

Universidad Central «Marta Abreu» de Las Villas
Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial
Carrera de Ingeniería Mecánica



Trabajo de Diploma

**Estudio técnico para evaluar la posibilidad de
producción de Aerogeneradores de baja potencia en la
fábrica de Antenas de Santa Clara.**

Autor: Andy Rivero Fleites

Tutor: Dr. Feliberto Fernández Castañeda

Curso 2016-2017

Dedicatoria

En especial a mi papá por ser la base de todos mis pensamientos día a día.

A mi mamá por brindarme su apoyo durante todos estos años.

A mi esposa por darme ese apoyo a larga distancia, y por siempre creer en mí, y darme un espacio en su corazón.

A mi hermana y cuñado por estar siempre ahí, a mi lado, brindándome su apoyo.

A todos ellos les dedico mis esfuerzos porque son parte de mi vida.

Agradecimientos

A Ricardo Arañón por todos sus buenos consejos y por siempre creer en este trabajo.

A Soledad por todos sus aportes que fueron de gran ayuda.

Mi tutor Dr. Feliberto Fernández Castañeda por darme el apoyo para realizar este trabajo.

A todos mis familiares que me han ayudado durante estos cinco años, en especial mis tíos Juanito e Isabel.

A mi segunda familia Yaima, Omar, Odalys, Leo y la cuquita por apoyarme en todo momento y brindarme su cariño día a día.

A mi tía Dulce, Julián, y Minney por siempre creer en mí y apoyarme en los momentos más difíciles.

A todos mis amigos, por brindarme su apoyo en todo momento.

A todos ¡Muchas Gracias!

Resumen

En la actualidad se precisa la necesidad de buscar fuentes alternativas de energía. Cuba abala el empleo de la energía eólica, una de estas opciones es el empleo de aerogeneradores como forma típica de aprovechar la energía del viento. En función de esta idea se realizó el trabajo con el objetivo de evaluar con un estudio técnico la posibilidad de fabricación de aerogeneradores de baja potencia en la empresa de Antenas, perteneciente al OSDE, el grupo de la electrónica (GELECT). Inicialmente se estudiaron las clasificaciones de los aerogeneradores, sus antecedentes y tendencias actuales. Se explican los principales componentes del aerogenerador de baja potencia. Se selecciona el material, el método de fabricación, de acuerdo a las posibilidades técnicas del país para su fabricación. Además se determina el lugar a instalar el aerogenerador de baja potencia y se calculan los parámetros iniciales.

Abstract

The wind energy is the best choice for the use of wind turbine. We need to do some research and value the possibility of produce wind turbine in Antena's Factory. At the beginning, there is an investigation, about all clasifications of wind turbine, their past and actual tendencies. After that, there is a good explanation about the principal components of the wind turbine. Finally we choose the appropriate material, and the right manufacturing method for his design in Cuba and we choose the right place for the wind turbine.

Índice

<i>Introducción</i>	1
<i>Capítulo I Estado del arte sobre el diseño de aerogeneradores de baja potencia en Cuba y en el mundo.</i>	3
1.1 <i>Fuentes renovables de energía</i>	3
1.2 <i>Energía eólica</i>	4
1.2.1 <i>Ventajas de la energía eólica</i>	5
1.2.2 <i>Desventajas de la energía eólica</i>	5
1.3 <i>Potencial Eólico</i>	6
1.4 <i>Aerogeneradores</i>	7
1.5 <i>Antecedentes</i>	7
1.6 <i>Criterios de clasificación de los aerogeneradores</i>	10
1.7 <i>Tendencias Actuales en el mercado de los aerogeneradores de baja potencia</i>	13
1.8 <i>Conclusiones parciales</i>	17
<i>Capítulo 2 Aerodinámica. Descripción de los principales componentes del aerogenerador de baja potencia</i>	18
2.1 <i>Aerodinámica. Principio de funcionamiento</i>	18
2.2 <i>Descripción de los principales componentes del aerogenerador de baja potencia. Materiales</i>	26
2.2.1 <i>Palas</i>	27
2.2.2 <i>Buje</i>	31
2.2.3 <i>Nariz o cubo</i>	32
2.2.4 <i>Generador</i>	33
2.2.5 <i>Estator o inducido</i>	34
2.2.6 <i>Rotor o inductor</i>	35
2.2.7 <i>Torre</i>	39
2.2.8 <i>Timón de cola</i>	41
2.2.9 <i>Sistema de Freno</i>	42
2.3 <i>Conclusiones parciales</i>	43
<i>Capítulo 3 Selección del material y el método de fabricación para los principales componentes del aerogenerador de baja potencia</i>	44
3.1 <i>Parámetros iniciales del aerogenerador de baja potencia</i>	44

<i>3.2 Selección del material para los principales componentes del aerogenerador de baja potencia.....</i>	<i>49</i>
<i>3.2.1 Palas</i>	<i>49</i>
<i>3.2.2 Buje y Estator</i>	<i>50</i>
<i>3.2.3 Nariz o cubo</i>	<i>51</i>
<i>3.2.4 Rotor.....</i>	<i>52</i>
<i>3.2.5 Torre y Timón de cola.....</i>	<i>53</i>
<i>3.3 Métodos de Fabricación para los principales componentes del aerogenerador de baja potencia.</i>	<i>54</i>
<i>3.3.1 Palas.</i>	<i>54</i>
<i>3.3.2 Buje</i>	<i>55</i>
<i>3.3.3 Estator</i>	<i>56</i>
<i>3.3.4 Rotor.....</i>	<i>57</i>
<i>3.3.5 Nariz o cubo</i>	<i>58</i>
<i>3.3.6 Torre y Timón de cola</i>	<i>58</i>
<i>3.4 Conclusiones parciales.....</i>	<i>60</i>
<i>Conclusiones.....</i>	<i>61</i>
<i>Recomendaciones.....</i>	<i>62</i>
<i>Referencias Bibliográficas</i>	<i>63</i>
<i>Bibliografía</i>	<i>65</i>
<i>Anexo 1</i>	<i>66</i>
<i>Anexo 2</i>	<i>67</i>
<i>Anexo 3.....</i>	<i>68</i>
<i>Anexo 4.....</i>	<i>69</i>

Introducción

En Cuba y en el mundo se ha visto la necesidad de buscar fuentes alternas de energía. Primordialmente las razones se fundamentan en bajar el consumo de los combustibles fósiles, logrando en el tiempo la disminución de las emisiones de CO₂ que se depositan día a día en la atmósfera terrestre. En adición a los factores ambientales, se puede mencionar que en algunos países el costo de la gasolina y toda la gama de combustibles fósiles es bastante elevado.

La motivación principal es combinar los aspectos tanto económicos como ambientales para crear una conciencia colectiva referente al uso de tecnologías de generación de energía. Casi toda la energía que se dispone proviene directa o indirectamente del Sol. La energía solar está constituida por la porción de irradiación solar que es interceptada por la Tierra y constituye, como recurso energético terrestre, la principal fuente de energía renovable a nuestro alcance. Las energías renovables son inagotables, limpias y se pueden utilizar de forma autogestionada (aprovechamiento en el mismo lugar en que se producen). Además tienen la ventaja adicional de complementarse entre sí, favoreciendo la integración entre ellas. Una de estas fuentes de energía renovable es la energía eólica.

La energía eólica se encuentra dentro de las alternativas, como una de las ciencias más desarrolladas e investigadas actualmente. Hoy en día países como Alemania y España se sitúan al nivel de Dinamarca, conformando los países europeos más desarrollados en este tema, sin embargo, el resto del viejo continente ha implementado en gran medida este tipo de energía. En un futuro se espera aprovechar el recurso eólico presente en todos los lugares del mundo. La utilización del viento como fuente de energía, proporciona electricidad a sus usuarios con un impacto ambiental casi nulo sin un gasto de combustible constante, ya que la naturaleza lo proporciona. La forma típica de aprovechar esta energía es a través de la utilización de aerogeneradores o turbinas de viento.

La Empresa de Antenas de Santa Clara necesita realizar un estudio de factibilidad para valorar la posibilidad técnica y económica de producir en serie, aerogeneradores de

baja potencia. Es imprescindible la valoración técnica y el análisis de viabilidad para realizar el diseño del aerogenerador.

Problema científico:

¿Cuál es la factibilidad técnica y económica de definir el diseño de un aerogenerador de baja potencia que permita su fabricación en la Empresa de Antenas, de Santa Clara?

Objetivo General:

Evaluar a partir de un estudio técnico la posibilidad de fabricación de aerogeneradores de baja potencia en la Empresa de Antenas para la sustitución de importaciones.

Objetivos específicos:

1. Constatar el estado del arte en el diseño de aerogeneradores de baja potencia en Cuba y en el mundo.
2. Proponer los posibles materiales a emplear en los principales componentes del aerogenerador de baja potencia.
3. Proponer las posibles tecnologías de fabricación de los principales elementos del aerogenerador de baja potencia.
4. Realizar las propuestas del diseño preliminar de los principales componentes del aerogenerador de baja potencia.

Capítulo I Estado del arte sobre el diseño de aerogeneradores de baja potencia en Cuba y en el mundo.

En este capítulo se realiza una breve revisión de los diferentes criterios de clasificación de los aerogeneradores. Se dispone de la información las posibles zonas a instalar el aerogenerador y sus antecedentes principalmente en Cuba. Se dan a conocer las tendencias actuales de los aerogeneradores de baja potencia, así como sus principales fabricantes mundialmente.

1.1 Fuentes renovables de energía

Las energías renovables aportan contribuciones beneficiosas a la problemática del aumento del consumo y de la protección del medio ambiente, por lo que a pesar de su estado de desarrollo, constituyen un factor importante que debe ser potenciado y desarrollado. (Román 2005)

Las fuentes renovables de energía son aquellas que se obtienen de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen o porque son capaces de regenerarse por medios naturales, según (Loidi 2017) estas son:

- La biomasa cañera.
- La energía solar por medio del uso de paneles fotovoltaicos, calentadores, secadores y otros.
- La biomasa no cañera con la utilización de recursos forestales desechos de la industria y otros.
- Los residuos agrícolas, pecuarios, industriales y desechos sólidos urbanos para la producción de biogás.
- Los recursos hidroenergéticos.
- Plantaciones agrícolas para la producción de biocombustibles, sin afectar la producción y el consumo de alimentos.
- La energía del mar y otras que el desarrollo de la ciencia y la técnica permitan su utilización.
- la energía eólica, con la instalación de aerogeneradores para generar electricidad y molinos a viento para el bombeo de agua.

La idea de hacer compatible el desarrollo económico y la preservación del medio ambiente, dentro de un término denominado desarrollo sostenible es de vital importancia, dónde las energías renovables están llamadas a ocupar un papel de especial relevancia para la consecución en un futuro a corto plazo de los intereses que se pretenden. (Román 2005)

El aprovechamiento de las energías renovables en Cuba es parte de los programas de desarrollo económico y social del país a largo plazo. Actualmente es baja la utilización de las fuentes de energía renovables, pues con ella solo se produce el 4.3% de la electricidad del país. Unas de las fuentes renovables de energía es la energía eólica pero aún es insuficiente la información que se tiene sobre las ventajas y limitaciones para su puesta en práctica.

1.2 Energía eólica

El uso de la energía eólica es uno de los métodos de aprovechamiento de energía renovables más antiguos que existen, esta es un recurso abundante, renovable, limpio, y ayuda a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. Cuando se habla de energía eólica, se refiere a la transformación de la energía cinética del viento (en función de la velocidad del mismo) en otro tipo de energía aprovechable por el ser humano (comúnmente eléctrica o mecánica) (Torres 2013). Actualmente está en la era de su aprovechamiento comercial como productor de energía eléctrica.

A nivel mundial, como consecuencia del desarrollo que ha alcanzado la energía eólica se ha consolidado una industria que comprende la investigación en el aspecto científico y tecnológico, y la comercialización e instalación de aerogeneradores.

La energía eólica se está volviendo más popular en Cuba, al haber demostrado la viabilidad industrial, y nació como búsqueda de una diversificación en el abanico de generación eléctrica ante un crecimiento de la demanda y una situación geopolítica cada vez más complicada en el ámbito de los combustibles tradicionales.

Como parte de la Revolución Energética en Cuba se dan pasos firmes para el desarrollo de la energía eólica. Durante los últimos años, gracias al trabajo de varias instituciones, se realizaron algunos proyectos piloto de desarrollo eólico que le permiten al país contar actualmente con una capacidad instalada de 480 kW. Unos de los logros

iniciales de este programa eólico es la confección del primer mapa eólico de Cuba con fines energéticos. Los resultados que se obtengan de la medición del viento, más las experiencias que se adquieran en esos primeros parques abrirán el camino hacia un desarrollo superior.(Fuentes 2014)

Cuba cree firmemente en el desarrollo y la aplicación de la energía eólica, así como otras fuentes renovables de energía, son la clave para el futuro.

1.2.1 Ventajas de la energía eólica

- Es renovable ya que tiene su origen en procesos atmosféricos.
- Es limpia ya que no produce emisiones atmosféricas ni residuos contaminantes.
- No requiere combustión, es decir que no genera emisiones de dióxido de carbono, por lo que no contribuye al incremento del efecto invernadero ni al cambio climático.
- Puede instalarse en espacios no aptos para otros fines, por ejemplo en zonas desérticas, próximas a la costa, en zonas áridas y muy empinadas para ser cultivables.
- Puede convivir con otros usos del suelo, como por ejemplo cosechas o tierras donde se lleve a cabo la actividad ganadera.
- Su utilización combinada con otros tipos de energía, habitualmente la solar, permite la auto alimentación de viviendas, terminando así con la necesidad de conectarse a la red eléctrica.

1.2.2 Desventajas de la energía eólica

- Comparada con las fuentes convencionales de energía, principalmente con la conexión a red, la eólica presenta costos elevados, sobre todo si se tiene en cuenta la inversión inicial.
- Al utilizar como recurso energético el viento, se debe considerar que éste no es constante, por lo que no es recomendable utilizarla como única fuente de energía. A pesar de ello, gracias a los bancos de baterías desarrollados recientemente, la autonomía de los equipos eólicos domésticos ha aumentado en gran medida.

1.3 Potencial Eólico

En la Revolución Energética que se desarrolla en nuestro país el uso de las energías renovables ocupa un lugar importante, destacándose entre ellas, la energía eólica. Por tal motivo ha sido prioritaria la evaluación del recurso eólico en el país para conocer el potencial en este recurso, así como los posibles sitios en los cuales es factible el emplazamiento de parques eólicos a mediana y gran escala que puedan tributar al Servicio Electroenergético Nacional (SEN).

La determinación del potencial eólico requiere realizar medidas de velocidad del viento, dirección, temperatura y presión para elaborar el mapa de recursos eólicos de las distintas zonas en el área de estudio. Es necesario disponer de una información meteorológica sobre la estructura y distribución de los vientos en función de su velocidad, debido a que este es el aspecto más importante para establecer cualquier desarrollo eólico. Las mediciones estadísticas deben realizarse sobre un período determinado para obtener valores fiables.

