

V.- PARQUES EOLICOS Y ANTECEDENTES DE LOS AEROGENERADORES AMERICANOS

V.1.- EL PARQUE EÓLICO

Con este nombre se conoce la instalación conjunta de gran número de generadores eólicos que generan electricidad que facilitan a las redes de suministro, resolviendo dos problemas como son la potencia relativamente baja de los aerogeneradores individuales y su producción intermitente.

El conjunto de un centenar de unidades conectadas, reduce los gastos de mantenimiento y simplifica los requisitos de interconexión de potencia. Además, se suavizan y compensan las interrupciones provocadas por turbulencias y fluctuaciones locales en la velocidad del viento.

Normalmente el concepto de parque eólico va asociado a un conjunto de aerogeneradores con potencias individuales del orden de 0,6 MW a 2 MW que suman una potencia entre 10 MW y 20 MW, aunque también existen parques eólicos con aparatos de potencia más pequeña, entre 25 kW y 50 kW, que tienden actualmente a ser sustituidos por otros más potentes.

Los problemas tecnológicos que plantean las interconexiones entre aerogeneradores requieren un estudio completo e individualizado de coordinación económica, meteorológica y social.

El almacenamiento de energía en períodos de producción excesiva se puede resolver, por ejemplo, bombeando agua en centrales hidroeléctricas.

La red de parques eólicos más extensa del mundo a principios de 1992 se encontraba en California; había 17.000 aerogeneradores de 25 kW a 50 kW instalados en sus terrenos montañosos que generaban el 1% de la energía consumida en California, y que suponía en esa época el 80% de toda la energía eólica generada en el mundo; se calculaba que para el año 2000 la energía eólica podría suministrar el 20% de la electricidad consumida en el Estado de California, pero problemas de armónicos inherentes a la propia señal eléctrica no han permitido llegar a esta situación. Actualmente se ha llegado a la conclusión de que más de un 10% de energía eléctrica de tipo eólico conectada a la red puede originar perturbaciones y averías en determinados aparatos y equipos industriales, científicos y domésticos, por lo que parece ser, por el momento, un límite superior a no sobrepasar.

Los parques eólicos se tienen que emplazar en lugares en los que el viento sea intenso y constante; la electricidad generada lo es a un precio que empieza a ser competitivo con la electricidad obtenida en las centrales convencionales hidráulicas, nucleares y térmicas.

Los parques eólicos se estructuraron en su día con un determinado número de aerogeneradores, de forma que, por ejemplo, una instalación de baja potencia con rotores de 12,5 m de diámetro podía comenzar a suministrar energía para velocidades del viento de 4 m/seg, llegando a generar una potencia nominal de 30 kW con velocidades del orden de 11 m/seg; para velocidades del viento por encima de este valor, podían mantener constante su potencia hasta velocidades de desconexión del orden de 25 m/seg.

Para mantener al mínimo posible unas necesidades de planificación, los parques eólicos se han desarrollado, con la experiencia acumulada en estos años, con un concepto técnico de constituir una estación central de distribución de energía del orden de 20 MW. Los requerimientos a tener en cuenta para su instalación, mantenimiento preventivo y reparación de aerogeneradores en lugares alejados, hacen que la estructuración de un parque eólico compuesto por aerogeneradores pequeños resulte más conveniente que una instalación única de mayor potencia; el número de aerogeneradores y la potencia nominal del parque eólico, se rigen por las necesidades constantes de suministro de potencia a la red eléctrica y por criterios económicos; desde un punto de vista económico siempre es posible ampliar un parque eólico para aumentar la generación de energía eléctrica, gracias a la estructura modular que se ha dado al conjunto de aerogeneradores que le conforman por cuanto éstos se construyen en serie.

Todas las funciones esenciales del servicio corren a cargo de unidades de control electrónico en cada uno de los sistemas aeroeléctricos, que están integradas tanto para el arranque del aerogenerador, o su interconexión a la red, como a su seguimiento y desconexión en caso de avería en la red o interrupciones breves, así como a toda una serie de funciones de seguridad y servicio que permiten la operatividad automática y casi exenta de cuidado y mantenimiento del parque eólico. La operatividad de las instalaciones de energía eólica conectadas a una red eléctrica, tienen que ser consecuentes con la frecuencia de la señal eléctrica principal, por lo que se las exige un ajuste de ciertos controles como el del ángulo de ataque de la pala que permite mantener regulado el régimen de rotación y potencia dentro de estrechas tolerancias, independientemente de las condiciones momentáneas de la red; como es natural, sólo es posible controlar la potencia generada por una instalación aeroeléctrica, en regímenes por debajo de los correspondientes a la potencia máxima dada por la velocidad instantánea del viento.

