III.- MAQUINAS EÓLICAS

CARGAS, ORIENTACIÓN Y REGULACIÓN

pfernandezdiez.es

III.1.- CLASIFICACIÓN

Las máquinas eólicas han sido estudiadas por el hombre en forma intensiva y dentro de ellas existen en la actualidad diferentes tipos que van desde pequeñas potencias, a las grandes máquinas americanas y alemanas de varios MW.

Son numerosos los dispositivos que permiten el aprovechamiento de la energía eólica, pudiéndose hacer una clasificación de los mismos según la posición de su eje de giro respecto a la dirección del viento.

En las máquinas eólicas de eje horizontal, para obtener en las palas una velocidad angular regular y uniforme $\breve{w}$, para una determinada velocidad del viento $\vec{v}$ se requiere que tanto la dirección del viento, como su velocidad, se mantengan constantes con respecto a las palas.

Por el contrario, en las máquinas eólicas de eje vertical, manteniendo las mismas condiciones regulares en la velocidad del viento y en la velocidad angular de las palas, resulta que éstas pueden estar sometidas a un viento aparente de dirección y velocidad continuamente variables, por lo que en estas máquinas, el flujo aerodinámico resulta ser muy complicado, ignorándose en muchas ocasiones las verdaderas posibilidades de las mismas.

Las máquinas eólicas se pueden clasificar en $\begin{cases} \textit{Aeroturbinas de eje horizontal y eje vertical} \\ \textit{Sistemas giromill (eje vertical y palas verticales} \\ \textit{Sistemas especiales} \end{cases}$

Dentro de ellas las aeroturbinas de eje horizontal son las más desarrolladas desde los puntos de vista técnico y comercial.

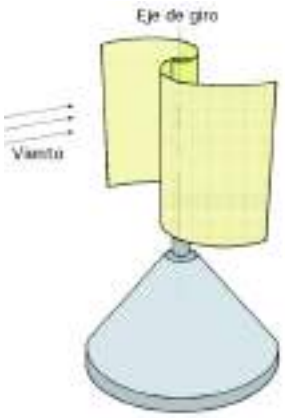

Fig III.1.- Rotor Savonius



Fig III.2.- Molino multipala

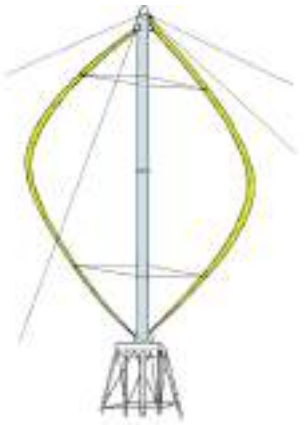

Fig III.3.- Aerogenerador Darrieux

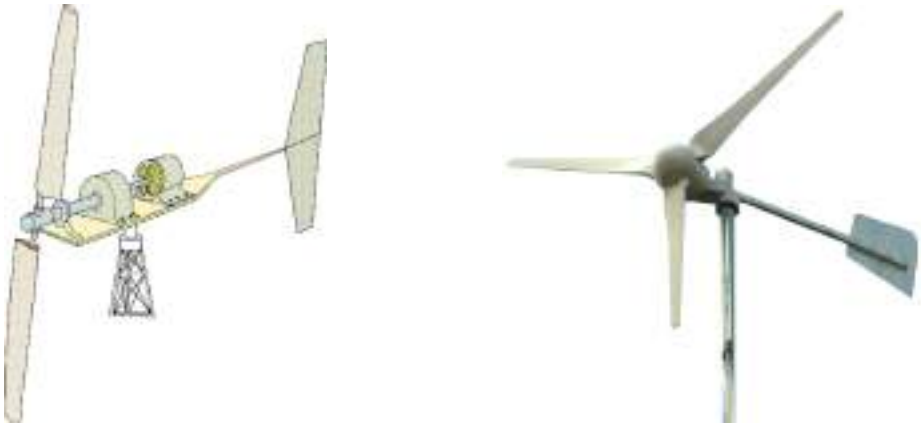

Fig III.4.- Aerogeneradores clásicos de hélice

Maquinas eólicas de eje horizontal.- Las aeroturbinas de eje horizontal se suelen clasificar según su velocidad de giro o según el número de palas que lleva el rotor aspectos que están íntimamente relacionados, en rápidas y lentas; las primeras tienen un número de palas no superior a 4 y las segundas pueden tener hasta 24.

Los principales tipos de máquinas eólicas de eje horizontal, son:

a) Máquinas que generan un movimiento alternativo, que se utilizan para el bombeo de agua
b) Máquinas multipala
c) Hélices con palas pivotantes (ángulo de ataque variable)
d) Hélices con palas alabeadas, sofisticadas, que incluyen clapetas batientes y alerones de ángulo variable

Los aerogeneradores de eje horizontal tipo hélice Fig III.4, constan de una aeroturbina, de una góndola o navecilla que contiene al generador eléctrico, dinamo o alternador, al sistema de acoplamiento que puede ser a su vez multiplicador del número de revoluciones proporcionadas por la hélice y al sistema de control y orientación; todo esto va montado sobre una torre en la que hay que vigilar con sumo cuidado sus modos de vibración.

La hélice puede presentar dos tipos de posiciones frente al viento, como son:

*Barlovento **upwind**, en la que el viento viene de frente hacia las palas, teniendo el sistema de orientación detrás, aguas abajo.*

*Sotavento **downwind**, en la que el viento incide sobre las palas de forma que éste pasa primero por el mecanismo de orientación y después actúa sobre la hélice.*

Las aeroturbinas lentas tienen un TSR pequeño y gran número de palas; sus aplicaciones van destinadas generalmente al bombeo de agua.

Las aeroturbinas rápidas tienen un TSR alto y el número de palas tiende a ser menor. Suelen ser tripalas, TSR = 4, y en algunos casos bipalas, TSR = 8, habiéndose diseñado y construido, incluso, aeroturbinas con una sola pala.

El proceso de funcionamiento de estas máquinas es diferente, por lo que respecta al tipo de la acción debida al viento que las hace funcionar; en las máquinas lentas la fuerza de arrastre es mucho más importante que la de sustentación, mientras que en las máquinas rápidas la componente de sustentación es mucho mayor que la de arrastre.

El número de palas también influye en el par de arranque de la máquina, de forma que una máquina con un rotor con gran número de palas requiere un par de arranque mucho mayor.

Maquinas eólicas de eje vertical.- Entre las máquinas eólicas de eje vertical se pueden citar:

a) El aerogenerador Savonius Fig III.1 que puede arrancar con poco viento, siendo muy sencilla su fabricación; tiene una velocidad de giro pequeña y su rendimiento es relativamente bajo.

b) El aerogenerador Darrieux o de catenaria Fig III.3, requiere para un correcto funcionamiento, vientos de $4 \div 5$ m/seg como mínimo, manteniendo grandes velocidades de giro y un buen rendimiento; se construyen con 2, 3 y 4 láminas

c) El molino vertical de palas tipo giromill o ciclogiro que deriva del Darrieux; tiene entre $2 \div 6$ palas.

El modelo Darrieux arranca mal, mientras que el Savonius se puede poner en funcionamiento con una pequeña brisa; debido a ello se puede hacer una combinación sobre un mismo eje de ambas máquinas de forma que un rotor Savonius actúe durante el arranque y un rotor Darrieux sea el que genere la energía para mayores velocidades del viento Fig III.28.

Las ventajas de los aerogeneradores de eje vertical frente a los de eje horizontal, son:

a) No necesitan sistemas de orientación

b) Los elementos que requieren un cierto mantenimiento pueden ir situados a nivel del suelo

c) No requieren mecanismos de cambio de revoluciones, por cuanto no suelen emplearse en aplicaciones que precisen una velocidad angular constante

Las ventajas de los aerogeneradores de eje horizontal respecto de los de eje vertical son:

a) Mayor rendimiento

b) Mayor velocidad de giro (multiplicadores más sencillos)

c) Menor superficie de pala S a igualdad de área barrida A

d) Se pueden instalar a mayor altura, donde la velocidad del viento es más intensa

III.2.- AEROGENERADORES DE EJE HORIZONTAL

Desde los primeros diseños de aerogeneradores para la utilización comercial, hasta los actuales, ha habido un progresivo crecimiento en la potencia de las turbinas (mayores rotores y alturas de torre), con progresivos descensos en el coste de generación por kWh.

Los aerogeneradores de eje horizontal se clasifican en $\begin{cases} \text{- lentos} \\ \text{- rápidos} \end{cases}$, según $\begin{cases} \text{su velocidad de giro} \\ \text{el número de palas del rotor} \end{cases}$, aspectos que están íntimamente relacionados.

