



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO  
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍAS

**TECNOLOGÍA EÓLICA MODERNA:  
TENDENCIAS DE DESARROLLO  
MONOGRAFÍA**

QUE PRESENTA COMO REQUISITO  
PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA

ELSA CITLALI CHARGOY LOUSTAUNAU

SUPERVISORES

MC. JAIME CUEVAS DOMINGUEZ  
MC. JOSÉ HERNANDEZ RODRIGUEZ  
DR. OMAR YAM GAMBOA

CHETUMAL Q. ROO, MARZO 2006



Ø49766

El presente trabajo monográfico titulado "TECNOLOGÍA EÓLICA MODERNA: TENDENCIAS DE DESARROLLO", como requisito parcial para obtener el título de Ingeniera en Sistemas de Energía, que presenta la alumna **ELSA CITLALI CHARGOY LOUSTAUNAU**, supervisada por el **M.C. JAIME DIONISIO CUEVAS DOMÍNGUEZ**, **M.C. JOSÉ HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ** y **DR. JOEL OMAR YAM GAMBOA**. Ha sido aprobada y aceptada por el jurado examinador.



---

**M.C. JAIME DIONISIO CUEVAS DOMÍNGUEZ,**



---

**M.C. JOSÉ HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ**



---

**DR. JOEL OMAR YAM GAMBOA.**



## Agradecimientos:

A la luz que nos creó.

A mi familia entera, por la motivación y el amor para este trabajo.

A mis supervisores y al Dr Cesar Cristóbal, a quienes debo tiempo, conocimientos y esfuerzo.

## Dedicatoria:

A Hania, mi hijita.  
Porque eres la fuerza de mi vida.

# INDICE

Introducción.....	1
-------------------	---

## Capítulo 1. Aspectos generales

1.1 Antecedentes.....	3
1.2 Principios básicos de transformación de la energía eólica.....	6
1.3 Antecedentes Históricos.....	10
1.4 Generadores eólicos modernos .....	11
1.4.1 Generadores eólicos conectados en red.....	11

## Capítulo 2. Sistema generador de potencia

2.1 Rotor.....	13
2.1.1 Palas.....	14
2.1.2 Superficies de control aerodinámico .....	24
2.1.3 Cubo .....	25
2.2 Sistema de transmisión de potencia. ....	30
2.2.1 Eje principal.....	31
2.2.2 Acoplamientos.....	31
2.2.3 Caja multiplicadora.....	32
2.3 Generador. ....	38
2.4 Frenos. ....	39

## Capítulo 3. Estructuras de Soporte

3.1 Góndola .....	43
3.2 Sistema de orientación.....	44
3.3 Torre y cimentación. ....	46

## Capítulo 4. Tendencias de la tecnología eólica

4.1 Estado del arte.....	50
4.1.1 Los grandes generadores eólicos : Economía de escala .....	51
4.1.2 Regulación de la velocidad.....	51
4.1.3 Tipos de generadores.....	52
4.1.4 Estructuras de soporte y transmisión.....	53
4.1.5 Sistemas aislados de la red.....	54
4.1.6 Perspectivas de desarrollo: Futuros desarrollos tecnológicos.....	58

4.2 Conclusiones.....	63
4.3 Recomendaciones.....	65

**Anexos**

A Principales fabricantes.....	66
B Otras turbinas eólicas. ....	67
C Glosario de términos en inglés.....	68
D Escala de velocidades de viento/ Tamaño de los generadores eólicos...74	

<b>Referencias Bibliograficas.....</b>	<b>75</b>
--	-----------

## Introducción

Los procesos de investigación documental de los interesados en energías renovables comúnmente se ven afectados por la falta de bibliografía especializada que detalle a fondo la composición y funcionamiento de los mecanismos de transformación de la energía renovable del planeta.

A pesar de la gran cantidad de literatura existente, las barreras del idioma y la falta de conocimiento de la existencia de dichas fuentes, obstaculizan en gran medida los primeros esfuerzos por completar una investigación.

Esta monografía se construyó con el propósito de ofrecer una guía para los alumnos que realizan investigaciones sobre energía eólica, por lo cual se plantean los siguientes objetivos:

1. Describir los subsistemas principales de los generadores eólicos de gran potencia.
2. Presentar las innovaciones de la tecnología para conformar el estado del arte y las tendencias de diseño.

Para tal efecto, el trabajo se presenta desglosado en cuatro capítulos; en el primero de ellos, se desarrolla una breve descripción de cómo fueron apareciendo las diferentes formas de extracción de la energía del viento hasta llegar al punto en el que se encuentran actualmente; pero principalmente pretende presentar los principios básicos de la transformación de la energía del viento en energía útil. Así como los términos esenciales para la comprensión del estado del arte planteado en los siguientes capítulos.

El segundo capítulo contiene la descripción de los principales componentes del sistema de transmisión de potencia de los grandes generadores eólicos modernos,

desde las palas hasta la caja multiplicadora, con el propósito de exponer su función principal así como las principales tendencias de diseño.

El capítulo 3 contiene información acerca de las estructuras de soporte y sistema de orientación. Se describe la función del armazón principal, la torre y la cimentación, así como el mecanismo de orientación.

El capítulo 4 es un estudio del estado de la tecnología y sus innovaciones, se enfoca en las tendencias de las nuevas investigaciones en Energía Eólica que enmarcan las perspectivas de desarrollo.

La información aquí contenida fue seleccionada de un compendio obtenido de diversos medios: bases de datos, sitios web, acervos bibliográficos especializados como la biblioteca del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), otras como las bibliotecas centrales de la Universidad Autónoma Chapingo; de la UNAM, Palacio de Minería y de la Universidad de Quintana Roo.

## Capítulo 1. Aspectos generales

### 1.1 Antecedentes

La Tierra posee cantidades enormes de energía, magnitud física que asociamos con la capacidad que tienen los cuerpos para producir trabajo mecánico, emitir luz, o generar calor; sus fuentes son fenómenos naturales, artificiales o yacimientos, y las cantidades disponibles de estas fuentes es lo que llamamos *recurso energético*.<sup>1</sup> A pesar de que nos encontramos inmersos en un constante flujo de energía, su obtención y transformación se ha convertido en uno de los problemas de la humanidad, debido no sólo a las crecientes necesidades de la población, sino a la evolución de nuestra forma de interactuar con el medio ambiente.

La modernización del hombre parece ir a la par con el aumento del consumo de energía; así, para comunidades consideradas como primitivas el consumo de energía por persona por día, era 46 veces menor que lo que consume un poblador de la moderna era industrial.<sup>2</sup>

Desde hace 200 años el petróleo ha fungido como elemento vital y factor estratégico de desarrollo.<sup>3</sup> En una visión realista seguirá siéndolo por algunos años más. Según proyecciones de la administración de información de energía<sup>4</sup> para el año 2025 se comercializarán  $2.56 \times 10^{20}$  Joules de petróleo, las perspectivas de consumo con respecto a otras fuentes de energía son que aportará 37% del consumo mundial de energía, todo mientras la atmósfera y los yacimientos lo permitan, si no logramos un nivel de conciencia que nos mueva a pensar a futuro.

Según la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo<sup>5</sup>, el concepto de *sostenibilidad* es “solventar las necesidades del presente sin comprometer la habilidad de generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”. Esto significa que los esfuerzos por utilizar tecnologías de energías renovables, no sólo nos beneficiarán ahora, sino que beneficiarán a muchas generaciones por venir. En la tabla 1, se muestra un mapa conceptual de dichas fuentes de energía, y las tecnologías desarrolladas para explotarlas.

Tabla 1. Mapa conceptual de fuentes renovables de energía

<p><b>Solar</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Fotovoltaica (celdas solares)</li><li>• Sistemas generadores de potencia mediante concentración solar</li><li>• Iluminación y calentamiento solar pasivo</li><li>• Procesos de calentamiento solar y acondicionamiento de espacios (calentamiento y refrigeración)</li></ul> <p><b>Biomasa</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Biocarburantes</li><li>• Cultivos energéticos.</li></ul> <p><b>Eólica</b></p> <p><b>Geotérmica</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• De alta temperatura</li><li>• De temperaturas medias</li></ul> <p><b>Hidráulica</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Convencional</li><li>• Bombeo</li></ul> <p><b>Oceánica</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Térmica</li><li>• Mecánica</li></ul> <p><i>fuentes: Agencia Valenciana de Energía, España y el Laboratorio Nacional de Energías Renovables de EEUU</i></p>
---

Pensando a futuro, la Agencia Internacional de Energía<sup>6</sup> pronosticó que la capacidad de generación eléctrica mundial aumentará a casi 5,8 millones de MW para el año 2020. Si consideramos que gran parte de esa electricidad será generada por medio de hidrocarburos como sucede en la actualidad, es lógico pensar que a ese nivel de consumo los suministros de hidrocarburos mundiales empezarán a escasear, como lo han pronosticado los mejores analistas de Wall Street<sup>7</sup>.

Actualmente, el petróleo es columna vertebral del presupuesto de nuestro país, en el año 2004, tuvo una aportación record al Gobierno Federal de 600 mil millones de pesos, las mayores aportaciones en la historia de Pemex.<sup>8</sup> En contraste, las energías renovables se encuentran en etapas tempranas de desarrollo, concretamente, en México la tecnología eólica ha sido impulsada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) mediante la instalación de equipo Eólico de gran capacidad en Guerrero Negro, BCS y la construcción de una central de 1.6 MW en la Venta, Oaxaca.

De acuerdo a la Gerencia de energías no convencionales del Instituto de Investigaciones eléctricas, el sector privado también ha invertido en máquinas de gran tamaño, como la empresa Cementos Apasco, que instaló una maquina de 0.55 MW en Ramos Arizpe, Coahuila. A este sector se suman poco más de 3 MW instalados en pequeños generadores y aerobombas de agua en todo el país por diversos particulares, que en el año 2000 generaron cerca de 10.5 GWh.

Además de estas instalaciones, en el año 2003 se adicionaron cuatro proyectos con una capacidad de 121 MW y una generación potencial de 391 GWh. En el 2010 habrán 187 MW eólicos instalados, que representarán 608 GWh de generación eléctrica.

A pesar de que el potencial eólico del país no ha sido evaluado con precisión, el Instituto de Investigaciones Eléctricas, ha realizado mediciones que cuantifican un potencial superior a los 5,000 MW económicamente aprovechables en las siguientes zonas identificadas: sur del Istmo de Tehuantepec (con potenciales de 2,000 a 3,000 MW); en las penínsulas de Baja California y Yucatán; la región central del altiplano y las costas del país.<sup>9</sup>

## 1.2 Principios básicos de transformación de la energía eólica.

El viento se define como la corriente atmosférica de aire que se origina por las diferencias de temperatura entre distintos puntos de la superficie terrestre. Las masas de aire caliente más ligeras que las frías, subirán en el ecuador donde hay mayor radiación solar, hasta alcanzar una altura aproximada de 10 km<sup>10</sup> y se extenderán hacia el norte y hacia el sur. Los vientos son desviados por la rotación de la Tierra de Oeste a Este en el hemisferio norte, y de Este a Oeste en el sur.

Una fracción de la energía cinética del viento puede ser convertida en potencia útil a través de generadores eólicos, cuyos sistemas principales son: *el rotor*, que convierte la energía cinética del viento en un movimiento rotatorio en la flecha principal del sistema; y un sistema de transmisión, que acopla esta potencia mecánica de rotación de acuerdo con el tipo de aplicación.<sup>11</sup>

Existen diferentes tipos de máquinas propulsadas por el viento. Para fines prácticos esta monografía se referirá a una configuración de máquinas de eje horizontal, como se muestra en la Figura 1.

El elemento principal del rotor es la pala, debido a que está diseñada para aumentar la eficiencia en la captación de la energía del viento a través de su sección transversal conocida como *perfil aerodinámico*. Su geometría tiende a reducir la resistencia al movimiento y

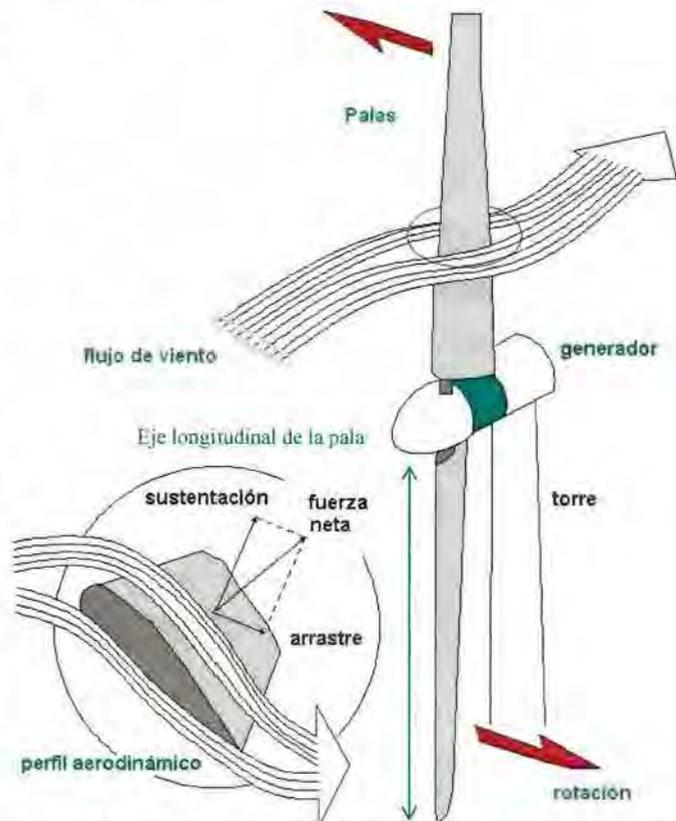


Figura 1. Configuración general de una turbina y las fuerzas que actúan sobre sus palas en movimiento. ( *Renewable Energy Resources: Basic Principles and Applications*. G.N. Tiwari, M K. Ghosal, 2005)

aprovechar al máximo las fuerzas que resultan del empuje del aire. En el recuadro de la Figura 1 se muestra el perfil aerodinámico de la pala superior; en el se esquematiza mediante vectores la resistencia que ofrece el perfil al movimiento conocido como *fuerza de arrastre*, y la fuerza perpendicular a esta conocida como sustentación, la fuerza neta que recibe la pala, es el resultado de la suma vectorial de estas dos fuerzas.

La fuerza por unidad de área que ejerce el viento está dada por:

$$F = 0.5 \rho A V_r^2 \quad (1-1)$$

Donde  $F$  es igual a la fuerza que ejerce el viento sobre la pala,  $\rho$  es la densidad del aire ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $A$  es el área de la pala de cara al viento ( $\text{m}^2$ ),  $V_r$  es la velocidad relativa del aire (la que experimenta el perfil por efecto de la rotación y la velocidad del viento). La velocidad relativa es igual a la diferencia vectorial de la velocidad del viento y la velocidad tangencial.

La cantidad de energía del viento transferida al rotor, depende de varios factores: uno de estos es la densidad del aire, este puede ser mas pesado cuando es mas frío y húmedo, que cuando es seco y cálido. Cuando es más pesado (denso) tiene la capacidad de empujar con más fuerza los objetos que obstaculicen su flujo, en este caso, las palas de una turbina. Ahora, ese empuje también está en función de la velocidad del viento, entre mas rápido se mueva el aire, mayor es el efecto de empuje sobre los objetos contra los que fluye. Esa fuerza crece con el cubo de la velocidad del viento<sup>12</sup>, por ejemplo, a 1m/s el viento tiene una potencia de 0,61  $\text{W}/\text{m}^2$ . A 2 m/s su potencia es de 4.9  $\text{W}/\text{m}^2$ , esto es ocho veces mas que a 1m/s.

La representación numérica de esta relación es

$$P = \frac{1}{2}(\rho V^3 A) \quad (1-2)$$

Donde  $P$  es la potencia del viento que pasa perpendicularmente a través de un área circular ( $W/m^2$ );  $\rho$  ( $\rho$ ) es la densidad del aire en  $kg/m^3$ ,  $V$  es la Velocidad del viento dada en  $m/s$  y  $A$  es el área en  $m^2$ .

Hay que recordar que la potencia es una medida de cuánto trabajo realiza una máquina por unidad de tiempo. Para realizar un trabajo es necesario contar con una fuerza.

Como se aprecia en la ecuación (1-2), el área que intercepta el flujo de aire, también es un factor que influye en la cantidad de empuje. Entre mayor sea el área, mayor *solidez\** y mayor es el empuje que experimenta el cuerpo. En este caso el área de barrido del rotor (área que trazan las palas durante su recorrido) determina cuanta energía del viento es capaz de capturar una turbina eólica.

La fuerza que hace girar las palas, es captada en parte, debido a que están ligeramente desalineadas con respecto al plano de rotación, como se aprecia en la Figura 2. Un perfil aerodinámico cuenta con un *borde de ataque* en la dirección de movimiento y un *borde de salida*, también conocido como "de fuga"; entre estos dos puntos se encuentra la *cuerda* que forma un ángulo con respecto al plano de rotación conocido como *ángulo de paso*<sup>13</sup>, (Figura 2).

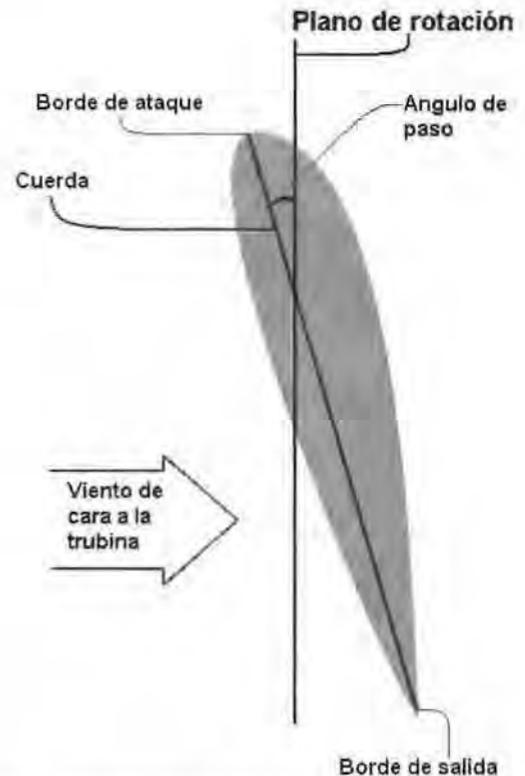


Figura 2 Nomenclatura de un perfil aerodinámico. "Renewable Energy Resources, basic principles and applications" GN Tiwari, MK Ghosal, 2005.

\* Solidez: cociente entre el área de las palas perpendicular al viento y el área de barrido.

El rendimiento de una turbina eólica es inherentemente fluctuante debido a que sólo pueden producir energía en respuesta a la velocidad del viento disponible. Cualquier sistema al que una turbina se conecta debe tomar esta variabilidad a su favor; generalmente las turbinas están optimizadas para velocidades alrededor de 10 - 15 m/s. Es mejor no diseñar generadores eólicos que maximicen su rendimiento a vientos más fuertes, ya que los vientos tan fuertes no son comunes.<sup>14</sup>

En el caso de vientos mas fuertes que los de diseño, es necesario gastar parte del exceso de la energía del viento para evitar daños en la turbina eólica. En consecuencia, todas las maquinas están diseñadas con algún tipo de control de potencia. En grandes generadores eólicos es común encontrar regulación por cambio del ángulo de paso y regulación por pérdida aerodinámica.

En un generador eólico de *regulación por cambio del ángulo de paso*, las palas del rotor deben ser capaces de moverse sobre su eje longitudinal (ver Figura 1). Los generadores eólicos de *regulación (pasiva) por pérdida aerodinámica* tienen las palas del rotor unidas al cubo en un ángulo fijo. Sin embargo, el perfil de la pala ha sido aerodinámicamente diseñado para asegurar que, en el momento en que la velocidad del viento sea demasiado alta, se producirá una turbulencia cuyo efecto será la pérdida de sustentación, evitando que la fuerza ascensional de la pala actúe sobre el rotor, y no aumente su velocidad.

Existen otros métodos de control de potencia, como la regulación activa por pérdida aerodinámica; que consiste en girar las palas en la dirección contraria a la que lo haría una máquina de regulación por cambio del ángulo de paso. En otras palabras, aumentará el ángulo de paso de las palas para llevarlas hasta una posición de mayor pérdida de sustentación, y poder así consumir el exceso de energía del viento.<sup>15</sup>

### 1.3 Antecedentes Históricos

La utilización del viento es tan antigua como es posible registrar. Algunos autores hacen referencia a la máquina de Heron de Alejandría de hace 2,000 años, que es lo mas parecido a un molino de viento, aunque fue diseñada para accionar un pistón de aire de lo que muchos llamarían un instrumento musical.