Para mantener una frecuencia fiable, incluso si el gasto másico disponible del viento sobrepasa temporalmente las necesidades de potencia de la red, es necesario tomar medidas preventivas en las técnicas de control del aerogenerador actuando sobre el ángulo de ataque de las palas, lo que ofrece posibilidades sencillas y eficaces que evitan el ascenso indeseable de la frecuencia de la red eléctrica general en esa situación. Esto supone, como ya se ha dicho y comprobado, que la máxima energía eléctrica de tipo eólico conectada a la red general no debe superar el 10% de ésta. Los daneses ya han llegado a esta cota y los españoles llegaremos próximamente.

Es posible programar en la unidad de control de la instalación aeroeléctrica una curva característica de potencia supeditada a la frecuencia, con objeto de que la potencia emitida caiga a cero antes de que se alcance la frecuencia límite superior admisible; alternativamente, también es posible consignar a las diferentes unidades de control de cada aerogenerador un parámetro de potencia teórica o una instrucción de desconexión a través de un sistema de mando remoto desde un grupo electrógeno Diesel, cuando conformen un sistema híbrido.

El período operativo de los parques eólicos no permite disponer todavía de resultados estadísticos suficientemente fiables para poder juzgar los proyectos en toda su extensión. Sin embargo, los resultados demuestran, para todos los lugares de ubicación, la existencia de una buena concordancia entre la

generación de energía comprobada y lo planificado en la fase de proyecto.

La disponibilidad temporal de las instalaciones eólicas, a largo plazo, puede ser superior al 98%, lo que se refleja en un mantenimiento inferior al 0,5% de los gastos de inversión en el parque eólico, y representan un notable ahorro económico en la producción de electricidad. Los costes del capital invertido y la producción energética anual constituyen, en términos muy generales, los factores decisivos que influyen sobre los costes de producción de energía. Los costes de operación tienen menor importancia, pero para contar con una estimación realista no se deben despreciar. Una estimación de los costes previsible para la generación de electricidad, en base a los costes efectivos de la inversión y la producción de corriente obtenida hasta la fecha, se puede llevar a cabo de acuerdo con los supuestos siguientes:

Tasa de interés anual 8%

Vida útil 20 años.

Mantenimiento preventivo y de reparación, 2% anual de los costes de inversión, y un 1% anual en seguros

Comparando estos costes con los de generación de corriente eléctrica, no se aprecian todavía ventajas claras en este tipo de instalaciones eólicas, por cuanto la potencia instalada es muy pequeña; sin embargo, su aplicabilidad económica respecto del consumo de gasóleo en sistemas híbridos, en los que la generación está más equilibrada, no sólo depende del creciente nivel de los precios de los combustibles fósiles, sino también de la optimización técnica y económica del parque eólico. Se han conseguido algunas mejoras modificando el diámetro del rotor y la altura de la torre, según el lugar de ubicación, para obtener la misma potencia, con unos costes operativos y de inversión prácticamente iguales.

Perspectivas.- Las experiencias operativas que se han hecho en los parques eólicos han motivado el interés por aprovechar más a fondo la energía eólica, en base a ampliar los parques eólicos existentes o de instalar nuevos puntos de ubicación. Los parques eólicos se consideran un complemento adecuado a las centrales eléctricas convencionales, dentro del 10% indicado, interés que no sólo se debe a los costes de generación de energía que resultan de los cálculos de rentabilidad, sino también a los criterios del aprovechamiento de la energía eólica, que son más amplios; es importante considerar que el cálculo de los costes de generación de electricidad se hagan a largo plazo y se mantengan al margen de la evolución de los precios de los combustibles.

Con el estudio de las instalaciones de energía eólica disponibles en la actualidad, se han sentado las bases para una más amplia explotación racional de la energía eólica en los llamados países umbrales y en vías de desarrollo. No sería de extrañar que aerogeneradores de primera generación, retirados de algunos parques eólicos, se reutilizasen en estos países.