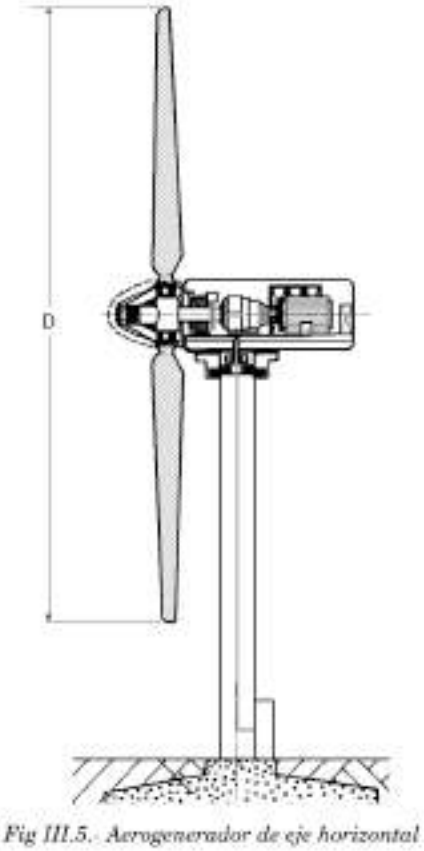

Fig III.5.- Aerogenerador de eje horizontal

En los aerogeneradores de eje horizontal rápidos, el rotor está constituido por una hélice de 2 o más palas; los perfiles utilizados normalmente en las mismas son muy parecidos al perfil de ala de avión, por cuanto estos están muy estudiados y se conocen muy bien sus características; dichos perfiles se eligen teniendo en cuenta el número de revoluciones por minuto que se desea adquiera el aparato, definiéndose el perfil en función de:

a) La forma de la estructura del mismo respecto a sus líneas medianas o cuerdas a distintas distancias del eje de giro

b) De su espesor con relación a la longitud característica de la cuerda

c) De la simetría o no de las palas, etc.

La forma de la pala es función de la potencia deseada, al igual que su velocidad de rotación, eligiéndose perfiles que no creen grandes tensiones en los extremos de las palas por efecto de la fuerza centrífuga, de forma que el número de revoluciones por minuto máximo $n_{máx}$ no supere la relación $(n_{máx}\, D = 2000)$ siendo D el diámetro de la hélice en m.

Para aerogeneradores destinados a la obtención de energía eléctrica, el número de palas puede ser de 2 ó 3, por cuanto la potencia generada no depende más que de la superficie A *barrenada* por la hélice, y no del número de palas. La aeroturbina puede accionar dos tipos distintos de generadores eléctricos, de corriente continua (dinamos), o de corriente alterna (síncronos, asíncronos, etc), bien directamente o mediante un sistema de multiplicación de engranajes Fig III.6, en la que se observa que los ejes del aerogenerador y del alternador pueden estar alineados o no. Los primeros di-

seños que eran de potencias pequeñas y velocidad fija, tenían generadores de inducción directamente conectados a la red.

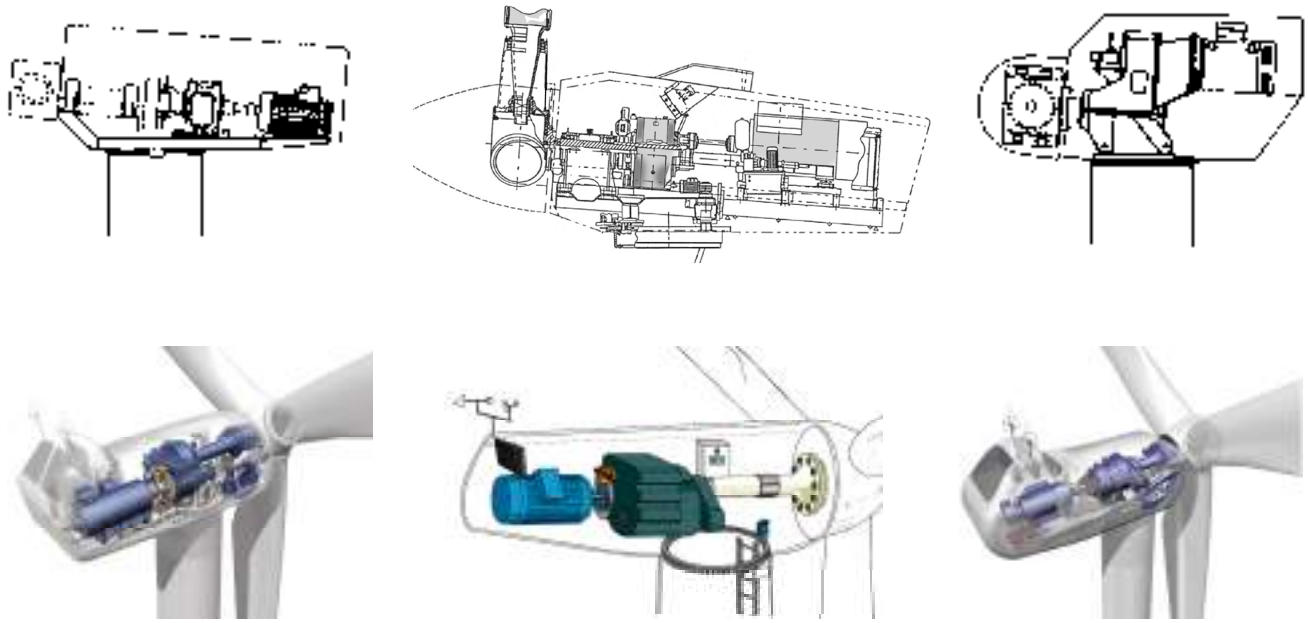

Fig III.6.- Disposiciones diversas de la torreta de un aerogenerador

La potencia nominal, en primera aproximación, viene dada por la expresión:

$$N = 0{,}20\, D^2 v^3$$

en la que N viene dada en W, D en m y $\vec{v}$ en m/seg.

Con el diagrama de la Fig III.7 se determina la potencia de un aerogenerador rápido en función del nº de rpm, el TSR, la velocidad del viento y el diámetro de la superficie barrida por las palas

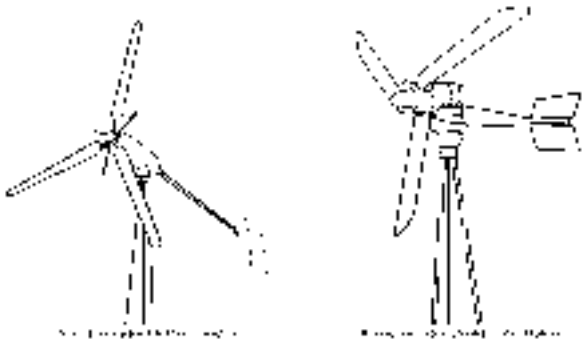

Fig III.7.- Aerogeneradores antiguos de eje horizontal tripala y timón de orientación

La potencia máxima de un aerogenerador rápido se obtiene para valores del TSR altos, del orden de $7 \div 10$, requiriéndose velocidades del viento superiores a 6 m/seg.

Su rendimiento es del orden del $35\% \div 40\%$, que es un valor más alto que el de los multipala.

Con 3 palas se consigue un par de arranque importante, por cuanto en la puesta en marcha la fuerza ejercida por el viento es proporcional al número de palas (de ahí el uso de rotores multipala

para el bombeo de agua, que requieren un buen par de arranque dadas las características del fluido a bombear), cosa que no se consigue con aparatos bipala que, en algunos casos, precisan de energía adicional para comenzar a funcionar.