La primera edición del Mapa de Potencial Eólico de Cuba permite identificar 26 zonas geográficas, que revelan potenciales eólicos acordes con 4 clases (Moderado, M), (Bueno, B), (Excelente, E) y (Excepcional, Excep.), con potencias que van desde 500 y 600 W/m², y velocidades entre 6,2-6,8 m/s y más de 1 000 W/m² (> 8,2 m/s) (Excep.). En línea general puede decirse que los potenciales altos (entre Moderado y Excelente) se hallan desplazados hacia las áreas costeras, con puntos muy notables en zonas montañosas. Estos resultados se corresponden con el carácter insular (isla larga y estrecha) de Cuba, donde la circulación local de brisas en las costas norte y sur, desempeñan un importante rol, junto a los patrones de gran escala, en la definición del clima del recurso eólico del país.

A partir de la determinación de la extensión en kilómetros cuadrados de las áreas consideradas entre moderadas y excelentes se determinó el potencial eólico de Cuba, está entre 5 000 y 14 000 MW.

Una de las zonas factibles para la instalación del aerogenerador de baja potencia es en la provincia de Santiago de Cuba (ver figura 1), donde existen potenciales altos principalmente en las áreas costeras y 14 numerosas áreas con alto potencial eólico situadas en la Sierra Maestra y en la cordillera de la Gran Piedra.

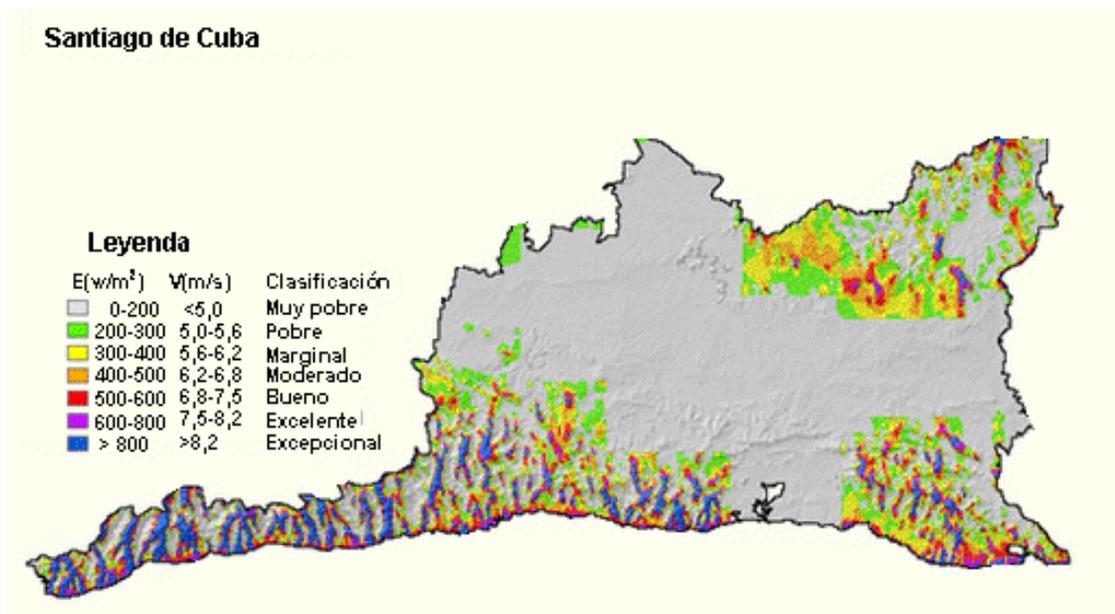


Figura 1 Zonas con buen potencial eólico en la provincia de Santiago de Cuba

Fuente: Documento Primera edición del Mapa de Potencial Eólico de Cuba

1.4 Aerogeneradores

Un aerogenerador es un generador eléctrico que funciona convirtiendo la energía cinética del viento en energía mecánica a través de una hélice y en energía eléctrica gracias a un alternador. Sus precedentes directos son los molinos de viento que se empleaban para la molienda y obtención de harina.

1.5 Antecedentes

Si bien el aprovechamiento del recurso eólico como fuente de energía desde varios siglos antes de cristo, realizar un estudio de su evolución histórica es de vital importancia. Ya en el siglo V a.C. aparecen las primeras máquinas eólicas en Irak, Persia, China, y eran de eje vertical. Por la misma época se usaban molinos de eje horizontal en Egipto y aunque eran distintos desde el punto de vista tecnológico, tenían el mismo principio: transformar la energía eólica en energía para el bombeo de agua, moler los granos, etcétera.

A partir de los siglos XII-XIII comienza a generalizarse el uso de los molinos de viento. Europa se llenó a su vez de molinos, sobre todo en Bélgica y en los países bajos. Los molinos de Holanda tenían 4 aspas de lona y se utilizaban para el drenaje, mientras que los de Portugal tenían 6, y los de Grecia 12. Los molinos con gran número de palas

determinan velocidades de rotación relativamente bajas y un funcionamiento útil a partir de velocidades del viento del orden de 2 m/s.

En la segunda mitad del siglo XIX, empieza a aparecer una nueva generación de molinos eólicos. El ámbito de aplicación de estas se aboca a zonas rurales aisladas, donde las ventajas de la industrialización no se han hecho notar. Esta nueva generación tuvo como paradigma el denominado molino multipala americano (ver figura 2), desarrollado en 1854 por Daniel Halladay en los Estados Unidos utilizado para el bombeo de agua de pozo, lo que hizo posible el gran desarrollo ganadero en toda América. Este molino, de unos 3 metros de diámetro de aspas, ha sido el más vendido de la historia, llegándose a fabricar más de seis millones de unidades, de las que existen varios miles en funcionamiento.(Romero 2005)

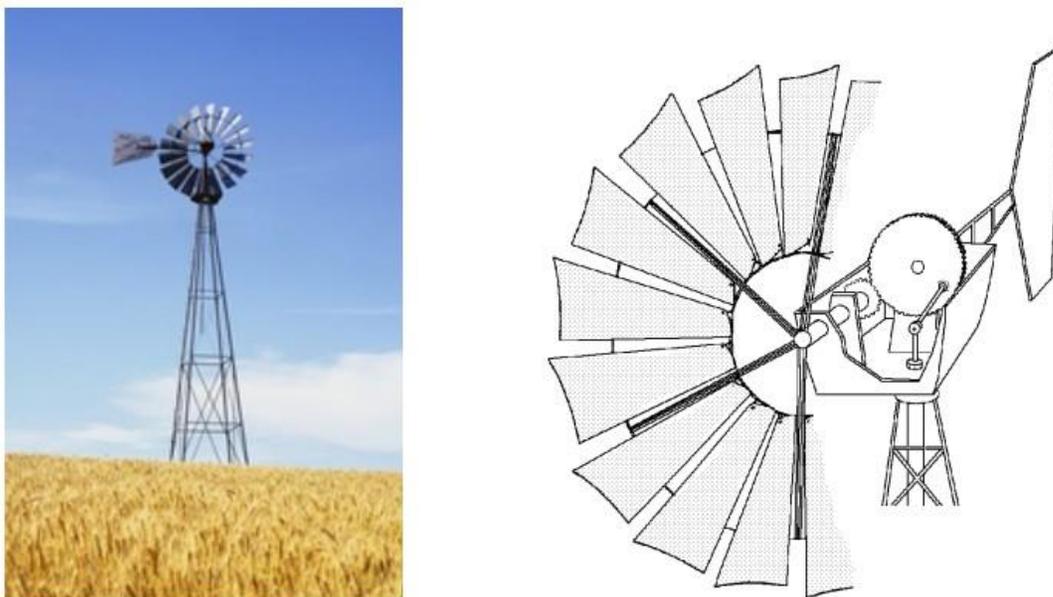


Figura 2 Molino Multipala Americano

En Cuba se conoce que hay molinos instalados desde hace más de 100 años de trabajo, según sus propietarios. Estos se difundieron principalmente en las zonas ganaderas, desde Camagüey hacia el oriente. Las llanuras camagüeyanas, sus posibilidades de buena exposición al viento y su suave brisa hicieron que fueran un éxito en esta región. De aquí que también en Camagüey se fabricaran los primeros molinos de viento cubanos, tradición que se mantuvo hasta finales de los años ochenta. A principios de los años noventa estos molinos se fabricaban, en menor escala, en

Bayamo, Ciego de Ávila y en otros talleres y fábricas de la Isla. Hoy continúan fabricándose en las provincias de Granma y Pinar del Río. Actualmente hay más de seis mil molinos de vientos instalados en Cuba.

Por otro lado, el auge alcanzado por los aerogeneradores tipo Windcharger facilitó la instalación de algunos equipos en fincas y residencias cubanas, pero han quedado muy pocas huellas de su existencia. Estas máquinas formaron parte del relativo desarrollo alcanzado por la energía eólica en el mundo después de la Segunda Guerra Mundial y estaban constituidas por un rotor de dos palas y un sistema de regulación mediante freno aerodinámico.(Larrosa 2008)

La teoría de la aerodinámica se desarrolla durante las primeras décadas del siglo XX, permitiendo comprender la naturaleza y el comportamiento de las fuerzas que actúan alrededor de las palas de las turbinas. Estableciendo los criterios básicos que debían cumplir las nuevas generaciones de turbinas eólicas. En los años 20 se empiezan a aplicar a los rotores eólicos los perfiles aerodinámicos que se habían diseñado para las alas y hélices de los aviones. En 1927, el holandés A.J.Dekker construye el primer rotor provisto de palas con sección aerodinámica.(Hernández 2012)

Otro avance importante fue la introducción de los sistemas de regulación de paso variable, que permitían un mejor control de la potencia en las turbinas. A consecuencia de estos avances surge en los años veinte toda una nueva industria en relación con el diseño de los pequeños aerogeneradores fabricados por la casa Jacobs Wind Electric en EUA (ver figura 3), que fabricó miles de unidades de su modelo con una capacidad de 1 KW.(Hernández 2012)



Figura 3 Aerogenerador de Jacob de 1 KW

Al producirse una etapa donde el precio del petróleo aumento y se prolongó hasta 1986, favoreció el desarrollo de los aerogeneradores eólicos como fuente de energía alternativa, renovable y no contaminante. En esta época, las redes de electrificación empezaban a ser lo suficientemente extensas como para cubrir la mayor parte de las zonas rurales, por lo que también disminuyeron las ventajas de los aerogeneradores de baja potencia utilizados en zonas aisladas.

En los últimos años se han podido construir aerogeneradores con potencias mayores, desarrollados por las grandes compañías de la industria aeronáutica, que aumentan la fiabilidad de las máquinas y reducen sus costos, lo que demuestra el alto grado de madurez alcanzado por esta tecnología.

1.6 Criterios de clasificación de los aerogeneradores

Los aerogeneradores se pueden clasificar según (Román 2013) en dependencia de la posición de los ejes, la potencia a generar, posición con respecto al viento y por el número de pala.

Según la posición del eje estos pueden ser (ver figura 4):

- **Aerogeneradores de eje vertical:** como su nombre lo indica, en este tipo de turbina eólica el eje de rotación del rotor se ubica perpendicularmente a la dirección del viento. Posee la ventaja de no necesitar orientarse respecto a la dirección donde sopla el viento, aprovechando eficientemente la fuerza directa del viento sin desperdiciar parte de esta.
- **Aerogeneradores de eje horizontal:** se les llama de esta forma ya que poseen los ejes principales situados paralelamente al suelo. Una de las consecuencias inmediatas de esta característica es que es necesario el uso de un dispositivo para orientar la posición del rotor.

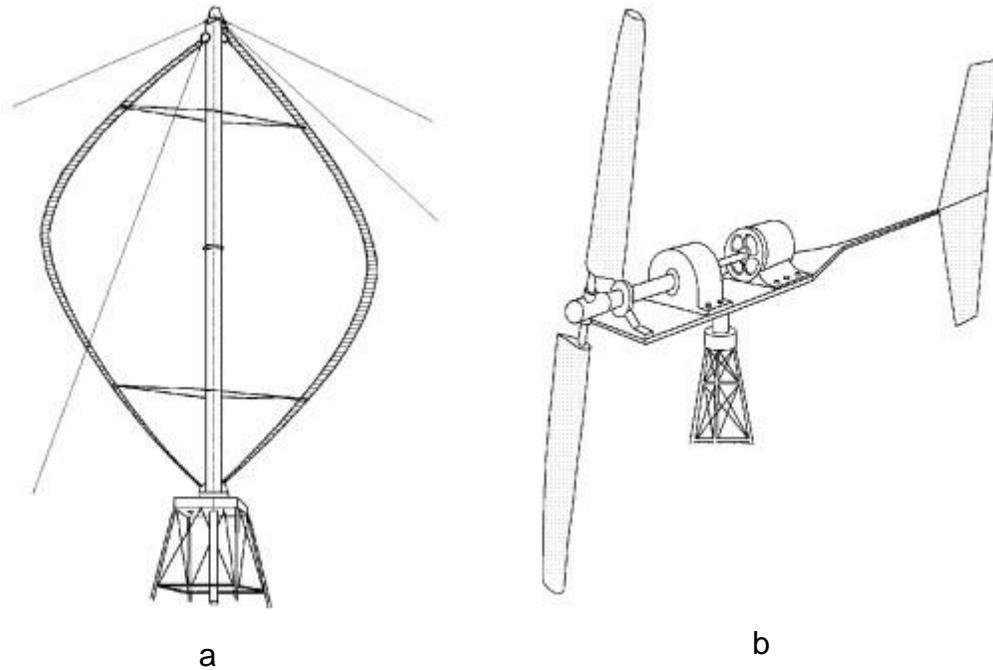


Figura 4 Tipos de Aerogeneradores a) de eje vertical y b) de eje horizontal

Por la posición del equipo con respecto al viento (ver figura 5):

- **Orientados a barlovento:** se denomina así cuando el rotor se encuentra enfocado de frente a la dirección del viento dominante. Se obtiene un mayor aprovechamiento de la fuerza del viento que en la opción contraria denominada sotavento, ya que no presenta interferencias aerodinámicas con la torre. Necesita un mecanismo mecánico capaz de orientar la máquina hacia el viento, en aerogeneradores de reducidas dimensiones se puede conseguir la orientación por medio de un timón de cola. Es actualmente el diseño más utilizado para los aerogeneradores.
- **Orientados a sotavento:** se denomina así cuando el rotor se encuentra enfocado en sentido contrario a la dirección del viento dominante. En este caso es el viento el que orienta con su propia fuerza a la góndola, por lo que no son necesarios elementos de orientación automatizada en la teoría, aunque si suelen utilizarse como elemento de seguridad.

