UNIVERSIDAD CENTRAL ‘‘MARTA ABREU’’ DE LAS VILLAS

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO DE DIPLOMA

Departamento de Energía

Titulo: Diseño y fabricación de componentes un aerogenerador para su instalación.

Autor: Oriel Bravo Rodriguez

Tutor: MSc. Ernesto Fariñas Wong,

Dr. Félix Santos García

Curso 2003-2004

Santa Clara 2004
"Año del 45 aniversario del triunfo de la revolución"

A mis tutores, por su dedicación y el apoyo brindado en la realización de este trabajo y en especial por su amistad.

A todos los trabajadores del taller, a Frank y Tilio, por su colaboración incondicional.

A todos los profesores del departamento de Energía y del CAD-CAM, que me brindaron una mano cuando la necesité, en especial a Soriano e Idalberto.

A mis compañeros de grupo, en especial a Beatriz, que estuvo a mi lado siempre.

A mi novia y familia, por su confianza y ayuda.

A toda mi familia.

A todos muchas gracias.

Resumen:

Hoy en día, el tema de la energía constituye una gran preocupación para toda la humanidad. En nuestro país se desarrollan diferentes trabajos, con el objetivo de desarrollar el uso de fuentes renovables de energía cada vez más eficientes, para colaborar con la preservación de nuestro planeta, además de lograr un ahorro de energía. En el presente trabajo se realizó el completamiento e instalación de un aerogenerador de 1 kW de potencia en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la UCLV.

En este trabajo se desarrolló un estudio acerca de las configuraciones básicas de los pequeños aerogeneradores, así como, la forma de captar el viento por un rotor y el método para dimensionar al mismo. Además se realizó un análisis de los diferentes sistemas de orientación-regulación para pequeños aerogeneradores donde se seleccionó el sistema de regulación por momento de inercia.

Teniendo en cuenta el estudio realizado, se desarrolló el diseño y construcción del rotor, del sistema de orientación por momento de inercia en la cola, la torre, así como, la base para la instalación del aerogenerador en el techo de la Facultad. Además se realizaron los cálculos de resistencia al árbol del generador, a los cojinetes del mismo, así como, a las uniones roscadas del sistema de orientación y de la brida de la torre, donde se demostró que los mismos resistían las condiciones de trabajo a las que estaban sometidos.

Se incluye en este trabajo los planos de construcción y montaje del aerogenerador analizado.

Abstract:

Today, the topic of energy constitutes a great concern for the whole humanity. In our country different works are developed, with the objective of developing the use of more and more efficient renewable sources of energy, to collaborate with the preservation of our planet, besides achieving an energy saving. In the present work was finish and carried out the installation of an aerogenerator of 1 kW of power in the Mechanical Engineering Faculty of the UCLV.

In this work a study was developed about the basic configurations of the small aerogenerators, as well as the way of capturing the wind by a rotor and the method for giving its right dimensions. It was also carried out an analysis of the different orientation-regulation systems for small aerogenerators where the regulation system was selected by moment of inertia.

Keeping in mind the carried out study, it was developed the design and construction of the rotor, the orientation system for moment of inertia in the line, the tower, as well as the base for the installation of the aerogenerator in the roof of the Faculty. It was also carried out the resistance calculations of generator tree the bearings, as well as the threaded unions of the orientation system and the flange of the tower, where it was demonstrated that the same ones resisted the work conditions that were subjected.

It is included in this work the construction planes and assembly of the analyzed aerogenerator.

Índice:

Pág.

Introducción……... 1

Objetivos……..2

Capítulo 1: Análisis teórico sobre pequeños aerogeneradores…….. 3

1.1 Introducción……... 4

1.2 Descripción de la fuente de energía utilizada (El viento)……..4

1.3 Clasificación de los aerogeneradores…… 6

1.4 Captación del viento por un rotor…….. 9

1.4.1 Energía suministrada por el viento…….. 9

1.4.2 Acción del viento sobre las palas del aerogenerador……... 10

1.5 Forma de dimensional un rotor…….. 11

1.6 Sistema de orientación y regulación…….. 14

1.6.1 Dispositivos de servomotores…….. 15

1.6.2 Aleta estabilizadora……..15

1.6.3 Freno aerodinámico centrífugo……... 16

1.6.4 Hélice auxiliar……..17

1.6.5 Dispositivos manuales……. 18

1.6.6 El rotor orientado a sotavento…….18

1.6.7 Ángulo de paso fijo y variación del área de captación…… 18

1.6.8 Ángulo de paso fijo y entrega en pérdida aerodinámica o "stall"……19

1.6.9 Ángulo de paso variable o "pitch regulation"……..20

1.6.10 Regulación por momento de inercia en la cola……..21

1.7 Conclusiones parciales……...23

Capítulo 2: Diseño de algunas parte para un aerogenerador de 1 kW……24

2.1 Introducción……... 24

2.2 Descripción del aerogenerador donado por CUBASOLAR…….. 24

2.3 Diseño del rotor del aerogenerador……25

2.4 Diseño del sistema de orientación-regulación por momento de inercia…… 29

2.5 Diseño y construcción de la torre……...32

2.6 Conclusiones parciales……...34

Capítulo 3: Cálculo de resistencia de algunos componentes……..35

3.1 Introducción……... 35

3.2 Cálculo de cargas aerodinámicas en el rotor del aerogenerador……35

3.3 Cálculo de resistencia del árbol del generador…….. 37

3.4 Análisis de los cojinetes de rodamiento del generador……..47
3.5 Cálculo de las uniones roscadas…….50
3.5.1 Unión 1…… 50
3.5.2 Unión 2…… 52
3.5.3 Unión 3…… 53
3.6 Conclusiones parciales……...55
Conclusiones Generales.....56
Recomendaciones……... 57
Bibliografía……58
Anexos……61

Capítulo # 1: Análisis teórico sobre pequeños aerogeneradores.

1.1-*Introducción.*

En este Capítulo se resumen una serie de informaciones teóricas necesarias para el completamiento, construcción e instalación del aerogenerador donado por CUBASOLAR al Centro de Estudio de Termoenergética Azucarera (CETA) de la Facultad de Ingeniería Mecánica. Se realiza la descripción de la fuente de energía utilizada (el viento), una de las fuentes renovables de energía más importante de nuestro planeta. También se abordan las diferentes formas de captar el viento por un rotor y los pasos para el dimencionamiento del mismo. Además se hace referencia a los diferentes sistemas de orientación y regulación que junto al rotor constituye una de las partes más importantes de los aerogeneradores.

1.2 – *Descripción de la fuente de energía utilizada (El viento).*

Sólo un 2 % de la energía solar que llega a la Tierra se convierte en energía eólica y por diversos motivos, sólo una pequeña parte de esta energía es aprovechable. A pesar de ello, se ha calculado que el potencial energético de esta fuente es unas 20 veces el actual consumo mundial de energía, lo que hace de la energía eólica una de las fuentes de energía renovables de primera magnitud.

La atmósfera, constituida esencialmente por oxígeno, nitrógeno y vapor de agua, se caracteriza por su presión, su temperatura y su humedad, las cuales varían con la altura. Debido a que la tierra es redonda, la radiación solar incide de manera diferente en los polos que en el ecuador. La energía absorbida en el ecuador es mayor que la absorbida en los polos. Estas variaciones de temperatura, ocasionan cambios en la densidad de las masas de aire, provocando que se desplacen en diferentes latitudes. Estas traslaciones se realizan desde las zonas en que la densidad del aire (presión atmosférica) es alta en dirección hacia las de baja presión atmosférica.

Se establece así, cierto equilibrio por transferencia de energía hacia las zonas de temperaturas extremas, sin lo cual serían inhabitables. Existen otros desplazamientos que se ejercen perpendicularmente a la dirección del movimiento de las masas de aire, hacia la derecha en el hemisferio norte, y hacia la izquierda en el hemisferio sur.

Estas leyes definen los movimientos generales del desplazamiento de masas de aire, es decir, del viento. Se puede prever la dirección de los vientos dominantes en la mayor parte de las zonas del globo terrestre con cierta seguridad (figura 1.1).

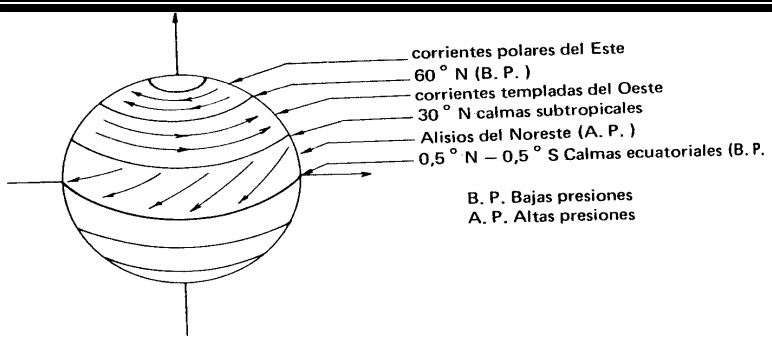


Figura 1.1- Circulación general de los vientos medios a nivel del suelo y en el hemisferio norte.

Sin embargo, estas direcciones, están frecuentemente perturbadas por:

- Las tormentas que desvían la dirección dominante, como se hace patente en registros.
- Los obstáculos naturales, bosques, cañadas, depresiones, etc. Estos obstáculos modifican la circulación de las masas de aire en dirección y velocidad.
- Las depresiones ciclónicas que pueden desplazarse en cualquier dirección, pero de hecho, tienen ciertas direcciones establecidas, superponiéndose al sistema general de presión atmosférica.

El viento se caracteriza por dos grandes variables respecto al tiempo: la velocidad y la dirección. La velocidad incide más directamente que la dirección en el rendimiento de la estación.

Los Fenómenos instantáneos (ráfagas) son difíciles de caracterizar; para tener una idea aproximada de estas variaciones, son necesarios registros meteorológicos de vientos periódicos, de aproximadamente 20 años atrás.

Los cambios diarios se deben a los fenómenos térmicos producidos por la radiación solar. Las variaciones de temperatura con la altitud crean corrientes ascendentes. La velocidad media del viento es más débil por la noche, con pocas variaciones. Aumenta a partir de la salida del sol y alcanza su máximo entre las 12 PM y las 16 PM.

Los fenómenos o variaciones mensuales dependen esencialmente del lugar geográfico y sólo las estadísticas meteorológicas pueden predecir estas variaciones.

Los fenómenos o variaciones anuales se realizan de forma periódica, con buena precisión en los datos, de modo que de un año a otro, es posible hacer una buena evaluación de la energía eólica recuperable en un lugar determinado.

La correcta utilización de la energía eólica requiere una elección muy razonada del lugar en función de las velocidades medias del viento, de las ráfagas, de las direcciones y de los obstáculos. Ahora bien, en el caso de utilización de aerogeneradores de pequeña y mediana potencia, el lugar suele venir impuesto por el problema. Dentro de la poca libertad dejada en la implantación de aeromotores pequeños en un sitio, la toma en consideración de todos los elementos (obstáculos, altura de la torre soporte) será determinante para el buen funcionamiento de la estación. [23]

El viento, debido a su origen, presenta una gran variabilidad, tanto en dirección como en intensidad de un lugar a otro. Su caracterización desde el punto de vista energético es de gran importancia para determinar:

- El potencial disponible y con ello permitir deducir la rentabilidad económica de la instalación.
- El emplazamiento más adecuado.
- Las cargas sobre el sistema, que permita el dimensionado idóneo.
- La estrategia operativa de arranque, parada, regulación, orientación al viento, etc.
- La vida útil del sistema por el efecto de la turbulencia, ráfagas, tormentas, etc.
- El comportamiento energético de la explotación eólica.

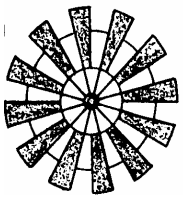
1.3 – *Clasificación de los aerogeneradores por la forma de captación del viento.*

Los aerogeneradores por la forma de captación del viento por el rotor se definen en general, según la posición de su eje de rotación, con relación a la dirección del viento. Así se dividen en:

1. Aerogeneradores de eje horizontal.
   - Con el eje paralelo a la dirección del viento.
   - Con el eje perpendicular a la dirección del viento.
2. Aerogeneradores de eje vertical.
3. Aerogeneradores que utilizan el desplazamiento de un móvil (citados sólo como recuerdo).
4. Sistemas estáticos de recuperación de energía eólica.

❖ Los aerogeneradores de eje horizontal con el eje paralelo a la dirección del viento (Figura 1.2), en la actualidad son las máquinas más difundidas y con mayores rendimientos que las otras existentes. En este grupo se incluyen aquellas que tienen 1, 2, 3 o 4 palas, además de las típicas multipalas o (molino americano) para el bombeo de agua.

Entre estas máquinas se distinguen aquellas que tienen el rotor a barlovento (cara al viento) y con el rotor a sotavento (espalda al viento). [23]

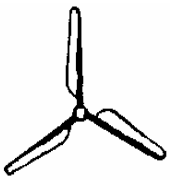


MULTIPALA DE VELOCIDAD LENTA

(a)

BIPALAS

(b)



TRIPALAS RAPIDOS

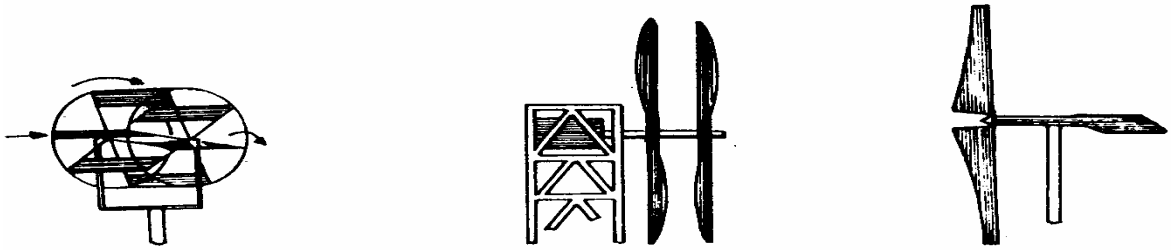
(c)

"BARLOVENTO" "SOTAVENTO"

(d) (e)

Figura 1.2 - Aerogeneradores de eje horizontal con el eje paralelo a la dirección del viento. [23]

❖ Los aerogeneradores de eje horizontal con el eje perpendicular a la dirección del viento más significativos son, el de perfil oscilante y el sistema de captación con palas batientes. (Figura 1.3) Estos sistemas se han estudiado ampliamente; también se construyeron prototipos, pero presentan más inconvenientes que ventajas; en especial necesitan sistemas de orientación igual a los de eje horizontal paralelo al viento. La recuperación de energía es generalmente complicada y no poseen un buen rendimiento. Por lo que no constituye un buen sistema a utilizar.



PALAS BATIENTES DOBLE ROTOR PALAS DE LONA

(a) A CONTRAROTACION (NOAH) (c)

(b)

Figura 1.3 - Aerogeneradores de eje horizontal con el eje perpendicular a la dirección del viento. [18]

❖ Los aeromotores de eje vertical son, presumiblemente (Figura 1.4), las primeras máquinas que se utilizaron para la captación de energía eólica, son conceptualmente más sencillas que las de eje horizontal; no necesitan de ningún sistema de orientación, lo que constituye una ventaja constructiva nada despreciable. En funcionamiento, las palas, los rodamientos y los ejes, no están sometidos a esfuerzos importantes por cambios de orientación, son de fácil construcción; sin embargo, tienen la gran desventaja de poseer un rendimiento mediocre (el rotor Savonius alcanza un 20% del límite de Betz), es por ello que no se experimentó un gran desarrollo en estos equipos. [18]

- Existen 3 grandes familias de aeromotores de eje vertical:
  - Aeromotores derivados del rotor de Savonius:

    Esencialmente utilizan el arrastre diferencial creado por las palas, que pueden ser de diversas formas. El par de arrastre es elevado, pero la velocidad máxima es claramente inferior a la de los rotores de eje horizontal.
  - Aeromotores derivados del rotor Darrieus.(patentado en 1931):

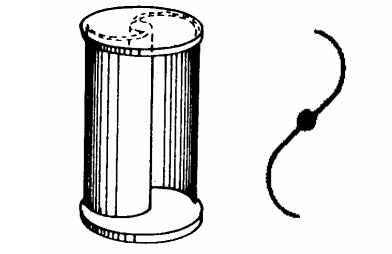
    Emplea la sustentación de las palas y están caracterizados por débil par de arranque y velocidad de rotación elevada que permite la recuperación de una gran potencia.

    Para mejorar el par de arranque se pueden acoplar otro tipo de rotor, haciéndolo mixto, por ejemplo: (Savonius-Darrieus), lo cual afectará seguramente otras propiedades, siendo necesario buscar las condiciones óptimas.

Estas máquinas de eje perpendicular son susceptibles de competir con los aerogeneradores rápidos, bipalas y tripalas de eje horizontal, que en la actualidad son objeto de estudio y desarrollo. [28]

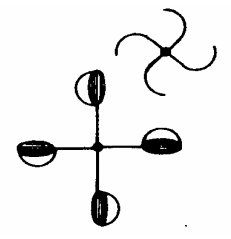
- Aeromotores derivados de las máquinas con palas batientes.

TIPO SAVONIUS



Rotor de SAVONIUS verdadero

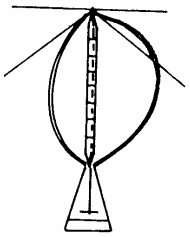
(a)



Molinete

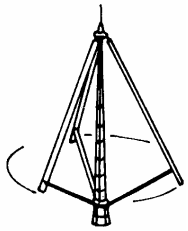
(b)

TIPO DARRIEUS



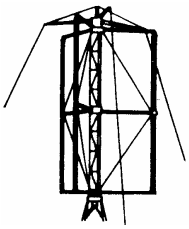
DARRIEUS circular

(c)



DARRIEUS delta

(d)



Giromil

(e)

Figura 1.4 - Aerogeneradores de eje vertical. [28]

1.4 – *Captación del viento por un rotor.*

1.4.1 Energía suministrada por el viento.

La energía que el viento proporciona está dada en forma de energía cinética, en función de la masa y de la velocidad de un determinado volumen de aire. Si se considera que la masa por unidad de volumen o densidad del aire es constante, se puede afirmar que la energía proporcionada por el viento está en función de su velocidad.

