizontal.

Las posibles causas que originaron la rotura de la pala y que provocaron la inutilización de la instalación, pudieron ser debidas a:

- La complicación (inútil) de las palas con conicidad variable.

- Las interferencias originadas por el poste-soporte de perfil angular cuando la hélice pasaba frente a él, que era una fuente no despreciable de perturbaciones para la hélice.

- La constitución de las palas, construidas en chapa de acero inoxidable soldada por puntos, lo que suponía una disminución de la resistencia del acero, e implicaba una relación resistencia-peso desfavorable.

- Como el eje de giro de las palas estaba situado en su borde de ataque, el centro de presiones se desplazaba con incidencias importantes como consecuencia del tipo de perfil (NACA 4418), lo que generaba unos esfuerzos de torsión que iban acompañados de vibraciones.

- La adopción de palas de forma rectangular (no alabeadas), aumentaba también el momento flector de las mismas y los efectos de inercia.

Ninguno de los fenómenos descritos mejoraba el rendimiento de la instalación. Cualesquiera que fueren las imperfecciones que provocaron la rotura de la pala, estas no atenúan en absoluto los méritos de sus constructores que hicieron una labor pionera fabricando el primer aerogenerador de potencia superior a 1 MW.

Aerogenerador de Percy Thomas de 6,5 MW .- En ese mismo año, Percy Thomas presentó al Congreso el proyecto de un aerogenerador eólico de 6,5 MW de potencia, Fig V.6. El modelo era un multirotor, situado sobre una torre de 145 m de altura, que operaba con velocidades de viento de 45 km/h. El proyecto no fue aprobado, posiblemente por estar todavía reciente el fracaso del experimento

Smith-Putnan; el interés en las máquinas eólicas desapareció durante las décadas siguientes. En los años setenta, el Departamento de Energía puso gran interés en dirigir los trabajos de investigación y desarrollo de este sector energético. La primera fase del programa consistió en un estudio sobre la viabilidad y rentabilidad de los sistemas eólicos de producción de energía a gran escala. El estudio fue realizado paralelamente en el año 1975 por las grandes compañías de la industria aeronáutica, la Karman Aerospace Corporation, en colaboración con la Hamilton Standard y la General Electric.

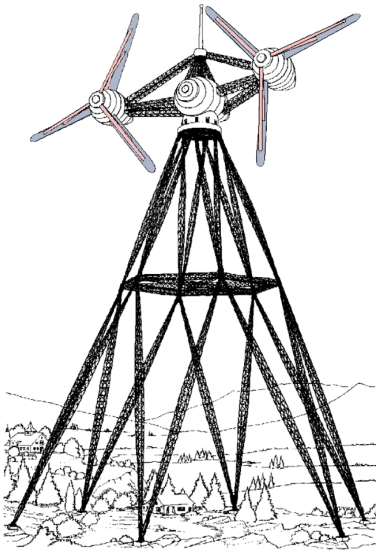


Fig V.6.- Aerogenerador eólico de 6,5 MW de Percy Thomas (1945)

Una vez obtenidas las primeras conclusiones, se realizó otro estudio más detallado sobre dos modelos de 500 kW y 1.500 kW, diseñados para operar con vientos medios de 20 y 30 km/h, respectivamente. Se evaluaron emplazamientos y áreas de recursos eólicos aprovechables, y se determinaron los parámetros de diseño más determinantes.

El paso siguiente fue la elaboración de un programa de cinco años de duración para el diseño y construcción de tres prototipos, los MOD-0, MOD-1 y MOD-2, de 100 kW, 2 MW y 2,5 MW, respectivamente, ocupándose el Centro de Investigación Lewis de la NASA en Sanduski (Ohio), de su coordinación. Los elementos más delicados, las palas, fueron construidas en aluminio, habiéndose utilizado para el diseño de los elementos estructurales procedimientos de cálculo y fabricación elaborados para rotores de helicópteros.

Las pruebas realizadas sobre la planta demostraron la validez de los modelos teóricos, ya que las tensiones calculadas en los elementos resistentes se ajustaban a las reales, por lo que se decidió construir otros prototipos con palas fabricadas en materiales diferentes, capaces de soportar vientos de mayor velocidad. La selección de los materiales y de los métodos constructivos empleados en la fabricación de las palas ha sido uno de los problemas de mayor interés de las nuevas aeroturbinas. Las soluciones actuales apuntan a palas huecas, fabricadas con resinas de poliéster reforzadas con fibra de vidrio que permiten soluciones constructivas más sencillas y económicas.

Aerogenerador experimental MOD 0 de 100 kW.- En 1975 empezó a funcionar el primer aerogenerador MOD-0 en Plum Brook cuyo objetivo era contrastar los resultados obtenidos mediante métodos analíticos y comprobar la información experimental obtenida en las plantas de Hütter y de Putnan, en las que se había basado el diseño; inicialmente fue proyectado con un rotor bipala con buje rígido, en el que la hélice que estaba situada a sotavento de la torre, estaba provista de una celosía muy tupida, con plataformas y escaleras que llegaron a provocar interferencias (bloqueo) debido a la acción de la torre sobre el rotor, cuando las palas de éste pasaban por su parte inferior; debido a ello se suprimieron las escaleras y las plataformas, quedando la torre con una celosía menos tupida.

A pesar de ello no se modificó la situación de las palas, dado que la ubicación de la torre, a sotavento, tenía la ventaja de la autoorientación de la máquina.

Esta aeroturbina sirvió para realizar diversos estudios y ensayos de cargas dinámicas y puntos de funcionamiento a distintos regímenes de trabajo de los diferentes componentes de la instalación, y así obtener nuevos datos sobre los esfuerzos debidos al viento, y esfuerzos y vibraciones de las diferentes

partes del aerogenerador, para así determinar los componentes más económicos y fiables para su construcción en serie.

Las características más importantes de esta máquina eran:

- Rotor bipala de 38 m de diámetro con buje basculante

- Nº de palas: 2, de paso variable con perfil aerodinámico tipo NACA 230 XVI



Fig V.7.- Aerogenerador experimental MOD-0A de 200 kW

- No tiene palas alabeadas, siendo la cuerda en el cubo de 1,332 m. y en la periferia de 0,30 m

- La velocidad de conexión es de 4 m/seg, la nominal es de 8 m/seg y la de desconexión de 18 m/seg

- El alternador es síncrono con un voltaje de 480 V, 125 kWA y un peso de 700 kg

- Velocidad de rotación del eje: 40 rpm, por lo que lleva una caja de engranajes con un factor de multiplicación capaz de proporcionar 1.800 rpm. Rendimiento de la caja de engranajes = 0,75.

- El control de potencia se consigue mediante control hidráulico

- Apertura de las palas a partir de una velocidad del viento de 30 m/seg.

- Arranque a partir de una velocidad del viento de 3 m/seg

- Altura de la torre: 30 m.

- Coeficiente de potencia C_N = 0,375.

- La instalación estaba prevista para resistir vientos de 240 km/hora.

Cuando la velocidad del viento era superior a 4 m/seg comenzaba a girar el rotor hasta llegar a la velocidad de 8 m/seg en que la máquina producía su potencia nominal; a partir de aquí el paso variable de las palas se encargaba de mantener dicha potencia, siempre que la máquina no llegase a los 18 m/seg, en que dejaría de funcionar. Como sistema de seguridad se la incluyó un freno de disco.

Dos años más tarde entraron en funcionamiento tres aerogeneradores MOD-0 de 200 kW, diseñados por Westinghouse, que se instalaron en Clayton (Nuevo México), en la isla de la Culebra (Puerto Rico) y en Block Island (Rhode Island). En 1980 se instaló en Hawai otro modelo de este tipo.

Aerogenerador experimental MOD 0A de 200 kW.- Este prototipo de 200 kW estaba formado por un rotor bipala de 38 m de diámetro, con la torre situada a sotavento, y eje rígido; la pala era de aluminio, con un perfil aerodinámico de la serie 230 XX, con una torsión de 26º y una cuerda de entronque en el cubo de 1,24 m y en la periferia de 0,46 m, Fig V.7.

La torre era de celosía con una altura de 30 m; la potencia de 200 kW se obtenía para una velocidad nominal de 10 m/seg, siendo la velocidad de conexión de 4 m/seg y la de desconexión de 18 m/seg. Estaba conectada a un alternador síncrono de 480 V que giraba a una velocidad de 1.800 rpm.

Aerogenerador MOD 1.- La siguiente fase del programa fue la construcción del MOD-1, Fig V.8, diseñado por General Electric, que se instaló en el monte Howard's Knob, cerca de Boone, en Carolina del Sur. Puesto en servicio a principios de 1979, fue la primera turbina eólica capaz de generar electricidad a escala industrial y ha sido una de las que mayores problemas ha planteado.

Además de las ya habituales de tipo operacional, su rotor a sotavento producía perturbaciones aeroacústicas de baja frecuencia nocivas para personas con afecciones cardiacas.

Sus características principales eran:

- Diámetro: 61 m; Hélice bipala de acero con paso variable, a sotavento.
- Potencia: 2 MW.
- Velocidad de rotación: 35 rev / min; Velocidad nominal del viento: 11,2 m / seg
- Velocidad de desconexión: 19 m / seg; Velocidad especifica: TSR = 7,8.
- Alternador síncrono: 1 800 rev / min, 2 MW.
- Torre de acero (celosía) de 42,7 m de altura.

En este modelo se modificó el diseño original, reduciendo la velocidad de giro debido a problemas de ruido; el control de giro era de paso variable.

Las palas, de acero, tenían un perfil aerodinámico variable, de la serie 44-XX, con un ángulo de alabeo de 11°, una cuerda en el cubo de 3,6 m y de 0,85 m en la periferia.