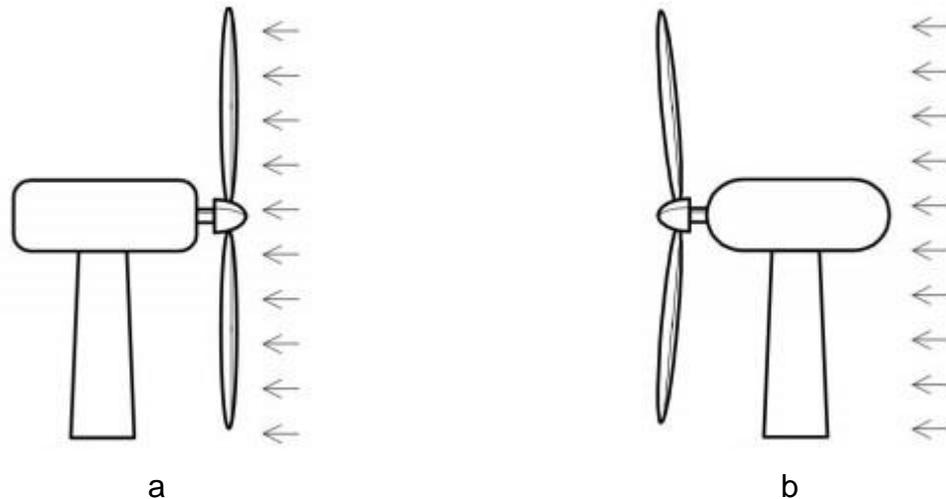


Figura 5 Posición del equipo con respecto al viento a) barlovento b) sotavento

Por el número de palas (ver figura 6):

- **Monopala:** la utilización de una turbina eólica monopala aumenta la velocidad de rotación del rotor y por tanto reduce las masas y costos de los demás elementos como el multiplicador y el generador eléctrico. Estos son poco utilizados y presentan problemas de estabilidad y fatiga. Otra desventaja es que la velocidad en punta de pala al ser muy alta provoca mucho ruido aerodinámico.
- **Bipala:** estos tienen la ventaja de ahorrar el coste de una pala y por supuesto, su peso. Sin embargo, suelen tener dificultades para penetrar en el mercado, en parte porque necesitan una mayor velocidad de giro para producir la misma energía de salida. Se emplean para producción de energía eléctrica en parque eólicos.
- **Tripala:** la mayoría de los aerogeneradores modernos tienen este diseño, con el rotor manteniendo en la posición corriente arriba. Los aerogeneradores de tres palas tienen velocidades de rotación relativamente bajas, lo son también las de punta de pala, constituyendo una gran ventaja respecto a los monopalas y bipalas debido a la reducción en el nivel de ruido que esto conlleva. Son los más empleados para la producción de energía eléctrica.

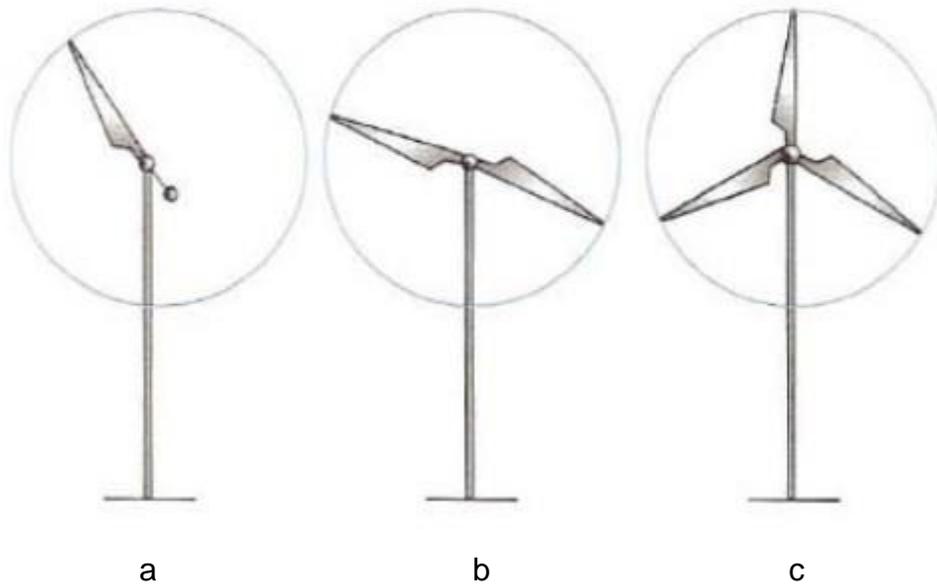


Figura 6 Clasificación por el número de palas a) monopala b) bipala c) tripala

Según la potencia que generan:

- **Aerogeneradores de potencia baja:** son aquellos que entregan una potencia de hasta 100 KW. Se utilizan principalmente para abastecer viviendas, así como establecimientos de pequeño tamaño. Se encuentran ubicados de manera dispersa alrededor del país.
- **Aerogeneradores de potencia media:** poseen una potencia de salida entre 100 KW y 30 MW, su aplicación se da generalmente en pequeños desarrollos comunitarios.
- **Aerogeneradores de potencia alta:** son aquellos capaces de generar más de 30 MW. Son utilizados para proveer electricidad a la red nacional, por ello se encuentran comúnmente en zonas con gran potencial eólico. En general, se instalan varios generadores juntos, formando un parque eólico.

1.7 Tendencias actuales en el mercado de los aerogeneradores de baja potencia

Un estudio realizado en España, en el 2000, llegó a la conclusión de que actualmente existen unos treinta fabricantes de aerogeneradores de baja potencia, principalmente en la Unión Europea y los Estados Unidos.

El listado de ejemplos de aplicación de los aerogeneradores de baja potencia para la producción de electricidad es sorprendente. Las podemos encontrar en los exploradores

de la Antártica para alimentar de energía a los campamentos aislados; en las grandes llanuras mongolas, donde los grupos nómadas las emplean para cocinar sus alimentos; en las zonas ecuatoriales para la conservación de alimentos; en las antenas repetidoras de comunicación, radio y televisión; para la carga de cercas eléctricas; en los yates de recreo; en cubiertas de edificaciones alcanzando un alta popularidad; en fin, son ilimitadas las aplicaciones de los aerogeneradores de baja potencia pero han alcanzado un rápido desarrollo por generar electricidad en áreas sin red eléctrica.(Figueredo 2000). En los últimos años se ha trabajado en busca de disminuir los costos y aumentar la fiabilidad, lo que los ha convertido en máquinas insustituibles en aquellos sitios donde la red no alcanza y los vientos son sencillamente evidentes. La práctica ha demostrado que la mayoría de los aerogeneradores actuales pueden operar durante tres años o más, en sitios de ambiente agresivo, sin necesidad de mantenimiento ni inspección.

La mayor parte del crecimiento del mercado de los aerogeneradores de baja potencia ocurrieron en tres países: China, EE.UU. y Reino Unido. Esta situación es una clara indicación de que el mercado mundial de los pequeños aerogeneradores está aún en etapa temprana. En la mayoría de los países se registra poca cantidad, por lo que estos no contribuyen al desarrollo de un mercado que pudiera incentivar su producción masiva, por parte de compañías fabricantes de aerogeneradores de baja potencia. La producción permanece concentrada en China, Norteamérica y varios países europeos. Los países en desarrollo aún no juegan un papel importante en dicha producción. Está claro que no obstante los recursos eólicos existentes en muchos países de África, sudeste de Asia y América Latina, con muchas regiones con condiciones ideales para desplegar los aerogeneradores de baja potencia, los mismos aún no han consolidado una industria nacional capaz de suministrar a su mercado interno. Es necesario unir esfuerzos entre estos países y la comunidad internacional, para establecer programas internacionales que cambien esa situación. (Figueredo 2000)

China es aún el mayor mercado en términos de unidades instaladas. Se instalaron 70 000 unidades para un total acumulado de 570 000 a finales de 2012. Esto representa 70% del mercado mundial. Este mercado chino comenzó a principios de los años 80. El segundo mayor mercado se encuentra en los Estados Unidos con un total de 155 000 unidades instaladas. El Reino Unido, Canadá, Alemania, Japón y Argentina son los

mercados de tamaño medio, con un total de entre 7000 y 23 500 turbinas instaladas. (Figueredo 2000)

Modelos comerciales de aerogeneradores de baja potencia según (Mayoral 2006)

Tabla 1 Modelos comerciales de aerogeneradores de baja potencia.

Marca	Modelo	Potencia (W)	Diámetro (m)	$V_{nominal}$ (m/s)	Peso neto (kg)	Precio (USD)
Bornay	Inclin 250	250	1.4	11	32	\$2.250
	Inclin 600	600	2	11	38	\$3.030
	Inclin 1500	1500	2.7	12	42	\$4.470
	Inclin 3000	3000	3.7	12	125	\$6.950
	Inclin 6000	6000	3.7	12	150	\$12.220
ARE Wind Generators	ARE110	2.500	3.6	11	143	\$11.500
	ARE442	10.000	7.2	11	610	\$36.000
Windstream Power	AIR X	400	1.15	12.5	6	\$680
	Whisper 100	900	2.1	12.5	21	\$2.085
	Whisper 200	1000	3	10.5	30	\$2.490
	Whisper 500	3000	4.5	11.3	80	\$7.095
PROVEN	WT600	600	2.55	12	32	\$3.300
	WT2500	2500	3.5	12	86	\$6.200
	WT6000	6000	5.5	12	227	\$12.900
	WT15000	15000	9	12	500	\$23.900
JACOBS	23-10	10.000	7	11.17	861	\$24.260
	23-12.5	12.500	7	12	861	\$24.260
	26-15	15.000	8	11.6	861	\$24.260
	26.-17.5	17.500	8	12	861	\$24.260
	31-20	20.000	8.5	11.6	1.134	\$25.000
AMPAIR	Pacific 100	100	0.9	12.5	-	\$950
	Pacific 300	300	1.2	12.8	-	\$1.650
BERGEY	XL.1	1.000	2.5	11	34	\$2.590
	Excel	10.000	7	13	476	\$18.400

Para la comercialización de esta tecnología se deben tener en cuenta los siguientes criterios:

- Precio: La relación de la inversión por cada kW producido es alta. Solamente puede ser económicamente rentable donde hay un viento fuerte y continuo o alternativas son poco viables. Calculando la vida incluyendo el mantenimiento, pueden ser más caros que sistemas fotovoltaicos, sobre todo donde la radiación solar es alta.
- Impredecibilidad: Fuera de la costa y a alturas no elevadas, el viento raras veces es constante. Así, en sistemas no conectados a la red, se necesita acumular la energía para el tiempo sin viento a veces considerable largo, lo que requiere una alta capacidad en baterías.
- Mantenimiento y reparaciones: Los aerogeneradores tienen hélices, rodamientos, bobinas y todo se mueve sobre ejes. Esto significa un desgaste con el tiempo y es causado por fallas. Consecuentemente necesitan mantenimiento.
- Corrosión: Cerca de la costa, la humedad es alta y con el contenido de sal, el ambiente es extraordinariamente corrosivo. En zonas desérticas con el tiempo, la arena en el aire daña como papel lija la pintura. Sin renovar adecuadamente esta protección, un aerogenerador común puede fallar en menos de cinco años.
- Confiabilidad: Los aerogeneradores tienen que sobrevivir condiciones extremas en tormentas, lluvia, nieve, hielo y demás amenazas.
- Eficiencia: Mientras los grandes aerogeneradores captan un poco más de 50% de la energía del viento principalmente por el ajuste continuo de las hélices, las pequeñas raras veces superan 30%.
- Ruidos y vibraciones: Los pequeños aerogeneradores giran rápido y causan frecuentemente ruidos molestos de alta frecuencia, vibraciones, sobre todo si los aerogeneradores son instalados sobre techos, pueden causar daños a estructuras.

1.8 Conclusiones parciales

- A partir del estudio del mapa del potencial eólico de Cuba, se logra identificar las zonas donde se encuentra localizado el recurso eólico para su posible uso con fines energéticos.
- El estudio bibliográfico realizado permitió sintetizar las principales características y clasificación de los aerogeneradores.
- Se comprobó que el mercado de los aerogeneradores de baja potencia crece cada día, por lo cual resulta necesario crear estrategias para incrementar su desarrollo en países como América Latina, sudeste de Asia, y África.
- Se constató el gran número de fabricantes de aerogeneradores de baja potencia en el mundo y los relativos altos costos de los mismos, por lo que se hace necesario realizar un estudio para su posible producción en el país a menor precio.

Capítulo 2 Aerodinámica. Descripción de los principales componentes del aerogenerador de baja potencia.

En este capítulo se presentan brevemente los conceptos basados en la aerodinámica de los aerogeneradores, tales como, la fuerza de sustentación, fuerza de arrastre, coeficiente de potencia, el perfil aerodinámico entre otros. Luego se explican los principales componentes del aerogenerador de baja potencia y se exponen los principales materiales para su correcta fabricación en la industria cubana. La selección de los materiales es un aspecto importante para garantizar un correcto funcionamiento y una calidad apropiada del aerogenerador a diseñar.

2.1 Aerodinámica. Principio de funcionamiento

Los aerogeneradores modernos toman prestada de los aviones y los helicópteros tecnología ya conocida, estos trabajan en un entorno realmente muy diferente, con cambios en las velocidades y en las direcciones del viento.

La razón por la que un aeroplano puede volar es que el aire que se desliza a lo largo de la superficie superior del ala se mueve más rápidamente que el de la superficie inferior. Esto implica una presión más baja en la superficie superior, lo que crea la sustentación (ver figura 7), es decir, la fuerza de empuje hacia arriba que permite al avión volar. (Aragón 2010)

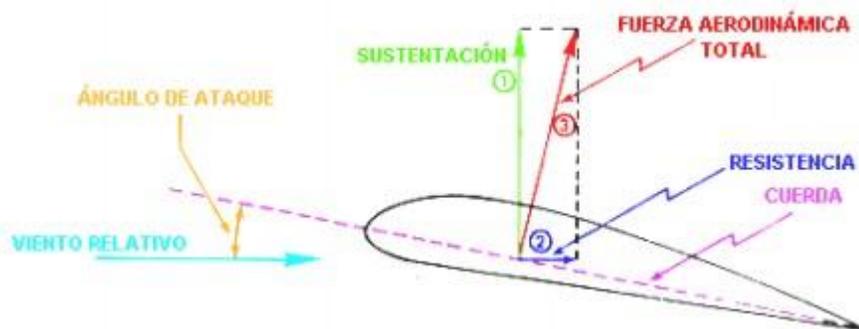


Figura 7 Diagrama de fuerzas

Si la inclinación de las palas es muy elevada se puede producir el fenómeno conocido como pérdida de sustentación, en el que el flujo de aire de la superficie superior deja de estar en contacto con la superficie del ala y por tanto las palas dejan de girar. Es por

este motivo que las palas de los aerogeneradores están alabeadas con el fin de que el ángulo de ataque sea el óptimo a lo largo de toda la longitud de la misma y no se produzca dicho fenómeno.

Fuerza de sustentación

La fuerza de sustentación en las palas de un aerogenerador es la responsable de provocar la rotación característica en los aerogeneradores de eje horizontal, incidiendo directamente sobre el par del rotor de la máquina. Es necesario mantener una posición en el aerogenerador, tal que permita una fuerza de sustentación acorde a la velocidad nominal requerida para generar la potencia idónea.(Castro 2014)

La fuerza de sustentación viene dada por la siguiente expresión:

$$F_{sust} = 0.5 * \rho * S * C_l * V^2 \quad (1)$$

Donde:

ρ : Densidad del fluido.

S : Área de referencia del cuerpo (también llamado "superficie alar").

C_l : Coeficiente de sustentación, que depende directamente del ángulo de ataque del viento.

V : Velocidad del viento.

