Universidad Central "Marta Abreu "de Las Villas

Facultad de Ingeniería Mecánica



TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Diseño de un aerogenerador de imanes permanentes

Diplomante: Waldy Castillo Fleites

Tutor: M. Sc. Ernesto Fariñas Wong.

CURSO: 2002-2003

"Año de Gloriosos Aniversarios de Martí y el Moncada"

PENSAMIENTO

"La cultura es algo que pertenece al Mundo, es quizás como el lenguaje, algo que pertenece a la especie humanay la técnica es igual, la técnica se puede usar para domesticar a los pueblos, y se puede usar al servicio de los pueblos, para liberarlos."

Che.

DEDICATORIA

A mis padres por todo su amor y confianza durante toda mi vida (SON LO MÁS GRANDE), y a cuales debo lo que he logrado alcanzar.

A toda mi familia.

A mi novia por su amor y dedicación, a su familia por el cariño que me han brindado.

A mis verdaderas amistades.

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor: Msc Ernesto Fariñas Wong por su interés, voluntad, por la dedicación y el empeño mostrado en la realización de este trabajo; por su amistad.

A Maiquel quien ha compartido conmigo los buenos y malos momentos en la carrera y quien a sido y es mi mejor amigo; mi hermano.

A mis primos Abdel e Idelín por su enorme apoyo, en toda mi carrera.

A Vicente y su familia por su ayuda y amistad.

A los profesores del departamento de Energía y CAD-CAM, en especial a Soriano Pedro y Miriel por brindarme su ayuda en la realización de este trabajo.

A todos los profesores que durante mi carrera me guiaron por los caminos de la ciencia.

A mis compañeros de grupo con quienes he compartido una importante etapa de mi vida.

A la Facultad de mecánica, a esta Universidad, y en especial a la Revolución por haberme dado la posibilidad de ser un joven profesional.

RESUMEN

Resumen

Debido a la importancia que tiene en estos momentos el ahorro de energía en nuestro país y la necesidad de encontrar fuentes renovables de energía cada vez más eficientes, se acomete el siguiente trabajo, lográndose el diseño de un aerogenerador de imanes permanentes de 2KW de potencia acorde a las condiciones industriales y geográficas de nuestro país.

En este trabajo se realizó un estudio acerca de las configuraciones básicas de los aerogeneradores con énfasis en los aerogeneradores de imanes permanentes, realizándose un análisis crítico del diseño preliminar propuesto para un aerogenerador de este tipo por Morales [30]. Se esboza una breve panorámica de las cargas a las que esta sometida una aeroturbina y también se ofrece una referencia a la teoría de modelos, sobre la cual se basa el análisis realizado para la posible modelación del diseño en túnel de viento.

Teniendo en cuenta el análisis de cargas realizado, se desarrolla una metodología implementada sobre el tabulador Excel, para el cálculo del sistema de regulación por momento de inercia. Además se realizan los cálculos correspondientes a las uniones por tornillos de las palas, del mecanismo de giro y de la base de la torre del diseño analizado.

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

Summary

Due to the importance that has now days the energy save in our country and also the necessity to find removable energy source, more and more efficiently, this work is carry out, obtaining the design of a PMG wind turbine of 2 kW according to the industrial and geographic conditions of our country.

In this paper deal with the study of wind turbines basic configurations and more specifically the PMG wind turbines, making a critical analysis of the preliminary design of a wind turbine propound by Morales [30]. It is show a brief description of the forces that act in this wind turbine. A reference to the model theory is done, which is based for the analysis realized concerning the possibility of modelation of this design in a wind tunnel.

Taking into account the force analysis it is develop a methodology implemented in Excel, for the calculations of the regulating system by moment of inertia. Besides it was also made the correspondent calculations to the bolt unions, of the blades, of the your system and the base of the tower of the designed wind turbine.

In this work we attach the drawing plans of the constructions and mounting of the win turbine.

INDICE

Índice

	Introducción
	Canítulo 1 Clasificación y descrinción de los diferentes sistemas de
	acondicionamiento de
	aire
-	Sistemas de expansión
	directa
-	Sistema todo-agua
-	Sistema todo-aire
-	Sistema aire-agua
-	Aplicaciones
-	Descripción de los diferentes tipos de instalaciones de acondicionamiento de aire aplicada a los hospitales
	Capítulo 2 :Clasificación y descripción de diferentes tipos de intercambiadores para la recuperación de frío
-	Consideraciones económicas.
-	Consideraciones técnicas
-	Ejemplos de recuperación de energía aire a aire.
-	Intercambiadores de plato - fijo
-	Intercambiadores de energías rotatorios de aire a aire
-	Intercambiador de tubos de calor
-	Capitulo 3: calculo de los diferentes parámetros del sistema recuperador de calor
-	Información de la selección general
-	Aplicación del ejemplo anterior al sistema imperante en los salones de operación del Hospital Celestino Hernández
_	Canitulo 4: calculo económico impacto ambiental y mantenimiento
_	Aspecto economico
-	Impacto ambiental
-	Mantenimiento
-	Conclusiones
-	Recomendaciones

- BibliografíasAnexos

Introducción

Entre los problemas más apremiantes para la humanidad en el siglo 21 es el suministro de energía, sin lugar a dudas uno de los más inmediatos a resolver. Son conocidos los problemas ambientales ocasionados a partir del uso de combustibles fósiles para la preservación de la vida en el planeta, así como el empleo de la energía nuclear, dados los peligros que representa su manipulación y almacenamiento de desechos.

A finales del siglo 20 es que el hombre toma conciencia de su papel rector en el mantenimiento de la vida a escala global y en este sentido comienza a brindar soluciones al problema de generar energía para garantizar la sustentabilidad del planeta, sin que su producción y consumo constituyan una amenaza para las generaciones venideras.

Son las fuentes renovables de energía una de estas soluciones y su desarrollo e implantación ha sido la política de muchos países, tanto desarrollados como en vías de desarrollo.

Cuba como país socialista, subdesarrollado y miembro de la comunidad internacional, ha encaminado esfuerzos y recursos al desarrollo en la utilización de este tipo de energía; dado el innegable beneficio que a la par con el cuidado y preservación del planeta, proporciona a la economía.

Son varias las fuentes de energía renovable utilizadas en el país, entre las que se destacan: El biogás, solar – fotovoltaica, biomasa, eólica y la hidroenergía.

Con el objetivo de potenciar y organizar el desarrollo de las fuentes renovables de energía en el país se creó recientemente el "Frente Nacional de Energía Renovable", dirigido por la Ministra del CITMA. El Frente acoge a todos los centros investigativos y movimientos políticos que contribuyen al desarrollo de las fuentes renovables de energía.

Se conoce históricamente que en Cuba se ha usado el viento como una fuente alternativa de energía, básicamente, en regiones aisladas donde se hace necesario el bombeo de agua. Esto reafirma la hipótesis que existen potenciales para el desarrollo de esta fuente renovable de energía.

Las experiencias cubanas en la explotación de esta fuente de energía son pequeñas, pues se reduce a los molinos múltipalas (tipo americano), que han venido siendo utilizados desde hace muchos años, para el bombeo de agua; mientras que para la generación de electricidad prácticamente no han sido utilizados.

Existen en el país varias instalaciones eólicas recientes para la generación de electricidad, la más grande con dos maquinas y generadores asincrónicos ECOTECNIA de 225 kW cada uno, se encuentran en la isla de Turiguanó, otra instalación de 10 kW fue montada en Guantánamo siendo esta una donación del Folkecenter de Dinamarca; mientras existen otros

1

Introducción

emplazamientos en regiones montañosas y de la Cienaga de Zapata, los cuales llegan a producir hasta 500 W.

Se conoce el desarrollo científico - técnico alcanzado por algunos países europeos entre los que se destacan Alemania, Dinamarca, Holanda y España. Este creciente desarrollo ha propiciado un mayor aprovechamiento de la energía del viento, encontrándose soluciones a muchos problemas que anteriormente limitaban su explotación.

Desde el año 1998 el Centro de Estudios de Termoenergética Azucarera (CETA) perteneciente a la UCLV, ha venido realizando varios trabajos de investigación que potencian el desarrollo de la energía eólica para las condiciones de Cuba. Dentro de estos se encuentra el diseño preliminar de un aerogenerador de Imanes Permanentes (PMG) de 2 kW [30].

Es interés de este trabajo el desarrollo y aprovechamiento de la energía eólica, por lo que representa como fuente de energía no contaminante, propia y versátil.

Teniendo en cuenta lo expresado anteriormente y la necesidad del país de investigar y desarrollar las fuentes autónomas de energía, en especial la energía eólica sobre las bases de una industria nacional, y basados en el diseño preliminar anteriormente referido es que se propone la siguiente **Hipótesis de Investigación**:

Basándose en la información bibliografía y en el diseño preliminar de un aerogenerador PMG de 2 kW de potencia, es posible completar, integrar, ponerlo a termino y organizar su diseño para su construcción con fines investigativos.

Para dar cumplimiento a la hipótesis de investigación se propone el siguiente **objetivo** general:

Chequear y complementar el diseño de un aerogenerador PMG de 2 kW de potencia, con sistema de regulación por momento de inercia.