La utilización del viento para generar electricidad es un tanto más reciente. Se cree que la primera turbina eólica de funcionamiento automático para generación de electricidad fue construida en 1887 por Charles F. Brush, en Cleveland (Ohio). El rotor tenía 17 m de diámetro y 144 palas fabricadas en madera de cedro.<sup>16</sup>

Otro pionero de las modernas turbinas eólicas generadoras de electricidad fue Poul la Cour de Dinamarca. Construyó su propio túnel de viento para realizar experimentos y sentó las bases de la aerodinámica moderna, diseñó un generador cuatripala de aspecto similar al de los molinos holandeses, de palas rectangulares un tanto torcidas. Tenía 25 m de diámetro, y era sostenido por una torre metálica de 24 metros de altura. Hay que recalcar que ya se empieza a tomar ventaja de construir máquinas con menor número de palas.

En 1927, el holandés Dekker construyó el primer rotor provisto de palas con sección aerodinámica, es decir, las palas se parecían mas a las alas de un avión. Para 1940-50, las turbinas generaban corriente alterna; Johannes Juul llegó a ser un pionero en el desarrollo de estos generadores eólicos, en 1956-57 construyó el generador eólico de Gedser<sup>17</sup>, esta máquina se orientaba electromecánicamente. J. Juul inventó los frenos aerodinámicos de emergencia en punta de pala, que se sueltan por la fuerza centrífuga en caso de sobrevelocidad.

A partir de 1979, las turbinas eólicas ya tenían las características generales de las turbinas actuales. Desde entonces los generadores eólicos han ido evolucionando hasta convertirse en gigantes que pueden llegar a producir 5 MW de energía eléctrica. Sus palas pueden medir hasta 61.5 metros de largo y 183 metros de altura, y pueden llegar a tener complejos sistemas de control y gran rendimiento.

## 1.4 Generadores eólicos modernos

A continuación se presenta el esquema general de las turbinas eólicas modernas comúnmente encontradas en grandes instalaciones (o granjas) eólicas. Cabe señalar que existen una gran variedad de tipologías, pero este escrito hace referencia al tipo utilizado en dichas instalaciones, como el mostrado en la Fig. 3.

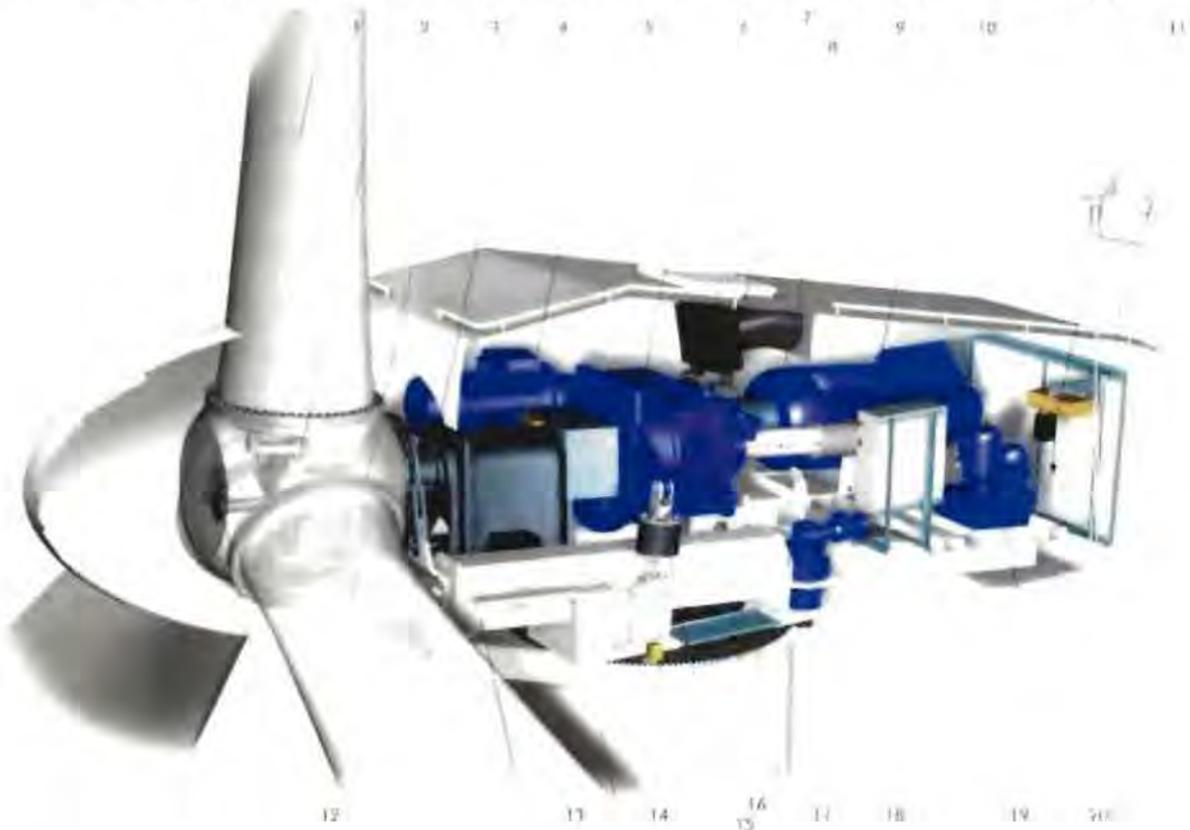


Fig. 3. Partes principales de la turbina: 1.Pala, 2.Cubo, 3.Rodamiento de la pala, 4.Eje Principal, 5.Generador secundario, 6.Multiplicadora, 7. Freno de disco 8. Radiador, 9. Eje Cardan, 10. Generador primario, 11. Entrada de Servicio (mediante grúa) 12. Mecanismo de regulación por cambio del ángulo de paso: 13. Armazón principal, 14. Torre, 15. Control del sistema de orientación, 16. Barra guía, 17. Rodamiento de orientación, 18. Engranajes de orientación, 19. Unidad de control 20. Sistema hidráulico. (Vestas V47 660) <http://wind.erl.itri.org.tw/demonstration/Specification.htm>

### 1.4.1 Generadores eólicos conectados en red

Las interconexiones entre varios dispositivos conforman una red. Las redes pueden ser: circuitos alimentadores de baterías, sistemas de potencia a escala residencial, redes aisladas o en islas, y las grandes redes de electrificación de empresas de servicios públicos.

En grandes redes, las turbinas eólicas sirven para reducir la carga eléctrica total y esto conlleva a una disminución tanto en el número de generadores convencionales que se usan, como en el uso de combustible de aquellos que están en funcionamiento. En redes más pequeñas, puede haber almacenamiento de energía, generadores de respaldo, y algunos sistemas de control especializados.

En términos de generación de potencia, las turbinas del viento frecuentemente encontradas son realmente bastante pequeñas - en el orden de 10 kW o menos. En términos de capacidad total generadora, las turbinas que constituyen la mayor capacidad son en general bastante grandes - en el rango de 500 kW a 2 MW. Estas turbinas más grandes se utilizan principalmente en amplias redes de electrificación, principalmente en Europa y los Estados Unidos.<sup>18</sup>

Actualmente las grandes instalaciones de electrificación eólica están concentradas en cinco países. Alemania cuenta con el 37% de la producción global de energía eólica, Estados Unidos un 16%, España 16%, Dinamarca 8%, India 5%, mientras que en el resto del mundo se produce un 18%.<sup>19</sup>

## Capítulo 2. Sistema generador de potencia

En este capítulo abordaremos los subsistemas de un generador eólico de eje horizontal típica. Presentaremos una descripción de los componentes directamente involucrados en la transformación de la energía cinética del viento, en energía mecánica y eléctrica, como el rotor, el sistema de transmisión de potencia, el generador y los frenos.

### 2.1 Rotor

El rotor se compone de las palas de la turbina eólica, las superficies de control aerodinámico y el cubo. Se considera a menudo que éstos son los componentes más importantes, tanto desde el punto de vista de su desempeño, como desde el punto de vista del costo global. El cubo del rotor está acoplado al eje de baja velocidad del generador.

Las palas del rotor capturan el viento y transmiten su potencia hacia el cubo. En un generador eólico moderno de 600 kW cada pala mide alrededor de 20 metros de longitud y su diseño es muy parecido al del ala de un avión.<sup>20</sup>

Se han construido turbinas de una sola pala en el pasado, pero ya no se fabrican. Las palas de la mayoría de las turbinas se hacen de compuestos, principalmente plásticos reforzados con fibra de vidrio (GRP), pero a veces se usa lámina de madera/epoxy.

Los rotores de generadores eólicos deben operar bajo condiciones que incluyen cargas estables así como variables periódicas y estocásticas. Estas cargas variables ocurren durante un gran número de ciclos, así que la fatiga de la estructura del rotor, es un aspecto importante a considerar durante su diseño.

El diseñador debe esforzarse por mantener las tensiones cíclicas tan bajas como sea posible, y usar materiales que puedan resistir esas tensiones el mayor tiempo posible. El rotor también es un generador de cargas cíclicas para el resto de la turbina, en particular para el sistema de transmisión.

Las próximas secciones se enfocan en los temas de interés primario en el rotor: las palas y el cubo.

### 2.1.1 Palas

Los componentes más importantes del rotor son las palas. Estas son los dispositivos que convierten la fuerza del viento en el torque requerido para generar potencia útil. Hay varios aspectos que considerar durante el diseño de las palas, pero la mayoría de estos se pueden agrupar en dos categorías: (1) Aerodinámica y (2) estructura.

La forma básica y las dimensiones de las palas son principalmente determinadas por el esquema global de la turbina y la aerodinámica. Los detalles en la forma, particularmente cerca de la raíz de la pala, también están influenciados por consideraciones estructurales. Por ejemplo, la forma de la superficie de las palas en la mayoría las turbinas eólicas reales, difiere significativamente de la forma óptima (Fig. 4) debido a que el costo por manufactura sería demasiado alto.<sup>21</sup>

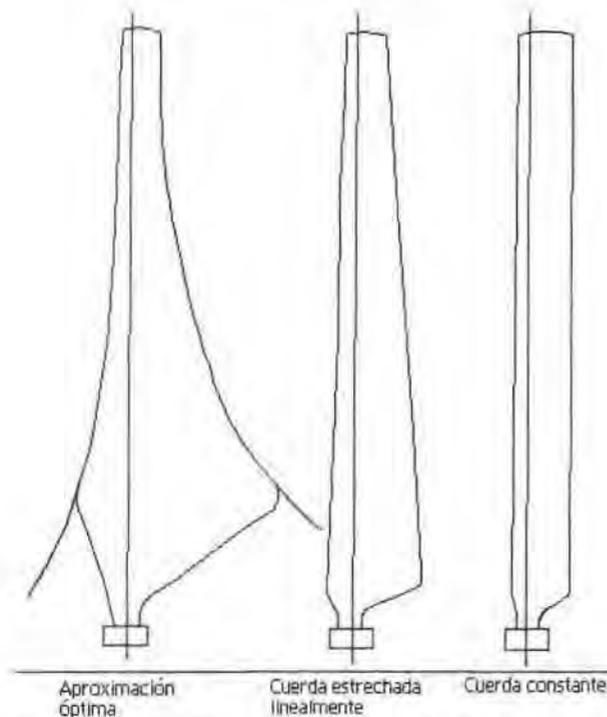


Fig. 4. Formas típicas de palas "Windkraftanlagen. - Teubner Verlag, Stuttgart". Gasch, R. (1996)

Las palas de una turbina eólica frecuentemente no tienen sólo una forma de perfil aerodinámico a lo largo de su longitud, (ver fig. 7). Más comúnmente pero no siempre, los perfiles son todos de la misma familia, pero el espesor relativo varía. Los perfiles más gruesos están más cerca de la raíz, estos proporcionan mayor fuerza sin degradar seriamente el desempeño global de la pala.

Aproximadamente el 80 % de la potencia total generada por el rotor, corresponde a la fracción de la pala comprendida entre 30 y 95 % de su longitud, medida a partir del eje de rotación.<sup>22</sup>

Las características materiales y los métodos disponibles de fabricación también son particularmente importantes en la elección de la forma exacta de las palas. Por supuesto, será crucial minimizar el costo de la energía en el periodo de vida de la turbina, esto quiere decir que el costo de la turbina en si, además de los costos de mantenimiento y operación, deben mantenerse lo más bajos posibles.

### **Diseño aerodinámico.**

Los factores aerodinámicos principales que afectan el diseño de la pala, según J.F. Manwell<sup>23</sup> son:

- 1 Potencia nominal de diseño y velocidad de viento clasificada (nominal).
- 2 Razón de la velocidad de punta.
- 3 Solidez.
- 4 Perfil aerodinámico.
- 5 Numero de palas.
- 6 Control de potencia (por pérdida aerodinámica o grado de inclinación variable).
- 7 Orientación del rotor (barlovento o sotavento de la torre).

El área barrida por el rotor, y por ende la longitud de las palas, esta directamente relacionado con la potencia nominal de diseño y velocidad de viento nominal. Sin tener cambios en las demás variables, usualmente es ventajoso diseñar una *razón de velocidad de punta* alta, que es la velocidad lineal a la que se mueve la punta de la pala, dividida entre la velocidad del viento.<sup>24</sup>

Una razón de velocidad de punta alta produce baja solidez (fig. 5) que a su vez resulta en menor área total de la pala. Esto hace que las palas sean más ligeras, y por lo tanto también menos caras. Una velocidad de rotación más alta, también beneficia al resto del sistema de transmisión de potencia.

Por otro lado, las proporciones de velocidad de punta altas provocan más ruido en la turbina. Debido a que las palas son más delgadas, las tensiones perpendiculares al plano de rotación tienden a ser más fuertes. Palas más delgadas también son más flexibles. Esto a veces puede ser una ventaja, pero las palas más delgadas también pueden experimentar problemas de vibración, y las flexiones extremas pueden producir impactos de la pala contra la torre. La razón o proporción de velocidad de punta también tiene un efecto directo en la cuerda y la distribución de la torsión de la pala.

*Proporción de velocidad de punta  $\lambda$ .* Mientras la razón de la velocidad de punta aumenta (durante el diseño) la selección del perfil aerodinámico apropiado se vuelve progresivamente más importante. En particular es necesario mantener la proporción de sustentación-arrastre alta para que el rotor tenga un alto coeficiente de potencia. También es de notar que el coeficiente de sustentación tendrá efecto en la solidez del rotor y en la cuerda de la pala: entre más alto sea el coeficiente de sustentación, más pequeña la cuerda. Además, la elección del perfil aerodinámico es importante a tal grado, que afecta el método de control aerodinámico usado en el rotor. Por ejemplo, un perfil que es conveniente para un rotor regulado por cambio en el ángulo de paso, puede no ser apropiado para una turbina regulada por pérdida aerodinámica.<sup>25</sup>

Algunos factores que dificultan alcanzar valores altos de razón de velocidad de punta, incluyen los problemas de arranque asociados con rotores de bajo torque, particularmente en vientos moderados o bajos.<sup>26</sup> (0.4- 8.7 m/s, para generadores eólicos grandes, ver Anexo D)<sup>27</sup>

Ciertos perfiles, particularmente en turbinas que tienen regulación por pérdida aerodinámica, son bastante susceptibles a fallar, debido por ejemplo, a una costra de insectos en el borde de ataque<sup>28</sup>. La selección de un perfil puede hacerse con la ayuda de bases de datos, tales como las desarrolladas por Selig.<sup>29</sup>

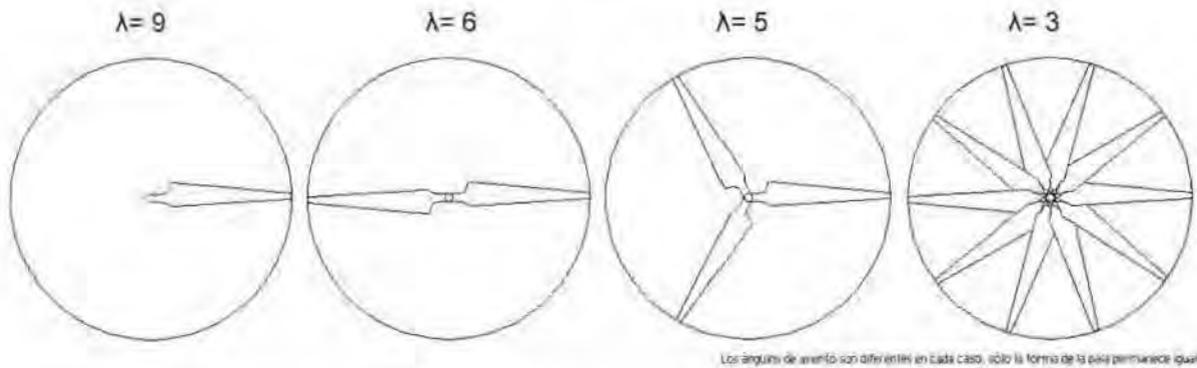


Fig. 5 Diferentes valores de proporción de velocidad de punta. <http://www.scoraigwind.com/books/>

Con las técnicas actuales de manufactura de palas, en general es ventajoso tener el menor número posible. Esto es debido principalmente a los costos fijos de fabricación, además, cuando hay más palas (para una determinada solidez) estas serán menos rígidas y pueden experimentar mayor tensión en las raíces. Las turbinas eólicas de dos palas, históricamente han tenido una solidez más baja que las máquinas de tres palas. Esto mantiene el costo bajo, lo cual es una ventaja sobre las turbinas de tres palas.

El método de control o regulación de potencia por pérdida aerodinámica o por cambio del ángulo de paso, tiene un efecto significativo en el diseño de las palas, particularmente con respecto a la selección del perfil aerodinámico. Una turbina regulada por pérdida aerodinámica, depende de la pérdida de sustentación para reducir la producción de potencia durante vientos altos. Es muy deseable que las palas tengan características de pérdida aerodinámica buenas. Estas deben entrar en pérdida gradualmente mientras la velocidad del viento incrementa, y deben estar relativamente libres de efectos transitorios, como los causados por la pérdida dinámica. En turbinas reguladas por cambio del ángulo de paso, las características de pérdida son generalmente mucho menos importantes. Sin embargo, es importante saber que las palas funcionan aceptablemente al inclinarse durante vientos altos.<sup>30</sup>

Por otro lado, la conicidad es una inclinación de las palas fuera del plano de rotación y está definida por las raíces de la pala. La mayoría de las máquinas con

rotor a sotavento operan con orientación libre. En dichas máquinas, las palas deben estar inclinadas lejos del plano de rotación para permitir a los rotores rastrear el viento y mantener un poco de estabilidad en el movimiento de orientación.

El diseño de la pala involucra a menudo varias iteraciones para calcular propiamente los requisitos aerodinámicos y estructurales. En cada iteración se desarrolla un diseño provisional, y luego es analizado. Un método para acelerar este proceso, conocido como método de diseño inverso, ha sido desarrollado por Selig y Tangier.<sup>31</sup> Involucra el uso de un programa de computadora (PROPID) para proponer diseños que reunirán ciertos requisitos. Por ejemplo, es posible especificar: dimensiones globales, una serie de perfiles, potencia pico y coeficiente de sustentación de la pala a lo largo de la envergadura, y luego usar el programa para determinar la cuerda y distribución de la torsión de la pala. Otros programas de diseño encontrados son: *YawDyn*, *FAST\_AD*, *BLADED*, *Phatas-III*, y *ADAMS*.<sup>32</sup>

### **Diseño estructural.**

Además de las cargas que una pala de turbina debe resistir, las consideraciones primarias en su diseño estructural son (1) los materiales y (2) las opciones de fabricación. Un aspecto importante adicional es la unión de las palas al cubo.