Fuerza de arrastre o resistencia

Esta fuerza actúa en sentido opuesto al movimiento del cuerpo. La presencia de viscosidad en los fluidos hace que aparezca una componente de fricción que frenará el movimiento del objeto que lo atraviese. La fuerza de arrastre tiene un carácter negativo sobre la producción de potencia en aerogeneradores, por eso es importante dotar las palas de una forma aerodinámica adecuada con tal de minimizar este efecto. (Castro 2014)

Velocidad específica de rotación

La velocidad específica (λ), se define como la relación entre la velocidad tangencial en el extremo de la pala (" u ") y la velocidad del viento sobre las palas (v):

La expresión para la velocidad específica es la siguiente:

$$\lambda = \frac{u}{v} = \frac{\omega * R}{v} = \frac{2 * \pi * n * R}{60 * v} \quad (2)$$

Donde:

ω = Velocidad angular.

n = Velocidad de rotación del rotor.

R = Radio del rotor.

Ángulos de incidencia en la operación de un aerogenerador

La figura 8 presenta los ángulos de interés en la aerodinámica de aerogeneradores, estos ángulos influyen en la velocidad de rotación que tiene la máquina eólica y por ende en la potencia eléctrica generada. (Leal 2014)

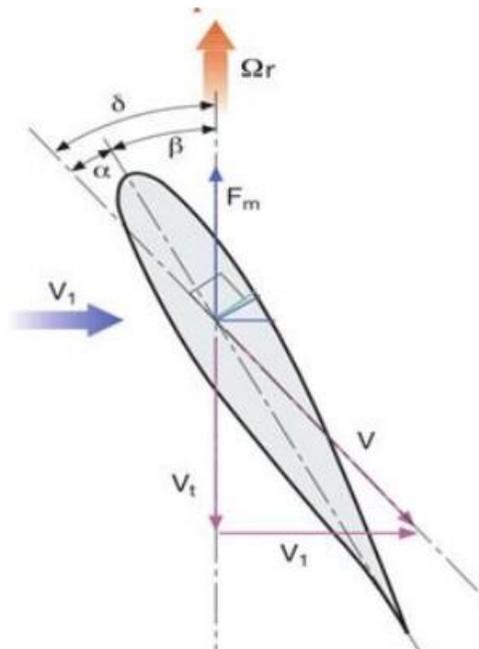


Figura 8 Ángulos de incidencia sobre una pala

Donde:

β : Ángulo que forma una cuerda del perfil con el plano de rotación (ángulo de paso o ángulo de calado).

α : Ángulo que forma la cuerda del perfil con la velocidad aparente del viento (ángulo de ataque).

δ : Ángulo que forma el plano de rotación con la dirección aparente del viento que pasa por el borde de ataque (ángulo aparente del viento).

La relación entre cada uno de los ángulos corresponde de la misma manera con la relación entre velocidades y vienen dadas por la siguiente expresión:

$$\delta = \alpha + \beta \quad (3)$$

Coefficiente de sustentación

El coeficiente de sustentación (ver fórmula 4), depende en gran medida del ángulo de ataque del perfil. El valor de C_l aumenta linealmente con (α) hasta alcanzar el ángulo crítico a partir del cual se dice que el perfil ha entrado en pérdida. Al entrar en pérdida la fuerza de sustentación que actúa sobre el perfil decrece a medida que (α) aumenta. (Castro 2014)

$$C_l = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad (4)$$

Coefficiente de arrastre

En el diseño de perfiles aerodinámicos se tiende a buscar coeficientes de arrastre relativamente bajos, con el objetivo de minimizar el efecto del arrastre sobre el rotor eólico para hacer más efectiva la captación de energía. El coeficiente C_d (ver fórmula 5) será pequeño mientras el ángulo de ataque también lo sea. Al entrar en pérdida, la fuerza de arrastre sobre el perfil aumenta rápidamente y el perfil deja de ser efectivo. (Castro 2014)

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U^2 c} \quad (5)$$

El factor usual para determinar la calidad aerodinámica de un perfil se calcula:

$$\varepsilon = \frac{C_d}{C_l} \quad (6)$$

Coeficiente de potencia

El coeficiente de potencia (C_p) se define como el rendimiento con el cual funciona el aerogenerador, e indica la potencia que puede capturar el rotor, respecto a la potencia eólica total que posee el viento incidente. El coeficiente de potencia máximo ($C_{p_{max}}$) se le llama también límite de Betz y es igual a 0.5925, o sea del viento solo se puede aprovechar en el rotor una potencia máxima inferior al 60% ($\leq 59\%$ o $16/27$). (Vergara 2015)

El $C_{p_{max}}$ se calcula mediante la ecuación:

$$C_{p_{max}} = \frac{16}{27} \lambda \left[\lambda + \frac{1.32 + \left(\frac{\lambda-8}{20}\right)^2}{B^{2/3}} \right]^{-1} - \frac{0.57\lambda^2}{\frac{C_l}{C_d} \left(\lambda + \frac{1}{2B}\right)} \quad (7)$$

Donde:

λ : Velocidad específica de rotación.

B : Número de palas.

C_l/C_d : Relación que tiene entre el coeficiente de sustentación frente al coeficiente de resistencia.

Número de palas

Para un aerogenerador de eje horizontal tradicionalmente el rotor puede estar constituido de tres, dos o una pala (bipala, monopala, tripala, multipala respectivamente). La diferencia principal entre estos es la velocidad específica de rotación (λ), y el coeficiente de potencia máximo $C_{p_{max}}$ (ver figura 9).

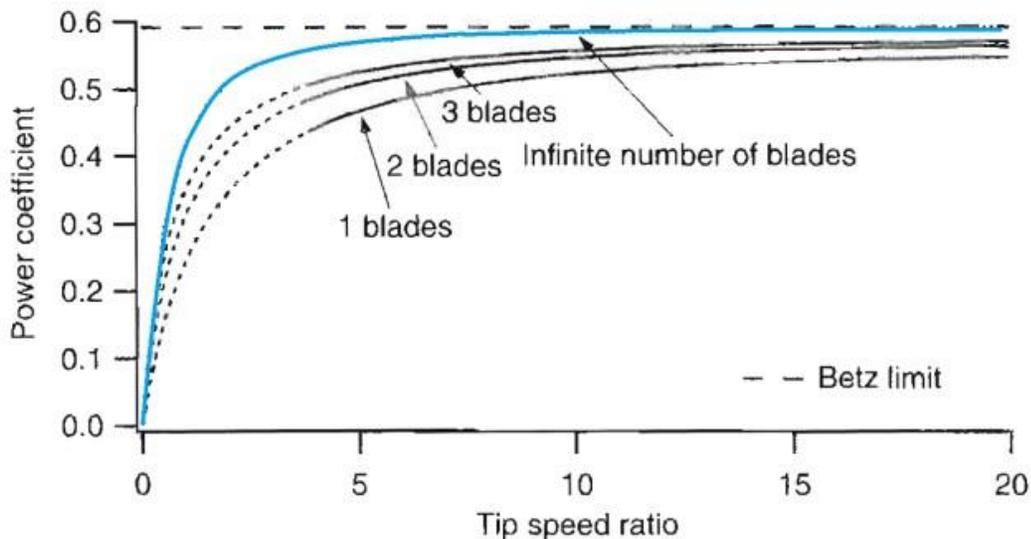


Figura 9 Máximo coeficiente de potencia alcanzable en función del número de palas

Fuente: 'Wind Energy Explained' J.F.Manwell, J.G. McGowan, A.L. Rogers

Mientras mayor sea el número de palas, mayor será el coeficiente de potencia a una misma velocidad específica de rotación. Esto es debido a que las pérdidas por el efecto de la punta disminuyen con el número de palas. Por otra parte al aumentar el número de palas aumenta el costo.

Al estar relacionada la velocidad específica de rotación (λ), con el coeficiente de potencia (C_p) se puede afirmar que los aerogeneradores de una pala tienen una velocidad más alta que una de dos, y éstas más rápidas que una de tres. Esto significa que la relación en el par es inversa y por lo tanto un aerogenerador tripala genera para una misma potencia un par mayor. Tener un par mayor beneficia el arranque ya que vencerá más fácilmente la fuerza de rozamiento de los elementos mecánicos. (Duarte and Madero 2011)

El número de palas, típicamente es decreciente con la velocidad específica de rotación (λ):

Tabla 2 Valores típicos del número de palas en función de la velocidad específica de rotación.

λ	B
1	8 a 24
2	6 a 12
3	3 a 6
4	2 a 4
≥ 5	3, raramente 2 o 1

En el alcance de este proyecto no se diseñan las palas, debido a que ninguna empresa en el país dispone de la tecnología para su diseño y fabricación. Inicialmente las palas del aerogenerador son importadas, con un número de palas $B = 5$, debido a esto se propone reducir el número de palas a 3 y mantener el perfil aerodinámico, con el objetivo de disminuir los costos (menos palas). Este cambio es de vital importancia porque aumentaría la velocidad en la punta de las palas, aumentaría la velocidad de rotación del aerogenerador, y se lograría la potencia nominal con menores velocidades de viento, ya que esto es un problema en Cuba, porque existe un bajo potencial eólico.

Perfil aerodinámico

El diseño o selección de los perfiles aerodinámicos determina el comportamiento del aerogenerador en todas las situaciones de operación. La correcta selección de un perfil aerodinámico incrementa el rendimiento del sistema y es necesario conocer las condiciones de operación, en particular, cómo es el flujo en el que va a trabajar el perfil. (González 2012)

Los perfiles alares en aerogeneradores fueron obtenidos de la aviación donde se encuentran normalizados, los más usuales son los perfiles NACA llamados así porque fueron normalizados por el National Advisory Committee for Aeronautics (Comité Consejero Nacional para la Aeronáutica).

En los perfiles NACA de cuatro cifras, su primera cifra indica la máxima flecha de la línea media en % con respecto a la cuerda, (f/c), la segunda la distancia de esta

magnitud con respecto al borde de ataque X_f , y por último las dos últimas cifras indican el espesor máximo relativo a la cuerda (d/c) (ver figura 10) (Ruiz 2009). Así un perfil NACA 4412, es un perfil que tiene un 4 % de flecha máxima relativa a la cuerda, situada al 40 % del borde de ataque y con un espesor relativo del 12 %.

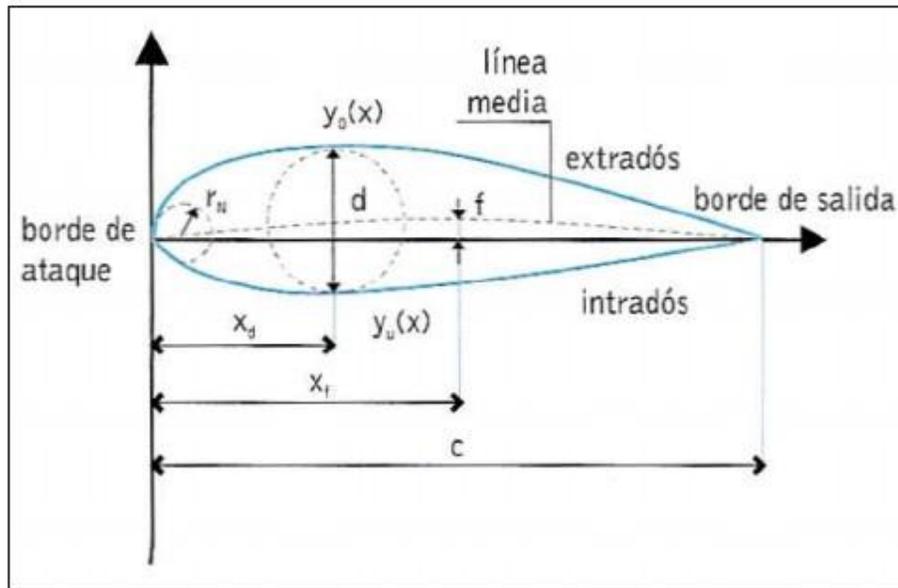


Figura 10 Parámetros geométricos de un perfil NACA

- Cuerda, c (m): Línea que une los puntos extremos del perfil.
- X_f : Posición de la máxima curvatura.
- X_d : Posición del máximo espesor.
- Espesor relativo (d/c): Medida en tanto por ciento del espesor máximo perpendicular a la línea media del perfil respecto a la cuerda.
- Máxima curvatura (f/c): Medida en tanto por ciento de la máxima curvatura del perfil, flecha máxima f , respecto de la cuerda.
- R_n : Radio de la nariz.
- Coordenadas $Y_0(x)$ e $Y_u(x)$, indican las coordenadas del extradós y del intradós respectivamente.
- Extradós: zona superior del perfil entre el borde de ataque y el de salida.
- Intradós: zona inferior del perfil entre el borde de ataque y el de salida.

Selección del perfil aerodinámico

La elección del perfil aerodinámico para las palas de un aerogenerador, se inicia seleccionando aquellos que poseen un elevado coeficiente de sustentación y simultáneamente un bajo coeficiente de resistencia. Esto normalmente se obtiene tomando aquellos perfiles que poseen altos valores de la relación sustentación sobre resistencia (C_l/C_d), entre más alto sea el valor del resultado va a tener mayor eficiencia la máquina. El perfil que contiene las palas del aerogenerador es NACA 4412 (Según datos del proveedor).

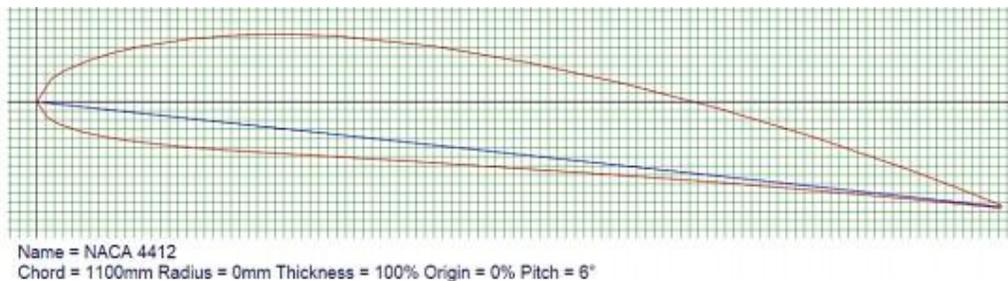


Figura 11 Perfil NACA 4412.

Fuente: <http://airfoiltools.com/plotter/index?r=msvg/svg/all&name=MAirfoilPlotterForm>

Tabla 3 Perfil NACA 4412.

Perfil a 6°	CL	CD	CL/CD
NACA 4412	1,128	0,00884	127,6018

El valor de (C_l/C_d) es un factor importante para elegirlo lo más alto posible pero deberá tenerse en cuenta que los perfiles con elevados (C_l/C_d) poseen mucha curvatura y como consecuencia de ésta, el momento aerodinámico M suele ser muy elevado.

2.2 Descripción de los principales componentes del aerogenerador de baja potencia. Materiales.

Los principales componentes que constituyen el aerogenerador de baja potencia a diseñar son:

2.2.1 Palas

Las palas (ver figura 12) están fabricadas y diseñadas con el fin de alcanzar un balance óptimo en la captación eficaz de la energía del viento y lograr una mínima carga sobre el aerogenerador, al mismo tiempo que un funcionamiento libre de problemas.



