

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Mecánica

CETA



TRABAJO DE DIPLOMA

**Metodología de Cálculo del Sistema de Regulación – Orientación
por Momento de Inercia de un aerogenerador de pequeña
potencia.**

Autor: Beatriz Martínez Hernández

Tutor: MSc. Ernesto Fariñas Wong

Curso 2003 - 2004

"Año del 45 aniversario del triunfo de la revolución"

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 eficiente, es que se acomete el siguiente trabajo, con vista a desarrollar métodos de cálculos que permitan poner a nivel industrial las investigaciones que se viene llevando acabo en el mundo en el sector de la energía eólica.

En este trabajo se realizó una revisión bibliográfica con el objetivo de conocer las características actuales que presenta el uso de la energía eólica en el mundo y las posibilidades de desarrollo que ha tenido en nuestro país.

Se aborda la temática de la caracterización de la fuente de energía para conocer hasta que punto podemos aspirar en su desarrollo, bajo nuestras condiciones geográficas.

El trabajo se centra en el perfeccionamiento de una metodología que estaba incompleta y sin suficiente respaldo técnico, haciendo muy difícil su implementación.

Como resultado de este trabajo se tiene una metodología detallada, la cual esta soportada por una hoja de cálculo Excel, y con la que se busca conocer la fuerza que es necesario que ejerza el viento para que comience a funcionar el mecanismo de orientación – regulación, conocidas las dimensiones de todas las partes del aerogenerador y las coordenadas de los centroides de cada una de ellas calculados a partir de un eje de referencia.

ABSTRACT

Due to the importance that has at present the energy saving in our country and the necessity of finding renewable sources of energy, more and more efficient, it is that the following work is achieved, with view to develop methods of calculations that allow to put at industrial level the investigations that it comes taking place in the world in the wind energy.

In the present work it was carried out a literature study with the objective of knowing the current characteristics that it presents the wind energy in the world and the development possibilities that has had in our country.

The thematic of the characterization of the energy source is approached to know until point can reach in this development, under our geographical conditions.

The work is centred in the improvement of a methodology that had numerous holes, making very difficult its implementation.

As a result of this work one has a detailed methodology the one which this supported by a Excel worksheet, with this it is looked for to obtain the necessary force so that a correct operation of the aerogenerator.

INDICE



INDICE

INTRODUCCION	1
CAPITULO 1: BÚSQUEDA BIBLIOGRÁFICA	5
1.1-INTRODUCCIÓN	5
1.2- SITUACIÓN ENERGÉTICA GLOBAL.	5
1.3- CLASIFICACIÓN Y USO DE LAS FUENTES EN RENOVABLES Y NO RENOVABLES.	6
1.4-BREVE HISTORIA DE LOS AEROGENERADORES.	7
1.5- DESCRIPCIÓN DE LA FUENTE DE ENERGÍA UTILIZADA (EL VIENTO) Y COMO HA SIDO SU DESARROLLO	8
1.6 SITUACIÓN DE LA EÓLICA EN EL MUNDO Y EN NUESTRO PAÍS.	13
1.6.1 Actualidad internacional.	13
1.6.2 Desarrollo e inversiones mundiales.	13
1.6.3 Actualidad nacional	15
1.7 CARGAS QUE ACTÚAN SOBRE LOS AEROGENERADORES.	16
1.8 TIPOS DE SISTEMAS DE REGULACIÓN – ORIENTACIÓN	18
1.8.1 Sistema de regulación por momento de inercia en la cola	19
CAPITULO 2: METODOLOGÍA. CÁLCULO POR MOMENTOS DE INERCIA.	22
INTRODUCCIÓN	22
2.1- DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO REALIZADO ANTERIORMENTE.	22
2.2- NUEVOS CRITERIOS ABORDADOS EN EL CÁLCULO	24
2.2.1 Cálculo de las componentes de la velocidad angular de la cola, respecto al sistema de coordenadas principales.	42
2.2.2 Cálculo de las componentes de la velocidad angular del aerogenerador.	43
2.2.3 Cálculo de las componentes del momento de inercia del aerogenerador.	43
2.2.4 Cálculo de las componentes del producto de inercia del aerogenerador.	43
2.2.5 Cálculo de las componentes del momento cinéticos del aerogenerador	44
2.2.6 Cálculo del momento cinéticos del aerogenerador	44
2.2.7 Cálculo del momento resultante.	44
2.2.8 Cálculo de la fuerza mínima que debe ejercer el viento sobre el aerogenerador (en especial sobre las paletas) para que comience a actuar el mecanismo de la cola.	45
2.3 CONCLUSIONES	45
CAPITULO 3	47
3.1 INTRODUCCIÓN	47
3.2 EJEMPLO DE VARIACIONES EN LA METODOLOGÍA Y RESULTADOS OBTENIDOS	47
3.2.1 Variando las dimensiones de algunas partes del aerogenerador	47
3.2.2 Variando velocidades angulares	50

3.2.3 Variando las distancias de x , y , z .	51
3.3 CONCLUSIONES	52

INTRODUCCIÓN



INTRODUCCION

Actualmente las reservas energéticas constituyen preocupaciones para la humanidad, tanto desde el punto de vista de sus cantidades como de lo nocivo para su supervivencia y la de otras especies, que ya comenzaron a sufrir en gran medida los efectos. Así la humanidad ha visto cómo cada día se incrementan el número de especies que tienden a desaparecer y finalmente el hombre se ha visto en la obligación de tomar medidas para su protección.

En los últimos años las campañas por la toma de conciencia de que el hombre será la próxima especie en extinguirse, han aumentado y se han creado organizaciones internacionales encargadas de velar por el cumplimiento y control de algunos lineamientos, a fin de disminuir los daños provocados por el uso indiscriminado de las reservas y fuentes de energía a partir de combustibles fósiles. Dándose pasos para buscar fuentes alternativas y menos dañinas a la salud y la existencia humana.

La política energética cubana referida a la electricidad está dirigida a asegurar el suficiente suministro de esta energía acorde con el desarrollo energético esperado. En los últimos cinco años, el consumo energético en Cuba ha crecido establemente en la misma manera que la economía nacional ha recobrado su salud. La generación de electricidad se basa aún en el uso intensivo de los combustibles fósiles, pero la estructura de tal generación ha cambiado. Más de 50 % de toda la potencia es obtenida del llamado crudo nacional, un combustible barato que ha permitido a nuestra economía reducir la importación de petróleo, aunque pagando una cuota de daños al medioambiente. El pronóstico es alcanzar en los próximos cinco años, 90 % de la generación de electricidad usando el petróleo nacional, pero también mejorando las tecnologías que reduzcan los impactos medioambientales asociados a su uso.

En los últimos quince años en nuestro país las condiciones básicas han sido creadas para impulsar el uso de algunas energías renovables, como complemento al balance energético nacional y para la electrificación de objetivos aislados.

A pesar de que la " Ley Eléctrica Cubana " no estimula especialmente el uso y comercialización de las energías renovables, algunas regulaciones complementarias permiten a los productores independientes de energía vender electricidad a la red eléctrica nacional. En el momento actual estas regulaciones benefician al Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), que maneja

y opera las micro y mini plantas hidroeléctricas, y al Ministerios de la Industria Azucarera (MINAZ), que opera algunas docenas de los cuales cogeneran electricidad.

Lo mencionado anteriormente se puede interpretar como un antecedente muy importante pues indica la posibilidad de que la Unión Eléctrica (UNE), que es propietaria y opera la SEN, acepte la compra de electricidad generada mediante energía eólica por productores independientes cubanos, ya sean estatales o privados o por asociaciones comerciales entre compañías cubanas y extranjeras, en estas regiones donde los pronósticos de la UNE indiquen que pueda aparecer déficit de generación, como son los casos de la región occidental y Cayo Coco.

Entre la preocupación por los problemas medioambientales, la conveniencia de disminuir la dependencia energética con el exterior, la búsqueda de nuevas y mejores soluciones técnico-económicas al problema del suministro energético, están los factores que influyen decisivamente sobre las políticas que se tienen en cuenta en este campo a la hora de fomentar la investigación, el desarrollo y las aplicaciones de las energías renovables. Dentro de las distintas energías renovables, la eólica, por su grado de desarrollo, sus costos y carácter limpio e inagotable, tiene un alto potencial de aplicación en aquellas áreas que cuentan con el viento necesario para permitir su uso.

El Estado cubano cree firmemente que el desarrollo y la aplicación de la potencia eólica, así como otras fuentes renovables de energía, son la clave para el futuro, no solo para nosotros, sino para todo el mundo. Una revisión de las oportunidades del uso de la potencia eólica en nuestro país, muestra que las principales oportunidades están en los sitios donde no hay red eléctrica, fenómeno común en áreas rurales de los países en desarrollo. Miles de sistemas aislados para el bombeo de agua operan en Cuba, pero el uso de pequeños sistemas aislados para la generación de electricidad mediante energía eólica es limitado a equipos importados y de alto costo.

En este marco nacional e internacional se inscriben los esfuerzos del CETA (Centro de Estudios de Termoenergetica Azucarera) por el desarrollo de varias fuentes de energía renovable; siendo el caso particular de este trabajo el desarrollo de la energía eólica a través de pequeños aerogeneradores.

Desde hace miles de años el hombre aprovecha la energía del viento. Entre sus usos se pueden recordar los molinos de viento, barcos o botes veleros que surcaron los mares desde tiempos inmemoriales. En aquellos tiempos no se conocía que sólo la veinteva parte de toda la energía que el Sol envía a la Tierra se convierte en viento y este cinco por ciento es capaz de convertirse

en treinta y tres trillones de unidades de calor, o sea, veinte mil veces las posibilidades energéticas de las otras fuerzas terrestres. Con el paso del tiempo la energía eólica ha atravesado por momentos de altas y bajas, sin embargo en estos momentos existe sin duda un desarrollo por pasos seguros.

A partir de lo referido anteriormente y teniendo en cuenta la necesidad de desarrollar la energía eólica en el país por métodos científicos y considerando como uno de los factores principales la enorme influencia que tendría para el medio ambiente la utilización de los recursos eólicos como variante energética en el país y a nivel mundial, tal como aparece plasmado en el Programa Energético del Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente (CITMA), se puede proponer la *hipótesis* siguiente en nuestra investigación: Bajo las condiciones existentes para el desarrollo tecnológico y conocimientos acumulados, con las fuentes y condiciones energéticas disponibles, es posible crear una metodología de calculo para, calcular los momentos de inercia de un aerogenerador , así como las fuerzas que actúan sobre el mismo, con el fin de poder variar sus dimensiones y su punto de equilibrio, para diferentes condiciones de trabajo, y de regimenes de viento, a fin de estudiar la generalización de los mismos en Cuba.

Para desarrollar el trabajo que permita el seguimiento de la hipótesis anterior, se establecen métodos de investigación científica que van de lo general a lo particular y de aspectos teóricos se retorna a nuevas visiones teóricas después de pasar por la fase experimental o constructiva, para ello se proponen los *objetivos* siguientes.

Objetivos:

General: A partir de los conocimientos y experiencias acumuladas, realizar una hoja de cálculo Excel que permita obtener los momentos de inercia del aerogenerador de imanes permanentes, para potencias menores a 10 kW, empleando las formulas de las figuras geométricas correspondientes de cada pieza del aerogenerador, o sea área, masa, producto de inercia etc, para lograr así una variación de sus dimensiones, en el momento adecuado y en condiciones requeridas.

CAPÍTULO 1



CAPITULO 1: Búsqueda bibliográfica

1.1-Introducción

En este Capítulo se busca un acercamiento al mundo de la energía eólica con vistas a lograr un desarrollo tecnológico en este campo, se realiza una breve descripción de la evolución de la misma con el paso del tiempo, que como todo en nuestro planeta ha sufrido importantes modificaciones, que la han llevado a lo que es hoy, una fuente importante de energía renovable para el desarrollo, además se realiza una descripción de la fuente de energía utilizada (el viento), brindándose una panorámica del estado de desarrollo en el mundo y Cuba, así como las significativas ventajas y desventajas. También se hace referencia a las cargas que actúan sobre los aerogeneradores, debido a que es un objetivo principal de la tesis el desarrollo de una metodología de cálculo para hallar los momentos de inercia del mismo, así como la variación del punto de equilibrio en relación con las dimensiones de este y de la velocidad del viento.

1.2- Situación energética global.

El mercado energético internacional ha experimentado cambios significativos desde el año anterior. Las alzas y bajas de los precios del petróleo a escala internacional, junto a la “diplomacia del petróleo” en diversos países, dieron lugar a una enorme inestabilidad mercantil, agudizada por la actual guerra contra Irak, imponiéndonos seguir de cerca el papel de los factores bélicos a corto plazo y las tendencias más duraderas en el mercado internacional.

Con el advenimiento del nuevo siglo, particularmente después de la explosión llamada “burbuja de la nueva economía”, la energía se ha convertido cada vez más en preocupación principal de los países desarrollados, que se sienten presionados a ajustar sus estrategias en este frente.

De cara a los cambios en la situación energética mundial desde que estalló la crisis iraquí, muchos países han comenzado a ajustar sus políticas energéticas, incluyendo medidas tradicionales de estabilizar los precios del petróleo y nuevas medidas para adaptarse a la globalización económica. Debido a estas crisis, el mundo se ve obligado a implantar otras formas de generar electricidad donde se utilicen las energías renovables y se deje a un lado los fósiles que con el tiempo traerán la destrucción del planeta.

1.3- Clasificación y uso de las fuentes en renovables y no renovables.

Por todo lo expuesto anteriormente es necesario hacer un paréntesis en la importancia del conocimiento, de las fuentes de energía renovable y su uso, teniendo en cuenta sus beneficios y dificultades, así como saber hasta que punto pueden ser utilizadas las no renovables. Seguidamente se da una clasificación de los dos tipos de fuentes de energías existentes:

Fuentes de energía renovables: Son aquellas cuyo potencial es inagotable, ya que provienen de la energía que llega a nuestro planeta de forma continua como consecuencia de la radiación solar o de la atracción gravitatoria de otros planetas de nuestro sistema solar. Entre ellas están: la energía solar, eólica, hidráulica, mareomotriz, la biomasa y la geotérmica. También se les llaman **energías alternativas**.