Históricamente, las palas de las turbinas eólicas se construyeron de madera, a veces cubiertas con tela. Hasta mediados de este siglo, las palas para turbinas eólicas más grandes se construyeron de acero. Los ejemplos incluyen la turbina Smith-Putnam 1250 kW (años cuarenta) y la turbina Gedser de 200 kW.<sup>33</sup>

Desde los años setenta, la mayoría de las palas para turbinas eólicas de eje horizontal, se han construido con compuestos. Los compuestos más comunes consisten de fibra de vidrio en una resina de poliéster, aunque la lámina de madera-epoxy también se ha usado ampliamente. Puede encontrarse información acerca de compuestos usados para las palas de turbinas eólicas en "Wind Energy Explained"<sup>30</sup>, de Manwell o en "La energía eólica, tecnología e historia" de Cádiz.<sup>33</sup>

En algunas turbinas eólicas se ha usado aluminio para la construcción de la palas. El aluminio ha sido una opción popular para las turbinas de eje vertical. Sus palas normalmente tienen cuerda constante sin torsión, esto les permite ser construidas mediante pultrusion. La pultrusion es un proceso donde el material (como aluminio) se estira a través de una matriz moldeadora de acero para crear la forma deseada. La forma es uniforme longitudinalmente.<sup>34</sup>

### **Detalles de la fabricación de las palas.**

El concepto básico en la fabricación de palas para turbinas eólicas es hacer una estructura fuerte, ligera cuya forma exterior corresponda al diseño aerodinámico, es decir, cada corte transversal de una pala muestra un perfil aerodinámico; además, la pala normalmente se adelgaza hacia la punta y se "tuerce". Con el fin de construir semejante estructura y obtener la fuerza requerida, el método usual es hacer la pala en dos tipos de partes: (1) forro y (2) colocación de largueros. El forro proporciona la forma del perfil deseado y los largueros proporcionan la rigidez.

El primer paso en la fabricación de una pala, normalmente es construir un armazón a partir de largueros. Los armazones pueden ser de diferentes formas, pero el propósito es crear un miembro ligero que pueda resistir los momentos aplicados. La forma del armazón puede ser una trama, una viga de compartimiento o una D. En el caso de una viga de compartimiento o trama, la dimensión externa en dirección perpendicular al plano de rotación, será tal que pueda unirse a la parte interna del forro por arriba y por debajo de la pala. Con un armazón D, el forro de la pala se une al frente del armazón. El armazón en palas de fibra de vidrio normalmente es fabricado construyendo capas de fibra de vidrio y resina alrededor de un mandril que posteriormente es removido.

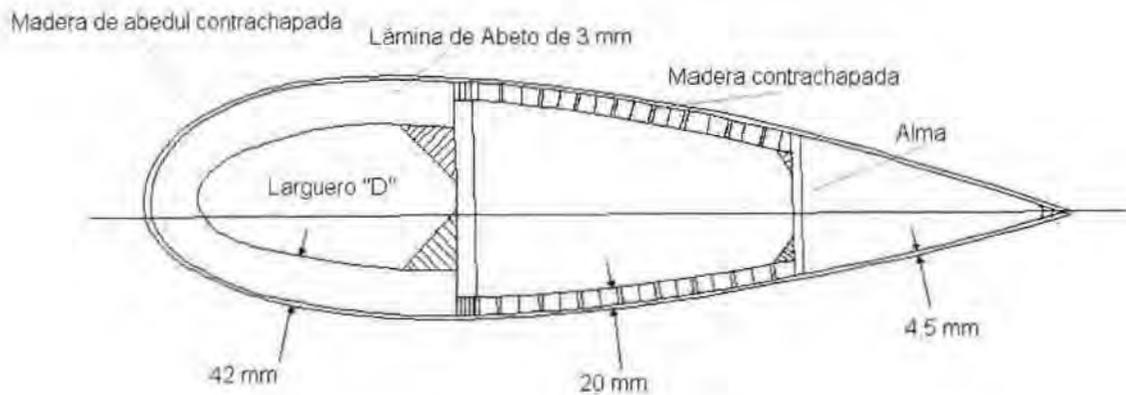


Figura 6. Sección transversal de una pala de madera-epoxi "Wind Energy Explained Theory, Design and Application." Manwell, J. F., McGowan, J.G., Rogers, A.L., (2004)

El forro de una pala GRP se construye mediante la unión de capas de tela de fibra de vidrio y resina dentro de un molde. En este método hay dos partes para amoldar, uno para la superficie superior y otro para la superficie inferior. Cuando se completan las dos mitades de la pala, se remueven de los moldes y se unen con el armazón en medio.

La fabricación de palas de madera-epoxy (fig.6) sigue un procedimiento similar. La diferencia principal es que se usa madera en el laminado en lugar de la tela de fibra de vidrio. Además, el espesor del forro relativo al espesor de la pala, normalmente es mayor que en una pala de GRP, y en lugar de un armazón de vigas tipo caja, se usa una tira de madera contrachapada para proporcionar rigidez.

Note que al usar los moldes del tipo descrito aquí, es posible fabricar cualquier tipo de superficie. Esto incluye superficies cóncavas que normalmente se encuentran en algunos de los perfiles más nuevos, (Figura 7) como la serie SERI (Solar Energy Research Institute). La desventaja de construir palas de esta manera es que el proceso involucra una cantidad significativa de mano de obra. Esto resulta en costos altos, y también hace difícil asegurar la consistencia de una pala a otra.

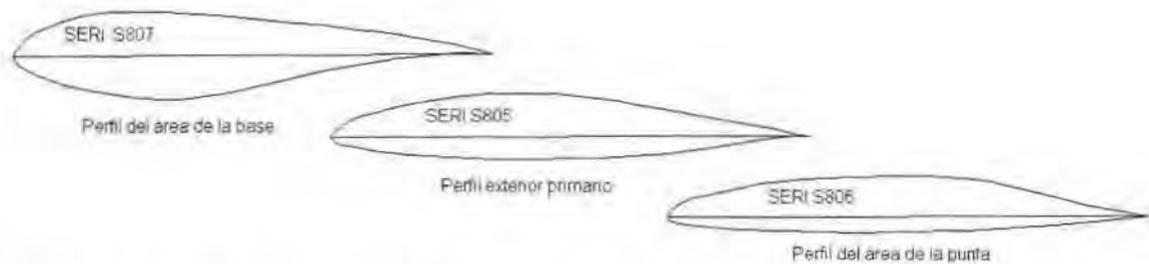


Figura 7. Perfiles del Solar Energy Research Institute (SERI), familia de perfiles aerodinámicos delgados. National Research Council, (1991)

Otro método para fabricar palas es conocido como "filamento bobinado". Ésta es una técnica para hacer palas de fibra de vidrio, pero el proceso es bastante diferente que el método de molde descrito anteriormente. En el método de filamento bobinado, se enrollan fibras de vidrio sobre un mandril, mientras la resina se aplica simultáneamente. Este método, desarrollado originalmente en la industria aeroespacial, puede automatizarse. Sin embargo, es difícil de usar con formas cóncavas.

#### **Unión de las palas al cubo.**

Una parte crítica de la pala es la raíz, que es el extremo más cercano al cubo. La raíz experimenta las cargas más altas, y también es la ubicación que debe mantener la conexión al cubo. Para reducir las tensiones, generalmente la raíz se fabrica tan gruesa como es posible en la dirección perpendicular al plano de rotación. La conexión entre la raíz y el cubo ha demostrado a menudo ser difícil. Esto es principalmente debido a las desigualdades en las propiedades de los materiales y la rigidez entre las palas, el cubo y los pernos. Las cargas muy variantes también contribuyen al problema.

Un tipo de raíz es conocida como el diseño Hütter, nombrado así por su inventor, el pionero en energía eólica alemana Ulrich Hütter. En este método, largos ramales de fibra de vidrio se unen en la parte más baja de la pala. Se colocan bridas circulares de metal en la base de la pala, y unidos a estas bridas hay espaciadores circulares huecos. Los ramales de fibra de vidrio se envuelven

alrededor de los espaciadores y luego se llevan de regreso al resto de la pala. La resina mantiene todos los ramales y los collarines en su lugar. Las palas se unen eventualmente al cubo mediante tornillos que atraviesan las bridas y espaciadores.

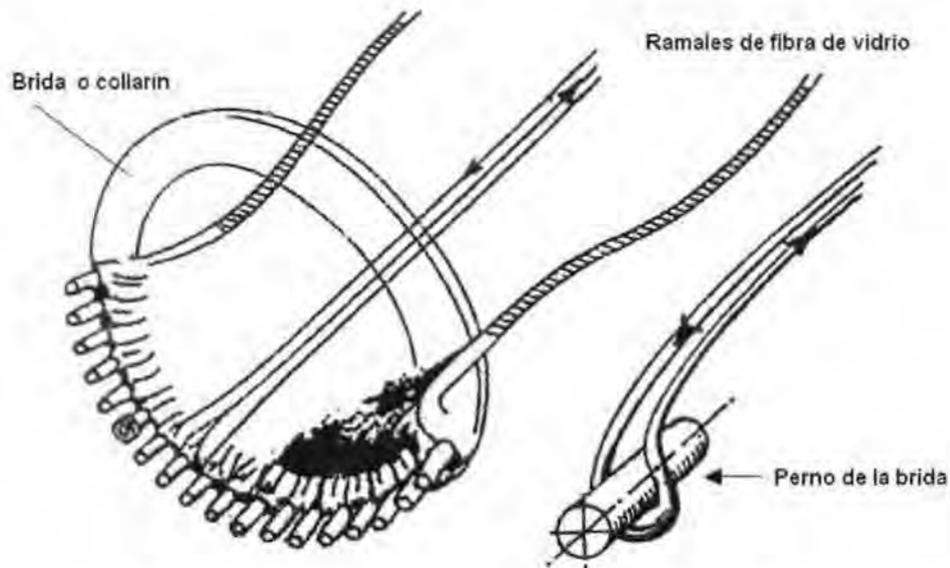


Fig. 8 Variante del diseño de Hütter "Wind Energy Explained Theory, Design and Application,"  
Manwell, J. F., McGowan, J.G., Rogers, A.L., (2004)

Este diseño de la raíz es más aplicable a rotores con grado de inclinación fijo. El método puede modificarse para rotores con ángulo de inclinación variable.

Una variante del diseño de Hütter, que fue usada ampliamente en los años setenta, se muestra en la figura 8, la cual ilustra parte de una sección transversal de la raíz. La superficie inferior de la placa de asiento es la más cercana al cubo. La placa de base y un anillo de acero a presión forman un sandwich dentro del cual se encuentran los manojos de fibra de vidrio formando ovillos (ases torcidas de fibras). Dichos manojos vienen del resto de la pala, y se envuelven alrededor de pernos de acero. Los tornillos atraviesan la placa de presión, el cubo, y la placa de asiento para completar la conexión.<sup>35</sup>

La raíz de Hütter modificada tiene algunas limitaciones. El problema es que está sujeta a fatiga. Las tensiones cíclicas durante el funcionamiento tienden a aflojar la resina de la matriz y permiten el movimiento relativo de la fibra de vidrio. El movimiento del vidrio exacerba el problema. El control de calidad cuidadoso reduce la frecuencia de ocurrencia.

Otro método de unión es el uso de refuerzos o juntas roscadas unidas directamente en las palas. Este método, se desarrolló originalmente junto con las palas de madera-epoxy, pero ha demostrado ser aplicable también en palas de GRP.

La sujeción al cubo de las palas de turbinas eólicas con ángulo de inclinación fijo, comúnmente se realiza mediante tornillos o refuerzos que se alinean radialmente, y de forma perpendicular al extremo de la raíz de la pala. Estos pernos deben resistir todas las cargas que surgen de las palas.

La construcción de la raíz de una pala de ángulo de inclinación variable, es bastante diferente que el de una pala de ángulo fijo. En particular, la conexión entre la raíz y el cubo debe incorporar rodamientos para que la pala pueda inclinarse. Estos rodamientos deberán poder resistir los momentos flexionantes y fuerzas de cizallamiento impuestas por el resto de la pala. Además, éstos, u otros rodamientos deben tomar la carga centrífuga que resulta de la rotación del rotor.

Los métodos de unión de palas discutidos anteriormente son mas comunes en turbinas de tamaño medio o más grandes (Anexo D) . Las palas de turbinas pequeñas normalmente emplean técnicas de unión diferentes.

### 2.1.2 Superficies de control aerodinámico

Una superficie de control aerodinámico es un dispositivo que puede moverse para cambiar las características aerodinámicas de un rotor. Hay una gran variedad de tipos de superficies del control aerodinámicas que pueden incorporarse en las palas de turbinas eólicas. Estos deben diseñarse junto con el resto del rotor. La selección de superficies de control aerodinámico está fuertemente relacionada con la filosofía del control global. Las turbinas eólicas reguladas por pérdida aerodinámica, normalmente incorporan algún tipo de freno aerodinámico, como los frenos de la punta, flaps o alerones.

Las turbinas que no se controlan mediante pérdida aerodinámica normalmente tienen un control aerodinámico mucho más extensivo. En turbinas reguladas por cambio del ángulo de paso, la pala entera puede girar sobre su eje longitudinal.<sup>36</sup>

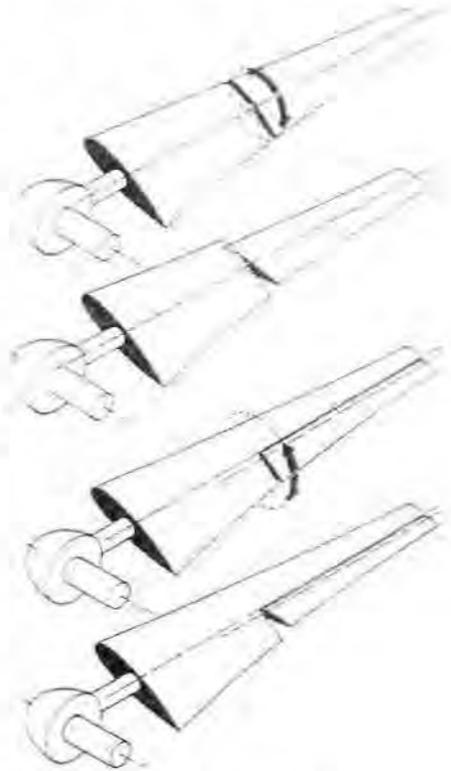


Fig. 9 Superficies de control Aerodinámico "La energía Eólica, tecnología e Historia" Cádiz D. J, (1984)

Algunos diseños de turbina usan regulación por cambio del grado de inclinación de envergadura parcial (fig 9). En este caso, la parte interna de la pala permanece fija con respecto al cubo. La parte exterior está montada sobre rodamientos, y puede girarse sobre el eje radial de la pala. La ventaja de la regulación por grado de inclinación de envergadura parcial es que el mecanismo no necesita ser tan voluminoso como para el control de grado de inclinación de envergadura completo.

Otro tipo de superficie de regulación aerodinámica es el alerón. Éste es un ala flexible movable, localizada en el borde de arrastre de la pala. El alerón puede ser aproximadamente  $1/3$  de la pala entera, y se extiende aproximadamente  $1/4$  de distancia hacia el borde de ataque.

Cualquier superficie de control se usa junto con un mecanismo que le permite moverse como es requerido. Este mecanismo puede incluir rodamientos, bisagras, resortes y uniones. Los frenos aerodinámicos incluyen a menudo electroimanes para sostener la superficie en su lugar durante el funcionamiento normal, pero para liberarla cuando es necesario. Los mecanismos para regulación por inclinación activa o por alerón, incluyen motores para operarlos.

### **2.1.3 Cubo**

El cubo de la turbina es aquel componente que conecta las palas al eje principal y finalmente al resto del sistema de transmisión de potencia. El cubo transmite y debe resistir todas las cargas generadas por las palas. Normalmente se hacen cubos de acero, soldado o colado. Los detalles entre cubos difieren considerablemente dependiendo de la filosofía de diseño global de la turbina.

**Tipos.** Existen tres tipos básicos de diseño del cubo que se han aplicado en turbinas eólicas de eje horizontal: (1) los cubos rígidos, (2) cubos balanceantes, y (3) los cubos para palas con bisagras o articulados. Algunos de los tipos comunes de cubos se ilustran en la Figura 10.

#### *Cubos rígidos*

Los cubos rígidos, tienen todas las partes principales fijas con respecto al eje principal. Estos son el diseño más común, y es casi universal para las máquinas con tres (o más) palas. El término "cubo rígido", incluye sin embargo aquellos cubos en los que el grado de inclinación de la pala puede variarse, pero ningún otro movimiento de la pala se permite.

El cuerpo principal de un cubo rígido es una pieza soldada o fundida a la cual se unen las palas, y que puede sujetarse al eje principal. Si las palas tienen pre-conicidad relativa al eje principal, esto se preverá en la geometría del cubo. Un cubo rígido debe ser lo bastante fuerte para resistir todas las cargas que pueden surgir de cualquier carga aerodinámica sobre las palas, así como cargas inducidas dinámicamente, como aquellas debidas a la rotación y al movimiento de orientación.

El cubo en una turbina regulada por cambio del ángulo de paso, debe tener rodamientos en las raíces de la pala y medios para afianzar las palas contra todo movimiento exceptuando la inclinación. Los mecanismos de inclinación pueden usar una barra que atraviesa el eje principal junto con una unión en el cubo. Esta unión se conecta a su vez a las raíces de las palas. La barra de inclinación es impulsada por un motor montado en la parte no rotativa de la turbina.

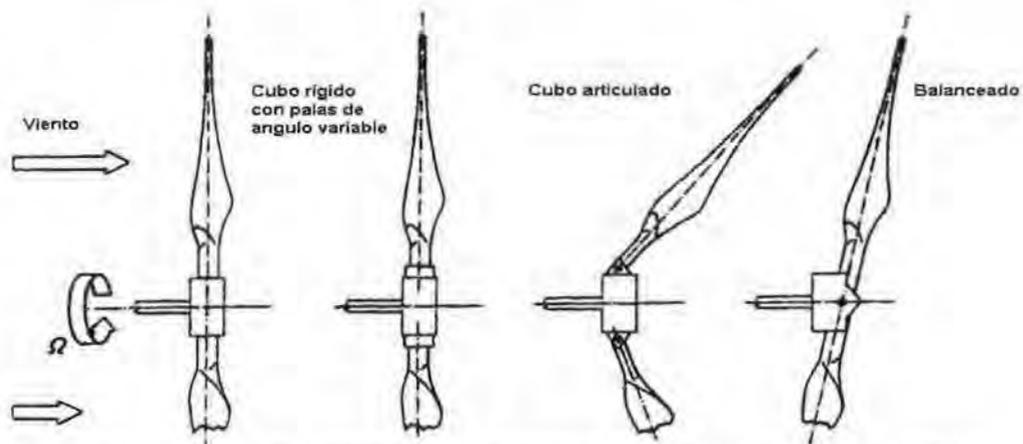


Figura 10. Tipos comunes de cubos "Wind Energy Explained Theory, Design and Application." Manwell, J. F., McGowan, J.G., Rogers, A.L., (2004)

Un método alternativo para inclinar las palas, es montar motores eléctricos en el cubo y hacerlos mover las palas directamente. En este caso, es necesario proporcionar potencia a los motores, mediante anillos rozantes (conectores rotativos). Sin tener en cuenta la filosofía del diseño del mecanismo inclinación, este deberá ser a prueba de fallas.

### Cubos balanceantes.

Los cubos balanceantes (Fig. 11) se usan en casi todas las turbinas eólicas de dos palas. Esto es porque un cubo balanceante puede reducir las cargas debido a desequilibrios aerodinámicos o cargas debido a efectos dinámicos de la rotación del rotor, que pongan en peligro a la turbina. Los cubos balanceantes son considerablemente más complejos que los cubos rígidos. Estos consisten en por lo menos dos partes principales: el cuerpo del cubo principal y un pasador de muñón, además de rodamientos y amortiguadores.

Los cubos balanceantes permiten el movimiento relativo entre la parte que conecta a las palas y el eje principal. Cuando una pala se mueve en una dirección, la otra pala se mueve en sentido opuesto.