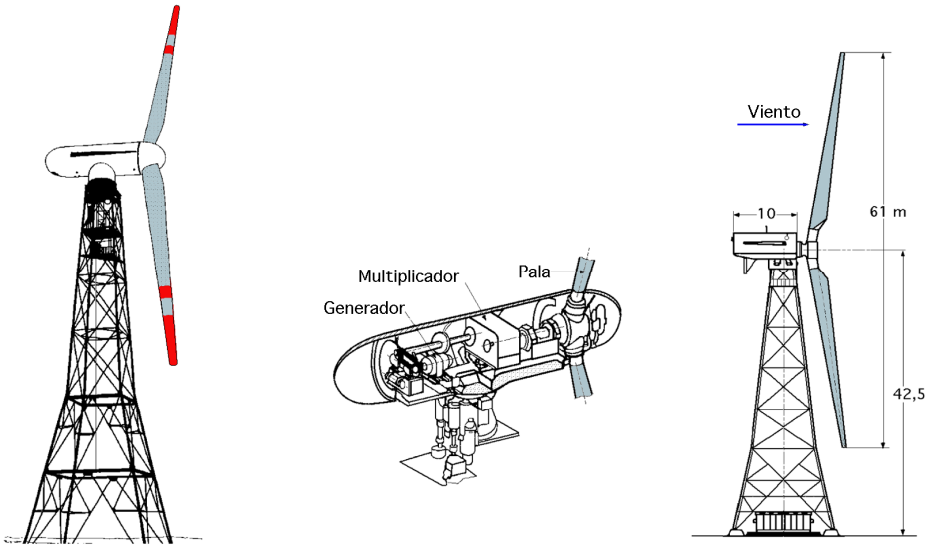


Fig V.8.- Aerogenerador MOD 1

Aerogenerador MOD 2.- Un año más tarde, la Boeing Engineering and Construction pone en marcha el MOD-2, con el objetivo de optimizar los parámetros de diseño y reducir los costes, mejorando la rentabilidad de la energía obtenida en este tipo de sistemas eólicos. La máquina, instalada en 1980 en Goldendale, Estado de Washington, se diferenciaba de las precedentes por su concepto y tecnología; era una máquina de segunda generación cuya construcción tuvo en cuenta las observaciones, ensayos y medidas hechas sobre los prototipos MOD 0 y MOD 1.

Sus características eran las siguientes:

- Hélice bipala girando delante de la torre (barlovento).
- Cada pala estaba compuesta por una parte fija (70% de la longitud) y una parte móvil (30% de la longitud). Las palas eran de acero y plástico armado con fibra de vidrio.
- Perfiles de la serie NACA 230-XX. Alabeo de 7°
- Cuerda del perfil en el cubo 3,4 m y en la periferia de 1,5 m
- Diámetro: 91,5 m.; Potencia: 2,5 MW.

- Velocidad nominal del viento: 12,5 m / seg

- Velocidad especifica: TSR = 6,7.

- Velocidad de rotación: 17,5 rpm

- Velocidad de conexión 5 m / seg

- Velocidad de desconexión 20 m / seg

- Generador: alternador de 4 polos, 1 800 rpm.

- La regulación y seguridad de la instalación, quedaban mantenidas, para la variación del paso, por la parte móvil de cada pala.

- Torre cilíndrica de acero de 61 m de altura

- Como consecuencia de la diferencia entre las velocidades del viento por debajo y por encima del círculo recorrido por las palas, el eje del rotor estaba sometido a un momento de flexión de frecuencia doble de la velocidad de rotación.

- Buje basculante

- Control de potencia por paso variable

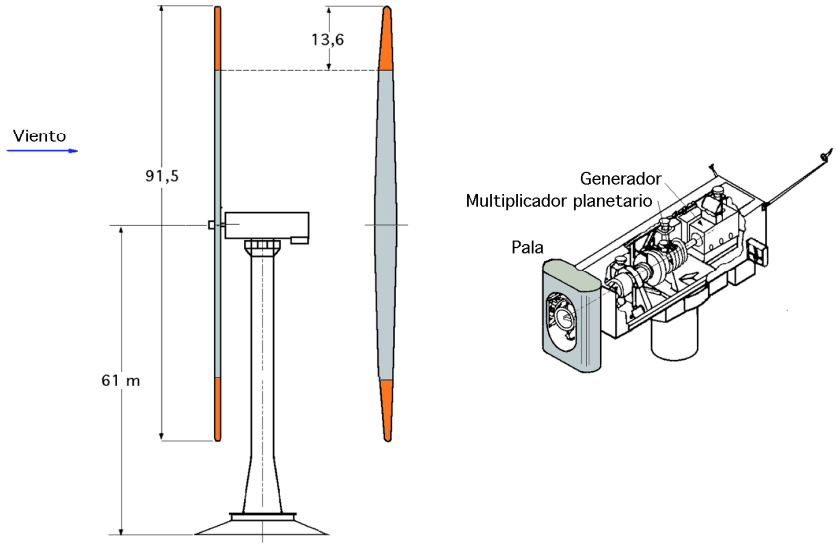


Fig V.9.- Aerogenerador experimental MOD-2 de 2,5 MW

Para reducir los efectos de las ráfagas y de la diferencia de velocidades por debajo y por encima del círculo barrido por las palas y, por consiguiente de la fatiga, el cubo del rotor llevaba articulaciones que permitían a las palas girar 5º de una a otra parte del plano medio de rotación.

Esta reducción de la fatiga implicó una reducción del peso y del precio del rotor, de la góndola y de la torre. La torre que soporta el aerogenerador estaba constituida por un cilindro de acero compuesto de virolas soldadas, (precursora de los actuales sistemas de construcción de torres); se calculó de forma que su frecuencia fundamental de vibración estuviese comprendida entre ***n*** y ***2n*** rev/seg del rotor y, por consiguiente, era más ligera y flexible. La frecuencia de la torre fue seleccionada suficientemente distinta de ***2n*** para evitar el fenómeno de resonancia. El sistema de fijación de las palas sobre el eje del rotor reducía la transmisión a la torre de los momentos de flexión que actuaban sobre las palas. De todo ello se obtuvo un importante ahorro en el peso, ya que el aerogenerador MOD 2 tenía aproximadamente el mismo peso que el MOD 1, por lo que el precio del kW generado era inferior.

Aerogeneradores experimentales de 4, 6,2 y 7,5 MW.- Otros rotores, actualmente en estudio, tienen potencias del rango de 4 MW, con rotores bipala de 80 m de diámetro y velocidades nominales de 17 m/seg. Finalizada esta fase del proyecto eólico, el Departamento de Energía elaboró otro programa parra la construcción del MOD-5A, de 6,2 MW y 128 m de diámetro, con diseño de la General Electric, y el MOD-5B, de 7,5 MW de potencia diseñado por Boeing, Fig V.10.

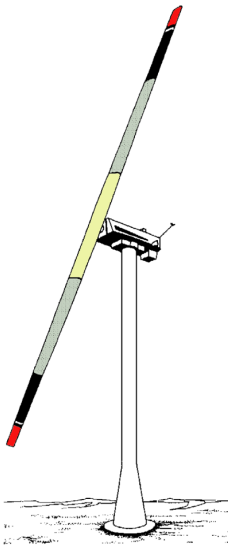


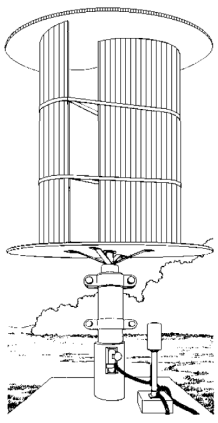
Fig V.10.- Aeroturbina MOD-5B de 7,5 MW (Boeing)

Independientemente del programa federal, la compañía eléctrica Southern California Edison puso en funcionamiento en 1980 la turbina Bendix/Schale, de 3 MW con un rotor tripala de 50 m de diámetro, cuya originalidad era que transmitía la fuerza motriz a tierra mediante un sistema hidráulico. El rotor estaba fijado a la torre, y la orientación se realizaba girando la base de la misma.

Otra planta eólica, financiada por capital privado y desarrollada por la Hamilton Standard, se construyó en Medicine Bow (Wyoming), acoplada a una central hidroeléctrica; disponía de un rotor bipala de 78 m de diámetro con una potencia de 4 MW

El desarrollo eólico del mundo se inició en California, en donde se estableció en 1980 un marco de subvenciones que dieron lugar a la proliferación de aerogeneradores, que todavía pueden verse en Altamont Pass, Victory Garden, etc. Empresas de todo el mundo, especialmente danesas, empezaron a fabricar exclusivamente para el mercado californiano, y gracias a ello fueron mejorando los equipos y aumentando la potencia, (las primeras máquinas eran de 30 kW). Paralelamente a la construcción de estas máquinas, se realizaron proyectos de desarrollo y optimización de grandes aeroturbinas, para analizar las ventajas e inconvenientes de construir rotores con una, dos o tres palas, de bujes rígidos o basculantes, de torres de estructura metálica o de hormigón, etc., llegándose así a la actual generación de aeroturbinas.

V.2- AEROGENERADORES EUROPEOS



Aerogenerador Savonius

V.2a.- 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 muy adecuadas para regiones poco industrializadas.

V.2b.- RUSIA.- En la Tabla V.2 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, estaba equipado con un regulador centrífugo de resorte.

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 V.12. 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.