Fuentes de energía no renovables: Son aquellas que existen en una cantidad limitada en la naturaleza. No se renuevan a corto plazo y por eso se agotan cuando se utilizan. La demanda mundial de energía en la actualidad se satisface fundamentalmente con este tipo de fuentes. Los más comunes son carbón, petróleo, gas natural y la energía nuclear.

Con el pasar de los años podemos ver como el hombre poco a poco ha ido destruyendo la tierra y con ello la vida en el, uno de los problemas principales es el calentamiento global, el cual esta dado únicamente por el uso indiscriminado de las fuentes no renovables de energía lo que a llevado a un cambio de clima del planeta. Por encima de las incertidumbres asociadas al comportamiento climático de la Tierra, los científicos han reunido suficientes evidencias que indican que se producirán profundas modificaciones en el sistema climático global durante este siglo, y tales cambios se producirán a una velocidad superior a cualquier otro ocurrido en los últimos 10.000 años.

Todo este problema viene dado por la cantidad de CO₂ que se expulsa a la capa de ozono. Los gases que están produciendo este calentamiento global se conocen como "gases de efecto invernadero" (GEI). El principal gas de efecto invernadero es el dióxido de carbono (CO₂) como se mencionó anteriormente, cuyo origen es fundamentalmente la quema de combustibles fósiles. Su actual concentración atmosférica es la mayor de los últimos 420.000 años.

Cada vez es más fuerte el consenso internacional respecto de la gravedad del cambio climático. Esto hace cada vez más evidente que continuar como hasta ahora no es una opción válida y que el mundo debe rápidamente cambiar hacia una economía basada en energías limpias. Algunos argumentan que afrontar el cambio climático es un reto desalentador y que es, en cierto modo,

demasiado costoso para las economías y la industria. En este dilema, la energía eólica es una de las mejores alternativas como respuesta al estancamiento y la falta de acción: es una poderosa fuente de energía a escala global, accesible y capaz de sustituir a los combustibles fósiles y otras fuentes contaminantes. Debido a esto es necesario dar una reseña sobre la historia y actualidad de los aerogeneradores, así como de la energía eólica. (artículo de pdf 2321)

1.4-Breve historia de los aerogeneradores.

Llegar a los aerogeneradores actuales ha sido un camino largo y escabroso. No es posible indicar en que parte del mundo se construyeron los primeros molinos de viento. Existen múltiples versiones de diferentes autores sobre el principio de la evolución de estos aparatos, existen razones para creer que fue en Egipto y los cruzados fueron quienes llevaron consigo la idea desde el Cercano Oriente a Europa.

Por otra parte se plantea que en el siglo V antes de Cristo se encuentran los primeros aerogeneradores en Asia: son máquinas de eje vertical iguales a las denominadas panemonas en algunas islas griegas que aún hoy se pueden contemplar

Siendo distintos desde el punto de vista tecnológico, los molinos tenían el mismo principio, ser capaces de transformar la energía eólica en energía para el bombeo de agua o la moledura de granos, etc. Lo cual limitó el aprovechamiento del viento durante siglos solo a estas aplicaciones.

Aunque desde Egipto se llevó rápidamente la idea de los molinos de viento hacia Europa, no es hasta el siglo VII después de Cristo cuando aparecen los primeros molinos, la tecnología de los mismos evolucionó hasta nuestros días, dando lugar a los clásicos molinos holandeses mecánicamente sofisticados, o los aeromotores para el bombeo de agua que progresan con la invención de la rueda multipala en el año 1870 por los americanos. (30)

Fue en el año 1802 cuando se pensó, por primera vez, en la transformación de la energía eólica en energía eléctrica. Lord Kelvin trató de asociar un generador eléctrico a un aeromotor, pero hubo que esperar hasta 1850 al acontecimiento de la Dinamo, para que existiese lo que hoy conocemos como "aerogenerador", en la producción de energía eléctrica. (5)

El faro de la Hebe fue la primera instalación de balizamiento marítimo equipada con una fuente de energía eléctrica autónoma mediante un aerogenerador.

Esta nueva aplicación de la energía eólica tuvo cierto éxito, de forma que en el año 1920 existían unos trescientos constructores de estos aparatos. [16]

El estudio en los campos de la aerodinámica permitió alcanzar grandes progresos en los aeromotores, muchos de estos conllevaron incluso a la realización de grandes máquinas, cuya potencia está comprendida entre 100 y 1000 kW, lo cual demuestra que la producción de energía eléctrica a partir de la del viento es factible, ello ocurrió hasta el año 1961. Desgraciadamente en ese año el precio del petróleo bajó, poniendo al kilowatt "eólico" a precios inaccesibles. Todas las máquinas fueron desmontadas y vendidas a precio de chatarra. [30]

Desde el año 1973, poco a poco, ocurre el proceso inverso, impulsando programas de estudio y realización de aerogeneradores. No obstante, en 1978 eran pocas las instalaciones eólicas. La demanda de aerogeneradores de potencia pequeña y mediana en países industrializados permanece limitada a aplicaciones muy concretas. No obstante su demanda en países tercermundistas aumentó, esto se debe al bajo costo de producción e instalación de estos equipos en comparación con las ganancias retribuidas. [5] (tesis de raidel)

1.5- Descripción de la fuente de energía utilizada (el viento) y como ha sido su desarrollo



"Eólica" viene de Eolo, dios griego del viento. El viento es *energía en movimiento*. El ser humano ha utilizado esta energía de diversas maneras a lo largo de su historia: barcos de vela, molinos, extracción de agua de pozos subterráneos.

Sólo un 5% 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 de energía 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 energía del viento es de tipo cinético (debida a su movimiento); ello hace que la potencia obtenible del mismo dependa de forma acusada de su velocidad, así como del área de la

superficie captadora. Así, todas las máquinas que ha construido el hombre para obtener el mayor rendimiento posible de la energía del viento se basan en frenar el viento por medio de algún dispositivo colocado en su camino.

Al soplar, el viento mueve las aspas de un molino. Esta energía cinética se transforma, mediante un generador, en energía eléctrica.

En algunos países, como Dinamarca y Alemania, existen *granjas eólicas*, en las que cientos de molinos son impulsados por el viento, produciéndose electricidad suficiente para alimentar ciudades completas.

La energía eólica se considera una forma indirecta de energía solar, puesto que el sol, al calentar las masas de aire, produce un incremento de la presión atmosférica y con ello el desplazamiento de estas masas a zonas de menor presión. Así se da origen a los vientos como un resultado de este movimiento, cuya energía cinética puede transformarse en energía útil, tanto mecánica como eléctrica.

La energía eólica, transformada en energía mecánica ha sido históricamente aprovechada, pero su uso para la generación de energía eléctrica es más reciente, existiendo aplicaciones de mayor escala desde mediados de la década del 70 en respuesta a la crisis del petróleo y a los impactos ambientales derivados del uso de combustibles fósiles. **(Artículo sobre la energía eólica)**

En el mundo los avances en la aerodinámica han incrementado el rendimiento de los aerogeneradores del 10 hasta el 45%. En buenos emplazamientos, con vientos medios anuales superiores a los 5 m/s a 10 metros de altura, se consiguen producciones eléctricas anuales por metro cuadrado de área barrida superiores a los 1.000 kWh. El tamaño medio de los grandes aerogeneradores es de 600-1.300 kW con rotores de 40 metros de diámetro.

Los futuros desarrollos tecnológicos buscan la reducción de costos mediante la elección de conceptos simplificados como, por ejemplo, el uso de trenes de potencia modulares, diseños sin caja de multiplicación, sistemas de comunicación pasivos y con orientación libre. Los desarrollos inciden también, en la reducción de cargas y desgastes mecánicos mediante articulaciones y sistemas de velocidad variable, con control de par, reduciendo las fluctuaciones y mejorando la sincronización a la red. Todo esto, se traducirá en trenes de potencia más ligeros y baratos.

Hace pocos años los prototipos instalados tenían una potencia de 1.500 kW, en el año 2001 son los más vendidos, ahora se proyectan máquinas de 2.500 y 3.000 kW., incluso de 5.000 kW.

Los generadores sincrónicos parecen haber llegado a su fin, hoy se habla de generadores doblemente inducidos y velocidad variable, también se estudian generadores de imanes permanentes multipolares y con rotores conectados directamente al rotor. Los nuevos diseños buscan, asimismo, la reducción del impacto visual y la disminución del ruido aerodinámico.

Actualmente la energía eólica se aprovecha de dos formas bien diferenciadas:

Por una parte se utilizan para sacar agua de los pozos un tipo de eólicas llamadas aerobombas, actualmente hay un modelo de máquinas muy generalizado, los molinos multipala del tipo americano. Directamente a través de la energía mecánica o por medio de bombas estos molinos extraen el agua de los pozos sin más ayuda que la del viento.

Por otra, están ese tipo de eólicas que llevan unidas un generador eléctrico y producen corriente cuando sopla el viento, reciben entonces el nombre de *aerogeneradores*.

Los aerogeneradores pueden producir energía eléctrica de dos formas:

Las aplicaciones aisladas por medio de pequeña o mediana potencia se utilizan para usos domésticos o agrícolas (iluminación, pequeños electrodomésticos, bombeo, irrigación, etc.), Incluso en instalaciones Industriales para desalación, repetidores aislados de telefonía, TV, instalaciones turísticas y deportivas, etc. En caso de estar condicionados por un horario o una continuidad se precisa introducir sistemas de baterías de acumulación o combinaciones con otro tipo de generadores eléctricos (grupos diesel, placas solares fotovoltaicas, centrales mini hidráulicas)

También se utilizan aerogeneradores de gran potencia en instalaciones aisladas para usos específicos; desalinización de agua marina, producción de hidrógeno, etc.

La conexión directa a la red viene representada por la utilización de aerogeneradores de potencias grandes (más de 10 ó 100 kW). Aunque en determinados casos y gracias al apoyo de los estados a las energías renovables, es factible la conexión de modelos más pequeños, siempre teniendo en cuenta los costes de enganche a la red (equipos y permisos). La mayor rentabilidad se obtiene a través de agrupaciones de máquinas potencia conectadas entre si y que vierten su energía conjuntamente a la red eléctrica. Dichos sistemas se denominan *parques eólicos*.

El uso de la energía eólica presenta grandes ventajas pero a la vez presenta dificultades;

Ventajas de la energía eólica.

La energía eólica *no contamina, es inagotable* y frena el agotamiento de combustibles fósiles contribuyendo a *evitar el cambio climático*. Es una tecnología de aprovechamiento totalmente madura y puesta a punto.

Es una de las fuentes más baratas, puede competir en rentabilidad con otras fuentes energéticas tradicionales como las centrales térmicas de carbón (considerado tradicionalmente como el combustible más barato), las centrales de combustible e incluso con la energía nuclear, si se consideran los costes de reparar los daños medioambientales.

La utilización de la energía eólica para la generación de electricidad presenta *nula incidencia sobre las características fisicoquímicas del suelo* o su erosión, ya que no se produce ningún contaminante que incida sobre este medio, ni tampoco vertidos o grandes movimientos de tierras. Al contrario de lo que puede ocurrir con las energías convencionales, la energía eólica *no produce* ningún tipo de alteración sobre los acuíferos ni por consumo, ni por contaminación por residuos o vertidos. La generación de electricidad a partir del viento *no produce gases tóxicos, ni contribuye al efecto invernadero, ni destruye la capa de ozono, tampoco crea lluvia ácida*. No origina productos secundarios peligrosos ni residuos contaminantes. Cada kWh de electricidad generada por energía eólica en lugar de carbón, evita:

0,60 Kg. de CO₂, dióxido de carbono

1,33 gr. de SO₂, dióxido de azufre

1,67 gr. de NO_x, óxido de nitrógeno

La electricidad producida por un aerogenerador *evita que se quemen diariamente miles de litros de petróleo* en las centrales térmicas. Ese mismo generador produce idéntica cantidad de energía que la obtenida por quemar diariamente 1.000 Kg. de petróleo. Al no quemarse esos Kg. de carbón, se evita la emisión de 4.109 Kg. de CO₂, lográndose un efecto similar al producido por 200 árboles. Se impide la emisión de 66 Kg. de dióxido de azufre -SO₂- y de 10 Kg. de óxido de nitrógeno -NO_x- principales causantes de la lluvia ácida.

La energía eólica es *independiente de cualquier política* o relación comercial, se obtiene en forma mecánica y por tanto es directamente utilizable. En cuanto a su transformación en electricidad, esta se realiza con un rendimiento excelente y no a través de aparatos termodinámicos con un

rendimiento de Carnot (*de energía*) siempre pequeño. Al finalizar la vida útil de la instalación, el desmantelamiento no deja huellas

<i>Evita</i>	28.480 Tn. Al año de CO ₂
Sustituye	2.447 toneladas equivalentes de petróleo
Aporta	Trabajo a 130 personas al año apróx. Durante el diseño y la construcción
Proporciona	Industria y desarrollo de tecnología
Genera	Energía eléctrica para 11.000 familias apróx.

Tabla 1: Un Campo de 10 MW

Desventajas de la energía eólica

El aire al ser un fluido de pequeño peso específico, implica fabricar *máquinas grandes* y en consecuencia caras. Su altura puede igualar a la de un edificio de diez o más plantas, en tanto que la envergadura total de sus aspas alcanza la veintena o más de metros, lo cual encarece su producción.

Desde el punto de vista estético, la energía eólica produce un *impacto visual* inevitable, ya que por sus características precisa unos emplazamientos que normalmente resultan ser los que más evidencian la presencia de las máquinas (cerros, colinas, litoral). En este sentido, la implantación de la energía eólica a gran escala, puede producir una alteración clara sobre el paisaje, que deberá ser evaluada en función de la situación previa existente en cada localización.

Un impacto negativo es *el ruido* producido por el giro del rotor, pero su efecto no es más acusado que el generado por una instalación de tipo industrial de similar entidad, y siempre que estemos muy próximos a los molinos.