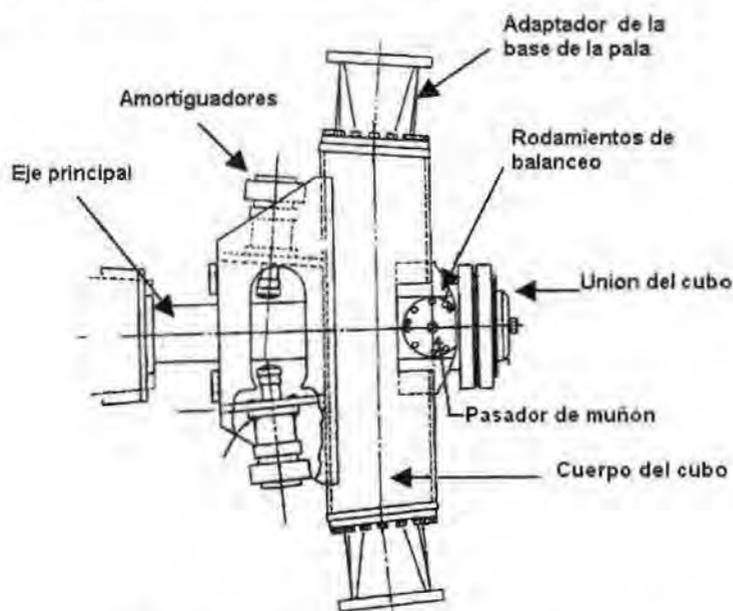


Fig. 11. Cubo balanceante "Wind Energy Explained Theory, Design and Application." Manwell, et al, (2004)

En ambos extremos del cuerpo principal del cubo se encuentran los puntos de unión para las palas. Este cubo tiene palas que al rotar, trazan una cónica a sotavento, y no un plano de rotación. Los adaptadores para la base de la pala, no son perpendiculares al eje longitudinal del cubo, como se muestra en la figura 11.

En ambos lados del cuerpo del cubo hay rodamientos de balanceo. Estos se sostienen en su lugar mediante seguros removibles. El arreglo es tal que los rodamientos quedan sobre un eje perpendicular al eje principal, y equidistante de las puntas de la pala. Los rodamientos de balanceo llevan todas las cargas que pasan entre el cuerpo del cubo y el pasador de muñón; este último se conecta rigidamente al eje principal.

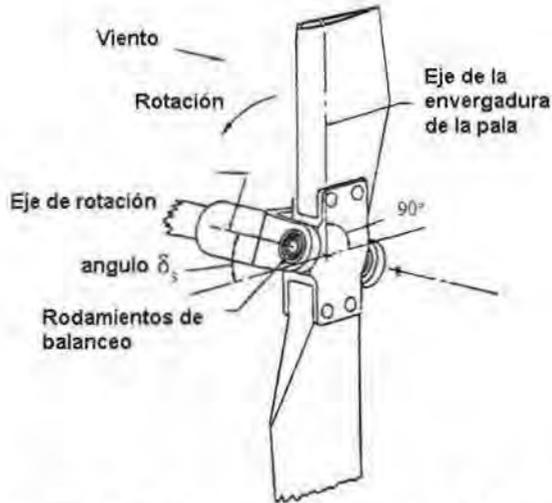


Fig 12 Cubo con un ángulo delta-3  $\neq 0$  "Wind Energy Explained Theory, Design and Application." Manwell, et al, (2004)

En el cubo mostrado en la Figura 12, la línea perpendicular al pasador de muñón, forma un ángulo con la línea del eje de la envergadura de las palas. El ángulo entre las dos es conocido como el ángulo delta-3 ( $\delta_3$ , un término importado de la industria del helicóptero.) Cuando las líneas son paralelas ( $\delta_3 = 0$ ) todo el movimiento de la pala está en la dirección del abatimiento durante el balanceo. Cuando  $\delta_3 \neq 0$  entonces hay también una componente de

inclinación. Puede haber poco beneficio al tener un ángulo  $\delta_3 \neq 0$ , pero no hay acuerdo general en la industria de la energía eólica acerca de si debe y cuando emplearse, y qué tan grande debe ser el ángulo.

La mayoría de los cubos balanceantes se han construido para las turbinas con ángulo de inclinación fijo, pero estos también pueden usarse en turbinas con ángulo de inclinación variable. El diseño del sistema de ángulo variable es más complejo desde que el mecanismo impulsor está en la parte del cubo que se mueve con respecto al eje principal.

Los cubos balanceados requieren dos tipos de rodamientos. Uno es del tipo cilíndrico, radialmente cargado; el otro es un rodamiento de empuje. Hay un rodamiento o cojinete de cada tipo en cada pin. Los cojinetes cilíndricos llevan plena carga cuando el eje del pin se encuentra horizontal. Cuando el eje del pin no es horizontal, hay un componente axial principalmente debido al peso del rotor. Uno de los cojinetes de empuje llevará esa parte de la carga. Se hacen rodamientos de balanceo típicamente de compuestos especiales.

Durante el funcionamiento normal, un cubo balanceado se moverá sólo unos grados adelante y hacia atrás. Durante los vientos altos, arranques y frenadas, o altas tasas de orientación, los movimientos de balanceo pueden ser mayores. Para prevenir el daño de impacto bajo estas condiciones, se proporcionan amortiguadores del balanceo y frenos graduales. En el cubo mostrado en la Figura 11 (que tiene un rango máximo permitido de  $\pm 7.0$  grados) los amortiguadores están en el lado del cubo opuesto los rodamientos. Las opciones para unir un cubo balanceado al eje principal son iguales que para los cubos rígidos.

### *Cubos articulados*

Un cubo articulado con bisagras es de alguna manera el punto intermedio entre un cubo rígido y un cubo balanceado, estas articulaciones permiten el movimiento independiente de las palas con respecto al plano de rotación. Un cubo articulado es básicamente un cubo rígido con bisagras para las palas.

El montaje de la bisagra agrega un poco de complejidad. Como con un cubo balanceado, debe haber rodamientos en las bisagras. Los cubos balanceados tienen la ventaja de que las dos palas tienden a equilibrarse entre sí, así que la falta de rigidez centrífuga durante el funcionamiento a rpm bajas no es un problema mayor. No hay ningún contrapeso en una pala con bisagras, sin embargo, debe proporcionarse un mecanismo para impedir que las palas caigan durante velocidades rotatorias bajas. Esto podría incluir resortes. Ciertamente incluirá también amortiguadores.

Dichos cubos se usan sólo en máquinas comerciales, pero han sido empleados en algunas turbinas históricamente importantes (Smith-Putnam) y está recibiendo atención renovada.<sup>37</sup>

## Unión del Cubo.

El cubo debe unirse al eje principal de forma que no se deslice o gire en el eje. Las turbinas más pequeñas frecuentemente emplean clavijas con seguros en el eje y el cubo. El eje también se rosca y las superficies de unión se *mecanizan* (y quizás se adelgacen en la punta) para un ajuste firme. El cubo puede entonces sujetarse con una tuerca. Sin embargo, dicho método de unión es menos deseable en máquinas más grandes. En primer lugar, un seguro debilita el eje. Roscar el eje en turbinas grandes también puede ser inoportuno.

Uno de los métodos para unir el cubo al eje de la turbina eólica es el Ringfeder® Shrink Disc® que se ilustra en la Figura 13.

En la Figura 13 se muestra una proyección del cubo que se sobrepone al extremo del eje principal. El diámetro del agujero de la proyección del cubo es ligeramente más grande que el extremo del eje principal.

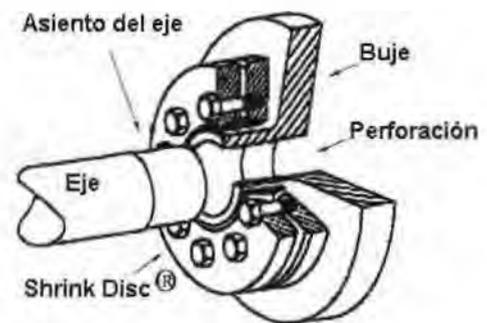


Fig. 13. Unión cubo-eje mediante Ringfeder® Shrink Disc® "Wind Energy Explained Theory, Design and Application." Manwell, et al. (2004)

El Shrink Disc® consiste en un anillo y dos discos. La superficie interna del anillo se desliza sobre la parte externa de la proyección del cubo. La parte externa del anillo se adelgaza en ambas direcciones axiales. Los dos discos se colocan en ambos lados adelgazados, y luego se unen con los tornillos. Cuando estos se acercan uno al otro, el anillo se comprime y esto a su vez comprime la proyección del cubo. La compresión de la proyección del cubo es lo que fija el cubo al eje.

## 2.2 Sistema de transmisión de potencia.

El sistema de transmisión consiste de las partes que giran de la turbina. Éstas incluyen: un eje de baja velocidad (típicamente en el lado del rotor), una caja multiplicadora, y un eje de alta velocidad (del lado del generador). Otros componentes de la transmisión incluyen rodamientos de apoyo, uno o más

acoplamientos, un freno, y las partes rotativas del generador. El propósito de la caja multiplicadora es acelerar la proporción de rotación del rotor de un valor bajo (decenas de rpm) a una proporción conveniente para impulsar un generador normal (cientos o miles de rpm). La mayoría los generadores convencionales dan vuelta a 1800 rpm (60 Hz) o 1500 rpm (50 Hz).

### **2.2.1 Eje principal.**

Cada generador eólico tiene un eje principal, a veces llamado "de baja-velocidad". El eje principal es el elemento rotativo principal, que transfiere el torque del rotor al resto del sistema de transmisión. También soporta el peso del rotor. El eje principal es apoyado a su vez por rodamientos que transfieren cargas de reacción al armazón principal de la turbina. Dependiendo del diseño de la caja multiplicadora, el eje y/o los rodamientos pueden integrarse a la multiplicadora o pueden estar completamente separados de ella, conectados sólo por un acoplamiento. El tamaño del eje principal se estima según las cargas combinadas de torque y flexión. Normalmente los ejes principales se hacen de acero.

### **2.2.2 Acoplamientos**

Los acoplamientos se usan para conectar ejes entre sí. Hay dos sitios en particular donde probablemente serán usados los grandes acoplamientos de turbinas eólicas: (1) entre el eje principal y la caja multiplicadora, y (2) entre el eje de salida de la multiplicadora y el generador.

La función primaria de los acoplamientos es transmitir el torque entre dos ejes, pero puede tener otras funciones también. A veces es ventajoso amortiguar las fluctuaciones de torque en el eje principal antes de que la potencia sea convertida a electricidad. Un acoplamiento diseñado apropiadamente puede servir para estos propósitos, como los acoplamientos hidráulicos.

### 2.2.3 Caja multiplicadora

La caja multiplicadora de velocidad del eje principal, es uno de los componentes más pesados y costosos en una turbina eólica. De hecho, normalmente las cajas multiplicadoras se diseñan y construyen por un fabricante diferente al que construye el rotor y los demás subsistemas de la turbina eólica. Puesto que las condiciones de operación experimentadas por una multiplicadora de turbina eólica son significativamente diferentes que en la mayoría de las otras aplicaciones, es indispensable que el diseñador de la turbina entienda de multiplicadoras, y que el diseñador de la multiplicadoras entienda de turbinas eólicas. La experiencia ha mostrado que los "infradiseños" de la caja multiplicadora son una fuente principal de problemas operacionales en turbinas eólicas.

Todas las multiplicadoras tienen algunas similitudes: estas consisten principalmente en una caja, ejes, engranajes, rodamientos y sellos. En turbinas eólicas se usan dos tipos de multiplicador: de eje paralelo y el planetario. En multiplicadoras de eje paralelo, los engranajes se montan en dos o más ejes paralelos. Estos ejes están apoyados en rodamientos montados en la caja. En una multiplicadora de una sola etapa, hay dos ejes, un eje de baja velocidad y un eje de alta velocidad. Los dos ejes que son paralelos sobresalen de la caja. Uno de ellos deberá conectarse al eje principal o rotor y el otro al generador. Hay también dos engranes, uno en cada eje. Los dos engranes son de tamaño diferente, el más grande de los dos está en el eje de baja velocidad. La proporción del paso diametral de los engranes es inversamente proporcional a la razón de las velocidades rotatorias.

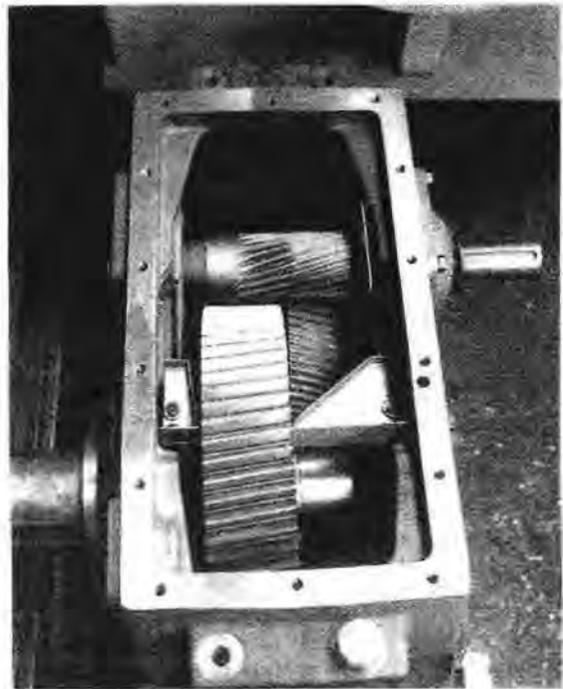


Figura 14. Caja multiplicadora de ejes Paralelos. "Wind Energy Explained Theory, Design and Application." Manwell, et al, (2004)

Hay un límite práctico para la proporción del tamaño de los dos engranes que pueden usarse en una multiplicadora de una sola etapa de eje paralelo. Por esta razón, multiplicadoras con proporciones de gran aceleración usan múltiples ejes y engranajes. Estos engranajes constituyen un sistema de engranes. Una caja multiplicadora de dos etapas, por ejemplo, tiene tres ejes: un eje de entrada (baja velocidad), uno de salida (de gran velocidad) y un eje intermedio, el cual tiene engranes, el más pequeño impulsado por el eje de baja velocidad. El más grande de estos engranes impulsará el engrane en el eje de alta velocidad. Una multiplicadora de eje paralelo típica se ilustra en la Fig. 14.

Las multiplicadoras planetarias tienen varias diferencias significativas con las multiplicadoras de ejes paralelos. Notablemente, los ejes de entrada y salida son coaxiales. Además, hay múltiples pares de dientes del engrane que se endentan a todo momento, para que las cargas en cada engrane se reduzcan. Esto hace a las multiplicadoras planetarias relativamente ligeras y compactas.

Como se muestra en la Figura 15, en las multiplicadoras planetarias un eje de baja velocidad, apoyado sobre rodamientos en la caja, se conecta rígidamente a un portador planetario que sostiene tres engranajes pequeños idénticos conocidos como *planetas*. Estos engranajes están montados en ejes y rodamientos cortos y son libres de girar.



Figura 15, Vista esquemática de una multiplicadora planetaria de dos etapas. "Wind Energy Explained Theory, Design and Application." Manwell, et al, (2004)

Los *planetas* se endentan con un engranaje de anillo (o interior) de diámetro grande y un engranaje sol de diámetro pequeño. Cuando el eje de baja velocidad y el portador ruedan, el engranado de los planetas en el engrane de anillo, fuerza a los planetas a rodar a una velocidad más alta que la velocidad del portador. La unión de los planetas con el engranaje de sol también lo hace girar. El engranaje sol impulsa al eje de alta velocidad al que está rígidamente conectado. El eje de alta velocidad está apoyado sobre rodamientos montados en la caja.

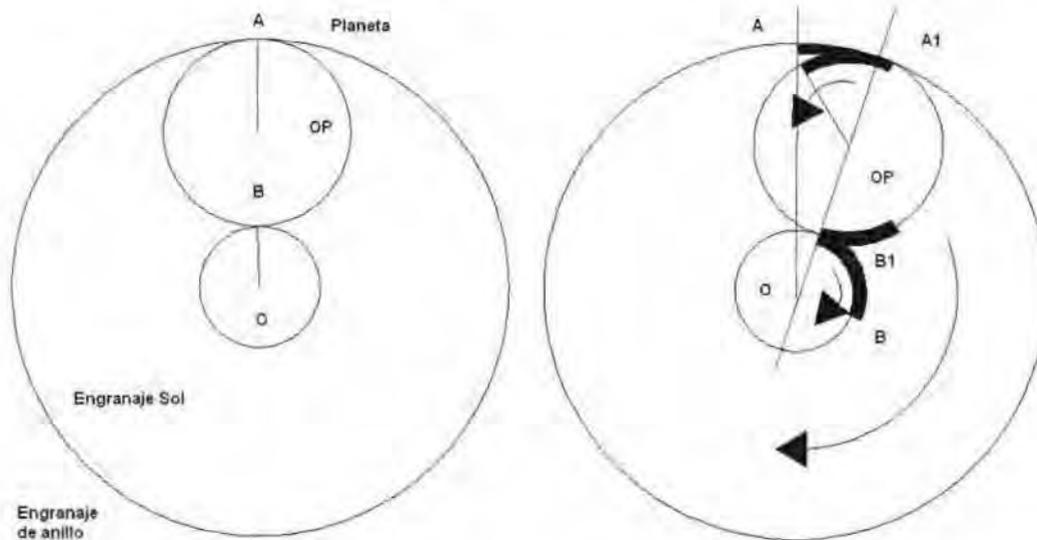


Figura 16. Ilustra la relación entre los engranajes y los ángulos hechos durante un pequeño ángulo de rotación. "Wind Energy Explained Theory, Design and Application." Manwell, et al, (2004)

Note en la figura 16, que antes de la rotación, el sol y el engrane planetario se endentan en el punto B, mientras el planeta y el engrane anillo se endentan en el punto A. Después de la rotación, los puntos correspondientes al endentando son B1 y A1. Los centros del sol y el planeta están respectivamente en O y OP.

La proporción de alta velocidad para la configuración mostrada en la Figura 16 (con el engrane de anillo estacionario) es:

$$n_{HSS} / n_{LSS} = 1 + (D_{anillo} / D_{sol}) \quad (2-1)$$

donde  $n_{HSS}$  es la velocidad del eje de alta velocidad (m/s),  $n_{LSS}$  es la velocidad del eje de baja velocidad (m/s),  $D_{anillo}$  es el diámetro del engranaje anillo (m), y  $D_{sol}$  es el diámetro de engrane sol (m).

Como sucede con la caja multiplicadora de ejes paralelos, hay un límite en la proporción de aceleración que puede lograrse mediante una sola etapa del conjunto de engranes planetarios. Para lograr una proporción de aceleración más alta, se colocan múltiples etapas en serie. Cuando hay etapas múltiples en serie, la aceleración global es el producto de la aceleración de las etapas individuales.

Los engranajes en muchas cajas multiplicadoras de turbinas eólicas, son de tipo cilíndrico, aunque también se encuentran del tipo helicoidal. Los rodamientos son de bola, de rodillo, o rodillos cónicos dependiendo de las cargas. Las multiplicadoras de turbinas eólicas son, ya sea de componentes separados, o combinados con otros componentes. En el último caso estas son conocidas como multiplicadoras integradas o parcialmente integradas

Hay una gran cantidad de factores a considerar en el diseño y selección de multiplicadoras. Éstos incluyen:

- Tipo Básico (ejes paralelos o planetaria),
- Multiplicadora separada o una multiplicadora integrada
- Proporción de aceleración
- Numero de etapas
- Peso y costo de la Multiplicadora
- Carga de multiplicadora
- Lubricación
- Efectos de operación intermitente
- Ruido

Por ejemplo, en varias turbinas con multiplicadora parcialmente integrada, el eje principal y los rodamientos del eje principal están integrados al resto de la multiplicadora. En una multiplicadora integrada, la caja multiplicadora es en realidad el marco principal de la turbina. El rotor se une a su eje de baja velocidad. El generador se acopla al eje de alta velocidad y también es atornillado directamente a la caja. Parte del sistema de orientación se integra a la base de la caja.

La proporción de aceleración de una caja multiplicadora se relaciona directamente a la velocidad rotatoria deseada del rotor y la velocidad del generador. La velocidad del rotor es determinada principalmente por consideraciones aerodinámicas. La velocidad del generador es en la mayoría de los casos 1800 rpm en redes de 60Hz o 1500 rpm en redes de 50Hz, aunque también otras velocidades son posibles, por ejemplo, una turbina eólica con un rotor diseñado para operar a 60 rpm y un generador de 1800 rpm necesitaría una multiplicadora con una proporción de aceleración de 30:1.

El número de etapas en una caja multiplicadora es motivo de preocupación para el diseñador de la turbina eólica debido principalmente a que afecta la complejidad, dimensiones, peso y costo de la caja multiplicadora. Entre más etapas son, mayor es el número de componentes internos. Generalmente, una sola etapa no proporcionará una aceleración de más de 6:1. Las proporciones de múltiples etapas colocadas en serie, resultan en una proporción global dada por el producto de las proporciones en cada fase. Por ejemplo, uno podría ganar una aceleración de 30:1 teniendo dos fases de 5:1 y 6:1 en serie.