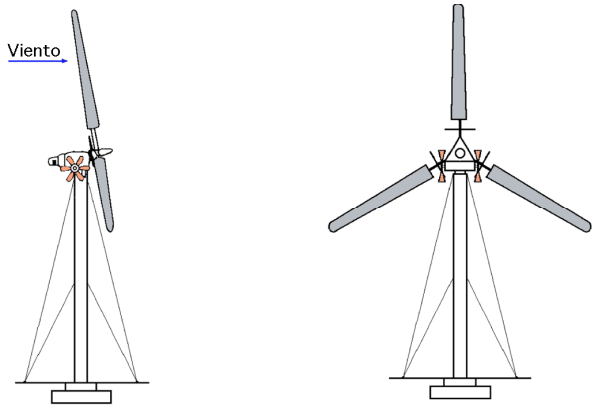


Fig V.11.- Aerogenerador Sokol

Tabla V.2.- 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 rpm.	*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*

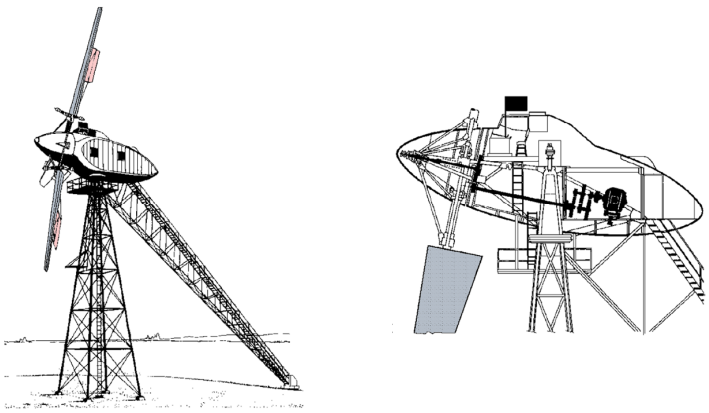


Fig V.12.- Aerogenerador de 100 kW de Balaclava (1931) y vista interior de la góndola

Sus principales características eran:

- *Diámetro de las palas: 30 m.*
- *Potencia nominal:* $\begin{cases} 100\ kW\ para\ un\ viento\ de\ 10{,}5\ m/seg \\ 50\ kW\ para\ un\ viento\ de\ 8\ m/seg \end{cases}$
- *Potencia máxima: 130 kW para un viento de 11 m/seg.*
- *Velocidad de rotación* $\begin{cases} 25\ rev/min\ para\ un\ viento\ de\ 8\ m/seg \\ 30\ rev/min\ para\ un\ viento\ de\ 10\ m/seg \end{cases}$

- Generador asíncrono trifásico de velocidad aproximada 600 rpm.

- 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.

V.2c.- 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 rpm.

- Generador asíncrono de 200 kW a 1000 rpm.

- Multiplicador de dos pasos: $\begin{cases} \textit{Primer paso de cadena (relación de multiplicación , 4/1)} \\ \textit{Segundo paso de engranajes (relación de multiplicación, 4/1)} \end{cases}$

- 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 15º. Para velocidades del viento inferiores a 3 m/seg, el sistema de control aislaba el generador de la red.

V.2d.- 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 primera 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 V.13. A partir de entonces el parque eólico empezó a reducirse rápidamente.

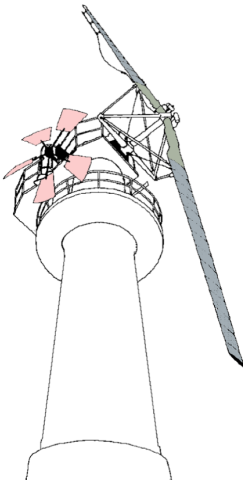


Fig V.13.- Aeroturbina danesa diseño aerodinámico capaz de generar entre 30 y 70 kW

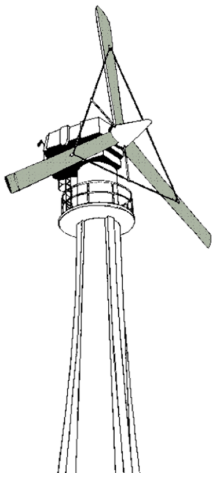


Fig V.14.- Aerogenerador danés de 45 kW (J. Juul), que se instaló en la isla de Bogo

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 V.14, 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 V.15. 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^2 de superficie barrida.

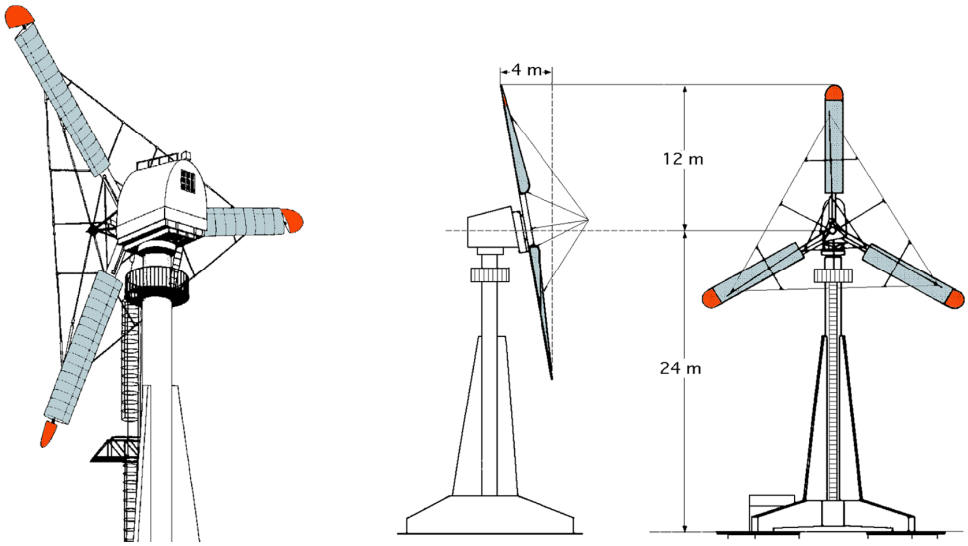


Fig V.15a.- Aerogenerador Gedser de 200 kW

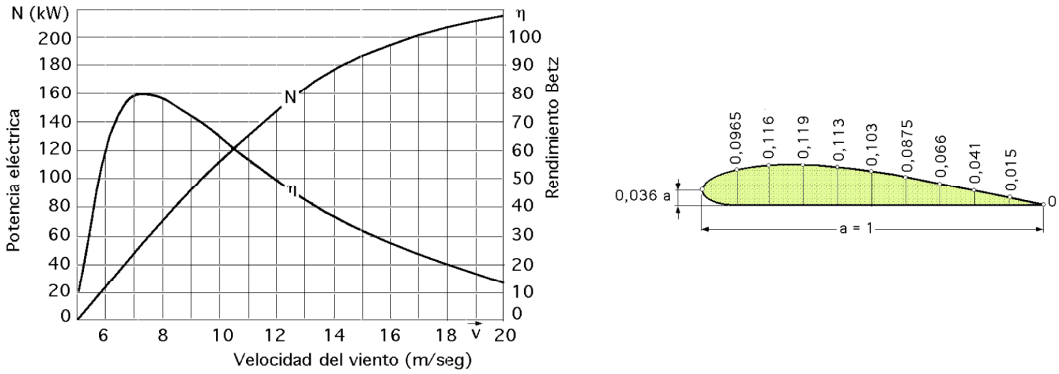


Fig V.15b.- Características del aerogenerador Gedser de 200 kW

Sus características técnicas eran:

- *Diámetro: 24 m; Superficie barrida: 450 m^2.*
- *Hélice tripala: colocada bajo la góndola.*
- *Velocidad nominal: 17 m / seg; Potencia nominal: 200 kW; Velocidad de rotación: 30 rpm.*
- *Altura del soporte: 25 m.*
- *Generador asíncrono: 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.*

Las palas eran alabeadas de paso fijo, con un ángulo de calaje de 16º. 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.

El generador asíncrono conectado 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 (stall).

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 60º 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.

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 V.16.

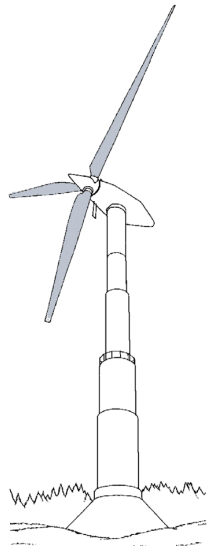


Fig VI.16.- Aerogenerador de Tvind, de 2 MW

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 rpm.*
- *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 rpm.*
- *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 m, Fig V.17.

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 -6º. Las partes de las palas situadas cerca del cubo eran fijas y estaban unidas con obenques.

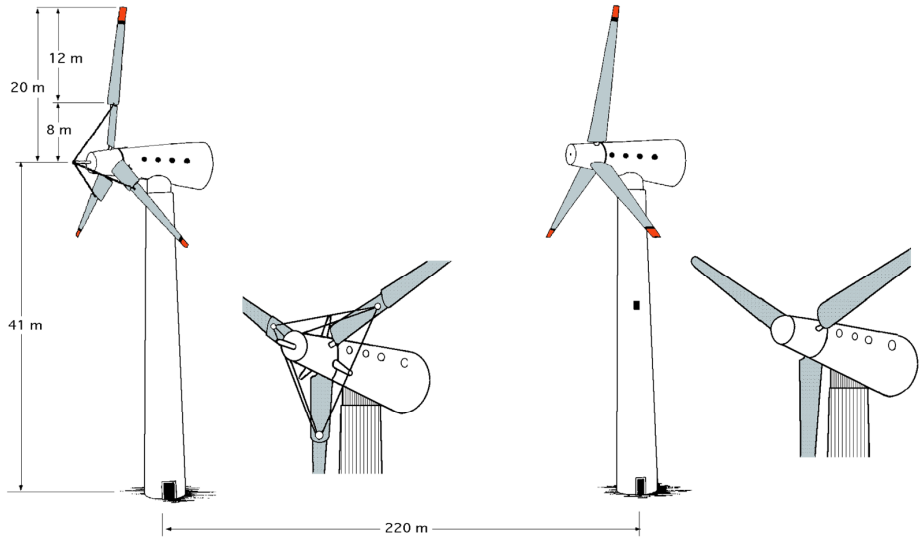


Fig V.17.- Aerogeneradores NIBE A y B de 630 kW

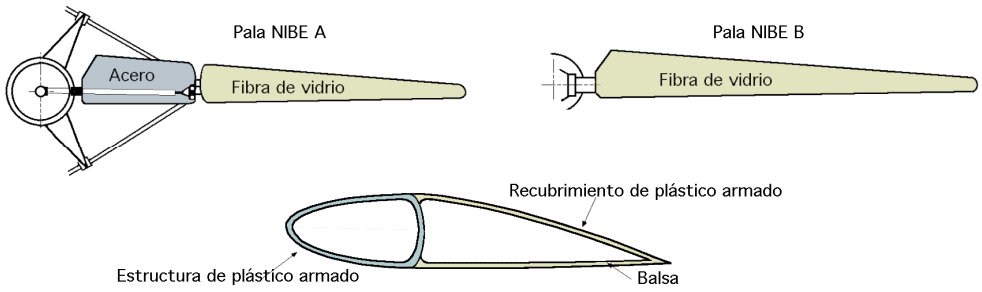


Fig V.18.- Palas de los aerogeneradores NIBE A y B

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*

- *Palas de acero y poliéster con refuerzo de fibra de vidrio; presentaban una torsión (alabeo) de 11º desde el entronque en el cubo hasta las extremidades*