También ha de tenerse especial cuidado a la hora de seleccionar un parque si en las inmediaciones habitan aves, por el riesgo mortandad al impactar con las palas, aunque existen soluciones al respecto como pintar en colores llamativos las palas, situar los molinos adecuadamente dejando “pasillos” a las aves, e incluso en casos extremos hacer un seguimiento de las aves por radar llegando a parar las turbinas para evitar las colisiones.

1.6 Situación de la eólica en el mundo y en nuestro país.

A raíz de la crisis del precio de petróleo en los años 70 se demostró en que medida los países industrializados dependen del suministro asegurado por la energía. Se notó entonces que los recursos energéticos de la tierra son limitados y que se agotarían en un futuro no muy lejano si el consumo continuase en forma desenfrenada. Se percibió la relación que hay entre los daños que sufre el medio ambiente con la generación y el consumo de la energía. Esta situación dio lugar para que se pensase en aprovechar otros recursos naturales como la energía solar, eólica, de la biomasa, hidráulica, de las olas, geotérmica, de las mareas y nuclear.

Teniendo en cuenta lo antes expuesto, se brinda a continuación una breve descripción del panorama internacional y nacional del desarrollo de la energía eólica

1.6.1 Actualidad internacional.

El desarrollo de la energía eólica en las últimas décadas a escala mundial ha aumentado vertiginosamente a tal punto que en el año 2000 existía una capacidad instalada de 18 449 MW, acumulando un valor superior a la capacidad que se explota en nuestro país entre unas siete u ocho veces.

El crecimiento en los últimos años desde 1983 hasta el 2000 ha pasado por varias etapas desde 1983 hasta 1985 hubo cierto incremento en la capacidad instalada por año y en la capacidad acumulada luego desde 1986 hasta 1992 el crecimiento fue casi nulo, pero a partir del año 1993 comienza un despegue que continua aún. Este despegue fue provocado por algunas razones como el estímulo de algunos gobiernos (Alemania, Dinamarca) al empleo de este tipo de energía, el incremento de los precios del petróleo junto con el descenso de los costos de fabricación y explotación de las instalaciones eólicas, que cada vez las hace más competitivas, [56]. Además del incremento la cultura energética ambiental en el mundo y de la firma del protocolo de Kyoto.

1.6.2 Desarrollo e inversiones mundiales.

En la última década se tiene un desarrollo vertiginoso de la energía eólica en Italia. A partir de 1992 el Comité Interministerial de Precios (CIP) publicó la ley que premia las empresas que

producen electricidad mediante fuentes renovables. Esta ley surge a raíz de los esfuerzos del gobierno por desarrollar la energía eólica en el país.

Como prueba de lo anterior se tiene el trabajo que está realizando la compañía de investigaciones y desarrollo CESI en cooperación con la Universidad de **Genoa** que está conformando el mapa del potencial eólico del país. Además están las inversiones realizadas en Sicilia. El grupo Enel completó un proyecto de 800 MW en el año 2000, y en este propio año esta misma empresa destinó 259 millones de euros para nuevos proyectos en el periodo 2000-2005, [17].

Actualmente Alemania es el país que más potencial instalado posee, esto se debe a la política energética del Gobierno Federal. Dicha política descansa sobre tres pilares: el ahorro de energía, la eficacia energética y el aprovechamiento de energías renovables. El Gobierno, ya ha sentado importantes bases legislativas y administrativas para el paso a una nueva estructura energética sin energía nuclear. Los instrumentos utilizados son una política fiscal y contributiva ecológica y el fomento de la rentabilidad de técnicas y procesos energéticos hasta la fecha no competitivos o comercializables. Estos instrumentos favorecen el desarrollo de las energías renovables, [22].

Desde 1997, año en que arrebató a Estados Unidos el liderazgo mundial en la materia, Alemania es el principal productor de energía eólica del mundo. Todos los años se registran nuevos record en este sector. Según el sindicato de energía eólica, es probable que en 2020 el número de turbinas llegue a 25.000, que producirían 30% de la electricidad total. Unos 30.000 millones de marcos de fondos públicos se destinarán a su implantación, según fuentes gubernamentales, [28, 22].

La energía eólica es actualmente la de más rápido desarrollo en el sector renovable en Europa, con una razón de crecimiento del 36 %.

Se prevé que en próximos años se continuará desarrollando tecnológicamente este sector, como ejemplo se puede señalar el desarrollo de turbinas de 5MW producidas por ENERCON, las que poseen mayor productividad y permitirán disminución de los costos de generación.

Existen expectativas que se introduzcan grandes turbinas entre 2004 y 2007 anunciando un cambio significativo en \$/MW en las granjas eólicas. La producción de turbinas eólicas se ha convertido en un significativo negocio. Dinamarca se ha convertido en el pionero de la energía eólica y el mayor exportador en este sector.

Como perspectiva futura se plantea en [57] que Europa y Norteamérica representan los dos principales mercados, además, Asia se encuentra incrementando la demanda de energía eólica lo que representará un mercado significativo en el 2010, Anexo IV.

1.6.3 Actualidad nacional

Históricamente en Cuba se han utilizado los molinos de viento como solución al suministro de agua para la ganadería generalmente en lugares donde es difícil tener electricidad. Estas máquinas se fueron deteriorando con el tiempo y después de ejecutarse una política de rescate, en el año 2002 estaban instaladas más de 8 000 en casi todas las provincias del país. Esto fue posible, con el apoyo de CUBASOLAR, mediante la producción de molinos clásicos multipalas en la fábrica de Bayamo. Se estudia el desarrollo de nuevos modelos, tanto para bombeo de agua como para producción de electricidad, principalmente en el Centro Integrado de Tecnología Apropriada de Camagüey (CITA), el Centro de Investigaciones de Energía Solar de Santiago de Cuba (CIES), el Centro de Estudios de Energías Renovables (CETER) del Instituto Superior “José Antonio Echeverría”, en el Grupo de Energía Solar de La Habana y el Centro de Estudio de Termoenergética Azucarera (CETA).

Los resultados de la prospección y evaluación del potencial eólico cubano que conduce el Grupo Eólico de CUBASOLAR desde 1991 y el Ministerio de la Industria Básica, caracterizan las posibilidades estudiadas hasta hoy. Se han analizado ya los datos de 23 lugares, con mediciones de más de dos años en los puntos de mejores resultados, [34].

No existen estudios profundos de la penetración tierra adentro del viento energéticamente útil, ni en las montañas, por la insuficiencia de equipos, [34]. Sin embargo, con la base de datos elaborada según los estudios realizados hasta el presente por CUBASOLAR y el Ministerio de la Industria Básica (MINBAS), se puede afirmar que en Cuba hay lugares donde la generación de electricidad a partir de la energía eólica es una solución real y económicamente ventajosa. Este es el caso de Cayo, Sabinal, Punta de Maisí, Cayo Guillermo, Cayo Santa María y la Isla de Turiguanó, [34].

En 1999 se terminó el Parque eólico de la Isla de Turiguanó, con dos aerogeneradores de 225 kW. de potencia por cada uno (total: 450 kW.), ver Anexo VI. Se construyó y montó en Cabo Cruz, provincia Granma, un aerogenerador de 10 kW. Estas dos instalaciones están

interconectadas al sistema electro-energético nacional. El pasado año, se montó el sistema híbrido eólico-diesel de Cayo Romano de 10 kW de potencia, el cual trabaja autónomamente.

Según la bibliografía consultada en Cuba solo se ha trabajado en el diseño y construcción de molinos multipalas para el abasto de agua a pequeñas comunidades rurales y fincas ganaderas. Las únicas experiencias en el aprovechamiento de la energía eólica para la producción de electricidad son las anteriormente mencionadas, en las cuales no se trabajó en el diseño, solo fue montaje de equipos de firmas extranjeras. *(tesis de pedro)*

Existen limitaciones prácticas a los intentos de desarrollar el mercado de parques eólicos conectados a la red eléctrica. Las principales limitaciones para el desarrollo del mercado eólico en Cuba son:

- El costo de generación debe estar por debajo del costo evitado de la energía.
- El bajo costo de la electricidad convencional para el sector industrial.
- Gran disponibilidad de combustibles fósiles en relación con la disponibilidad del viento.
- No hay un programa nacional para el desarrollo de la energía eólica.

Una situación diferente se prevé para las nuevas áreas con desarrollo turístico, principalmente en los cayos de la costa norte, donde varios miles de habitaciones serán construidas en los próximos diez o quince años. Debido a su localización geográfica no es prácticamente factible unir estas áreas a la red nacional por lo que deberán instalarse sistemas eléctricos autónomos.

1.7 Cargas que actúan sobre los aerogeneradores.

Dadas las características tan dispersas y aleatorias de la energía eólica, es obvio que la única manera de estudiar si un emplazamiento es adecuado o no, es utilizando la estadística. Para ello se recurre a la representación de la velocidad del viento como una variable aleatoria con cierta función de distribución.

La mayoría de los autores, entre los que se destacan [3, 9, 12, 15, 16, 18, 20, 42] plantean que los valores del parámetro de forma k oscilan entre 1.3 y 4.3, lo que respondería a la distribución Weibull. Pero plantean que para pocos datos suele hacerse una simplificación, $k = 2$ y así facilitaría el cálculo mediante una distribución Rayleigh.

Los métodos de simulación computacional se están convirtiendo necesariamente en fuertes herramientas en el campo de la energía eólica, en el diseño y determinación de las cargas que

actúan sobre los aerogeneradores. Pues esta es la parte fundamental y de mayor envergadura en el diseño de aerogeneradores.

Desde hace dos décadas atrás en los aerogeneradores se han usado análisis estáticos y cuasiestáticos para el cálculo de cargas, son pocas las referencias en las que se puede encontrar información al respecto. Las existentes solo tocan el tema muy someramente y basan sus análisis en estructuras comunes, no siendo estas las que están presentes en su totalidad en un aerogenerador.

Giguere [24] plantea que se debe prestar especial atención en el diseño para la obtención de coeficientes de sustentación lo más alto posible siempre y cuando se preserven las características idóneas de trabajo. Los coeficientes de sustentación altos en la punta de la paleta se convierten más deseables en máquinas de mayor tamaño.

Las cargas son fuera de toda duda, las variables más difíciles de ser medidas. Hay varias consideraciones que se deben tener en cuenta a la hora de alcanzar una buena calidad en los datos, también en este caso la cadena de medida es más complicada. Aparecen ciertos fenómenos, como los problemas de calibración, efectos de temperatura, efectos de las cargas estáticas, etc. Todas estas y otras consideraciones son tratadas de la siguiente manera en [11].

Diferentes efectos provocan la aparición de cargas sobre el aerogenerador. Fuerzas aerodinámicas, inerciales y estructurales son las principales.

El conocimiento del nivel de las cargas sobre el aerogenerador permite calcular el diseño de la máquina, el efecto de los diferentes parámetros y controlar el tiempo de vida real del aerogenerador en las condiciones específicas de operación.

F = Fuerzas exteriores o interiores
 E = Fuerzas elásticas
 I = Fuerzas de inercia

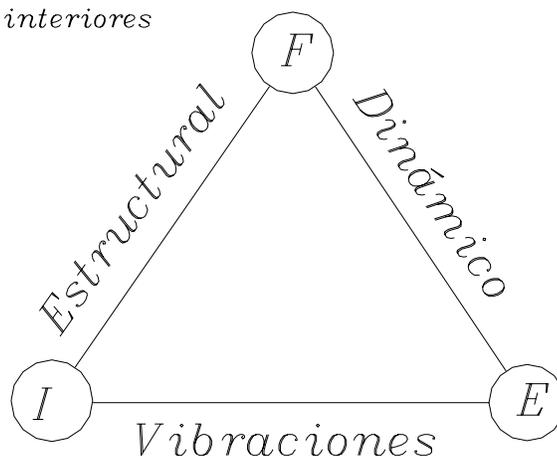


Figura 1. 1: Triángulo de collar.

El conocimiento de las cargas reales sobre prototipos que afecten a los aerogeneradores evita resultados catastróficos.

1.8 Tipos de Sistemas de Regulación – Orientación

Toda máquina eólica necesita un sistema de control que permita:

- a) Detener la máquina y limitar su velocidad por razones de seguridad.
- b) Optimizar el funcionamiento.
- c) En el caso de generación eléctrica a frecuencia constante es necesario mantener la velocidad de giro del rotor dentro de ciertos límites para obtener un rendimiento elevado en el generador.

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. [37]. Siendo el mecanismo de orientación – regulación el encargado de minimizar estos problemas.

Además no debe perderse de vista el aspecto económico del problema, generalmente las máquinas de este tipo son diseñadas para producir energía eléctrica lo más barata posible. Por tal razón, en su diseño se adopta un sistema tal que cuando el viento alcance determinada velocidad (velocidad de corte), predeterminada durante la etapa de diseño, la máquina disminuya la cantidad de energía captada del viento. De esta forma se considera que para velocidades del viento superiores a las determinadas durante el diseño, no tiene sentido dimensionar las distintas partes de la máquina. En concreto, para velocidades superiores es necesario desperdiciar o dejar de producir el exceso de energía en pos de proteger la integridad estructural de la turbina.

Existen variados tipos y naturalezas de dispositivos para lograr este control. Presentándose a continuación los más significativos, finalmente se adoptará el más conveniente para el aerogenerador en desarrollo.

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 (16) [tesis de raidel](#)

1.8.1 Sistema de regulación por momento de inercia en la cola

Según lo planteado por **morales** se escoge el sistema de regulación por momento de inercia en la cola, debido a que este 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 saca 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 Teodoro Sánchez de Perú [48] y Hugh Piggot de Escocia [40], 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 Raidel[#].

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

CAPÍTULO 2



CAPITULO 2: Metodología. Cálculo por momentos de inercia.

Introducción

En las investigaciones publicadas consultadas durante la elaboración de este trabajo, las cuales han abarcado, tesis, trabajos de diplomas, bibliografías en Internet, libros y revistas, se muestran que es necesario abordar el cálculo de los sistemas de orientación mediante técnicas de modelación matemática, debido a que es sumamente engorroso y costoso hacerlo por los métodos tradicionales de tanteo y error.