Es importante estudiar con detalle los aspectos ambientales de los parques, construirlos con esmero y dotarlos de elementos singulares que los caractericen. Los aerogeneradores tienen que adecuarse a situaciones de un mayor aprovechamiento de los vientos locales existentes, es decir, aprovechar vientos más bajos que se pueden dar en zonas más accesibles, que implicarían menores costes de instalación. Su producción en serie incide en menores costos de fabricación. Equipos sofisticados de control, telemando y telegestión permitirán una explotación más racional de los parques eólicos y una mejor calidad de la señal de la energía suministrada a la red. También permitirán adaptar las turbinas eólicas a situaciones insulares, donde el factor de calidad de la energía suministrada es más crítico, por no existir otras fuentes de energía convencionales.

Los costes de generación de electricidad en un parque eólico eran, en base a estos supuestos, del orden de 12 Ptas/kW del año 1998, tendentes a la baja. En un mercado cada vez más competitivo, la relación (coste/producción) se tiene que reducir.

En 1980 el coste de MW instalado era de 200 millones de ptas, y el de generación, de 0,16 dólares USA/kW. En la actualidad estos costes se han reducido por debajo de los 100 millones por MW instalado y 0,08 dólares USA/kW generado. La adecuación a tarifas cada vez más ajustadas hará más importante la reducción de la relación (coste/producción)

Tabla V.1.- Potencia instalada en Europa en MW

1995	1996	1997	1998	1999	2000
2529	3496	4695	6430	8960	12160

Tabla V.2.- Potencia eólica en Europa

País	Potencia hasta 1999	MW instalados en 1999
Austria	42	12
Bélgica	9	3
Dinamarca	1700	289
Finlandia	38	21
Francia	19	0
Alemania	4444	1569
Grecia	121	73
Irlanda	68	5
Italia	281	101
Luxemburgo	10	1
Holanda	409	69
Portugal	57	6
España	1180	346
Suecia	195	19
Reino Unido	1342	18
Total	9915	2532

La potencia eólica total conectada a red en Europa se recoge en las Tablas V.1.2; por ejemplo, en 1998 se instalaron 1735 MW, a los que correspondería una producción de 296 Ktep. Alemania es el primer país por energía eólica generada, (6113 MW instalados hasta el año 2000), habiendo superado a países como Dinamarca, considerado el pionero de la industria de la energía eólica en Europa.

Es posible que el sector eólico haya sido una explosión en España, probablemente demasiado rápida; se van a cumplir holgadamente los objetivos del Plan de Fomento de las Energías Renovables y habrá que empezar a prever soluciones para cuando haya un exceso de potencia eventual, momento en que la red tendrá que limitar la entrada de energía eólica en horas valle.

V.2.- IMPACTO AMBIENTAL DE LOS AEROGENERADORES EOLICOS

Los principales efectos de los aerogeneradores sobre el medio ambiente son los siguientes:

Efectos meteorológicos sobre el microclima.- Se estima que la reducción de la velocidad del viento por los aerogeneradores tiene, aproximadamente, las mismas consecuencias sobre el clima local que un grupo de árboles, no esperándose que se produzcan cambios significativos.

Efectos sobre la fauna y flora.- El efecto mas significativo está relacionado con el obstáculo que los rotores representan para el vuelo de las aves. Sin embargo, la experiencia obtenida hasta el momento ha demostrado que la probabilidad de choque es sumamente baja, debido a la rotación lenta de las máquinas y su bajo coeficiente de solidez.

Ruido.- La intensidad del ruido generado por las máquinas eólicas ha sido investigado por la NASA

mediante un prototipo de 100 kW. El estudio acústico abarcó un espectro de frecuencias comprendido en el rango de audición entre 15 y 20.000 Hz.

El nivel acústico medido cerca de la máquina fue de 64 dB para las frecuencias comprendidas en el rango audible, con un nivel de ruido de fondo de 52 dB, observándose que el ruido de la máquina era inaudible por encima del ruido de fondo a distancias del orden de 200 metros.