- Hélices tripala delante de la torre.
- Perfiles utilizados: NACA 4412, 4434.
- Cubo rígido.; ángulo de cono: 7º
- Inclinación del eje de rotación sobre el plano horizontal: 6º.
- Velocidad de rotación: 34 rpm.
- Velocidad nominal del viento: 13 m/seg.
- Velocidad específica: TSR = 5,4.
- Velocidad máxima del viento en servicio: 25 m/seg.
- Generador eléctrico asíncrono: 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 arriostramiento 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 V.19.

Sus características principales eran las siguientes:

- Hélice tripala; Diámetro: 28 m.
- Palas de plástico armado de fibra de vidrio. Alabeo: 7,8º.
- Anchura de las palas: junto al cubo: 1 800 mm.; en sus extremidades: 600 mm.
- Perfiles: NACA 4412, 4420.
- Potencia: 265 kW.- Velocidad nominal del viento: 13 m/seg
- Velocidad de rotación: 42 rev/min para viento fuerte y moderado y 28 rev/min para viento suave
- Cubo rígido; ángulo de cono 4º
- Inclinación del eje de rotación sobre el plano horizontal: 6º
- Regulación con paso variable y regulador centrífugo.
- Torre troncocónica de acero de 28 m de altura, diámetro de $\begin{cases} 0{,}80\ m \text{ en la cima} \\ 1{,}4\ m \text{ en la base} \end{cases}$.
- Autoorientable por rotor auxiliar.
- La máquina podía resistir vientos de 70 m/seg (250 km/hora).
- Dos generadores asíncronos: $\begin{cases} \text{- de 6 polos, 58 kW, 1000 rev/min; vientos de velocidad baja} \\ \text{- de 4 polos, 265 kW, 1512 rev/min; vientos moderados y fuertes} \end{cases}$
- Producción anual estimada para una velocidad media de $\begin{cases} 5{,}35\ m/seg\text{: } 450.000\ kWh/año \\ 7\ m/seg\text{: } 800.000\ kWh/año \end{cases}$

- 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
- Su duración se estimó en 30 años

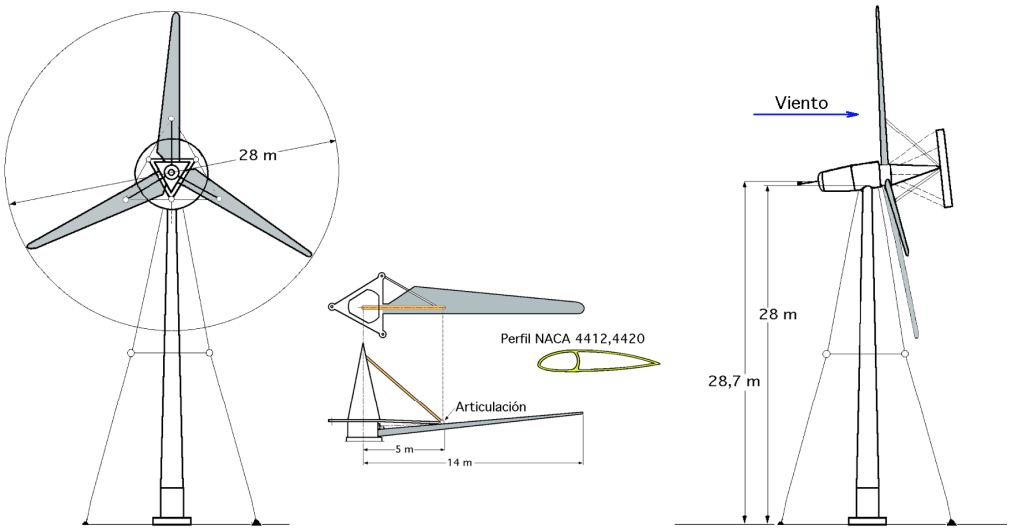


Fig V.19.- Aerogenerador Volund de 265 kW

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.- Tenía las siguientes características técnicas, Fig V.20a:

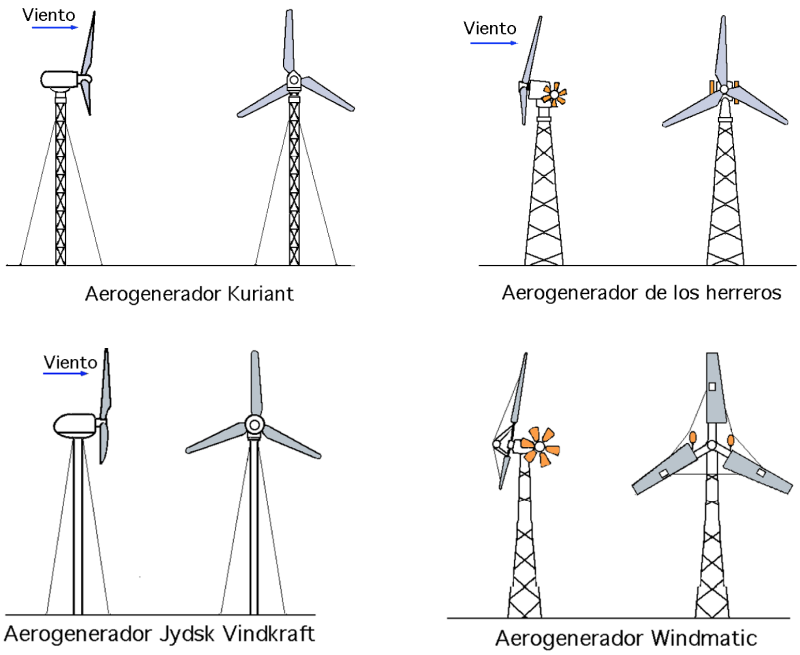


Fig V.20abcd.- Algunos aerogeneradores daneses

- 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, $\begin{cases} \text{- de 4 kW, para vientos débiles} \\ \text{- de 15 kW, a 1000 r.p.m. y velocidad del viento hasta 25 m/seg} \end{cases}$
- Los dos aerogeneradores estaban 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.

Aerogenerador Holger Danske.- Era un tripala de palas de plástico armado de fibra de vidrio de diámetro 11 m; los alerones colocados en el extremo exterior de las palas podían girar 60º; 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.- Semejante al anterior, estaba equipado con dos generadores asíncronos de 30 y 5 kW.

Aerogenerador Sonebjerg.- Era un tripala que utilizaba 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 Jydsk.- Arrastraba un generador asíncrono de 15 kW, Fig V.20c; el rotor de paso variable tenía 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 V.20d.

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: $\begin{cases} \text{10 kW con viento de 8 m/seg} \\ \text{22 kW con viento de 12 m/seg} \end{cases}$
- Velocidad específica: TSR = 4,4.
- Velocidad del viento = 20 m/seg.
- Relación de multiplicación: 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.- Era semejante al precedente, excepto en que sus palas estaban soldadas.

Aerogenerador Poulsen.- Era muy particular; el eje de rotación estaba inclinado 30º 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 Vindkrait.- Estaba conectado a un generador de 15 kW; el paso de las palas era variable.

Aerogenerador Elsan.- 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 de reducir costes, y que entró en funcionamiento en 1992. Su rotor de 50 m de diámetro puede funcionar con paso fijo y variable.

En 1980, los daneses construían modelos comerciales de potencia, como un rotor tripala de 28 m 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 era un multipala coaxial que se ponía en funcionamiento y generaba energía para velocidades del viento menores.

Otras características eran: *Posición de la torre a sotavento, palas de acero y fibra de vidrio, potencia 650 kW, altura de la torre 45 m, 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 deel orden de 100 MW y por un valor de 100 millones de dólares; en California se instalaron una gran cantidad de máquinas eólicas danesas.

V.2e.- 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 V.21.

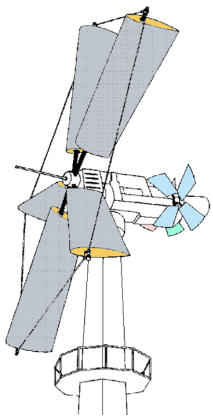


Fig V.21.- Aerogenerador alemán Kumme

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

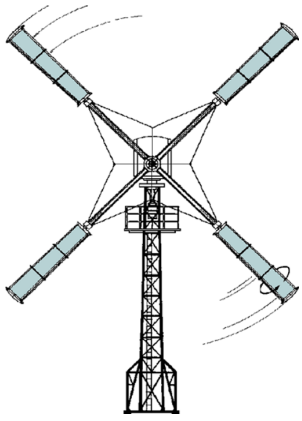


Fig V.22.- Aerogenerador alemán de palas giratorias (Flettner)

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 V.22.

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 V.23.