Para esto se toman los trabajos realizados por **Castillo [#]** y **Morales [#]**, los cuales iniciaron una metodología que permite realizar algunos cálculos, estos tienen determinados inconvenientes que reclamaban un conocimiento a nivel de especialistas en el tema. En estos trabajos se asumen valores y los cuales llevan a cometer errores situación que se pretende cambiar en este Capítulo. A continuación se exponen los cambios y aportes a este trabajo con vista hacerlo más versátil y de fácil manejo.

2.1- Descripción del trabajo realizado anteriormente.

Según **(Morales [#])** los cálculos del sistema de regulación por momento de inercia del aerogenerador se realizan teniendo en cuenta las características de la cola diseñada y así se determinó la fuerza que debe ejercer el viento a las hélices para accionar el mecanismo de regulación.

Este análisis se realizó a partir de los dibujos realizados en Autocad 2000 y Mechanical Destop, en 3D los cuales brindan la posibilidad de obtener las dimensiones de las partes y los momentos y productos de inercia de los codos y las aspas.

Para el cálculo se toman varios supuestos: el generador giraba a 600 r.p.m, momento en el cual el viento debe tener una velocidad mayor a 10m/s y es cuando debe entrar a funcionar el mecanismo de regulación, con vistas a mantener la velocidad del rotor cerca de la velocidad máxima de generación y preservar el aerogenerador de la destrucción. Este es un análisis de equilibrio de

fuerzas que permite determinar la fuerza producida por el viento sobre el aerogenerador, para que el sistema de regulación comience a funcionar.

El procedimiento de cálculo se llevó a cabo de la siguiente forma:

El aerogenerador se dividió en cuatro elementos para su análisis cinemático y se fija un sistema de coordenadas globales para la determinación de los momentos y productos de inercia, así como el punto de aplicación respecto al cual se toman los mismos.

El sistema de coordenadas globales se define con un eje paralelo al eje del generador, mientras que el otro eje se coloca paralelo al del Yaw System.

El ángulo de inclinación del pivote de la cola es de 27° respecto al eje del Yaw System y de 45° al eje del rotor, con vista a determinar las componentes de la velocidad angular de la cola, referido al sistema de coordenadas fijado.

La metodología de cálculo se inicia con una sumatoria de momentos sobre el eje de giro del generador, los que están determinados por los momentos de inercia provocados por los diferentes componentes del aerogenerador y la fuerza ejercida por el viento sobre el mismo.

Luego se realizó el cálculo de las componentes de la velocidad angular de la cola, respecto al sistema de coordenadas globales a partir de los ángulos mencionados y de las velocidades de rotación fijadas, para llegar así al cálculo de las componentes de la velocidad angular del aerogenerador.

Seguidamente se pasó al cálculo de las componentes del momento de inercia del aerogenerador en cada eje, haciendo una sumatoria de los momentos de cada elemento en sus respectivos ejes. Así mismo se procedió con los componentes del producto de inercia.

Se continuó con el cálculo de las componentes del momento cinético del aerogenerador, a partir de todo lo calculado anteriormente, para obtener posteriormente al valor del momento cinético del aerogenerador, haciendo una suma algebraica de los valores resultantes de cada eje.

Todos estos pasos se realizaron para obtener el valor del momento resultante del aerogenerador,

Finalizando entonces con el cálculo de la fuerza mínima que debe ejercer el viento sobre el aerogenerador (en especial sobre las paletas) para que comience a actuar el mecanismo de la cola.

La metodología de (Castillo) es la desarrollada por Morales [], solo que esta fue insertada en una hoja Excel, la cual tiene ventajas debido a que los cálculos son precisos y rápidos.

Castillo incluye una base de datos que contiene velocidad angular del aerogenerador, velocidad de giro del rotor, así como los momentos y productos de inercia obtenidos del software AutoCad, la cual puede ser variada a conveniencia para obtener diferentes condiciones de trabajo.

Este trabajo presenta la desventaja de que los productos y momentos de inercia fueron obtenidos del Autocad, es imposible variar las dimensiones de los elementos directamente por la fórmula de los mismos, debido a que esta tabla no tiene en su base dichas fórmulas, por lo que para cambiar las dimensiones habría que ir directamente al dibujo y modificarlo, lo que resultaría muy incomodo de hacer cada vez que se tenga un tipo diferente de aerogenerador o una condición diferente para el trabajo.

Debido a estos inconvenientes, se maneja en este trabajo elaborar una nueva metodología que solucione estos inconvenientes.

2.2- Nuevos criterios abordados en el cálculo

La metodología desarrollada en este trabajo se basa en la descrita anteriormente, con algunos criterios nuevos para lograr una mayor versatilidad en tiempo de diseño, este trabajo también incluye una hoja Excel con algunas diferencias que se exponen en el desarrollo de este epígrafe, a continuación se plantea la metodología con los cambios aportados.

Para realizar los cálculos del sistema de regulación por momento de inercia se ha teniendo en cuenta las características de la cola diseñada con el objetivo de determinar la fuerza que debe ejercer el viento a las hélices para accionar el mecanismo de regulación.

La nomenclatura utilizada es la siguiente:

NOMENCLATURA

n_y → Velocidad de rotación de la hélice en el eje **Y**.

W_y → Velocidad angular de la hélice en el eje **Y**.

W_z → Velocidad angular del generador en el eje **Z**.

W_c → Velocidad angular de la cola.

W_{xc}, W_{yc}, W_{zc} → Componente en **X, Y, Z** de la velocidad angular de la cola (W_c)

W_x', W_y', W_z' → Velocidades angulares del aerogenerador.

r_i → Distancia entre el eje del generador y el eje de giro del aerogenerador en el eje **X**.

r_k → Distancia entre el eje del generador y el eje de giro del aerogenerador en el eje **Z**.

F_j → Fuerza ejercida por el viento sobre el aerogenerador para que entre en funcionamiento el sistema de regulación –orientación en el eje **Y**.

h_0 → momento cinético del aerogenerador.

h_{xi} , h_{yj} , h_{zk} , → componentes del momento cinético en cada eje.

I_x , I_y , I_z , → componentes de los momentos de inercia en cada eje.

P_{xy}' , P_{yz}' , P_{xz}' , → componentes de los productos de inercia del aerogenerador.

Como se explicó anteriormente el aerogenerador se dividió en cuatro elementos principales, para simplificar el cálculo, estos elementos están compuestos por diferentes piezas, cada una con sus características geométricas.

En la [figura 2.1](#), se esquematan 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.

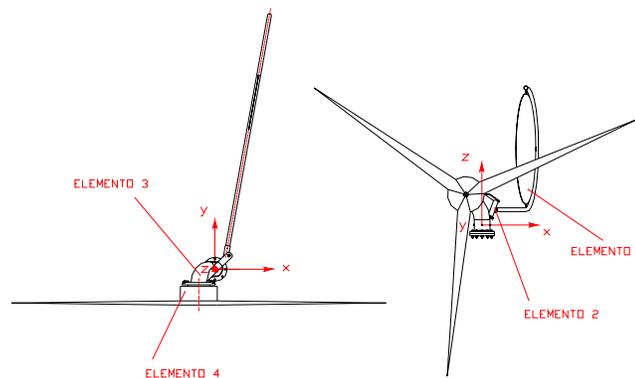


Figura 2. 1: Representación del sistema de coordenadas y de los elementos del aerogenerador.

Al dividir el equipo en 4 elementos para su análisis cada uno de ellos cuenta con los siguientes componentes:

Elemento 1

- Tubo recto de la cola (1)
- Placa de la cola.(14)

Elemento 2

- Pivote vertical (2)
- Pivote horizontal (3)
- Pivote superior recto (16)
- Pivote inferior inclinado (17)
- Pivote superior inclinado (18)

Elemento 3

- Cilindro base (4)
- Brida superior de los codos (12)
- 2 codos (uno de 45° y otro de 90°)
(19)
-

Elemento 4

- Carcasa tubular (5)
- Cilindro magnético (6)
- Laminado (7)
- Bobinado (8)
- Base del generador (se divide en dos partes) (9)
- Cilindro 1
- Cilindro 2
- Rodamiento del generador 1 (10)
- Rodamiento del generador 2 (11)
- Árbol del generador (13)
- Tapa de la carcasa (15)
- Aspas 1,2,3 (20)
- Nariz (21)

Nota: Los números entre paréntesis indican la posición que tienen en la hoja de cálculo Excel (metodología de calculo)

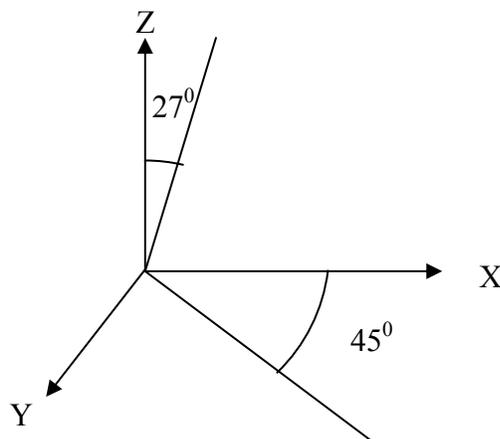


Figura 2. 2: Inclinación de los ejes de coordenadas señalando la inclinación de la cola de 27° respecto a la vertical y los 45° de inclinación con respecto al eje del rotor para la determinación de las componentes de la velocidad angular de la cola, respecto al sistema de coordenadas señalado en la Figura 2.1.

DATOS

$n_y = 600$ r.p.m velocidad de rotación de la hélice en y

$W_z = 6.283$ rad/s esta velocidad angular se obtiene $(n_z * \pi) / 30$

$\vec{r} = - (0,172 \text{ m})i + (0,333 \text{ m})k$ esta es la distancia hasta el eje centroidal (eje de giro del aerogenerador), con sus dos componentes en los ejes (Y) y (Z).

$\vec{F} = (F)j$ esta es la fuerza a calcular, es decir, la fuerza que tiene que ejercer el viento sobre el aerogenerador, para que el mecanismo de orientación – regulación por momento de inercia comience a funcionar. Esta fuerza es ejercida en el eje (Y).

CÁLCULOS

Para comenzar se realizará una sumatoria de momentos sobre el eje de giro del aerogenerador (Yaw System).

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

$$\sum Mo = \text{Brazo (r) x Fuerza (F)} \quad (1)$$

La ecuación (1) relaciona todos los datos mencionados anteriormente y la incógnita a calcular.

Para llegar a ese resultado es necesario determinar los componentes de la sumatorias de momentos:

Se despeja la fuerza a partir de la ecuación (1):

$$F = \frac{\sum Mo}{r},$$

La sumatoria de momento obedece la siguiente expresión:

$$\sum Mo = \frac{\delta h_0}{\delta t} + \Omega x h_0 \quad (2)$$

Donde:

- h_0 es la sumatoria de todos los componentes de los momentos cinéticos en cada eje:

$$h_0 = h_x + h_y + h_z = h_x i + h_y j + h_z k \quad (3)$$

Cada componente tiene su ecuación:

$$h_x = (W_x' * I_x') - (W_y' * P_{xy}') - (P_{xz}' * W_z) \quad (4)$$

$$h_y = - (P_{xy}' * W_x') + (I_y' * W_y') - (P_{yz}' * W_z) \quad (5)$$

$$h_z = - (P_{xz}' * W_x') - (P_{yz}' * W_y') + (I_z' * W_z) \quad (6)$$

$$\Omega = W_z \quad (7)$$

Los componentes de los momentos de inercia (I) se calcularon a partir de la aproximación de las formas reales de las piezas, a las figuras geométricas fundamentales conocidas. Las utilizadas en el trabajo fueron:

Momentos de inercia

- **Cilindros** $I_x = 0.5 m * a^2 \rightarrow m - \text{masa} \quad a - \text{diámetro}$
 $I_y = I_z = 1/12 * m * (3a^2 + l^2) \rightarrow l - \text{longitud o largo}$
- **Placas rectangulares** $I_x = 1/12 * m * (a^2 + b^2) \rightarrow m - \text{masa} \quad a - \text{largo} \quad b - \text{ancho}$
 $I_y = 1/12 * m * a^2$
 $I_z = 1/12 * m * b^2$
- **Placas circunferenciales** $I_x = 0.5 * m * r^2 \rightarrow m - \text{masa} \quad r - \text{radio} \quad I_y = I_z = 0.25 * m * r^2$

Elemento I

$I_{xI}, I_{yI}, I_{zI}, P_{xyI}, P_{yzI}, P_{xzI}$: todos estos valores son la sumatoria de los valores particulares de las partes que conforman el Elemento 1, (piezas 1 a la 14 en la hoja Excel)

Cada uno con su respectiva formula:

Datos:

$l_1 \rightarrow \text{longitud del tubo} = 2 \text{ m}$

$\rho_1 = \rho_{14} \rightarrow \text{peso específico del material} = 7850 \text{ kg/m}^3 \text{ (acero 20)}$

$De_1 \rightarrow \text{diámetro exterior} = 0.042 \text{ m}$

$Di_1 \rightarrow \text{diámetro interior} = 0.038 \text{ m}$

$De_{14} \rightarrow \text{diámetro exterior de la placa de la cola} = 1.214 \text{ m}$

$s_{14} \rightarrow \text{espesor de la placa de la cola} = 0.002 \text{ m}$

$$I_{x1} = \pi * 1 (m) * \rho (\text{kg/m}^3) * [(De_1^4 - Di_1^4) / 8] (m^4) \quad (8)$$

$$I_{x1} = 3.14 * 2 \text{ m} * 7850 \text{ kg/m}^3 * [(0.042^4 - 0.038^4) / 8] m^4$$

$$I_{x1} = 0.01 \text{ kg m}^2$$

$$I_{x14} = 0.5 * m_{14} \text{ (kg)} * (De_{14}/2)^2 \text{ (m}^2\text{)} \quad (9)$$

m_{14} → peso de la placa de la cola, la cual se rige por la siguiente ecuación:

$$m_{14} = \lrcorner * De_{14}^2 \text{ (m}^2\text{)} * S_{14} \text{ (m)} * \rho_{14} \text{ (kg/m}^3\text{)} / 4 \quad (10)$$

$$m_{14} = 3.14 * 1.21 \text{ m}^2 * 0.002 \text{ m} * (7850 \text{ kg/m}^3) / 4$$

$$m_{14} = 18.17 \text{ kg}$$

Sustituyendo el peso en la ecuación (9)

$$I_{x14} = 3.35 \text{ kg mm}^2$$

Luego se halla el **I_x** del Elemento 1 que no es más que la sumatoria de los **I_x** de las partes antes calculadas (1 y 14)

$$I_{x I} = I_{x1} + I_{x14} \quad (11)$$

Sustituyendo:

$$I_{x I} = 3.35 \text{ kg m}^2$$

Nota: Este procedimiento es el mismo a realizar con todas las demás incógnitas mencionadas al comienzo del cálculo del Elemento 1

$$I_{y1} = \lrcorner * \rho \text{ (kg/m}^3\text{)} * l_1 \text{ (m)} * (3 * De_1^4 + l_1^2 * De_1^2 - 3 * Di_1^4 - Di_1^2 * l_1^2) / 48 \text{ (m}^4\text{)} \quad (12)$$