Para dar cumplimiento a este objetivo general se proponen los siguientes objetivos específicos:

- 1. Realizar un análisis crítico del diseño preliminar propuesto por Morales [30].
- Realizar un estudio teórico sobre la posibilidad de hacer un modelo de la máquina para probarla en un túnel de viento.
- Desarrollar e implementar una metodología que permita hacer un dimensionado correcto del sistema de regulación por momento de inercia a partir del análisis de las cargas actuantes en el aerogenerador.
- Complementar la documentación técnica de diseño del aerogenerador PMG de 2 kW de potencia.

Capítulo 1. Análisis teórico del desarrollo de los aerogeneradores PMG en el CETA.

1.1. Introducción.

El Centro de Estudios de Termoenergética Azucarera (CETA) perteneciente a la Universidad Central de Las Villas (UCLV), ha desarrollado un trabajo encaminado al estudio teórico y el diseño de las aeroturbinas con generador de imanes permanentes (PMG).

En el siguiente Capítulo se abordará brevemente las configuraciones básicas de los aerogeneradores con énfasis en los aerogeneradores de imanes permanentes. Como parte de los objetivos específicos propuestos en el trabajo se realizará un análisis crítico del diseño propuesto por Morales [30]. Posteriormente se estudiará la posibilidad de probar un modelo en un túnel de viento para su estudio y escalado.

Para lograr a una mejor comprensión de los cálculos cinemáticos-dinámicos que se realizan en este trabajo, se esboza una breve panorámica de las cargas a las que esta sometida una aeroturbina. También se ofrece una referencia a la teoría de modelos, la cual se aplicará al diseño propuesto.

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

La atmósfera constituida esencialmente por oxígeno, nitrógeno y vapor de agua, se caracteriza por su presión, que varía con la altura.

La radiación solar se absorbe de manera diferente en los polos que en el ecuador, a causa de la redondez de la tierra. La energía absorbida en el ecuador es mayor que la absorbida en los polos. Estas variaciones de temperatura, provocan cambios en la densidad de las masas de aire, lo cual hace 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 a 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.

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 que 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.[18]



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

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 son periódicas 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. [18]

1.3. Clasificaciones generales de los aerogeneradores.

Capítulo 1.

Dado el desarrollo científico-técnico alcanzado en el aprovechamiento de la energía eólica se cuentan con varios tipos de configuraciones para los aerogeneradores, lo cual da al traste con diferentes clasificaciones, de las cuales las mas importantes son:

- Aerogeneradores según la posición de su eje de rotación, con relación a la dirección del viento.
 - 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.

• Aerogeneradores según la disposición de Rotor.

- 1. Rotor a barlovento.
- 2. Rotor a sotavento

Aerogeneradores según el numero de palas.

- 1. Monopalas.
- 2. Bipalas.
- 3. Tripalas.
- 4. Cuatro palas.
- 5. Múltipalas (molino americano)

- Aerogeneradores con o sin caja multiplicadora.
- Aerogeneradores PMG según la distribución de los imanes en el generador (tipo de flujo).
 - 1. Flujo radial.
 - 2. Flujo transversal.
 - 3. Flujo axial.

Aerogeneradores según el sistema de orientación y regulación

- 1. Dispositivos de servomotores.
- 2. Aleta estabilizadora.
- 3. Freno aerodinámico centrífugo.
- 4. Hélice auxiliar.
- 5. Dispositivos manuales.
- 6. El rotor orientado a sotavento.
- 7. Ángulo de paso fijo y variación del área de captación.
- 8. Ángulo de paso fijo y entrega en pérdida aerodinámica o "stall".
- 9. Ángulo de paso variable o "pitch regulation".
- 10. Regulación por momento de inercia. [13]

1.4. Cargas que actúan sobre un aerogenerador.

Unos de los problemas fundamentales en el diseño de un aerogenerador es el análisis de las cargas que actúan sobre él. En tal sentido no se debe ver a estas máquinas como un sistema cerrado en el cual únicamente están actuando las fuerzas del viento.

El conocimiento de estas y el efecto que ejercen sobre el equipo permite obtener un diseño adecuado, acorde a la prestación que se requiere y a las condiciones especificas de operación.

7

Capítulo 1.

Una clasificación o subdivisión de las cargas puede ser: Carga estáticas y cargas dinámicas, también se pueden clasificar en cargas aerodinámicas y cargas inerciales. [10]

Las cargas aerodinámicas más importantes son las generadas por las fuerzas de sustentación en los perfiles y las diferentes fuerzas de arrastre generadas en todos los elementos externos de la máquina.

Las cargas inerciales están conformadas por el efecto combinado de las diferentes fuerzas de inercia generadas a partir del movimiento de los diferentes elementos del aerogenerador. En esta clasificación se le debe prestar atención al efecto de la fuerza centrífuga sobre las palas [9]

Las cargas se trabajan básicamente por conjuntos, las palas para el análisis de su resistencia se pueden trabajar independientes, donde se consideran las fuerzas cortantes y los momentos en su base. Después se concentran las cargas en el centro del rotor y a partir de aquí se puede realizar el resto del calculo de los elementos del equipo.

En el sistema de orientación por momento de inercia resulta muy importante el análisis de las fuerzas de arrastre en la cola, pues estas fuerzas y las fuerzas actuantes en el centro del rotor, son las responsables de mantener una correcta orientación de la máquina en las diferentes etapas de funcionamiento.[31]

1.5. Descripción de la configuración del aerogenerador PMG propuesto por Morales [30]. Análisis crítico.

Dado la necesidad de conocer las características del diseño del aerogenerador propuesto por Morales [30], se analiza a continuación la configuración general de este, basadas en las clasificaciones anteriormente expuestas.

El aerogenerador de eje horizontal con el eje paralelo a la dirección del viento, es la máquina que en la actualidad más difundida está, por tener un rendimiento superior a las otras disposiciones.

En cuanto a las formas posibles de disponer el rotor o hélice horizontal (barlovento, sotavento) y las posibles estrategias de orientación de la hélice en la dirección perpendicular al viento Morales[30], considera ventajosa la adopción de una configuración para el rotor a barlovento de la torre debido a la influencia de la sombra aerodinámica de la misma, siendo esta configuración la que elimina en mayor escala esta influencia sobre sus palas.

Número de palas en el rotor.

Basado en las prestaciones y aplicaciones que se pretenden para la maquina así como por las condiciones externas a la que deberá estar la misma, se propone para su hélice un número de tres palas, lo cual se justifica por la suavidad de funcionamiento, fácil balanceo y bajo nivel de ruido originado en su marcha, aspecto importante este ya que estas máquinas son generalmente instaladas muy cerca de lugares habitados, siendo estéticamente las más aceptadas por su armonía en las comunidades.

Sistema de trasmisión y tipo de configuración del aerogenerador.

El acoplado directo al generador es la característica del sistema de trasmisión escogido dado que para aerogeneradores con potencias por debajo a 10 KW no le es favorable las relaciones masa potencia que se tienen al introducir una caja multiplicadora al sistema, siendo otro inconveniente el espacio físico disponible que no permite la inserción de este tipo de mecanismo.[30]

Otras razones que argumentan el uso del generador acoplado directamente lo es el costo de electricidad producida y el ruido de la maquina eólica, los cuales pueden ser reducidos notablemente con esta configuración. La reducción del ruido será importante al permitir solicitar los permisos para instalar los conversores de energía del viento cerca de lugares habitados. La reducción del costo de la electricidad producida se debe a una disminución en el costo del tren de potencia, a la disminución de las pérdidas por conversión de energía y a una mejora de la disponibilidad en el conversor de energía.

En la configuración del generador con imanes permanentes se tiene una disposición de flujo radial dado que su topología permite un diámetro exterior menor en comparación con la de flujo axial, además de ser más eficaz que este último. En cuanto al generador de flujo transversal se puede decir que es el más eficaz y ligero, sin embargo tiene el inconveniente que su estructura es más complicada, en comparación con la de un flujo radial, lo cual conlleva a un aumento de los costos de fabricación.

Teniendo en cuenta la potencia que se desea alcanzar (2 KW), el generador de imanes permanentes presenta 28 imanes (Cerámica grado 8 ferrita), con 28 polos pegados a la carcaza (rotor) alrededor del laminado (estator)que será de Silicón steel M19 grano no orientado, siendo esta la chapa mas común y barata que usa para transformadores y motores eléctricos. El sistema de colector de electricidad a la salida del generador está compuesto por un sistema colector de escobilla y carbones el cual garantiza el giro a 360 grados del molino sobre su eje.

Capítulo 1.

Sistema de regulación por momento de inercia en la cola.

El sistema de regulación por momento de inercia en la cola tiene dos funciones fundamentales: primero la 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 segundo el de actuar como mecanismo en la regulación del aerogenerador cuando el viento aumente su velocidad por encima de los valores de diseño para la máquina.

Este mecanismo posee una gran fiabilidad durante su explotación ya que no necesita mecanismos con resorte o de engranajes que aumenten considerablemente los costos de fabricación por maquinado y lubricación, incrementando el costo total, así como las paradas por mantenimiento. Con en este sistema se logra un funcionamiento estable, siendo la regulación 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 (Ver anexo 02-00-00) 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, siendo esta la principal ventaja del sistema Otra ventaja es que este sistema no ocuparía espacio alguno para su implementación al formar parte de la cola. Tiene el inconveniente de ser un sistema complicado, según refieren especialistas en el tema como Piggot [31], por la dependencia de coeficientes de rugosidad, momentos y productos de inercia que se originan durante el funcionamiento del aerogenerador, haciendo los cálculos sumamente engorrosos, provocando la necesidad de realizar pruebas de campo por el método de tanteo y error, sin embargo estos cálculos y pruebas no son tan complicados como los necesarios en los sistemas stall Morales [30].