Para un equipo con una superficie S de captación, considerando que la velocidad del viento es constante en cualquier punto de la superficie S, la potencia disponible es:

$$P = \frac{1}{2} \cdot m_0 \cdot S \cdot V^3 \tag{1.1}$$

Donde:

P → potencia (w)

m_o → densidad del aire (kg/m^3)

S → superficie (m^2)

V → velocidad del viento (m/s)

Desgraciadamente, no se puede captar toda esta energía, ya que la velocidad del viento, una vez atravesada la superficie de captación, no es nula y el teorema de Betz demuestra que la máxima energía recuperable (solo en teoría) es igual a 16/27 (60%) de la energía total. Tomando como densidad del aire un valor medio de 1, 25 kg/m^3, la potencia máxima teóricamente recuperable por un aeromotor es:

$$p = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \cdot 1.25 \cdot S \cdot V^3 \tag{1.2}$$

Es, efectivamente, el *límite de Betz:* $P = 0.27 \cdot S \cdot V^3$ (1.3)

En el caso de un rotor, la superficie S es la barrida por las palas. Si el diámetro de las palas es D, el límite de Betz es:

$$P = 0.37 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D \cdot V^3$$
$$P = 0.29 \cdot D \cdot V^3 \tag{1.4}$$

Esta energía captada por el rotor del aeromotor y convertida en energía mecánica, se verá afectada por todos los rendimientos propios de las diferentes transformaciones. También el rendimiento de cada elemento depende de la velocidad del rotor. Ello implica que, fuera del régimen nominal, aún disminuya más el rendimiento global del sistema. Para los aerogeneradores clásicos, el rendimiento varía entre el 30 y el 50% del límite de Betz (en régimen nominal).

1.4.2 Acción del viento sobre las palas del aerogenerador.

Para el rotor de un aerogenerador cuyo eje de rotación es paralelo a la dirección del viento, la acción del mismo sobre cada pala crea una presión sobre la cara delantera de la pala (la expuesta al viento) y una depresión sobre la parte trasera. Sus fuerzas se suman y crean una fuerza resultante (R) perpendicular a la pala y su punto de aplicación es el centro aerodinámico. Esta fuerza resultante puede descomponerse en dos fuerzas: una llamada fuerza de sustentación (S) perpendicular a la dirección del viento y la otra fuerza de arrastre (A) en la misma dirección del viento. Las fuerzas de arrastre tienden a desplazar al rotor con un movimiento de traslación en la misma dirección del viento. Las fuerzas de sustentación crean un par motor que tiende a girar el rotor en un plano perpendicular a la dirección del viento.

Si se dejan libres las palas, bajo la acción de las fuerzas de sustentación, el rotor girará. Esto se modifica sensiblemente, ya que el viento que "ve" la pala será la composición de la acción real del viento y la acción del viento creado por el giro de las palas (U). Este viento resultante se denomina viento aparente o relativo (Vr) (Figura 1.5).

El viento creado por el movimiento de desplazamiento de las palas varía a lo largo de la misma, en todos sus puntos, proporcionalmente a su distancia al eje de rotación. Por otra parte, esta velocidad es proporcional a la velocidad de rotación.

Consideremos ahora un elemento de pala (una sección recta de la misma) en la cual la velocidad del viento debida al desplazamiento de las palas, pueda considerarse constante. El ángulo de ataque es siempre el formado por la pala y la dirección del viento aparente, y su notación es "α". Por tanto, varía a lo largo de toda la pala.

Igual que antes, la resultante de las fuerzas aplicadas a este elemento de pala es perpendicular a la pala y puede descomponerse en dos fuerzas, S y A:

S → fuerza de sustentación, perpendicular a la dirección del viento aparente.

A → fuerza de arrastre, de sentido igual al del viento aparente.

Se obtiene, por tanto, la representación que sigue a continuación, para el elemento de pala considerado, a la distancia r del eje de rotación (Figura 1.6).

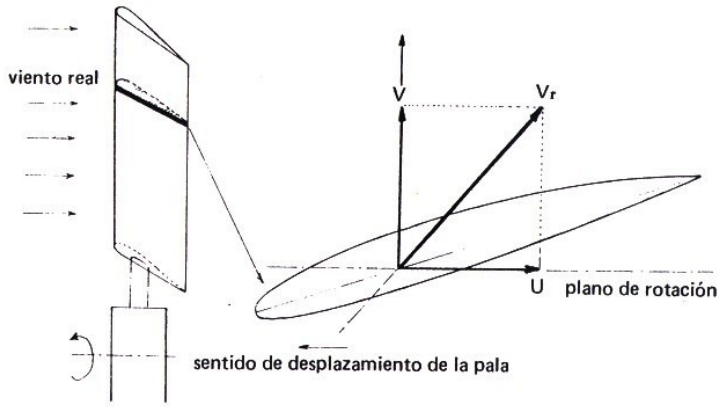


Figura 1.5 – Dirección de los vientos

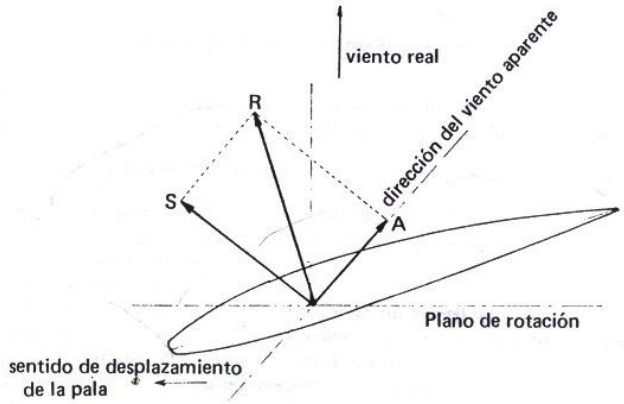


Figura 1.6 – Dirección de las fuerzas.

Pero lo que realmente interesa, son componentes útiles en el plano de rotación: (Fz) es la fuerza propulsora y (Fx) que es una fuerza inútil que tiende a desplazar al rotor en el sentido del viento. Calculando los valores de las fuerzas S y A, para cualquier punto M de la polar de un perfil y para un régimen dado de funcionamiento, se puede expresar Fz y Fx en función de los ángulos θ y α. El ángulo formado por la pala y el plano de rotación se denomina ángulo de calaje, y su notación es "θ".

Se puede demostrar que el rendimiento de un elemento de pala, que es igual a la relación entre la potencia recuperada y la potencia proporcionada por el viento, es función del ángulo de ataque "α". Existirá pues, para cada proporción elemental de la pala, un ángulo de ataque óptimo. Esto explica que para optimizar el rendimiento de una pala es necesario hacer variar el calaje a lo largo de la misma, es decir, hacer una pala con superficie alabeada.

1.5 – *Forma de dimensionar un rotor.*

El elemento fundamental en el rotor son las palas. Las palas son una parte importante del aerogenerador. De su naturaleza depende el buen funcionamiento y la duración de la vida de la máquina, así como su rendimiento. Hay muchos elementos que caracterizan estas palas:

- Longitud.
- Anchura.
- Perfil.
- Materiales.
- Número.

Entre estos elementos, algunos se determinan por la hipótesis de cálculo, potencia y par. Por orden de importancia son: longitud, perfil y anchura. Los otros se eligen en función de criterios tales como: costos, resistencia a las condiciones climáticas de trabajo, etc.

El diámetro del rotor se debe a la longitud de las palas que está en función de la potencia deseada. Al determinar este, se fija también la frecuencia de rotación máxima, que la hélice no deberá pasar para evitar las tensiones en la punta de las palas, debida a la fuerza centrífuga. Es de vital importancia analizar la fatiga y los riesgos de vibraciones, sobre todo para las palas muy largas.

Al analizar las velocidades máximas, la que se elija deberá tener en cuenta la relación entre la velocidad en la punta de la pala y la velocidad del viento real. Esta relación, determina el rendimiento de la hélice en relación al límite de Betz, según el tipo de máquina.

El perfil se elige en función del par deseado. Cuando ya se ha elegido el perfil y la velocidad de giro para la velocidad nominal del viento, se determina el calaje. Para la mayoría de los aerogeneradores de mediana y pequeña potencia las palas no están alabeadas, es decir, el ángulo de ataque solo es óptimo para una sección de la pala, situada entre la mitad y los dos tercios. Sin embargo, la mayoría de los aerogeneradores de más de 100 kW tienen las palas alabeadas.

Las características de los perfiles se determinan en los túneles aerodinámicos. Los datos de estos perfiles se encuentran en las literaturas especializadas. A cada perfil se le asocia generalmente el nombre del laboratorio y un número de referencia. Ejemplo: NACA 4412, Gottingen 548.

La anchura de las palas (longitud de la cuerda del perfil) no interviene en la potencia del aeromotor, que es función de la superficie barrida. La anchura interviene en el par de arranque que será mayor cuanto más ancha sea la pala, pero para obtener velocidades de rotación elevadas se prefieren las palas finas y ligeras. El resultado será pues un compromiso entre estos dos factores.

En contradicción a lo que se cree, no es la propia aerodinámica en donde está el problema, sino en la construcción y la resistencia de los materiales de las palas. En los aerogeneradores actuales, se analiza el método de construcción de las palas, para lograr aumentar la seguridad de su funcionamiento, manteniendo un precio que permita su comercialización.

Los materiales utilizados en las palas son esenciales tanto como el sistema de regulación, son los dos elementos básicos que definen la calidad del aerogenerador. El material de las palas debe responder a frecuencias elevadas de rotación y otras exigencias, a veces contradictorias. Deben ser:

- Ligero.
- Indeformable.
- Resistente a la fatiga mecánica (en particular a las tensiones alternas debidas al funcionamiento de los de los rotores y a las vibraciones).
- Resistente a la erosión y a la corrosión.
- Perfectamente homogéneo para facilitar la producción en serie.
- De uso y producción sencillos.
- Costo bastante bajo para que el aerogenerador se pueda construir y vender.

Actualmente se encuentran cuatro tipos de materiales para hacer las palas:

➢ La madera, que presenta ciertas ventajas: es sencilla, ligera, fácil de trabajar y resiste bien la fatiga. Pero a menudo le falta homogeneidad, se puede deformar y es sensible a la erosión. Estas variaciones de masa y estas deformaciones son el origen de vibraciones destructoras para los aeromotores. Para eliminar un poco estos inconvenientes se recurre a tratamiento o protecciones de la madera antes o después de hacer las palas:

- Chapas encoladas o chapas pegadas con baquelita.
- Protección contra la humedad por tratamiento hidrófugo.
- Protección del borde de ataque por un perfil pegado (o clavado).
- Protección total por un cubrimiento ligero.
- Por revestimiento sintético duro (resinas de poliéster).
- Por revestimiento de neopreno.

➢ El metal es otro de los materiales utilizados, fundamentalmente una aleación ligera con Silicio o con Manganesio. También se utiliza Aluminio moldeado, hilado o repujado, aunque hay que destacar que este resiste bastante mal la fatiga, lo cual limita su empleo. Existen otros materiales ligeros con propiedades mecánicas superiores, pero de elevado costo.

➢ Materiales sintéticos (resinas, fibras y otros). Existen aerogeneradores con palas plásticas con las siguientes características: poco peso, insensibilidad a la corrosión y buena resistencia a la fatiga. Pero presentan ciertos inconvenientes: costo elevado, falta de homogeneidad en la construcción; las características dimensionales pueden variar de una pala a la otra. También existen con palas de fibras de carbono, según la técnica utilizada en los helicópteros.

➢ Palas compuestas. Estas son una buena solución, en particular para los aerogeneradores de pequeña y mediana potencia. Ejemplo: Aleación ligera + espuma de poliuretano, aleación ligera + poliéster y fibra de vidrio, madera y poliéster, madera y metal, etc.

Las palas en los aerogeneradores son la parte que sin duda tiene que evolucionar más.

Selección del número de palas. Las turbinas eólicas pueden tener en el rotor diferente número de palas. La regla general, en principio, es: un menor número de palas en el rotor permite mayor velocidad de giro en el eje del mismo. La medida para esto es la denominada velocidad específica, cuyo valor resulta del cociente entre la velocidad tangencial de la punta de pala y la velocidad del viento, es decir:

$$\lambda = \frac{w \bullet R}{V_{\infty}} \tag{1.5}$$

En el diseño de turbinas eólicas para la generación de electricidad es aconsejable que el rotor gire al mayor número de revoluciones posible debido a la reducción en el tamaño, el peso del generador eléctrico y del sistema multiplicador, si éste fuera necesario, con el consiguiente abaratamiento de la máquina. Debido a la cinética misma de la hélice, se hace importante reducir al máximo las masas rotantes, y el peso de las palas es más que significativo. Además, una máquina comercial debe poseer un nivel de emisión de ruido reducido, por esto y teniendo en cuenta que esta emisión aumenta potencialmente con la velocidad en punta de pala, la velocidad de rotación y la de punta de pala no deben exceder cierto nivel. [34]

1.6 – *Sistema de orientación y regulación.*

Los aerogeneradores, para evitar su destrucción cuando los vientos son demasiado fuertes, requieren estar provistos de un sistema que permita disminuir las tensiones mecánicas en la hélice. Los sistemas pueden actuar de diferentes maneras, más o menos precisas y con un grado de automatismo nulo o integral. Además, los aerogeneradores de eje horizontal necesitan una orientación permanente de la máquina en una dirección paralela a la del viento, para disminuir los esfuerzos y las pérdidas de potencia. El sistema de orientación deberá cumplir con la condición necesaria de mantener el rotor cara al viento sin provocar grandes cambios de dirección del rotor cuando se produzcan cambios rápidos de la dirección del viento.

El sistema de orientación – regulación surge para evitar que la potencia captada por el aerogenerador alcance valores extremos y genere tensiones estructurales en el equipo mas allá de los límites tolerables, esto se logra limitando la velocidad de giro de la turbina. Si la fuerza centrífuga, que aumenta con el cuadrado de esta velocidad supera la resistencia de la raíz de la pala esta se desprenderá; aún si esto no llegara a suceder, podría ocasionar daños considerables. Otro momento crítico es durante las tormentas. El viento, que cambia de dirección con demasiada frecuencia, induce a la máquina a cambiar su orientación y la hélice girando a elevadas revoluciones, tiende por efecto giroscópico a mantener fijo su plano de rotación, aún cuando el eje de la hélice cambia de dirección. Este fenómeno produce una flexión tan importante en las palas

que puede hacer que éstas toquen la torre. [34] y es el mecanismo de orientación – regulación el encargado de minimizar estos problemas.

Los dispositivos de orientación del rotor más utilizados son:

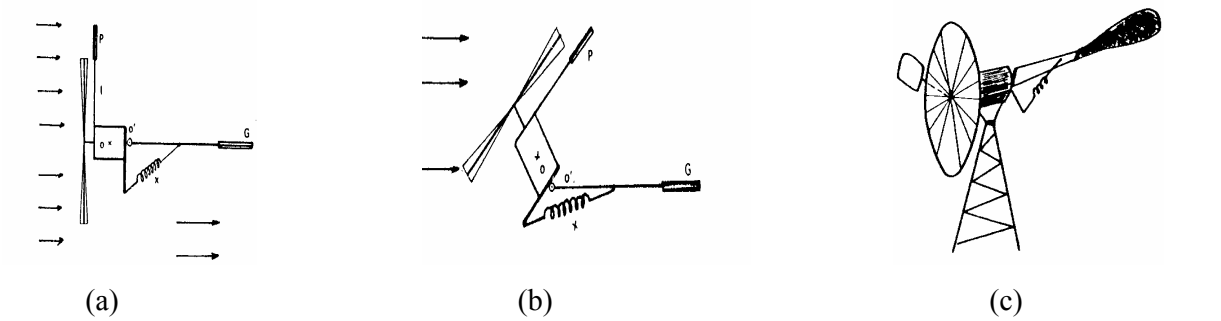
- Dispositivos de servomotores.
- Aleta estabilizadora.
- Freno aerodinámico centrífugo.
- Hélice auxiliar.
- Dispositivos manuales.
- El rotor orientado a sotavento.
- Ángulo de paso fijo y variación del área de captación.
- Ángulo de paso fijo y entrega en pérdida aerodinámica o "stall".
- Ángulo de paso variable o "pitch regulation".
- Regulación por momento de inercia. [18]

1.6.1 Dispositivos de servomotores.

Los Sistemas de Conversión de Energía Eólica (SCEE) a barlovento pueden ser regulados por sistema de orientación activos o pasivos. Un sistema de orientación activo contempla la utilización de servomecanismos que guían al rotor automáticamente hacia la dirección del viento mediante censores de dirección y accionamientos motorizados. Este mecanismo es utilizado en aerogeneradores de elevada potencia, ya que son mecanismos caros y que necesitan de espacio para su instalación. Cuentan con una hélice auxiliar, simple o doble, situada detrás de la hélice principal y perpendicular a ésta, que solo funciona cuando el viento no llega al aeromotor en la dirección perpendicular a la hélice principal. La hélice auxiliar gira hasta colocar al aerogenerador paralelo a la dirección del viento.