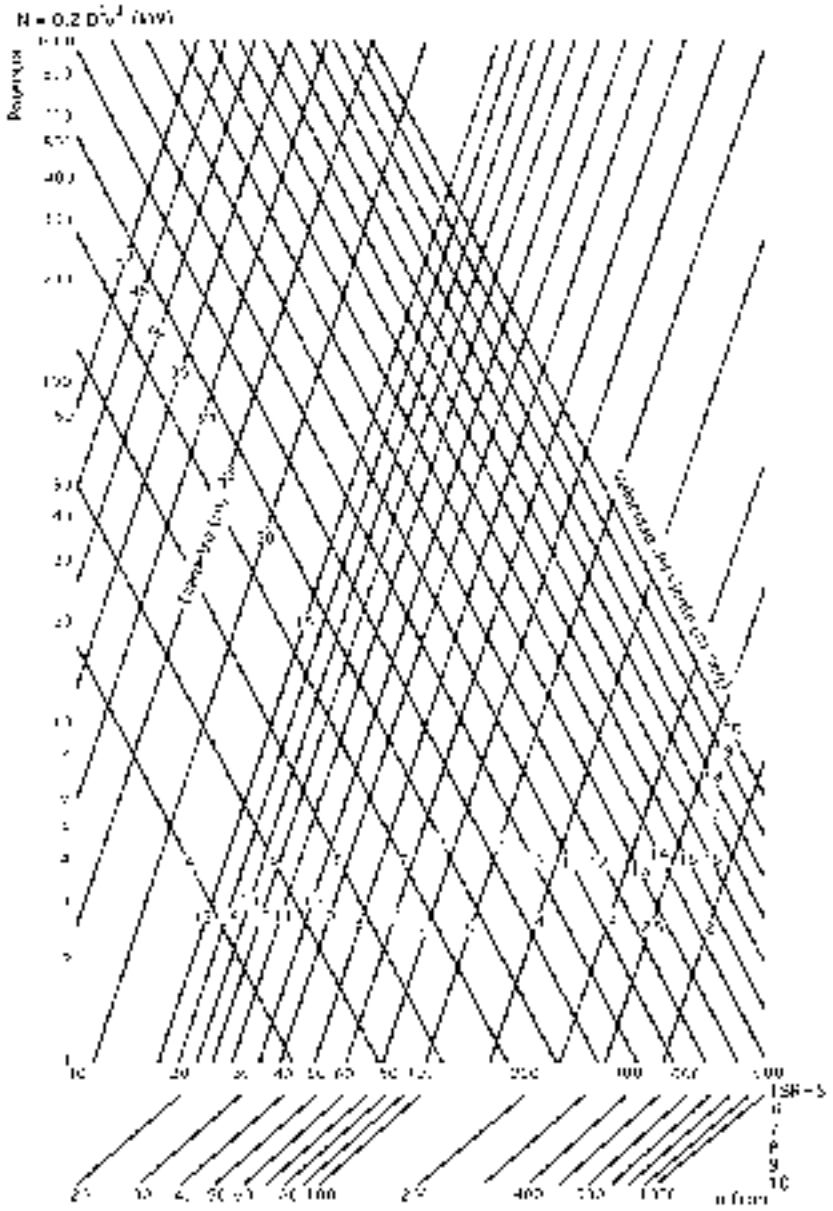

Fig III.7.- Diagrama para la determinación de la potencia en aerogeneradores rápidos, de hasta 1 MW

III.3.- CARGAS QUE ACTÚAN SOBRE EL ROTOR

Las cargas que actúan sobre el rotor se pueden clasificar en estáticas y dinámicas.

La fuerza centrífuga es una carga estática perpendicular al eje de giro; la pala suele colocarse ligeramente inclinada, proporcionando dicha fuerza centrífuga una componente de tracción a lo largo de la pala y otra de flexión en sentido contrario al de las cargas aerodinámicas; los esfuerzos estáticos que dichas cargas originan son muy pequeños.

Las cargas dinámicas son debidas al giro de la pala existiendo también cargas transitorias debidas a las maniobras de la máquina.

La gravedad actúa como una carga periódica que se comporta como una fuerza oscilante en el plano del rotor, apareciendo una desalineación por cuanto el rotor nunca funciona perpendicularmente a la acción del viento, sino que tiene oscilaciones que generan cargas dinámicas.



Fig III.9.- Flexión de las palas del rotor por la acción del viento

Otros tipos de cargas dinámicas son el efecto de la variación del viento con la altura Fig III.9, o el efecto de la estela sobre la torre, sobre todo si el rotor está detrás de la torre, o los efectos debidos a las turbulencias. Estas cargas dinámicas originan un problema de vibraciones, en el que hay que estudiar la frecuencia de las fuerzas que intervienen. También hay que tener en cuenta los cambios de paso de cada pala y los efectos de las maniobras de orientación del rotor.

Los efectos estáticos y dinámicos que actúan sobre el rotor se estudian en situaciones límites, tales que si en ellas se asegura que la pala no se rompe, ésta no se romperá en ninguna de las otras situaciones previsibles.

Situaciones límite a tener en cuenta:

a) *Casos operativos (régimen estacionario)* en los que se exige que los esfuerzos que actúan en la estructura estén siempre dentro de los límites de fatiga y, además, que no alcancen nunca los límites del esfuerzo de pandeo, ya que la pala se comporta como una viga empotrada y en ella aparecen esfuerzos de tracción y compresión que provocan la fatiga.

- El primer caso operativo se corresponde con una *velocidad nominal del viento* que provoca la máxima carga y se supone con potencia y revoluciones nominales y paso de pala nulo; este caso corresponde a la carga máxima de la pala y es un esfuerzo dinámico máximo

- El segundo caso se corresponde con la máxima velocidad del viento y se supone también con potencia y revoluciones nominales, pero con paso de pala máximo; este caso es también de esfuerzo dinámico máximo

- El tercer caso se corresponde con la velocidad máxima del viento necesaria para provocar el arranque, con potencia cero y paso cero; se corresponde con un gran esfuerzo estático

b) Los *transitorios* se incluyen en los casos anteriores como esfuerzos dinámicos, con velocidades próximas a la nominal y a la de desconexión (embalamiento).

c) Los *casos extremos* a tener en cuenta son: $\begin{cases} \textit{El huracán y el rotor en bandera} \\ \textit{La velocidad del viento se duplica sin cambio de paso} \end{cases}$

Vibraciones.- *El rotor de dos palas,* en general, genera vibraciones ya que durante la rotación normal el c.d.g. de las palas describe, teóricamente, una circunferencia, pero debido a su propio peso y a la acción del viento que tiende a flexar las palas, el c.d.g. del sistema durante la rotación no está sobre el eje de giro del rotor, debido al plegamiento y deformación de las palas bajo su propio peso, como se indica en la Fig III.9; este efecto se puede evitar parcialmente, equilibrando las palas mediante unos contrapesos que tiendan a hacer coincidir el c.d.g. del conjunto de las mismas con el eje de giro.

Sin embargo, y aún equilibrada, la hélice bipala genera vibraciones de frecuencia doble a la de rotación, debido a efectos de inercia, que si llegan a acoplarse con las vibraciones de la estructura soporte, pueden destruir el aparato. Estos inconvenientes no se presentan, en general, en el rotor tripala, aunque su equilibrado es más difícil de conseguir.

El diseño del soporte del aerogenerador y de la torre se tiene que estudiar con cuidado, de forma que sus frecuencias propias de vibración no estén próximas a las frecuencias generadas por la rotación de la hélice y así evitar el que entren en resonancia, siendo su estudio bastante complicado.

Para las aeroturbinas cuyo diámetro sea inferior a 30 ó 40 m se puede utilizar un cubo rígido, especialmente cuando la hélice es tripala porque este tipo de rotor es más equilibrado que el bipala.

El momento de cabeceo es menor para el primero, por lo que la fatiga a la flexión del eje del rotor se reduce. Cuando el diámetro es superior a 40 m parece preferible la utilización del cubo articulado (flexible) para los rotores bipalas. El momento de cabeceo disminuye y la fatiga a la flexión de las palas, del eje y de la torre se reduce considerablemente.

El soporte más barato tipo de baja frecuencia, consiste en una torre de hormigón o de acero; este tipo es más ligero pero menos resistente que el de frecuencia elevada, que es rígido. Sea cual sea el tipo escogido, hay que hacer constar que el soporte se debe calcular para resistir a la fuerza centrífuga que aparecería en su parte más elevada en caso de rotura de una pala.

Esto es importante para la seguridad de los aerogeneradores; las estadísticas muestran que muchas instalaciones han sido destruidas por la rotura de una pala. En Suecia, todas las instalaciones de gran potencia se han calculado para aguantar este tipo de accidente.

III.4.- MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Una cuestión que hay que tener muy en cuenta en el diseño de un rotor es el problema estructural, por cuanto siempre es posible diseñar una pala muy buena desde el punto de vista aerodinámico, pero que no sea capaz de resistir los esfuerzos a que esté sometida.

Otra cuestión importante es el proceso de fabricación del rotor, puesto que una disminución de costes en este sentido tiene que rebajar el coste de la instalación.