El ruido generado por una máquina de 2,5 MW a pie de torre es similar, en cuanto al tipo de intensidad, al de un automóvil circulando por una autopista, desapareciendo el ruido a una distancia relativamente pequeña de la máquina.

El ruido correspondiente a frecuencias inferiores al rango audible es producido por la circulación del aire sobre obstáculos como la torre y las palas, y puede afectar a la salud ocasionando problemas si se superan los 100 dB; las mediciones efectuadas no han sobrepasado los 75 dB.

Existe sin embargo otra experiencia, en una aeroturbina de 2 MW en la que sí se han presentado ruidos molestos para los residentes en las inmediaciones, ligados a los fenómenos aeroacústicos antes mencionados; en dicha máquina, cuyo rotor estaba a sotavento de la torre, se producía una interacción de muy baja frecuencia entre las palas y la torre, que originaba ruidos por debajo del rango audible que obligaron a modificar el diseño del aerogenerador, reduciendo la velocidad periférica de las palas.

Este problema tiene menores probabilidades de presentarse en el caso de posicionar el rotor a barlovento, si bien se estima que durante el diseño se puede evitar su aparición, aun en el caso de estar posicionado a sotavento. Lo cierto es que, actualmente, dada la proliferación de parques eólicos, son muchas las quejas, por este motivo, de personas que viven en sus proximidades y a las que nadie, en ningún momento, pidió su aprobación para la instalación; estos detalles habrá que cuidarlos mucho.

Interferencias con ondas de televisión y radiocomunicaciones.- Las palas del aerogenerador pueden reflejar las ondas electromagnéticas, pero se estima poco probable que produzcan interferencias en las señales de radio y navegación salvo a distancias pequeñas de la máquina.

La señal de televisión puede quedar afectada a distancias de unos centenares de metros e, incluso, hasta 1 ó 2 km. Esto puede ocurrir si el aerogenerador está emplazado a gran altura y si los receptores de televisión reciben normalmente una señal débil, debido a la distancia o a efectos de blindaje causados por el terreno sobre la estación de televisión. Influyen también las posiciones relativas de la estación, el receptor y el aerogenerador.

Consumo de energía.- Una de las ventajas de la energía eólica frente a otras nuevas fuentes de energía, es que el balance energético de los aerogeneradores es claramente positivo, recuperando el coste de la energía empleada en la producción de sus materiales constitutivos y en su construcción en un período del orden de 7 meses de funcionamiento.

Seguridad y utilización del terreno.- El principal problema relacionado con la seguridad radica en la posibilidad de rotura de una pala. Dada la alta velocidad periférica del rotor, se estima que el área de seguridad en torno a un aerogenerador debe comprender un círculo de unos 200 metros con centro en la base de la torre de la máquina.

Con los métodos de cálculo existentes actualmente la probabilidad de que se produzca dicha rotura es pequeña por lo que la zona de seguridad se puede utilizar para usos agrícolas, ganadería, circulación de vehículos y otros fines equivalentes. La superficie de terreno ocupada por un aerogenerador de 1 MW es pequeña, (2000 m²); la zona de seguridad abarcaría 120.000 m².

En el caso de una agrupación de aerogeneradores es necesario que la distancia entre ellos guarde un mínimo necesario para evitar interferencias aerodinámicas entre máquinas, que es del orden de 7 a 10 veces el diámetro del rotor, lo que implica distancias de aproximadamente 1 km para generador-

res de 2,5 MW. El terreno entre aerogeneradores podría ser utilizado para otros fines respetando las servidumbres impuestas por las carreteras de acceso a las máquinas y las líneas eléctricas.

Protección contra el rayo.- Como los aerogeneradores sobresalen del entorno que les rodea, constituyen unos conductores privilegiados de transmisión de la electricidad estática de las nubes hacia el suelo. Para evitar que durante una tormenta se estropeen por un rayo, conviene conectar el pilón soporte del aerogenerador a una buena toma de tierra y colocar pararrayos en los cables eléctricos que unen el aerogenerador a la red de utilización, (chispómetro de gas, y en las instalaciones de grandes potencias, eventualmente variómetros). Como los chispómetros de pararrayos se regulan para una tensión doble de la tensión máxima eficaz que pueden producir en sus bornes, se deben unir a la toma de tierra mediante un conductor lo más corto posible.