1.6.2 Aleta estabilizadora.

Este es un sistema de orientación pasivo en una turbina de rotor a barlovento, el cual puede asociarse a un resorte que ponga en funcionamiento (posición inicial) al aeromotor cuando la velocidad del viento este por debajo de la velocidad máxima que puede soportar el aeromotor, incluso su acción puede ser progresiva, en efecto el ángulo que forma el plano de la hélice con el viento depende de la presión sobre la pala y la velocidad de rotación disminuiría hasta cero cuando el ángulo pase de 90^0 a 0^0, ver la figura 1.7.



(a) (b) (c)

Figura 1.7 – Mecanismo de regulación con aletas estabilizadoras. [34]

Su desventaja principal es que poseen un alto "nerviosismo" bajo condiciones de viento por ráfagas, debiéndose implementar modificaciones al diseño de aleta fija para pasar a aletas con grados de libertad complicados y de difícil análisis. Asimismo, este nerviosismo que experimentan bajo condiciones complejas de operación constituye una causa frecuente de roturas no sólo en la aleta en sí y su soporte, sino también en las otras partes de la turbina. Además, estos mecanismos no deben utilizarse más que con los aeromotores cuya velocidad de giro no debe ser constante.

1.6.3 Freno aerodinámico centrífugo.

Los sistemas de regulación con freno aerodinámico centrífugo poseen las palas principales fijas (calaje constante). La regulación dispone de dos paletas P_1 y P_2, articuladas en O_1 y O_2 sobre un soporte perpendicular al eje de las palas principales. Las mismas tienen la parte delantera un poco más larga y pesada que la posterior. Se mantienen en la posición inicial mediante los tensores t_1 y t_2 y los muelles ajustados x_1 y x_2.

Hasta una velocidad de giro determinada Wo (es decir, la velocidad del viento correspondiente a V_0), las palas están en posición concéntrica. Actuando como un volante de inercia, tienden a mantener estable la velocidad de giro cuando la velocidad del viento varía durante breves momentos (pequeñas ráfagas).

Las palas que tienen un calaje fijo aumentan su velocidad de giro con el viento; cuando esta velocidad sobrepasa V_0 la velocidad de giro sobrepasa Wo, la fuerza centrífuga y la presión del aire sobre las paletas son preponderantes. Las paletas P_1 y P_2 giran alrededor de O_1 y O_2 y toman la posición correspondiente al frenado, ver la (figura 1.8)

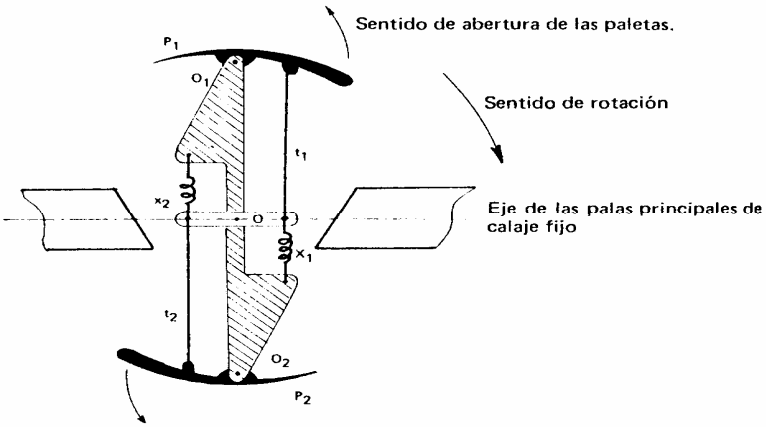


Figura 1.8 – Mecanismo de regulación con freno aerodinámico centrífugo.

Al disminuir la velocidad de giro y la fuerza de los muelles x_1 y x_2 vuelve a ser preponderante, volviendo las paletas a la posición inicial. Si la velocidad del viento aumenta y sobrepasa a V_0, el proceso se inicia nuevamente, aceleración, abertura, frenado, vuelta a la posición inicial, etcétera. Es este el inconveniente principal del sistema, puesto que para vientos continuos superiores a V_0 durante cierto período de tiempo, el sistema sufre fuertes vibraciones, lo cual contribuye a su destrucción y necesita un sistema de mantenimiento y chequeo muy riguroso.

Además, debe instalarse un freno para poder inmovilizar el aeromotor en casos necesarios por paradas de urgencia o temporales. [18]

1.6.4 Hélice auxiliar.

La orientación mediante la implementación de una hélice auxiliar constituye otro sistema pasivo a utilizarse, tanto en una disposición a barlovento como a sotavento. El principio de funcionamiento es el siguiente: se ubican una o dos hélices al costado de la principal, con su eje perpendicular al de esta. Si el rotor principal no está orientado en la dirección del viento, el auxiliar se pone en marcha accionando un tornillo sinfín, fijo a su eje, que engrana con una corona dentada concéntrica al eje vertical del soporte, solidario a éste. La ventaja de este sistema sobre la aleta estabilizadora es una mayor suavidad en su funcionamiento, aún bajo ráfagas, si se adopta una adecuada relación de transmisión entre el sinfín y la corona. Los inconvenientes que tienen son; la zona turbulenta que se origina al atravesar la corriente de aire las hélices auxiliares, que afectará en mayor o menor medida al perfil incidente de viento en el rotor principal y la introducción de elementos dentados en el sistema, cuyos costos de maquinado, lubricación, etc. incrementa el costo total, así como las paradas por mantenimiento, algo que se propone minimizar mediante este proyecto. [15]

1.6.5 Dispositivos manuales.

Es el método más simple, dado su simplicidad, no se considera necesario explicarlo. Es activado por un operador, cuando el viento alcanza una cierta fuerza.

1.6.6 El rotor orientado a sotavento.

Una turbina con rotor o hélice a sotavento no requiere, en principio, ningún dispositivo auxiliar de orientación si su diseño es correcto. El funcionamiento mismo de la hélice origina una fuerza en la dirección del viento, axial, que tiende a arrastrarla en el sentido del viento. Si el rotor se ubica detrás de la torre y permite el giro a su alrededor, el mismo se orientará automáticamente según la dirección del flujo aéreo. Básicamente éste es el principio del fenómeno de auto orientación de un rotor a sotavento. En contrapartida a tal beneficio, un rotor a sotavento posee un comportamiento dinámico frente a corrientes arrachadas similar a los que poseen aleta estabilizadora [34]

1.6.7 Ángulo de paso fijo y variación del área de captación.

Este sistema consiste en reducir el área de captación o área del rotor que se encuentra en posición perpendicular a la corriente de aire incidente cuando la velocidad supera cierto valor crítico. El sistema que detecta la energía en exceso y que actúa en la reducción del área de captación, lo forman el mismo rotor y su vinculación a la torre a través del nacelle.

Cuando el viento incide sobre el rotor se genera sobre éste una fuerza en la dirección y sentido de la corriente de aire. Si el eje del rotor, lugar donde se aplica esta fuerza, no pertenece al plano vertical que contiene al eje de la torre, donde gira el conjunto nacelle-rotor según la dirección del viento, se producirá un momento que desalineará al rotor respecto a la dirección del viento. Este giro es limitado mediante un resorte calibrado unido por un lado al rotor y por el otro a la estructura de la cola del molino, el cual regula que solamente cuando existan corrientes de aire a velocidades superiores a la nominal se presente la desalineación mencionada, llamándose este sistema "furling", figura 1.9. [34]

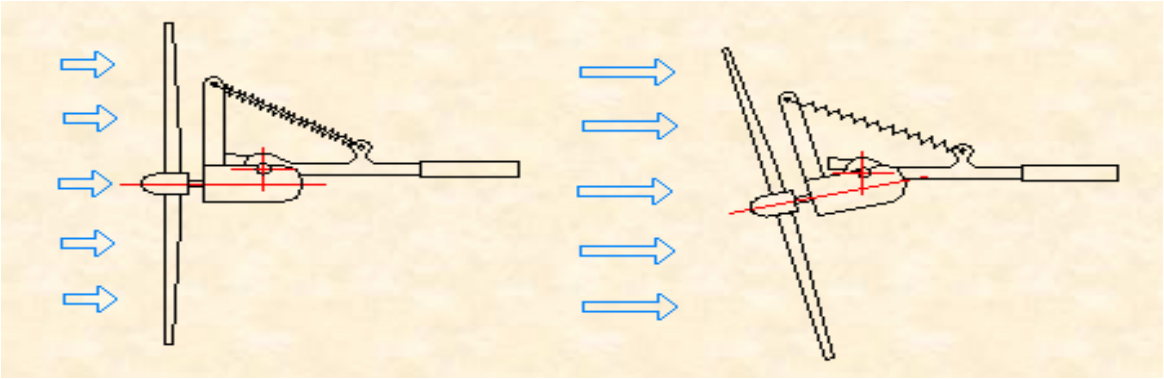


Figura 1.9 – Mecanismo de regulación con ángulo de paso fijo y variación del área de captación (furling)

Existen otros sistemas parecidos al "furling", con un principio de funcionamiento similar. Es utilizado corrientemente en equipos de hasta 5 kW. Figura 1.10.

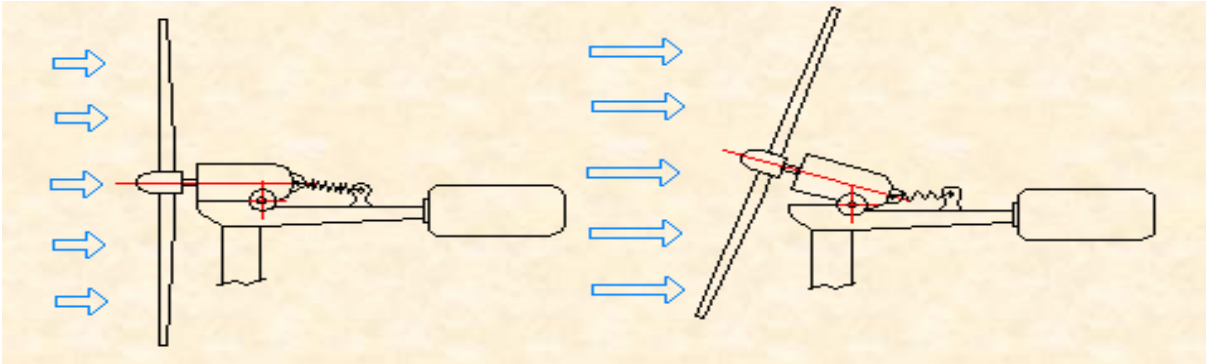


Figura 1.10 – Mecanismo de regulación con ángulo de paso fijo y variación del área de captación

En este tipo de mecanismo existe el inconveniente de presentar fuertes vibraciones, que inducen peligrosos esfuerzos de fatiga de naturaleza irregular en toda la estructura. Estas se deben a que el viento incidente no posee un comportamiento estable en el tiempo y por tanto las cargas sobre el rotor también serán irregulares; de este modo a velocidades cercanas a la crítica se sucederán situaciones de un equilibrio casi inestable, provocando oscilaciones desde la posición del eje del rotor, que golpean el tope del soporte. Se ha mejorado parcialmente este inconveniente introduciendo amortiguadores para esta oscilación con resultados no completamente satisfactorios para condiciones severas de viento [34].

1.6.8 Ángulo de paso fijo y entrega en pérdida aerodinámica o "stall".

Este mecanismo de control pasivo, reacciona con la velocidad del viento. Las palas son dimensionadas de manera que se obtenga un máximo rendimiento para condiciones nominales. Como las palas están fijas al cubo, para determinada velocidad de giro del rotor, al aumentar la velocidad del aire incidente se producirá un aumento en el ángulo de ataque efectivo entre la velocidad del aire relativa y el perfil de la pala. Por lo que para un determinado ángulo característico del perfil utilizado, se llegará a una situación en que la capa límite del perfil se desprende entrando en pérdida y perdiendo sus propiedades de elevada sustentación y baja resistencia aerodinámica. Así, disminuye drásticamente el rendimiento y la energía captada por la pala.

Se debe mencionar que los ángulos de torsión en la pala a través de sus radio se determinan en tal forma, que las diferentes secciones no entren en pérdida simultáneamente, ya que de lo contrario

sus efectos serían demasiado abruptos, con esta distribución se provoca, que superada la velocidad crítica una separación de la capa limite ocurre de forma paulatina a lo largo del eje de la pala.

Se puede esquematizar parte de lo explicado mediante la (figura 1.11)

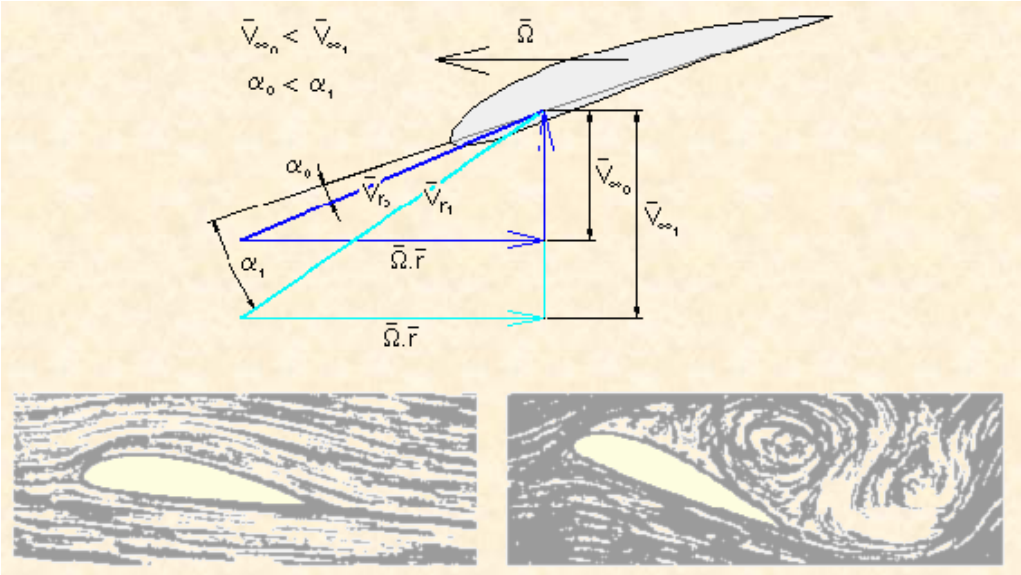


Figura 1.11 – Mecanismo de regulación con ángulo de paso fijo y entrega en perdida aerodinámica o "stall".

Entre las ventajas principales de este sistema se pueden mencionar:

- Ausencia de mecanismos de variación en el ángulo de paso de las palas.
- La estructura del cubo resulta mucho más simple.
- Menor mantenimiento debido a menos partes móviles.

En contrapartida, los sistemas stall representan un complejo problema aerodinámico de difícil solución, las cargas, entrado el perfil en pérdida producen un estado vibratorio peligroso para la estructura de la turbina. [18]

1.6.9 Ángulo de paso variable o "pitch regulation".

Este sistema a diferencia del stall, es un sistema de mando activo que normalmente necesita una señal de entrada de la energía captada. Se toma, por ejemplo, la velocidad de giro en el eje del rotor como variable de entrada.

La forma para limitar la potencia en este sistema es la siguiente: siempre y cuando las r.p.m nominales sean superadas debido al incremento en la velocidad del viento incidente, el sistema hace girar la pala en torno a su eje longitudinal con el fin de disminuir su ángulo de ataque, en todas sus secciones, y reducir el rendimiento aerodinámico del perfil, reduciendo en esta forma la extracción

de energía del viento. Contrariamente, al reducirse la velocidad de giro se incrementa nuevamente el ángulo de paso para lograr mayor captación energética.

Para un rotor con palas diseñadas con una geometría y ángulo de ataque para unas determinadas condiciones de velocidad nominal incidente del aire y de velocidad de giro del rotor, las palas extraen la mayor cantidad de energía posible. Si la velocidad del aire varía, el sistema de paso variable, actuará respecto al ángulo de ataque para lograr optimizar la captación de la energía.

Se pueden citar como ventajas de este sistema:

- Permite el control de la potencia activa bajo todas las condiciones de viento.
- Óptima prestación aerodinámica del rotor.
- Arranque de la máquina a bajas velocidades de viento ajustando el ángulo a un valor adecuado.
- No necesita de fuertes frenos mecánicos para detener el rotor en caso de emergencia posicionando la palas en bandera.
- Disminución y uniformidad de las cargas sobre las palas para elevadas velocidades de viento.

En contrapartida puede citarse la inclusión de un sistema como éste, que generalmente no es sencillo y requiere un delicado diseño de ingeniería en el cubo del rotor, aumentando las partes mecánicas, lo cual incrementa el costo de la turbina, aunque este aspecto debería ser analizado tomando en cuenta el mayor rendimiento alcanzado.

1.6.10 Regulación por momento de inercia en la cola.

Este sistema para aerogeneradores de baja potencia (< 10 kW) realiza las dos funciones: orientación del aerogenerador, para lo cual deberá cumplir las condiciones necesarias de mantener el rotor de cara al viento sin provocar grandes cambios de posición cuando se produzcan variaciones en la dirección del viento y deberá actuar también como mecanismo en la regulación del aerogenerador cuando el viento aumente su velocidad por encima de los valores de diseño para la máquina.

En otros sistemas analizados, uno de los métodos para controlar la velocidad del rotor consiste en desviar la máquina de la acción directa del viento y para esto Piggot [39] propone, que se logre localizando el eje de giro del aerogenerador en una posición excéntrica con respecto al eje de giro del rotor, planteando que el momento de inercia de la cola (peso de la cola multiplicado por la distancia de su centro de gravedad a la raíz) es lo que gobernaría el mecanismo de orientación. Hugh plantea que el momento de inercia hace que la cola provoque una fuerza tal que saque suavemente al aerogenerador del viento, pero no totalmente, sino tratando de mantener una inclinación que posibilite el giro del rotor a la velocidad de diseño, controlando así el

aerogenerador. Esto se puede lograr montando la cola en una bisagra inclinada, provocando que con vientos menores de los que fue diseñada se mantenga en una posición frente al viento y para vientos fuertes la cola se levante moviendo al mismo tiempo el rotor.