Por lo antes mencionado es el sistema de regulación por momento de inercia en la cola, el utilizado en el diseño del aerogenerador, el cual está en correspondencia con las capacidades tecnológicas de la industria mecánica cubana.

Dado el análisis realizado al diseño del aerogenerador propuesto por Morales [30] se tiene que en el mismo faltan algunos elementos para su culminación, los cuales se enumeran continuación:

- Palas.
- Torre de la aeroturbina.
- Sistema de anclaje de la torre al suelo.
- Sistema de izaje.

Capítulo 1.

De igual forma se analizan otros elementos ya diseñados, encontrándose que en el sistema de fijación que une las palas con la carcaza (unión por tornillos) a criterios del autor, este no garantiza una simetría angular entre las palas (ángulo de 120 grados).

También se detectó un sobredimensionamiento en el diámetro de la brida y en el número de tornillos que une el aerogenerador con la torre.

1.6 *Análisis de la teoría de modelo.*

En la actualidad el dimensionamiento final de aeroturbinas con mecanismo de regulación por momento de inercia se lleva acabo mediante pruebas de tanteo y error, realizándose estas en campos de molinos, esto se debe a que no existe aun una metodología con la cual se logre obtener un diseño que garantice el correcto funcionamiento del sistema, dado por la complejidad en el análisis tanto cinemática como dinámico que se debe hacer de el fenómeno. Es el empleo de modelos, la solución a muchos problemas de ingeniería que como en el que se analiza, se hace muy engorroso o no es confiable la utilización de un método analítico.

El aspecto económico es también una justificación para el empleo de la modelación en el análisis de fenómenos de este tipo, ya que un modelo cuesta poco por ser pequeño en comparación con el prototipo para el cual se construye y sus resultados pueden conducir a ahorros de muchas veces su costo, aunque hay que señalar que en comparación con el costo del trabajo analítico, el costo de los modelos es en general caro y no se justifica en estudios en que los métodos analíticos puedan producir una solución confiable.

La similitud entre un prototipo y un modelo llega a ser un medio de correlacionar los resultados aparentemente divergentes obtenidos a partir de fenómenos de fluidos similares. Se encontrará que la aplicación de las leyes de similitud conduce a resultados más comprensibles, a una validación del diseño y a un mejor entendimiento de los fenómenos que ocurren en el mismo.

Existen tres tipos básicos de similitud [24], todos ellos deben lograrse si existe la similitud completa entre los fenómenos de fluidos. El primero y más sencillo de ellos es el de la **similitud geométrica** que establece que la geometría de los campos de flujo y de los límites del modelo y del prototipo, tienen la misma forma y por lo tanto, las longitudes correspondientes del modelo y del prototipo son las mismas.

La semejanza geométrica se refiere también a la rugosidad superficial del modelo y el prototipo. Si cada dimensión lineal del modelo es 1/10 de la correspondiente dimensión lineal del prototipo las alturas de las rugosidades deben de estar en la misma proporción.



Figura 1.2 Representación del análisis de similitud cinemática, dinámico y geométrico de un prototipo y su modelo sumergidos en flujo.

Para tener claridad de estos conceptos tomemos como ejemplo dos flujos alrededor de dos objetos simétricamente similares (Ver Fig1.1), si estos son campos de flujo de la misma forma y si las velocidades y las aceleraciones correspondientes son las mismas a través del flujo, estos son cinematicamente similares; por lo tanto los flujos con línea de corriente similares son cinematicamente similares, esta es la **similitud cinemática** y es otro de los tipos básicos de similitud a tener en cuenta. Por último la **semejanza dinámica** se define como que la distribución de fuerzas en los flujos es tal que en puntos correspondientes, los tipos idénticos de fuerzas (tal como la fuerza cortante, presión, etc) son paralelas y la relación entre sus módulos es constante para todos los tipos de fuerzas. Las condiciones para la semejaza dinámica son que los flujos tienen que ser cinematicamente semejantes y además las distribuciones de las masas deben ser tales que la relación de las densidades en puntos correspondientes de los flujos tengan el mismo valor para todos los conjuntos de puntos. A estos que satisfacen esta ultima condición se dice que tienen distribuciones de masas semejantes.

$$\frac{F_1}{F_{1m}} = \frac{F_2}{F_{2m}} = \frac{F_3}{F_{3m}} = \frac{Ma_4}{M_n a_{4m}}$$
(1.1)

La similitud completa como bien se dijo antes, requiere la satisfacción simultanea de la similitud geométrica, cinemática y dinámica Por supuesto los flujos cinematicamente similares deben ser geométricamente similares. Pero si las distribuciones de masa en los flujos

Capítulo 1.

son similares de la ecuación 1.1 se ve que los flujos cinematicamente similares son automáticamente similares por completo.

Como un ejemplo: para fluidos de densidad constante, la similitud cinemática garantiza la similitud completa, en tanto que la similitud geométrica más la dinámica garantizan la similitud cinemática.

El manejo de las distribuciones de masas de una forma lo más similar posible en la construcción de nuestro modelo, es de gran importancia para poder aplicar la teoría de modelo de una forma más sencilla, garantizándonos obtener resultados confiables.

Las fuerzas que pueden afectar un campo de flujo son las de presión, Fp; las de inercia Fi; gravedad Fg; viscosidad, Fv; elasticidad, Fe; y tensión superficial Ft.

Para que se obtenga la similitud dinámica entre dos campos de flujo [22], cuando sobre los mismos actúan todas estas fuerzas, todas las relaciones de fuerzas correspondientes en el modelo y en el prototipo deben ser las mismas así esta similitud se puede expresar por las siguientes cinco ecuaciones simultaneas.

$$\left(\frac{Fi}{Fv}\right)_{p} = \left(\frac{Fi}{Fv}\right)_{m} = \left(\frac{Vl\rho}{\mu}\right)_{p} = \left(\frac{Vl\rho}{\mu}\right)_{m}; \qquad \text{Rp} = \text{Rm} \qquad (1.3)$$

$$\left(\frac{Fi}{Fg}\right)_p = \left(\frac{Fi}{Fg}\right)_m = \left(\frac{V^2}{\lg_n}\right)_p = \left(\frac{V^2}{\lg_n}\right)_m; \qquad Fp = Fm \qquad (1.4)$$

$$\left(\frac{Fi}{Fe}\right)_{p} = \left(\frac{Fi}{Fe}\right)_{m} = \left(\frac{\rho V^{2}}{E}\right)_{p} = \left(\frac{\rho V^{2}}{E}\right)_{m}; \qquad Mp = Mm \quad (1.5)$$

$$\left(\frac{Fi}{Ft}\right)_{p} = \left(\frac{Fi}{Ft}\right)_{m} = \left(\frac{\rho l V^{2}}{\sigma}\right)_{p} = \left(\frac{\rho l V^{2}}{\sigma}\right)_{m} \qquad Wp = Wm \quad (1.6)$$

Para el trabajo con estas ecuaciones y una mejor compresión de las mismas, es útil definir un juego de números adimensionales de similitud dinamita:

Número deEuler,
$$E = V \sqrt{\frac{\rho}{2\Delta p}}$$

Número de Reynolds, $R = \frac{Vl}{v}$

Número de Fraude,
$$F = \frac{V}{\sqrt{\lg_n}}$$

Relación de la fuerza de presión a la fuerza de inercia.

Relaciona la fuerza de inercia a la fuerza de fricción, normalmente en función de parámetros geométricos y de flujo adecuados.

Relaciona la fuerza de inercia a la fuerza de gravedad. Si existe una superficie libre, tal como en el caso de los ríos, la forma de esta superficie al formarse hondas, se verá afectada por la fuerza de gravedad y por tanto en este tipo de problema el numero de Froude será significativo.

Numero deCauchy, $C = \frac{\rho V^2}{E}$ Numero de Weber, $W = \frac{\rho l v^2}{\sigma}$

Relaciona la fuerza de inercia con la fuerzas elásticas.

Relación de la fuerza de inercia a la fuerza debida a la tensión superficial. También se requiere la presencia de superficies libres, pero cuando se trata de cuerpos de grandes dimensiones, como buques en fluido tal como en el agua, este efecto es muy pequeño.

Numero de Mach ,
$$\sqrt{\frac{\frac{V^2}{L}}{\frac{c^2}{L}}} = \frac{V}{c}$$

Relación de la raíz cuadrada de la fuerza de inercia a la raíz cuadrada de la fuerza que tiene su origen en la compresibilidad del fluido. Es de gran importancia en los flujos de elevada velocidad, donde las variaciones de densidad, debidas a la presión son significativas.

Como bien se dijo anteriormente estas ecuaciones de reacción de fuerzas se pueden escribir en función de estos números adimensionales.