* Sustituyendo en (12)

$$I_{y1} = 1.32 \text{ kg m}^2$$

$$I_{y 14} = 0.25 * m_{14} \text{ (kg)} * (De_{14}/2)^2 \text{ (m}^2\text{)} \quad (13)$$

* la masa fue calculada anteriormente

* Sustituyendo en (13):

$$I_{y14} = 1.67 \text{ kg m}^2$$

* Luego se pasa a la sumatoria de los **I_y**, cumpliendo la ecuación (11)

$$I_{y I} = I_{z I} = 2.99 \text{ kg m}^2$$

Datos necesarios para los productos de inercia (P):

x_1 → distancia desde el centro de la parte 1 al eje de giro del aerogenerador en el eje **x** = 0.3 m

y_1 → distancia desde el centro de la parte 1 al eje de giro del aerogenerador en el eje **y** = 0.04 m

z_1 → distancia desde el centro de la parte 1 al eje de giro del aerogenerador en el eje **z** = 0.09 m

m_1 → masa de la parte 1 (se calcula)

x_{14} → distancia desde el centro de la parte 14 al eje de giro del aerogenerador en el eje **x** = 0.6 m

y_{14} → distancia desde el centro de la parte 14 al eje de giro del aerogenerador en el eje **y** = 0.13 m

z_{14} → distancia desde el centro de la parte 14 al eje de giro del aerogenerador en el eje **z** = 0.2 m

* Todos los productos de inercia (**P**) se hallan por la ecuación (14)

$$\mathbf{P_{xy}_n} = x_n(\text{mm}) * y_n(\text{mm}) * m_n(\text{kg}) \quad (14)$$

* Para calcular $\mathbf{P_{xy}_1}$ hace falta la masa de la parte 1 (m_1)

$$m_1 = [(\pi * l_1(\text{m}) * \rho(\text{kg/m}^3) * (D_{e1}^2 - D_{i1}^2) (\text{m}^2))] / 4 \quad (15)$$

* sustituyendo en (15):

$$m_1 = 3.94 \text{ kg}$$

* ahora sustituyendo en (14):

$$\mathbf{P_{xy}_1} = 0.04 \text{ kg m}^2$$

* Para hallar el $\mathbf{P_{xy}_{14}}$ solo hay que sustituir en (14) los datos de la parte 14

$$\mathbf{P_{xy}_{14}} = 1.39 \text{ kg m}^2$$

* Luego se halla el **Pxy I** sustituyendo en la ecuación (11)

$$\mathbf{P_{xy}_I} = 1.43 \text{ kg m}^2$$

$$\mathbf{P_{yz}_1} = 0.01 \text{ kg mm}^2 \quad \mathbf{P_{yz}_{14}} = 0.46 \text{ kg m}^2$$

* sustituyendo en (11):

$$\mathbf{P_{yz}_I} = 0.47 \text{ kg mm}^2$$

$$\mathbf{P_{xz}_1} = 0.10 \text{ kg m}^2 \quad \mathbf{P_{xz}_{14}} = 2.14 \text{ kg m}^2$$

* Sustituyendo en la ecuación (11)

$$\mathbf{P_{xz}_I} = 2.24 \text{ kg m}^2$$

Resultados del Elemento I

$$\mathbf{I_x I} = 3.35 \text{ kg m}^2 \quad \mathbf{I_y I} = \mathbf{I_z I} = 2.99 \text{ kg m}^2$$

$$\mathbf{P_{xy}_I} = 1.43 \text{ kg m}^2 \quad \mathbf{P_{yz}_I} = 0.47 \text{ kg m}^2 \quad \mathbf{P_{xz}_I} = 2.24 \text{ kg m}^2$$

Elemento II

$I_x II$, $I_y II$, $I_z II$, $P_{xy} II$, $P_{yz} II$, $P_{xz} II$: todos estos valores son la sumatoria de los valores particulares de las partes que conforman el Elemento 2, (contiene las piezas numeradas en la hoja Excel (metodología) 2, 3, 16,17 y el 18), los cuales tiene según su forma geométrica una determinada fórmula para el cálculo de sus Momentos (**I**) y Productos (**P**) de Inercia.

Datos necesarios:

$l_2 \rightarrow$ longitud del pivote vertical = 0.19 m

$\rho \rightarrow$ peso específico del material = 7850 kg/m^3 (acero 20), este peso específico es el mismo para todas las piezas.

$De_2 \rightarrow$ diámetro exterior = 0.05 m

$Di_2 \rightarrow$ diámetro interior = 0.04 m

$l_3 \rightarrow$ longitud del pivote horizontal = 0.14 m

$De_3 \rightarrow$ diámetro exterior = 0.06 m

$Di_3 \rightarrow$ diámetro interior = 0.04 m

$L_{16} \rightarrow$ largo de la oreja del pivote superior recto = 0.24 m

$a_{16} \rightarrow$ ancho de la oreja del pivote superior recto = 0.07 m

$s_{16} \rightarrow$ espesor de la oreja del pivote superior recto = 0.006 m

$L_{17} \rightarrow$ largo de la oreja del pivote inferior inclinado = 0.07 m

$a_{17} \rightarrow$ ancho de la oreja del pivote inferior inclinado = 0.068 m

$s_{17} \rightarrow$ espesor de la oreja del pivote inferior inclinado = 0.006 m

$L_{18} \rightarrow$ largo de la oreja del pivote superior inclinado = 0.18 m

$a_{18} \rightarrow$ ancho de la oreja del pivote superior inclinado = 0.068 m

$s_{18} \rightarrow$ espesor de la oreja del pivote superior inclinado = 0.006 m

I_{x_2} y I_{x_3} se calculan por la ecuación (8)

Sustituyendo en (8)

$$I_{x_2} = 0.002 \text{ kg m}^2 \quad I_{x_3} = 0.003 \text{ kg m}^2$$

Los I_x de las partes 16, 17 y 18 se calculan por la siguiente ecuación:

$$I_{x_n} = 0.0833 * m_n \text{ (kg)} * (L_n^2 + a_n^2) \text{ (m}^2)$$

(17)

* para calcular todos estos I_x se necesita la masa de las tres partes , estas se calculan por la ecuación (18):

$$m_n = l_n (m) * a_n (m) * s_n (m) * \rho (kg/m^3)$$

(18)

* sustituyendo en (18) los valores de las tres partes :

$$m_{16} = 0.76 \text{ kg} \qquad m_{17} = 0.22 \text{ kg} \qquad m_{18} = 0.59 \text{ kg}$$

* sustituyendo las masas en (17) :

$$I_{x16} = 0.004 \text{ kg m}^2 \qquad I_{x17} = 0.0002 \text{ kg m}^2 \qquad I_{x18} = 0.002 \text{ kg m}^2$$

* Luego se sustituyen todos estos valores en (11):

$$I_x \text{ II} = 0.01 \text{ kg m}^2$$

I_{y2} y I_{y3} se calculan por la ecuación (12)

$$I_{y_n} = \pi * \rho (kg/m^3) * l_n (m) * (3 * D_{e_n}^4 + l_n^2 * D_{e_n}^2 - 3 * D_{i_n}^4 - D_{i_n}^2 * l_n^2) / 48 (m^4)$$

$$I_{y2} = 0.01 \text{ kg m}^2$$

$$I_{y3} = 0.003 \text{ kg m}^2$$

I_{y16} , I_{y17} , I_{y18} se hayan por la ecuación (19) y las masas ya fueron calculadas en el paso anterior:

$$I_{y_n} = 0.0833 * m_n (kg) * l_n^2 (m^2) \qquad (19)$$

* sustituyendo las masas correspondientes en la ecuación (19)

$$I_{y16} = 0.004 \text{ kg m}^2 \qquad I_{y17} = 0.0001 \text{ kg m}^2 \qquad I_{y18} = 0.002 \text{ kg m}^2$$

Luego se halla el I_y del **Elemento II** que no es más que la sumatoria de los I_{y_n} de las partes antes calculadas (**2, 3,16, 17 y 18**), por lo que se sustituyen estos valores en la ecuación (11):

$$I_{yII} = 0.01 \text{ kg m}^2$$

$$I_{z2} = I_{y2} = 5206.77 \text{ kg m}^2 \qquad I_{z3} = I_{y3} = 3081.64 \text{ kg m}^2$$

I_{z16} , I_{z17} , I_{z18} se obtienen por la ecuación (20)

$$I_{z_n} = 0.0833 * m_n (kg) * a_n^2 m^2 \qquad (20)$$

* Sustituyendo en (20):

$$I_{z16} = 0.0003 \text{ kg m}^2 \qquad I_{z17} = 0.0001 \text{ kg m}^2 \qquad I_{z18} = 0.0002 \text{ kg m}^2$$

* Sustituyendo entonces todos los valores de I_z en la ecuación (11):

$$I_{zII} = 0.01 \text{ kg m}^2$$

Datos necesarios para los productos de inercia:

x→ distancia desde el centro de las partes al eje de giro del aerogenerador en el eje X

y→ distancia desde el centro de las partes al eje de giro del aerogenerador en el eje Y

z→ distancia desde el centro de las partes al eje de giro del aerogenerador en el eje Z

Valores de los mismos por piezas:

$$x_2 = 0.11 \text{ m} \quad x_3 = 0.10 \text{ m} \quad x_{16} = 0.32 \text{ m} \quad x_{17} = 0.10 \text{ m}$$

$$x_{18} = 0.12 \text{ m}$$

$$y_2 = 0.18 \text{ m} \quad y_3 = 0.20 \text{ m} \quad y_{16} = 0.08 \text{ m} \quad y_{17} = 0.09 \text{ m}$$

$$y_{18} = 0.11 \text{ m}$$

$$z_2 = 0.17 \text{ m} \quad z_3 = 0.18 \text{ m} \quad z_{16} = 0.32 \text{ m} \quad z_{17} = 0.93 \text{ m}$$

$$z_{18} = 0.03 \text{ m}$$

Todos los productos de inercia (**P**) se hallan por la ecuación (14):

m₂ y **m**₃ se halla por la ecuación (15), por tanto:

$$m_2 = 1.26 \text{ kg} \quad m_3 = 1.07 \text{ kg}$$

sustituyendo en (14):

$$P_{xy_2} = 0.03 \text{ kg m}^2 \quad P_{xy_3} = 0.02 \text{ kg m}^2 \quad P_{xy_{16}} = 0.02 \text{ kg m}^2 \quad P_{xy_{17}} = 0.002 \text{ kg m}^2$$

$$P_{xy_{18}} = 0.01 \text{ kg m}^2$$

Haciendo la sumatoria:

$$P_{xyII} = 0.08 \text{ kg m}^2$$

$$P_{yz_2} = 0.04 \text{ kg m}^2 \quad P_{yz_3} = 0.04 \text{ kg m}^2 \quad P_{yz_{16}} = 0.02 \text{ kg m}^2 \quad P_{yz_{17}} = 0.002 \text{ kg m}^2$$

$$P_{yz_{18}} = 0.02 \text{ kg m}^2$$

Sustituyendo en la ecuación (11)

$$P_{yzII} = 0.12 \text{ kg m}^2$$

$$P_{xz_2} = 0.02 \text{ kg m}^2 \quad P_{xz_3} = 0.02 \text{ kg m}^2 \quad P_{xz_{16}} = 0.02 \text{ kg m}^2 \quad P_{xz_{17}} = 0.002 \text{ kg m}^2$$

$$P_{xz_{18}} = 0.02 \text{ kg m}^2$$

Sustituyendo en la ecuación (11)

$$P_{xz II} = 0.09 \text{ kg m}^2$$

Resultados del Elemento II

$$I_{xII} = 0.01 \text{ kg m}^2 \quad I_{yII} = 0.01 \text{ kg m}^2 \quad I_{zII} = 0.01 \text{ kg m}^2$$

$$P_{xyI} = 0.08 \text{ kg m}^2 \quad P_{yzII} = 0.12 \text{ kg m}^2 \quad P_{xzII} = 0.09 \text{ kg m}^2$$

Elemento III

I_{xIII} , I_{yIII} , I_{zIII} , P_{xyIII} , P_{yzIII} , P_{xzIII} : todos estos valores son la sumatoria de los valores particulares de las piezas que conforman el **Elemento III**, (denominación numérica en la hoja Excel (metodología)4, 12, y el 19)

Datos necesarios para el cálculo de los productos (P) y momentos (I) de inercia:

$l_4 \rightarrow$ longitud del cilindro base = 0.19 m

$De_4 \rightarrow$ diámetro exterior = 0.17 m

$Di_4 \rightarrow$ diámetro interior = 0.15 m

$l_{12} \rightarrow$ longitud de las bridas superiores de los codos = 0.14 m

$De_{12} \rightarrow$ diámetro exterior = 0.26 m

$Di_{12} \rightarrow$ diámetro interior = 0.17 m

$De_{19} \rightarrow$ diámetro exterior = 0.17 m

$Di_{19} \rightarrow$ diámetro interior = 0.15 m

$s_{19} \rightarrow$ espesor de los codos = 0.007 m

I_{x_4} se calcula por la ecuación (8)