Este sistema tiene características que lo diferencian de los antes mencionados, haciéndolo más fiable durante su explotación, ya que no necesita mecanismos con resorte o de engranajes que aumenten considerablemente los costos de fabricación por maquinado y lubricación, que incrementan el costo total, así como las paradas por mantenimiento.

La principal ventaja de este mecanismo consiste en que se logra un funcionamiento estable, la regulación sería de forma suave, logrando que cuando el molino alcance la potencia máxima de diseño y el viento tenga una velocidad superior a la de diseño, la cola saque la hélice del viento sin que la potencia caiga abruptamente, en tal forma, el molino seguirá generando lo más cerca de la potencia máxima, pero sin que se destruya. Así se evita que la máquina caiga en un estado vibratorio peligroso para la estructura de la turbina. Otra ventaja es que este sistema no ocuparía espacio alguno para su implementación, ya que formar parte de la cola.

Este sistema tiene el inconveniente de ser un sistema complicado, según refieren especialistas en el tema como Teodoro Sánchez de Perú [45] y Hugh Piggot de Escocia [38], ya que dependen de coeficientes de rugosidad, momentos y productos de inercia que se originan durante el funcionamiento del aerogenerador. Esto hace que los cálculos sean sumamente engorrosos, y provoca la necesidad de realizar pruebas de campo por el método de tanteo y error. Sin embargo, estas pruebas y cálculos no son tan complicados como los necesarios en los sistemas stall.

1.7 – *Conclusiones parciales:*

1. Con el estudio bibliográfico realizado es posible diseñar el rotor de un aerogenerador de pequeña potencia como el requerido para el aerogenerador donado por CUBASOLAR.
2. Es necesario diseñar el sistema de regulación por momento de inercia con la capacidad de cambiar sus dimensiones para comprobar los datos aportados por los expertos expuestos en la bibliografía.
3. El uso de la energía del viento en Cuba ha sido limitada al bombeo de agua, y es siendo posible su utilización para la generación de corriente eléctrica.
4. En las condiciones actuales del mercado internacional, específicamente en cuanto al precio del petróleo, es necesario buscar el desarrollo de fuentes renovables de energía.

Capítulo # 2: Diseño de algunas parte para un aerogenerador de 1 kW.

2.1-*Introducción.*

Basándonos en el estudio de la bibliografía, realizado en el Capítulo 1, se brinda una breve descripción del aerogenerador de fabricación china con potencia eléctrica de 1 kW; el cual fue donado por la ONG CUBASOLAR a nuestra Centro de Investigaciones. Con vista a su instalación para luego realizar investigaciones sobre los sistemas de orientación usados en pequeños aerogeneradores y a la vez consumir la energía producida por este en las instalaciones de la Facultad de Ingeniaría Mecánica. Se diseña y construye el rotor de esta máquina teniendo en cuenta los datos de chapa del equipo así como en las recomendaciones de los especialistas en el tema y las posibilidades materiales financiaras con que se cuenta, para desarrollar el trabajo de instalación. También se realizó el diseño y construcción del sistema de orientación por momento de inercia en la cola, así como la adaptación para fijarlo al aerogenerador. Se diseña y construye la torre, la brida para la instalación de la aeroturbina en la misma, así como la base para su fijación.

2.2 – *Descripción del aerogenerador donado por CUBASOLAR.*

En el Centro de Estudio de Termoenergética Azucarera (CETA) se trabaja en el diseño de un pequeño aerogenerador de imanes permanentes de 2 kW de potencia. Además, existe una pequeña máquina donada por la empresa CUBASOLAR, la que requiere del completamíento de sus piezas para su instalación. Este aerogenerador cuenta con las siguientes partes: el generador, la carcaza, el cubo del rotor, un multiplicador de ruedas dentadas y el Yaw System.

El generador es un alternador trifásico de 12 V, que cuenta con los siguientes datos de chapa:

- Diámetro del rotor = 3.6 m.
- Potencia = 1 kW.
- Intensidad = 83.4 A.
- Velocidad del viento = 9.8 m/s.
- Peso = 52 kg.

El eje del generador se encuentra desfasado del eje de rotación del aerogenerador, como se observa en la (figura 2.1), lo cual permite que en el mismo sea posible la instalación del sistema de orientación por momento de inercia. Este se encuentra acoplado directamente al multiplicador en el cual se acopla el cubo del rotor.

El Multiplicador está compuesto por dos ruedas dentadas de dientes inclinados. La corona tiene 33 dientes y un diámetro exterior de 140 mm, el piñón tiene 11 dientes y el diámetro exterior de 54 mm, con una relación de transmisión igual a 3. En el árbol que sostiene la corona se fija el cubo del rotor por medio de una chaveta y una turca. Este árbol gira en dos cojinetes de bolas, un 108307K

con un diámetro interior = 35 mm y exterior = 80 mm, y un 180304K con diámetro interior = 20 mm y exterior = 52 mm.

El Yaw System cuenta con un colector que permite la rotación del generador 360°. Tiene un árbol donde se fija el generador y por dentro de este pasan los cables hacia el colector. Por el interior del árbol pasa también un tubo de pequeño diámetro, por el que pasa un cable de acero con el cual se accionaría la cola manualmente, con el objetivo de detener el aeromotor (puesta en bandera) en caso de mantenimiento o tormenta muy fuerte.

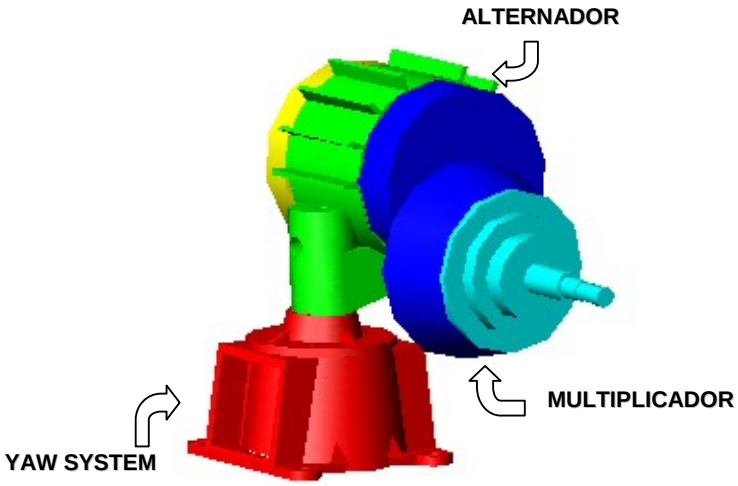


Figura 2.1- Aerogenerador donado por CUBASOLAR

2.3 – *Diseño del rotor del aerogenerador.*

Conocidas las piezas existentes del aerogenerador, comenzamos el diseño del rotor del mismo basándonos en las recomendaciones de la bibliografía estudiada, tomando en cuenta los datos de chapa del equipo, diámetro del rotor 3.6 m y haciendo uso del cubo del rotor con que contamos.

Para la construcción del rotor de nuestro aerogenerador se escogió un número de tres palas. Una de las razones principales para su utilización en la hélice es el momento debido a Coriolis constante, casi nulo, del rotor respecto a los movimientos operacionales alrededor del eje longitudinal de la torre. Todos los rotores con tres o más palas tienen esta favorable propiedad. Por consiguiente, no induce ninguna carga sobre la estructura debido a éste fenómeno, lo que deviene en una simplificación estructural y reducción en los costos de fabricación.

La característica fundamental de esta configuración es su mayor suavidad de funcionamiento. Otra de las causas de este menor estado vibratorio puede comprenderse a partir de la figura 2.2.

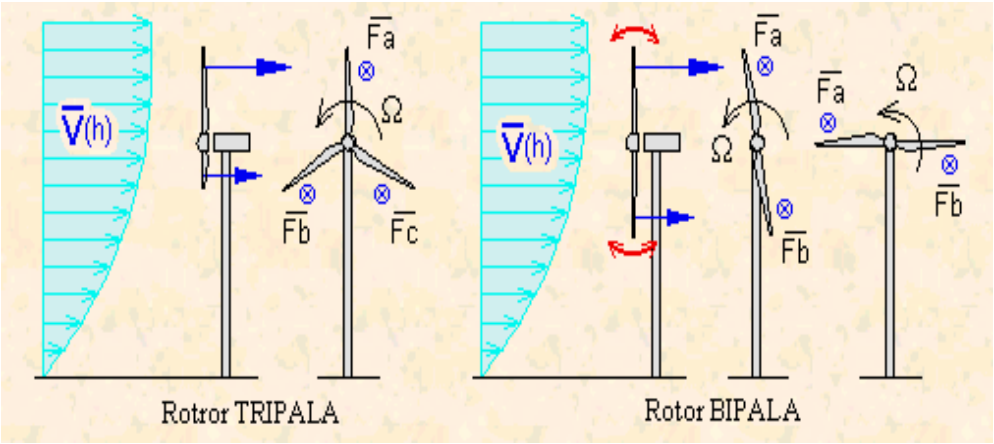


Figura 2.2: Fuerzas correspondientes para aerogeneradores de 2 y 3 palas.

Considerando un perfil de la capa límite atmosférica como el representado, vemos que la fuerza aerodinámica de empuje axial provocada por el viento es mayor sobre las palas que ocupan una posición superior respecto a las demás. En un rotor de tres palas, si bien estas fuerzas no quedan completamente equilibradas, la descompensación es bastante menor a la que se produce en uno de dos palas. Podemos considerar en el primero que Fa ≈ Fb + Fc para los 360º en el giro de la hélice, mientras que en el segundo, cuando esta ocupa una posición vertical Fa > Fb, mientras que al ocupar una posición horizontal Fa = Fb. Se originará así un fuerte estado vibratorio de frecuencia Ω/2, que puede aminorarse con el sistema de *teetering*, pero no completamente.

El rotor de tres palas, al ser sus velocidades de rotación relativamente bajas, lo son también las de punta de pala, constituyendo una gran ventaja respecto a las monopalas y bipalas debido a la reducción en el nivel de ruido que esto conlleva. Esta propiedad se ve potenciada, al utilizarse la turbina para el abastecimiento eléctrico de puntos aislados, donde generalmente la máquina se debe emplazar en las cercanías de la población y se debe minimizar la perturbación introducida en el hábitat natural. Asimismo, de manera diferente a las hélices mono y bipalas las de tres palas gozan de una gran aceptación pública en cuanto al impacto visual que ocasionan. [2]

El material seleccionado para la construcción de las palas fue la madera (cedro), siendo en nuestra condición barata y de fácil obtención. Después de un análisis y en correspondencia con el material que contábamos se seleccionó un perfil NACA 4415 uno de los propuestos para pequeños aerogeneradores. Además se decidió construir las palas alabeadas, para lograr así, una mayor eficiencia en la captación del viento. En la figura 2.3 se observa el rotor diseñado.

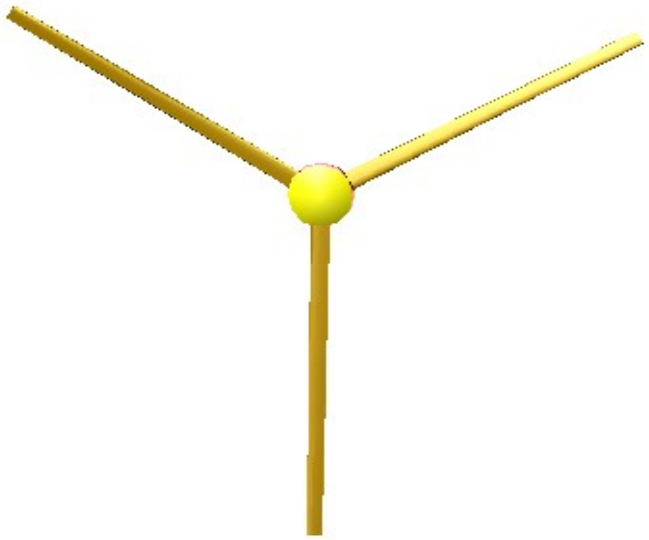


Figura 2.3: Rotor del aerogenerador.

Las palas tienen una longitud de 1635 mm y se construirán por secciones para hacerlo con mayor facilidad y para lograr que sean homogéneas. Esas secciones se unirán mediante una fina cabilla de acero y se pegarán con cola, así mismo se une la base al cubo de la pala. Estarán recubiertas con pintura con el objetivo de disminuir la erosión en las mismas. Las dimensiones se encuentran en la tabla 2.1 y en los planos de los anexos. El alabeado de las palas se logra basándonos en la teoría expuesta en [9] y haciendo uso de la formula:

$$\beta = ATAN \cdot \left(\frac{2 \cdot R}{3 \cdot r \cdot \lambda} \right) - \alpha$$

(2.1) donde:

β → es el ángulo de alabeo.

R → el radio del rotor.

r → distancia hasta la sección analizada.

λ → coeficiente que depende del número de palas (para tres palas λ = 5)

α → ángulo de ataque (se toma el valor de 5°).

Esta ecuación nos brinda la distribución siguiente:

Tabla 2.1: Secciones en que se dividió la pala.

# de secciones	Distancia en la pala (mm)	Ángulo de alabeo	Longitud de cuerda (mm)
base	0	11.91°	100
16	105	11.91°	98.34
15	207	11.91°	96.72
14	309	11.91°	95.13
13	411	11.91°	93.54
12	513	11.91°	91.95
11	615	11.91°	90.36
10	717	11.91°	88.72
9	819	9.9°	87.13
8	921	8.32°	85.63
7	1023	7.03°	84.09
6	1125	5.97°	82.56
5	1227	5.07°	81.03
4	1329	4.32°	79.52
3	1431	3.66°	78.01
2	1533	3.09°	76.51
punta	1635	2.59°	75

Dado que el tiempo de entrega de este trabajo no era suficiente, se valoró la posibilidad de utilizar las palas del rotor de cola de un helicóptero MI-24, donadas por las Fuerzas Armadas Revolucionaria (FAR), específicamente por la Base Aérea de la provincia de Villa Clara. Esta palas cumplen algunos parámetros geométricos, como es la longitud, pero son más anchas que las diseñadas anteriormente, lo cual aumentaría el par de arranque del aerogenerador disminuyendo la velocidad de giro del mismo.

En los helicópteros las palas, al igual que las alas fijas, son diseñadas en dos tipos: simétrico (con superficies idénticas en sus lados superior e inferior) y asimétrico (la superficie superior más redonda que la inferior). La cantidad neta de sustento producido por cada pala es la diferencia entre el sustento obtenido en la parte superior y la fuerza ascendiente ejercida en el lado inferior. El diseño simétrico de palas fue usado comúnmente en los helicópteros producidos hasta la década de 1960 por su excelente tasa de sustento-resistencia aerodinámica y por su costo de fabricación relativamente bajo. Aunque este diseño se encuentra hoy día todavía en algunos helicópteros, la

tendencia en la industria se ha movido a usar perfiles asimétricos desde la introducción de los modelos militares CH-47 y OH-58—esto debido a que producen más sustento, a que los problemas originales relativos a su punto de pérdida han sido mejorados substancialmente y a que la disponibilidad de nuevos materiales compuestos hacen su fabricación menos costosa. Dentro del tipo asimétrico varios fabricantes han producido una variedad de diseños.

El perfil de las palas opera bajo diferentes condiciones en diferentes regiones de su largor, por lo que la geometría de las palas difiere en varios puntos de su extensión para adaptarse óptimamente a las condiciones de vuelo y balancear la carga entre su raíz y su punta.

El ángulo en que las palas cortan el aire (ángulo de ataque) influye grandemente sobre la cantidad de sustento obtenido. Mientras más acentuado sea dicho ángulo más sustento se produce. Varios factores causan que el ángulo de ataque cambie; entre estos los ajustes realizados manualmente por el piloto o aquellos obtenidos automáticamente por el diseño del sistema de rotor. Sin embargo, en todo caso el ángulo de ataque de las palas cambia constantemente según éstas se mueven alrededor del disco del rotor.

Las palas del rotor de cola del helicóptero MI-24 son de un perfil asimétrico 23415, lo cual aumenta la fuerza de sustentación de las mismas, aspecto favorable para su instalación en el aerogenerador de nuestro trabajo. De esta forma se decidió utilizar estas palas para conformar el rotor del aerogenerador con un ángulo de calaje $\theta = 10°$, ángulo utilizado en las palas del rotor de cola de los helicópteros para los vuelos de iniciación y estacionarios [49], además, está en el rango calculado para la pala que diseñamos anteriormente. Este ángulo pudiera ser variado después de analizar el funcionamiento del aerogenerador.

2.4 – *Diseño del sistema de orientación-regulación por momento de inercia.*

A continuación se da una pequeña reseña sobre el diseño y la construcción del sistema de orientación por momento de inercia que nos ocupa en este trabajo.

Existen diferentes criterios para el diseño del sistema de orientación- regulación por momento de inercia. Según Teodoro Sánchez [45], si se trata de veleta de orientación solamente, ese no es ningún problema; su utilización bajo los estudios experimentales de los holandeses y de su grupo han demostrado buenos resultados con un área aproximada de 1/10 a 1/12 del área del rotor y a una distancia del eje de la torre de aproximadamente 2/3 del diámetro del rotor.

Pero si se trata de una veleta que debe servir como mecanismo de regulación de velocidad, ese es otro tema y se complica mucho ya que las ecuaciones de comportamiento son bastante complicadas y se llega a un punto donde hay dos o tres coeficientes que dependen de rugosidad, y otros

elementos que solo se pueden determinar experimentalmente. Los trabajos de laboratorio en este campo resultan difíciles porque estamos tratando con máquinas difíciles de introducir en laboratorios, y en el campo determinar estos coeficientes es realmente difícil. En estos momentos se fabrican aerogeneradores pequeños con la veleta descentrada con respecto al eje de la torre, pero no se poseen datos precisos. Se viene trabajando experimentalmente y en los casos donde no tienen la teoría completa se avanza sobre su comportamiento, conservadoramente.