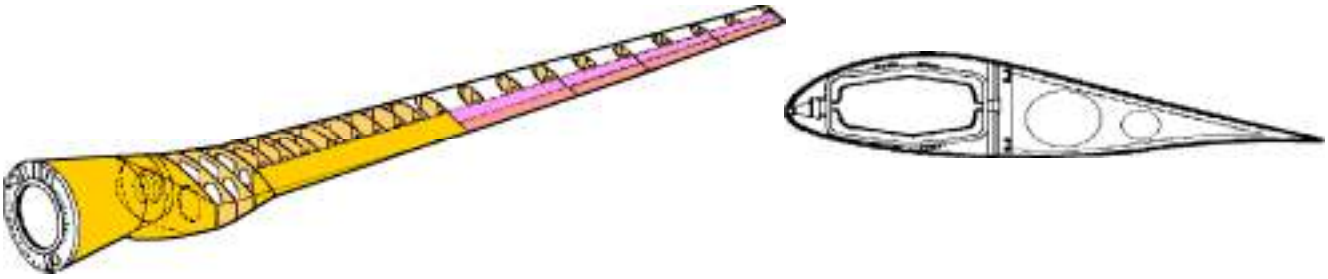

Fig III.10.- Estructura moderna de una pala

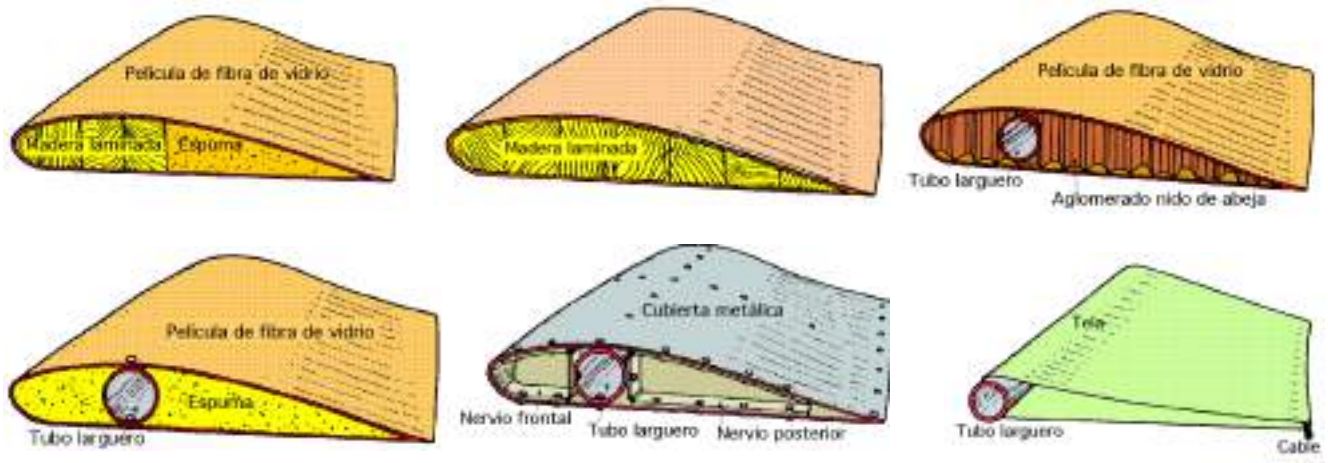

Fig III.11.- Algunas soluciones constructivas antiguas para la fabricación de las palas

Las palas van a estar sometidas a condiciones de trabajo muy duras, con fenómenos de corrosión, erosión, contracciones y dilataciones debidas a las vibraciones (fatiga), etc. y de ahí el que sea muy importante el material conque se construyan; en su fabricación se han utilizado materiales baratos como telas (equipos económicos), maderas, pero una de las soluciones más interesantes consiste en utilizar estructuras de aleaciones de aluminio (duraluminio) con chapa fina, larguero central resistente y costillas que le proporcionen una cierta rigidez, Fig III.10; ésta parece la concepción más simple pero quizás sea la más cara; por ello se pueden utilizar otros procedimientos como sustituir el aluminio por acero con el inconveniente de un mayor peso para resistencias análogas.

Otro tipo de estructura previsible es la de fibra de vidrio, que se puede realizar de diversas formas. Se pueden construir mediante bobinado o colocando la fibra en sentido longitudinal o en dirección del eje, con lo que la resistencia aumenta considerablemente

Estas fibras pueden ser, complejos de resinas sintéticas $\begin{cases} fibra\ de\ vidrio + resinas\ epoxy \\ fibra\ de\ vidrio + poliésteres \\ fibra\ de\ carbono + elastómeros, etc \end{cases}$, que se pueden moldear fácilmente, y que son interesantes para pequeñas series.

Para la construcción de la parte móvil de las palas se puede utilizar plástico armado debido a su ligereza y resistencia y para la parte fija plástico y acero.

III.5.- DIMENSIONADO DE LAS PALAS

La anchura de las palas no interviene prácticamente en la potencia generada por el viento; las palas finas permiten una velocidad de rotación muy grande, gracias a la disminución de su masa y del rozamiento con el aire; sin embargo, tienen el inconveniente de ser muy frágiles y el de no presentar una superficie frontal suficiente para proporcionar un par de arranque adecuado; se suele tomar una anchura de pala (cuerda) del orden de $\frac{1}{20} \div \frac{1}{25}$ del diámetro D de ellas, estando comprendido el ángulo de calaje de la pala en el intervalo $3° < \beta < 8°$.

La ventaja de elegir un TSR alto (para el caso de una hélice bipala del orden de 10), es la de obtener una máquina eólica ligera, simple y barata.

Por otro lado, como estas máquinas van acopladas a generadores eléctricos que requieren, en general, una velocidad de rotación sincrónica, precisan de un sistema multiplicador de revoluciones con un mínimo de engranajes, con lo que las pérdidas por rozamiento disminuyen simplificando la transmisión.

En general, el rotor se puede construir con palas $\begin{cases} fijas \\ de\ paso\ variable \end{cases}$; el sistema de palas fijas presenta la ventaja de la robustez, mientras que el de palas de paso variable es más frágil y requiere mayores cuidados.

En la escala de grandes potencias las experiencias americanas y danesas indicaron que la mejor solución consistía en utilizar palas de paso fijo cerca del cubo y de paso variable en el extremo.

III.6.- ANTECEDENTES DE LOS SISTEMAS DE REGULACIÓN DE LA VELOCIDAD DE GIRO

Un dispositivo fundamental en un aerogenerador eólico es el que permite la regulación y control del número de revoluciones, que además sirve de protección de dicha máquina para velocidades del viento superiores a las admisibles bajo el punto de vista estructural.

Cuando una máquina está sometida a una determinada velocidad del viento, comienza a girar; dicha velocidad es la velocidad de conexión, pero su giro es lento y la máquina está lejos de generar su máxima potencia.

A medida que la velocidad del viento aumenta el rotor gira más deprisa y la potencia que produce también aumenta; a una determinada velocidad (nominal), el rotor gira a las revoluciones precisas para que la máquina proporcione su potencia nominal y a partir de este momento, aunque aumente la velocidad del viento, no interesa que la velocidad de giro aumente, por lo que hay que actuar sobre ella regulando su velocidad.

Si la velocidad del viento sigue aumentando, el rotor puede peligrar desde el punto de vista estructural siendo muy importante disminuir las vibraciones; por eso, cuando esta velocidad aumenta mucho, el rotor se tiene que frenar.

La velocidad a la que el rotor inicia la parada es la velocidad de desconexión y los procedimientos utilizados para que dicha desconexión se produzca se llaman de protección.

En las primeras aeroturbinas el paso de la pala era fijo por lo que las ráfagas de viento provocaban fuertes sobrecargas mecánicas sobre los componentes de la turbina, que tenían que estar sobredimensionadas.

Con la introducción del paso variable se limitan las cargas máximas en la turbina, y con esta innovación comienza el proceso de disminuir los esfuerzos mecánicos que se generaban durante las ráfagas de viento en los momentos en que su velocidad media era del orden de la nominal, iniciándose también el proceso de ofrecer rotores de varios diámetros para adecuarse a las condiciones del emplazamiento.

Para las máquinas eólicas que accionan un generador eléctrico se han diseñado diversos sistemas de regulación, ya en desuso, tales como:

a) Regulación por frenos aerodinámicos que se activan por la acción de la fuerza centrífuga y que actúan cuando el giro del rotor no es el adecuado por sobrepasar un cierto valor.

Todos ellos se basan en el efecto de la fuerza centrífuga de rotación y la actuación del frenado aerodinámico se realiza mediante un dispositivo adecuado, que consiste en colocar perfiles aerodinámicos en los extremos de las palas del rotor que actúan cuando éste alcanza altas velocidades. El sistema implica la regulación por variación del ángulo de inclinación β de las palas, que puede ser de toda la pala, de parte de la pala o mediante alerones.

La sencillez de los mecanismos de regulación es una de las principales características de los aerogeneradores de baja potencia.

Los sistemas, cada vez más complejos, se simplifican mediante la introducción de nuevas tecnologías y nuevos materiales que permiten diseñar elementos resistentes y flexibles que facilitan la regulación, como en el caso del modelo desarrollado por la Universidad de East-Hartfort (USA) Fig III.12.

La regulación por medio de palas orientables es la más utilizada en las grandes máquinas; su funcionamiento consiste en actuar sobre el ángulo de calaje θ que, a su vez, lo es también del ángulo de ataque α y del de calaje β, $(\theta = \beta + \alpha)$; así se consigue variar la fuerza aerodinámica que actúa sobre la pala sin más que hacer variar el ángulo de calaje, que se controla por procedimientos mecánicos relacionados con la velocidad de ataque del viento

Una variante del sistema de regulación por alerones es el sistema danés en el que el extremo de las palas juega el papel de freno aerodinámico con viento fuerte; con viento normal, el alerón móvil que se encuentra en la prolongación de la pala, cuya superficie es del orden de la décima parte de la misma, constituye el elemento de frenado que se acciona mediante un servomotor hidráulico; en caso de velocidad excesiva llega a girar 60º, introduciendo así un par de frenado considerable.