Por fortuna en la mayor parte de los problemas de ingeniería no es necesario el empleo de todas las ecuaciones, ya que algunas de las fuerzas establecidas pueden no actuar, pueden ser despreciables o pueden oponerse a otras fuerzas de manera tal que se reduzca el efecto de ambas. Es necesario señalar la importancia de conocer en detalles el fenómeno del fluido que se trate para poder hacer las consideraciones y simplificaciones pertinentes que nos permita el no incurrir en errores que puedan afectar los resultados.

Conclusiones Parciales.

- A partir del análisis realizado al diseño del aerogenerador propuesto por Morales [30] se detectó que:
 - Falta un grupo elementos básicos para su culminación, entre los que se encuentran: las palas, la torre, el sistema de anclaje de la torre al suelo y el sistema de izaje.
 - En el sistema de fijación que une las palas con la carcaza (unión por tornillos), no garantiza una simetría angular entre las palas (ángulo de 120 grados).
 - Existe un sobredimensionamiento en el diámetro de la brida y en el número de tornillos que une el aerogenerador con la torre.
- 2. En el diseño de maquinas eólicas se debe prestar especial atención al análisis de las cargas que se producen producto del funcionamiento del equipo (cargas internas).
- La construcción de modelos para el estudio de fenómenos de fluidos es una vía de análisis cuya utilización se justifica solamente cuando el método analítico es complejo o no garantiza resultados confiables.

Capítulo 2. Análisis de semejanza. Metodología para el cálculo del sistema de regulación por momento de inercia.

2.1. Introducción.

El análisis de los sistemas de regulación por momento de inercia en aerogeneradores de baja potencia suele ser un tanto complicado, según Piggot [31] esto se resuelve de forma aproximada mediante pruebas de campos con prototipo utilizando métodos de tanteo y error. Esta solución tiene el inconveniente de elevar el costo de obtención del diseño, lo cual es un aspecto importante a tener en cuenta.

El empleo de software de modelación para dar solución a este tipo de problema es una tendencia actual en este campo y una vía de análisis a tener en cuenta dada las facilidades que brinda.

En el presente capítulo se analiza la posibilidad de modelación en túnel de viento del aerogenerador propuesto por Morales [30], para lo cual en un primer análisis, se obtiene la velocidad a la que debe ser probado el modelo en el túnel de viento.

Se desarrolla también una metodología de cálculo basada en las características del sistema de regulación propuesto en [30], pudiéndose utilizar la misma de forma general para sistemas de este tipo y con la cual se obtiene la fuerza que debe ejercer el viento sobre la aeroturbina para que comience a actuar el mecanismo de regulación. Además se incluyen los cálculos correspondientes de los tornillos de las palas, del mecanismo de giro y de la base de la torre.

2.2. Análisis de Semejanza. Cálculo de la velocidad de ensayo del Modelo.

El empleo de la modelación en túneles de viento, según se expone en el epígrafe 1.7, puede ser una solución ventajosa desde el punto de vista económico para abordar el estudio del diseño que se analiza. Basados en la teoría sobre la construcción de modelos y prototipos de la Mecánica de los Fluidos, de la cual se abordaron algunos aspectos básicos en el epígrafe antes mencionado, es que se realiza el siguiente análisis.

Como se conoce para lograr una similitud dinámica se debe cumplir la similitud geométrica y la cinemática. Esto presupone un escaldo de las dimensiones y lograr similitud de Números de Reynolds y Euler.

Similitud geométrica:

Capítulo 2

El factor de escala de 1:10 con que se analiza el modelo propuesto está en función de la forma y dimensión del túnel, con que se cuenta en el laboratorio para hacer el análisis. Datos

 $L_P = 2m$ (longitud características en el modelo) (radio del rotor)

$$\frac{L_p}{L_m} = \frac{2m}{0.20m} = \text{Fe (factor de escala)} = 10$$
(2.1)

 $L_M = 0.20$ m (longitud características en el prototipo) (radio del rotor).

Similitud de Reynolds:

A continuación se expondrá el cálculo de la velocidad a la que se debe ensayar el modelo en el túnel de viento a partir de la semejanza geométrica y con igualdad del números de **Reynolds** [24].

Datos

 $V_p = 8$ m/s (Velocidad media del viento para las condiciones de trabajo en el prototipo) V_m (velocidad del viento a la que debe probarse el modelo en el túnel de viento)=? Igualando los números de Reynolds

$$\left(\frac{VL_p}{v}\right)_p = R_p = R_m = \left(\frac{VL_m}{v}\right)_m$$
(2.2)

donde:

- R_p y R_m números de Reynols del prototipo y el modelo respectivamente.
- L_P y L_m longitudes características del el modelo y el prototipo respectivamente, que para el caso analizado son las longitudes en los perfiles de las palas (ver nexo 01-01-08).
- ν , es la viscosidad del aire a presión y temperatura normal.

entonces

$$V_m = V_P * Fe$$

$$V_m = 8m/s * 10$$

$$V_m = 80m/s$$

Como se puede constatar dado el valor de V_m , la velocidad a la que debe ser probado el modelo en el túnel es muy alta, con lo cual se corre el riesgo de que se destruya el equipo en

5

Capítulo 2

el túnel, además de que pueden ocurrir efectos de compresibilidad lo cual anularía cualquier resultado confiable en el ensayo. Con un cambio de fluido, por ejemplo agua o la utilización de un túnel más grande pudieran lograrse velocidades de flujo mucho menores, pero estas soluciones tienen el inconveniente de que se tendrían que construir instalaciones con estos fínes, que en la actualidad no existen en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Mecánica, trayendo consigo un aumento considerable en los costos del prototipo.

Se debe señalar que un resultado similar se obtuvo por un grupo de especialistas que pertenecen a la lista de discusión "awea-viento-home", de Yahoogroups.com.

2.3. Metodología para el cálculo del sistema de regulación por momento de inercia.

A continuación se desarrolla una metodología la cual permite obtener la fuerza necesaria que debe ejercer el viento sobre el aerogenerador para que comience ha actuar el mecanismo de regulación.

Para realizar este cálculo es necesario obtener los momentos y productos de inercia de los elementos del aerogenerador que tiene movimiento, dado lo complejo y engorroso que resulta este cálculo debido a la forma geométrica de los elementos, se obtienen los mismos por el software Autocad 2000 a través de los dibujos en 3D previamente realizados en este programa.

En la figura # 2.1, se esquematizan los elementos en que se dividió el aerogenerador para su análisis cinemático, mostrándose en la figura # 2.2 el sistema de coordenadas globales utilizadas para la determinación de los momentos y productos de inercia, así como el punto de aplicación respecto al cual se tomaran los mismos.



Figura 2.1 Representación del sistema de coordenadas global y de los elementos del aerogenerador.



Figura 2.2 Inclinación de los ejes de condenadas donde (α) es el ángulo de inclinación de la cola respecto a la vertical y (β) el de inclinación con respecto al eje del rotor lo cual permite la determinación de las componentes de la velocidad angular de la cola, respecto al sistema de coordenadas señalado en la Figura # 2.1.

Nomenclatura.

- $n_y \rightarrow Velocidad de rotación de la hélice en y.$
- $Wy \rightarrow Velocidad$ angular de la hélice en y.
- $Wz \rightarrow Velocidad$ angular del generador en z.
- $Wc \rightarrow Velocidad$ angular de la cola.

7

Wxc, Wyc, Wzc \rightarrow Componente en x, y, z de la Wc.

Wx', Wy'; Wz'→Velocidades angulares del aerogenerador.

 Ix_i , Iy_i , $Iz_i \rightarrow$ Momentos de inercia de cada elemento i, en que se divide el aerogenerador.

 Px_i , Py_i , $Pz_i \rightarrow$ Productos de inercia de cada elemento i, en que se divide el aerogenerador.

 $r_i \rightarrow Distancia$ entre el eje del generador y el eje de giro del aerogenerador en x. Ver anexo (01-00-00).

 $r_k \rightarrow Distancia$ entre el eje del generador y el eje de giro del aerogenerador en z. Ver anexo (01-00-00).

 $Fj \rightarrow$ Fuerza ejercida por el viento sobre el aerogenerador para que entre en funcionamiento el sistema de regulación en y.

Para iniciar los cálculos se deben tener los siguientes datos:

 $n_{y} (rpm)$ Wz (rad/s) $\vec{r} = r_{i} (m) + r_{k} (m)$ (2.4)

<u>Cálculos</u>

Se realizará una sumatoria de momentos sobre el eje de giro del generador.

Estos están determinados por los momentos de inercia provocados por los diferentes componentes del aerogenerador y la fuerza ejercida por el viento sobre el mismo [8].

$$\sum Mo = \text{Brazo}(\bar{r}) \times \text{Fuerza}(\mathbf{Fj})$$
(2.5)

También este momento se puede expresar como:

$$\sum Mo = \frac{\delta h_0}{\delta t} + \Omega x h_0$$
(2.6)

Capítulo 2

Donde:

 $\frac{\delta h_0}{\delta t}$ (Variación del Momento cinético con respecto al viento) = 0 Debido a que la velocidad angular del aerogenerador se asume constante, puesto que se está analizando cuando comienza a actuar el mecanismo de regulación.