* Sustituyendo en (8):

$$I_{x_4} = 0.10 \text{ kg m}^2$$

$I_{x_{12}}$ se calcula por la ecuación (12)

* Sustituyendo en (12):

$$I_{x12} = 0.09 \text{ kg m}^2$$

Nota: Los momentos de inercia de los codos fueron sacados del Autocad debido a lo complejo de la figura, la cual se tomo como la unión de los dos codos.

$$I_{x19} = 1.69 \text{ kg m}^2$$

Seguidamente la sumatoria de los momentos de inercia I_x

$$I_{xIII} = 1.87 \text{ kg m}^2$$

I_{y4} , I_{y12} se calculan por la ecuación (12)

* Sustituyendo en (12):

$$I_{y4} = 0.05 \text{ kg m}^2 \quad I_{y12} = 0.04 \text{ kg m}^2 \quad I_{y19} = 1.81 \text{ kg m}^2$$

Luego se halla el I_y del **Elemento III** que no es más que la sumatoria de los I_{y_n} de las piezas antes calculadas (numeración en la hoja Excel 4, 12 y 19)

$$I_{yIII} = 1.90 \text{ kg m}^2$$

$$I_{z4} = I_{y4} \quad I_{z12} = I_{y12} \quad I_{z19} = 0.24 \text{ kg m}^2$$

* Sustituyendo entonces todos los valores de I_z en la ecuación (11):

$$I_{zIII} = 0.33 \text{ kg m}^2$$

Calculo de los productos de inercia

Datos necesarios para los productos de inercia:

$x \rightarrow$ distancia desde el centro de las partes al eje de giro del aerogenerador en el eje **X**

$y \rightarrow$ distancia desde el centro de las partes al eje de giro del aerogenerador en el eje **Y**

$z \rightarrow$ distancia desde el centro de las partes al eje de giro del aerogenerador en el eje **Z**

Valores de los mismos por partes:

$$x_4 = 0 \text{ m} \quad x_{12} = -0.17 \text{ m} \quad x_{19} = -0.08 \text{ m}$$

$$y_4 = 0 \text{ m} \quad y_{12} = -0.16 \text{ m} \quad y_{19} = -0.02 \text{ m}$$

$$z_4 = 0 \text{ m} \quad z_{12} = 0.33 \text{ m} \quad z_{19} = 0.36 \text{ m}$$

Nota: las coordenadas de la pieza 4 son 0 porque esta se encuentra en el eje centroidal por lo tanto no tiene producto de inercia.

Todos los **productos** de inercia (**P**) se hallan por la ecuación (14)

m_{12} se halla por la ecuación (15), por tanto:

$$m_{12} = 1.84 \text{ kg}$$

Sustituyendo en la ecuación (14):

$$P_{xy12} = 0.05 \text{ kg m}^2$$

Para calcular P_{xy19} hace falta la masa la cual se calcula por la siguiente ecuación:

$$m_{19} = \rho(\text{kg/m}^3) * (H+h)/2(\text{m}) * \pi * (De_{19}^2 - Di_{19}^2) (\text{m}^2) \quad (21)$$

sustituyendo:

$$m_{19} = 45.56 \text{ kg}$$

por tanto:

$$P_{xy19} = 0.09 \text{ kg m}^2$$

Haciendo la sumatoria:

$$P_{xyIII} = -1.06 \text{ kg m}^2$$

$$P_{yz12} = -0.10 \text{ kg m}^2 \quad P_{yz19} = -0.38 \text{ kg m}^2$$

* Sustituyendo en la ecuación (11)

$$P_{yzIII} = -1.11 \text{ kg m}^2$$

$$P_{xz12} = -0.11 \text{ kg m}^2 \quad P_{xz19} = -1.38 \text{ kg m}^2$$

Sustituyendo en la ecuación (11)

$$P_{xz \text{ III}} = -0.44 \text{ kg m}^2$$

Resultados del Elemento III

$$I_{x\text{III}} = 1.87 \text{ kg m}^2 \quad I_{y\text{III}} = 1.90 \text{ kg m}^2 \quad I_{z\text{III}} = 0.33 \text{ kg m}^2$$

$$P_{xy\text{III}} = -1.06 \text{ kg m}^2 \quad P_{yz\text{III}} = -1.11 \text{ kg m}^2 \quad P_{xz\text{III}} = -0.44 \text{ kg m}^2$$

Elemento IV

$I_{x\text{IV}}$, $I_{y\text{IV}}$, $I_{z\text{IV}}$, $P_{xy\text{IV}}$, $P_{yz\text{IV}}$, $P_{xz\text{IV}}$: todos estos valores son la sumatoria de los valores particulares de las piezas que conforman el **Elemento IV**, (denominación según la hoja Excel metodología de cálculo) 5, 6, 7,8, 9.1, 9.2, 10, 11,13,15, 20.1,20.2, 20.3 y el 21)

Cada uno con su respectiva formula:

Datos:

$l_5 \rightarrow$ longitud de la carcasa tubular = 0.15 m

$l_6 \rightarrow$ longitud del cilindro magnético = 0.08 m

$l_7 \rightarrow$ longitud del laminado = 0.08 m

$l_8 \rightarrow$ longitud del bobinado = 0.09 m

$l_{9.1} \rightarrow$ longitud del cilindro 1 de la base del generador = 0.02 m

$l_{9.2} \rightarrow$ longitud del cilindro 2 de la base del generador = 0.11 m

l_{10} y $l_{11} \rightarrow$ longitudes de los rodamiento 1 y 2 del generador = 0.023 m

$l_{13} \rightarrow$ longitud del árbol del generador = 0.23 m

$l_{20.1.2.3} \rightarrow$ longitud de las 3 aspas = 2 m

$l_{21} \rightarrow$ longitud de la nariz = 0.21 m

$De_5 \rightarrow$ diámetro exterior = 0.40 m

$De_6 \rightarrow$ diámetro exterior = 0.38 m

$De_7 \rightarrow$ diámetro exterior = 0.34 m

$De_8 \rightarrow$ diámetro exterior = 0.34 m

$De_{9,1} \rightarrow$ diámetro exterior = 0.26 m

$De_{9,2} \rightarrow$ diámetro exterior = 0.12 m

$De_{10} \rightarrow$ diámetro exterior = 0.11 m

$De_{11} \rightarrow$ diámetro exterior = 0.11 m

$De_{13} \rightarrow$ diámetro exterior = 0.05 m

$De_{15} \rightarrow$ diámetro exterior = 0.38 m

$De_{21} \rightarrow$ diámetro exterior = 0.41 m

$Di_{21} \rightarrow$ diámetro interior = 0.40 m

$Di_5 \rightarrow$ diámetro interior = 0.38 m

$Di_6 \rightarrow$ diámetro exterior = 0.34 m

$Di_7 \rightarrow$ diámetro exterior = 0.24 m

$Di_8 \rightarrow$ diámetro exterior = 0.32 m

$Di_{9,1} \rightarrow$ diámetro exterior = 0.11 m

$Di_{9,2} \rightarrow$ diámetro exterior = 0.105 m

$Di_{10} \rightarrow$ diámetro exterior = 0.05 m

$Di_{11} \rightarrow$ diámetro exterior = 0.05 m

$s_{15} \rightarrow$ espesor de la tapa de la carcasa = 0.01 m

Los momentos de inercia I_{X_5} , I_{X_6} , I_{X_7} , I_{X_8} , $I_{X_{9,1}}$, $I_{X_{9,2}}$, $I_{X_{10}}$ y $I_{X_{11}}$ se calculan por la ecuación (8)

* Sustituyendo:

$$I_{X_5} = 1.59 \text{ kg m}^2 \quad I_{X_6} = 1.66 \text{ kg m}^2 \quad I_{X_7} = 2.32 \text{ kg m}^2 \quad I_{X_8} = 0.98 \text{ kg m}^2$$

$$I_{X_{9,1}} = 0.19 \text{ kg m}^2 \quad I_{X_{9,2}} = 0.02 \text{ kg m}^2 \quad I_{X_{10}} = I_{X_{11}} = 0.01 \text{ kg m}^2$$

$I_{X_{13}}$ se calcula por la ecuación (20) y m_{13} por la ecuación (21)

* sustituyendo en (21):

$$m_{13} = 3.61 \text{ kg}$$

Sustituyendo en la ecuación (20):

$$I_{x13} = 0.005 \text{ kg m}^2$$

I_{x15} se calcula por la ecuación (9), pero para esta se necesita m_{15} la cual se calcula por la ecuación (10):

Sustituyendo en la ecuación (10):

$$m_{15} = 8.67 \text{ kg}$$

sustituyendo m_{15} en la ecuación (9):

$$I_{x15} = 0.15 \text{ kg m}^2$$

* **Nota:** los momentos de inercia de las aspas tambien fueron extraidos del Autocad, por la complejidad de su geometría y por el corto tiempo disponible.

$$I_{x20.1} = 0.001 \text{ kg m}^2 \quad I_{x20.2} = 0.09 \text{ kg m}^2 \quad I_{x20.3} = 0.002 \text{ kg m}^2$$

I_{x21} se calcula por la siguiente ecuación:

$$I_{x21} = 3/10 * m_{21}(\text{kg}) * (De_{21}/2)^2 (\text{m}^2) \tag{22}$$

* sustituyendo en (22):

$$I_{x21} = 0.01 \text{ kg m}^2$$

Seguidamente la sumatoria de los momentos de inercia I_x

$$I_{xVI} = 5.45 \text{ kg m}^2$$

$I_{y5}, I_{y6}, I_{y7}, I_{y8}, I_{y9.1}, I_{y9.2}, I_{y10}, I_{y11}$ se calculan por la ecuación (12)

Sustituyendo en (12):

$$I_{y5} = I_{z5} = 0.82 \text{ kg m}^2$$

$$I_{y6} = I_{z6} = 0.83 \text{ kg m}^2$$

$$I_{y7} = I_{z7} = 1.17 \text{ kg m}^2$$

$$I_{y8} = I_{z8} = 0.50 \text{ kg m}^2$$

$$I_{y9.1} = I_{z9.1} = 0.10 \text{ kg m}^2$$

$$I_{y9.2} = I_{z9.2} = 0.01 \text{ kg m}^2$$

$$I_{y10} = I_{z10} = 0.01 \text{ kg m}^2$$

$$I_{y11} = I_{z11} = 0.01 \text{ kg m}^2$$

I_{y13} se calcula por la ecuación siguiente:

$$I_{y13} = 0.0833 * m_{13} * (3 * De_{13}^2 + l_{13}^2) \quad (23)$$

* Sustituyendo en (23)

$$I_{y13} = I_{z13} = 0.02 \text{ kg m}^2$$

I_{y15} se calcula por la ecuación (9):

Sustituyendo en (9):

$$I_{y15} = I_{z15} = 0.08 \text{ kg m}^2$$

$$I_{y20.1} = 0.005 \text{ kg m}^2$$

$$I_{z20.1} = 0.005 \text{ kg m}^2$$

$$I_{y20.2} = 0.01 \text{ kg m}^2$$

$$I_{z20.2} = 0.03 \text{ kg m}^2$$

$$I_{y20.3} = 0.004 \text{ kg m}^2$$

$$I_{z20.3} = 0.03 \text{ kg m}^2$$

I_{y21} se calcula por la formula siguiente:

$$I_y = I_z = 3/5 * m * (r^2/4 + h^2) \quad (24)$$

$$I_{y21} = I_{z21} = 0.002 \text{ kg m}^2$$

Luego se halla el I_y y el I_z del **Elemento IV** que no es más que la sumatoria de los I_{y_n} de las partes antes calculadas (según la hoja Excel 5, 6,7, 8, 9.1, 9.2, 10, 11, 13, 15, 20.1, 20.2, 20.3, y21)

Sustituyendo en (11):

$$I_{yIV} = 2.76 \text{ kg m}^2$$

$$I_{zIV} = 2.83 \text{ kg m}^2$$

Datos necesarios para los productos de inercia:

x → distancia desde el centro de las partes al eje de giro del aerogenerador en el eje X

y → distancia desde el centro de las partes al eje de giro del aerogenerador en el eje Y

z → distancia desde el centro de las partes al eje de giro del aerogenerador en el eje Z

Valores de los mismos por piezas:

$$\begin{array}{llll}
 x_5 = -0.17 \text{ m} & x_6 = -0.17 \text{ m} & x_7 = -0.17 \text{ m} & x_8 = -0.17 \text{ m} \\
 x_{9,1} = -0.17 \text{ m} & x_{9,2} = -0.17 \text{ m} & x_{10} = -0.17 \text{ m} & x_{11} = -0.17 \text{ m} \\
 x_{13} = -0.17 \text{ m} & x_{15} = -0.17 \text{ m} & x_{20,1} = -0.68 \text{ m} & x_{20,2} = 0.57 \text{ m} \\
 x_{20,3} = 0.63 \text{ m} & x_{21} = 0.47 \text{ m} & &
 \end{array}$$

$$\begin{array}{llll}
 y_5 = -0.28 \text{ m} & y_6 = -0.23 \text{ m} & y_7 = -0.23 \text{ m} & y_8 = -0.23 \text{ m} \\
 y_{9,1} = 0.17 \text{ m} & y_{9,2} = -0.22 \text{ m} & y_{10} = -0.10 \text{ m} & y_{11} = -0.25 \text{ m} \\
 t_{13} = -0.28 \text{ m} & y_{15} = -0.34 \text{ m} & y_{20,1} = -0.38 \text{ m} & y_{20,2} = -0.38 \text{ m} \\
 y_{20,3} = -0.38 \text{ m} & y_{21} = 0.33 \text{ m} & &
 \end{array}$$

$$\begin{array}{llll}
 z_5 = 0.33 \text{ m} & z_6 = 0.33 \text{ m} & z_7 = 0.33 \text{ m} & z_8 = 0.33 \text{ m} \\
 z_{9,1} = 0.33 \text{ m} & z_{9,2} = 0.33 \text{ m} & z_{10} = 0.33 \text{ m} & z_{11} = 0.33 \text{ m} \\
 z_{13} = 0.33 \text{ m} & z_{15} = 0.33 \text{ m} & z_{20,1} = -0.36 \text{ m} & z_{20,2} = -1.14 \text{ m}
 \end{array}$$

$$z_{20,3} = 0.33 \text{ m} \quad z_{21} = 0.33 \text{ m}$$

* Todos los productos de inercia (**P**) se hallan por la ecuación (14)