V.3. 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.



Fig V.1.- Aerogenerador Jacobs de 1 kW

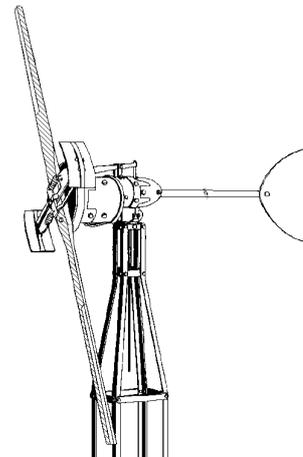


Fig V.2.- Aerogenerador Windcharger

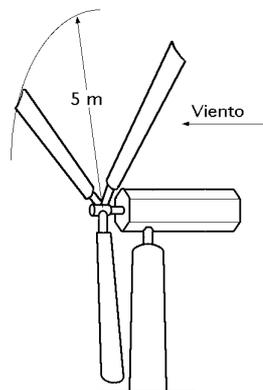
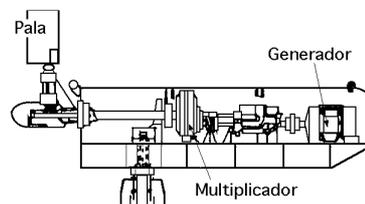


Fig V.3.- Aerogenerador Windstream 33



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.

En el campo de las grandes máquinas, Fales proyectó 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.

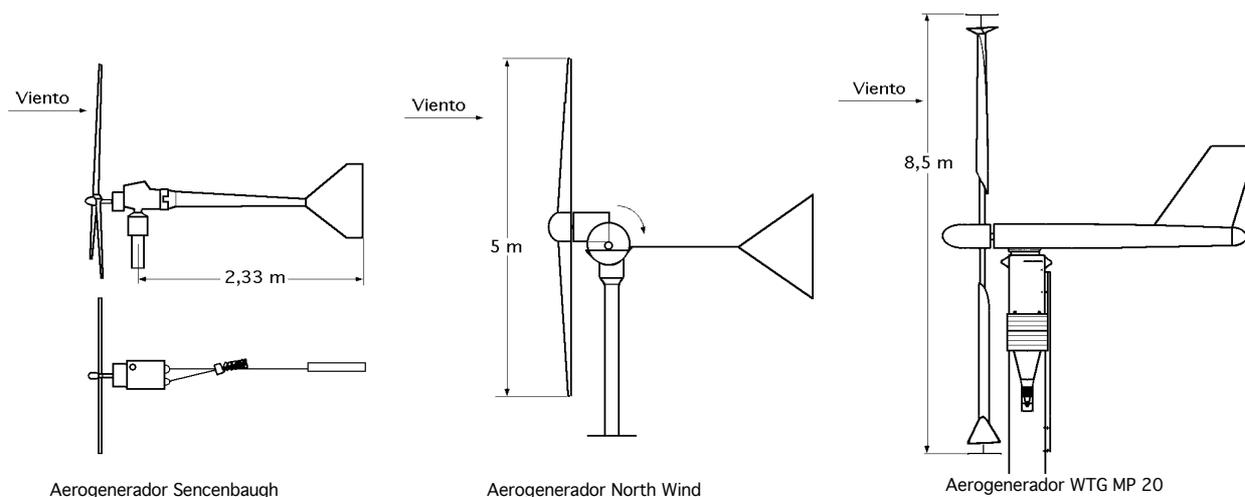


Fig V.4.- Pequeños aerogeneradores americanos

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

Marca	Windcharger	Sencenbaugh	North wind	KTG
Modelo	20 - 110	500-1 000	HR2	MP 20
Palas	2, madera,	3, madera,	3, madera,	3, acero inox.
Rotor	palas fijas Barlovento (upwind)	palas fijas Barlovento (upwind)	palas fijas Barlovento (upwind)	palas fijas Barlovento (upwind)
Diámetro (m)	2,30 a 3,35	1,80 a 3,60	5	8,5
Potencia kW	0,25-1	0,5-1	2,2	20 (m'xx 36)
Veloc. nominal (m/seg)	8,5 a 9	11 a 10	9	13,5
N r.p.m.	400	1000 a 290	250	120
Relación de multip. (k)	1 1	1 3	1	15
Generador	c.c. c.c.	c.c. c.c.	c.c.	inducción
Orientación del sistema	Plano de estabilización	Plano de estabilización	Plano de estabilización	Plano de estabilización

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. Putnam y J. B. Wilbur. 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 1.954 se rompiera una pala debido a un fallo estructural, Fig V.5.