Las relaciones dimensionales que nos brindan los aerogeneradores Berguey [11]; [30] están dadas por el uso de un solo tipo de control en su cola, la cual esta desfasada con respecto al eje del generador; el área aproximada de la veleta en la cola es 1/11 del área del rotor y una distancia del eje de la torre de 1/3 el diámetro del rotor. Esta configuración tiene más cosas en contra que a favor, ya que al colocar un contrapeso en el extremo de la hélice, se logra que la misma se flexione. Este mecanismo provoca cortes bruscos de la potencia en la generación cuando aumenta la velocidad del viento por encima de la velocidad de corte.

Existen en otros aerogeneradores donde la cola esta paralela al eje del generador pero desfasada 45^0 con respecto a este y las consecuencias son más o menos similares a los Berguey.

En el mecanismo que usaremos para nuestro aerogenerador, se trata de lograr que cuando el molino alcance la potencia máxima de diseño (aproximadamente a una velocidad del viento de 10 m/s), la cola ocupe una posición que permita sacar la hélice del viento sin que la potencia caiga abruptamente, cosa de que el molino siga generando cerca de la potencia máxima, pero sin que se destruya. Para lograrlo Piggot [39] propone la conjugación de dos ángulos, el primero en el pivote de la cola, desfasado 45^0 con respecto al eje del generador y el segundo es que el pivote de la cola presente un ángulo de inclinación con respecto ha la vertical entre los 20^0 a 27^0. Con esto se pretende que la curva de potencia del molino se mantenga casi lineal cuando comience a salir del viento (levantar la cola); luego cuando la velocidad del viento disminuye la cola cae suavemente permitiendo que el rotor se coloque de frente al viento, lo cual no sucede con la cola del Berguey que cae de forma violenta.

Para lograr las características antes mencionadas con este tipo de sistema de orientación se necesita que el eje del generador y el eje de giro del aerogenerador presenten un desfasaje. Se recomienda por Piggot [38] que sea mayor a un 3% del área barrida por el rotor, ya que si no la máquina empieza a hacer cosas raras tales como girar sobre su propio eje y no orientarse adecuadamente al viento, el material de la veleta de la cola no debe ser de aluminio ya que tiende a fatigarse, el área de la cola debe de estar comprendida entre 1/10 a 1/14 del área barrida por el rotor, la cola tiene una longitud global determinada por condiciones experimentales que se integrará por medio de su momento de inercia al control del aerogenerador. Este momento de inercia es el peso de la cola

multiplicado por la distancia de su centro de gravedad a la raíz y sugiere que se utilice el mismo momento de inercia +/- 10 %. La acción de este momento de inercia es el que permite que el aerogenerador cambie de posición durante los cambios de velocidad del viento.

Debido a la suavidad en su funcionamiento, a su simplicidad de construcción y que el aerogenerador con que contamos tiene el desfasaje entre el eje del generador y su eje de giro mencionado anteriormente, se diseñó y construyó el sistema de orientación por momento de inercia para el aerogenerador. Además, este diseño cuenta con la posibilidad de variar el rango del ángulo entre (20^0 a 27^0), así como, cambiar el área y la longitud de la cola con el fin de encontrar un funcionamiento óptimo. Como este equipo también tiene fines docentes, la posibilidad de variar dichos parámetros, permitiría realizar pruebas en la realización de diferentes laboratorios.

Para una mejor comprensión del mecanismo, este se muestra a continuación en la figura 2.4 y la figura 2.5.

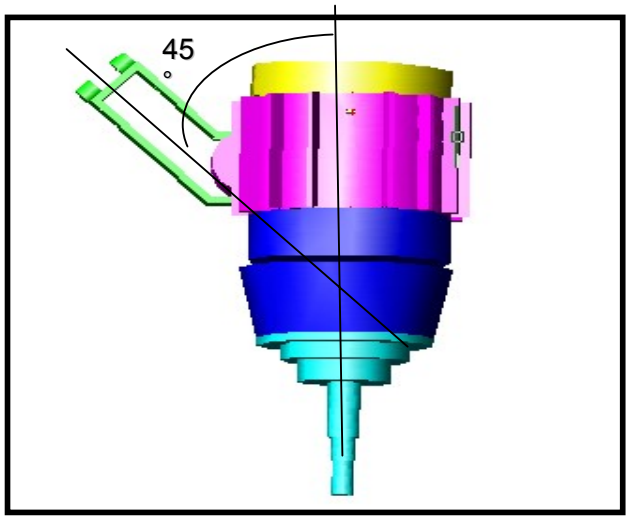


Figura 2.4: Ángulo de 45° respecto a la horizontal en el pivote de la cola

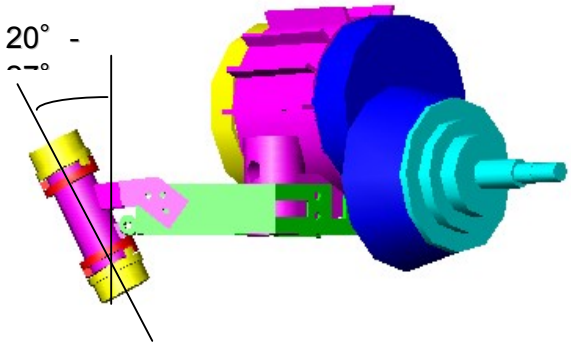


Figura 2.5: Ángulo respecto a la vertical en el pivote de la cola

Para el tubo de la cola se decidió utilizar tres longitudes que permiten que la misma se encuentre dentro del rango recomendado (2.4 m, 1.8m y 1.2 m). El tubo de la cola está unido al sistema por

tornillos con el objetivo de intercambiarlo, permitiendo así, variar la longitud de la misma. La veleta de la cola es de una plancha de acero con un espesor de 1.17 mm y está unida al tubo por tornillos con el mismo objetivo. También se seleccionaron tres áreas que se encuentran dentro del rango recomendado (1.018 m^2, 0.848 m^2 y 0.727 m^2). Para la construcción del sistema de orientación por momento de inercia y por razones de tiempo, se trabajó con un área de la veleta de 0.848 m^2 y a una longitud del eje de la torre de 1.8 m. Los planos de estos elementos se encuentran en los anexos.

2.5 – *Diseño y construcción de la torre.*

Después del diseñado y construcción del rotor y del sistema de orientación-regulación por momento de inercia, se realizó el diseño de la torre. Este pequeño aerogenerador será instalado en el techo de la Facultad de Ingeniería Mecánica con el objetivo de sobrepasar los obstáculos que ofrecen las distintas construcciones de la UCLV. Se decidió instalarlo allí porque alrededor de la Facultad de Ingeniería Mecánica no existe un emplazamiento mejor. Además, este equipo tiene como objetivo energizar parte del CETA y realizar en un futuro laboratorios docentes referidos a este tema.

La torre para nuestro aerogenerador se decidió que fuera abatible, un mástil tubular ligero, con tensores. Para su construcción se utilizó un tubo de 5 m de longitud con un diámetro exterior igual a 115 mm. Esta altura de la torre es más pequeña que las recomendadas, la razón es clara: la torre necesita ser lo suficientemente alta para evitar la zona del flujo del viento perturbado por los edificios, árboles y otras obstrucciones. Para evitar esta zona de turbulencia cerca del obstáculo, la misma debe alcanzar dos veces la altura del mismo, el aerogenerador deberá sobrepasar esta altura, Figura 2.6. La turbulencia es una ladrona de potencia, por tanto lo ideal es instalar la turbina eólica en una zona de flujo no perturbado, de la misma forma que para los paneles fotovoltaicos se busca el pleno sol [24]. En nuestro caso se utilizó la altura antes mencionada, debido a que era el material con que contábamos y además no era permitido instalar un equipo más alto.

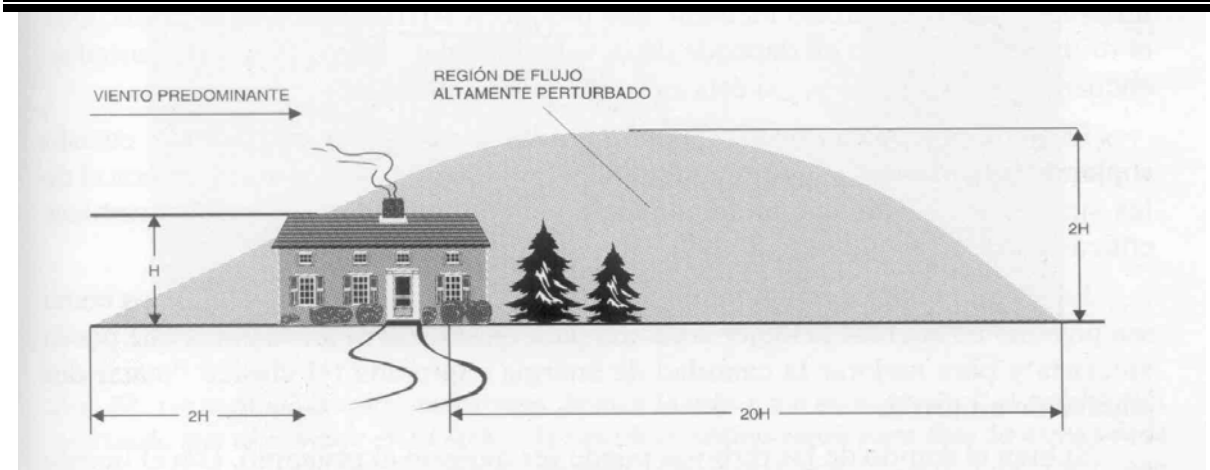


Figura 2.6: Zona de flujo turbulento creado por un obstáculo.

La torre cuenta con una brida elaborada de una plancha de 8 mm de espesor cuyas dimensiones se encuentra en los anexos. Esta se encuentra unida a la torre mediante soldadura y a ella se une el colector del aerogenerador mediante cuatro tornillos M16 x 2 y separado por un entredós, de 8 mm de espesor, por razones geométricas. La base de la torre es cuadrada, de una plancha de 8 mm de espesor y se une a la misma por soldadura. Esta se une a otra plancha por medio de cuatro tornillos M24 x 2 la que a su vez, se encuentra unida por cuatro tornillos M24 x 2 empotrados a una base de hormigón armado. La base de la torre cuenta con un sistema de pivote que facilita el izaje del aerogenerador; además, este sistema podrá ser utilizado para el arreado del aerogenerador en caso de roturas, mantenimiento o fuertes vientos. Los planos de estas piezas se los podrán encontrar en los anexos. También se diseñó y construyó un accesorio para facilitar el izaje del aerogenerador. Los cables eléctricos del aerogenerador pasan por dentro de la torre y entran y salen por unas aberturas que tiene la misma en la parte superior e inferior. El aerogenerador también se encuentra sujetado por cuatro vientos que se fijan a la losa del techo de la facultad.

2.6 – *Conclusiones parciales:*

1. Se diseñó el rotor del aerogenerador, con paletas alabeadas y usando un perfil NACA 4415, además se utilizó, para la construcción del rotor, las palas del rotor de cola de un helicóptero MI-24.
2. Se diseñó y construyó el sistema de orientación por momento de inercia en la cola para el aerogenerador de 1 kW.
3. Se diseñó y construyó la torre así como la base para la instalación del aerogenerador en la Facultad de Ingeniería Mecánica.

Capítulo 3: Cálculo de resistencia de algunos componentes.

3.1-*Introducción.*

El aerogenerador en su funcionamiento está sometido a diferentes cargas aerodinámicas, las cuales tienen un notable efecto en algunas de las piezas que conforman el equipo. En este capítulo se calculan las fuerzas y momentos que actúan sobre el rotor del aerogenerador para comprobar el árbol del generador y los rodamientos del mismo. Al ensamblar las piezas que conforman al aerogenerador, se emplean uniones roscadas con diferentes sistemas de cargas. Este tipo de unión permite un fácil montaje y desmontaje del equipo, además da la posibilidad de variar parámetros en la geometría de algunos elementos; se realizaran también, los cálculos de resistencia de las uniones más importantes, analizando su comportamiento ante las cargas a las que están sometidas.

3.2 – *Cálculo de cargas aerodinámicas en el rotor del aerogenerador.*

La acción del viento sobre las palas del rotor del aerogenerador como se expresó anteriormente se descompone en dos fuerzas fundamentales, la fuerza de sustentación y la de arrastre, estas actúan sobre el mismo acompañadas de efectos de inercia, el torque motor, la fuerza centrífuga y los pesos. Para determinar la influencia de las fuerzas y momentos, se toma un sistema ortogonal de coordenadas Figura 3.1, donde el plano x-y responde al plano del rotor y el eje z se encuentra ubicado sobre el árbol del aerogenerador.

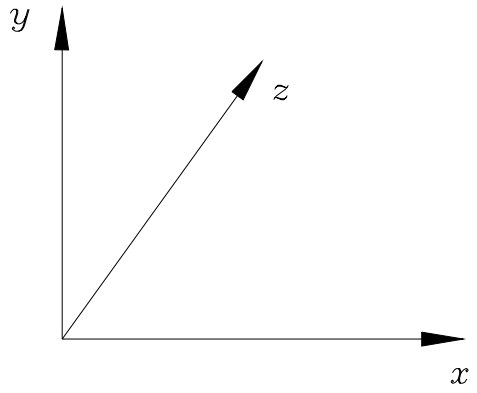


Figura 3.1: Sistema coordenado tomado para el análisis de las cargas sobre el rotor.

Para facilitar los cálculos y la seguridad de los resultados a través de la metodología propuesta en [12], el autor utiliza el tabulador Microsoft Excel. De esta forma se pueden determinar las fuerzas y momentos que actúan en cada eje coordenado. Para el trabajo con esta aplicación se necesitan una serie de datos para poder determinar las cargas aerodinámicas que están actuando sobre el rotor del aerogenerador. Los datos necesarios para el cálculo son:

Datos para el cálculo de las cargas aerodinámicas sobre el rotor	***Símbolo***	***Valor***
Radio del Rotor [m]	R_{rotor}	1.6
Velocidad [m/s]	V_1	10
Torque de freno [Nm]	T_b	0
Número de elementos en que dividirá la pala. [-]	N	5
Cantidad de palas. [-]	N_b	3
Tilt (Ángulo de inclinación del aerogenerador) [Grados]	υ	1
Angulo de inclinación de las palas. [Grados]	β_1	0
Posición de la pala. [Grados]	δ	60
Frecuencia de rotación. [rpm]	Frec.	300
Distancia entre la línea de centro de gravedad de la pala y el eje del aerogenerador. [m]	D	0.0015
Densidad del aire. [kg/m^3]	D_{aire}	1.1774
Densidad del material. [kg/m^3]	D_{mat}	1009.2
Velocidad de posicionamiento. [rad/s]	W_y	0.2
Cuerda interior. [m]	C_i	0.27
Cuerda exterior. [m]	C_e	0.27
Alfa para cada elemento i. (en función de Cl/Cd). [Grados]	α	2 - 6

Tabla 3.1: Datos necesarios para la determinación de las cargas sobre el rotor del aerogenerador.

Resultados del análisis de las cargas aerodinámicas que actúan sobre el rotor analizado aparecen en la tabla 3.2.

Fx=	-0.318	N
Fy=	-27.731	N
Fz=	7.319	N
Mx=	-0.0002225	Nm
My=	-0.000000354	Nm
Mz=	68.702	Nm

Tabla 3.2: Resultado de las cargas aerodinámicas que actúan sobre el rotor.

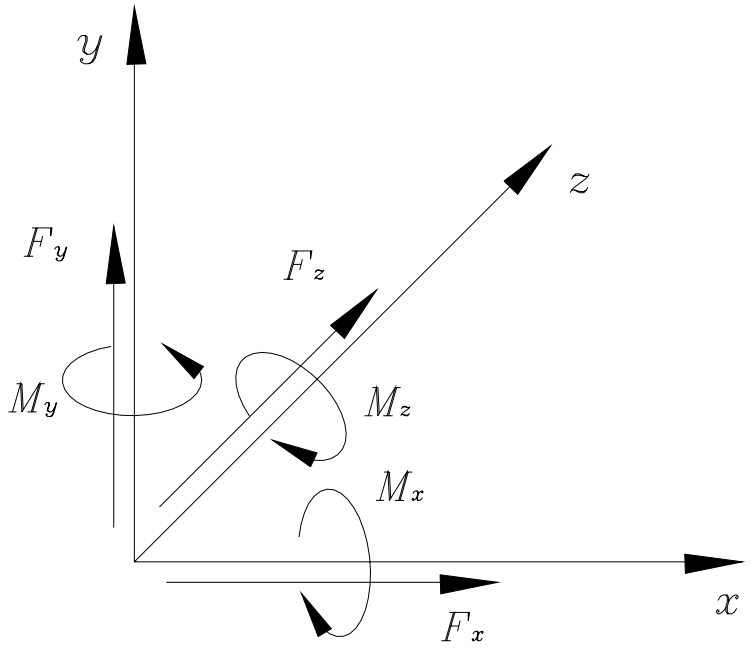


Figura 3.2 Representación de fuerzas y momentos que actúan sobre el rotor.

Con el resultado obtenido en el cálculo de las fuerzas y momentos que actúan sobre el rotor del aerogenerador, además del peso de cada elemento se efectúan los cálculos de resistencia de algunas de las piezas del equipo. Los pesos son los siguientes:

- Generador = 351 N.
- Rotor = 316.11 N.
- Cola = 108 N.
- Sistema de Orientación (Yaw System) = 102 N.
- Sistema de giro de la cola = 65 N.
- Soporte de la cola = 25 N.