Por lo que:

$$\sum Mo = \Omega x h_0 \tag{2.7}$$

Ahora bien:

$$\Omega$$
 (Rotación del sistema en el eje z) = Wz (2.8)

 h_{θ} , es el momento cinético del aerogenerador respecto al sistema de coordenadas utilizado.

$$\boldsymbol{h}_{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{h}\mathbf{x} + \mathbf{h}\mathbf{y} + \mathbf{h}\mathbf{z} = \mathbf{h}\mathbf{x}\mathbf{i} + \mathbf{h}\mathbf{y}\mathbf{j} + \mathbf{h}\mathbf{z}\mathbf{k}$$
(2.9)

Componentes en los tres ejes del momento cinéticos del aerogenerador

$$hx = (Wx' * Ix') - (Wy' * Pxy') - (Pxz' * Wz')$$
(2.10)

$$hy = -(Pxy' * Wx') + (Iy' * Wy') - (Pyz * Wz')$$
(2.11)

$$hy = -(Pxz' * Wx') - (Pyz' * Wy') + (Iz * Wz')$$
(2.12)

Para obtener las componentes del momento cinético se tiene que:

$$\mathbf{W}\mathbf{y} = \frac{n_y \bullet \pi}{30} \ [\text{ rad/s}]$$
(2.13)

Las componentes en los tres ejes de la velocidad angular de la cola, respecto al sistema de coordenadas principales.

$$\mathbf{Wzc} = -\mathbf{Wc} * \cos \alpha \tag{2.14}$$

 $\mathbf{Wxc} = -\mathbf{Wc} * \operatorname{sen} \alpha * \cos \beta \tag{2.15}$

$$\mathbf{Wyc} = \mathbf{Wxc} \tag{2.16}$$

Las componentes de la velocidad angular del aerogenerador.

$$\mathbf{W}\mathbf{y}^{*} = \mathbf{W}\mathbf{y} + \mathbf{W}\mathbf{y}\mathbf{c} \tag{2.17}$$

$$\mathbf{W}\mathbf{z}^{\prime} = \mathbf{W}\mathbf{z} + \mathbf{W}\mathbf{z}\mathbf{c} \tag{2.18}$$

$$\mathbf{Wx'} = \mathbf{Wx} + \mathbf{Wxc} \tag{2.19}$$

Las componentes del momento de inercia del aerogenerador.

$$Ix' = \sum Ix_{1} = Ix_{1} + Ix_{2} + Ix_{3} + Ix_{4}$$
(2.20)

$$Iy' = \sum Iy_1 = Iy_1 + Iy_2 + Iy_3 + Iy_4$$
(2.21)

$$Iz' = \sum Iz_1 = Iz_1 + Iz_2 + Iz_3 + Iz_4$$
(2.22)

componentes del producto de inercia del aerogenerador.

$$Pxy' = \sum Pxy_1 = Pxy_1 + Pxy_2 + Pxy_3 + Pxy_4$$
(2.23)

$$Pyz' = \sum Pyz_1 = Pyz_1 + Pyz_2 + Pyz_3 + Pyz_4$$
(2.24)

$$Pxz' = \sum Pxz_1 = Pxz_1 + Pxz_2 + Pxz_3 + Pxz_4$$
(2.25)

Para obtener la fuerza mínima **Fj** que debe ejercer el viento sobre el aerogenerador (en especial sobre las paletas) para que comience a actuar el mecanismo de la cola, se_igualan las ecuaciones 2.5 y 2.7

$$\sum Mo = \mathbf{r}_{i} (\mathbf{m}) + \mathbf{r}_{k} (\mathbf{m}) \mathbf{x} \quad \mathbf{Fj} = \Omega \mathbf{x} \mathbf{h}_{0}$$
(2.26)

Dado que el autor ha realizado una aplicación sobre el tabulador Microsoft Excel de la metodología propuesta, la misma brinda la posibilidad de interactuar con los diseños que se analicen, gracias a que los elementos con que cuenta en su base de datos pueden ser modificados.

Capítulo 2



a de regulación por momento de inercia.

2.4. Cálculo de los tornillos de las palas.

Para el análisis realizado a la unión por tornillos en las palas se tiene, que la misma cuenta con 4 tornillos M10 X1 con una distribución como se muestra en la figura 2.3.

Dado que la única fuerza que ejerce un efecto considerable sobre la unión es la de inercia (Fi) producto del movimiento de rotación de las palas, se chequean los tornillos solamente a cortante.



Figura 2.3 – Representación de la fuerza de inercia en la pala, así como la distancia del centro de rotación al centro de masa de la pala. Datos

w (velocidad angular de las palas) = 300 rpm = 31.14 rad/s
m (masa de las palas) = 3.28 kg
r (distancia del centro de rotor al centro de masa de la pala) = 0.75m

La fuerza de inercia de la pala es:

$$Fi = m * w^{2}_{NAX} * r = 2385N$$
(2.27)

Calculo de la clase del tornillo.

$$\delta_{t} = \frac{5.2 * P_{0}}{\pi * d_{1}^{2}} \le \left[\delta_{t}\right]$$
(2.28)

Donde:

 δ_t (clase del tornillo)

 d_1 (*diámetro de la raíz de la rosca*)= 8.918mm, según (manual complementario). P_0 (*carga resultante sobre la unión*) = V'+ P (2.29)

 $I_0(\operatorname{curg} u \operatorname{result} u \operatorname{mon}) \quad i \in I$

P (fuerza de tracción resultante)= 0, no existe fuerza de tracción en los tornillos.

Por lo que:

$$P_0 = V'$$
 (2.30)

Entonces:

$$V'(pretensión\ inicial) = \frac{\delta^* Q}{i^* f}$$
(2.31)

Donde:

 δ (coeficiente de seguridad) = 1.5 i (# de superficies en contacto) = 1 f (coeficiente de rozamiento) = 0.6 (acero-madera) Q (fuerza cortante resultante) = Fi= 2385N Por lo que:

$$V' = 5962.5 N = P_0 \tag{2.32}$$

y nos queda que:

 $\delta_t = 124 \text{ N/mm}^2$

De la condición de resistencia se tiene:

$$\delta_t = \delta_Y * 0.4 \tag{2.33}$$

$$\delta_{Y} = \frac{\delta_{t}}{0.4} = \frac{124Nmm^{2}}{0.4} = 310Nmm^{2}$$
(2.34)

 δ_y (tensión de fluencia del tornillo)

Entonces con δy y según Álvarez [4] se obtiene para los tornillos analizados una clase de 5.8 con lo cual [δt]=400*N/mm*².

Se cumple que $310N/mm^2 < <400N/mm^2$, por lo que los tornillos resisten las solicitaciones de cargas a que son sometidos. Hay que señalar que la unión fue diseñada teniendo en cuenta la geometría de la esta, lo cual justifica el amplio de seguridad que presentan en cuanto a su resistencia.

2.5. Cálculo de los tornillos del mecanismo de giro.

En la unión por brida del mecanismo de giro del aerogenerador, anexo (00-00-00) se cuenta con cuatro tornillos M16 X1,5. En la figura 3.4 se representan las fuerzas y momentos que actúan sobre el rotor y que a su vez producen efecto a tracción y a cortante en la unión. Estas fuerzas son obtenidas aplicando la metodología sobre el tabulador Excel propuesta por Casanova [9]. El análisis dinámico-cinemático que realiza la misma, tiene en cuenta la acción ejercida por el viento sobre las palas, además de la que se produce por el movimiento de rotación de estas y del aerogenerador en su conjunto (movimiento giroscópico).



Figura 2.4 – Fuerzas que actúan sobre el rotor, distancias correspondientes del centro de giro del rotor al eje de giro del aerogenerador.

Datos:

Fx(fuerza sobre el rotor en el eje x) = 5.1N Fy(fuerza sobre el rotor en el eje y) = 35N Fz(fuerza sobre el rotor en el eje z) = -3.2N My(momento sobre el rotor en el eje y) =152000 Nmm

Cálculo de la clase del tornillo.

$$\delta_{t} = \frac{5.2 * P_{0}}{\pi * d_{1}^{2}} \le \left[\delta_{t}\right]$$
(2.35)

Donde:

 δ_t (clase del tornillo)

 d_1 (diámetro de la raíz de la rosca)= 14.918 mm, según [4]

$$P_0 (carga resultante sobre la unión) = V' + P$$
(2.36)

Capítulo 2

Para calcular V' y P

Análisis de fuerzas y momentos para los tres planos.

<u>Plano xz</u>



Fig 2.5- Esquema de carga plano xz

En el esquema anterior se representan la sumatoria de momentos y fuerzas al centro de la unión en el plano xz. Los cálculos correspondientes se exponen a continuación.