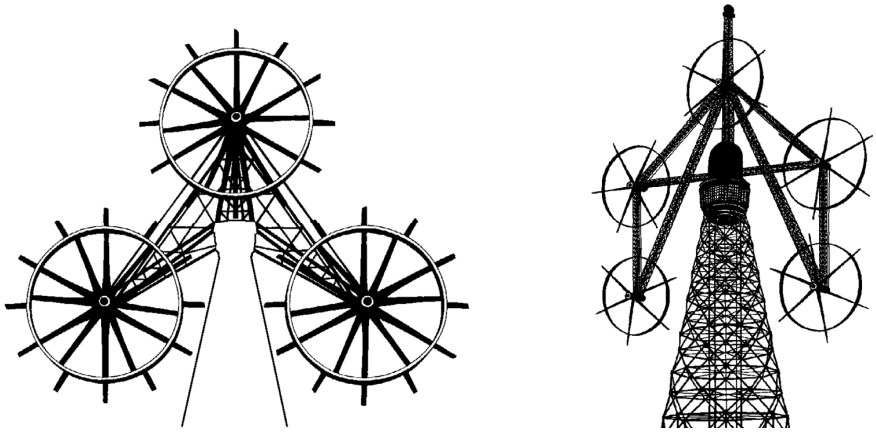


Fig V.23.- Turbinas eólicas Honnef de 75 MW y 120 MW

Después de la guerra, el protagonista del programa eólico alemán fue el Prf. 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 epoxy y refuerzo de fibra de vidrio. La aeroturbina funcionó en perfectas condiciones durante diez años, siendo desmantelada en 1968, Fig V.24.

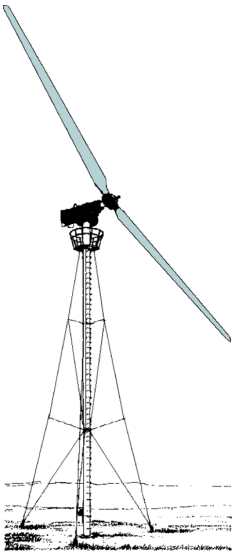


Fig VI.24.- Aerogenerador de Hütter de 100 kW, con palas de plástico

También se realizaron grandes esfuerzos en la construcción de un aerogenerador de 3 MW, con un rotor de 100 m de diámetro, diseñado por la Messerschmitt Bolkom 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, Fig 25 donde se encontraba 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.

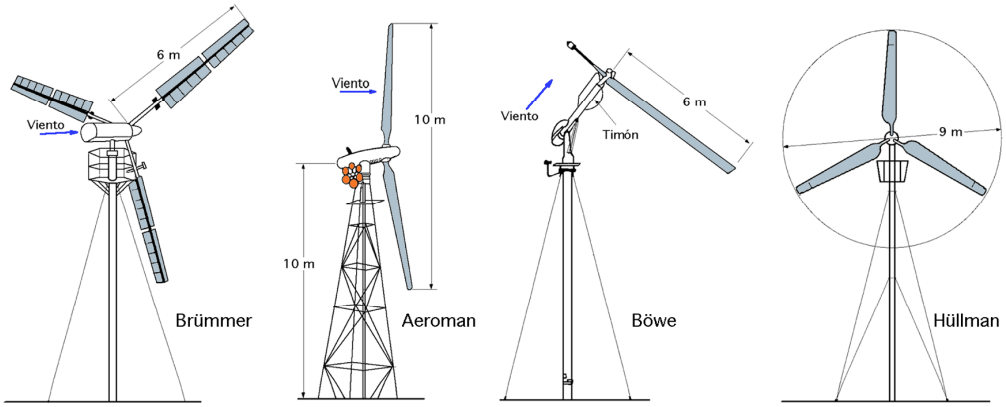


Fig V.25.- Aeroturbinas alemanas

Tabla V.3.- 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*	*9*
n, r.p.m.	*40*	*100*	*115*	*100*
TSR	*3,14*	*7,2*	*9*	*5,9*
Relación de multiplicación	*37,5*	*15*	*13*	*15*
Altura del soporte m	*9*	*10*	*11*	*12*

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. 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 monopala experimentales, 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.

Aerogeneradores Growian de 265 kW y 3 MW.- En la actualidad, el Growian I, situado cerca de la desembocadura del Elba, Fig V.26a, es una aeroturbina con un rotor bipala de 100,4 m de diámetro, situado a sotavento de una torre de 100 m 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.

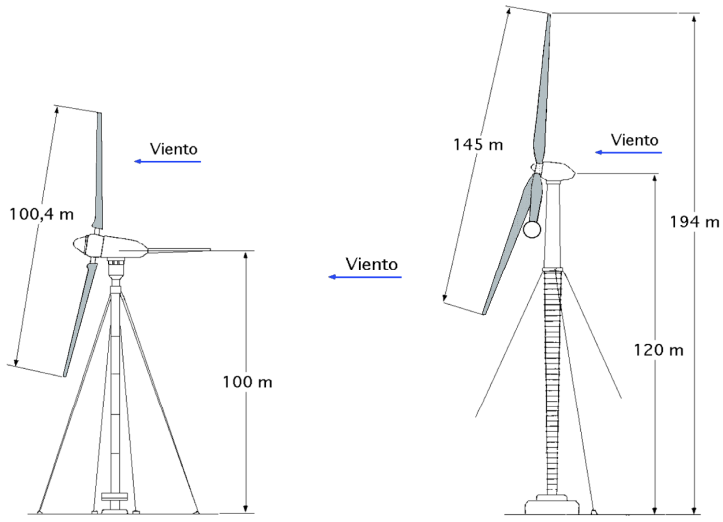


Fig V.27.- Aerogeneradores Growian de 265 kW y 3 MW

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 ± 15 %

- Velocidad específica: TSR = 8.

- Potencia: 3 MW.

- Producción estimada: 12 GWh.

- 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.

- Rotor calculado para resistir un viento de 60 m / seg (220 km / hora).

- Generador asíncrono: 1500 rev / min ± 15 %

- 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.

El modelo Growian II, Fig V.27b, está previsto con un rotor de una sola pala (con contrapeso) y un diámetro de 145 m. 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 está en estudio el proyecto EOLO con un nuevo aerogenerador de 3 MW.

V.2f.- 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 aeroturbina 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 solidas que las hélices convencionales.

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.

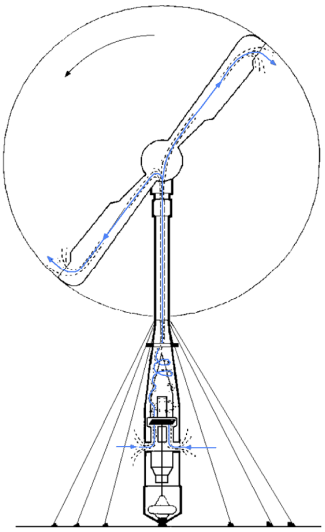


Fig V.27.- Aerogenerador Andreu-Enfield

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 comprendi-

das 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^3/min.
- Alternador de 100 kW, 415 V.
- 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 V.28, 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.

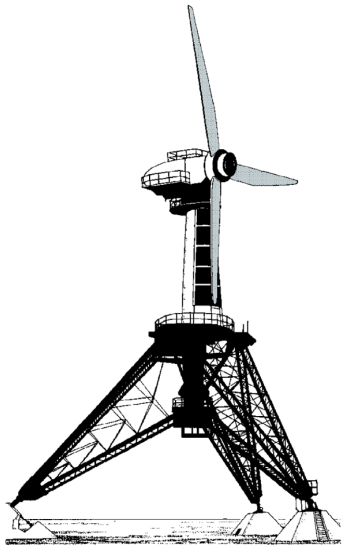


Fig VI.28
Aerogenerador de 800 kW de Best-Romaní

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 rpm.
- Generador: alternador con 6 poleas a 1 000 rpm.
- 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 $\begin{cases} 7,5 / 1 \\ 3 / 1 \end{cases}$

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-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 V.29, 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.

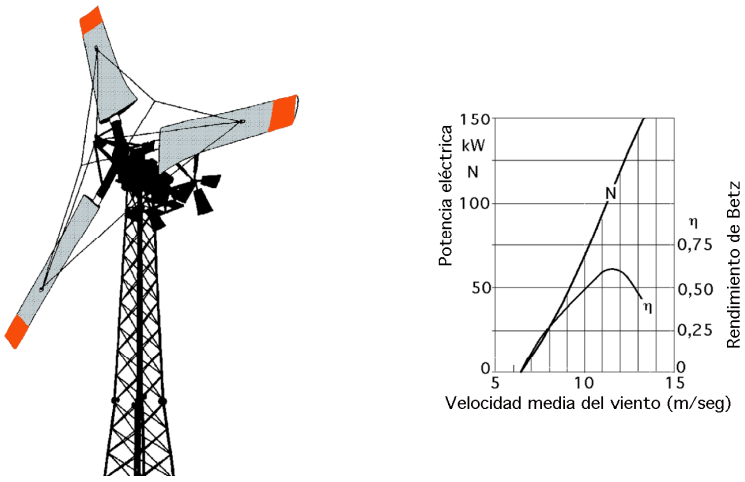


Fig V.29.- Aerogenerador Neyrpic de 132 kW de St. Remy des Landes y curva de variación de la potencia y del rendimiento con relación al límite de Betz

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, y velocidad de rotación: 56 rpm.
- Potencia máxima: 150 kW y rendimiento máximo: 0,5 a 0,6, para vientos de 10 a 13,5 m/seg.
- Hélice tripala paso variable, aluminio soldado, y estructura metálica con revestimiento plástico
- Doble tren multiplicador.
- Generador eléctrico asíncrono a 1530 rpm.