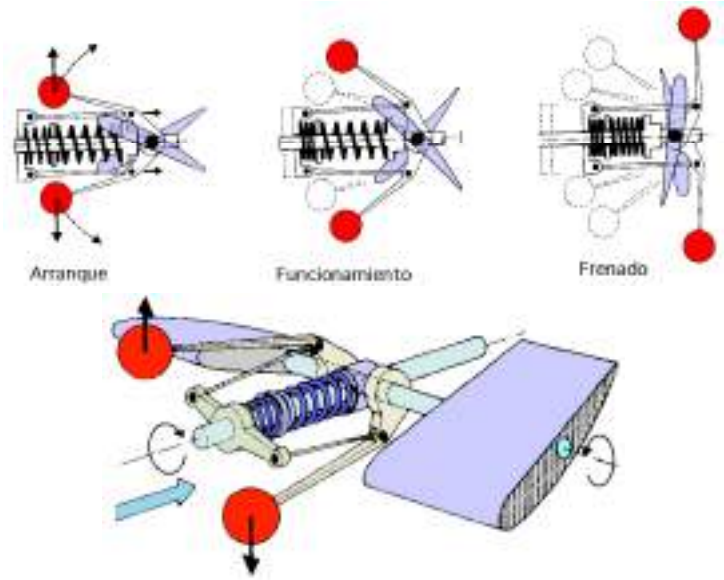

Fig III.12.- Regulación del ángulo de inclinación de las palas mediante resortes, por acción de la fuerza centrífuga, período 1950-70 (Aerowatt)

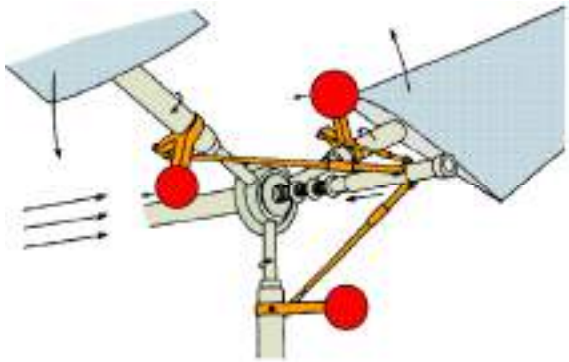

Fig III.13.- Sistema de regulación centrífugo del ángulo de inclinación de las palas mediante bieletas

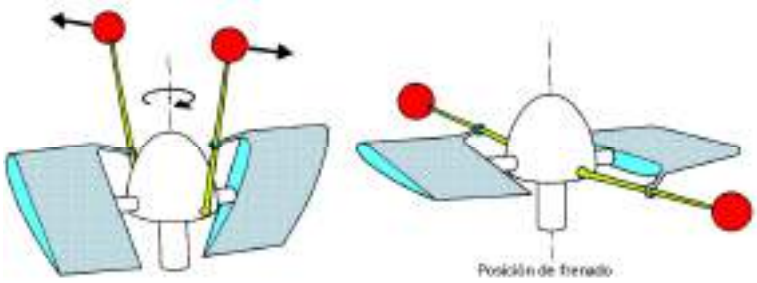

Fig III.14.- Sistema de regulación centrífugo desarrollado por la Universidad de East-Hartfort (USA)

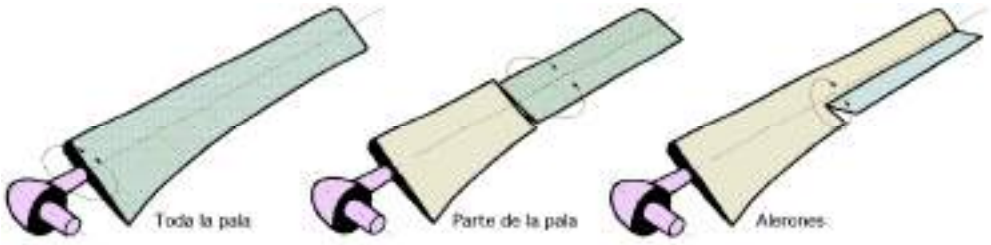

Fig III.15.- Regulación del calaje de las palas

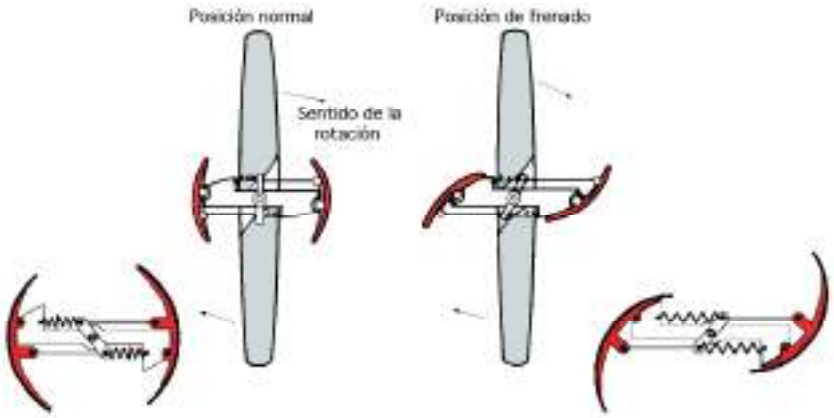

Fig III.16.- Regulación del ángulo de inclinación de las palas por acción de la fuerza centrífuga, (Windcharger)

Otra solución consiste en accionar los alerones mediante un regulador centrífugo.

b) Regulación mediante el control electrónico de la potencia, en las que se puede variar la velocidad del rotor en un pequeño margen mediante resistencias rotóricas variables, controladas por un microprocesador y accionadas por interruptores estáticos; de esta forma se consigue variar el deslizamiento del generador, y con ello la velocidad del rotor.

c) Regulación por desenganche de las palas *(Darrieux)* en las que mediante la acción de una varilla, éstas se pueden dejar en una posición en la que no actúe sobre ellas el viento, Fig III.17. Esta situación se conoce también como *regulación por bandera* y se utiliza en aquellas máquinas eólicas cuya velocidad de giro no tiene la necesidad de ser constante, por no accionar generadores eléctricos. Los dispositivos que utilizan el desenganche aerodinámico de las palas originan vibraciones debido a las estelas que aparecen sobre el extradós de las palas. Los dispositivos que colocan las palas paralelamente a un viento de velocidad fuerte son mejores. Evidentemente cada aerogenerador debe tener un freno mecánico para parar el rotor.

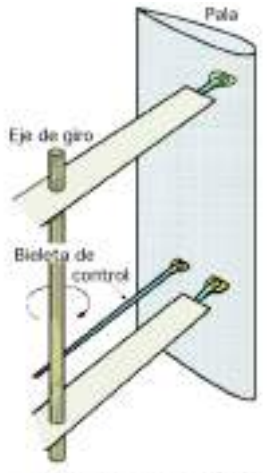

Fig III.17.- Regulación por desenganche de las palas

d) ***Regulación por orientación del rotor*** (en aerogeneradores de baja potencia), cuando la velocidad del viento comienza a ser peligrosa para la hélice, que pone sus palas orientadas de modo que ofrezcan al viento la mínima superficie posible, para que éste no interaccione con ellas.

En la Fig III.18 un muelle permite un giro de la hélice de 90° alrededor de un eje vertical

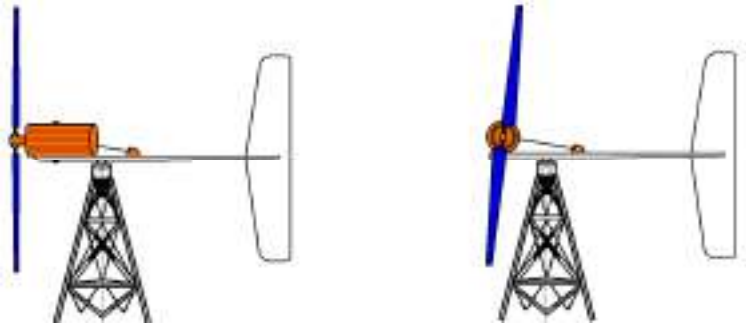

Fig III.18.- Regulación por giro de la hélice de 90° respecto a un eje vertical

En la Fig III.19 un muelle permite un giro de la hélice de 90° alrededor de un eje horizontal

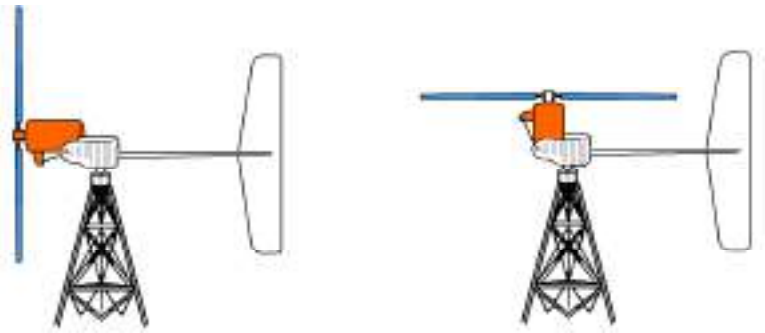

Fig III.19.- Regulación por giro de la hélice de 90° respecto a un eje horizontal

En la Fig III.20 el efecto se consigue mediante una veleta auxiliar y en la Fig III.21 mediante el empuje aerodinámico sobre una excéntrica

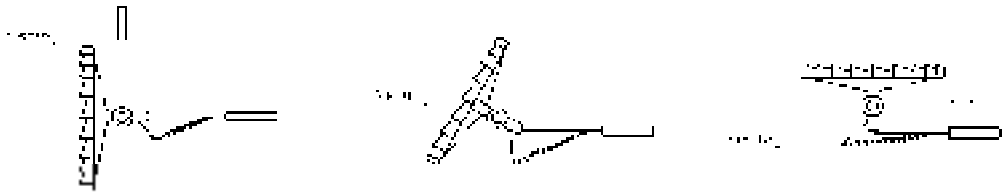

Fig III.20.- Regulación por giro de la hélice de 90°respecto a un eje horizontal (sistema de pala lateral)

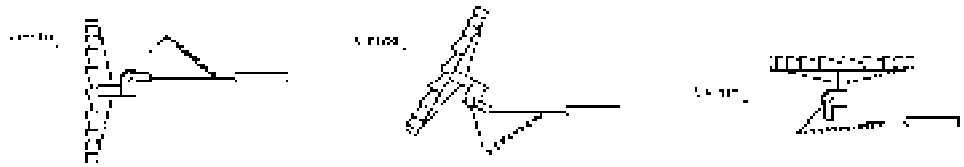

Fig III.21.- Regulación por giro de la hélice de 90° respecto a un eje horizontal (sistema de eje excéntrico)

En los dispositivos de palas fijas, los procedimientos que conseguían la regulación del giro del rotor, hacían que el plano del mismo girase de manera que la superficie que se ofrecía al viento disminuyera; esto se conseguía con una conexión que articulaba el eje del rotor con el eje de transmisión o colocando una excéntrica que hacía que la fuerza de empuje del viento produjese un par que

desorientaba el plano del rotor; en estas situaciones la hélice dejaba de estar en posición frontal a la dirección del viento.