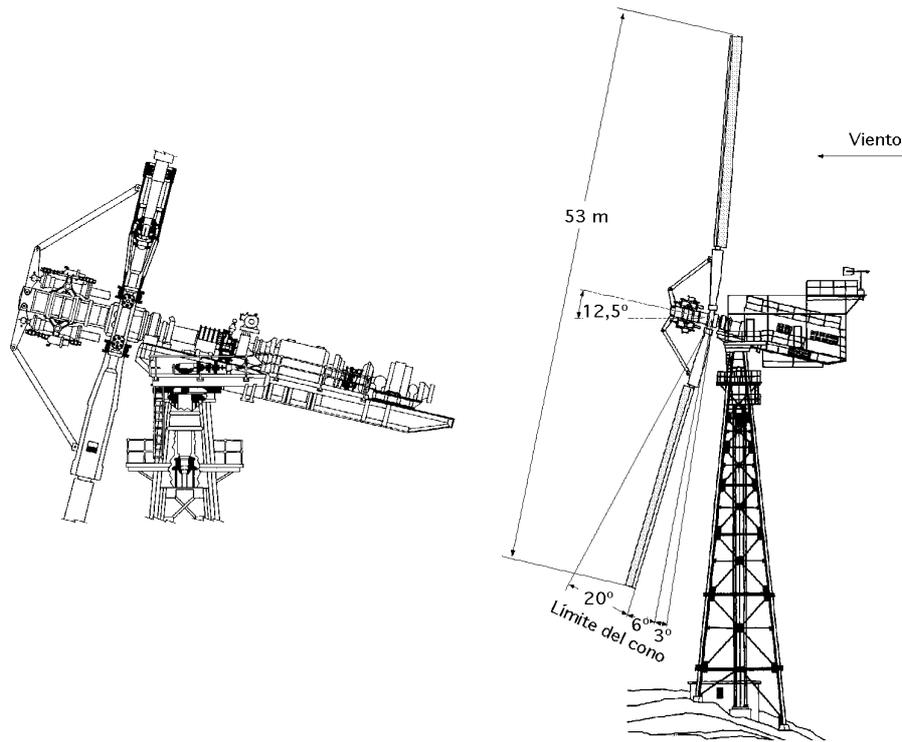


Fig V.5.- Aerogenerador Smith-Putnam de 1,25 MW (1941) Central Grandpa's Knob (Vermont) (USA)

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 rev/min, Potencia nominal: 1,25 MW
- Velocidad nominal: 29 rev/min.
- 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 par-

cialmente 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 12° 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 eólico de 6,5 MW de Percy Thomas - 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.

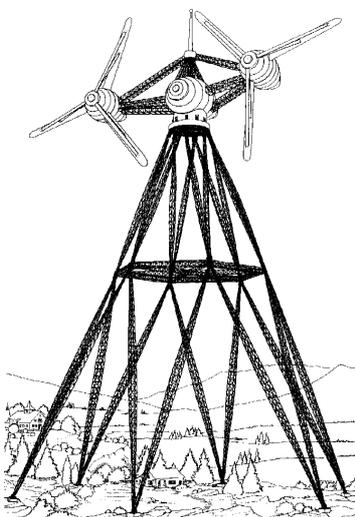


Fig V.6.- Aerogenerador eólico de 6,5 MW de Percy Thomas (1945)

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.

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 auto-orientación 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 metros de diámetro con buje basculante
- N° de palas: 2, de paso variable con perfil aerodinámico tipo NACA 230 XVI
- 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 voltios, 125 kVA 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.



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

Aerogenerador experimental MOD 0A de 200 kW.- Este prototipo de 200 kW estaba formado por un rotor bipala de 38 metros 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 26° y una cuerda de entronque en el cubo de 1,24 metros y en la periferia de 0,46 metros, Fig V.7.

La torre era de celosía con una altura de 30 metros; 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.