Aerogenerador NEYRPIC de 800 kW de St. Rémy des Landes (Manche, Francia).- El segundo aerogenerador Neyrpic, diseñado por Louis Vadot, Fig V.30, empezó a funcionar en 1.963; el rotor, fabricado en plástico reforzado, era un tripala regulable de 35 m de diámetro, con paso variable.

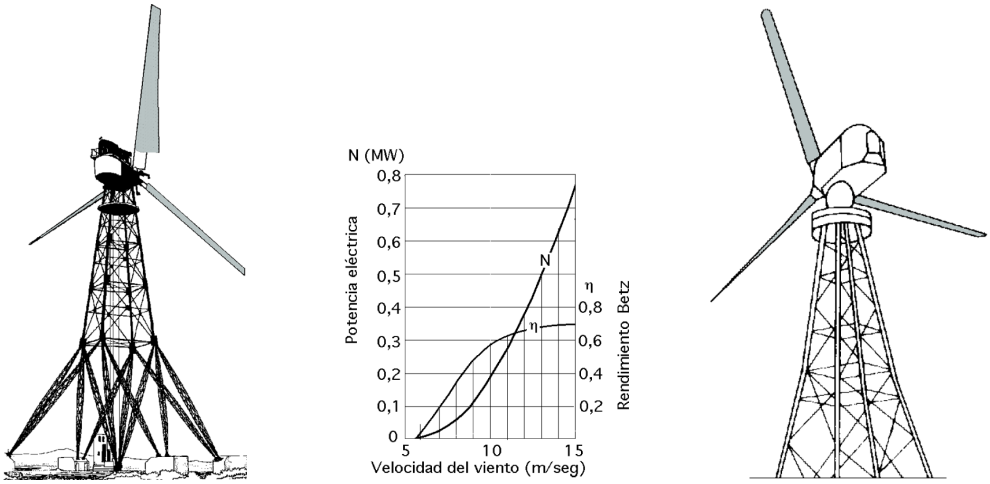


Fig V.30.- Aerogenerador Neyrpíc de 0,8 MW

La planta, instalada en St. Remy des Landes, tuvo un funcionamiento muy satisfactorio durante un año, pero se paró 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 del poco tiempo de funcionamiento, no se reparó nunca debido a los bajos precios del petróleo; fue desmontada en junio de 1966.

Sus características técnicas eran:

- Diámetro: 35 m.
- Potencia nominal: 1 MW para un viento de 17 m/seg (60 km/hora).
- Rendimiento máximo: 0,6 a 0,7 para un viento de 13 a 15 m/seg.
- Altura de la torre: 61 m.
- Masa total: 96 toneladas.
- Parada por alerones para una velocidad del viento inferior a 6 m/seg.
- Hélice tripala de plástico, autoorientable y palas de paso variable.
- Calaje fijo hasta 650 kW, y variable en adelante.
- Generador eléctrico asíncrono: 1015 rev/min, 3000 V

Aerogeneradores Aerowatt.- En los años cincuenta se comercializaron una serie de aerogeneradores de baja potencia y dentro de ellos los *Aerowatt*, Fig V.31, 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.

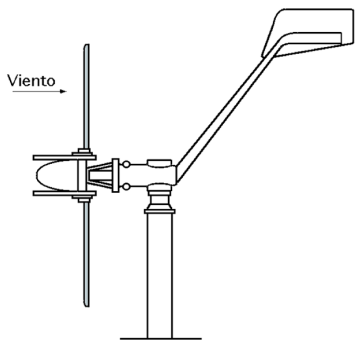


Fig V.31.- Aerogenerador Aerowatt

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

Las palas, Fig V.32, 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.

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.

Tabla V.4.- 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*

En Francia, existen varios faros equipados con aerogeneradores Aerowatt, como el faro de Sept Iles cerca de Perros Guirec (Bretaña) cuyo generador compound de corriente continua 110 V, puede desarrollar 5 kW a 300 rev/min, estando sometido 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 aleación de aluminio inoxidable, ligeros, paso variable y enteramente automáticos. La aeroturbina iba montada directamente en el árbol del generador, sin caja 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 V.5.- Características técnicas del aerogenerador Enag

Modelo	*Rotor bipala*	*Rotor tripala*	*Rotor tripala*
Diámetro	*2,35 m*	*2,55 m*	*4,40 m*
Potencia	*0,65 kW*	*1 kW*	*3 kW*
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 rpm.
- Alternador Unelec Alsthom sin anillos ni escobillas de 10 kW, que gira a 1.500 rpm.
- Tensión: 220/380 V.
- 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 multirotor 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.

V.2g.- 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.

V.2h.- 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, Fig V.32. Las palas estaban aguzadas y no eran alabeadas; la velocidad de diseño era de 56 km/h; suministró energía eléctrica en las islas Orkney. 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 V.32.- Aerogenerador de 100 kW en las islas Orkney (North Scotland Hydroelectric Board)

Paralelamente, la British Electric Authority encargó a la 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. 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. 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.

Tabla V.6.- Características técnicas de algunos aerogeneradores ingleses

Aerogenerador	*Enfield*	*Dowsett*	*Smith*	*J. Brown*
Palas	*2*	*3*	*3*	*15*
Diámetro m	*10*	*12,8*	*15,2*	*10*
Potencia kW	*10*	*25*	*100*	*15,2*
Velocidad nominal m/seg	*8,3*	*11*	*18,5*	*130*
nº r.p.m.	*103*	*65*	*75*	
Altura del soporte (m)	*12*	*10*	*10,5*	*12*

Otras turbinas eólicas de baja potencia fueron las siguientes:

Aerogenerador Dowsett.- Llevaba una hélice tripala de paso variable y arrastraba un generador asíncrono de 25 kW; estaba orientada por dos rotores auxiliares.

Aerogenerador 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, Fig V.33. La planta, que se tenía que haber instalado en Costa Hill, en las islas Orkney, tenía unas palas alabeadas de 68,5 m de diámetro, perfil NACA 0015, de paso variable; estaba accionada por un alerón, y arrastraba por medio de una caja multiplicadora de engranajes un generador asíncrono previsto para proporcionar 3,5 MW a una velocidad del viento de 15,5 m/seg.

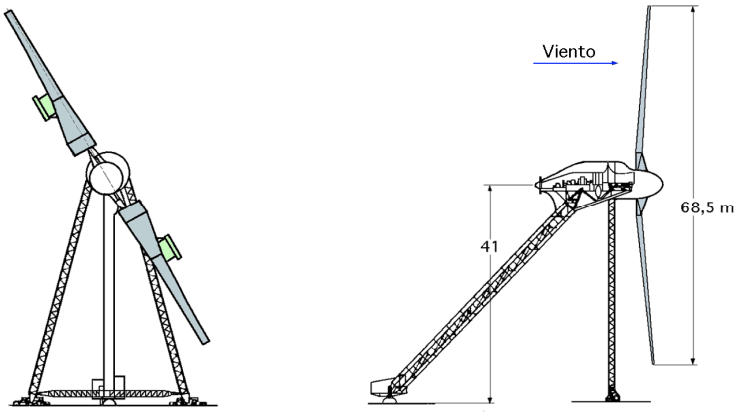


Fig V.33.- Primer aerogenerador de 3,5 MW en las islas Orkney (No se construyó)

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 boggies colocados bajo el pie del trípode.

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.

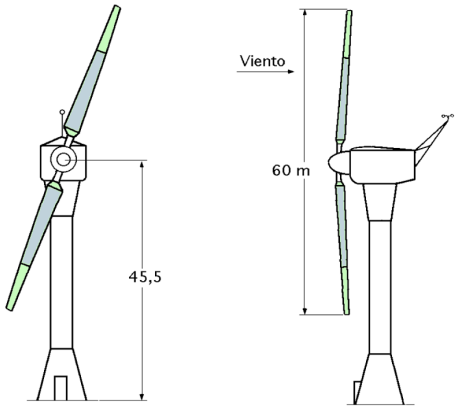


Fig V.34.- Segundo aerogenerador de 3,7 MW en las islas Orkney

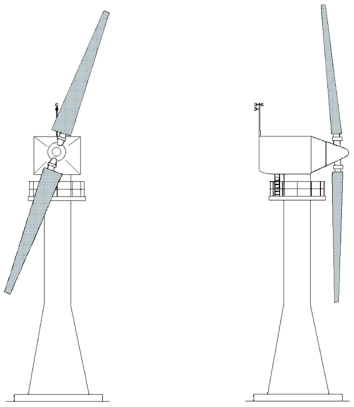


Fig V.35.- Aeroturbina de 3 MW desarrollada por la North Scotland Hydroelectric

Las características de la instalación 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.

- Palas curvadas hacia las extremidades para compensar el momento flector por efecto de la fuerza centrífuga.

- Freno aerodinámico formado por alerones colocados sobre el borde de salida en la extremidad de las palas; éste sistema estaba reforzado por un 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 rpm.

Cuando se alcanzaba la velocidad máxima tolerable entraba en funcionamiento el freno aerodinámico, el generador se desconectaba de la red y el servomotor de orientación colocaba el eje de la máquina perpendicular 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 1970. 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 V.35, 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.

V.2i.- 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 en desarrollo otra turbina, el modelo M-55, con una sola pala y 800 kW de potencia.

V.2j.- 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.