Fig III.22.- Dispositivo de eje de regulación inclinado

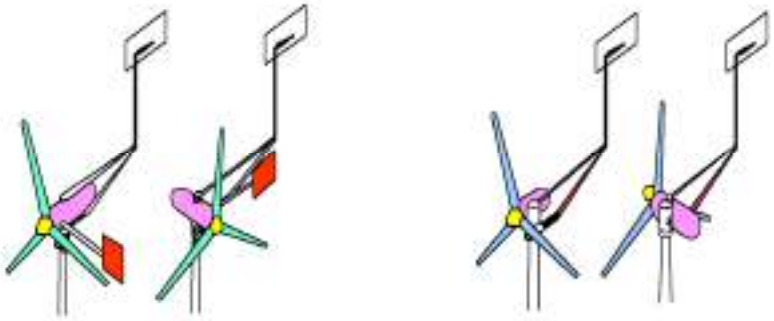

Fig III.23.- Sistema de regulación por orientación del rotor

e) Otras formas de frenado.- El frenado aerodinámico con palas huecas permitía reducir la velocidad del aerogenerador mediante la aparición de una corriente de aire en la periferia de las palas, en el supuesto de que éstas sean huecas, como en el aerogenerador Andreu-Enfield Fig III.24.

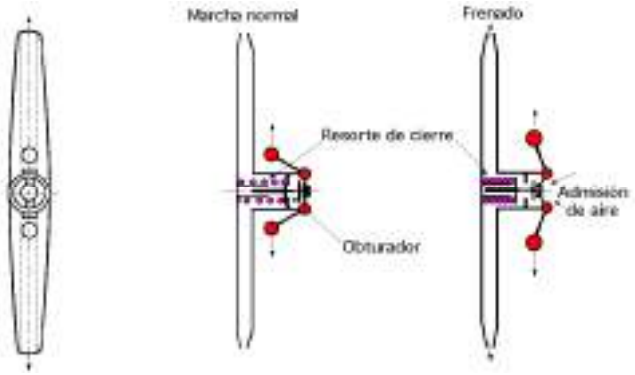

Fig III.24.- Sistema de regulación por palas huecas

El frenado aerodinámico con una hélice secundaria fijada a la hélice principal Fig III.25, la gran anchura de la hélice secundaria permitía asegurar el arranque de la aeroturbina, así como el frenado cuando el viento era demasiado fuerte.

A partir de una cierta velocidad, por efecto de la fuerza centrífuga, las palas del regulador se separan de la hélice principal, de forma que el sentido de rotación alrededor de su propio eje es tal que su ángulo de asiento se anula, adquiriendo a continuación un valor negativo; el par que era motor

en el arranque y velocidades pequeñas, pasa a valer cero y después se convierte en par resistente, no permitiendo que la máquina se embale.

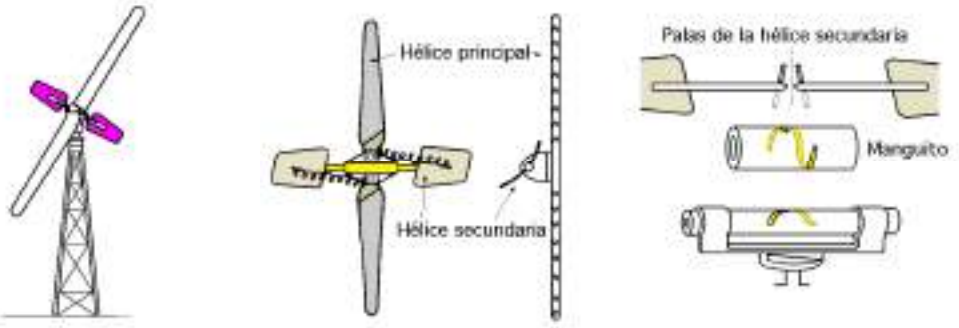

Fig III.25.- Sistema de regulación por palas secundarias fijadas a las palas principales (Aerogenerador París-Rhône)

III.7.- ANTECEDENTES DE LOS MECANISMOS DE ORIENTACIÓN

Uno de los principales problemas que plantearon los aerogeneradores de eje horizontal fue la necesidad de su orientación, de forma que el viento incidiese perpendicularmente al disco barrido por el rotor, con el fin de obtener la máxima potencia a base de hacer incidir la mayor cantidad posible de masa de aire en movimiento y así obtener la mayor cantidad posible de energía cinética; con este fin, para pequeños aerogeneradores, existen diversos sistemas que permiten la orientación de la máquina, como:

a) Una cola o veleta que es un método muy eficaz sobre todo en máquinas pequeñas Fig III.26

b) Un sistema de orientación accionado por rotores auxiliares Fig III.27

c) Un servomotor controlado electrónicamente

d) Un sistema de orientación por efecto de la conicidad que se da a las palas en su disposición y montaje sobre el cubo del rotor, tal como se indica en la Fig III.28

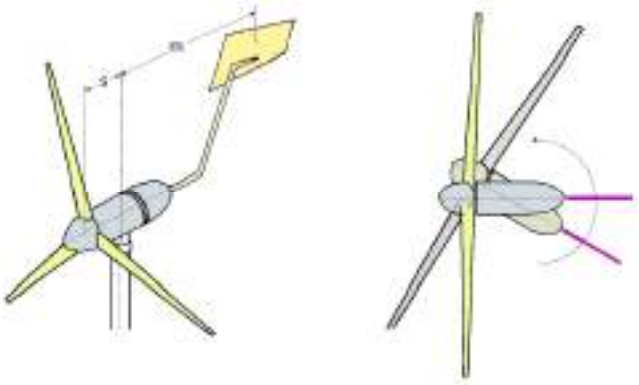

Fig III.26.- Orientación del rotor mediante timón de cola

Las *veletas* o *timones* son dispositivos de orientación situados en la prolongación del eje del rotor y tienen por misión orientar la aeroturbina en la dirección del viento. Están constituidas por una superficie plana metálica o de madera, sobre la que el viento ejerce una presión en el momento en

que no están orientadas paralelamente en la dirección del mismo, provocando un par de giro que orienta la máquina.

Si llamamos $\begin{cases} \text{- } m \text{ a la distancia entre el c.d.g. de la placa de la veleta y el eje de giro vertical de la máquina} \\ \text{- } s \text{ a la distancia entre el plano barrido por las palas y el eje de giro} \end{cases}$

se debe cumplir que $(m = 4\ s)$.

Otro procedimiento de orientación de las máquinas eólicas consiste en la utilización de *rotores auxiliares* colocados en un plano ortogonal al plano del rotor del aerogenerador; cuando éste no esté orientado correctamente, los rotores eólicos auxiliares comienzan a girar y hacen que la máquina principal se oriente correctamente Fig III.27.

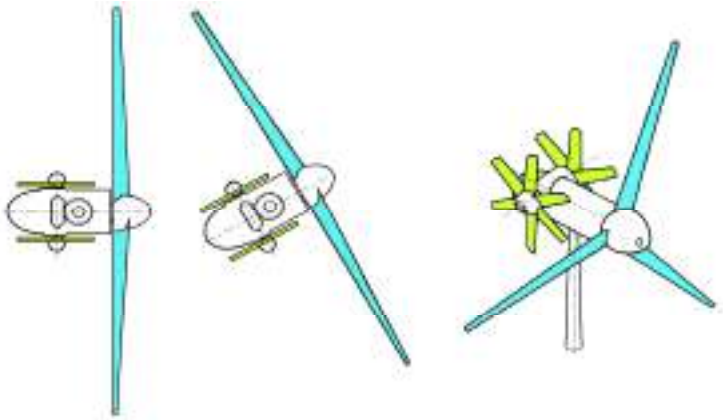

Fig III.27.- Orientación del rotor por efecto de rotores auxiliares

Una máquina eólica se podría autoorientar, sin más, colocando el rotor a sotavento de la torre, de forma que el viento incidiese antes en la góndola del aerogenerador que en el rotor; este procedimiento implica una interferencia al estar el rotor situado detrás de la torre y, por ello, habría que construir góndolas y torres que presentasen poca resistencia Fig III.28.