Figura 12 Palas

Aerogeneradores de regulación por pérdida aerodinámica (Stall controlled)

Los aerogeneradores de regulación por pérdida aerodinámica tienen las palas del rotor unidas al buje en un ángulo fijo. Sin embargo el perfil de la pala ha sido diseñado para asegurar que en el momento en que la velocidad del viento sea demasiado alta, se creará turbulencia en la parte de la pala que no da al viento. La pala del rotor de un aerogenerador regulado por pérdida aerodinámica genera que la pala está ligeramente torsionada a lo largo de su eje longitudinal. Esto es así en parte para asegurar que la pala pierde la sustentación de forma gradual, en lugar de hacerlo bruscamente, cuando la velocidad del viento alcanza su valor crítico. La principal ventaja de este sistema es que evitan las partes móviles del rotor y un complejo sistema de control. (Aragón 2010)

Aerogeneradores de regulación por cambio del ángulo de paso (Pitch controlled)

El controlador electrónico del aerogenerador comprueba varias veces por segundo la potencia generada. Cuando esta alcanza un valor demasiado alto, el controlador envía una orden al mecanismo de cambio del ángulo de paso, que inmediatamente hace girar las palas del rotor ligeramente fuera del viento y a la inversa. Así pues, las palas del

rotor deben ser capaces de girar alrededor de su eje longitudinal (variar el ángulo de paso). (Aragón 2010)

Aerogeneradores de regulación activa por pérdida aerodinámica

Este sistema es utilizado en aerogeneradores de gran potencia. Para tener un momento de torsión fuerza de giro razonablemente alto a bajas velocidades del viento, este tipo de máquinas serán normalmente programadas para girar sus palas como las de regulación por cambio del ángulo de paso a bajas velocidades. Mediante este sistema la producción de potencia puede ser controlada de forma más exacta y la máquina puede funcionar casi exactamente a la potencia nominal a todas las velocidades de viento. (Aragón 2010)

Principales requisitos para la selección del material

Las palas de un aerogenerador se diseñan bajo formas constructivas y con materiales que deben atender principalmente a los requisitos siguientes:

- Resistencia estructural: soportar las cargas máximas previsibles que puedan ocurrir durante el período de vida de la máquina.
- Resistencia a fatiga: soportar las cargas de fatiga que aparezcan durante la vida de la máquina.
- Rigidez: Desplazamientos inferiores a los máximos permitidos, para evitar inestabilidades.
- Peso: debe ser el mínimo necesario para tener el mínimo coste y minimizar las cargas de tipo inercial y gravitatorio sobre los diversos componentes de la máquina (es crítico en grandes aerogeneradores).
- Fabricación: Facilidad de fabricación que requiera técnicas y materiales adaptados a la maquinaria y tecnología existente en la industria.
- Resistencia a los ambientes medioambientales: Resistencia a la corrosión en ambientes marinos y a la degradación por la radiación solar.
- Minimizar la emisión de ruido acústico: Diseño encaminado a producir el menor impacto acústico para facilitar la instalación de estos sistemas cerca de sitios habitados.

Materiales de fabricación de las palas

Actualmente según (Nieto 2015) existen diferentes tipos de materiales para hacer las palas:

- **Madera:** Este material tiene como ventajas su baja densidad, facilidad de mecanizado, buen comportamiento a fatiga y desde luego bajo costo. La madera mayormente posee irregularidades en su constitución, las cuales pueden provocar fisuras y por tanto una reducción de sus propiedades mecánicas. Otra desventaja del empleo de la madera es su capacidad de absorción de agua, que reduce igualmente su comportamiento estructural.(Ruiz 2009)
- **Acero:** Las propiedades mecánicas de este material en cuanto a resistencia y tenacidad hicieron de este material una opción muy válida para la fabricación de palas, sin embargo su elevada densidad provoca un aumento considerable de cargas inerciales y gravitatorias sobre el aerogenerador. Otra desventaja del acero es su facilidad para la corrosión, sin embargo este problema se soluciona con un adecuado tratamiento superficial.(Ruiz 2009)
- **Materiales sintéticos, resinas, fibras y otros:**

Algunos aerogeneradores funcionan con palas de materiales plásticos, estos tienen como ventaja:

Poco peso, insensibilidad a la corrosión, buena resistencia a la fatiga, presentan ciertos inconvenientes que podrían reducirse, coste elevado, falta de homogeneidad en la construcción, las características dimensionales pueden variar de una pala a otra.

- **Palas compuestas:**

Las palas con diferentes materiales son una buena solución, en particular para los aerogeneradores de pequeña y mediana potencia. Los materiales más empleados son:

- **Aleaciones de acero y de aluminio:** estos tienen problemas de peso y de fatiga del metal, respectivamente, son actualmente usadas sólo en aerogeneradores muy pequeños.
- **Fibra de vidrio reforzada con resina poliéster:** se utilizan en la mayoría de las palas para grandes aerogeneradores.

- **Fibra de vidrio reforzada con resina epoxy:** estas son más ligeras, poseen mayor flexibilidad, menor deformación bajo temperaturas extremas, excelente resistencia a la absorción de agua.
- **Fibra de carbono o aramidas:** estas tienen una alta resistencia específica, y son palas muy ligeras. Normalmente estas palas son antieconómicas para grandes aerogeneradores.
- **Mixtos fibra de vidrio-fibra de carbono.**
- **Composites de madera, madera-epoxy, o madera-fibra-epoxy:** aún no han penetrado en el mercado de las palas, aunque existe un desarrollo continuado en ese área. (Aragón 2010)

Entre los inconvenientes que tienen los materiales compuestos para la fabricación de palas están:

- Materias primas todavía caras (excepto fibra de vidrio).
- Necesitan procesos de fabricación no estándar (fabricación manual).
- Comportamiento estructural no intuitivo.
- Falta de bases de datos fiables de características mecánicas.

Tabla 4 Características de los materiales empleados en la fabricación de palas de aerogeneradores.

Fuente: www.google.com/ materiales de las palas de un aerogenerador.

Materiales	ρ (g/cm^3)	σ_u (N/mm^2)	E (kN/mm^2)	$\pm\sigma_A[10^7]$ (N/mm^2)
Acero	7.85	520	210	60
Aleación de acero	7.85	680	210	70
Madera	0.38	~65	~8	~20
Aluminio	2.7	480	70	40
F.V.(*). poliéster	1.8	~400	~15	---
F.V.(*). epoxy	1.7	~400	15	---
F.C.(*). epoxy	1.4	550	44	---
Madera - epoxy	0.58	~75	~11	~35

2.2.2 Buje

Es la pieza de unión entre las palas y el eje principal (ver figura 13). Este elemento puede ser:

- **Rígido:** Utilizado en aerogeneradores de tres palas compuesto de una estructura metálica hueca. Permite un acoplamiento firme de las palas a través de pernos roscados o espigas metálicas embebidas en el material de las palas. Se acopla rígidamente con el eje principal del aerogenerador.
- **Basculante:** Utilizados en aerogeneradores de dos palas. Permite un ligero movimiento de las palas en una dirección perpendicular al plano del rotor (permite un desplazamiento angular de $2,5^\circ$ respecto al plano normal del eje de rotación). Esto Ayuda a reducir las cargas dinámicas.



Figura 13 Buje

Material del buje

El material del buje dependerá del tamaño del rotor y de su comportamiento ante las variables ambientales. Es decir materiales como la madera o plásticos son normalmente utilizados en bujes para rotores pequeños, pasando por las aleaciones de aluminio en bujes de rotores medianos y finalizando con acero de gran resistencia en bujes de rotores de gran tamaño.

- **Aluminio:** Este material presenta una baja densidad en comparación con otros metales, lo que lo hace ligero, pero a la vez cuenta con la resistencia mecánica necesaria para soportar el régimen de trabajo al que estará sometido. La desventaja radica en la tecnología para la fabricación del mismo en el país, pues

son escasas las empresas que pueden garantizar la composición química necesaria. También se pueden encontrar diferentes aleaciones de aluminio, con componentes aleantes como el cobre, manganeso, silicio, magnesio, zinc y para mejorar sus propiedades son tratadas térmicamente. (Aragón 2010)

- **Acero:** Este es un material mucho más resistente que el aluminio, y también más barato. Pero este material tiene la desventaja de ser aproximadamente 3 veces más pesado que el aluminio, lo que lo hace poco idóneo.
- **Polietileno de alta densidad:** Otra opción es fabricar el buje de materiales plásticos, específicamente de polietileno de alta densidad, el cual presenta una densidad mucho menor que el acero o el aluminio, lo que lo hace atractivo para la fabricación. Pero la resistencia mecánica del mismo es mucho menor, por lo que la vida útil del aerogenerador se acortaría considerablemente.

2.2.3 Nariz o cubo

La nariz (ver figura 14) es una cubierta frontal en forma de cono. Sirve para desviar el viento hacia el tren motor y mejorar la ventilación en el interior, también para eliminar las turbulencias indeseables en el centro frontal y para mejorar el aspecto estético.



Figura 14 Nariz o Cubo

Material para el diseño de la nariz

Generalmente se utiliza el polietileno. El cual se puede clasificar en tres tipos diferentes de acuerdo a la densidad que presentan ya que esta es un buen indicativo del tipo de estructura que posee el polímero. Puede ser:

- **Polietileno de baja densidad.**
- **Polietileno de mediana densidad.**
- **Polietileno de alta densidad.**

2.2.4 Generador

Un generador, es una máquina eléctrica encargada de transformar la energía mecánica de rotación en energía eléctrica. Este está conformado por la parte móvil llamada rotor, la parte estática que se denomina estator, y las tapas (ver figura 15).



Figura 15 Generador eléctrico

Cuando un generador eléctrico está en funcionamiento, una de las dos partes genera un flujo magnético (actúa como inductor) para que el otro lo transforme en electricidad (actúa como inducido). Los generadores eléctricos se diferencian según el tipo de corriente que producen. Así, nos encontramos con dos grandes grupos de máquinas eléctricas rotativas: los alternadores y las dinamos.

- Los alternadores: estos generan electricidad en corriente alterna. El elemento inductor es el rotor y el inducido el estator.
- Los dinamos: estos generan electricidad en corriente continua. El elemento inductor es el estator y el inducido el rotor. En la actualidad se utilizan muy poco, ya que la producción y transporte de energía eléctrica es en forma de corriente alterna.

Tabla 5 Tipos de generadores.

Tipos de generadores	Tipo de corriente	Velocidad de rotación (rpm)	Costo Mtto	Tamaño
Generadores de corriente continua	DC	900-3600	Normal-alto	grande
Generadores de corriente alterna	AC	≤3600	Normal	normal
Generadores de excitación clásica	AC	900-3600	Normal	normal
Generadores de imanes permanentes	AC	≤900	Normal-alto	pequeño

Con referencia a la (taba 5) se procede a seleccionar un generador de corriente alterna con rotor de imanes permanentes. Por ello el campo magnético que se necesita para generar la corriente eléctrica es producido por los imanes que giran montados sobre el rotor. Esto es una ventaja ya que no se consume ningún tipo de energía para producir los campos magnéticos necesarios, además de evitar el uso de bobinas giratorias, colectores y escobillas que sufren desgaste y precisan mantenimiento.

Los alternadores con imanes permanentes son empleados en la pequeña potencia, estos permiten aprovechar el viento en un amplio rango de velocidades, desde 2,5-3 m/s (velocidad de inicio de generación) hasta 11-13 m/s (velocidad de protección).(Romero 2005)

Alternadores de imanes permanentes

- Ventajas: son baratos, eficientes y tienen una enorme capacidad de producción y su construcción puede ser muy robusta. Este tipo de alternadores son los más potentes a todas sus velocidades, tanto bajas como altas. No requiere mantenimiento debido a la total ausencia de piezas en rozamiento. A igual potencia es más una ligero y económico comparándolo con otro tipo de alternadores.
- Desventajas. Su construcción puede ser muy complicada. Requiere cierto maquinado.

2.2.5 Estator o inducido

El estator es la parte fija del alternador la que no tiene movimiento y es donde están alojadas las bobinas inducidas que generan la corriente eléctrica. El cuerpo del estator

es metálico (aceros inoxidable o aluminio), su superficie puede ser liso o con aletas (a partir de un perfil estruzado) para disipar el calor (ver figura 16).

El estator tiene una armazón que está formado por un paquete ensamblado de chapas magnéticas de acero al silicio, laminado en forma de corona circular, troqueladas interiormente para formar en su unión las ranuras donde se alojan las bobinas inducidas.



Figura 16 Estator

Material para el diseño del cuerpo del estator

- **Aluminio:** con el objetivo de que posea menor peso aunque sea más caro, pero a la vez cuenta con la resistencia mecánica necesaria para soportar el régimen de trabajo al que estará sometido. Se debe pintar adecuadamente evitando que se oxide.
- **Acero inoxidable:** estos se define como una aleación de acero (con un mínimo del 10 % al 12 % de cromo). El acero inoxidable es un acero de elevada resistencia a la corrosión, y posee excelente propiedades.

2.2.6 Rotor o inductor

El rotor o parte móvil del alternador, es el encargado de crear el campo magnético inductor el cual provoca en el bobinado inducido la corriente eléctrica que suministra después el alternador. El rotor está conformado por el árbol que posee los imanes

permanentes y los cojinetes de rodamiento. Además, el mismo está acoplado directamente al aerogenerador (no utiliza multiplicador) (ver figura 17).

Descripción del árbol

Tabla 6 Descripción del árbol.

Número de escalón	Dimensiones		Características
	Diámetro mm	Longitud mm	
1	25	15	Diámetro interior y apoyo del cojinete de rodamiento.
2	30	19	Apoyo axial del cojinete de rodamiento y de los imanes del generador. Posee un chaveta del tipo CNS 169 A a una distancia de 14 mm del borde, con un ancho de 8 mm, longitud de 18 mm y una profundidad de 4 mm.
3	29	40	Apoyo de los imanes del generador.
4	24	1.5	Arandela de presión funciona como apoyo axial de los imanes del generador.
5	30	14	
6	25	20	Diámetro interior y apoyo del cojinete de rodamiento.
7	25/16	33	
8	16	25	Rosca métrica M16. Agujero para un pasador.



Figura 17 Rotor

Materiales que se utilizan en la fabricación de árboles y ejes

Se utilizan generalmente aceros para mejoramiento:

- Al carbono con contenido del mismo de 0,2% a 0,5%.
- Aleados, con similar contenido de carbono y otros elementos de aleación como cromo, níquel, molibdeno, generalmente alrededor de 1% a 2%.

En la tabla 7 se muestran algunos de los aceros más utilizados en la fabricación de árboles y ejes.

Tabla 7 Principales aceros utilizados en la fabricación de árboles y ejes.

Fuente: Reshetov, D. "Elementos de máquinas".

# AISI	Composición química						Propiedades		
	C	Mn	Cr	Mo	Ni	V	S _y (MPa)	S _U (MPa)	HB
1040	0,4	<1					290	496	144
1050	0,5	<1					338	620	180
4140	0,4		0,95	0,2			414	655	197
4340	0,4		0,5÷0,8	0,25	1,8		469	745	217
5150	0,5		0,8				359	676	197
6150	0,5		0,5÷1,1			0,15	407	662	197
8650	0,5		0,5	0,2	0,55		386	717	212

S_y → Limite de fluencia, S_U → Resistencia última

También se pueden fabricar árboles de acero inoxidable para evitar los procesos de corrosión.