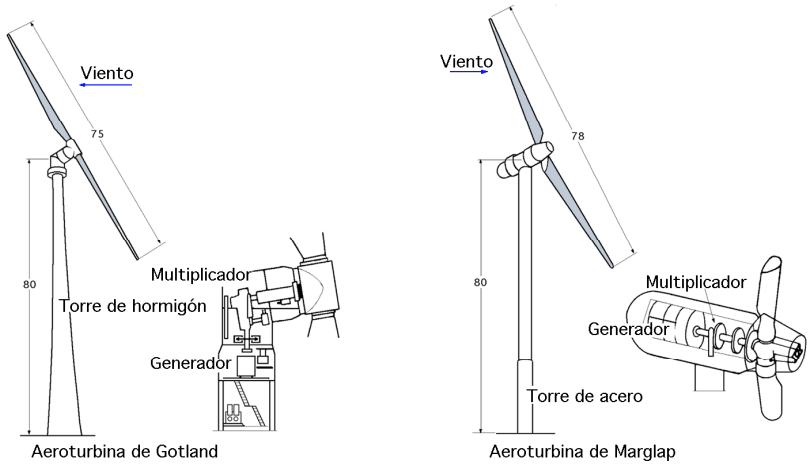


Fig V.36.- Aeroturbinas suecas

Tabla V.7.- 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	*Sotavento*	*Barlovento*
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 ame-

ricana Hamilton Standard, y se instaló en 1983 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 construidos en acero y plástico armado de fibra de vidrio.

Estas instalaciones fueron experimentales, con el objetivo de aprovechar las experiencias para definir el mejor modelo en la continuación del programa energético.

V.2k.- 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 estudio 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, racionalizando los existentes e identificando las zonas de elevado potencial eólico. Para ello se completó el mapa eólico nacional determinando las zonas de alto potencial eólico.

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.

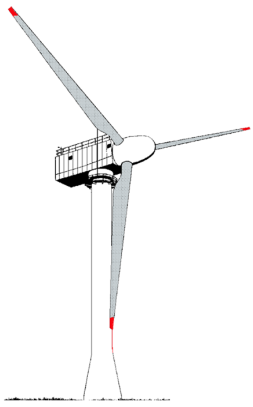


Fig V.37.- Aerogenerador AWEC de 1 MW (Cabo Villano)

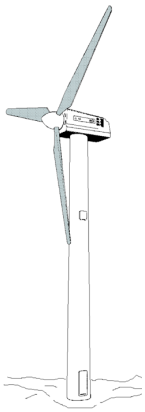


Fig V.38.- Aerogenerador de 350 kW (Endesa-Made)

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 V.37.

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.

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 generaron 50 MW 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).- Este parque eólico se comenzó a instalar en 1987, con 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 es, posiblemente, el mayor parque eólico del mundo

Parque eólico de Granadilla (Tenerife).- 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 nominal del viento: 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) 4500 kg
Góndola (equipada) 9500 kg;
Torre 13700 kg;
Cimentación, 2000 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).- 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 10^6 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 recogía la velocidad y dirección del viento.

Parque eólico del Cabo Creus (Gerona).- 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).- 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 m de altura sobre el flanco Norte del estrecho de Gibraltar.

Con los resultados obtenidos con estos aparatos, en 1988 se desarrollan un aerogenerador de 300 kW, y otro de 150 kW, con tecnología y fabricación española, que fue exhibido en la EXPO 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. La potencia total del conjunto se aproximaba a los 2 MW; con la experiencia obtenida en estos años se acometieron otros proyectos en esta zona de Tarifa, como la Planta Eólica del Sur y la sociedad Energía Eólica del Estrecho, etc.

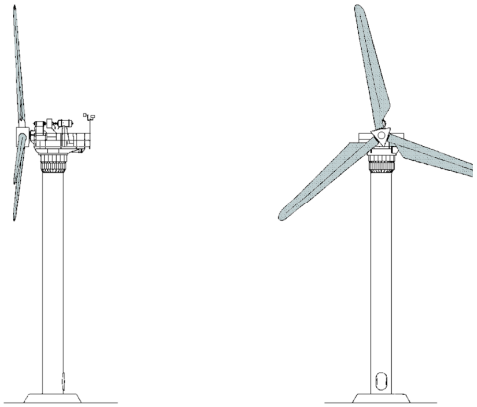


Fig V.39.- Aeroturbina de 100 kW (Tarifa)

La Planta Eólica del Sur PESUR ubicada en Tarifa, tenía 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, tenía 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.

Parque Eólico Cabo Villano.- 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 totalizaban 3,6 MW de potencia.

El aerogenerador *AE20* es 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: 4.500 kg;
Góndola (equipada): 9.500 kg;
Torre: 13.700 kg;
Anclajes a cimentación: 2.000 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.

V.3.- ALGUNOS PROYECTOS UTÓPICOS

La atracción que representa una energía como la del viento, inagotable, gratuita y no contami-

nante ha dado lugar a un gran número de proyectos ambiciosos y de proporciones gigantescas que hoy nos parecen utópicos, pero que quizá podrán realizarse en el futuro; entre ellos citamos los siguientes:

Proyecto Heronemus.- El profesor Heronemus, USA, proyectó la construcción de 30.000 torres eólicas, de 250 m de altura provistas de 20 aeroturbinas de 15 m de diámetro.

Estas torres se distribuirían en las grandes llanuras que se extienden desde Texas al Canadá con una torre por milla cuadrada; ésta empresa representaría la construcción de una torre por cada 1000 ciudadanos americanos con un total de 600.000 generadores con sus correspondientes aparatos de almacenamiento de energía. En conjunto, el proyecto supondría una producción eléctrica de 190.000 MW (equivalente a 150 centrales nucleares de la generación actual), y produciría más del 50% de la energía eléctrica consumida hoy en USA. Incluso se prevé el aprovechamiento de la energía eólica instalando torres con aerogeneradores de 2 MW flotando sobre lagos y océanos. La energía eléctrica generada se destinaría a la obtención de hidrógeno procedente de la electrólisis del agua.

Proyecto de Ezgar Nazare.- E. Nazare (Francia) propuso la construcción de una torre ciclónica a instalar en el Sáhara con una chimenea convergente divergente entre 300 y 600 m de altura y 300 m de diámetro en la base. El tiro por la chimenea aspira aire caliente a ras del suelo y se eleva a gran velocidad hacia las capas frías de la parte superior de la torre. Una o más turbinas situadas en la sección más estrecha de la torre producirían hasta 1.000 MW durante las horas más cálidas del día.

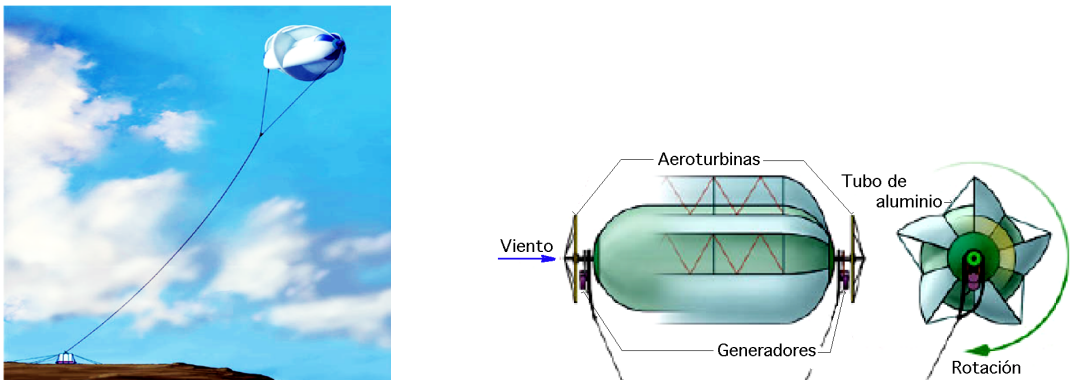


Fig IV.40.- Similitud con el proyecto Aurora?

Proyecto Aurora.- F.Moissin-Franckhauser propuso la idea de un generador formado por una inmensa vela de 450 m de radio sujeta por cables de 2 km a un buque dotado de máquinas eólicas, que al ser propulsado por la vela transformarían su energía cinética en electricidad. Para una vela a 500 m de altura, se podría proporcionar una potencia de 1 GW que se destinaría a la fabricación de hidrógeno y metanol a partir de la electrólisis del agua.

Proyecto Heidman.- Consistía en el aprovechamiento total de la energía eólica del viento mistral a lo largo del valle del Ródano y así sustituir 20 centrales nucleares de 500 MW.

Proyecto Valioukine.- Valioukine propuso instalar en Rusia, en el trayecto de los vientos siberianos que soplan periódicamente a más de 100 km/h,un conjunto de 1.000 aerogeneradores de 20 m de diámetro a lo largo de un cañón artificial, suministrando una potencia total de 7.000 MW.

Otra posibilidad es la de utilizar un conjunto de paracaídas dispuestos en fila y unidos mediante un cable, conformando un circuito en forma de lazo; los paracaídas de una parte de este circuito se

hinchan por la acción del viento, mientras que los de la parte opuesta se pliegan, estableciéndose así un movimiento circular que aprovecha el viento para accionar una polea situada sobre el buque anclado y que está acoplada a un generador eléctrico; pruebas mediante modelos (en laboratorio) demuestran que el método funciona con la ventaja de que su instalación es menos costosa que la de los sistemas de turbina convencionales. Otros proyectos prevén la posibilidad de aprovechar la energía de oscilación de los árboles sacudidos por el viento o las cargas electrostáticas producidas por la fricción del viento en la superficie de globos cautivos o el establecimiento de centrales eólicas en la troposfera que aprovecharían la gran regularidad de los vientos a gran altura, etc. Al margen de estos proyectos, que en algún momento llegaron a despertar cierto interés, todavía existen otros sistemas eólicos, tal vez con pocas posibilidades de desarrollo, pero cuyos diseños indican un elevado nivel de imaginación.

Proyecto Obert.- El sistema aerostático diseñado por el profesor Obert se compone de seis aerogeneradores acoplados a un globo, que podría elevarse entre 5.000 y 10.000 m de altura, para operar con velocidades de viento muy superiores a las que se pueden obtener a nivel del suelo. Una planta de este tipo podría generar 20 MW e incluso alcanzar los 100 MW.