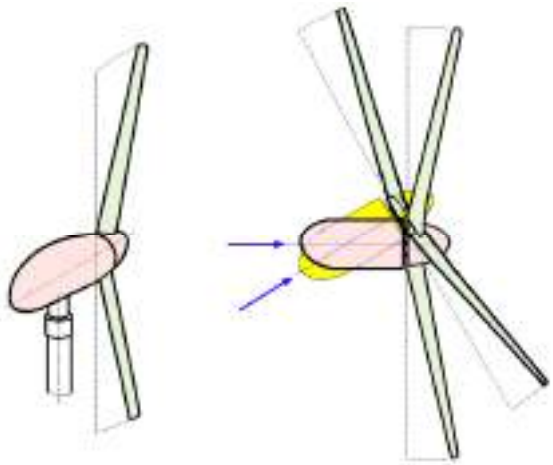

Fig III.28.- Orientación del rotor por efecto de la conicidad (Ver Fig VI.5)

El aerogenerador se puede orientar también mediante un servomecanismo que actúe sobre él al recibir información de la dirección del viento por medio de una veleta. Este procedimiento es adecuado para su utilización en grandes máquinas o en granjas eólicas con varias máquinas.

Cuando la torre es cilíndrica y de diámetro grande, es mejor colocar el rotor delante de la torre debido a la estela producida por ésta.

Cuando el soporte es una estructura de acero o una torre de diámetro pequeño, la hélice se puede colocar detrás.

Cuando el rotor gira delante de la torre, es necesario un motor de orientación. Cuando el rotor gira detrás, la máquina se puede orientar sola y no es necesario motor; en este caso, se aconseja utilizar un amortiguador.

Mecanismos de transmisión.- Mediante el mecanismo de transmisión, el rotor se acopla al generador eléctrico o al sistema de bombeo de agua, pudiéndose hacer de muchas formas, de entre las que destacamos los siguientes dispositivos:

a) Mecánicos, mediante engranajes, bielas, correas de transmisión, etc

b) Eléctricos, que proporcionan la velocidad adecuada a la dinamo o al alternador

c) Hidráulicos, según los cuales el rotor acciona una bomba rotativa o aspirante-impelente

d) Neumáticos que eyectan aire a través de las palas huecas del rotor, provocando una corriente de aire que acciona una turbina eólica, como en el generador eólico Andreu-Enfield

III.8.- TENDENCIAS ACTUALES EN EL DISEÑO DE AEROGENERADORES

Los factores que influyen en el aprovechamiento de la energía eólica son el emplazamiento y el aerogenerador, y sólo mediante una adecuada combinación de ambos se puede alcanzar un buen rendimiento en un parque eólico.

Los emplazamientos difieren unos de otros no sólo en la velocidad media anual del viento, sino también en:

- La distribución de frecuencias de esa velocidad (nº de horas que sopla el aire en un determinado rango de velocidades)

- La turbulencia del lugar

- El perfil de velocidades del viento con la altura

- La orografía del lugar y la rugosidad del suelo

Con este panorama parece sencillo admitir que tiene que existir una cierta adecuación de la turbina al emplazamiento. Si existe una cierta flexibilidad a la hora de elegir parámetros como la altura de torre o el diámetro del rotor, se puede diseñar un prototipo único de góndola para una turbina que aproveche al máximo los recursos de cada emplazamiento.

Las diferentes alturas de la torre permiten jugar con ciertos compromisos como:

Una mayor altura permite captar vientos con flujo más laminar, en principio (salvo orografía complicada) de mayor velocidad media y con menor diferencia entre la velocidad del viento en la parte superior e inferior de la circunferencia barrida). Lógicamente el costo es superior, y en ciertos emplazamientos, como las crestas de los montes, puede existir una inversión del perfil de vientos con lo que no siempre es cierto que a mayor altura la velocidad del viento es mayor.

Por otra parte, para un mismo tipo de turbina se pueden ofertar diversos diámetros del rotor; por ejemplo, para una turbina de 600 kW se pueden ofertar rotores de 39, 42 y 44 m de diámetro.

Un rotor mayor (más caro) permite captar más energía del viento, disminuyendo la velocidad nominal del viento a la que se genera la potencia nominal.

Sin embargo la velocidad de corte del viento, a la que la turbina se detiene por cuestiones de seguridad, es menor con lo que existe el riesgo de desaprovechar horas de vientos fuertes. En principio, cuanto menor es la velocidad media anual del viento en un emplazamiento se debe elegir un rotor más grande, siempre que la turbulencia del viento en el lugar se mantenga en niveles aceptables.

TORRES FLEXIBLES Y TORRES RÍGIDAS.- Si la orografía no es compleja, a mayor altura, mayor es la velocidad del viento puesto que el efecto de fricción de las capas contra el suelo disminuye. Este hecho, junto con el de aumento de la potencia de las turbinas (y por consiguiente del diámetro del rotor), hace que los diseños tiendan a torres más altas.

Existe el problema de que cuando la frecuencia propia de la torre, junto con el peso de la góndola y palas, coincide con la frecuencia a la que gira el rotor, que origina un movimiento vibratorio peligroso en la torre, ambas frecuencias entran en resonancia y pueden destruir el aparato.

Torres flexibles.- Para paliar el efecto de lastrado o sobrecarga de la torre se ha tomado una solución opuesta a la anterior, es decir, construir torres flexibles para que la frecuencia de resonancia del sistema sea menor que la frecuencia de operación del rotor, lo cual se consigue a partir de una potencia y altura dadas; esta solución supone un ahorro de material y costos.

Torres rígidas.- Las torres rígidas, que son las que se han construido hasta hace unos años, se lastraban para aumentar la frecuencia propia de la instalación y alejarlas así de la frecuencia de operación del rotor.

La frecuencia propia de la torre disminuye al aumentar $\begin{cases} \textit{la altura} \\ \textit{el peso de la góndola} \\ \textit{el peso de las palas en diseños de potencia} \end{cases}$

por lo que el material a añadir para hacer más rígida la torre aumenta excesivamente.

PASO VARIABLE Y PASO FIJO.- Los diseños actuales de aerogeneradores se pueden clasificar en aerogeneradores de pala de paso fijo y aerogeneradores de pala de paso variable.

- Los aerogeneradores de paso fijo presentan un ángulo de inclinación de la pala constante cara al viento.

- Los de paso variable permiten adaptar dicha inclinación de pala en función de la velocidad del viento, rotando alrededor del eje longitudinal de la pala, y modificando las propiedades del perfil aerodinámico en su confrontación frente al viento incidente.

Aerogeneradores de paso fijo.- Consisten en una aeroturbina de palas fijas y un generador de rotor de jaula bobinada (máquina asíncrona de inducción), conectados mediante una caja multiplicadora de engranajes. El devanado del estator del generador está conectado a la red.

Sus ventajas fundamentales son la simplicidad del equipo y costo, por lo que se utilizan mayoritariamente en sistemas de baja potencia; a velocidades de viento altas no aprovechan óptimamente las propiedades aerodinámicas de las palas, con la consiguiente pérdida de energía captada. Al ser un diseño fijo, a velocidades de viento altas los esfuerzos mecánicos son considerablemente altos, con lo que las palas se deben construir de tal manera que soporten tales tensiones, aumentando su coste. No disponen de un autofrenado, con lo que en caso de embalamiento hay que instalar un freno que sea capaz de absorber toda la energía cinética de las palas. Este tipo de control tiene problemas de par de arranque del rotor, con lo que a veces el arranque es motorizado (utilizando el generador como motor).

En ciertas turbinas de paso fijo se incluyen frenos aerodinámicos como $\begin{cases} \textit{control de punta de pala} \\ \textit{alerones, etc} \end{cases}$ para evitar el embalamiento.

Aerogeneradores de paso variable.- En sistemas de alta potencia es rentable instalar un mecanismo de giro de inclinación de las palas, que supone una mayor complejidad y costo del equipo, pero que se justifica por las ventajas que a continuación se exponen:

a) Al variar el ángulo de inclinación de las palas se consigue optimizar el aprovechamiento de la energía del viento en todo el rango de velocidades, muy particularmente por encima de la velocidad nominal de la turbina.

b) Con paso variable, las cargas mecánicas sobre las palas y el resto del aerogenerador son menores, permitiendo un diseño más ligero y de menor coste de la pala. Las cargas horizontales sobre la turbina se reducen, minimizando también la cimentación.

c) Al poder orientar la pala se resuelve de forma aerodinámica el frenado de la turbina en caso de embalamiento. Por esto, el freno hidráulico de emergencia de la turbina se puede diseñar más pequeño sin comprometer la seguridad de la operación. En las turbinas de paso variable la pala es un elemento estructural único, con la consiguiente simplicidad. El par de arranque de la turbina es bueno puesto que el ángulo de paso de las palas se regula, consiguiéndose el óptimo par de arranque y con posibilidad de arranque a velocidades inferiores de viento.

d) En zonas donde el ruido generado es un problema, el paso variable le disminuye a altas velocidades de viento o incluso puede limitar la generación de ruido a cualquier velocidad de viento (en Alemania existen

turbinas en zonas habitadas que se desconectan si el nivel de ruido excede cierto valor).

e) La turbina se puede ajustar, mediante un software adecuado, a trabajar a una potencia inferior a la establecida normalmente en caso de redes muy débiles, o para realizar ciertos ensayos, consiguiéndose además evitar el problema de la sensibilidad del momento de entrada en pérdida de la pala ante ciertos parámetros, como la densidad del aire o la suciedad en la pala.