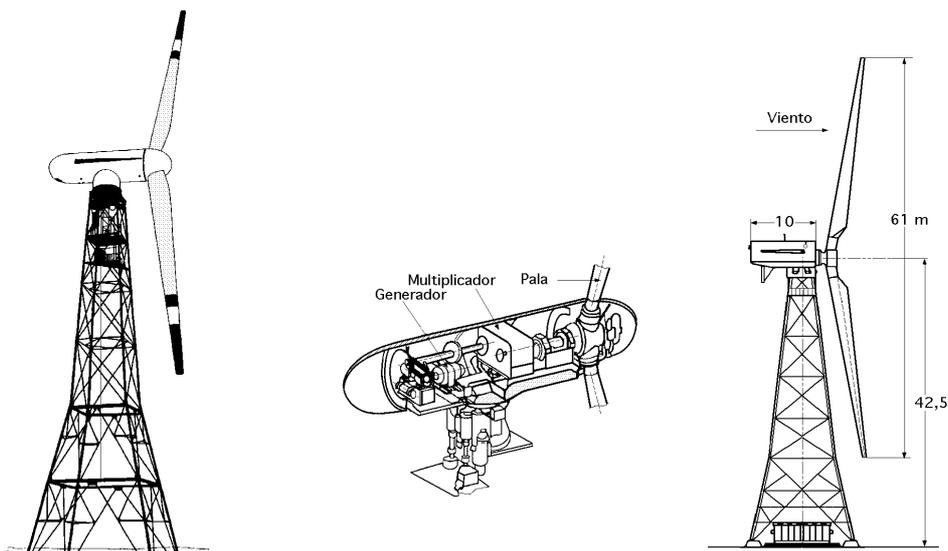


Fig V.8.- Aerogenerador MOD 1

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 específica: 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.

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 específica: TSR = 6,7.
- Velocidad de rotación: 17,5 rev/min.; velocidad de conexión 5 m/seg; velocidad de desconexión 20 m/seg.
- Generador: alternador de 4 polos, 1 800 rev/min.
- 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

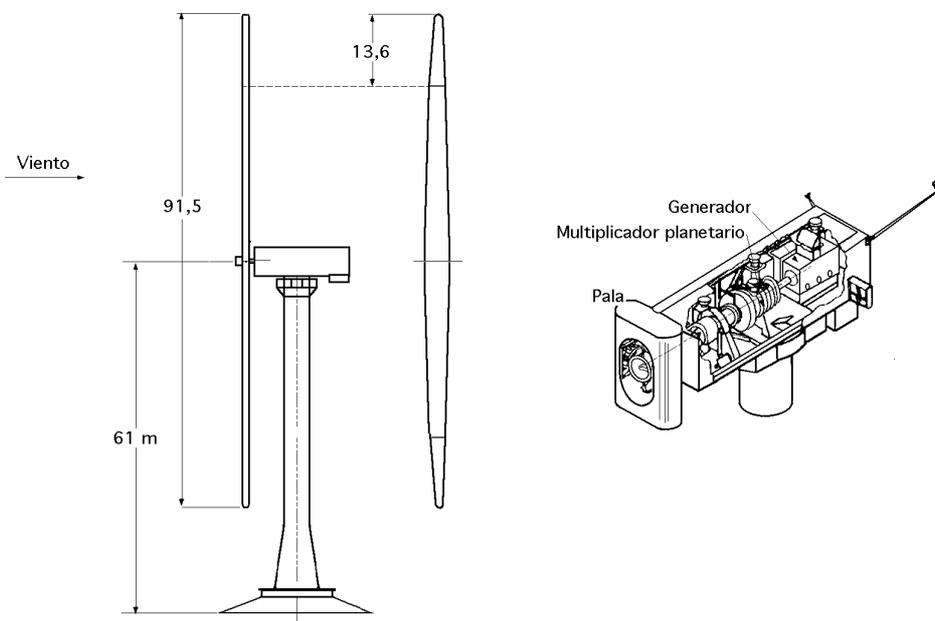


Fig V.9.- Aerogenerador experimental MOD-2 de 2,5 MW

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 5° 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 metros de diámetro y velocidades nominales de 17 m/seg. Finalizada esta fase del proyecto eólico, el Departamento de Energía elaboró otro programa para 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.

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 las 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.