El peso de las multiplicadoras aumenta dramáticamente con el incremento en la potencia nominal de la turbina. De hecho, el peso de la multiplicadora aumentará igual que el peso del rotor, proporcionalmente con el cubo del radio. Dado que las multiplicadoras planetarias son más ligeras que las de ejes paralelos, si se les utiliza hay una ventaja de peso, sin embargo, debido a su mayor complejidad, su costo también es mayor.

Para las máquinas grandes (de más 500 kW, ver Anexo D), las ventajas de peso y tamaño del multiplicador planetario llegan a ser más pronunciadas. Algunas turbinas eólicas usan generadores de baja velocidad especialmente diseñados, que no requieren multiplicador.

Las cargas que la multiplicadora debe resistir son debidas principalmente a aquéllas impuestas por el rotor. Éstas incluirán al menos el torque del eje principal, y pueden incluir el peso del rotor y varias cargas dinámicas dependiendo del grado de integración de la multiplicadora con el eje principal y los rodamientos. Las cargas también son impuestas por el generador, ya sea durante el funcionamiento normal o mientras arranca, y por cualquier freno mecánico localizado en el lado de alta velocidad de la multiplicadora. Durante un periodo de tiempo extendido, las multiplicadoras, como el rotor, experimentarán algunas cargas que son relativamente continuas, otras que varían periódicamente o al azar, y también otras transitorias. Todo esto contribuye al daño por fatiga y al desgaste en los dientes del engranaje, rodamientos y sellos.

La lubricación es un factor importante en el funcionamiento de la multiplicadora. Deben seleccionarse aceites para minimizar el desgaste en los dientes del engranaje y los rodamientos, y para funcionar propiamente bajo las condiciones medioambientales externas en las que la turbina operará. En algunos casos, puede ser necesario proporcionar filtrado o enfriando activo del aceite. Es recomendable, tomar muestras periódicas de aceite para evaluar el estado del mismo, así como para verificar las señales de desgaste interno.

El funcionamiento intermitente, una situación común en turbinas eólicas, puede tener un impacto significativo en la vida de una multiplicadora. Cuando la turbina no está en funcionamiento, el aceite puede escurrir, alejándose de los engranajes y rodamientos produciendo lubricación insuficiente durante el impulso inicial de la turbina.

En tiempo frío, el aceite puede tener alta viscosidad mientras no se caliente la multiplicadora. Las turbinas en tales ambientes pueden beneficiarse al tener calentadores de aceite en la multiplicadora. La condensación de humedad puede acelerar la corrosión. Cuando el rotor se frena, los dientes del engranaje pueden moverse ligeramente de un lado a otro. El movimiento está limitado por el "backlash" (distancia de acoplamiento entre dientes de dos engranes), pero puede ser suficiente para producir algún daño de impacto y desgaste del diente.

Las multiplicadoras pueden ser una fuente de ruido. La cantidad de ruido esta en función, entre otras cosas, del tipo de multiplicadora, los materiales de construcción de los engranajes y de cómo están cortados. El diseño de multiplicadoras para una mínima producción de ruido es un área de interés.

Para más detalles acerca de multiplicadoras de turbinas eólicas, particularmente relacionados con el diseño, puede consultar los *principios de diseño* de la American Gear Manufacturers Association<sup>38</sup>.

### **2.3 Generador.**

El generador convierte la potencia mecánica del rotor en potencia eléctrica, los principios básicos de esta transformación y los conceptos necesarios para su comprensión, pueden consultarse en [www.windpower.org/es/tour/wtrb/electric.htm](http://www.windpower.org/es/tour/wtrb/electric.htm).

Casi todas las turbinas eólicas usan generadores de inducción o síncronos. Ambos diseños requieren una velocidad rotatoria constante o casi constante del generador cuando este se encuentra directamente conectado a la red de distribución de las compañías eléctricas de servicios públicos.

La mayoría de turbinas eólicas instaladas en aplicaciones de redes usan generadores de inducción. Un generador de inducción opera dentro de un rango estrecho de velocidades ligeramente más alto que su velocidad síncrona (un generador cuatri polo que opera en una red a 60 Hz tiene una velocidad síncrona de 1800 rpm). La ventaja principal de generadores de inducción es que éstos son robustos (fuertes), económicos, y fáciles conectar a una red eléctrica.

Una opción para la generación de potencia eléctrica involucra el uso de una turbina eólica de velocidad variable. Dichos sistemas ofrecen varios beneficios que incluyen la reducción del desgaste en la turbina eólica y el potencial funcionamiento de la turbina a su máxima eficiencia dentro de un rango de velocidades de viento, y en consecuencia el aumento en la captura de energía.

Aunque hay un gran número de opciones de equipos para el funcionamiento de turbinas eólicas a velocidad variable, actualmente se usan componentes electrónicos de control de potencia en la mayoría de las máquinas que se diseñan de este tipo. Cuando son usados con convertidores electrónicos de potencia apropiados, tanto generadores de inducción como síncronos, pueden funcionar a velocidad variable.

## **2.4 Frenos.**

### *Función del freno.*

Casi todas turbinas eólicas emplean un freno mecánico en alguna parte del sistema de transmisión de potencia. Dicho freno normalmente es incluido además de los frenos aerodinámicos. De hecho, algunas normas de diseño actuales <sup>39</sup> requieren dos sistemas de frenado independientes, uno de los cuales normalmente es aerodinámico y el otro en el sistema de transmisión de potencia. En la mayoría de los casos, el freno mecánico es capaz de detener la turbina. En otros casos, el freno mecánico se usa sólo para estacionar. Es decir, impide al rotor dar vuelta cuando la turbina no está operando. Frenos que sólo pueden usarse para estacionar turbinas están siendo menos comunes, debido a la influencia de las normas de diseño. Generalmente, dichos frenos ligeros sólo se usarían en turbinas que tienen rotor a prueba de fallas, regulado por cambio del ángulo de paso.

### *Tipos de frenos.*

Hay dos tipos de frenos de uso común en turbinas eólicas: frenos de disco y frenos de embrague. El freno de disco opera de una manera similar al de un automóvil. Un disco de acero se fija rígidamente al eje a ser frenado. Durante el frenado, un caliper (mordaza) accionado hidráulicamente empuja las almohadillas de frenado contra el disco. La fuerza resultante crea un torque que se opone el movimiento del disco frenando así al rotor.

Otro, el tipo menos común de freno funciona eléctricamente y es conocido como freno dinámico. El principio básico consiste en alimentar con potencia a un banco de resistencias después de desconectar el generador eólico de la red eléctrica. Esto agrega carga en el generador, y por ende un torque en el rotor, disminuyendo así la velocidad.<sup>40</sup>

### *Localización.*

Los frenos mecánicos pueden localizarse en cualquiera de una gran variedad de sitios en el sistema de transmisión de potencia. Por ejemplo, pueden estar tanto en el lado de baja como el de alta velocidad de la multiplicadora. Si se encontrasen en el lado de alta velocidad, pueden estar en cualquier lado del generador.

Es importante notar que un freno en el lado de baja velocidad de la multiplicadora debe poder ejercer un torque mucho más alto que el necesario para uno en el lado de alta velocidad. Sería entonces, relativamente voluminoso. Sin embargo, si el freno se encuentra en el lado de alta velocidad, necesariamente actuará a través de la multiplicadora y posiblemente aumentará el desgaste de esta. Además, en caso de falla interna en la multiplicadora, un freno en el lado de alta velocidad podría ser incapaz de frenar el rotor.

### *Activación del freno.*

La activación del freno depende del tipo de freno usado. Los frenos de disco requieren presión hidráulica. Esta normalmente es proporcionada por una bomba hidráulica, a veces junto con un acumulador. Hay también diseños en los que resortes aplican presión al freno, y el sistema hidráulico se usa para soltar los frenos. Manwell muestra con más detalle estos mecanismos de frenos en la sección 6.5.4 del libro *Wind Energy Explained*.

Normalmente los frenos de tipo embrague son aplicados vía resortes. Puede usarse un sistema neumático o un sistema hidráulico para liberar el freno. En caso de ser neumático, debe proporcionarse un compresor aéreo y un tanque de almacenamiento, así como las tuberías apropiadas y controles.

### *Desempeño.*

Tres consideraciones importantes en la selección de un freno incluyen:

- Torque máximo
- Duración de tiempo requerida para su aplicación
- Absorción de energía

Un freno diseñado para detener una turbina eólica, debe poder ejercer un torque mayor que el que podría esperarse que origine el rotor. Las normas recomendadas indican que el torque de diseño del freno debe ser igual al torque de diseño máximo de la turbina eólica.<sup>41</sup>

Un freno diseñado para detener una turbina debe accionarse casi inmediatamente, y debe aumentar a pleno torque en pocos segundos. El tiempo de frenado es un balance entre *instantáneo* (qué aplicaría una carga transitoria muy alta al eje de transmisión de potencia) y *progresivo*, en cuyo caso la aceleración del rotor y calentamiento del freno durante la desaceleración podrían ser preocupantes. Normalmente el proceso de frenado completo, desde el inicio hasta que el rotor se detiene, lleva menos de cinco segundos.

La capacidad de absorción de energía del freno es una consideración importante. En primer lugar el freno debe absorber toda la energía cinética en el rotor al dar vuelta a su máxima velocidad posible. También debe poder absorber cualquier energía adicional que el rotor podría adquirir durante el periodo de frenado.

## Capítulo 3. Estructuras de Soporte

Este capítulo incluye información del alojamiento del generador (góndola), la placa de asiento de la máquina o armazón principal, y el sistema de orientación de la parte superior de la torre, que permite que la turbina eólica siempre esté de frente al viento. El armazón principal mantiene la unión y alineación apropiada de los componentes del sistema de transmisión de potencia. La góndola es la cubierta que protege la máquina de la exposición a la intemperie.

### 3.1 Góndola

La góndola es el albergue para los componentes principales de la turbina eólica (con la excepción del rotor). Incluye el armazón principal y la cubierta de la góndola.

#### **Armazón principal.**

El armazón principal es la pieza estructural a la que se unen la multiplicadora, generador y freno. Proporciona una estructura rígida para mantener la alineación apropiada entre esos componentes. También mantiene un punto de unión para el rodamiento de orientación, que a su vez se atornilla a la torre.

Básicamente hay dos tipos de armazón principal. El armazón principal puede ser un componente separado, o parte de una multiplicadora integrada.

Cuando el armazón principal es un componente separado, normalmente es de acero colado rígido o una estructura soldada. Se provee de perforaciones roscadas u otros puntos de unión en los sitios apropiados para atornillar los otros componentes. Cuando el armazón principal es parte de una multiplicadora integrada, la caja se fabrica lo suficientemente gruesa para que soporte las cargas requeridas. Como sucede con el marco principal separado, se mantienen puntos de unión para fijar los otros componentes.

El armazón principal debe transmitir todas las cargas del rotor y las cargas de reacción del generador y frenos a la torre. También debe ser lo bastante rígido para no permitir movimiento relativo entre el rodamiento de soporte del rotor, multiplicadora, generador y freno.

### **Cubierta de la góndola.**

La cubierta de la góndola proporciona protección contra la exposición a la intemperie de los componentes de la turbina que se localizan en la góndola. Esto incluye a los componentes especialmente eléctricos y mecánicos que podrían ser afectados por luz del Sol, la lluvia, hielo o nieve.

Normalmente las cubiertas de las góndolas se construyen de un material ligero, como fibra de vidrio. En máquinas más grandes la góndola es lo suficientemente grande para que el personal pueda entrar a inspeccionar o dar mantenimiento a los componentes interiores. En turbinas pequeñas y medianas, normalmente se sujeta una cubierta separada de la góndola al armazón principal de tal manera que pueda abrirse fácilmente para acceder a los elementos. Un componente que algunas turbinas tienen, y que se relaciona estrechamente a la cubierta de la góndola, es el spinner o cono de la nariz, que sirve de cubierta para el cubo.

### **3.2 Sistema de orientación**

Con muy pocas excepciones, todas las turbinas eólicas de eje horizontal deben ser capaces de moverse para auto orientarse en la dirección del viento. Hay dos tipos básicos de sistemas de orientación: orientación activa y orientación libre. Las turbinas con orientación activa normalmente son máquinas con rotor a barlovento. Estas emplean un motor para alinear la turbina activamente. Las turbinas con orientación libre normalmente son máquinas con rotor a sotavento. Estos dependen de la aerodinámica del rotor para alinear la turbina.

Algunas turbinas también usan orientación activa como un medio de regulación de potencia. En todo caso, un mecanismo debe instalarse para permitir que el

movimiento de orientación tenga lugar, y para hacerlo a una tasa lo suficientemente lenta para evitar grandes fuerzas giroscópicas.

El componente principal es un rodamiento de gran tamaño, que conecta el armazón principal con la torre. Este rodamiento debe llevar el peso de la parte principal de la turbina, así como transmitir cargas de empuje a la torre. En sistemas de orientación activa, (generalmente usado en turbinas eólicas a barlovento), el rodamiento posee dientes de engranaje alrededor de su circunferencia. Se coloca un engranaje de piñón en el sistema de propulsión (del movimiento de orientación) engranado en dichos dientes, para que pueda impulsarse en cualquier dirección. Este mecanismo normalmente es controlado por un sistema automático de control cuyo sensor de dirección de viento se encuentra montado sobre la góndola del generador eólico. A veces, con este tipo de diseño, se usan frenos para mantener la góndola en posición.

Un problema encontrado en la orientación activa ha sido el rápido desgaste o ruptura de la transmisión del sistema de orientación, debido a los pequeños movimientos continuos de orientación de la turbina. Esto ocurre debido al espacio interdental entre el piñón de la transmisión de orientación y el engranaje macho. El movimiento produce muchos ciclos de golpes de carga entre esos engranajes. Para reducir estos ciclos, frecuentemente se usa un freno de orientación en sistemas de orientación activos. Este freno está siempre aplicado cuando la turbina no tenga que orientarse. Simplemente se libera antes de que empiece a moverse.

La diferencia angular entre la dirección de la velocidad del viento y la orientación del rotor, es el dato de entrada para el sistema de control del movimiento de orientación en un sistema activo. Esta diferencia de orientación se supervisa por medio de una veleta montada en la turbina. Cuando el error de orientación esta fuera del rango permitido por algún periodo de tiempo, el sistema de propulsión del sistema se activa, y la turbina se mueve en la dirección apropiada.

Sistemas de libre orientación (es decir que estos pueden auto-alinearse con el viento) se utilizan usualmente en máquinas con rotor a sotavento, el sistema es normalmente mucho más simple. A menudo no hay nada más que el rodamiento de orientación. Algunas turbinas, sin embargo, incluyen un amortiguador. Se usan amortiguadores de orientación para retardar la tasa de orientación y ayudan a reducir las cargas giroscópicas. Estos son más útiles en máquinas que tienen un momento polar de inercia relativamente pequeño sobre el eje de orientación.

### **3.3 Torre y cimentación.**

Esta categoría incluye la estructura de la torre y la cimentación de soporte. Hay tres tipos de torres de uso común para las turbinas eólicas de eje horizontal:

- celosía (armazón)
- tubo (torre tubular)
- mástil tensado con vientos (atirantadas).

Para las turbinas más pequeñas, se usan frecuentemente torres atirantadas. La altura de la torre es típicamente 1 a 1.5 veces el diámetro del rotor, pero en todo caso es normalmente de por lo menos 24 m. La selección de la torre es influenciada principalmente por las características del sitio. La rigidez de la torre es un factor primordial en la dinámica del sistema de la turbina eólica debido a la posibilidad de vibraciones acopladas entre el rotor y torre. Para las turbinas con rotores a sotavento, el efecto de sombra de la torre (la estela creada por el flujo de aire alrededor de la torre) en la dinámica de la turbina, las fluctuaciones de potencia, y generación de ruido deben ser consideradas. Por ejemplo, debido a la sombra de la torre, las turbinas a sotavento son típicamente más ruidosas que sus colegas a barlovento.

#### *Opciones de Torres*

Las torres tubulares tienen varias ventajas. A diferencia de las torres de celosía, estas no dependen de muchas conexiones atornilladas que necesiten verificación

periódica del torque. También proporcionan un área protegida para escalar la torre y acceder a la máquina.

#### *Materiales.*

Normalmente se construyen torres de acero para turbinas eólicas, aunque a veces se usa el hormigón reforzado. Cuando el material es acero, normalmente se galvaniza o se pinta para protegerlo de corrosión. A veces se usa acero Cor-Ten® debido a su resistencia a la corrosión.

#### *Cargas de la torre.*

La torre puede experimentar dos tipos principales de carga: (1) continuas y (2) dinámicas. Las cargas continuas de la torre surgen principalmente del empuje y torque producidos aerodinámicamente. El peso de la propia máquina también es una carga significativa. La carga en la torre se evalúa por lo menos para dos condiciones: (1) operando a la potencia nominal (2) estacionaria a velocidad de viento de supervivencia. En el último caso, las normas de IEC recomiendan que sea usada la velocidad del viento extrema de cada 50 años<sup>42</sup>. Los efectos de la carga deben ser considerados sobre todo en flexión y pandeo.

Los efectos dinámicos pueden ser una fuente significativa de cargas, sobre todo en torres "flexibles" o "extraflexibles". Recordando que una torre firme es una cuya frecuencia natural fundamental está sobre la frecuencia de paso de la pala, una torre "flexible" es una cuya frecuencia natural está entre la frecuencia de paso de la pala y la frecuencia del rotor, y una torre "extraflexibles", es una cuya frecuencia natural está debajo de la frecuencia del rotor y la frecuencia de paso de la pala. Una torre "flexible" o "extraflexible", puede excitarse durante el arranque o frenado de la turbina. Para determinar la frecuencia natural de la torre se pueden consultar los métodos discutidos en el Capítulo 4 de *Wind Energy Explained*<sup>43</sup>.

Para torres no-uniformes o atirantadas, el método de Rayleigh puede ser bastante útil. Este método es descrito en general para turbinas eólicas por Thomson (1981) y por Wright et al. (1981). Un análisis comprensivo de las torres incluyendo

estimación de la frecuencia natural puede hacerse con métodos de elemento finitos. Un ejemplo de esto se da en El Chazly<sup>44</sup>.

Una torre debe diseñarse para que su frecuencia natural no coincida con las frecuencias de excitación de la turbina (la frecuencia del rotor o la frecuencia de paso de la pala). Además, las frecuencias de excitación generalmente no deben estar dentro de 5 frecuencias naturales de la torre durante funcionamiento prolongado. Cuando se planea el funcionamiento en una región donde las frecuencias de excitación están entre 30 y 140 frecuencias naturales de la torre, debe usarse un factor de amplificación dinámico,  $D$ , para multiplicar las cargas de diseño en la evaluación de la estructura. El factor de amplificación es determinado por las propiedades de frenado de la torre y la relación entre las frecuencias de excitación.

El amortiguado de vibraciones de la torre es debido tanto a factores aerodinámicos como estructurales. El decremento de amortiguado sugerido por Germanischer Lloyd (1993) es 0.1 para hormigón reforzado y entre 0.05 - 0.15 para acero.

Una valoración comparativa de las opciones de torres para turbinas se da en Babcock y Connover<sup>45</sup>.

### **Cimentación de la torre.**

La cimentación de una turbina eólica debe ser suficiente para mantener la turbina vertical y estable bajo las condiciones de diseño más extremas. En muchos de los sitios, la cimentación se construye como un relleno de concreto reforzado (Fig. 17-a). El peso del hormigón se escoge para proporcionar resistencia al volcado bajo todas las condiciones. A veces se instalan turbinas en piedra. En este caso la cimentación puede consistir de barras insertadas en agujeros taladrados profundamente en la piedra (fig. 17-b) y posteriormente rellenados con lechada. Una almohadilla de concreto puede usarse para proporcionar una superficie nivelada, pero cualquier carga tensora es conducida finalmente por las barras.