MyFx (momento en y producido por la fuerza en x) = Fx*417.5mm(2.37) MyFx = 5.1N*417.5mm = 2133Nmm

MyFz (momento en y producido por la fuerza en z) = Fz*167.5mm(2.38) MyFz = -3.1*167.5mm = -520.9Nmm

MRxz (momento resultante en el plano xz) = MyFx + (-My-MyFz)(2.39) MRxz = 2133Nmm + (-152000Nmm - 520Nmm) = 150387Nmm

$$PMxz = \frac{MRxz * xk}{\sum (x_i^2 * z_i)}$$
(2.40)

Donde:

PMxz(fuerza axial en el plano xz producto MRxz) xk(coordenadas en el eje x del tornillo mas alejado respecto al pivote) xi(coordenadas en el eje x de cada tornillo respecto al pivote) z_i(# de tornillos para cada coordenada x respecto al pivote)

$$PMxz = \frac{150387Nmm*136mm}{(136^2mm*1) + (77.5^2mm*2) + (19^2mm*1)} = 662N$$

<u>Plano yz</u>



Fig 2.6- Esquema de carga plano yz

$$P_{Z} = \frac{F_{Z}}{Z} \tag{2.41}$$

Donde:

Pz(fuerza axial en la unión producta de la fuerza en el eje z) Z(# de tornillos de la unión)= 4

$$Pz = \frac{-3.1}{4} = -0.81N$$

MxFy (momento en x producido por la fuerza en y) = Fy*417.5mm(2.42) MxFy=35*417.5mm=14612.5Nmm

MxFz (momento en x producido por la fuerza en z) = Fz*377.5mm(2.43) MyFz = -3.1*377.5mm = -1218Nmm

$$MRyz (momento resultante en el plano yz) = MxFy-MxFz$$
(2.44)
$$MRyz = 14612.5Nmm - 1218Nmm = 13394.5Nmm$$

$$PMyz = \frac{MRyz * yk}{\sum (y^2_i * z_i)}$$
(2.45)

Donde:

PMyz(fuerza axial en el plano yz producto MRyz) yk(coordenadas en el eje y del tornillo mas alejado respecto al pivote) y_i (coordenadas en el eje y de cada tornillo respecto al pivote) z_i (# de tornillos para cada coordenada y respecto al pivote)

$$PMyz = \frac{150387Nmm*136mm}{\left(136^2mm*1\right) + \left(77.5^2mm*2\right) + \left(19^2mm*1\right)} = 662N$$

<u>Plano xy</u>

En este plano se analizan las fuerzas y momentos que producen cortante en los tornillos.



Fig 2.7- Esquema de carga plano xy.

$$Px = \frac{Fx}{Z} \tag{2.46}$$

Donde:

Px(*fuerza en el eje x que produce cortante en el plano yx*)

$$Px = \frac{5.11N}{4} = 1.3N$$

$$Py = \frac{Fy}{Z}$$
(2.47)

donde:

Py(fuerza en el eje y que produce cortante en el plano yx)

$$Py = \frac{35N}{4} = 8.75N$$

MzFy (momento en z producido por la fuerza en y) = Fy*167.5mm(2.48) MzFy=35N*167.5mm=5862.5Nmm

MzFx (momento en z producido por la fuerza en x) = Fx*377.5mm(2.49) MzFx = 5.11*377.5mm = 1929Nmm

 $MRxy(momento \ resultante \ en \ el \ plano \ xy) = MzFx + MzFy$ (2.50) MRxy = 1929Nmm + 5862.5Nmm = 7791.5Nmm

$$Q = \frac{MRxy * rk}{\sum (r_i^2 * z_i)}$$
(2.51)

donde:

Q(fuerza cortante en el plano xy producida por MRxy) rk(radio del centro de la unión al tornillo mas alejado) r_i (radio del centro de la unión a cada tornillo) z_i (# de tornillos para cada radio)

 $\mathbf{r}\mathbf{k} = \mathbf{r}_{\mathbf{i}} = 58.5$ mm, por ser una unión por brida (2.52)

$$Q = \frac{7791.5Nmm*58.5mm}{(58.5^2 mm*4)} = 33.3N$$

$$Q_R = \sqrt{\sum Qx^2 + \sum Qy^2}$$
(2.53)

Donde:

 Q_R (fuerza cortante resultante) $\Sigma Q x^2$ (sumatoria de fuerza que producen cortante en x) $\Sigma Q y^2$ (sumatoria de fuerza que producen cortante en y)

$$Q_R = \sqrt{(33.3N + 1.3N)^2 + (8.75N)^2}$$

 $Q_{R} = 35.7N$

$$V'(pretension\ inicial) = \frac{\delta^* Q_R}{i^* f}$$
(2.54)

Donde:

 δ (coeficiente de seguridad)= 1.5 i (# de superficies en contacto)= 1 f (coeficiente de rozamiento)= 0.5 (acero-acero) Q_R (fuerza cortante resultante)= 35.7N

V' = 357N

$$P = PMxz + PMyz - Pz \tag{2.55}$$

donde:

 $P(fuerza \ axial \ resultante \ sobre \ los \ tornillos)$ P = 662N + 59N - 0.81N = 720.2N

 $P_{\theta} (carga \ resultante \ sobre \ la \ unión) = V' + P$ $P_{\theta} = 357N + 720.2N = 1077N$ (2.56)

la clase del tornillo es:

$$\delta_t = \frac{5.2 * 1077N}{\pi * (14.918mm)^2} = 8N / mm^2$$

según la condición de resistencia:

 $\delta_t = (0.4)\delta y \tag{2.57}$

 δy (tensión de fluencia del tornillo)

$$\delta y = \frac{8N/mm^2}{0.4} = 20N/mm^2$$

Entonces con δy y según Álvarez [4] se obtiene para los tornillos analizados una clase de 3.6 con lo cual $[\delta t]=180N/mm^2$.

Entonces se cumple que $20N/mm^2 << 180N/mm^2$. por lo que los tornillos resisten todas las cargas a que son sometidos. Hay que señalar que los tornillos fueron diseñados teniendo en cuenta la geometría de la unión, lo cual justifica el amplio margen de seguridad que presentan en cuanto a su resistencia.

2.6. Cálculo de los tornillos en la base de la torre

La unión por tornillos en la base de la torre cuenta con 4 tornillos M20 X2 (Ver anexo(03-00-00)), sobre los mismos actúan las fuerzas y momentos analizados en la unión del mecanismo de giro del aerogenerador, además de la fuerza que ejerce el viento sobre la torre. En la figura 3.5 se esquematizan todas las fuerzas y momentos correspondientes a los planos **xz**, **yz**, respectivamente.



Figura 2.5 – Fuerzas y momentos que actúan sobre la torre, distancias correspondientes del centro de la unión al centro de masa de la torre y del pivote a cada tornillo(xi, yi)

La fuerza que ejerce el viento sobre la torre se obtiene según Vernard [24] como:

$$Fv = \frac{1}{2} * \rho * A * CD * Vv^2$$
(2.58)

Donde:

 ρ (densidad de aire)=1.1774kg/m³ A(área de la torre proyectada en el plano)= 2.34m² CD(coeficiente de arrastre), según Vernard [24] = 0.9 Vv(velocidad máxima del viento)= 30m/s

Entonces:

$$Fv = \frac{1}{2} * 1.1774 kg / m^{3*} 2.34 m^2 * 0.9 * (30m / s)^2 = 1116N$$

Para el cálculo de la clase del tornillo en esta unión se trabaja con la misma que en el epígrafe anterior.

Calculo de la clase del tornillo.

$$\delta_{t} = \frac{5.2 * P_{0}}{\pi * d_{1}^{2}} \le [\delta_{t}]$$
(2.59)

Capítulo 2

Donde: $d_1 = 17.835 \text{ mm}, \text{ según [4]}$ $P_0 = V' + P$

Para calcular V' y P

Análisis de fuerzas y momentos para los tres planos.

<u>Plano xz</u>



Figura 2.6- Esquema de carga plano xz.

En el esquema anterior se representan la sumatoria de momentos y fuerzas al centro de la unión en el plano **xz**. Los cálculos correspondientes se exponen a continuación.

MRxz (momento resultante en el plano *xz* producto del análisis a los tornillos del mecanismo de giro)=-150387Nmm

MyFx (momento en y producido por la fuerza en x) = Fx*10010mm(2.61) MyFx = 5.1N*10010mm = 51151mm

MRxz'(momento resultante en el plano xz) = MyFx-MRxz(2.62) MRxz' = 51151Nmm-150387Nmm = -99236Nmm

$$PMxz = \frac{MRxz'*xk}{\sum (x_i^2 * z_i)}$$
(2.63)

(2.60)

donde:

PMxz'(fuerza axial en el plano xz producto MRxz')

$$Q = \frac{MRxy * rk}{\sum (r_{i}^{2} * z_{i})}$$
(2.64)

$$PMxz = \frac{-99236Nmm*370nm}{(370^2 mm*2) + (30^2 mm*2)} = -133N$$

<u>Plano yz</u>



Figura 2.7- Esquema de carga plano yz.

En el esquema anterior se representan la sumatoria de momentos y fuerzas al centro de la unión en el plano yz.