Cojinetes de rodamiento

Los cojinetes de rodamiento sirven de apoyo a las piezas giratorias o rodantes que utilizan elementos rodantes (bolas o rodillos) y que trabajan a base del rozamiento por rodadura. Los cojinetes de rodamiento según la forma de los cuerpos de rodadura se clasifican en cojinetes de bolas y cojinetes de rodillos. Los cojinetes de bolas por término medio son más rápidos, estos garantizan la posibilidad de fijar el árbol en sentido axial y de soportar las fuerzas axiales en uno o en ambos sentidos. Los principales materiales que se emplean para fabricar los cojinetes son los **aceros al cromo**, altos en carbono.

El árbol tiene dos cojinetes de rodamiento rígidos de bolas del tipo 6205 con una capacidad de carga dinámica de 11 000 N, y una capacidad de carga estática de 7100 N.

Los imanes permanentes

Un imán es un material capaz de producir un campo magnético exterior y atraer el hierro. La capacidad de atracción es mucho mayor en sus extremos o polos (denominados norte y sur). La región del espacio donde se pone de manifiesto la acción de un imán se llama campo magnético. Este campo se representa mediante líneas de fuerza, que son unas líneas imaginarias, cerradas, que van del polo norte al polo sur, por fuera del imán y en sentido contrario en el interior de éste. (Hernández 2010)

El rotor tiene **8 imanes de neodimio/boro** aleación NeFeB, estos están formados por hierro, neodimio y boro. Estos tienen alta resistencia a la desmagnetización y se oxidan fácilmente, por eso van recubiertos con un baño de zinc o níquel. Generalmente son bastantes frágiles y están especialmente diseñados para reducir dimensiones y aumentar potencia.

Es importante conocer la potencia eléctrica máxima a diferentes velocidades que se puede obtener de los imanes:

Primeramente es necesario conocer según (Hernández 2010) la energía magnetostática máxima que entregan los imanes, esto se rige por la ecuación:

$$E_m = \frac{1}{2} * (b * H) * V * N \quad (8)$$

Donde:

E_m : Energía magnetostática máxima.

$b * H$: Prod.Max.E (J/m^3).

V : Volumen de un imán.

N : Número de imanes montados en el rotor.

Luego para obtener la potencia eléctrica máxima que se puede producir, resulta multiplicar la energía magnetostática máxima por la velocidad angular a la cual se encuentran girando:

$$P_{ElectMax} = E_m * \omega \quad (9)$$

E_m = Energía magnetostática máxima.

ω = Velocidad angular (rad/s).

Una vez realizado los cálculos se puede obtener la máxima potencia que llegan a entregar los imanes con respecto a la velocidad.

2.2.7 Torre

Elemento que soporta el aerogenerador (ver figura 18). Generalmente es una ventaja disponer de una torre alta. A medida que la torre es más alta, los vientos serán más veloces con condiciones de flujo óptimas que permiten el buen desempeño de la misma. Las torres pueden ser:

Torres de celosía: Son realizadas utilizando perfiles de acero soldado. Este tipo de torre resulta favorable en aerogeneradores de baja potencia, por lo que fueron muy utilizadas en la década de los 80. A medida que se fueron levantando rotores de mayores diámetros, cayeron en desuso.

Torres tubulares de acero: Estas son las más utilizadas mundialmente. Precisan una instalación más laboriosa y cara, pero ofrecen una mayor resistencia y necesitan un menor mantenimiento que las torres de celosía.

Torres de hormigón: el diseño de estas permite alcanzar alturas mayores que las torres de acero; carecen de resonancia y su balanceo es mucho menor por lo que son más estables, además reducen las sollicitaciones de fatiga en la estructura, favoreciendo una mayor vida útil de la misma.

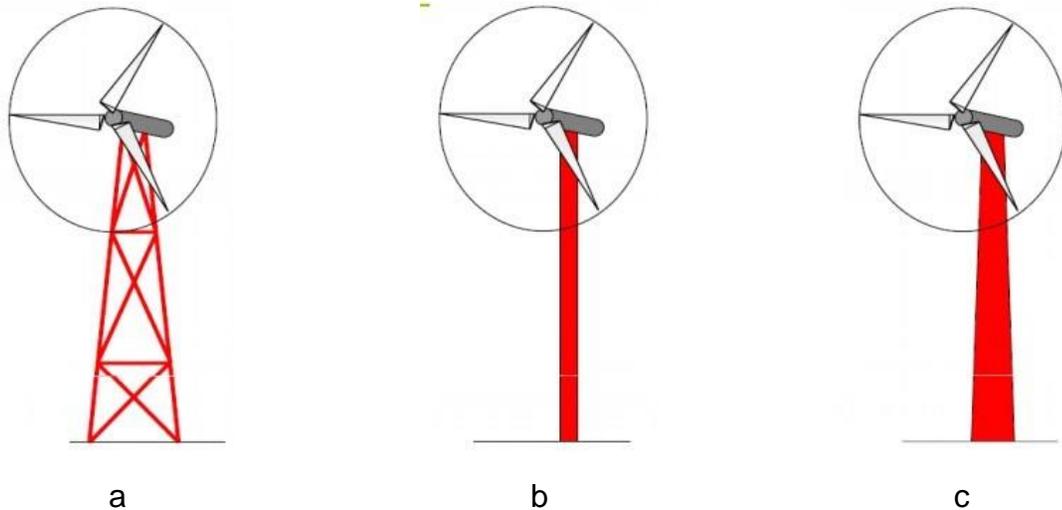


Figura 18 Tipos de torres a) celosía b) tubulares c) hormigón

Materiales de las torres

En cuanto a materiales se refiere, los más adecuados para su fabricación, son el **acero** y el **hormigón** como principales componentes. Puesto que el acero tiene un peso mucho menor que el hormigón, característica que interesa, se buscará entre los aceros, aquel que tenga mejores propiedades, y los que contienen elementos aleados son recomendados para aplicaciones estructurales, aunque su uso se limita generalmente, debido a su alto coste.

Las aleaciones especiales son utilizadas en los tornillos de alta resistencia para la unión entre secciones cilíndricas, así como en elementos donde sea necesario evitar los procesos de corrosión, por la relevancia de los mismos, se emplean aleaciones metálicas y aceros inoxidables especiales. Dichas aleaciones tienen un elevado precio, por lo que no se emplean en la estructura general. (Rucoba 2012)

Diseño estructural

El diseño de la torre ha de realizarse en cuanto a varios criterios según (Lässig 2014)

- **Materiales:** Se estudia la utilización de materiales alternativos al acero debido a las limitaciones que presenta este material, principalmente debido a su gran flexibilidad. El uso de materiales como el hormigón para la producción de aerogeneradores es uno de los principales retos que plantea la industria eólica.

- Estabilidad y resistencia: Para disminuir el riesgo de fatiga en torres tanto de acero como de hormigón, se investigan métodos de control activo o pasivo de vibraciones. Como estas estructuras están diseñadas para durar bastantes años, es importante que se realice este tipo de estudio y así poder evitar que se rompa la torre por fatiga.
- Análisis de cargas: Se busca reducir la incertidumbre en la determinación de cargas que actúan sobre la torre durante su vida útil, especialmente las de viento, dada la naturaleza aleatoria de la misma. La máxima resistencia de la torre se determina mediante un cálculo de cargas estáticas debidas al peso de la propia torre y de todos los elementos situados en su parte superior.

2.2.8 Timón de cola

Debido a las dimensiones de los aerogeneradores de baja potencia, estos no tienen espacio para instalar los mecanismos de transmisión y los motores eléctricos que orientan al rotor de frente al viento. Por tanto, el sistema de orientación utilizado es por un timón de cola (ver figura 19). Esta técnica es muy barata para aerogeneradores de pequeñas dimensiones. La gran ventaja es que no requiere de mecanismos complejos sino simplemente una cola y un mecanismo que permita girar en su eje vertical adaptándose a la dirección del viento impulsado por la fuerza de la cola.



Figura 19 Timón de cola

Materiales

El material más usado para el timón de cola es **acrílico**, ya que proporciona excelentes propiedades mecánicas a la hora de soportar cargas de tiempo corto. La tenacidad presente en el acrílico es la necesaria para poder disipar las diferentes cargas del viento incidente que puedan presentarse, aunque también puede fabricarse de **acero**.

2.2.9 Sistema de Freno

Todos los aerogeneradores necesitan de un método independiente de frenado que permita la detención del aerogenerador en cualquier momento o circunstancia (reparación, pérdida de red, motivos de seguridad, etc.), estos pueden ser:

- Sistema de freno aerodinámico.
- Sistema de freno mecánico.
- Frenado eléctrico.

2.3 Conclusiones parciales

- Se abordan las nociones básicas de la aerodinámica y sus principales parámetros que permiten el funcionamiento de un aerogenerador de baja potencia.
- Se exponen los principales componentes que integran un aerogenerador de baja potencia, especificando las características de funcionamiento de cada parte.
- Se explican los materiales más utilizados en la fabricación de los principales componentes del aerogenerador de baja potencia, así como sus propiedades más importantes, de acuerdo a los requerimientos y condiciones de trabajo de cada elemento.

Capítulo 3 Selección del material y el método de fabricación para los principales componentes del aerogenerador de baja potencia.

En este capítulo se calculan todos los parámetros iniciales del aerogenerador a diseñar, velocidad nominal, radio del rotor, velocidad de giro del rotor. Se selecciona el material y el método de fabricación para los principales componentes a diseñar del aerogenerador. Es necesario aclarar que algunos componentes van hacer importados debido a que el país no cuenta con las condiciones necesarias para su correcta fabricación.

3.1 Parámetros iniciales del aerogenerador de baja potencia

Al identificar las zonas con mayor potencial eólico en el capítulo 1, se planea instalar el aerogenerador de baja potencia en la zona de Gran Piedra, Santiago de Cuba (ver figura 20), donde existe un buen potencial eólico para su desempeño.



Figura 20 Ubicación Zona Gran Piedra, Santiago de Cuba

Fuente: www.maps-google.com

Coordenadas geográficas de la ubicación:

Latitud: 20.009482

Longitud: -75.627181

La potencia eólica de una zona se determina mediante la ecuación y ésta depende de la densidad del aire, de la velocidad del viento y del área barrida por las palas.

$$P_{eólica} = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (10)$$

A continuación se detallan los datos referentes a las velocidades medias mensuales y la velocidad media anual en el año 2016, en la zona a instalar el aerogenerador de baja potencia. (Datos medidos a 10 metros de altura sobre el nivel del suelo)

Tabla 8 Velocidad del viento en la zona de Gran Piedra, Santiago de Cuba.

Fuente: <http://eosweb.larc.nasa.gov>.

Meses	Velocidad del viento (m/s)
Enero	5.7
Febrero	5.6
Marzo	6.7
Abril	6.2
Mayo	5.8
Junio	6.0
Julio	7.9
Agosto	7.5
Septiembre	7.8
Octubre	6.9
Noviembre	7.8
Diciembre	7.5
Anual	6.7

Las variaciones del viento cercanas a la superficie (10m a 100m) dependen estrechamente de la naturaleza del terreno ya que este ejerce una fuerza de rozamiento que se opone al movimiento del aire y cuyo efecto es retardar el flujo y disminuir la velocidad del viento. Este efecto decrece a medida que se incrementa la altura sobre la superficie del terreno. (Duarte and Madero 2011)

Debido a que la variación de velocidad depende del terreno y de la altura a la que se tome, se corrige la velocidad media anual obtenida mediante la ecuación de Hellmann:

$$V_{h2} = V_{h1} * \left(\frac{h2}{h1}\right)^b \quad (11)$$

Donde V_{h1} , V_{h2} representan las velocidades de los vientos a las alturas $h1$ y $h2$ y b es un coeficiente que depende del nivel de rugosidad del terreno. En la Tabla 9 se detallan diferentes valores del coeficiente b en función de distintos tipos de terreno.

Tabla 9 Nivel de rugosidad del terreno.

Nivel de rugosidad del terreno	b
No rugoso (arena, nieve, mar)	0.10-0.13
Poco rugoso (hierba, campo de cereales)	0.13-0.20
Rugoso (bosque, casa pequeñas)	0.20-0.27
Muy rugoso (edificios grandes)	0.27-0.40

Así pues, suponiendo que el rotor del aerogenerador estará situado a 8 m de altura y que la zona donde se ubicará es rugosa ($b=0,23$) la velocidad media corregida es la que se muestra en la ecuación 12.

$$V_{8m} = V_{10m} * \left(\frac{h2}{h1}\right)^{0.23} = 6.7 * \left(\frac{8}{10}\right)^{0.23} = 6.36 \text{ m/s} \quad (12)$$

La velocidad nominal es la velocidad a la cual el aerogenerador alcanza su potencia nominal (0.4kW para el actual proyecto). Esta velocidad determina la cantidad de energía que podrá generar la máquina en un emplazamiento particular en su punto máximo de rendimiento. Es por ello que se busca una velocidad para la cual se pueda aprovechar de manera óptima la mayoría de las distribuciones del viento en lugar a instalar (Duarte and Madero 2011). En función del análisis de los datos del viento en la zona de Gran Piedra se estima una velocidad nominal de 7 m/s.

La potencia eléctrica se puede calcular mediante la fórmula:

$$P_{eléctrica} = \eta_{sistema} * P_{mec} = \eta_{sist.elect} * C_p * P_{eólica} \quad (13)$$

Sustituyendo en la ecuación 13:

$$P_{el\u00e9ctrica} = \eta_{sistema} * \frac{1}{2} C_p \rho A V^3 \quad (14)$$

$\lambda = 5$ para un n\u00famero de palas $B=3$.

$C_p = 0.59$ (el m\u00e1ximo te\u00f3rico que se puede conseguir seg\u00fan la Ley de Betz).

$\eta_{sistema} = 0.95$.

$P_{el\u00e9ctrica} = 0.4kW$.

$V_{nominal} = 7 m/s$.

$\rho = 1.25kg/m^3$.

Sustituyendo los valores en la ecuaci\u00f3n 14 y despejando se obtiene el valor de radio del rotor:

$$0.4kW = \frac{10^{-3}}{2} 0.95 * 0.59 * 1.25 \frac{kg}{m^3} * (7 m/s)^3 * A$$

$$9.13 m^2 = \pi * R^2$$

$$1.02 m = R$$

Luego se calcula la velocidad de giro del rotor (n), despejando de la ecuaci\u00f3n 2 y sustituyendo los valores:

$$n = \frac{60 * \lambda * V}{2 * \pi * R} = \frac{60 * 5 * 7(m/s)}{2 * \pi * 1.02 m^2} = 328 rpm$$

Para validar que el di\u00e1metro de rotor sea correcto, hay que comprobar que la velocidad en la punta de la pala (u) no sea superior a la velocidad del sonido, ya que de lo contrario el dise\u00f1o de las palas no ser\u00eda \u00f3ptimo ya que se podr\u00edan producir cavitaci\u00f3n en la punta de la pala, cosa que implicar\u00eda p\u00e9rdida de rendimiento de las mismas, ruido, vibraciones y erosi\u00f3n. A continuaci\u00f3n en la ecuaci\u00f3n 15 se realiza dicho c\u00e1lculo de comprobaci\u00f3n.

$$u = \omega * R = \frac{2\pi}{60} n * R \quad (15)$$

$$u = \frac{2\pi}{60} * 328 \text{ rpm} * 1.02 \text{ m}$$

$$u = 35.03 \text{ m/s} \leq 340 \text{ m/s}$$

Tabla 10 Parámetros iniciales.