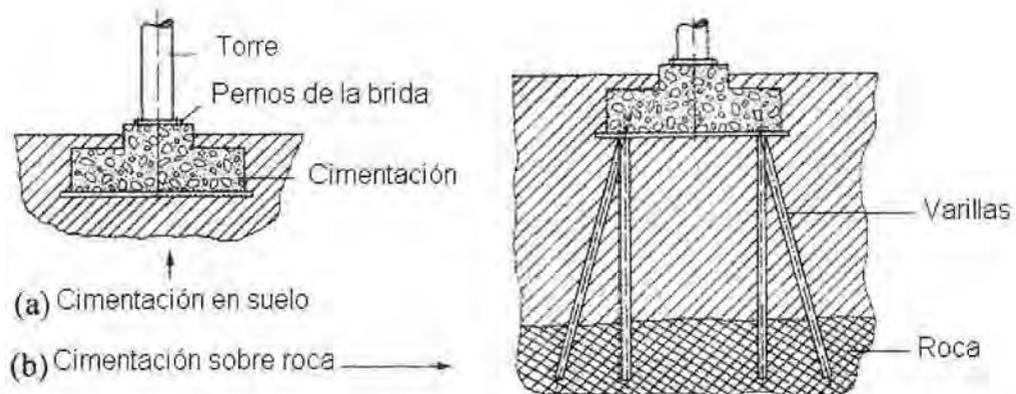


Fig. 17, Tipos de cimentación. "Wind Energy Explained Theory, Design and Application." Manwell, et al, (2004)

## Capítulo 4. Tendencias de la tecnología eólica

### 4.1 Estado del arte

La evolución que ha tenido la tecnología eoloeléctrica en las dos últimas décadas, ha seguido un camino esencialmente basado en la optimización de los desarrollos existentes en los años ochenta. Este proceso de cambio ha ido ligado al desarrollo de innovaciones tecnológicas, pero los dos factores esenciales han sido: la disminución de los costes debido a la economía de escala (derivada del incremento del tamaño de los generadores eólicos) y la optimización mediante la aplicación de las nuevas herramientas de diseño, desarrolladas en los programas de investigación y desarrollo llevados a cabo en las dos últimas décadas, como consecuencia de la crisis energética de 1973.

A principio de la década de los ochenta aparecen los primeros generadores eólicos comerciales de lo que denominaremos nueva generación de sistemas de conversión eólica. De estas primeras máquinas a los generadores eólicos que se están instalando en la actualidad, ha existido un notable desarrollo que permite afirmar que la tecnología de generadores eólicos para funcionamiento conectado a la red, es una tecnología totalmente madura. Hoy se pueden adquirir en el mercado mundial, máquinas de más de veinte fabricantes diferentes con garantía de cinco años. La optimización de los diseños, de los componentes y de los procesos de fabricación, ha permitido una reducción importante en el coste de los generadores eólicos que por término medio, se sitúa entre los 600-700 € por kW.

La experiencia acumulada, con los más de 60,000 generadores eólicos instalados, ha conseguido disminuir notablemente los costes de explotación (operación y mantenimiento), con lo que el coste medio del kilowatt-hora producido se sitúa entre 4 y 7 céntimos de euro por kWh, para zonas de aceptable potencial eólico.

La tecnología más usada en las actuales instalaciones son generadores eólicos tripala a barlovento, de torre tubular, regulación por pérdida aerodinámica y/o cambio de paso y sistema de orientación activa y con 40-60 m de diámetro de rotor, lo que corresponde con una potencia unitaria entre 500 y 1,500 KW, en comparación a los generadores empleados en los ochentas, de 15 metros de diámetro y 55 KW de potencia nominal.

Los rendimientos de producción, prácticamente se han duplicado, pasando de una producción específica en torno a los 600 KWh/año por metro cuadrado de área del rotor, a valores por encima de los 1000 KWh/año (para un emplazamiento típico). Por otro lado, se observa una importante disminución de los pesos específicos de los generadores eólicos, pasando de los 68 Kg/m<sup>2</sup> a los valores actuales de unos 22 Kg /m<sup>2</sup>. Estas mejoras han sido posibles gracias a los nuevos diseños optimizados, y a la utilización masiva de materiales avanzados en su fabricación, esencialmente los denominados materiales compuestos.

#### **4.1.1 Los grandes generadores eólicos: Economía de escala**

Entre las principales ventajas de los grandes generadores eólicos respecto de las máquinas más pequeñas, se encuentran las de un mejor aprovechamiento del terreno, una mayor producción específica (producción por metro cuadrado de área barrida). Sin embargo, en los modelos de potencia unitaria superior a un MW, cabe destacar el sensible incremento del costo con respecto a los generadores eólicos que actualmente se instalan en las redes. Igualmente existe una importante limitación en su transporte e instalación que se acentúa en terrenos de orografía compleja.

#### **4.1.2 Regulación de la velocidad**

Actualmente podemos encontrar tres tecnologías para la regulación de generadores eólicos: regulación por pérdida aerodinámica, regulación por cambio de paso, y regulación por pérdida aerodinámica activa.

La pérdida aerodinámica activa se realiza variando el ángulo de paso de la pala con el fin de hacer entrar en pérdida el rotor de forma controlada. El sistema permite optimizar la producción energética y realizar una regulación optimizada de las cargas en el generador, teniendo en cuenta factores no considerados en los sistemas tradicionales con pérdida aerodinámica, como por ejemplo la variación de la densidad del aire, la suciedad superficial de las palas, la cortadura del viento o la turbulencia. La aparición de las máquinas comerciales con sistema de pérdida aerodinámica activa es una clara innovación tecnológica, pues a pesar de que el concepto ya había sido ensayado y desarrollado hace tiempo, no había llegado a utilizarse a nivel comercial.

El proceso de evolución experimentado por varios fabricantes (VESTAS, MADE y NEG-Micon) que comenzaron comercializando generadores eólicos de velocidad constante y regulación por pérdida aerodinámica, ha dado como resultado el cambio de esas tecnologías por la de velocidad variable y regulación por cambio de paso.<sup>46</sup>

#### **4.1.3 Tipos de generadores**

Respecto al tipo de generación encontramos, tanto sistemas con generador asíncrono, como sistemas de generador síncrono. Por ejemplo, en el mercado alemán, durante los últimos 5 años, se observó una progresión de los generadores asíncronos con rotor devanado con doble alimentación, mientras que en el mercado español, un 60 % de las turbinas eólicas cuentan con un generador de inducción doblemente alimentado, un 38% con generador asíncrono de "jaula de ardilla" y solo un 1% con generador síncrono<sup>47</sup>.

Existe un gran desarrollo industrial experimentado por los generadores asíncronos de rotor devanado, con convertidor electrónico conectado a rotor. Estas máquinas permiten generar a frecuencia fija con un amplio margen de variación de velocidad, y a la vez con un menor tamaño del convertidor electrónico que el usado en generadores síncronos.<sup>48</sup>

Dentro de las turbinas eólicas con generador síncrono, se encuentran esencialmente los fabricantes que utilizan conexión directa sin caja de multiplicación. Asociado al tipo de generador tenemos sistemas de velocidad constante, de dos velocidades, de velocidad variable, y lo que denominamos como velocidad semi-variable, que corresponde a un margen de variaciones de velocidad respecto del valor nominal.<sup>49</sup>

Se observa claramente la progresión de los sistemas de velocidad variable, que suponen diseños con mejores características de comportamiento ante las bruscas variaciones de velocidad de viento, limitando el par y las cargas, reduciendo el ruido aerodinámico (sobre todo a bajos vientos) y mejorando la captura energética.

Dentro de las diferentes opciones de velocidad variable, las dos más utilizadas son los generadores de inducción bobinados con doble alimentación y generadores síncronos multipolo de conexión directa. También se han desarrollado prototipos con generador síncrono multipolo de imanes permanentes, aunque no hayan alcanzado la etapa comercial. El generador síncrono de imanes permanentes tiene un mayor rendimiento que el de rotor bobinado, así como un menor peso, por lo que resulta una alternativa de futuro muy interesante para las turbinas eólicas.<sup>50</sup>

#### **4.1.4 Estructuras de soporte y transmisión**

En lo que a la parte estructural se refiere, a los diseños de grandes máquinas se han incorporado nuevas opciones tecnológicas tanto en el sistema de transmisión, como en la distribución estructural de componentes, fundamentalmente con objeto de hacer frente al aumento de peso específico de los generadores (peso sobre la torre dividido por el área del rotor), a consecuencia de que las cargas que actúan sobre la turbina eólica son proporcionales al cubo del radio del rotor.

Una de las opciones innovadoras dentro del desarrollo tecnológico del sistema de transmisión, es la "caja integral" de multiplicación, con dos etapas planetarias y

una etapa de ejes paralelos, que está resultando muy utilizada en los diseños de grandes generadores eólicos.<sup>51</sup>

Uno de estos nuevos diseños estructurales de la transmisión, consiste en el que el eje de baja potencia solo transmite el par motor, derivándose las cargas asociadas a los momentos flectores a través de la estructura de la góndola; por otro lado, también existe un innovador diseño modular de la estructura sobre la torre, con tres módulos que se transportan y montan separadamente, facilitando y reduciendo los costes de transporte, instalación y mantenimiento.

Una de las grandes mejoras experimentadas en el desarrollo tecnológico de los últimos años, es la aparición de modelos diseñados para diferentes clases de viento, lo que permite optimizar el costo final de generación.

#### **4.1.5 Sistemas aislados de la red**

El objetivo prioritario en los sistemas aislados es cubrir la demanda energética de la aplicación con la producción del sistema eólico. La garantía de la cobertura del sistema es primordial junto con la optimización del coste del KWh generado. Dependiendo del tipo de demanda, es el diseño de la configuración del sistema, su tamaño y la tecnología específica de los generadores eólicos que en ella se instalan.<sup>25</sup>

El mercado potencial de sistemas aislados es amplísimo, centrándose especialmente en los países en vías de desarrollo donde se estima que hay más de 2000 millones de personas sin acceso a la electricidad. Los sistemas aislados cubren un amplio abanico de aplicaciones, desde instalaciones de bajo consumo con perfiles de carga casi constantes, y alimentación en corriente continua, como son las residencias familiares, repetidoras de telefonía, balizas marinas, etc., hasta instalaciones de consumo medio alto en corriente alterna, con cargas variables, como son las redes locales de electrificación rural.

La tecnología para el funcionamiento aislado, y específicamente la de pequeños generadores, es diferente de la tecnología desarrollada para sistemas conectados a la red. Las diferencias se ven reflejadas en la totalidad de los subsistemas, con especial incidencia en el diseño del rotor, sistema eléctrico, y regulación de potencia y velocidad de la turbina eólica. En general, el espectro tecnológico es mucho más variado que en las aplicaciones conectadas a red, cubriendo diferentes tecnologías, tamaños y configuraciones del sistema.

Asimismo se han de tener en cuenta las limitaciones existentes respecto a la selección del emplazamiento, que en los sistemas aislados viene determinada por el lugar donde se encuentra la aplicación, por lo que como norma general los emplazamientos donde se instalan estos sistemas disponen de menores velocidades de viento que en los parques eólicos conectados a red. Por otro lado, pueden aparecer obstáculos en las cercanías, que podrán dar lugar a turbulencias elevadas. Todo esto influirá en el diseño de las turbinas eólicas; primará el arranque a baja velocidad de viento, y la optimización de la producción en la zona de bajos vientos, por encima de la optimización de la producción específica (KWh/m<sup>2</sup>).

### **Pequeños generadores eólicos**

El mercado de pequeños generadores es un mercado prometedor. Hay un número creciente de fabricantes y actualmente los fabricantes de grandes generadores eólicos empiezan a realizar incursiones en este sector, atraídos por las posibilidades del nuevo mercado.

Las normas de certificación de generadores eólicos del Comité Electrotécnico Internacional (IEC), IEC 1400, diferencian los pequeños aerogeneradores (IEC 144-2), definiéndose como "aeroturbinas eólicas con una superficie de captación inferior a 40 m<sup>2</sup> para producción de electricidad" (Norma UNE 61400 1 y 2). En el caso de generadores de eje horizontal, esto corresponde a rotores con un radio inferior a los 3,57 m. No obstante, la citada normativa se encuentra en proceso de

modificación, y uno de los cambios propuestos se refiere al tamaño de las turbinas a los que se aplica, ampliándose hasta los 200 m<sup>2</sup> de área barrida (16 m de diámetro), lo que corresponde con una potencia de 50 KW.

Existen disponibles en el mercado más de sesenta modelos de generadores eólicos, con potencias unitarias desde el más pequeño de 20 W, hasta 12 Kw. La mayor parte de los generadores eólicos en el mercado son máquinas de eje horizontal a barlovento, si bien, existen modelos comerciales de eje horizontal a sotavento, así como de eje vertical.<sup>52</sup>

La tecnología utilizada en los generadores eólicos de eje horizontal varía desde rotores de dos palas, hasta rotores de 6 palas, cubriendo todas las soluciones intermedias: 3, 4 y 5 palas. El mayor número de modelos corresponde con turbinas eólicas tripalas y bipalas, utilizándose mayor número de palas en las máquinas de potencia nominal inferior a 250 W. Los generadores eólicos de dos palas presentan generalmente niveles mas altos de ruido aerodinámico, lo que condiciona su uso en algunas situaciones.

La mayoría de los diseños de pequeña potencia usan conexión directa entre el rotor de la turbina eólica y el generador eléctrico, sin existencia de caja de multiplicación. En los generadores eólicos de baja potencia (<3KW) el tipo de generador utilizado prácticamente en la totalidad de los diseños es un alternador de imanes permanentes de 6, 8 o 10 polos.

El punto clave en los pequeños generadores eólicos es conseguir una regulación adecuada mediante sistemas pasivos, puesto que las soluciones con mecanismos activos de paso variable, similar a los empleados en los generadores de mayor tamaño, dan lugar a diseños mas complejos, y por tanto, más caros y con mayor labor de mantenimiento. Existe una gran variedad de soluciones utilizadas para regular la potencia y la velocidad de giro en los pequeños generadores eólicos.

Entre ellas se incluyen:

- 1 Sin regulación, en la que la turbina eólica se diseña para poder soportar las cargas que se produzcan en todas las condiciones de operación, incluidas las velocidades de giro que puedan presentarse en funcionamiento en vacío.
- 2 Regulación por desorientación en el que el eje del rotor está desalineado con el plano horizontal respecto a la dirección del viento incidente. Existen distintas soluciones para que se produzca esta desorientación del rotor, si bien la más utilizada es mediante un diseño en el que el centro de empuje del rotor no queda alineado con el centro de rodamiento de orientación.
- 3 Regulación por cabeceo, similar al anterior, pero en el que la desalineación se produce en el plano vertical.
- 4 Regulación por cambio de paso. Similar al utilizado en los generadores eólicos más grandes, aunque en su mayoría se utilizan sistemas de cambio de paso pasivos, en los que la variación del ángulo de ataque de las palas se produce mediante sistemas centrífugos. Actualmente se ensayan soluciones en las que se eliminan los rodamientos en el encastre de las palas diseñando el cuello de la pala con baja resistencia a la torsión, lo que permite que las cargas que actúan sobre la pala, sean capaces de producir giro de la misma sobre su eje.
- 5 Regulación por pérdida aerodinámica, similar a la utilizada en grandes generadores eólicos.

Los sistemas más utilizados son por cabeceo de la turbina eólica debido al empuje, y por cambio de paso centrífugo y eléctrico. El sistema de orientación más utilizado para los generadores eólicos de eje horizontal a barlovento es por veleta de cola. El timón veleta de orientación utilizado es, indistintamente, recto o elevado (con el fin de disminuir la acción de la estela del rotor sobre el timón.)

En los generadores eólicos a sotavento la orientación se produce por la acción del viento sobre el rotor; es importante recalcar que aparecen inestabilidades difíciles de controlar. Respecto al tipo de torre existe una amplia dispersión, usándose torres atirantadas o auto portantes, tubulares y de celosía.

Entonces, el generador eólico tipo de pequeña potencia tendría las siguientes características: turbina eólica de eje horizontal, tripala a Barlovento, con un generador síncrono de imanes permanentes, orientado por timón de cola y con regulación de la velocidad mediante cabeceo. Dispondría de sistema redundante de frenado, siendo uno de los sistemas un freno mecánico.

#### **4.1.6 Perspectivas de desarrollo: Futuros desarrollos tecnológicos**

Existe un margen amplio de mejora y optimización de los generadores eólicos, esencialmente enfocado al diseño de máquinas mas ligeras, diseños optimizados en función de las condiciones de viento de los emplazamientos (vientos bajos, emplazamientos con alta turbulencia, emplazamientos marítimos, etc.), y otros aspectos como el incremento de la eficiencia energética, la reducción de la emisión acústica y la mejora de la calidad de la energía suministrada a la red.

En los próximos años se optimizarán los actuales generadores eólicos de tamaños entre los 40-80 m de diámetro del rotor (potencias unitarias entre los 500 Kw y los 2 MW), asimismo se desarrollará una nueva generación de grandes generadores eólicos (>2MW), enfocado esencialmente a cubrir las necesidades del mercado de plantas eólicas marítimas.

Se espera que la generación eólica de potencia en Europa crezca enormemente en las próximas dos décadas; la industria estima que la energía eólica proveerá el 28 por ciento de la capacidad de la generación de toda la nueva electricidad en Europa entre 2001 y 2010, y para el 2020, las turbinas del viento generarán más de 12 por ciento de la potencia en el continente.<sup>10</sup>

Según F. Avia (2004), los objetivos de los nuevos proyectos de investigación y desarrollo se centrarán en las siguientes áreas:

- Reducción de los costos de generación
- Mejora de la calidad de la energía
- Incremento de la capacidad de penetración de la red.
- Reducción del impacto medioambiental.

La reducción del costo puede conseguirse mediante la reducción de los costos específicos de las turbinas eólicas, la reducción de los costos de instalación, la reducción de los costos de operación y mantenimiento, la mejora del rendimiento de transformación y la mejora de la disponibilidad.

La posibilidad de reducción del costo específico de las turbinas eólicas se estima en un 15% para los próximos cinco años, repartido entre el efecto de escala en los procedimientos de fabricación y en la optimización de los nuevos diseños.

Se introducirán nuevos conceptos y se optimizarán los actuales en los diferentes subsistemas de los generadores eólicos, y en particular sistemas de velocidad variable, sistemas sin caja de multiplicación (Figura 18), generadores de imanes permanentes, lógicas de control sofisticadas, sistemas flexibles en palas y soportes, así como el incremento de la contribución de los materiales compuestos (epoxy-fibra de carbono) en el diseño de los componentes estructurales.

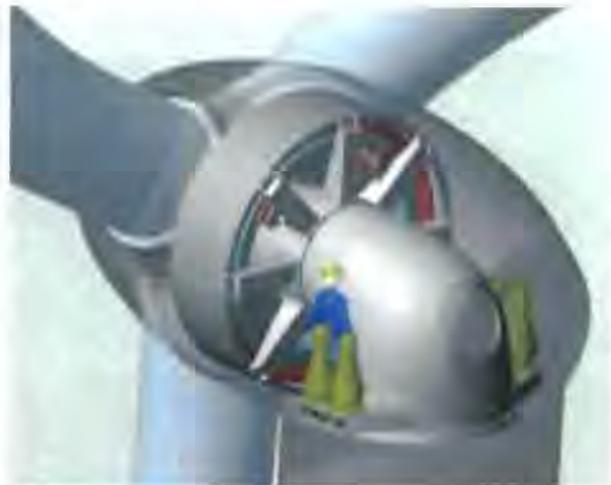


Fig. 18, El sistema de transmisión directa de la compañía Northern Power Systems, elimina la caja multiplicadora. *Wind Power, Today & Tomorrow*. U.S. Department of Energy, (2004).

Atención especial merecen los sistemas pasivos de control aerodinámico como los generadores de vórtices (Figura 19). La ventaja esencial de estos sistemas es la ausencia de sistemas hidráulicos y partes móviles, con el consiguiente aumento de fiabilidad y disminución de costos.



Fig. 19 Generadores de vórtices, [www.windpower.org](http://www.windpower.org)

Se modificarán los procedimientos de fabricación, y se dispondrá de mayor número de suministradores de componentes específicamente diseñados para su utilización en generadores eólicos, lo que repercutirá en reducción de los costos específicos de los mismos.

Se optimizarán los diseños para facilitar las labores de transporte, instalación y mantenimiento, lo que repercutirá en una disminución de los costos de operación de las plantas eólicas.

Asimismo se ampliará la oferta de configuraciones en cada uno de los modelos (diferentes generadores, altura de torre, diámetro de rotor, diseño de palas, etc.) lo que permitirá optimizar la elección de las máquinas en función de las condiciones específicas del proyecto.

Para alcanzar competitividad en costos de producción de energía eólica en aguas profundas, se esperan nuevas aportaciones fuertemente innovadoras mediante la simplificación de las tecnologías desarrolladas por la industria petrolera.<sup>53</sup> En la figura se muestran algunos métodos alternativos de anclado.