Proyecto Herter.- Otro ambicioso proyecto, también de 20 MW, fué el del profesor E. Herter, que consistía en unas alas provistas de hélices y sobre las que se apoyaba otra ala vertical de 30 m de altura. El sistema formado por varios módulos se pone en funcionamiento mediante la ayuda de motores auxiliares que utilizan las hélices como impulsoras. Una vez estabilizados los módulos a 100 m de altura y describiendo círculos de 300 m de diámetro, las hélices actúan como aerogeneradores. Las alas horizontales proporcionan la sustentación necesaria para mantenerse en el aire, actuando igual que las alas de los aviones Fig IV.41.

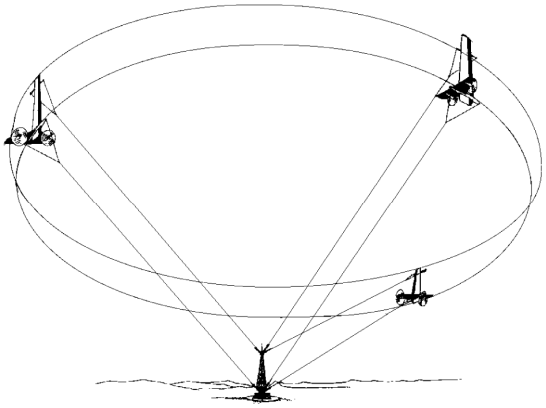


Fig IV.41.- Diseño de planta eólica de módulos aéreos provista de aerogeneradores que giran a gran altura (Herter)

Las alas verticales generarían el impulso que debe vencer la resistencia aerodinámica y producir el empuje necesario para que el sistema siga girando. Dicho impulso es inducido sobre las alas verticales por la energía del viento, de la misma forma que actúa sobre las turbinas Darrieux. La superficie de barrido del sistema sería de 18.000 m^2 y las velocidades del viento a 100 m de altitud son muy superiores a las que se pueden encontrar a nivel del suelo. La electricidad se obtendría a través de los rotores y se enviaría a la estación localizada en la base de la torre por los cables de sujeción. Por el momento, la limitación de potencia de las grandes máquinas eólicas, $5 \div 7$ MW, supone una dificultad comparativa frente a otros sistemas energéticos. Sin embargo, la solución en el futuro parece ser la instalación de granjas de aeroturbinas. La separación entre turbinas debería ser del orden de diez veces su diámetro para evitar posibles fenómenos de interferencias, pero podría compensarse con la reducción de los costes de mantenimiento y de instalación.

Algunos diseños futuristas

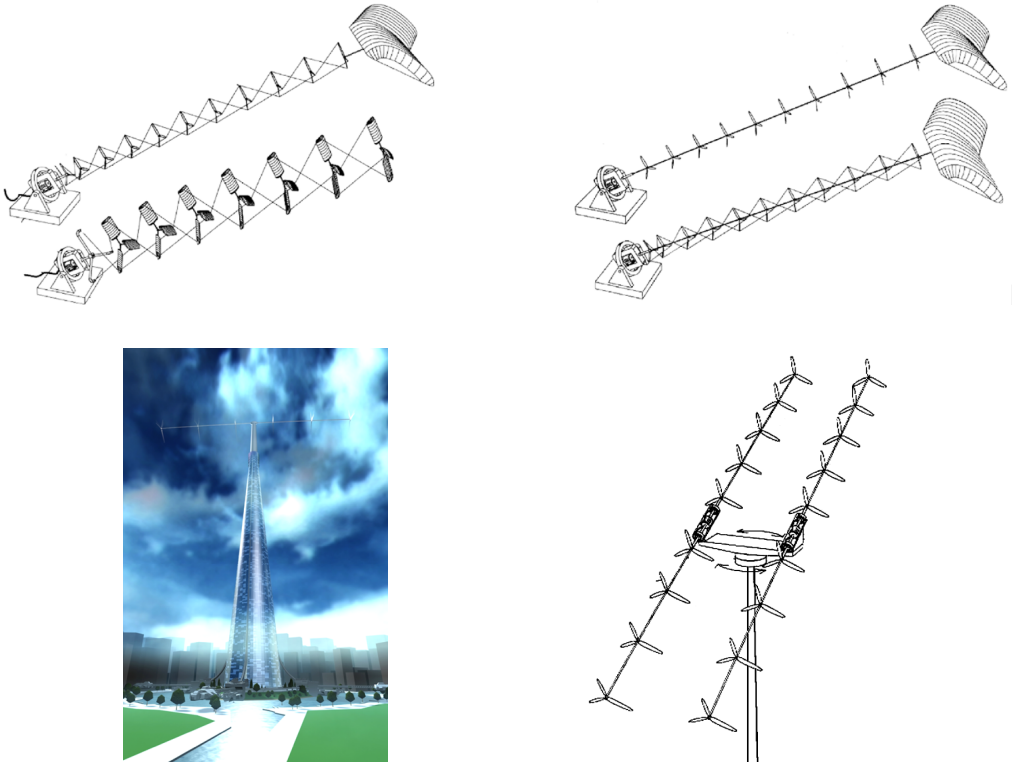


Fig V.42.- Estructura de 600 m de altura sobre la que iría montada la superturbina Selsam

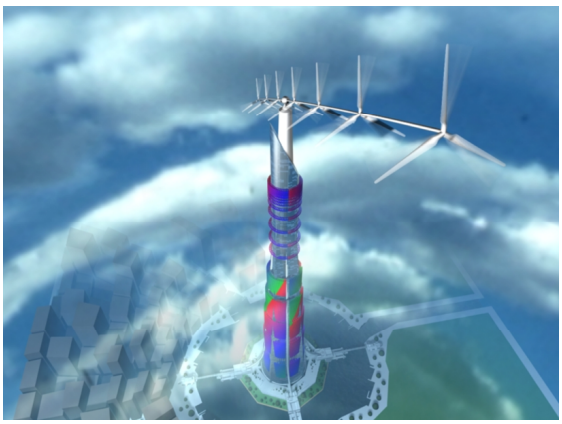


Fig V.43.- Una ciudad dentro de otra ciudad, la torre Selsam de Sánchez asciende 800 m en el cielo, es un transformador de energía, y desalina su propia agua dulce.



Fig V.44.- Turbina eólica de rotores múltiples Selsam, para 6 kW con un diámetro barrido de 7 ft (2,13 m)

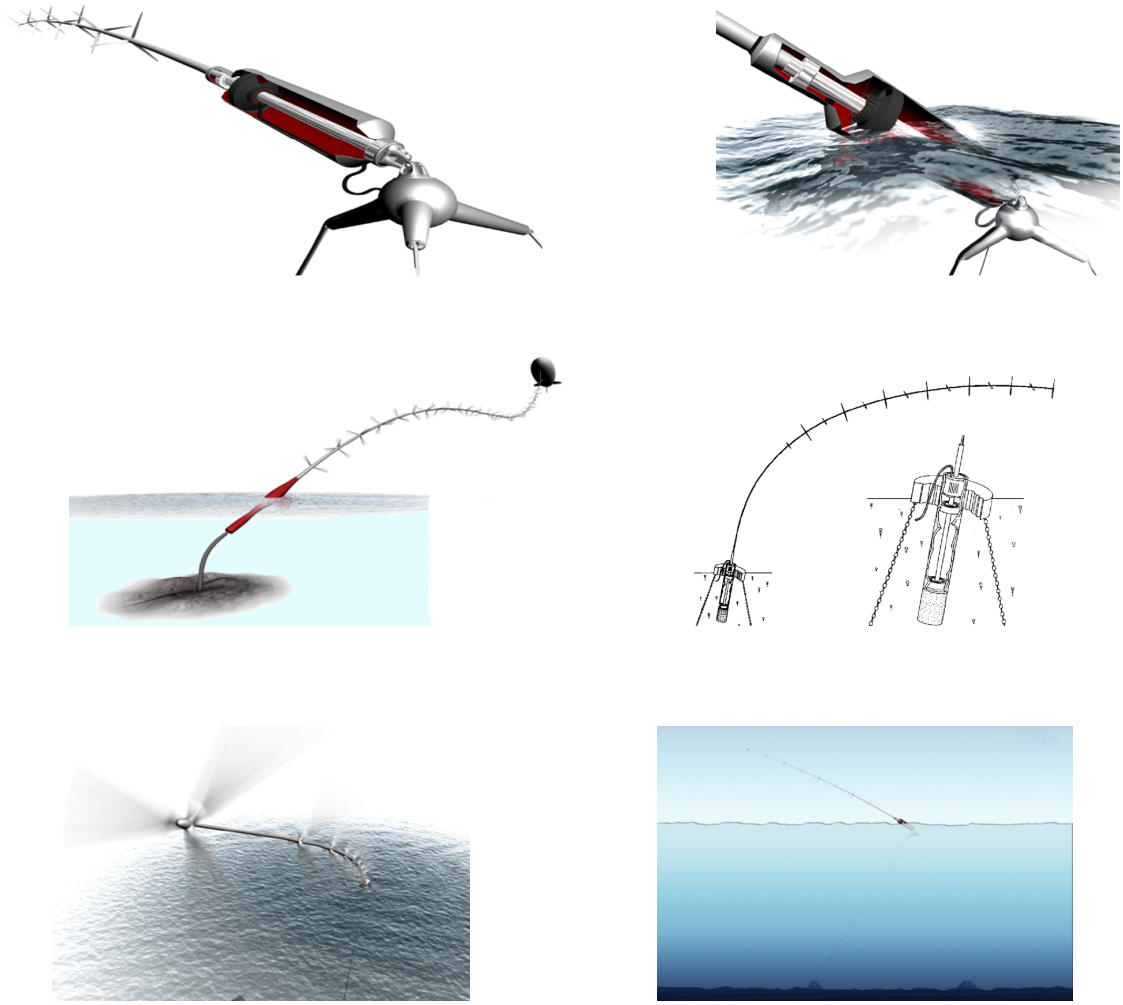


Fig V.45.- Concepto Off-Shore de la superturbina Selsam