Parámetros iniciales	Valores
Potencia nominal	400 W
Número de palas	3
Velocidad nominal	7 m/s
Velocidad de rotación del rotor	328 rpm
Diámetro del rotor	2.04 m
Altura del buje	8 m
Área de barrido	3.26 m ²

La Curva de potencia de un aerogenerador, es la relación entre la potencia eléctrica suministrada en función de la velocidad de viento incidente. La curva de potencia del aerogenerador es la característica más significativa de su eficiencia energética, y permite calcular la energía que puede suministrar el aerogenerador conociendo los datos de viento.

En la figura 21 se representa una curva de potencia característica en la que se pueden distinguir los siguientes valores:

- Velocidad de conexión o de arranque: valor de la velocidad media del viento para la que el aerogenerador comienza a generar energía eléctrica. En este caso a una velocidad de 2 m/s comienza a generar una potencia de 9.15 W.
- Velocidad nominal: En el proyecto se tomó como velocidad nominal 7 m/s, y para esta velocidad genera los 400 W. Aunque tradicionalmente no ha existido un valor de velocidad de viento aceptado de forma universal como velocidad nominal, la tendencia es usar el valor de 12m/s. (Arribas 2013)

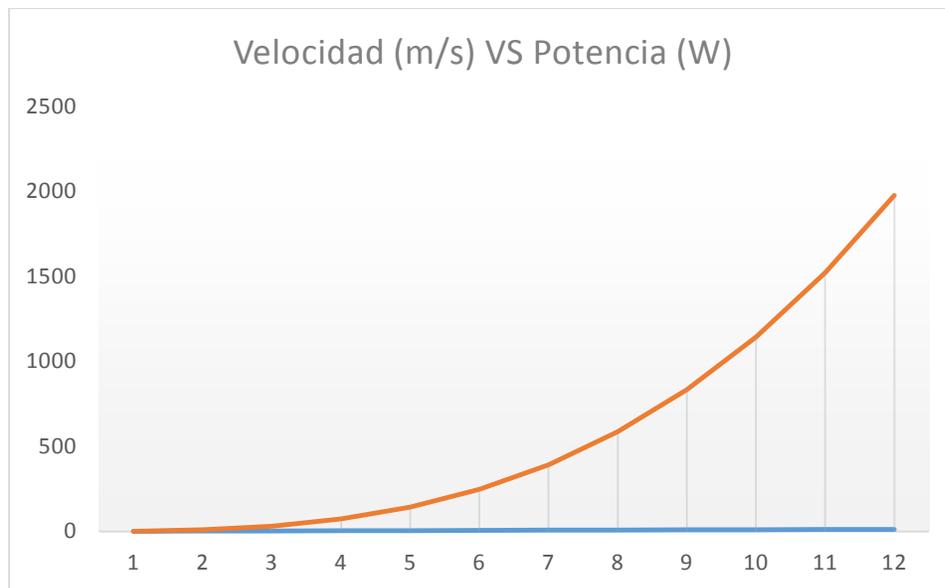


Figura 21 Velocidad del viento VS Potencia

3.2 Selección del material para los principales componentes del aerogenerador de baja potencia.

3.2.1 Palas

El material idóneo para la fabricación de las palas es **plástico reforzado con fibra de vidrio**. La fibra de vidrio tiene grandes aplicaciones industriales, debido a su gran resistencia a la tracción, gran flexibilidad y bajo costo.

La fibra de vidrio es un material fibroso obtenido al hacer fluir vidrio fundido a través de una pieza de agujeros muy finos (espinerette) y al solidificarse tiene suficiente flexibilidad para ser usado como fibra. Se comercializa en varios tipos: tejido, mat (filtro de hilos) y roving (filtros formando una hebra). (Ramos 2015)

La resistencia mecánica de los plásticos reforzados con fibra de vidrio (PRFV) depende de la cantidad de fibra de vidrio que contenga, el tipo de resina y del perfil que tengan. A mayor cantidad de fibra de vidrio tendremos mayor resistencia mecánica. (Reyes 2002)

La fibra de vidrio exhibe comportamientos similares a otros compuestos hechos de fibra y polímero como la fibra de carbono. Las fibras de carbono son muy superiores a las fibras de vidrio en términos de módulo elástico específico (Reyes 2002). Aunque la fibra de vidrio no sea tan fuerte o rígida como la fibra de carbono, es mucho más económica y menos quebradiza.

Los compuestos plásticos reforzados con fibra de vidrio tienen las siguientes características particulares:

- Resistencia mecánica, con una resistencia específica (tracción/densidad) superior a la del acero.
- Incombustibilidad. No propaga la llama ni origina humos o toxicidad.
- Estabilidad dimensional (bajo coeficiente de dilatación).
- Débil conductividad térmica.
- Buena resistencia a la corrosión.
- Resistencia a la humedad.
- Excesiva flexibilidad.
- Bajo coste.

Tabla 11 Propiedades mecánicas de la fibra de vidrio.

Material	Resistencia (N/mm^2)	Limite elástico (N/mm^2)	Alargamiento (%)	Densidad fibra (g/cc)
Fibra de vidrio	103	12411	90	2

3.2.2 Buje y Estator

El aluminio posee un buen comportamiento en cuanto a resistencia mecánica de muchas de sus aleaciones, tiene una alta conductividad térmica y eléctrica, su durabilidad y resistencia a la corrosión hacen de este material ideal para la fabricación del buje. El **aluminio** seleccionado es **6063**, de acuerdo con el sistema adoptado por la Aluminum Association y los principales elementos aleantes de este grupo son magnesio y silicio. Esta aleación obtiene características mecánicas adecuadas y es utilizado también en perfiles de carpintería, herrajes entre otros.

El buje y el estator pueden ser fabricados también de acero ya que este material es mucho más resistente que el aluminio, y también más barato. Pero este material tiene la desventaja de ser aproximadamente 3 veces más pesado que el aluminio, por esto se decide utilizar el aluminio para la fabricación.

Tabla 12 Propiedades mecánicas del aluminio 6063.

Aleación	Resistencia (N/mm^2)	Limite elástico (N/mm^2)	Alargamiento (%)	Dureza Brinell (HB)
6063	175	130	6	60

Tabla 13 Composición Química.

%Si	%Fe	%Cu	%Mg	%Mn	%Cr	%Zn
0.2-0.6	0.35	0.1	0.45-0.9	0.1	0.1	0.1

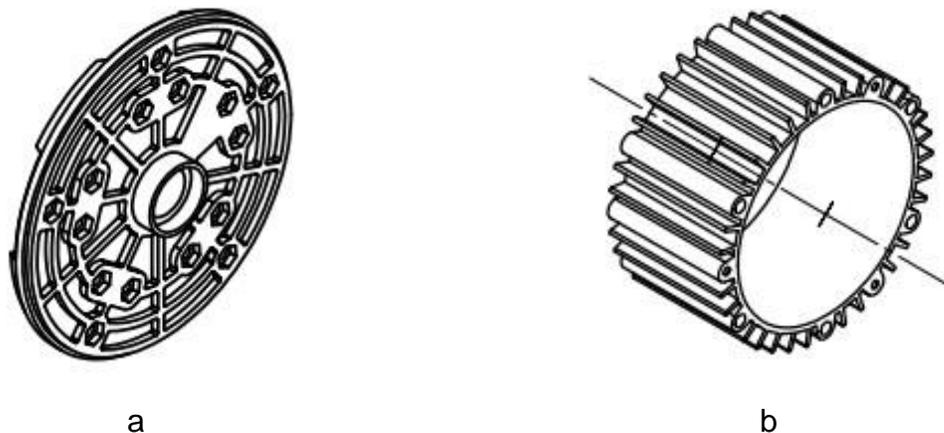


Figura 22 a) Buje b) Estator

3.2.3 Nariz o cubo

El material seleccionado para la fabricación de la nariz es el **polietileno de alta densidad**, debido a su buen comportamiento ante condiciones ambientales como la temperatura, humedad, radiación solar.

La clasificación que más se utiliza es la densidad, pues este parámetro es un buen indicativo de las cualidades entre los polietilenos, donde en general, con densidades altas, mayores propiedades mecánicas. El polietileno de alta densidad es muy tenaz, de esta manera demuestra alta resistencia a los impactos aun a bajas temperaturas, pues es capaz de absorber parte la energía proveniente de los impactos mediante deformaciones. (Girón 2005)

Este se encuentra entre los materiales plásticos más económicos para la producción de piezas de plástico y es también el más barato.

Este plástico posee unas características únicas que hacen que sea un sustituto viable de hierros y aceros en multitud de aplicaciones industriales:

- Excelente aislante eléctrico.
- Resistente a las bajas temperaturas.
- Inerte a los ataques de productos químicos.
- Excelente barrera a la humedad.
- Económico.
- Es muy ligero.
- Su densidad se encuentra en el entorno de 0.941 - 0.965 g/cm³.

Tabla 14 Propiedades mecánicas del polietileno de alta densidad.

Material	Resistencia (N/mm ²)	Dureza Rockwell
Polietileno de alta densidad	15-40	D60-63



Figura 23 Nariz o Cubo

3.2.4 Rotor

El material seleccionado para la fabricación del rotor es **acero inoxidable AISI 430**. Los aceros inoxidables se definen como una aleación de acero (con un mínimo del 10 % al

12 % de cromo contenido en masa). El tipo seleccionado es ferrítico, estos poseen bajo % de carbono y alto Cr (10-27%). El acero inoxidable tipo 430 es la aleación más comúnmente usada en los aceros inoxidables ferríticos, el cuál presenta una buena resistencia a la corrosión y es resistente a la oxidación hasta 816°C. Los aceros ferríticos son magnéticos y se distinguen porque son atraídos por un imán.

Tabla 15 Propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 430.

Aleación	Resistencia a la Fluencia (N/mm^2)	Resistencia Máxima (N/mm^2)	Elongación (%)
430	205	450	22

Tabla 16 Composición Química.

%C	%Mn	%Si	%Cr	%P	%S
0.12	1	1	16-18%	0.04	0.03

Tratamientos térmicos: el recocido se da con calentamiento entre 815 – 850 °C, mantenimiento de 30 minutos por cada 13 mm de espesor, enfriamiento lento en el horno hasta 625 °C y luego enfriamiento rápido en aire. Este grado no es endurecible por tratamiento térmico.

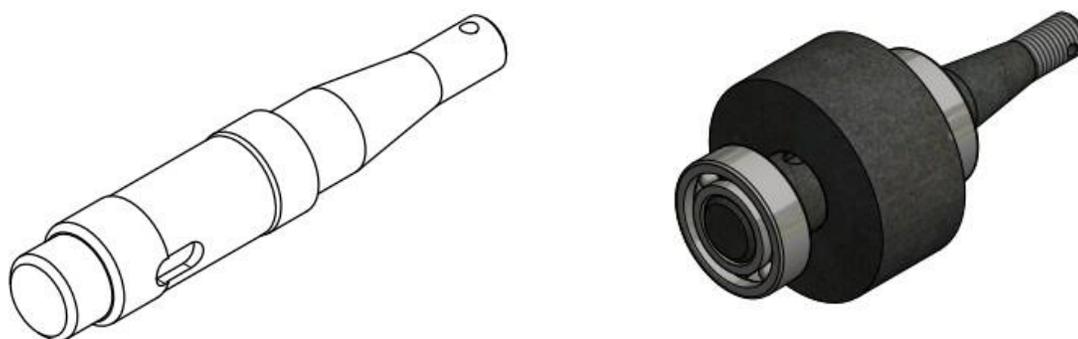


Figura 24 Rotor a) Eje b) Eje con los imanes permanentes y los cojinetes

3.2.5 Torre y Timón de cola

De los aceros al carbono, el más idóneo para la fabricación es el **acero ASTM A36**, es una de las variedades más comunes en parte debido a su bajo costo, y ofrece una

excelente resistencia y fuerza para un acero bajo en carbono y aleación. Aunque es propenso al óxido. Como todos los aceros el A36 se compone predominantemente de hierro (98 a 99 %) sin embargo, a diferencia de la mayoría de los aceros, tiene muy pocos elementos añadidos a él. Este tiene una composición química simple y es muy fácil de soldar, lo que lo convierte en un material estructural atractivo para la fabricación de la torre y el timón de cola.

Tabla 17 Propiedades mecánicas del acero ASTM A36.

Material	Resistencia Tracción (N/mm^2)	Elongación (%)
A36	400	20

Tabla 18 Composición Química.

%C	%Mn	%Si	%P	%S
$\leq 0,26$	0,80 -1,20	$\leq 0,40$	$\leq 0,04$	$\leq 0,0$

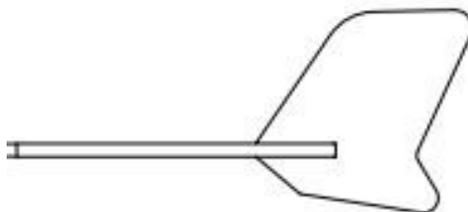


Figura 25 Timón de cola

3.3 Métodos de Fabricación para los principales componentes del aerogenerador de baja potencia.

3.3.1 Palas

Las palas del aerogenerador inicialmente se planea ser importadas, debido a que ninguna empresa en el país posee las condiciones ni las herramientas necesarias para realizar su diseño y construcción, pero siempre es importante conocer el método de fabricación.

El método de fabricación de las palas es por **inyección**. El proceso consiste en el llenado de un molde, que puede ser de poliéster o de acero, el cual se ha introducido anteriormente la fibra de vidrio de refuerzo. La fibra debe cortarse de forma que se adapte al molde.

El proceso de inyección según (Reyes 2002) consiste en los siguientes pasos:

- Preparación del molde.
- Colocación de las fibras de refuerzos.
- Cerrado del molde.
- Dejar entrar la resina.
- Cierre del canal de entrada de la resina.
- Aplicar vacío.

Este método es bien eficaz para la fabricación de las palas debido a la alta versatilidad de piezas que pueden fabricarse, la rapidez de fabricación, altos niveles de producción, y se pueden tratar geometrías muy complicadas que serían imposibles por otras técnicas.

El cerrado del molde es importante para que no se produzcan pérdidas de resina por los bordes del molde, y mayormente es cerrado mediante métodos mecánicos. Los costos de fabricación de los moldes suelen ser altos, ya que los tiempos empleados en la mecanización y ajuste de estos suele ser considerable. Además la exactitud de dimensiones y la calidad superficial suele ser extremadamente laboriosa conseguirla.

3.3.2 Buje

El buje se planea fabricarlo en la industria cubana mediante el **proceso de fundición por coquilla**. Este proceso comienza inicialmente en el horno de fundición, en el que se lleva a estado líquido el aluminio 6063. El horno cuenta con dos quemadores de aceite de petróleo, que le permiten elevar al aluminio a una temperatura de entre 780 y 820°C, temperatura a la cual se encuentra completamente líquido, ya que su punto de fusión es de aproximadamente 760°C.(Isaza 2007)

El aluminio en estado líquido debe ser conducido al molde por un operario, al que se le llama moldeador, éste se encarga de recoger el aluminio con una cuchara de acero con vástago largo, y agregar un agente saturador. El agente

saturador se utiliza para saturar el hidrógeno presente en el aluminio, y hacer que las burbujas que se forman al solidificarse la pieza sean imperceptibles.