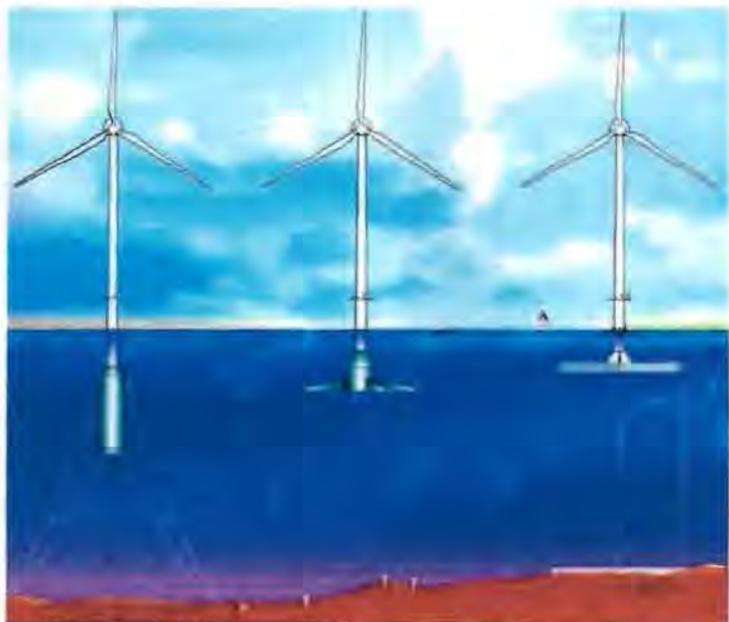


Fig. 20, Diseño conceptual de turbinas eólicas flotantes. *Wind Power Today*, (2005) US Department of Energy. [www.eere.energy.gov](http://www.eere.energy.gov)

Así por ejemplo, los criterios de diseño varían respecto a los aplicables para la tecnología desarrollada para uso en las plantas actuales: casos de carga distintos (combinación de condiciones meteorológicas y marinas), Sistemas de transporte, izado y operación y mantenimiento adecuados al nuevo entorno, conexión a red diferente, etc.

Como consecuencia de este nuevo tipo de plantas eólicas, se encuentran en fase de estudio y análisis nuevos desarrollos, floreciendo innovadores diseños de gran potencia entre 2MW y 5MW, diseños multirrotor (opción estudiada en la década pasada por el fabricante holandés Lagerwey y con precedentes en los diseños de Honnef por los años 40) y otras opciones específicas para instalaciones off-shore. Incluso han surgido propuestas para re-diseñar las torres eólicas de grandes generadores para utilizar su interior como un recipiente a presión para almacenar hidrógeno.<sup>54</sup>

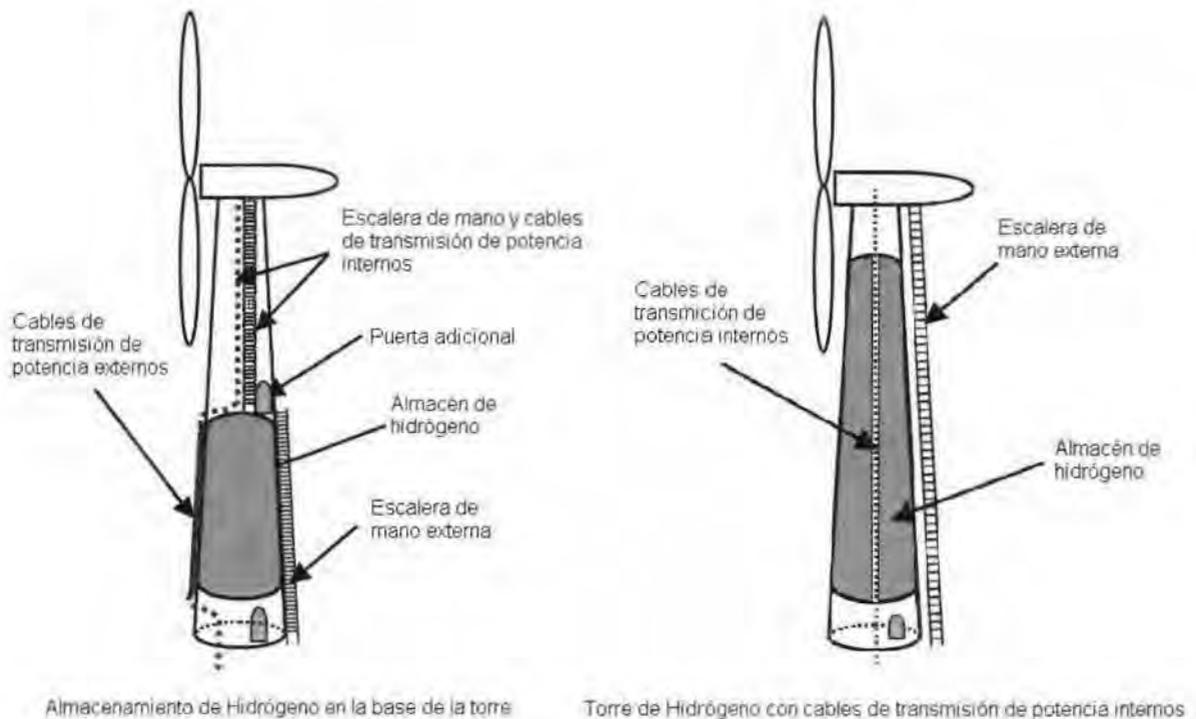


Fig. 21, *Diseño conceptual de torres como almacén de hidrógeno.*  
 R. Kottenstette. Technical Report, National Renewable Energy Laboratory (2003)

Dentro de los años siguientes, aparecerán generadores eólicos de mayor tamaño unitario a escala comercial (maquinas en el entorno de los 100m de diámetro y 4 MW de potencia nominal), que puedan resultar económicamente competitivos para instalaciones off-shore. De hecho, la turbina de viento mas grande del mundo es un prototipo de 5 MW, se construye en Dinamarca, sus palas miden 61.5 metros de largo y concluida alcanzará los 183 metros de altura.<sup>55</sup>

Es necesario un esfuerzo continuo para perfeccionar la tecnología existente de los generadores eólicos de pequeña potencia, que permita disminuir los costos y aumentar su fiabilidad, al igual que una adaptación de los mismos a las condiciones de funcionamiento en las distintas aplicaciones posibles. En particular los conceptos de regulación por medio de sistemas pasivos necesitan optimización y mejora, con objeto de alcanzar diseños sencillos, fáciles de instalar, de bajo mantenimiento y sencillez de operación".<sup>56</sup>

## Conclusiones

Es importante diversificar las fuentes de energía e investigar la forma en que estas pueden ser aprovechadas eficientemente. Se debe contar con mecanismos capaces de capturar, transformar y administrar la energía renovable del planeta, de no ser así, podría haber un periodo de crisis. No hay que olvidar que un tercio de los ingresos percibidos por México provienen de la venta del petróleo<sup>57</sup>, y que invariablemente, en algún momento éste escaseará.

Los generadores eólicos son una de las alternativas renovables de gran potencial de crecimiento. Existe un largo camino por recorrer en esta vía, pero se puede decir que hoy se cosechan los frutos de las investigaciones sobre aerodinámica y estructuras que se realizaron durante los años 80s, producto de la crisis energética de 1973.

Los resultados son, la disminución de los costos debido a la economía de escala (derivada del incremento del tamaño de los generadores eólicos) y la optimización mediante la aplicación de las nuevas herramientas de diseño. Así, las palas evolucionaron aerodinámica y estructuralmente, los materiales para construir las son compuestos híbridos (carbono/fibra de vidrio), ligeros y resistentes.

Con respecto al sistema de transmisión de potencia, las investigaciones se enfocan a reducir los costos de fabricación y el peso, además de un aumento en la resistencia. Al igual que con las palas se busca ligereza y resistencia a las cargas cíclicas.

Actualmente, son claras las ventajas de peso y volumen de las cajas multiplicadoras integradas, que consisten entre otras cosas, en la integración del marco principal de la turbina eólica a la caja. Parte del sistema de orientación se integra a la base de la caja multiplicadora que cuenta con dos etapas de engranes planetarios y una etapa de ejes paralelos.

Importante es nombrar que la conversión de energía en el sistema de transmisión de potencia de grandes generadores, será mediante componentes electrónicos avanzados, (interruptores eléctricos de carburo de silicio) para manejar mayores voltajes y corrientes, además de sobrevivir en ambientes a mayor temperatura, pudiendo así reducir el tamaño del conversor y mejorar el desempeño.

Actualmente las turbinas están a la caza del viento, tienen gran cantidad de sensores y controles, su costo ha disminuido y su productividad aumentado dando como resultado la energía renovable mas barata de todas, (0.04 dólares por kWh<sup>56</sup>) debido no solo a la economía de escala, sino a los avances en los métodos constructivos. Actualmente los métodos más comunes de fabricación de palas son: filamento bobinado, laminado de madera- epoxy y moldeado del forro con armadura interna.

Todos los cambios contribuyen a reducir los costos de producción de la energía y a mejorar la calidad de la misma. Esta búsqueda de la reducción de los costos ha llevado a los diseñadores a la investigación de nuevas técnicas de soporte para turbinas eólicas a mar abierto; con tecnologías importadas de la industria del petróleo para la construcción de plataformas flotantes ancladas al fondo marino.

Al parecer las aplicaciones marítimas a gran escala serán una parte importante del futuro de la energía eólica, sin olvidar que también aparecerán nuevos medios para almacenar y distribuir la energía producida por estas instalaciones, como el almacenamiento de hidrógeno.

Finalmente el conocimiento de la forma, materiales y estructuras de los generadores eólicos, nos ofrece una base para proponer nuevos diseños que cubran las necesidades de potencia, velocidad y resistencia que deberán tener las futuras propuestas. Esto promueve la investigación y mejoramiento de todo sistema y lo que impulsó la realización de esta monografía.

## Recomendaciones

Estimado lector, si buscas datos o información estadística, la base de datos de energía de la Energy Information Administration (<http://www.eia.doe.gov>) es una gran fuente.

Nuevas investigaciones y avances expuestos en conferencias y congresos acerca de energías renovables, las podrás encontrar en la base "Energy Technology Data Exchange World Energy Base" ETDEWEB. (<http://www.etde.org/etdeweb/>). La página Danesa <http://www.windpower.org/es/tour/wres/index.htm>, te ofrece una guía para dar inicio al estudio de los generadores eólicos modernos, ahí podrás encontrar información acerca de conceptos básicos como la fuerza de Coriolis, ley de Betz o la distribución de Weibull.

Hay revistas sobre energías renovables que tienen información actualizada y amena para todo lector como la revista española "Energía" la revista "windpower-monthly" o los boletines del Instituto de Investigaciones Eléctricas. Si lo que buscas es un poco de historia, la podrás encontrar en "La Energía Eólica, Tecnología e historia" de Cádiz. En los anexos de este libro se puede encontrar la metodología para el diseño de un generador eólico de baja potencia.

El libro de Rohatgi & Nelson "Wind Characteristics" tiene la mejor explicación del teorema de Betz. Es una buena fuente de información para quien está interesado en el estudio del viento con propósitos de explotación. Ahí podrás encontrar un mapa eólico de México y las demostraciones matemáticas de la conversión de energía cinética del viento a potencia utilizable.

La información sobre la praxis la podrás encontrar en todos los libros de Paul Gipe; son amenos y guardan buena información técnica, igual que "Wind and Solar Power Systems" de Datel. Ejercicios prácticos como estimaciones de la producción anual de energía, análisis de datos estadísticos, diseño de rotores, esfuerzos en ejes, palas y torres etc. Podrás encontrarlos en el libro "Wind Energy Explained"

## ANEXO A

### Principales fabricantes

Los fabricantes con mayor cuota de mercado en los últimos años se enlistan a continuación.

NEG MICON A/S (DK)

GE Wind Energy (USA)

VESTAS A/S (DK)

ENERCON (D)

GAMESA (E)

BONUS A/S (DK)

NORDEX (DK)

MADE (E)

ECOTECNIA (E)

MITZUBISHI (JPN)

Entre los productos comercializados por estos fabricantes conviven diferentes tipos de tecnologías, con la característica común de tratarse de generadores eólicos de eje horizontal, tripala a barlovento, lo que supone al menos una convergencia en el tipo de turbinas eólicas respecto a su sistema de captación. Si analizamos los datos de las instalaciones realizadas en Alemania en los últimos años se puede comprobar como han desaparecido la utilización de rotores de dos y cuatro palas, que en el año 1989 suponían el 40 % de las instalaciones, según indica el reporte alemán "250 MW Wind" en el International Energy Agency, 1990-2003.

## ANEXO B

### Otras turbinas eólicas.

La apreciación global de turbina eólica proporcionada anteriormente, es la que asume una topología básica de un solo tipo de turbina, a saber uno que emplea un rotor de eje horizontal, impulsado por fuerzas de sustentación. Vale la pena señalar que se han diseñado un inmenso número de otras topologías, y en algunos casos construido. Ninguno de éstos prototipos se ha encontrado con el mismo grado de éxito como aquellos con eje horizontal y rotor impulsado por sustentación. El contendiente más cercano al HAWT es la turbina eólica de eje vertical Darrieus. Este concepto se estudió extensivamente en los Estados Unidos y Canadá en los años setenta. No obstante algunos rasgos atractivos, nunca pudo igualar a los HAWT's en lo concerniente al costo de la energía. Sin embargo, es posible que el concepto pudiera surgir de nuevo para algunas aplicaciones.

Otro concepto que aparece periódicamente es el concentrador. La idea es encauzar el viento para aumentar la productividad del rotor. El problema es que el costo de construcción de un concentrador eficaz, que además pudiera resistir vientos extremos ocasionales, siempre ha sido mayor que el valor del dispositivo.

Finalmente, se han propuesto varios rotores cuyo principio de funcionamiento es el arrastre en lugar de sustentación. Uno de estos conceptos, el rotor de Savonius, se ha usado para pequeñas aplicaciones de bombeo de agua. Existen dos problemas fundamentales con tales rotores: (1) estos son inherentemente ineficaces y (2) es difícil protegerlos de los vientos extremos. Es dudoso si tales rotores alguna vez lograrán uso extendido en turbinas del viento.

El lector interesado en alguna de las variedades de conceptos de turbina eólica puede consultar Nelson (1996). Este libro proporciona una descripción de varios sistemas del viento innovadores. Se dan revisiones de varios tipos de máquinas del viento en Eldridge (1980), Le Gourieres (1982), Cádiz (1984) Algunos de los diseños más innovadores se documentan en trabajo apoyado por la Sección americana de Energía (1979, 1980).

## ANEXO C

### Glosario de términos en inglés

- actuators* actuadores/ impulsor  
*active stall power control* regulación activa por pérdida aerodinámica  
*aerodynamics* aerodinámica  
*aeroelastic* aeroflexible  
*airfoil* Perfil aerodinámico o superficie sustentadora — La forma de la sección transversal de los alabes o palas, la cual para las turbinas eólicas de eje horizontal modernas, está diseñada para aumentar la sustentación y mejorar el funcionamiento de la turbinas.  
*alternating current* (AC) corriente alterna (CA)  
*ampere-hour* Ampere-hora Una unidad de la cantidad de electricidad obtenida por la integración del flujo de corriente en el tiempo en horas para su flujo; usada como una medida de capacidad de las baterías.  
*anemometer* Anemómetro— Un dispositivo usado para medir la velocidad del viento.  
*availability factor* factor de disponibilidad  
*average wind speed* Velocidad promedio del viento — La velocidad media del viento sobre un periodo de tiempo específico.  
*azimuth* angle ángulo azimutal  
*ball bearings* rodamientos de bola  
*roller bearings* rodamientos de rodillo  
*bearings* rodamientos, cojinetes, valeros.  
*bedplate* placa de asiento  
*bending-* flexión doblamiento  
*Betz' law* Ley de Betz  
*birds* aves  
*blades* Alabes o palas La superficie aerodinámica que atrapa el viento.  
*blade root* base de la pala  
*bolt assembly* Unión con pernos  
*brakes* Frenos, Varios sistemas usados para frenar la rotación del rotor.  
*buckling* pandeo  
*bushing* cojinete  
*cage rotor* rotor de jaula de ardilla  
*capacity credit* crédito de capacidad  
*capacity factor* factor de carga  
*cast steel* acero colado  
*chord* profundidad del ala (cuerda)  
*computational fluid dynamics (CFD)* dinámica de fluidos computacional (CFD)  
*converter* Convertidor — Véase inversor.  
*cooling system* sistema de refrigeración  
*Coriolis force* fuerza de Coriolis  
*corrosion (offshore)* corrosión (en agua de mar)  
*cost of electricity* costo de la electricidad  
*cutaway* corte, sección  
*cut in wind speed* velocidad de conexión (ó de arranque)  
*cut out wind speed* velocidad de corte

**cut-in wind speed** Velocidad de arranque — La velocidad del viento a la cual la turbina empieza a generar electricidad.

**cut-out wind speed** Velocidad de paro— La velocidad del viento a la cual la turbina deja de generar electricidad.

**Danish concept** concepto danés

**dB (A)**, decibel (A) scale dB(A), escala de decibelios A

**delta connection** conexión triángulo

**density** Densidad — La cantidad de masa contenida en una unidad de volumen.

**density of air** densidad de aire

**direct grid connection** conexión directa a red

**drive train** transmisión, propulsión, eje de transmisión, sistema de transmisión de potencia

**driven yaw** , orientación impulsada

**downwind** Viento corriente abajo, sotavento — En el lado opuesto de la dirección desde la cual está soplando.

**downwind (machine)** máquina con rotor a sotavento

**drag** resistencia aerodinámica

**economics** Economía

**economies of scale** economías de escala

**Edgewise** de costado, de lado, de canto

**efficiency** eficiencia

**electromagnetism** electromagnetismo

**energy balance** Balance de energía

**energy** energía

**engineering** ingeniería, técnica

**Exploded view** vista esquemática

**extreme load** carga extrema

**fastening** pizas de unión , fijación

**fatigue load** Carga de fatiga

**feather** poner en bandera

**fixed yaw** orientación fija

**flange** brida

**Flap-** ala abatible, aleteo, aletazo, aleron

**Flatwise o flatways** horizontalmente, de plano

**Fluid drive** transmisión hidráulica

**flicker** flicker

**foundation** cimentación

**Furling** Desviación — Una protección pasiva de la turbina que típicamente hace que el rotor se doble ya sea hacia arriba o hacia un lado mediante la veleta de la cola.

**Free yaw** libre orientación

**Gap**, brecha, desequilibrio, boquete

**gearbox** multiplicador/ caja multiplicadora caja de velocidades

**Gedser wind turbine** generador eólico de Gedser

**generator slip** deslizamiento (del generador)

**generator** Generador

**geostrophic wind** viento geostrófico

**gimballed (hub)** cubo articulado,

**global winds** vientos globales

**gravity foundation (offshore)** cimentación (marina) por gravedad

**grid** Red — Los sistemas de distribución de las compañías eléctricas. La red que conecta los generadores de electricidad con los usuarios de la misma.

**grid frequency** frecuencia de red

**gust** ráfaga

**guy (wire)** viento, tirante

**HAWT (horizontal-axis wind turbine,)** — Turbina eólica de eje horizontal. TEEH

**Hinged blades** palas con bisagras, palas acodadas

**Hoist** levantamiento, torno, mecanismo de elevación

**Hoisting** levantamiento (instalación) de una estructura

**horizontal axis wind turbine (HAWT)** generador eólico de eje horizontal

**Hub** cubo del rotor

**hub height** altura del cubo

**hydraulics system** sistema hidráulico

**Hz (Hertz)** Hz (hercio)

**indirect grid connection** conexión indirecta a red

**induction generator / asynchronous generator** generador asincrónico

**induction generator** generador de inducción

**induction** Inducción

**installation costs** costes de instalación

**inverter** Inversor — Un dispositivo que convierte la corriente directa a corriente alterna.

**islanding** islanding (o funcionamiento en isla)

**issue** asunto, punto, cuestión, problema

**killed steel** acero calmado

**kW** — Kilowatts, una medida de potencia de la corriente eléctrica (1,000 watts).

**kWh** — Kilowatts-hora, una medida de la energía, igual al uso de un kilowatt durante una hora.

**lattice tower** torre de celosía

**lifetime (design)** vida (de diseño)

**lift** sustentación ("lift")

**Local** limitado restringido determinada

**manufacturers** Fabricantes

**masking noise** ruido enmascarador

**mean**, media, promedio

**mono pile foundation (offshore)** cimentación (marina) monopilote

**mountain wind** viento de montaña

**MW** — Megawatt, una medida de potencia (1,000,000 watts).

**Nacelle** Góndola, Cubierta — El cuerpo de una turbina eólica tipo hélice, conteniendo la caja de engranes, el generador, el núcleo del rodete, y otras partes.