MRyz (momento resultante en el plano yz producto del análisis a los tornillos del mecanismo de giro)=13394.5Nmm

$$Pz = \frac{Fz}{Z} \tag{2.65}$$

Donde:

Pz(fuerza axial en la unión producto de la fuerza en el eje z) Z(# de tornillos de la unión)= 4

$$Pz = \frac{-3.1}{4} = -0.81N$$

MxFy (momento en x producido por la fuerza en y) = Fy*10010mm(2.66) MxFy=35*10010mm=350350Nmm

MxFv (momento en x producido por la fuerza del viento) = Fv*4500mm (2.67) MyFz = 1116Nmm*4500mm = 5022000Nmm

MRyz' (momento resultante en el plano yz) = MxFy+MxFv+MRyz (2.68) MRyz' = 350350Nmm+5022000Nmm+13394.5 = 5425744.5Nmm

$$PMyz = \frac{MRyz * yk}{\sum (y_i^2 * z_i)}$$
(2.69)

Donde:

PMyz(fuerza axial en el plano yz producto MRyz') **yk**(coordenadas en el eje y del tornillo mas alejado respecto al pivote) **y**_i(coordenadas en el eje y de cada tornillo respecto al pivote) **z**_i(# de tornillos para cada coordenada y respecto al pivote)

$$PMyz = \frac{5425744.5Nmm*1370m}{(370^2 mm*2) + (370^2 mm*2)} = 7284N$$

<u>Plano xy</u>

En este plano se analizan las fuerzas y momentos que producen cortante en los tornillos.



Figura 2.8- Esquema de carga plano xy.

$$Py = \frac{(Fy + Fv)}{4} = \frac{(35N + 1116N)}{4} = 1151N$$
(2.70)

$$Px = \frac{Fx}{4} = \frac{5.11N}{4} = 1.3N \tag{2.71}$$

$$Q = \frac{MRxy*rk}{\sum (r_i^2 * z_i)} = \frac{7791.5Nmm*240mm}{(240mm^2 * 4)} = 8N$$
(2.72)

las componentes de Q en los ejes x, y son:

Qx = sen 0.7 * 8 = 5.7N = Qy Esto se debe a que los tornillos se encuentran a una misma distancia del centro de la unión.

$$Q_R = \sqrt{\sum Qx^2 + \sum Qy^2}$$
(2.73)

Donde:

$$Q_R = \sqrt{(5.7N - 1.3N)^2 + (5.7 + 288)^2} = 293.7N$$

Entonces:

$$V'(pretension\ inicial) = \frac{\delta^* Q_R}{i^* f} = \frac{1.5 * 293.7N}{1 * 0.15} = 2937N$$
(2.74)

$$P = PMxz + PMyz - Pz = -133N + 7284N + 0.81N = 7150N$$
(2.75)

$$P_0 = V' + P = 2937N + 7150N = 10087N \tag{2.76}$$

$$\delta_t = \frac{5.2 * 10087N}{\pi * (17.835mm)^2} = 52N / mm^2$$

según la condición de resistencia:

$$\delta_{t} = (0.4)\delta_{y}$$
(2.77)
$$\delta_{y} = \frac{52N / mm^{2}}{0.4} = 130N / mm^{2}$$

Capítulo 2

Entonces con δy y según Álvarez [4] se obtiene para los tornillos analizados una clase de 3.6 con lo cual $[\delta t]=180N/mm^2$.

Entonces se cumple que $130 \text{Nm}^2 < 360 \text{N/mm}^2$. por lo que los tornillos resisten todas las cargas a que son sometidos.

Conclusiones parciales

- No es factible ensayar un modelo a escala 1:10 del aerogenerador propuesto por Morales[30], en un túnel de viento, a una velocidad de fluido de 80m/s.
- 2. Se debe analizar la posibilidad de la simulación a través de software de computación.
- 3. Se desarrolló una metodología implementada sobre el tabulador Microsoft Excel la cual permite obtener la fuerza que debe ejercer el viento sobre el aerogenerador para que comience a actuar el mecanismo de regulación por momento de inercia.
- 4. Las uniones por tornillos en las palas, el mecanismo de giro y la torre resisten el sistema de cargas impuesto por el sistema.

Capítulo 3. Aplicación de la metodología.

3.1. Introducción.

En este capítulo se analiza la posibilidad de la simular el funcionamiento del aerogenerador propuesto en [30],a través del software "WorkingModel". Además se exponen los resultados obtenidos por la aplicación de la metodología desarrollada en el Capítulo 2 para el cálculo del sistema de regulación.

Por último se detallan los nuevos elementos y las modificaciones introducidas al aerogenerador con lo cual se logra poner a punto el diseño de esta máquina.

3.2. Resultado del análisis realizado para la modelación, con software especializados, del funcionamiento del aerogenerador.

El empleo de la modelación computacional es una herramienta muy utilizada en nuestros días para dar solución a diversos problemas ingenieriles. El sistema analizado en este trabajo requiere un análisis complejo.

Es por ello que el autor realiza un análisis sobre el tema con el objetivo de seleccionar un programa de modelación a través del cual se logre simular el funcionamiento de aerogenerador y obtener resultados válidos.

Teniendo en cuenta los programas de este tipo con que se contaban así como los conocimientos y experiencias en el trabajo con ellos se escogió el software **Working Model 2.0** para realizar la modelación. Este programa tiene la ventaja de que sobre el se puede modelar diversos tipo de mecanismos, pudiéndole aplicar a los mismos distintos valores de carga y velocidad, además brinda la posibilidad de obtener los análisis cinemáticos y dinámicos correspondientes para cada caso que se analice.

El inconveniente que surgió y que a la postre impidió la utilización de este programa estuvo dada, en que con el mismo no se pudo simular de forma satisfactoria los efectos que produce el viento sobre el aerogenerador, dado por los cambios de velocidad y dirección que experimenta en la realidad; además de que no se pudo coordinar todos los movimientos del equipo en función de estos efectos.

3.3. Cálculo del sistema de regulación por momento de inercia.

A través de la metodología propuesta por el autor, para el cálculo del sistema de orientación, se obtiene la fuerza que debe ejercer el viento sobre el aerogenerador para que comience a actuar el mecanismo de regulación por momento de inercia. Para el trabajo con este procedimiento de cálculo (el cual fue desarrollado sobre el tabulador Excel, dada las ventajas que este brinda), se requiere una serie de datos los cuales están en correspondencia con las características del diseño de la maquina y más específicamente de la cola. Se brinda a continuación el calculo del sistema de regulación propuesto por Morales [#], para lo cual se requieren los siguientes datos.

Datos para el cálculo del sistema de regulación por momento de	Símbolo	Valor		
inercia.				
Velocidad de rotación de la hélice en y [rpm]	ny	300		
Velocidad angular del aerogenerador en el eje x [rad/s]	Wx	0		
Velocidad angular del aerogenerador en el eje z [rad/s]	Wz	6.283		
Distancia entre el eje del generador y el eje de giro del	r _i	0.172		
aerogenerador en el eje x [m]				
Distancia entre el eje del generador y el eje de giro del	rk	0.333		
aerogenerador en z [m]				
Distancia entre el eje del generador y el eje de giro del	rj	0		
aerogenerador en j [m]				

Además se requiere de los momentos y productos de inercia respecto al sistema de coordenadas global escogido (ver figura 2.1 y 2.2), de los cuatro elementos en que fue dividido el aerogenerador. Estos fueron obtenidos a través del software Autocad 2000.

Elemento # 1 (Anexo 02-00-00)

	Eje x	Eje y	Eje z
Momento de inercia [I]	43kg/m ²	8.5 kg/m^2	30 kg/m^2
Producto de inercia [P]	14 kg/m^2	8.23 kg/m^2	22.43 kg/m^2

Elemento # 2 (Anexo 01-08-02-00)

	Eje x	Eje y	Eje z
Momento de inercia [I]	12.7 kg/m^2	3.27 kg/m^2	8.78 kg/m ²
Producto de inercia [P]	6.75 kg/m^2	2.87 kg/m^2	6.74 kg/m^2

Capítulo 3. __

Elemento # 3 (Anexo 01-08-00)

	Eje x	Eje y	Eje z
Momento de inercia [I]	31 kg/m^2	6.45 kg/m^2	19 kg/m^2
Producto de inercia [P]	9.75 kg/m^2	-5.78 kg/m^2	-14.3 kg/m^2

Elemento # 4 (Anexo 01-01-00)

	Eje x	Eje y	Eje z
Momento de inercia [I]	34 kg/m^2	7 kg/m^2	26 kg/m^2
Producto de inercia [P]	11 kg/m^2	6.85 kg/m^2	-22.54 kg/m^2

Del cálculo realizado por la metodología propuesta se obtiene una fuerza de *43.2 N* que es la debe ejercer el viento sobre la aeroturbina para que comience a actuar el mecanismo de regulación, Es significativo señalar lo ventajoso que resulta la aplicación sobre Excel del procedimiento, ya que esto nos permite variar los parámetros de diseño, específicamente en la cola, hasta obtener un resultado que garantice el correcto funcionamiento del sistema.

3.4. *Modificaciones realizadas al diseño anterior.*

Dado nuevos criterios de diseño, el autor realiza modificaciones al diseño propuesto por Morales [30] en algunos de sus componentes, además de que se le agregan otros a partir del análisis realizado en el Capitulo #1. A continuación se exponen las modificaciones propuestas a cada pieza, además de que se describen los otros elementos añadidos al diseño.