3.3 – *Cálculo de resistencia del árbol del generador.*

Después de determinadas las fuerzas y momentos que actúan sobre el rotor del aerogenerador, se realizan los cálculos de resistencia del árbol que transmite el movimiento de rotación hasta el generador. Este árbol ya se encuentra diseñado y construido, siendo el propósito fundamental analizar su comportamiento para las condiciones de trabajo del aerogenerador. Las dimensiones necesarias para realizar los cálculos se encuentran en el plano del árbol que aparece en los anexos del trabajo. Apoyado en los conocimientos adquiridos en la asignatura Resistencia de los Materiales y las ventajas que ofrece el programa de computación AutoCAD Mechanical, se realizaron los cálculos de resistencia del mismo.

Inicialmente se determinan las fuerzas que surgen en la transmisión por engranajes de dientes inclinados que conforman al multiplicador. Como datos de la misma se toman:

Mt = 68.7 Nm.

De_2 = 140 mm.

Z_2 = 33 dientes.

Determinando:

$$de = (Z + 2) * m \tag{3.1}$$

$$m = \frac{de}{Z + 2} = \frac{140}{33 + 2}$$

$$m = 4mm$$

$$dp = Z * m \tag{3.2}$$

$$do = 33 * 4 = 132 \text{ mm}$$

$$Pc = \frac{Mt}{dp} \tag{3.3}$$

$$Pc = \frac{68.7 * 10^3}{132} = 520N$$

$$Pa = Pc * tg\gamma \tag{3.4}$$

$$Pa = 520 * tg45^0 = 520N$$

$$\Pr = Pc * tg20^0 \tag{3.5}$$

$$\Pr = 520 * tg20^0 = 189.26N$$

Figura 3.3: Representación de las fuerzas en la rueda dentada.

Ya determinadas todas las fuerzas a continuación aparecen los gráficos de momentos y los resultados de los cálculos que nos ofrece el AutoCAD Mechanical.

<u>Análisis del árbol en el plano x-z:</u>

Shoulder fillet
Safeties:
Fatigue failure 31.613
Yielding Point 64.802

Shoulder fillet
Safeties:
Fatigue failure 45448.618
Yielding Point 96485.346

Shoulder fillet
Safeties:
Fatigue failure 137464.2
Yielding Point 507564.3

520N

0.32N

A

⇨ 0 N
⇧ 371.46N

B

⇨ 0 N
⇧ 148.86N

Shoulder fillet
Safeties:
Fatigue failure 392.6
Yielding Point 864.864

Shoulder fillet
Safeties:
Fatigue failure 30.017
Yielding Point 107.458

Shoulder fillet
Safeties:
Fatigue failure 31.204
Yielding Point 118.837

Figura 3.4: Distribución de las fuerzas en el plano XZ y resultado de la fatiga en las diferentes secciones.

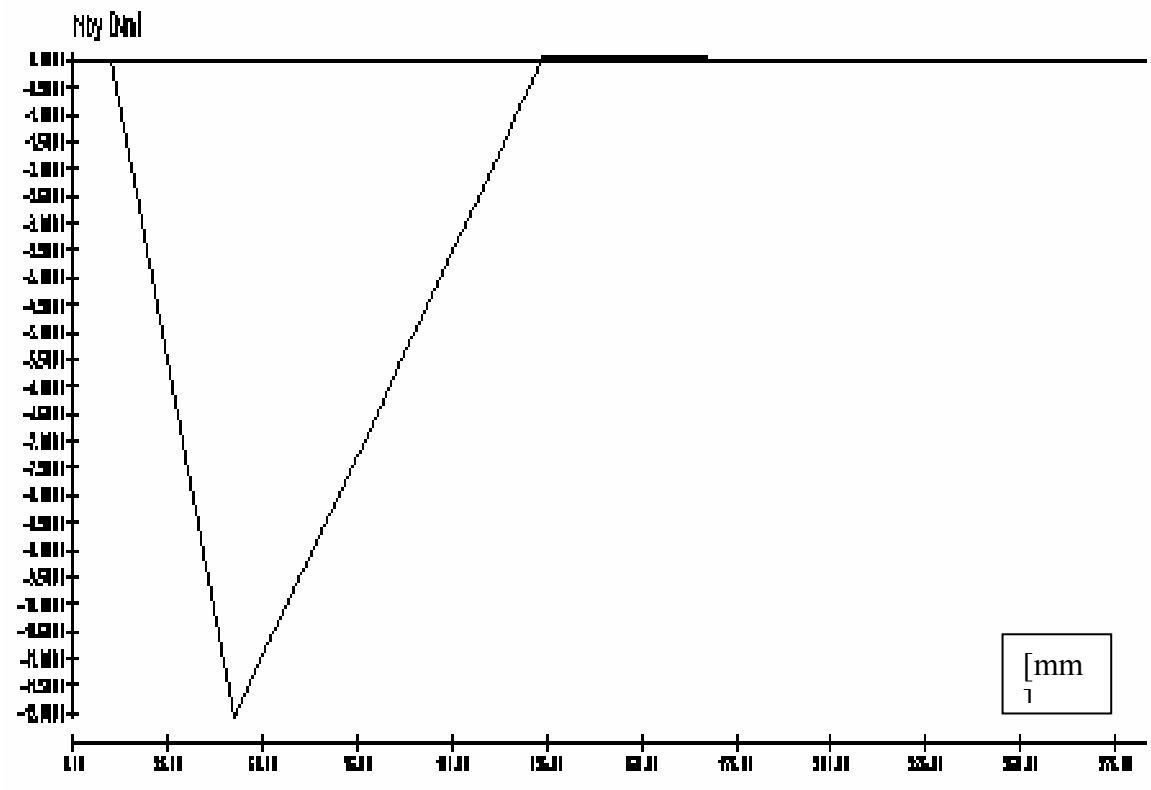


Figura 3.5: Gráfico de Momento Flector

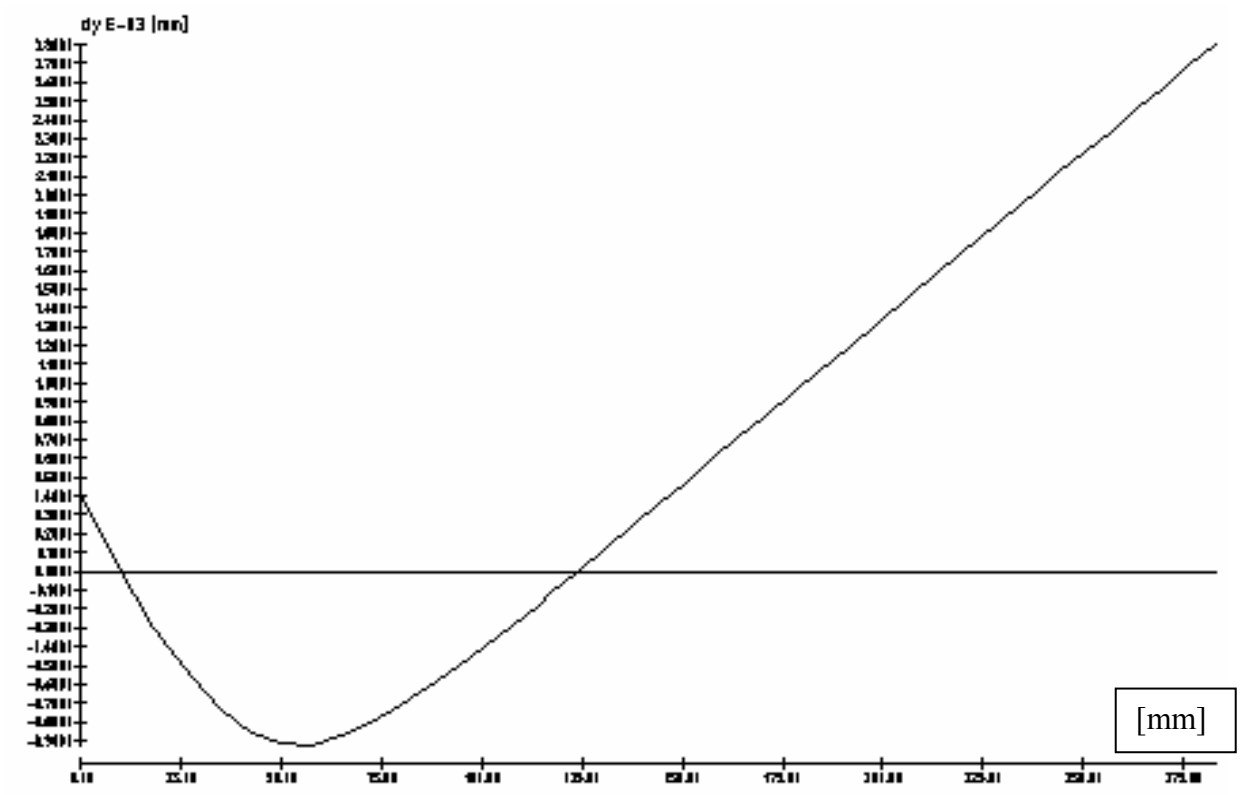


Figura 3.6: Gráfico de Deformación

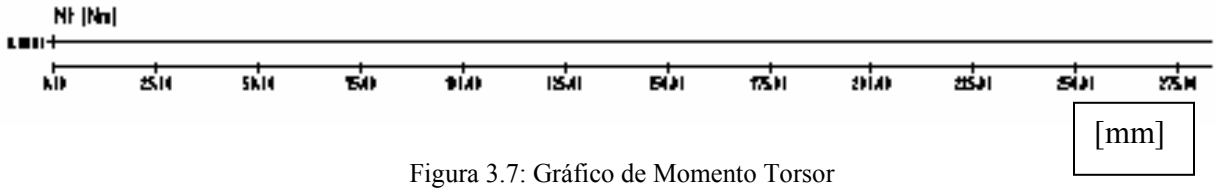


Figura 3.7: Gráfico de Momento Torsor

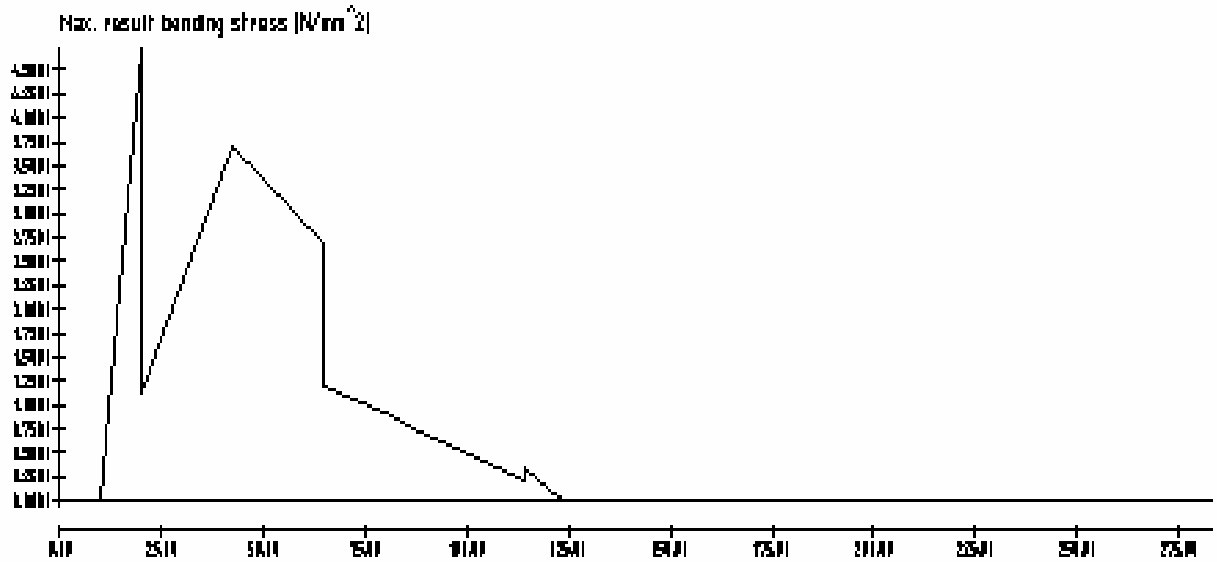


Figura 3.8: Gráfico de Tensiones producto de la Flexión

Tabla 3.3: Resultados del cálculo de resistencia en el plano XZ

Análisis del árbol en el plano y-z:

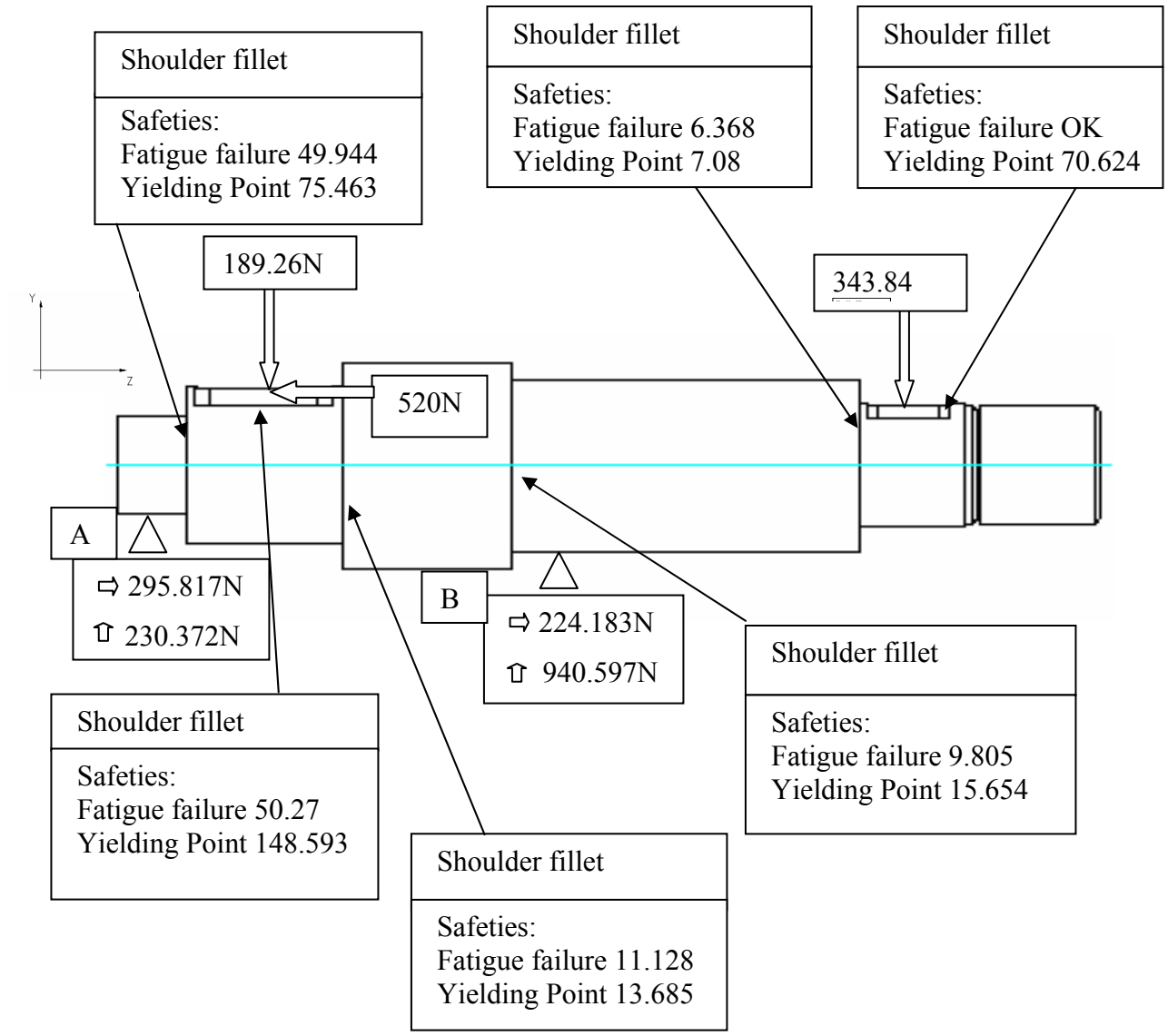


Figura 3.9: Distribución de las fuerzas en el plano YZ y resultado de la fatiga en las diferentes secciones.