**network** red

**noise** ruido

**o&M costs** Costos de OyM — Costos de operación y mantenimiento.

**obstacle** Obstáculo

**occupational safety** seguridad en el trabajo

**offshore wind energy** energía eólica marina

**operation and maintenance costs** costes de operación y mantenimiento

**park effect** efecto del parque

**Pinion** Ala, piñón, **pinion drive** transmisión por engranaje

**pitch control** regulación por cambio del ángulo de paso ("pitch control")

**Pitch** grado de inclinación

**pitch diameter** paso diametral (engranes)

**pole (magnetic)** polo (magnético)

**pole changing generator** generador con número de polos variable

**porosity** porosidad

**power (electrical)** potencia (eléctrica)

**power coefficient** Coeficiente de potencia — La razón de la potencia extraída del viento por una turbina eólica y la potencia disponible en la corriente de viento.

**power coefficient(rotor)** coeficiente de potencia (del rotor)

**power curve** Curva de potencia — Una gráfica mostrando la potencia obtenida en una turbina eólica a través de un rango de velocidades.

**power density** densidad de potencia

**power of the wind** potencia del viento

**power quality** Calidad de potencia

**PUC, Public Utility Commission** (Comisión de Empresas de Servicio Público) — Una agencia estatal la cual regula a las compañías eléctricas. En algunas áreas se le conoce como Public Service Commission.

**PURPA, Public Utility Regulatory Policies Act** Acta de Políticas Regulatorias de Empresas Eléctricas de Servicio Público de 1978, 16 U.S.C. § 2601.18 CFR § 292 — Las cuales se refieren a las reglas de conexión de pequeños generadores a las redes de la compañía eléctrica.

**rated output capacity** Clasificación de potencia — La potencia de salida de una turbina eólica operando a la velocidad de viento clasificada.

**rated power, nameplate power** \_\_ potencia nominal

**rated wind speed** Velocidad de viento clasificada (o nominal)— La velocidad de viento mínima a la cual la clasificación de potencia de la turbina eólica es obtenida.

**Rayleigh distribution** distribución de Rayleigh

**rectifier** rectificador

**release spring** muelle antagonista

**renewable energy** energía renovable

**Rotor** — El componente rotativo de una turbina eólica, incluyendo ya sea a los alabes y su ensamble, o la porción rotatoria del generador.

**rotor area(swept)** rotor area área del rotor (de barrido del rotor)

**rotor blade** Pala

**rotor diameter** Diámetro del rotor — El diámetro del círculo barrido por el rotor.

**rotor speed** Velocidad del rotor — El número de revoluciones por minuto del rotor de la turbina eólica.

**rotor(of a generator)** rotor (del generador)

**rotor(of a wind turbine)** rotor (de una turbina eólica)

**roughness class** clase de rugosidad

**roughness length** longitud de rugosidad(o parámetro de aspereza)

**roughness rose** rosa de las rugosidades

**safety** Seguridad

**scale parameter (Weibull distribution)** parámetro de escala (distribución de Weibull)

**sea bird** ave marina

*sea breeze* brisa marina  
*shadow casting* distribución de las sombras  
*shape parameter (Weibull distribution)* parámetro de forma (distribución de Weibull)  
*sheaves* poleas de doble ranura  
*shelter effect* efecto de resguardo  
*sinusoidal* sinusoidal  
*site, siting* emplazamiento  
*slip (generator)* deslizamiento (del generador)  
*soft start* arranque suave  
*sound* sonido  
*span* envergadura  
*spar* larguero  
*speed up effect* efecto acelerador  
*spoilers* alerones  
*spur gears* engranaje cilíndrico  
*stall control* regulación por pérdida aerodinámica ("stall control")  
*stall* regulación por pérdida aerodinámica ("stall")  
*star connection* conexión estrella  
*start-up wind speed* Velocidad del viento de arranque — La velocidad del viento a la cual el rotor empieza a girar. Véase también velocidad de arranque.  
*stator* estator  
*stream tube* tubo de corriente  
*strip*, franja, banda, faja  
*structural dynamics* dinámica estructural  
*stud* refuerzo  
*swept area* Área de barrido — El área que cubre al girar el rotor de la turbina eólica, calculada con la fórmula  $A = \pi R^2$ , donde R es el radio del rotor.  
*Switchgear* dispositivos de distribución  
*synchronous generator* generador síncrono  
*synchronous speed* velocidad de sincronismo  
*tapered roller bearings* rodamientos de rodillos cónicos  
*tailoring* adaptar  
*teeter* balanceo o vaiven  
*tensile strength* resistencia a la tracción  
*three phase alternating current* corriente alterna trifásica  
*thread* rosca  
*thyristor* Tiristor  
*tip speed ratio* Razón de la velocidad de punta — La velocidad lineal a la que se mueve la punta del alabe dividida entre la velocidad del viento. Es por lo regular un requerimiento de diseño de la turbina eólica.  
*torque* momento de torsión  
*tower* torre  
*trailing edge* borde de salida  
*tripod* cimentación  
*tripod foundation (offshore)* cimentación (marina) en tripode  
*truss*, armazón, apuntalar  
*tubular tower* torre\*tubular

**turbulence** Turbulencia — Los cambios en la dirección y velocidad del viento, frecuentemente ocasionados por obstáculos.

**twist (rotor blade)** torsión, alabeo (de la pala)

**ultimate loads** cargas fundamentales, elementales

**Upwind** Viento corriente arriba, barlovento — En el mismo lado de la dirección de donde el viento está soplando.

**upwind (machine)** máquina con rotor a barlovento

**utility** empresa de servicios públicos

**Vane** pala

**variable (rotational)** velocidad (de giro) variable

**VAWT (vertical-axis wind turbine,)** — Turbina eólica de eje vertical. TEEV

**vertical axis wind turbine (VAWT)** generador eólico de eje vertical

**viscosity** Viscosidad

**vortex generator** generador de torbellinos

**wake effect** efecto de la estela

**weak grid** red débil

**Weibull distribution** distribución de Weibull

**Weld** soldadura

**Winch** torno (para levantar carga)

**wind energy** energía eólica

**wind farm** Granja de viento — Un grupo de turbinas eólicas, frecuentemente pertenecientes y operadas una compañía. También se le conoce como planta eólica.

**wind map** Mapa eólico

**wind power** potencia eólica

**wind rose** rosa de los vientos

**wind shade** abrigo (o sombra) del viento

**wind shear** cizallamiento (o cortadura) del viento

**wind turbine** turbina eólica, aerogenerador, aeroturbina, generador eólico

**wind vane** veleta

**wire rope** Cable

**yaw** Rotación longitudinal — El movimiento de la parte superior de la torre que permite que la turbina eólica siempre esté de frente al viento.

**yaw mechanism** mecanismo de orientación

**yaw** orientación

**yield strength** límite de elasticidad

**yielding** flexible, blando

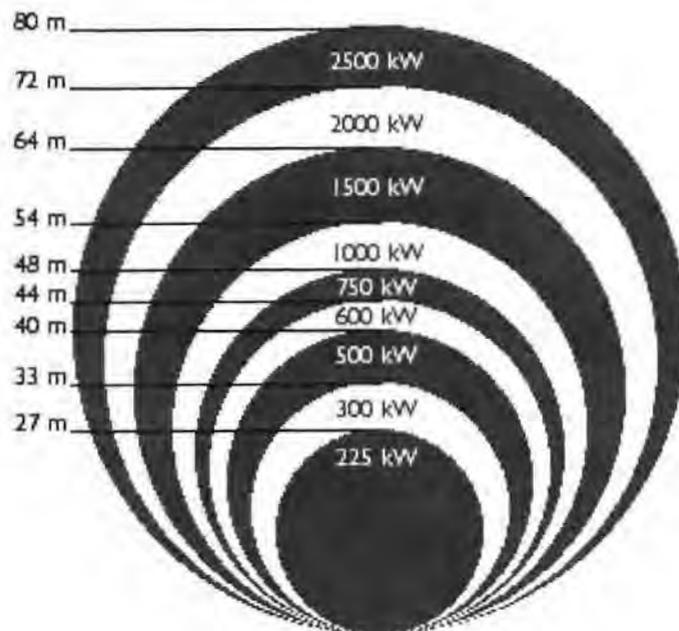
## ANEXO D

### Escala de velocidades de viento

Velocidades de viento a 10 m de altura		Escala	Viento
m/s	nudos	Beaufort (anticuada)	
0,0-0,4	0,0-0,9	0	Calma
0,4-1,8	0,9-3,5	1	
1,8-3,6	3,5-7,0	2	Ligero
3,6-5,8	7-11	3	
5,8-8,5	11-17	4	Moderado
8,5-11	17-22	5	Fresco
11-14	22-28	6	
14-17	28-34	7	Fuerte
17-21	34-41	8	
21-25	41-48	9	Temporal
25-29	48-56	10	
29-34	56-65	11	Fuerte temporal
>34	>65	12	Huracán

Fuente: Asociación danesa de la Industria Eólica <http://www.windpower.org/en/core.htm>

### Tamaño de los generadores eólicos



## Referencias bibliográficas

- <sup>1</sup> Agencia Valenciana de la Energía, (2005) "Tipos de energía" <http://www.aven.es>
- <sup>2</sup> Miller, G.T (1994) "Ecología y medio ambiente", Editorial Iberoamérica.
- <sup>3</sup> Julio Esper (1997) *El Petróleo II* <http://www.monografias.com/trabajos/petroleo2/petroleo2.shtml>
- <sup>4</sup> Internacional Energy Outlook 2005 Report #DOE/EIA-0484(2005) <http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/world.html>
- <sup>5</sup> Bruntland, G. (ed.) (1987) *Our common future: The World Commission on Environment and Development*, Oxford, Oxford University Press
- <sup>6</sup> Agencia Internacional de Energía <http://www.iea.org/>,
- <sup>7</sup> Maxwell, Charles T. (2004) "The Gathering Storm" <http://online.barrons.com/public/main> o en <http://www.crisisenergetica.org/article.php?story=20041116121707202&mode=print>
- <sup>8</sup> Ramírez Corzo Luis "Hacia un mejor aprovechamiento de los hidrocarburos de México" PEMEX 18.03.2005 <http://www.pemex.com/index.cfm?action=content&sectionID=8&catID=42&subcatID=2995>
- <sup>9</sup> Gerencia de energías no convencionales. Sistema de información Geográfica para las energías renovables en México. 13/Jul/2005 <http://genc.ine.org.mx/genc/siger/frames.asp?mcontador=10628&url=resultados%2Ehtm>
- <sup>10</sup> Asociación danesa de la Industria Eólica "Aerodinámica del rotor" <http://www.windpower.org/es/tour/wtrb/rotor.htm>
- <sup>11</sup> Valdósera C.,diario La jornada, 16 de febrero de 2006 "Aerogeneradores: lo que el viento nos traerá" <http://www.jornada.unam.mx/2006/02/16/032n1tec.php>
- <sup>12</sup> Asociación danesa de la Industria Eólica ""Potencia media del viento" <http://www.windpower.org/es/tour/wres/shelves.htm>
- <sup>13</sup> Nelson, V. (1996) "Wind Energy and Wind Turbines" Alternative Energy Institute, West Texas A&M University.
- <sup>14</sup> Asociación danesa de la Industria Eólica "Control de potencia en aerogeneradores" <http://www.windpower.org/es/tour/wtrb/powerreg.htm#anchor1387445>
- <sup>15</sup> Asociación danesa de la Industria Eólica "Control de potencia de aerogeneradores" <http://www.windpower.org/es/tour/wtrb/powerreg.htm>
- <sup>16</sup> Shepherd Dennis (1998) "Historical Development of the windmill" En: "Wind Turbine Technology". The American Society of mechanical Engineers, ASME PRESS New York,; David A.Spera,, Editor
- <sup>17</sup> Asociación danesa de la Industria Eólica "Historia" <http://www.windpower.org/es/pictures/index.htm>
- <sup>18</sup> Manwell, J. F., McGowan, J.G., Rogers, A.L., (2004) "Wind Energy Explained Theory, Design and Application." (Chichester, England): Ed. John Wiley & Sons Ltd.,
- <sup>19</sup> Technology Review, Septiembre 2004, "wind power: Taking Europe by storm" [www.technologyreview.com](http://www.technologyreview.com)
- <sup>20</sup> Asociación danesa de la Industria Eólica "Palas del rotor" <http://www.windpower.org/en/core.htm>

- 
- <sup>21</sup> Manwell, J. F., McGowan, J.G., Rogers, A.L., (2004) "*Wind Energy Explained Theory, Design and Application.*" (Chichester, England): Ed. John Wiley & Sons Ltd,
- <sup>22</sup> González, G. R., Saldaña F.R., (Nov. 2002) En *Curso Introductorio de Energía eólica, XXVI Semana Nacional de Energía Solar.* (Chetumal Quintana Roo): Asociación Nacional de Energía Solar, A.C.
- <sup>23</sup> Manwell, J. F., McGowan, J.G., Rogers, A.L., (2004) "*Wind Energy Explained Theory, Design and Application.*" (Chichester, England): Ed. John Wiley & Sons Ltd,
- <sup>24</sup> Rohatgi, R. J., Nelson V. (1994) *Wind Characteristics, an analysis for the generation of wind power* (Canyon, Texas, USA): Alternative Energy Institute West Texas A&M University.
- <sup>25</sup> Manwell, J. F., McGowan, J.G., Rogers, A.L., (2004) "*Wind Energy Explained Theory, Design and Application.*" (Chichester, England): Ed. John Wiley & Sons Ltd,
- <sup>26</sup> Spera, D. (1998) Introduction to Modern Wind Turbines. En: *Wind Turbine Technology* (New York, USA). The American Society of mechanical Engineers, ASME PRESS
- <sup>27</sup> Asociación danesa de la Industria Eólica "Escala de velocidades de viento"  
<http://www.windpower.org/es/stat/unitsw.htm>
- <sup>28</sup> Fuglsang, P., Dahl K.S., (March, 1999) Design of the new RIS0- A1 airfoil family for wind turbines. En *European Wind Energy Conference* (pp 134-137). Nice, France : Wind Eergy and Atmospheric Physics Department
- <sup>29</sup> Selig, M., "UIUC Airfoil Coordinates Data Base", UIUC Airfoil Data Site, (1998),  
<http://amber.aae.uiucc.edu/~m-selig/ads.html>
- <sup>30</sup> Manwell, J. F., McGowan, J.G., Rogers, A.L., (2004) "*Wind Energy Explained Theory, Design and Application.*" (Chichester, England): Ed. John Wiley & Sons Ltd,
- <sup>31</sup> Selig, M., Tangler, J.L. (1995) Development of a Multipoint Inverse Design Method for Horizontal Axis Wind turbines. En *Wind Engineering*, 19 (2), 91-105
- <sup>32</sup> NREL, "GUIDELINE DG01 Wind Turbine Design Loads Analysis" o en  
([http://www.nrel.gov/wind/docs/dg01\\_991109\\_revision1.doc](http://www.nrel.gov/wind/docs/dg01_991109_revision1.doc))
- <sup>33</sup> Cádiz D. J., (1984) *La energía eólica, tecnología e historia* (Madrid España): Herman Blume.
- <sup>34</sup> Divone, L.V., (1998) Evolution of Modern Wind Turbines. En *Wind Turbine Technology* (New York, USA) The American Society of mechanical Engineers, Spera, David A. ASME PRESS.,
- <sup>35</sup> Manwell, J. F., McGowan, J.G., Rogers, A.L., (2004) "*Wind Energy Explained Theory, Design and Application.*" (Chichester, England): Ed. John Wiley & Sons Ltd,
- <sup>36</sup> Asociación danesa de la Industria Eólica "Palas del rotor " <http://www.windpower.org/en/core.htm>
- <sup>37</sup> Manwell, J. F., McGowan, J.G., Rogers, A.L., (2004) "*Wind Energy Explained Theory, Design and Application.*" (Chichester, England): Ed. John Wiley & Sons Ltd,
- <sup>38</sup> Recommended Practices for Design and Specification of Gearboxes for Wind Turbine Generator Systems. (1997) AGMA Information Sheet. AGMA/AWEA 921-A97. American Gear Manufacturers Association. 1500 King St. Suite 201, Alexandria, VA 22314..

- 
- <sup>39</sup> Germanischer Lloyd, (1993) *Richtlinie für die Zertifizierung von Windkraftanlagen* Hamburg
- <sup>40</sup> Childs, S. Hughes, P., Saced, A. (1993) Development of a Dynamic Brake Model. En *Proc. Of the 1993 American Wind Energy Association Annual Conference*, American Wind Energy Association, Washington D.C.
- <sup>41</sup> Germanischer Lloyd. (1993) Regulation of the Certification of Wind Energy Conversion Systems, Rules and regulations IV: Non marine technology part 1, Wind Energy , Germanischer Lloyd, Hamburg.
- <sup>42</sup> Bakker, D (Secretary) (1996) Wind Turbine Systems, Part I: Safety requirements, 88/1400-1, Standards (Draft) Reference Numbers 88/69/ CD. International Electromechanical Commission.
- <sup>43</sup> Manwell, J. F., McGowan, J.G., Rogers, A.L., (2004) "*Wind Energy Explained Theory, Design and Application*." (Chichester, England): Ed. John Wiley & Sons Ltd
- <sup>44</sup> El Chazly, N. (1993) Wind Turbine Tower Structural and Dynamic Analysis Using the finite Element Method. En *Proc. of the 15<sup>th</sup> British Wind Energy Association Annual Conference*, London, Mechanical Engineering Publications,
- <sup>45</sup> Babcock, B. A., Conover, K.E. (1994) Design of cost effective Towers for an Advances Wind Turbine. En *Proc. Of the 15<sup>th</sup> ASEM Wind Energy Symposium*, New York. American Society of Mechanical Engineers.
- <sup>46</sup> Avia, A.F. (2004) Nuevos avances en el desarrollo tecnológico de la energía eólica En: *Especial de Energía Eólica, Vol. 30* (No. 174), Edición Especial.
- <sup>47</sup> *Nuevos vientos para el desarrollo sostenible* (2003) Plataforma empresarial eólica
- <sup>48</sup> Burgos, J.C., Rodríguez, J.L., (2003) *Sistemas Eólicos de Producción de Energía Eléctrica*. Editorial Rueda
- <sup>49</sup> Avia, A.F. (2004) Nuevos avances en el desarrollo tecnológico de la energía eólica En: *Especial de Energía Eólica, Vol. 30* (No. 174), Edición Especial.
- <sup>50</sup> Burgos, J.C., Rodríguez, J.L., (2003) *Sistemas Eólicos de Producción de Energía Eléctrica*, Editorial Rueda
- <sup>51</sup> de Vries, E., (2003) *Wind Turbine Technology Trends -Review 2003* Rev. Renewable Energy World, July-August
- <sup>52</sup> Avia F. Cruz, I. (1999) *Estado del Arte de la Tecnología de Pequeños Aerogeneradores* Informes Técnicos Ciemat No 185
- <sup>53</sup> US department of energy "Wind power today", Abril de 2005 [www.doe.gov/bridge](http://www.doe.gov/bridge).
- <sup>54</sup> R. Kottenstette, 2003. *Technical Report*, National Renewable Energy Laboratory
- <sup>55</sup> Parfil M., (2005, Agosto) *¡Soy Libre!* National Geographic en Español.
- <sup>56</sup> Avia, A.F. (2004) Nuevos avances en el desarrollo tecnológico de la energía eólica En: *Especial de Energía Eólica, Vol. 30* (No. 174), Edición Especial.
- <sup>57</sup> MSN Noticias (Miércoles, 15 de marzo de 2006 - 16:32 GMT) *México: descubren yacimiento petrolero* [http://news.bbc.co.uk/1/hi/spanish/business/newsid\\_4809000/4809858.stm](http://news.bbc.co.uk/1/hi/spanish/business/newsid_4809000/4809858.stm)
- <sup>58</sup> U.S. Department of Energy (2005) *Wind Power Today* [www.eere.energy.gov](http://www.eere.energy.gov)