* Todas las masas desde m_5 hasta m_{11} se hallan por la ecuación (15), por tanto:

$$\begin{array}{llll}
 \mathbf{m_5 = 10.6 \text{ kg}} & \mathbf{m_6 = 12.68 \text{ kg}} & \mathbf{m_7 = 26.81 \text{ kg}} & \mathbf{m_8 = 9.12 \text{ kg}} \\
 \mathbf{m_{9,1} = 4.94 \text{ kg}} & \mathbf{m_{9,2} = 1.49 \text{ kg}} & \mathbf{m_{10} = 1.60 \text{ kg}} & \mathbf{m_{11} = 1.60 \text{ kg}}
 \end{array}$$

Sustituyendo en (14):

$$\begin{array}{llll}
 \mathbf{P_{xy_5} = 0.51 \text{ kg m}^2} & \mathbf{P_{xy_6} = 0.50 \text{ kg m}^2} & \mathbf{P_{xy_7} = 1.06 \text{ kg m}^2} & \mathbf{P_{xy_8} = 0.36 \text{ kg m}^2} \\
 \mathbf{P_{xy_{9,1}} = 0.14 \text{ kg m}^2} & \mathbf{P_{xy_{9,2}} = 0.06 \text{ kg m}^2} & \mathbf{P_{xy_{10}} = 0.03 \text{ kg m}^2} & \mathbf{P_{xy_{11}} = -0.07 \text{ kg m}^2} \\
 \mathbf{P_{xy_{13}} = 0.17 \text{ kg m}^2} & \mathbf{P_{xy_{15}} = 0.51 \text{ kg m}^2} & \mathbf{P_{xy_{20,1}} = 1.30 \text{ kg m}^2} & \mathbf{P_{xy_{20,2}} = -1.09 \text{ kg m}^2} \\
 \mathbf{P_{xy_{20,3}} = -1.20 \text{ kg m}^2} & \mathbf{P_{xy_{21}} = 0.65 \text{ kg m}^2} & &
 \end{array}$$

Haciendo la sumatoria:

$$\mathbf{P_{xyIV} = 2.80 \text{ kg m}^2}$$

$$\begin{aligned}
 P_{yz5} &= -0.98 \text{ kg m}^2 & P_{yz6} &= -0.96 \text{ kg m}^2 & P_{yz7} &= -2.04 \text{ kg m}^2 & P_{yz8} &= -0.69 \text{ kg m}^2 \\
 P_{yz9,1} &= -0.27 \text{ kg m}^2 & P_{yz9,2} &= -0.11 \text{ kg m}^2 & P_{yz10} &= -0.06 \text{ kg m}^2 & P_{yz11} &= 0.13 \text{ kg m}^2 \\
 P_{yz13} &= -0.33 \text{ kg m}^2 & P_{yz15} &= -0.99 \text{ kg m}^2 & P_{yz20,1} &= 0.69 \text{ kg m}^2 & P_{yz20,2} &= 2.19 \text{ kg m}^2 \\
 P_{yz20,3} &= -0.63 \text{ kg m}^2 & P_{yz21} &= 0.24 \text{ kg m}^2 & & & &
 \end{aligned}$$

* Sustituyendo en la ecuación (11)

$$P_{yzIV} = -1408793.14 \text{ kg mm}^2$$

$$\begin{aligned}
 P_{xz5} &= -0.61 \text{ kg m}^2 & P_{xz6} &= -0.73 \text{ kg m}^2 & P_{xz7} &= -1.54 \text{ kg m}^2 & P_{xz8} &= -0.52 \text{ kg m}^2 \\
 P_{xz9,1} &= -0.28 \text{ kg m}^2 & P_{xz9,2} &= -0.09 \text{ kg m}^2 & P_{xz10} &= -0.09 \text{ kg m}^2 & P_{xz11} &= -0.09 \text{ kg m}^2 \\
 P_{xz13} &= -0.21 \text{ kg m}^2 & P_{xz15} &= -0.50 \text{ kg m}^2 & P_{xz20,1} &= 1.24 \text{ kg m}^2 & P_{xz20,2} &= -3.31 \text{ kg m}^2 \\
 P_{xz20,3} &= 1.05 \text{ kg m}^2 & P_{xz21} &= 0.65 \text{ kg m}^2 & & & &
 \end{aligned}$$

Sustituyendo en la ecuación (11)

$$P_{xz IV} = -4.93 \text{ kg m}^2$$

Resultados del Elemento IV

$$\begin{aligned}
 I_{xIV} &= 5.45 \text{ kg m}^2 & I_{yIV} &= 2.76 \text{ kg m}^2 & I_{zIV} &= 2.83 \text{ kg m}^2 \\
 P_{xyIV} &= 2.80 \text{ kg m}^2 & P_{yzIV} &= -1.68 \text{ kg m}^2 & P_{xzIV} &= -4.93 \text{ kg m}^2
 \end{aligned}$$

2.2.1 Cálculo de las componentes de la velocidad angular de la cola, respecto al sistema de coordenadas principales.

Los ángulos utilizados en esta fórmula no son más que la inclinación de la cola de 27^0 respecto a la vertical y los 45^0 de inclinación con respecto al eje del rotor para la determinación de las componentes de la velocidad angular de la cola, respecto al sistema de coordenadas señalado en la [Figura # 2.1](#).

* El dato de W_c fue sacado de (raidel)

$$W_{zc} = -W_c * \cos 27^0 = -6.28 \text{ rad/s} * 0.891 = -5,72 \text{ rad/s.}$$

$$W_{xc} = -W_c * \sin 27^0 * \cos 45^0 = -6.28 \text{ rad/s} * 0.453 * 0.707 = -4.35 \text{ rad/s.}$$

$$W_{yc} = W_{xc} = -4.35 \text{ rad/s.}$$

2.2.2 Cálculo de las componentes de la velocidad angular del aerogenerador.

Ya aquí se calculan las componentes de la velocidad angular del aerogenerador a partir de las velocidades calculadas anteriormente.

W_z también fue sacado de la tesis de raidel

$$W_{y'} = W_y + W_{yc} = 62.83 \text{ rad/s} - 4.35 \text{ rad/s} = \mathbf{58.48 \text{ rad/s}}$$

$$W_{z'} = W_z + W_{zc} = 6.28 \text{ rad/s} - 5.72 \text{ rad/s} = \mathbf{0.56 \text{ rad/s}}$$

$$W_{x'} = W_x + W_{xc} = 0 \text{ rad/s} - 4.35 \text{ rad/s} = \mathbf{-4.35 \text{ rad/s}}$$

2.2.3 Cálculo de las componentes del momento de inercia del aerogenerador.

$$I_{x'} = \sum I_{xi} = I_{x1} + I_{x2} + I_{x3} + I_{x4} = 10.68 \text{ kg m}^2$$

$$I_{y'} = \sum I_{yi} = I_{y1} + I_{y2} + I_{y3} + I_{y4} = 7.67 \text{ kg m}^2$$

$$I_{z'} = \sum I_{zi} = I_{z1} + I_{z2} + I_{z3} + I_{z4} = 6.17 \text{ kg m}^2$$

2.2.4 Cálculo de las componentes del producto de inercia del aerogenerador.

$$P_{xy'} = \sum P_{xyi} = P_{xy1} + P_{xy2} + P_{xy3} + P_{xy4} = 3.25 \text{ kg m}^2$$

$$P_{yz'} = \sum P_{yzi} = P_{yz1} + P_{yz2} + P_{yz3} + P_{yz4} = -2.20 \text{ kg m}^2$$

$$P_{xz'} = \sum P_{xzi} = P_{xz1} + P_{xz2} + P_{xz3} + P_{xz4} = -3.04 \text{ kg m}^2$$

2.2.5 Cálculo de las componentes del momento cinéticos del aerogenerador

$$h_x = (W_x' * I_x') - (W_y' * P_{xy}') - (P_{xz}' * W_z') = -2.35E+02 \text{ kg m}^2/\text{s}$$

$$h_y = - (P_{xy}' * W_x') + (I_y' * W_y') - (P_{yz}' * W_z') = 4.64E+02 \text{ kg m}^2/\text{s}$$

$$h_z = - (P_{xz}' * W_x') - (P_{yz}' * W_y') + (I_z * W_z') = 8.84E+01 \text{ kg m}^2/\text{s}$$

2.2.6 Cálculo del momento cinéticos del aerogenerador

$$h_o = h_x + h_y + h_z = h_x i + h_y j + h_z k = (-2.35E+02)i + (4.64E+02)j + (8.84E+01)k$$

2.2.7 Cálculo del momento resultante.

$$\sum M_o = \frac{\delta h_o}{\delta t} + \Omega_x h_o \quad (2)$$

$\frac{\delta h_o}{\delta t} = 0$ Debido a que la velocidad angular del aerogenerador se asume constante, puesto

que se está analizando cuando comienza a actuar el mecanismo de regulación.

$$\cdot \sum M_o = \Omega_x h_o \quad (8)$$

$$\Omega = W_z' = (0.56 \text{ rad/s})k$$

$$\sum M_o = (0.56 \text{ rad/s})k * (-2.35E+02)i + (4.64E+02)j + (8.84E+01)k$$

$$\sum M_o = (2.62E+02)i + (-1.33E+02)j \quad (9)$$

2.2.8 Cálculo de la fuerza mínima que debe ejercer el viento sobre el aerogenerador (en especial sobre las paletas) para que comience a actuar el mecanismo de la cola.

$$\sum Mo = \text{Brazo (r)} \times \text{Fuerza (F)} \quad (1)$$

$$r = - (0.172\text{m})i + (0.333\text{m})k \quad F = (F) j$$

$$\sum Mo = - (0.172\text{m})i + (0.333\text{m})k \times (F) j = -[0.172\text{m} (F)] k - [0.333\text{m} (F)] i \quad (10)$$

Iguando (9) y (10)

$$(2.62\text{E}+02)i + (-1.33\text{E}+02)j = -[0.172\text{m} (F)] k - [0.333\text{m} (F)] i$$

$$(2.62\text{E}+02\text{kg m}^2/\text{s}^2)i = -[0.333\text{m} (F)] i$$

Despejando F

$$F = -7.95\text{E}+02 \text{ N} = 795 \text{ N} = 0.75 \text{ KN}$$

Fuerza que debe ejercer el viento sobre el aerogenerador para que comience a actuar el mecanismo de regulación por momento de inercia en la cola.

2.3 Conclusiones

- 1- Con la metodología se logró una mayor rapidez a la hora de hacer los cálculos.
- 2- Se obtuvo un valor de fuerza aceptable con relación a los cálculos hechos anteriormente (raidel y waldi).

CAPÍTULO 3



CAPITULO 3

3.1 Introducción

En el Capítulo anterior se a desarrollado un metodología que nos permite poner en funcionamiento las bases para el cálculo de los componentes de un aerogenerador con el sistema de orientación por momento de inercia y con el eje del generador desfasado del eje de giro del aerogenerador (yaw), con vista a lograr una mayor facilidad en el manejo y utilización de la metodología la misma se ha implementado en una hoja de cálculo Excel, que permitirá ir variando las características geométricas del conjunto y a muy rápidamente obtener los resultados de las variaciones en las fuerzas y momentos producidos, ante el cambio de esos parámetros o de la velocidad del viento.

3.2 Ejemplo de variaciones en la metodología y resultados obtenidos

3.2.1 Variando las dimensiones de algunas partes del aerogenerador

Estos son las dimensiones que tiene actualmente el **tubo recto de la cola**

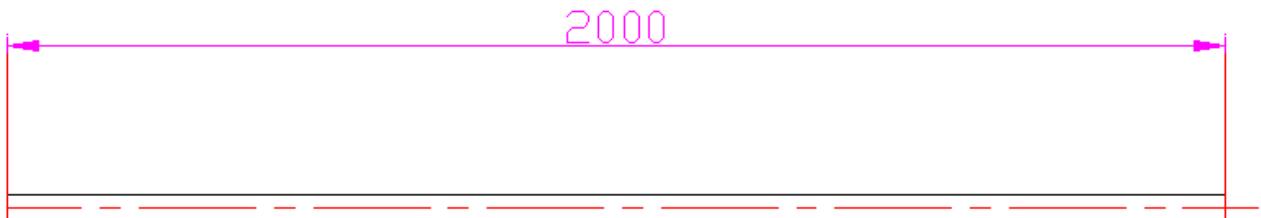


Figura 3. 1: Tubo recto de la cola

1	Tubo recto de la cola	42	38	2000
---	-----------------------	----	----	------

Estos son los momentos de inercia que dan con esas dimensiones

1 6325,92 1318444,69 1318444,69

Al variarle sus dimensiones por las siguientes:

1 Tubo recto de la cola 38 28 1000

Surgen entonces las siguientes respuestas:

1 4530,73 341362,17 341362,17

Tomando otra parte cualquiera, como es la **carcasa tubular** que tiene como dimensiones las señaladas a continuación:

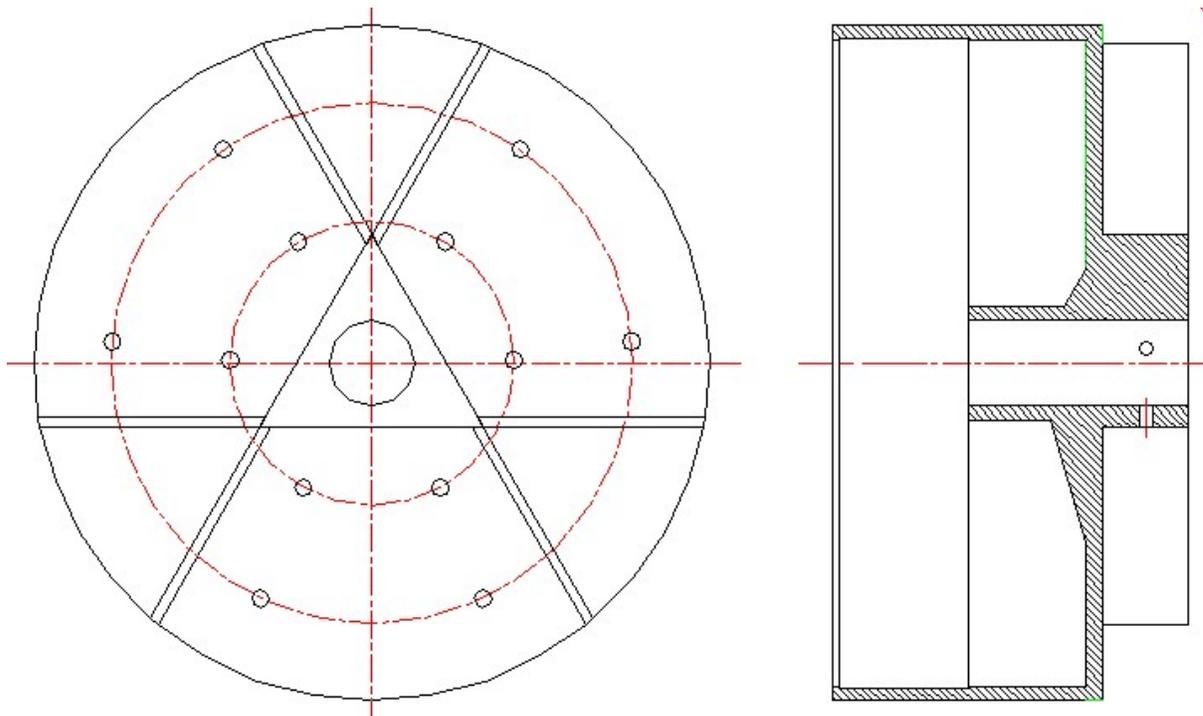


Figura 3. 2: Carcasa tubular

5 Carcasa tubular 395 380 148

Tiene los momentos de inercia siguientes:

5	1592575,63	816053,98	816053,98
---	------------	-----------	-----------

Al variar sus dimensiones por:

5	Carcasa tubular	200	189	120
---	-----------------	-----	-----	-----

Da los siguientes resultados:

5	119797,90	63728,29	63728,29
---	-----------	----------	----------

Ahora viendo la insidencia sobre los productos, de estos cambios de las dimensiones de ambas partes, podemos ver las variaciones siguientes:

1	41420,70	12126,97	101761,59
---	----------	----------	-----------

1	42715,09	12505,94	104941,64
---	----------	----------	-----------

5	507676,84	-980652,32	-608266,47
---	-----------	------------	------------

5	151515,20	-292673,85	-181535,99
---	-----------	------------	------------

3.2.2 Variando velocidades angulares

Estas son las que tiene actualmente

Wc (rad/s) -6,28	Wy(rad/s) 62,83	Wz (rad/s) 6,28	Wx(rad/s) 0
cos (27°) 0,91	cos (45°) 0,76	Wy'(rad/s) 58,49	Wz'(rad/s) 0,57
		Wx'(rad/s) -4,34	
Wzc(rad/s) -5,71	Wxc(rad/s) -4,34	Wyc(rad/s) -4,34	

Con estas velocidades dan los momentos cinéticos siguientes y la fuerza correspondiente:

hx -5,46E+13	hy 5,81E+14	hy 6,04E+12
F -		
9,95E+08		

Al cambiar Wc por 6 rad/s dan estos resultados:

Wc (rad/s) -6	Wy(rad/s) 62,83	Wz (rad/s) 6,28	Wx(rad/s) 0
cos (27°) 0,91	cos (45°) 0,76	Wy'(rad/s) 58,68	Wz'(rad/s) 0,82
		Wx'(rad/s) -4,15	

$W_{zc}(\text{rad/s})$	$W_{xc}(\text{rad/s})$	$W_{yc}(\text{rad/s})$
-5,46	-4,15	-4,15

h_x	h_y	h_z
-5,22E+13	5,83E+14	8,77E+12

F
-
1,45E+09

3.2.3 Variando las distancias de x , y , z .

Siendo estas las distancias:

$$1 \quad x = 296,87 \quad y = 35,37 \quad z = 86,91$$

$$5 \quad x = -172,34 \quad y = -277,85 \quad z = 332,9$$

Tiene los mismos productos de inercia señalados anteriormente, pero al variar estas distancias por las siguientes, dan otros resultados de productos de inercia.

$$1 \quad x = 224,78 \quad y = 30,78 \quad z = 76,98$$

$$1 \quad 27286,36 \quad 10740,65 \quad 101761,59$$

$$5 \quad x = -160,56 \quad y = -200,78 \quad z = 309,98$$

$$5 \quad 507676,84 \quad -980652,32 \quad -608266,47$$

3.3 Conclusiones

CONCLUSIONES



CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES



RECOMENDACIONES

ANEXOS



BIBLIOGRAFÍA



BIBLIOGRAFIA.

1. **Abbott-Von Doenhoff**; "Theory Of Wing Sections"; Dover Publ; United States; 1959.
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 Córdoba; 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. **Bastianon Ricardo.**; "Energía del Viento y Diseño de Generadores Eólicos de Electricidad e Turbinas Eólicas"; Edit. Tiempo de Cultura; Argentina; 1992.
9. **Bastianon. Ricardo**; "Diseño de un Aerogenerador: Adaptación Óptima Entre la Velocidad de Giro de la Hélice y el del Alternador"; F.I.U.B.A. – CITEFA; Argentina; 1998.
10. **Burgos Payan. Manuel - Gonzalez Rodríguez. Angel G. - Vallejo Saura. Manuel A**; "Generadores De Inducción en las Practicas de Laboratorio"; Dto. de Ingeniería Eléctrica, Escuela Superior de Ingenieros Industriales; Sevilla, España; 1997.
11. "BWC Excel, 10 Kw Class, Wind Turbine"; disponible en: <http://www.Berguey.com>
12. Compendium in Wind-turbine blade theory and praxis based on experience from the 4th. Period of wind electrical power generation. 1968-1978.

13. “Condiciones de Contorno”; Moyo 2000; disponible en:
<http://usuarios.arnet.com.ar/marman/Proyecto.Final.html>
14. “Consideraciones Generales Sobre Aspectos Relacionados a la Transformación del Viento con la Altura.”; Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales; Fuerza Aérea Argentina-Centro Espacial San Miguel, Argentina; Julio 1983.
15. **Cruz Cruz. Castro Gil**; "Energía Eólica"; Edit. PROGENSA; España; 1997.
16. **Cunty Guy**; “Aeromotores y aerogeneradores”; Ediciones Marzo 80; Barcelona; 1981.
17. **Dobrovolski. V**; “Elementos de Máquina”; Edit. MIR; Moscú; 1970.
18. “Energía eólica, la fuente renovable que ya es alternativa”; disponible en:
<http://www.iespana.es/heberg.html>
19. **Fernández L. Gilda**; “ Resistencia de Materiales”; Edit. Pueblo y Educación; Cuba; 1981.
20. **FITZGERALD - KINGSLEY – UMANS**; "Máquinas Eléctricas"; Ed. Mc. Graw Hill; México; 1992.
21. **Flavin Christopher and Lenssen Nicholas**; “Power Surge”; Edit. W.W. Norton & Company; 1994.
22. **Freris.L.L**; “Wind Energy Conversion Systems”;Edit.Prentice Hall; New York.
23. “Generadores Eólicos de Electricidad”; Tesis de graduación secundaria; disponible en:
<http://www.monografias.com/trabajos4/geneolico/geneolico.shtml>
24. **Golding E. W X**; “The Generation of electricity by wind power”; E.& F.N Son Ltd.; 1996.
25. **González Pérez. Ramón R**; “Manual de Metrología Dimensional”; Universidad central de las Villas; Cuba; 1990.
26. **Grauers Anders**; “Design of Direct – driven Permanent – magnet Generators for Wind Turbines” Technical Report No 292. the School of Electrical and Computer Engineering CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY; 1996.

27. **Heier. Siegfried**; "Grid Integration Of Wind Energy Conversion Systems"; John Wiley & Sons Ltd; England; 1996.
28. **Helsing. Johan**; "Motor for a Hybrid Electric Vehicle", Licentiate thesis, Chalmers University of Technology, School of Electrical and Computer Engineering, Technical Report No. 282L; Göteborg, Sweden; April 1998.
29. **Hengveld-Lysen-Paulissen**;"PUBLICATION CWD 78-3: Matching of Wind Rotors to Low Power Electrical Generators"; Edit. CWD; Netherlands; 1978.
30. **Instituto Para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA)**; "Manuales de Energías Renovables (Energía Eólica)" Edición Especial Cinco Dias; 1992.
31. "J Bornay, Aerogeneradores"; disponible en: <http://www.bornay.com>
32. **Jansen W . A. M and Smulders. P. T**; "Rotor design for horizontal axis windmills"; CWD c/o Readgevend Ingenieursbureau BV; May 1977.
33. **Kruse Jane; Steffensen Jesper**; "Foring Small-scale wind turbines until 25 kW"; Reporte del Folkecenter for Renowable Energy; 1996.
34. **Les Gurieres. Desire**; "Energía Eólica, Teoría, concepción..."; Edit. MASSON; España; 1983.
35. **Lindström. Joachim**; "Development of an Experimental Permanent-Magnet Motor Drive", Licentiate thesis. Chalmers University of Technology, School of Electrical and Computer Engineering, Technical Report No. 312L, Göteborg, Sweden, April 1999.
36. **Lloyd Germanischer**; "Rules and Regulations, Wind Energy"; Germany; 1993.
37. Manattini. Martin; "Diseño de Sistema Conversor de Energía"; diciembre del 2000; disponible en: http://usuarios.arnet.com.ar/marman/proyecto/proyecto_final.html.
38. **Mattio Héctor, Ponce Graciela**; "Nociones Generales de Energía Eólica"; CREE, Rawson, Chubut; Argentina; 1998.
39. **Park. Jack**; "The Wind Power Book"; Edit. Cheshire Books; United States; 1981.
40. **Piggott. H**; "Wind Turbine Plans North American. Edition 1990.

41. **Piggott. H**; “Windpower Workshop”; United Kindow; 1997.
42. **Pisarenko, G. S.** ; “Manual de Resistencia de Materiales”; Edit. MIR; Moscú; 1989.
43. “Principios de Conversión de Energía eólica”; Edit. CIEMAT; España; 1997.
44. “Programa de Cálculo de la Potencia de un Aerogenerador”; Actualizado el 5 de diciembre 2001; disponible en:
<http://www.windpower.org/es/tour/wres/pow/index.htm>
45. **Rechetov. D**; “Elementos de Máquina”; Edit. MIR; URSS; 1981.
46. **Rittenhouse. David**; "La Energía Eólica"; Edit. Fraternal; Argentina; 1978.
47. **Rodríguez Hernández. Orlando y Corugedo Méndez. Ángel**; “Dibujo Aplicado para Ingenieros” Tomo I y II; Edit. Pueblo y Educación; Cuba; 1986.
48. **Sánchez Teodoro**; Gerente del programa de energía de ITDG. Perú; “ Entrevista Sostenida con el Autor”; Julio 2002.
49. “Scoraig Wind Electric”; disponible en:
<http://www.windmission.dk/workshop/books.html>
50. “Sección: Energía Eólica”; disponible en:
<http://www.conae.gob.mx/renovables/eolica.html>
51. “Small Wind Turbine Design Notes”; disponible en:
<http://www.windmission.dk/workshop/books.html>
52. **Spera David**; "WIND TURBINE TECHNOLOGY"; Edit. ASME press; United States; 1994.
53. **Thiringer. Torbjörn**; “Measurement and Modelling of Low-Frequency Disturbances in Induction Machines”, Doctoral thesis. Göteborg, Sweden, Chalmers University of Technology, School of Electrical and Computer Engineering, November 1996.
54. “To find chord of a windmill rotor blade as a function of radius r”; disponible en:
http://www.servocomm.freeserve.co.uk/Windpower/uber_frame.htm

55. **Warne D.F**; “Generation of electricity from wind”; I.E.E. review, vol. 124,numero 11 R, nov 1987.

56. “Wind Power”; disponible en:

<http://ces.iisc.ernet.in/energy/paper/SEHandbook/solarerg.html>

De aquí para abajo la nueva

- http://spanish.peopledaily.com.cn/spanish/200304/07/sp20030407_63171.html (habla sobre la situación global después de la guerra contra iraq)

2- aquí tengo que poner lo de las enerias renovables

3- **Instituto Para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA)**; “Manuales de Energías Renovables (Energía Eólica)” Edición Especial Cinco Dias; 1992. (30)raidel

4- **Araus. Maria E , Massa. Aldo A y Solelti. Alfredo J**; “Energía Eólica”; Universidad Católica de Córdoba; 1983.(5) raidel

5- **Cunty Guy**; “Aeromotores y aerogeneradores”; Ediciones Marzo 80; Barcelona; 1981(16)raidel

6- <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar02/HTML/Articulo01.htm> (estado actual y desarrollo de la energia eolica en cuba

7- aquí hay que poner lo de la tesis de pedro

8- Manattini. Martin; “Diseño de Sistema Conversor de Energía”; diciembre del 2000; disponible en: http://usuarios.arnet.com.ar/marman/proyecto/proyecto_final.html **37 (raidel)**

9- **Sánchez Teodoro**; Gerente del programa de energía de ITDG. Perú; “ Entrevista Sostenida con el Autor”; Julio 2002 48raidel

10- **Piggott. H**; “Wind Turbine Plans North American. Edition 1990 40 raidel

- 2- <http://www.geocities.com/RainForest/Canopy/7192/energia.htm>(esta es la que habla de las ventajas y desventajas)
- 3-
- 4- *Fundación Educativa El Salvador Departamento de Ciencias (energía eólica) (este es el que habla de la Energía eólica)*
- 5- Marzo 2004 Greenpeace Argentina Mansilla 3046, 1425 Buenos Aires. Tel: 54-11-49620404, Fax: 54-11-49637164 Email: energia@ar.greenpeace.org (este es el que habla todo lo del medio ambiente)
- 6 - tesis de raidel
- 7 - tesis de pedro