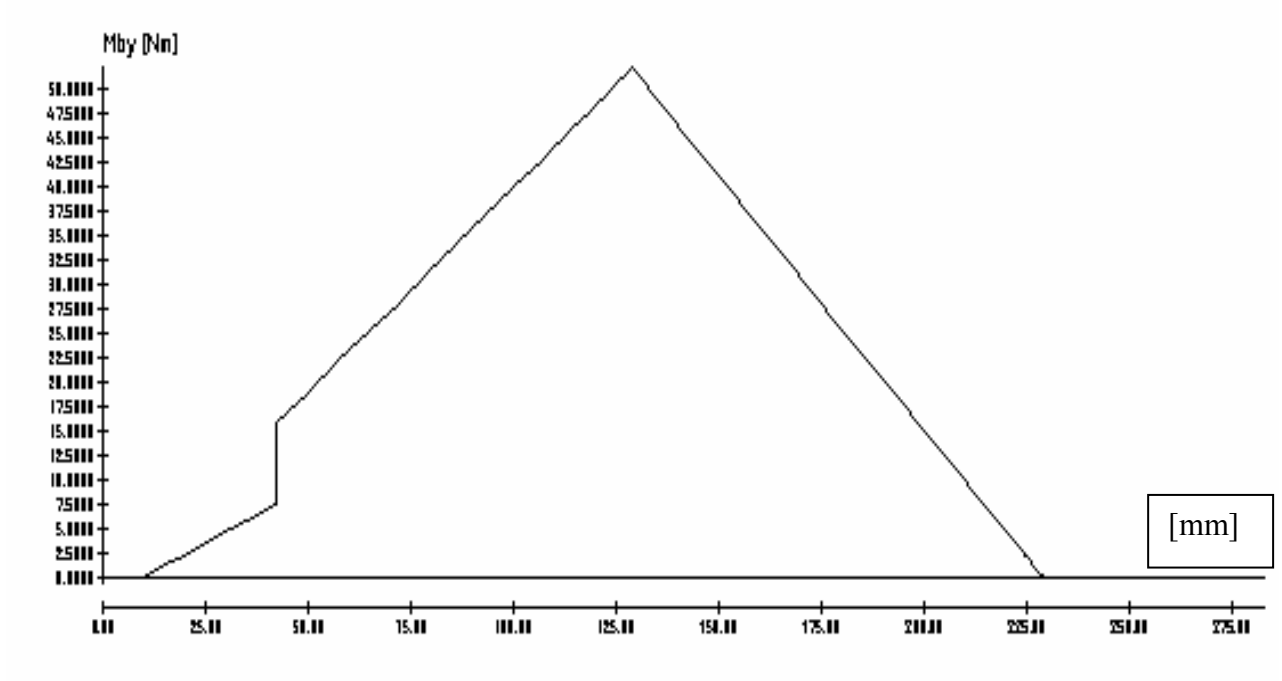


Figura 3.10: Gráfico de Momento Flector

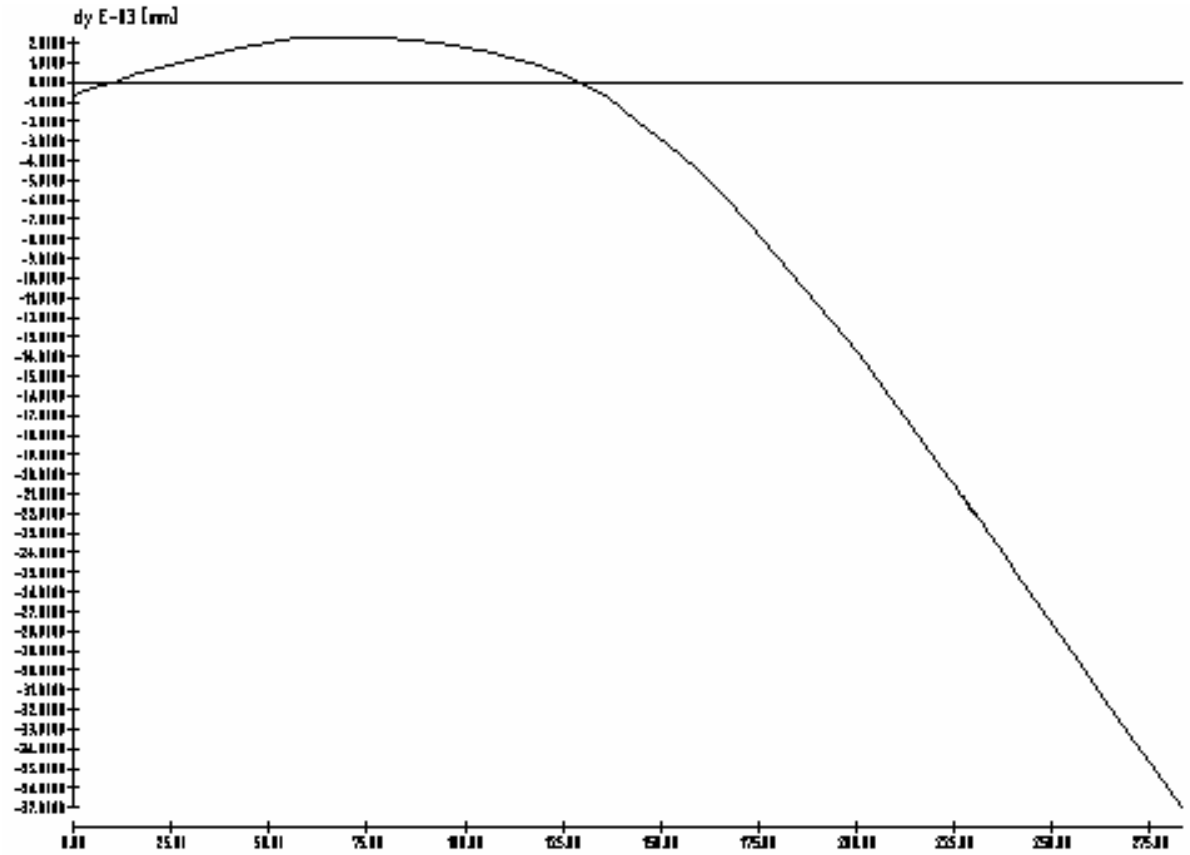


Figura 3.11: Gráfico de Deformación

[mm]

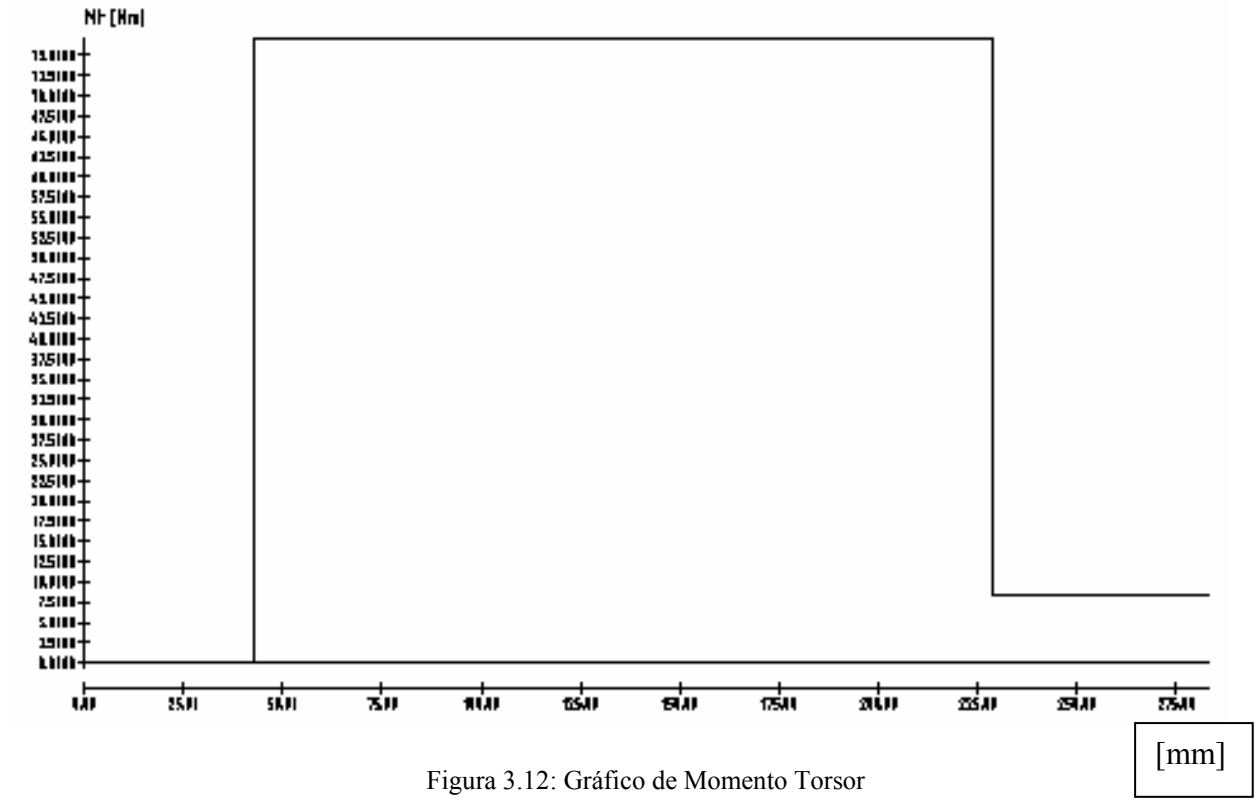


Figura 3.12: Gráfico de Momento Torsor

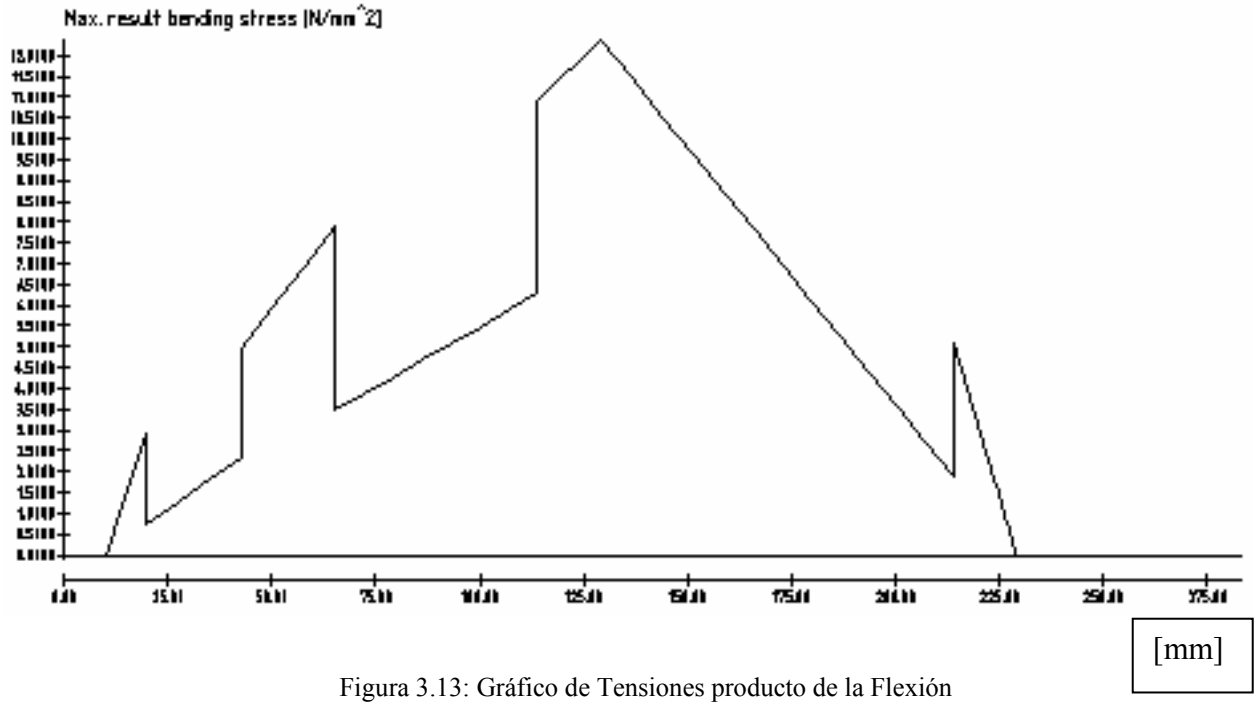


Figura 3.13: Gráfico de Tensiones producto de la Flexión

es		
	[N/mm^2]	276
	[N/mm^2]	206843
		Steel SAE 1025
ction	[mm]	37.0147 E-03
	[mm]	283.0
ng Moment	[Nm]	52.0973
	[mm]	129.0
ment	[Nm]	77.012
	[mm]	129.0
ation Angle	[deg]	92.4729 E-03
	[mm]	42.5
ess	[N/mm^2]	25.0667
	[mm]	223.7011
s	[N/mm^2]	941.6135 E-03
	[mm]	10.0
ding stress	[N/mm^2]	12.3769
	[mm]	129.0
stress	[N/mm^2]	43.7139
	[mm]	214.0
tresses are calculated without reflection of notches.		

Tabla 3.4: Resultados del cálculo de resistencia en el plano yz

Después de realizar los cálculos se puede apreciar que el árbol no presenta fallo a la fatiga en ninguna de las secciones analizadas, ya que el valor del coeficiente de seguridad que resulta está bastante alejado de 1. Para analizar el cálculo de comprobación a la resistencia con la siguiente ecuación se determina la tensión permisible:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_y}{n} \tag{3.6}$$

Donde:

[σ]------- es tensión permisible.

σ_y ------- tensión de fluencia.

n -------- factor de seguridad

$$[\sigma] = \frac{276}{2} = 138\,\text{MPa}$$

y valorando la condición de resistencia:

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma] \tag{3.7}$$

4.7296 MPa < 138 MPa

Se llegó a la conclusión de que el árbol resiste.

Analizado el plano y-z se observa que el árbol no presenta problemas de fatiga en ninguna de las secciones analizadas ya que el factor de seguridad no se encuentra próximo a 1. Apoyándonos en las ecuaciones 3.6 y 3.7 determinamos que:

$$[\sigma] = \frac{276}{2} = 138 \text{ MPa}$$

43.7139 MPa < 138 MPa

y se llegó a la conclusión de que el árbol resiste.

3.4 – *Análisis de los cojinetes de rodamiento del generador.*

Para el análisis de los cojinetes de rodamiento del generador nos basamos en la experiencia adquirida en la asignatura de Diseño de Máquina II. Después de analizar las fuerzas que actúan sobre el árbol del generador se puede analizar el comportamiento del los cojinetes del mismo, teniendo en cuenta que ya existían. En el apoyo A se encuentra un cojinete de bolas de serie 180304 con diámetro exterior igual a 52 mm e interior igual a 20 mm. En el apoyo B se encuentra un cojinete de bolas de serie 180307K con diámetro exterior igual a 80 mm e interior igual a 35 mm. Para realizar el análisis de los cojinetes nos apoyamos en el programa para cálculo de rodamientos (RODAM.EXE), el cual nos ofrece los resultados que aparecen en las tablas 3.5, 3.6 y 3.7.

Parámetros Generales	
Tiempo de trabajo	3000h
Número de recambio	1
Temperatura de trabajo	40°C

Tabla 3.5:

Parámetro del rodamiento Izquierdo	
Número de serie del rodamiento	180000
Código GPZ del rodamiento	180504
Diámetro interior (d)	20 mm
Diámetro exterior (D)	47 mm
Ancho (B)	18 mm
Radio del diámetro interior (r)	1.5 mm
Diám. Del Respaldo de la pista interior (d2)	0 mm
Diám. Del Respaldo de la de la pista exterior (D2)	0 mm
Capacidad de carga estática (C)	8390Nw
Radio del diámetro exterior (r1)	1.5 mm
Velocidad máxima (n)	5000 rpm
Capacidad de carga dinámica (CO)	5100 Nw
Peso	0.17 kg
Separación mínima de la cajuela (a)	0 mm
Probabilidad de NO rotura en el tiempo de trabajo (KL)	98.93%

Tabla 3.6:

Parámetro del rodamiento Derecho	
Número de serie del rodamiento	46000
Código GPZ del rodamiento	46207
Diámetro interior (d)	35 mm
Diámetro exterior (D)	72 mm
Ancho (B)	17.0 mm
Radio del diámetro interior (r)	2 mm
Diám. Del Respaldo de la pista interior (d2)	46.9 mm
Diám. Del Respaldo de la de la pista exterior (D2)	60.2 mm
Capacidad de carga estática (C)	22700Nw
Radio del diámetro exterior (r1)	1 mm
Velocidad máxima (n)	10000 rpm
Capacidad de carga dinámica (CO)	16600 Nw
Peso	0.27 kg
Ángulo de contacto (σ)	26°
Probabilidad de NO rotura en el tiempo de trabajo (KL)	99.86%

Tabla 3.7:

3.5 – *Cálculo de las uniones roscadas.*

El análisis de las uniones roscadas del aerogenerador es de gran importancia ya que estas relativamente poseen una baja resistencia mecánica a las cargas variables. Este aspecto es muy importante a la hora de diseñar y comprobar si dichas uniones son capaces de soportar las condiciones a las que estará sometido el equipo.

3.5.1 Unión roscada número 1.

Comenzamos realizando el análisis de la unión roscada entre la brida de la torre y el Yaw System.

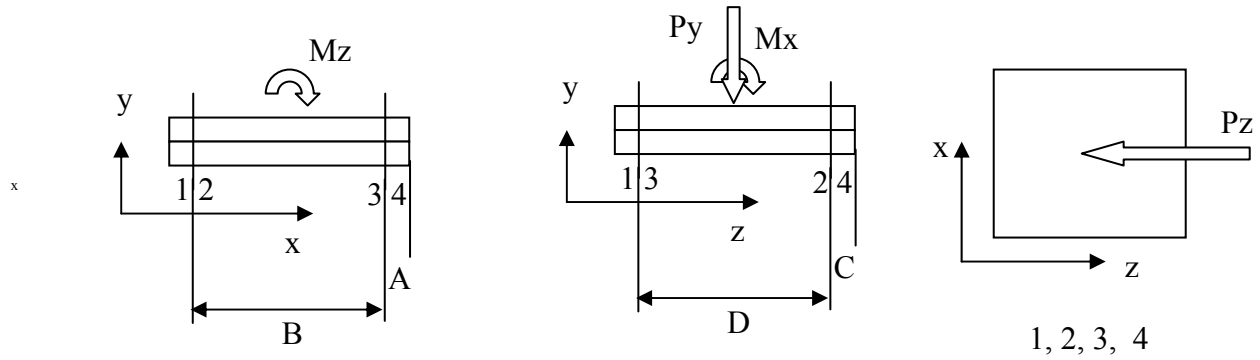


Figura 3.14: Esquema de distribución de fuerzas en los tres planos.

Después de analizar las fuerzas y momentos en cada plano se establece que el tornillo más cargado es el 1.