- Carcaza (rotor): Se le diseñaron quillas en la superficie frontal exterior con el objetivo de obtener un mejor ajuste de las palas a la carcaza garantizando con ello, una correcta simetría angular entre estas. Se le agregaron dos orificios roscados para los prisioneros que fijan la carcaza con el árbol para mejorar la seguridad en el acople de estas dos piezas. Se le disminuyó el número de cartabones interiores (venas), con el objetivo de disminuir el peso total de la pieza; además de que la misma para el nuevo diseño, se obtiene por fundición (anexos, plano 01-01-19).
- **Tapa (nariz):** Se le agrega esta pieza para obtener una forma aerodinámica en el rotor de aerogenerador (ver anexo, plano 01-01-03).
- Árbol: Dado las modificaciones introducidas en la carcaza y la adición de una nueva pieza a ese subensamble (ver anexo, plano 01-01-00), el árbol aumenta su longitud, y se le construyen tres chavetas, además de un orificio roscado para el tornillo que sujeta la tapa (ver anexo, plano 01-01-20).
- Acoplamiento de la base de giro del aerogenerador. A las dos bridas se le disminuye su diámetro exterior buscando uniformidad con la torre al igual que el número de orificios para los tornillos, brindándose en el Capitulo 2 los cálculos

correspondientes para la unión roscada propuesta por el autor. Esta modificación se introduce para el ahorro de materiales, así como por una mejor apariencia en la geometría de la unión (ver anexo, plano 00-00-00). La brida superior y el árbol de giro del mecanismo pasan a ser una sola pieza obteniéndose la misma por maquinado (ver anexo, plano 01-05-02).

3.4.1. Diseño de las palas.

Para las palas se selecciono un perfil de la serie NACA 44x, específicamente el perfil NACA 4424, el cual ya ha sido desarrollado y probado en túneles de viento. Este perfil según Casanova [9] es recomendado para pequeños y medianos aerogeneradores. El material utilizado será la madera (preferentemente pino), dado el poco peso específico del material y las facilidades que brinda a la hora de obtener la forma del perfil.

3.4.2 Diseño de la torre y su anclaje.

En el diseño de la torre del aerogenerador según [29], se tuvo en cuenta las características de la aeroturbina así como la altura a la que se quería la misma, por lo que se diseñó de forma cónica y con una altura de diez metros. Para su construcción se tomará una chapa de espesor 6mm de acero CT3 con las dimensiones necesarias (ver anexo, plano 03-01-02) y se doblará con el objetivo de formar un cono, soldándose a tope los dos bordes a toda la longitud de la pieza.

La torre irá unida por soldadura a una chapa cuadrada de espesor 10mm y esta a su vez a otra chapa, del mismo espesor con una unión por tornillos, la cual se calcula en el Capítulo 2, esta ultima chapa es la que va sujeta a la base de concreto por tornillos empotrados. La base de concreto se diseñó de acuerdo a [29], teniendo en cuenta la altura de la torre y el tipo de aeroturturbina (ver anexo, plano 03-00-00).

3.4.3. Diseño del izaje.

El sistema de izaje tiene dos funciones fundamentales primero, levantar la torre en su montaje y segundo facilitar el arreado de la misma para caso de roturas reparaciones o fuertes vientos. El diseño de este sistema se realizó de acuerdo a las recomendaciones de la literatura especializada [29], (Ver anexo, plano 03-00-00).

El resto de los planos de construcción y montaje de todo el equipo se exponen en los anexos.

Conclusiones y Recomendaciones.

- A partir del análisis realizado al diseño del aerogenerador propuesto por Morales
 [30] se detectó que faltaba el diseño de las Palas; la torre; el sistema de anclaje de
 la torre al suelo y el sistema de izaje. Además el sistema de fijación que une las
 palas con la carcaza no garantiza una simetría angular entre las palas y existe un
 sobredimensionamiento en el diámetro de la brida y en el número de tornillos que
 une el aerogenerador con la torre
- No es factible ensayar un modelo a escala 1:10, del aerogenerador propuesto por Morales[30], en un túnel de viento y a una velocidad de fluido de 80m/s.
- Se desarrolló una metodología implementada sobre el tabulador Microsoft Excel la cual permite obtener la fuerza que debe ejercer el viento sobre el aerogenerador para que comience a actuar el mecanismo de regulación por momento de inercia.
- Se logra concluir el diseño del aerogenerador de 2KW de potencia con sistema de regulación por momento de inercia.
- 5. En el diseño propuesto para el aerogenerador, el viento debe ejercer una fuerza de *43.2 N* sobre la máquina, para que en esta comience a actuar el mecanismo de regulación
- 6. Se debe seguir analizando la posibilidad de simulación a través de otros software de computación o mediante una versión actualizada del Workingmodel.
- 7. A partir del diseño se debe realizar un análisis económico con el objetivo de obtener el costo total del proyecto.

BIBLIOGRAFÍA.

- 1. A.C.Walshaw and D.A.Jobson;"Mechanics of Fluids"; Greaat Britain; 1962
- "Aerogeneradores: ¿Cuántas palas?"; Actualizado el 3 de enero 2001; disponible en: http://www.windpower.org/es/tour/design/concepts.htm
- 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.
- Álvarez Sánchez. Jesús y Otros; "Elementos de máquina (Manual Complementario) ". Ediciones del ISPJAE; Cuba; 1985.
- Araus. Maria E, Massa. Aldo A y Solelti. Alfredo J; "Energía Eólica"; Universidad Católica de Córdova; 1983.
- "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.
- Beer ferdinand P. "Mecánica vectorial para ingenieros". Dinámica. Tomo II. Edición Revolucionaria. Cuba. 1998.
- 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.
- 10. Bugge. Jacob. Regulation on the determination of load of windmill. 1998.
- 11. Cargas, Enero 2003.
- 12. Cruz Cruz. Castro Gil; "Energía Eólica"; Edit. PROGENSA; España; 1997.
- 13. Cunty Guy; "Aeromotores y aerogeneradores"; Ediciones Marzo 80; Barcelona; 1981.
- 14. Curtis Richard. "Manual de Instalaciones de Aeroturbina", PROVEN (UK), Abril 1998.

- 15. Dobrovolski. V; "Elementos de Máquina"; Edit. MIR; Moscú; 1970
- 16. "Energía eólica, la fuente renovable que ya es alternativa"; disponible en: http://www.iespana.es/heberg.html
- 17. Freris.L.L; "Wind Energy Conversion Systems"; Edit. Prentice Hall; New.
- 18. "Generadores Eólicos de Electricidad"; Tesis de graduación secundaria; disponible en: <u>http://www.monografias.com/trabajos4/geneolico/geneolico.shtml</u>
- Gonzáles Pérez. Ramón R; "Manual de Metrología Dimensional"; Universidad Central de las Villas; Cuba; 1990.
- 20. Hunter Rouse.P.F;"Elementary Mchanics of Fluids; Edit.John Wiley & Sons; United States; 1962.
- Instituto Para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA); "Manuales de Energías Renovables (Energía Eólica)" Edición Especial Cinco Dias; 1992.
- 22. Irving. H. Shames; "La mecanica de los fluidos"; Edit. McGraw-Hill; México; 1976
- 23. "J Bornay, Aerogeneradores"; disponible en: http://www.bornay.com
- John. K. Vernar y Rober. L. STREET; "Elementos de la mecánica de los fluidos"; Edit. Revolucionaria; La Habana; 1980.
- Lecuona Neuman. Antonio. La energía eólica: principios básicos y tecnología. Febrero 2002; disponible en: <u>http://bicho.uc3m.es/alunm/ie/eol.pdf</u>
- Les Gurieres. Desire; "Energía Eólica, Teoría, concepción...."; Edit. MASSON; España; 1980.
- 27. Mattio Héctor, Ponce Graciela; "Nociones Generales de Energía Eólica"; CREE, Rawson, Chubut; Argentina; 1998.
- 28. Merian. J. L, "Mecánica", Edición Revolucionaria, Cuba, 1979.
- 29. Modelación en túnel de viento de aeroturbinas. Marzo 2003; disponible en:

Awea-viento-home@yahoogroups.com

- Morales Gómez Raidel, "Diseño de un aerogenerador de imanes permanentes", Trabajo de diploma, UCLV, 2002.
- 31. Piggott. H; "Wind Turbine Plans North American. Edition 1990.
- 32. Piggott. H; "Windpower Workshop"; United Kindow; 1997.
- 33. Pisarenko, G. S. ; "Manual de Resistencia de Materiales"; Edit. MIR; Moscú; 1989.
- 34. Principios de Conversión de Energía eólica"; Edit CIEMAT; España; 1997
- 35. Rechetov. D; "Elementos de Máquina"; Edit. MIR; URSS; 1981.
- 36. Rittenhouse. David; "La Energía Eólica"; Edit. Fraterna; Argentina; 1978.
- 37. Rodríguez Hernández. Orlando y Corugedo Méndez. Ángel; "Dibujo Aplicado para Ingenieros"Tomo I y II; Edit. Pueblo y Educación; Cuba; 1986.
- 38. "Sección Energía Eólica"; disponible en: http://www.conae.gob.mx/renovables/eolica.html
- 39. Spera David; "WIND TURBINE TECHNOLOGY"; Edit. ASME press; United States; 1994.
- 40. Shih-Pai, PH.D;"Viscous Flow Theory I Laminar Flow"; Edit. D. Van Nostrand Company; United States; 1956.
- 41. Wiliiam. F. Hugnes, Ph. D y John. A. Brigton. Ph. D;"Teoría y problema de dinámica de los fluidos"; Edit. Latinoamericana; México; 1970.
- 42. "Wind Power"; disponible en: http://ces.iisc.ernet.in/energy/paper/SEHandbook/solarerg.html