El único parámetro a la hora de diseñar una pala es optimizar la captación de energía y no el punto de entrada en pérdida (remolinos) del perfil de la pala.

VELOCIDAD VARIABLE Y VELOCIDAD FIJA .- Dentro de las máquinas de paso variable, las diferentes opciones de regulación de velocidad se pueden comparar, desde los diseños menos sofisticados a los más complejos.

Aerogenerador de velocidad fija.- La estructura del aerogenerador de velocidad fija consiste en una caja multiplicadora y un generador asíncrono directamente acoplado a la red por su estator, con unas baterías de condensadores para compensar la energía reactiva. Muchos de los aerogeneradores de gran potencia que operan hoy en día en parques eólicos son de este tipo; incorporan un generador asíncrono de rotor de jaula bobinada estándar, gracias al cual se tiene un precio ajustado.

Los inconvenientes de funcionar a velocidad fija son las sobrecargas mecánicas que se generan debido a las ráfagas de viento. Estas fluctuaciones de potencia en el viento se traducen, aunque filtradas, en fluctuaciones de la potencia eléctrica generada.

El ***deslizamiento*** del generador varía con la energía generada cuando varía la velocidad, y es función de la resistencia del devanado del rotor, es decir, a mayor resistencia mayor deslizamiento, por lo que una forma de variar el deslizamiento consiste en variar la resistencia del rotor del alternador.

El generador asíncrono demanda energía reactiva de la red, lo cual es otro inconveniente desde el punto de vista de la red eléctrica; el consumo de energía reactiva del generador de rotor de jaula se compensa y corrige con baterías de condensadores.

La inestabilidad del viento supone, por lo tanto, un problema para la maquinaria del aerogenerador y para la red eléctrica de distribución.

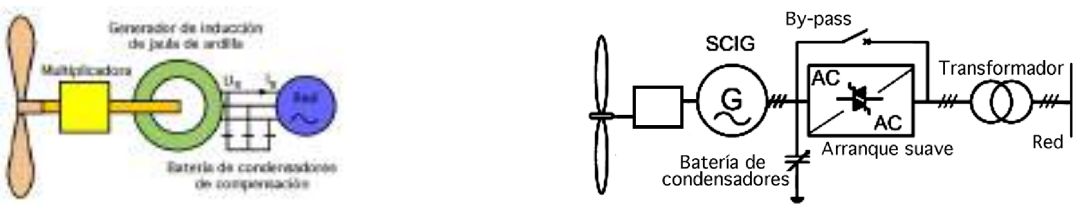

Fig III.29.- Esquemas de aerogeneradores de velocidad fija y generador asíncrono conectados directamente a la red por su estator

Deslizamiento variable.- La estructura de deslizamiento variable consta de un sistema multiplicador, generador asíncrono y unas resistencias del rotor variables. Al variar la resistencia del rotor se varía el deslizamiento, entre un $1 \div 10\%$, lo que permite a los aerogeneradores absorber los golpes de viento, reduciendo las cargas extremas sobre el multiplicador, a la vez que se genera una potencia eléctrica sin fluctuaciones; este sistema está patentado bajo el nombre de Opti-Slip(R) en el que las resistencias externas van montadas en el propio rotor, junto con el sistema electrónico. La energía de las ráfagas de viento se elimina mediante un ligero aumento de la velocidad de la cadena cinemática y mediante la disipación en resistencias en el rotor. El sistema necesita compensación de energía reactiva mediante baterías de condensadores, al igual que en el caso anterior.

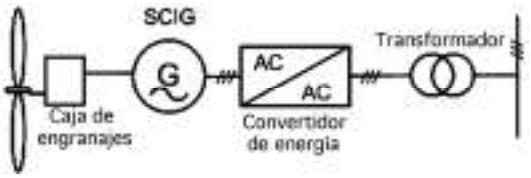

Fig III.30.- Esquema de aerogenerador de velocidad variable y generador de inducción jaula de ardilla

El control de orientación de las palas es relativamente sencillo, el aumento de precio es pequeño y el generador sigue siendo un generador estándar de jaula de ardilla, al que se le añade un módulo de resistencias variables en la parte posterior.

El deslizamiento se puede empezar a aumentar cuando se esté cerca de la potencia nominal de la aeroturbina, funcionando el generador en estas circunstancias, aproximadamente, a la mitad de su deslizamiento máximo. Con una ráfaga de viento, las señales del mecanismo de control hacen que el deslizamiento aumente para permitir que el rotor gire un poco más rápidamente, hasta que el mecanismo regulador del cambio del ángulo de paso de las palas pueda hacer frente a la situación; a partir de este momento, el deslizamiento disminuye.

Velocidad variable con generador de inducción doblemente alimentado.- Este sistema está formado por un sistema multiplicador y un generador asíncrono cuyo estator está conectado directamente a la red y cuyo rotor lo está a través de dos convertidores de frecuencia. Con esta estructura se consigue regular la velocidad del sistema en un campo del orden de la velocidad nominal. Los convertidores no deben soportar toda la potencia de la máquina, sino sólo una fracción de ella, resultando de esto un equipo electrónico más sencillo. Al poder variar la velocidad, nos acercamos más a puntos de rendimiento aerodinámico más altos.

El generador asíncrono es estándar, de jaula de ardilla de rotor bobinado. A velocidades altas del viento se genera energía por el rotor; la potencia de salida no tiene fluctuaciones. La potencia reactiva se puede controlar, como en el caso de un generador síncrono.

Las ráfagas no implican sobrecargas en el multiplicador, sino que es una energía que se emplea en aumentar la velocidad.

El inconveniente es el aumento de precio debido a la utilización de un sistema de control más sofisticado y de los equipos electrónicos de conversión de potencia en el rotor.

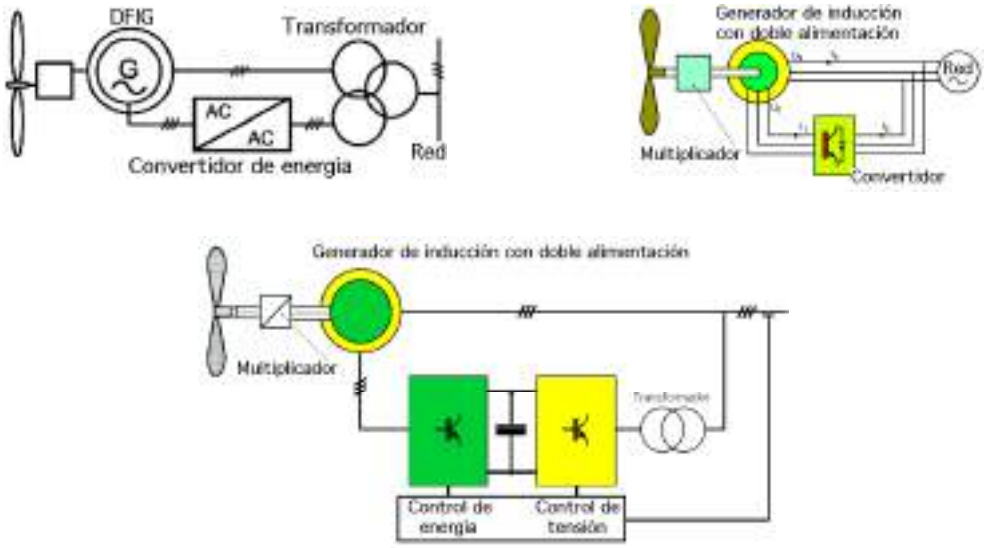

Fig III.31.- Esquemas de aerogeneradores de velocidad variable y generador de inducción asíncrono doblemente alimentados Su estator va acoplado directamente a la red y su rotor lo está a través de dos convertidores de frecuencia.

Velocidad variable con generador síncrono multipolo.- Este sistema es el más complejo de todos. El sistema multiplicador se elimina merced a un generador síncrono multipolo, empleándose para variar la velocidad en el estator dos convertidores que controlan toda la potencia de la máquina.

Las ventajas de este sistema son
- *La mejora del rendimiento aerodinámico*
- *La potencia de salida sin fluctuaciones*
- *El control de la energía reactiva*
- *La eliminación del sistema multiplicador*

Sin embargo, este sistema puede tener grandes inconvenientes ya que la eliminación del multiplicador implica la construcción de un generador muy complicado, que ya no es estándar y, por lo tanto, caro. Además como los equipos electrónicos de conversión de potencia manejan toda la potencia, encarecen el aerogenerador.

A pesar de ésto, es el futuro de los grandes aerogeneradores.