Datos:

A = 26.5 mm
B = 188.5 mm
C = 25.5 mm
D = 219.5 mm
Py = 942.11 N
Mz = 58 918.98 Nmm
Pz = 7.32 N
Mx = 30159.6 Nmm

Ecuaciones para el cálculo:

<u>Plano x-y</u>

$$P_1 = \frac{Mz}{2 * \left(A^2 + B^2\right)} * A \tag{3.8}$$

$$P_{11} = \frac{Mz}{2 * \left(A^2 + B^2\right)} * B \tag{3.9}$$

Plano y-z

$$P_{12} = \frac{Mx * D}{2 * \left(C^2 + D^2\right)} - \frac{Py}{4} \tag{3.10}$$

$$P_1 = P_{11} + P_{12} \tag{3.11}$$

$$P_0 = V_1 + P \tag{3.12}$$

Plano x-z

$$Pc_1 = \frac{Pz}{4} \quad \text{(cortante)} \tag{3.13}$$

$$V_1^{'/} = \frac{Pc_1}{\mu} = \frac{Pz}{4 * \mu} \tag{3.14}$$

Con estas ecuaciones y la ayuda del tabulador Microsoft Excel se realizan los cálculos al tornillo más cargado. Para lo cual se introducen los datos siguientes:

Plano XY		Plano YZ		Plano XZ	
				Py	942.11
Mz	58918.98	Mx	30159.6	Pz	7.32
A	26.5	C	25.5	Py/4	235.5275
B	188.5	D	219.5	Pz/4	1.83
P1	153.254878		67.7858326	Coef. Fricc.	0.15

Tabla 3.8: Datos de entrada

Calculando los parámetros que aparecen en las tablas a continuación.

P1total	-14.4867897
Pc1	1.83
Vp	12.2

Tabla 3.9: valores calculados

Métrica	d2 (mm)	t (mm)	D1 (mm)	daguj(mm)	f
16	14.701	2	22	17	0.15
Ft (mm2)	Et (Mpa)	S1 (mm)	S2 (mm)	Lt (mm)	Ep (Mpa)
144	2.10E+05	8	18	37	2.10E+05
H (mm)	h (mm)	Fp1 (mm2)	Fp2 (mm2)	Po	Sigy
10	12	303.9490892	527.787566	~~-2.29E+00~~	360
Ct	Cp1	Cp	V´	Sigma	SigR
817297.297	7978663.592	3475392.6	12.2	~~-0.02064463~~	420
Cp2	1/Cp		P	Condición	SigPer(MPa)
6157521.6	2.87737E-07		-14.4867897	-0.02064463	108

Tabla 3.10: Resultados de los cálculos

Analizando la condición de resistencia planteada en la tabla de los resultados, se puede apreciar que la unión roscada entre la brida de la torre y el Yaw System resiste las cargas que actúan sobre la misma.

3.5.2 Unión roscada número 2.

A continuación se efectúan los cálculos de resistencia a la unión roscada que se encuentra entre el tubo de la cola y el sistema de giro de la misma. Para ello se emplea la figura 3.15.

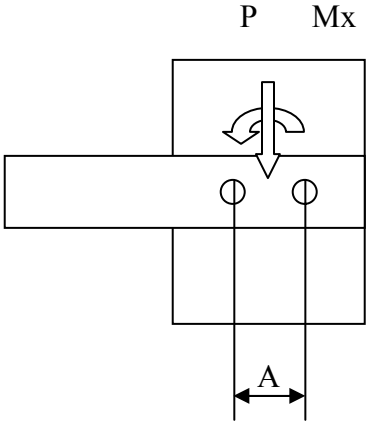


Figura 3.15: Esquema de distribución de fuerzas en la unión

Para realizar el análisis de esta unión roscada se tienen los siguientes datos:

A = 30 mm
Mx = 110160 Nmm
P = 108 N

Ecuaciones para el cálculo:

$$Pc_1 = \frac{P}{2} + \frac{Mx}{A} \tag{3.15}$$

$$\tau < [\tau] \tag{3.16}$$

$$\sigma_{ap} \leq [\sigma]_{ap} \tag{3.17}$$

$$\sigma_{ap} = \frac{Pc_1}{Ap} \tag{3.18}$$

$$Ap = Dt * S \tag{3.19}$$

$$[\sigma]_{ap} = \sigma_y \tag{3.20}$$

Apoyado nuevamente en el tabulador Microsoft Excel se realizan los cálculos para la unión, obteniendo así, los siguientes resultados:

Mx	110160
P	108
A	30
Pc1	3726
Pt	24840

Tabla 3.11: Datos de entrada

Métrica	d2 (mm)	t (mm)	D1 (mm)	daguj(mm)	f
10	9.026	1.5	14	11	0.15
Ft (mm2)	Et (Mpa)	S1 (mm)	S2 (mm)	Lt (mm)	Ep (Mpa)
52	2.10E+05	8	10	25.5	2.10E+05
H (mm)	h (mm)	Fp1 (mm2)	Fp2 (mm2)	Po	SigY
7	8	159.4358272	188.495559	3.78E+03	360
Ct	Cp1	Cp	V´	Sigma	SigR
428235.294	4185190.463	2034320.428	3726	94.5	420
Cp2	1/Cp	Q	P	Condición	SigPer(MPa)
3958406.74	4.91565E-07	3726	54	94.5	108

Tabla 3.12: Resultados de los cálculos

De esta forma, analizando los resultados de los cálculos realizados, se pudo comprobar que la unión roscada entre el tubo de la cola y el sistema de giro de la misma resiste.

3.5.3 Unión roscada número 3.

Por último se realiza el cálculo de resistencia de la unión roscada entre el sistema de giro de la cola y el soporte de la misma figura 3.16.

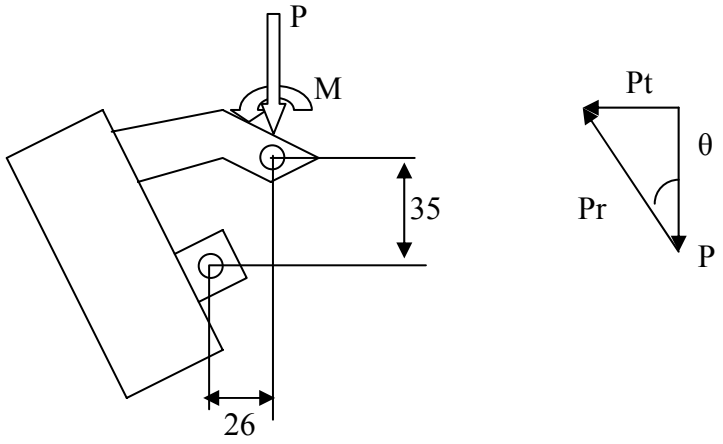


Figura 3.16: Esquema de distribución de fuerzas en la unión

Datos:

M = 141510 Nmm

P = 173 N

Ecuaciones para el cálculo:

$$P = \Pr * \cos\theta \tag{3.21}$$

$$Pt = \sqrt{P^2 + \Pr^2 - 2 * P * \Pr * \cos\theta} \tag{3.22}$$

$$\tau = \frac{Pt}{At} \leq [\tau] \tag{3.23}$$

Realizando los cálculos para la unión y se obtienen los siguientes resultados:

M	141510
P	173
x	26
y	35
Cita	0.93188234
Pr	3245.60805
Pt	3145.51116

Tabla 3.13: Datos de entrada y algunos cálculos.

Métrica	d2 (mm)	t (mm)	D1 (mm)	daguj(mm)	f
8	7.188	1.25	12	9	0.15
Ft (mm2)	Et (Mpa)	S1 (mm)	S2 (mm)	Lt (mm)	Ep (Mpa)
33	2.10E+05	8	8	21.75	2.10E+05
H (mm)	h (mm)	Fp1 (mm2)	Fp2 (mm2)	Po	SigY
5.5	6	137.4446786	137.444679	3.15E+03	360
Ct	Cp1	Cp	V´	Tau	SigR
318620.69	3607922.813	1803961.407	3145.51116	95.3185201	420
Cp2	1/Cp	Q	P	Condición	TauPer(MPa)
3607922.81	5.54336E-07	3145.511165	0	95.3185201	216

Tabla 3.14: Resultados de los cálculos

Se comprobó que la unión roscada entre el sistema de giro de la cola y el soporte de la misma resiste las cargas a que está sometida.

3.6 – *Conclusiones parciales.*

1. El aerogenerador puede construirse con las dimensiones que aparecen en el diseño aquí presentado sin que presente dificultades de operación puesto que los elementos dimensionados, fueron comprobados y resisten a las posibles fallas fundamentales, tales son los casos de: el rotor, el árbol principal y las uniones roscadas.
2. Los materiales empleados para la construcción de los elementos si bien no son los mejores dadas las condiciones atmosféricas a las que se exponen, reúnen los requisitos mínimos de resistencia a la corrosión, garantizando una vida relativamente prolongada. En estos casos se prefieren materiales más resistentes ante la exposición al medio ambiente, como pueden ser inoxidables o recubiertos con materiales resistentes.
3. Los cojinetes que se destinan para el árbol principal, resisten en uno de los apoyos y en el otro fue necesario proponer un cambio por un cojinete radial axial, esto permite una mayor vida del sistema o un mayor tiempo entre las operaciones del mantenimiento. Sin embargo no es recomendable poner cojinetes diferentes en ambos apoyos, por dificultarse la intercambiabilidad y la disponibilidad de repuestos. En este caso se prefiere poner ambos cojinetes iguales y es preferible el radial axial que garantiza la vida esperada en ambos lados.

Conclusiones Generales:

1. Después de realizar un estudio bibliográfico sobre pequeños aerogeneradores se comprobó que es posible diseñar y construir, en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la UCLV, los componentes necesarios para la instalación de un aerogenerador.
2. Se diseñó el rotor del aerogenerador, con paletas alabeadas y usando un perfil NACA 4415, además se utilizó, para la construcción del rotor, las palas del rotor de cola de un helicóptero MI-24.
3. Se diseñó y construyó el sistema de orientación por momento de inercia en la cola para el aerogenerador de 1 kW, con la posibilidad de variar algunos de sus parámetros geométricos.
4. Se diseñó y construyó la torre así como la base para la instalación del aerogenerador en el techo de la Facultad de Ingeniería Mecánica.
5. El aerogenerador puede construirse con las dimensiones que aparecen en el diseño aquí presentado sin que presente dificultades de operación puesto que todas los elementos dimensionados, fueron comprobados y resisten a las posibles fallas fundamentales, tales son los casos de: el rotor, el árbol principal y las uniones roscadas.
6. Los cojinetes que se destinan para el árbol principal, resisten en uno de los apoyos y en el otro fue necesario proponer un cambio por un cojinete radial axial, esto permite una mayor vida del sistema o un mayor tiempo entre las operaciones del mantenimiento. Sin embargo no es recomendable poner cojinetes diferentes en ambos apoyos, por dificultarse la intercambiabilidad y la disponibilidad de repuestos. En este caso se prefiere poner ambos cojinetes iguales y es preferible el radial axial que garantiza la vida esperada en ambos lados.
7. Se instaló el aerogenerador de 1 kW de potencia en el techo de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la UCLV.

Recomendaciones:

1. Realizar la instalación eléctrica del aerogenerador hasta el aula especializada del CETA, para comenzar a utilizar la energía que proporciona.
2. Construir las palas diseñadas en el trabajo para instalárselas al aerogenerador.
3. Realizarle las pruebas de campo variando los parámetros geométricos del sistema de orientación por momento de inercia para comprobar su funcionamiento.

Bibliografía:

1. **A.C.Walshaw and D.A.Jobson**;"Mechanics of Fluids";Greaat Britain; 1962

2. "Aerogeneradores: ¿Cuántas palas?"; Actualizado el 3 de enero 2001; disponible en: **http://www.windpower.org/es/tour/design/concepts.htm**

3. **Alatalo. Mikael**; "Permanent magnet machines with air gap windings and integrated teeth windings", Doctoral thesis. Göteborg, Sweden, Chalmers University of Technology, School of Electrical and Computer Engineering, Technical Report No. 288, May 1996.

4. **Álvarez Sánchez. Jesús y Otros**; "Elementos de máquina (Manual Complementario) ". Ediciones del ISPJAE; Cuba; 1985.

5. **Araus. Maria E, Massa. Aldo A y Solelti. Alfredo J**; "Energía Eólica"; Universidad Católica de Córdova; 1983.

6. "Atlas de Diseño de Elementos de Máquina" Tomo I y II; Edit. Pueblo y Educación; Cuba; 1982.

7. **AUTOCAD**; "Programa para el dibujo y diseño de piezas"; Autodesk.2000.

8. **Beer ferdinand P**. "Mecánica vectorial para ingenieros". Dinámica. Tomo II. Edición Revolucionaria. Cuba. 1998.

9. Blade Desing. Pdf. Disponible en: **http://www.windmission.dk/workshop/books.htm.**

10. **Bugge**. **Jacob**. Regulation on the determination of load of windmill. 1998.

11. "BWC Excel, 10 Kw Class, Wind Turbine"; disponible en: **http://www.Berguey.com**

12. **Casanova Treto Pedro**, "Metodología para la determinación de las cargas aerodinámicas de un rotor de un aerogenerador horizontal de frente al viento, Tesis de maestría, UCLV, 2003.

13. **Castillo Fleites Waldys,** "Diseño de un aerogenerador de imanes permanentes", Trabajo de Diploma, UCLV, 2003.

14. Cargas, Enero 2003.

15. Compendium in Wind-turbine blade theory and praxis based on experience from the 4th. Period of wind electrical power generation. 1968-1978.

16. "Condiciones de Contorno"; Moyo 2000; disponible en: **http://usuarios.arnet .com.as/marman/Proyecto.Final.html**

17. **Cruz Cruz. Castro Gil;** "Energía Eólica"; Edit. PROGENSA; España; 1997.

18. **Cunty Guy**; "Aeromotores y aerogeneradores"; Ediciones Marzo 80; Barcelona; 1981.

19. **Curtis Richard**. "Manual de Instalaciones de Aeroturbina", PROVEN (UK), Abril 1998.

20. **Dobrovolski. V**; "Elementos de Máquina"; Edit. MIR; Moscú; 1970

21. "Energía eólica, la fuente renovable que ya es alternativa"; disponible en: **http://www.iespana.es/heberg.html**

22. **Freris. L. L**; "Wind Energy Conversion Systems"; Edit. Prentice Hall; New.

23. "Generadores Eólicos de Electricidad"; Tesis de graduación secundaria; disponible en: **http://www.monografias.com/trabajos4/geneolico/geneolico.shtml**

24. **Gipe Paul**; "Energía Eólica Práctica"; Noviembre 2000.

25. **Gonzáles Pérez. Ramón R**; "Manual de Metrología Dimensional"; Universidad Central de las Villas; Cuba; 1990.

26. **H. Abott Ira**; "Theory of wing sections"; Power Publications, Inc 1959 Junio.

27. **Hunter Rouse**. **P. F; "**Elementary Mechanics of Fluids"; Edit. John Wiley & Sons; United States; 1962.

28. **Instituto Para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA)**; "Manuales de Energías Renovables (Energía Eólica)" Edición Especial Cinco Días; 1992.

29. **Irving**. **H. Shames**; "La mecánica de los fluidos"; Edit. McGraw-Hill; México; 1976

30. "J Bornay, Aerogeneradores"; disponible en: **http://www.bornay.com**

31. **John. K. Vernar y Rober. L. STREET**; “Elementos de la mecánica de los fluidos”; Edit. Revolucionaria; La Habana; 1980.

32. **Lecuona Neuman. Antonio**. La energía eólica: principios básicos y tecnología. Febrero 2002; disponible en: **http://bicho.uc3m.es/alunm/ie/eol.pdf**

33. **Les Gurieres. Desire**; "Energía Eólica, Teoría, concepción...."; Edit. MASSON; España; 1980.

34. Manattini. Martin; “Diseño de Sistema Conversor de Energía”; diciembre del 2000; disponible en: **http://usuarios.arnet.com.ar/marman/proyecto/proyecto_final.html.**

35. **Mattio Héctor, Ponce Graciela**; "Nociones Generales de Energía Eólica"; CREE, Rawson, Chubut; Argentina; 1998.

36. **Merian. J. L**, “Mecánica”, Edición Revolucionaria, Cuba, 1979.

37. **Morales Gómez Raidel,** “Diseño de un aerogenerador de imanes permanentes”, Trabajo de Diploma, UCLV, 2002.

38. **Piggott. H**; “Wind Turbine Plans North American. Edition 1990.

39. **Piggott. H**; “Windpower Workshop”; United Kindow; 1997.

40. **Pisarenko, G. S.** ; “Manual de Resistencia de Materiales”; Edit. MIR; Moscú; 1989.

41. Principios de Conversión de Energía eólica”; Edit CIEMAT; España; 1997

42. **Rechetov. D**; “Elementos de Máquina”; Edit. MIR; URSS; 1981.

43. **Rittenhouse. David**; "La Energía Eólica"; Edit. Fraterna; Argentina; 1978.

44. **Rodríguez Hernández. Orlando y Corugedo Méndez. Ángel**; “Dibujo Aplicado para Ingenieros”Tomo I y II; Edit. Pueblo y Educación; Cuba; 1986.

45. **Sánchez Teodoro;** Gerente del programa de energía de ITDG. Perú; “ Entrevista Sostenida con el Autor”; Julio 2002.

46. “Sección Energía Eólica”; disponible en: http:**//www.conae.gob.mx/renovables/eolica.html**

47. **Spera David**; "WIND TURBINE TECHNOLOGY"; Edit. ASME press; United States; 1994.

48. **Shih-Pai, PH.D**;"Viscous Flow Theory I Laminar Flow"; Edit. D. Van Nostrand Company; United States; 1956.

49. Teoría sobre las palas de los helicópteros, disponible en: **http://www.terra.es/personal2/helicoptero/index22.htm**

50. **Wiliiam. F. Hugnes, Ph. D y John. A. Brigton. Ph. D**;"Teoría y problema de dinámica de los fluidos"; Edit. Latinoamericana; México; 1970.

51. "Wind Power"; disponible en: **http://ces.iisc.ernet.in/energy/paper/SEHandbook/solarerg.html**