Es importante saber que cuando la aleación de aluminio se encuentra en estado líquido, el hidrogeno del aire se solubiliza en esta, siendo el único gas capaz de solubilizarse en el aluminio. (Isaza 2007)

Este sistema es manual o sea cuenta exclusivamente con la hembra y el macho del molde, que son cerrados y asegurados manualmente por el moldeador, de igual forma este operario llena el molde con el metal líquido, para posteriormente abrirlo y extraer la pieza conformada. Generalmente el molde consta de dos piezas.

3.3.3 Estator

El cuerpo del estator (carcasa) se planea ser importado debido a que no existe capacidad de extrusión en las empresas productoras de aluminio de nuestro país.

El proceso de **Extrusión** consiste en hacer pasar una masa de aluminio de forma cilíndrica, comúnmente denominada tocho, semisólida a causa de un calentamiento previo, a través de una matriz en el que se ha practicado un vaciado similar a la sección del perfil que queremos obtener. El tocho de aluminio es presionado por el émbolo de la prensa (máquina de grandes dimensiones en que se realiza la extrusión) y al mismo tiempo el perfil, todavía con una consistencia muy baja debido a la alta temperatura de su masa, es asistido en su salida mediante la tracción. El perfil así obtenido no presenta una geometría rectilínea en toda su longitud ni uniforme en su sección, a consecuencia de la deformación producida por el propio peso, debido a esto se somete a otros procesos:

Estirado: Cuando el perfil ya está frío se sujeta en ambos extremos y se somete a una fuerza instantánea de tracción en toda su longitud (estirado), que le confiere su forma definitiva.

Corte: Las barras de perfil así obtenidas son ahora cortadas en una sierra circular a la medida requerida.

Temple: Una vez obtenido el perfil con la forma y longitud requerida, su dureza sigue siendo muy baja. Para que sean de utilidad para el uso requerido se somete a un

proceso de templado, consistente en el calentamiento y enfriamiento (en un horno especial de templado) a una temperatura y durante un período de tiempo determinado.

3.3.4 Rotor

El **proceso tecnológico de maquinado** para la fabricación del rotor se realiza en la Fábrica de Antenas en un torno paralelo de fabricación soviética Modelo 16K20. Para su fabricación resulta más económico fabricarlo en este modelo de torno y no en un torno CNC, debido a que la producción de esta pieza no es alta (aproximadamente 100 rotores).

Para llevar a cabo este proceso es necesario conocer:

- Descripción de la pieza y análisis funcional: (ver tabla 6). Se tendrá en cuenta que la pieza a elaborar estará sometida a torsión y flexión.
- Análisis dimensional de la pieza: El ingeniero realiza un análisis dimensional donde para cada escalón se conozcan todas las dimensiones límites.
- Elaboración del plano de la pieza.
- Selección del material de la pieza: De acuerdo a las exigencias, condiciones de trabajo que va a estar sometida la pieza, las propiedades mecánicas que se requieren garantizar, el material seleccionado es acero inoxidable AISI 430.
- Propiedades mecánicas del material: (ver tabla 15)
- Selección de la pieza en bruto: De acuerdo al diámetro mayor de la pieza a elaborar, que es de 30 mm se parte de una barra de 40 mm de diámetro y longitud 175 mm. (la longitud lleva implícito un margen de 7 mm superior al de la pieza a elaborar).
- Selección de la secuencia de operación y pasos tecnológicos: Se realiza primeramente una operación de torneado con operaciones de refrentado, taladrado y cilindrado. Luego se realiza un operación de fresado para tallar el chavetero.
- Selección de las máquinas herramientas por operación y sus accesorios: Para el torneado se selecciona un torno paralelo de fabricación soviética Modelo 16K20, con diámetro de husillo igual a 63 mm. Los accesorios requeridos para la operación de torneado son plato autocentrante de 3 garras, mandril porta-broca, punto móvil, perro de arrastre. Para la realización del tallado del chavetero se

decide utilizar una fresadora modelo FV2A y los accesorios requeridos son cabezal divisor, cabezal móvil, Plato autocentrante de 3 garras. Para ambas operaciones se seleccionan las herramientas de corte necesarias (cuchillas, brocas, fresa).

3.3.5 Nariz o cubo

La nariz del aerogenerador se va a fabricar en la industria cubana. El proceso de fabricación de la nariz es también por **inyección**, este consiste en inyectar un polímero (en nuestro caso el polietileno de alta densidad), cerámico o un metal en estado fundido en un molde cerrado a presión y frío, a través de un orificio pequeño llamado compuerta. En el molde el material se solidifica. La pieza final se obtiene al abrir el molde y sacar de la cavidad la pieza.

3.3.6 Torre y Timón de cola

El proceso de fabricación de la torre y del timón de cola, se realiza en la fábrica de antenas por **soldadura GMAW**. El proceso de soldadura por arco de metal y gas (Gas Metal Arc Welding), el calor del arco generado entre el electrodo consumible y la pieza a ser soldada es utilizado para fundir las superficies del metal base y el extremo del electrodo. El metal fundido del electrodo es transferido hacia la pieza a través del arco, donde se convierte en metal de soldadura depositado (ver figura 26). La protección es obtenida por una cubierta de gas. El gas de protección envuelve el área del arco para protegerlo de contaminantes de la atmósfera.

Los componentes básicos del equipo son la unidad de pistola soldadora y cables, la unidad de alimentación del electrodo, la fuente de potencia y la fuente de gas protector.

Ventajas del proceso según (Eyheralde 2013):

- Debido a que es el único proceso de electrodo consumible que puede servir para soldar todos los metales y aleaciones comerciales.
- Puede soldarse en todas las posiciones, y es posible depositar soldaduras largas sin parar.
- Gran aprovechamiento del metal de aporte (no hay pérdidas por escorias, colillas, etc).

El proceso GMAW se aplica para la soldadura de todos los metales y aleaciones de mayor comercialización, lo que incluye los aceros al carbono, aleados e inoxidables, los hierros fundidos, las aleaciones base níquel, aluminio, magnesio, cobre, titanio, zirconio. En cuanto al rango de espesores se pueden soldar metales desde 0.5 mm de espesor en adelante (hasta un espesor prácticamente ilimitado). (Eyheralde 2013)

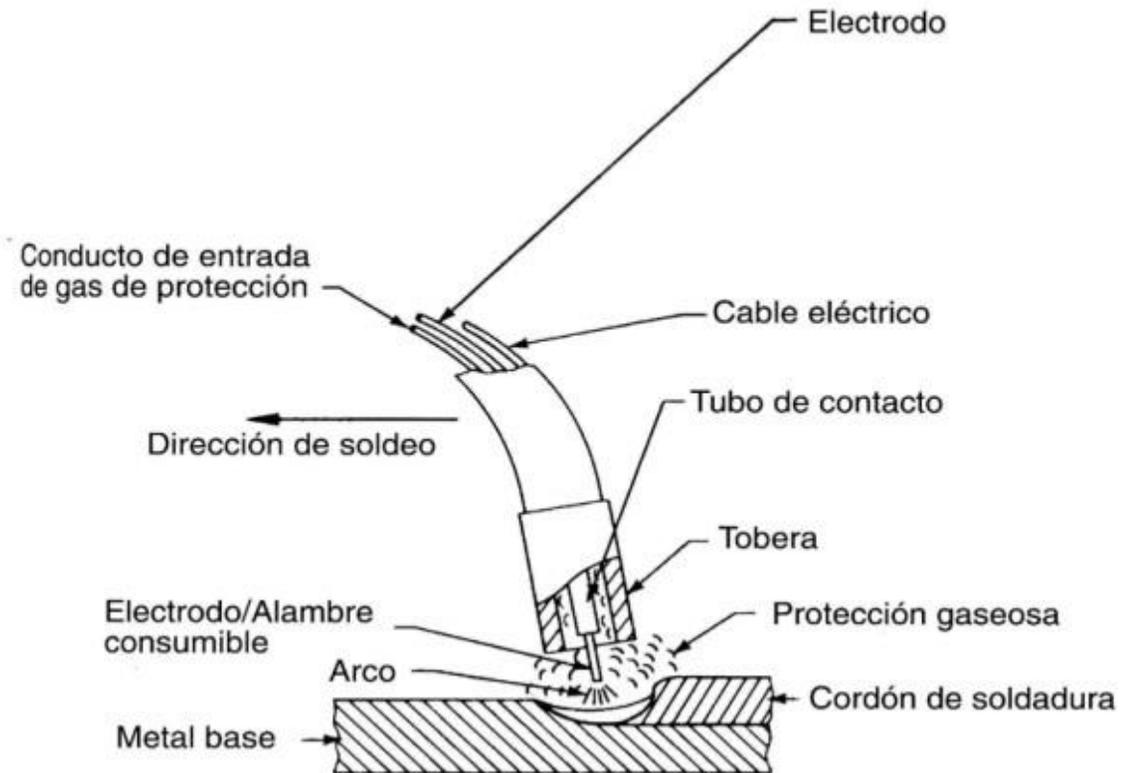


Figura 26 Proceso de soldadura GMAW

Fuente: www.google.com/ Proceso de soldadura GMAW.

3.4 Conclusiones parciales

- Se determinaron los parámetros iniciales necesarios para el diseño del aerogenerador de baja potencia, de acuerdo a las condiciones de ubicación geográfica establecidas. Entre ellos el radio y velocidad de giro del rotor.
- Se define el material para la fabricación de los principales componentes del aerogenerador de baja potencia, de acuerdo a las posibilidades del país.
- Se definieron las posibles tecnologías a emplear para la fabricación de los componentes de aerogeneradores de baja potencia, en base a la factibilidad técnica y económica que permita su producción en el país. Dentro de ellas el método de fundición por coquilla, moldes de inyección, maquinado y soldadura.
- Referente a las tecnologías de fabricación, se precisaron los elementos que, en la actualidad, deberían ser importados (palas, estator, imanes permanentes), debido a no contar con la tecnología adecuada para su fabricación.

Conclusiones

1. Del análisis bibliográfico realizado se constató la evolución en el diseño de aerogeneradores de baja potencia en el mundo, sus principales clasificaciones y se destacan las posibles zonas con un potencial eólico favorable para la instalación de aerogeneradores en Cuba, así como el gran número de fabricantes a nivel mundial y sus altos costos.
2. Sobre los materiales seleccionados para los principales componentes, se resalta que están determinados a partir de la tecnología existente en el país y de los costos, entre estos se pueden mencionar: aceros aleados e inoxidables, aluminio y polietileno de alta densidad.
3. Con el estudio y la valoración técnica realizada se demuestra que es posible la fabricación de aerogeneradores de baja potencia en Cuba. En este sentido, se pudieran elaborar alrededor del 75% de las piezas, ya que la industria nacional cuenta con tecnología y la experiencia necesaria para ello. De este análisis se precisa también que el 25% de los componentes deberán ser importados, debido a que algunas tecnologías son costosas y provienen de países desarrollados.
4. Se realizó el diseño preliminar de los principales componentes del aerogenerador a diseñar, haciendo uso del software Autodesk Inventor 2016.

Recomendaciones

- Proponer a la empresa de Antenas, de Santa Clara, realizar el estudio de factibilidad técnico económico para valorar la fabricación del aerogenerador de baja potencia.
- Que la empresa Antenas analice la posibilidad de invertir en tecnologías para la fabricación de los componentes importados y así influir en la disminución de los costos.

Referencias Bibliográficas

Aragón (2010). "MANUAL DE PROCEDIMIENTOS DE TRABAJO SEGUROS EN LA FABRICACION, MONTAJE Y MANTENIMIENTO DE GENERADORES DE ENERGIA EOLICA."

Arribas, L. (2013). "Energía Mini-eólica."

Castro, M. S. d. (2014). Diseño y Construcción de una min-turbina eólica.

Castro, M. S. d. (2014). "Diseño y Contrucción de una min-turbina eólica."

Duarte, L. G. B. and J. C. F. Madero (2011). Diseño de un sistema eólico de baja potencia para la zona aledaña al municipio de Gameza-Boyacá.

Eyheralde, M. (2013). "Procesos de soldadura semiautomáticos GMAW - FCAW."

Figueredo, C. M. (2000). "Los Pequeños Aerogeneradores. Perspectiva promisoría de la Pequeña Eólica."

Figueredo, C. M. (2000). "Producción de electricidad con pequeños aerogeneradores."

Fuentes, A. P. (2014). "Sistema de Gestión de Información de los parámetros del viento."

Girón, I. E. R. (2005). "Estudio de las propiedades y aplicaciones industriales del polietileno de alta densidad."

González, B. P. G. y. R. G. (2012). "Diseño Aerodinámico de palas para miniaerogeneradores."

Hernández, F. G. (2010). "Diseño y Construcción de un generador eléctrico para un aerogenerador de baja potencia."

Hernández, F. G. (2012). Diseño y Construcción de un generador eléctrico para un aerogenerador de baja potencia.

Isaza, P. C. (2007). "MODELACIÓN Y ANÁLISIS DE UN MOLDE PARA FUNDICIÓN DE ALUMINIO POR COQUILLA."

Larrosa, A. M. (2008). "Historia de la energía eólica en Cuba."

Lässig, A. A. a. J. L. (2014). "Tendencias en el diseño de las torres para aerogeneradores multimegawatt."

Leal, D. F. B. (2014). "REGULACIÓN DE POTENCIA DE UN AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL A PARTIR DE UN SISTEMA DE CONTROL DE VELOCIDAD DE ROTACIÓN."

Loidi, J. R. S. (2017). "Decreto-Ley No.345 "Del desarrollo de las fuentes renovables y el uso eficiente de la energía"."

Mayoral, A. G. y. G. (2006). "Diseño de un aerogenerador de eje horizontal de 1KW de potencia."

Nieto, R. R. (2015). "DISEÑO MECÁNICO DE UN AEROGENERADOR EÓLICO."

Ramos, R. T. (2015). "Materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibra de vidrio."

Reyes, J. H. B. (2002). "Los Plásticos reforzados con fibra de vidrio (PRFV), sus aplicaciones en la industria nacional."

Román, Á. L. S. (2013). "Diseño de un aerogenerador para uso particular."

Román, R. G. (2005). "Diseño y cálculo preliminar de la torre de un aerogenerador."

Romero, E. G. C. y. R. C. (2005). "MANUAL TEÓRICO DE CAPACITACIÓN EN ENERGÍA EÓLICA."

Rucoba, D. F. d. (2012). "OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO A FATIGA DE UNIONES SOLDADAS A TOPE Y SU APLICACIÓN AL DIMENSIONAMIENTO DE SOLDADURAS TRANSVERSALES DE TORRES EÓLICAS."

Ruiz, J.-F. F. (2009). ANÁLISIS SIMPLIFICADO DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL DE UNA PALA DE AEROGENERADOR

Torres, I. D. (2013). "Cuba: energía eólica vs petróleo."

Vergara, W. B. P. (2015). Análisis y parametrización de un aerogenerador Micro-eólico aislado para la Universidad politécnica Salesiana Sede Cuenca.

Bibliografía

Castro, M. S. d. (2014). "Diseño y Construcción de una mini-turbina eólica"

Román, R. G (2005). "Diseño y cálculo preliminar de la torre de un aerogenerador"

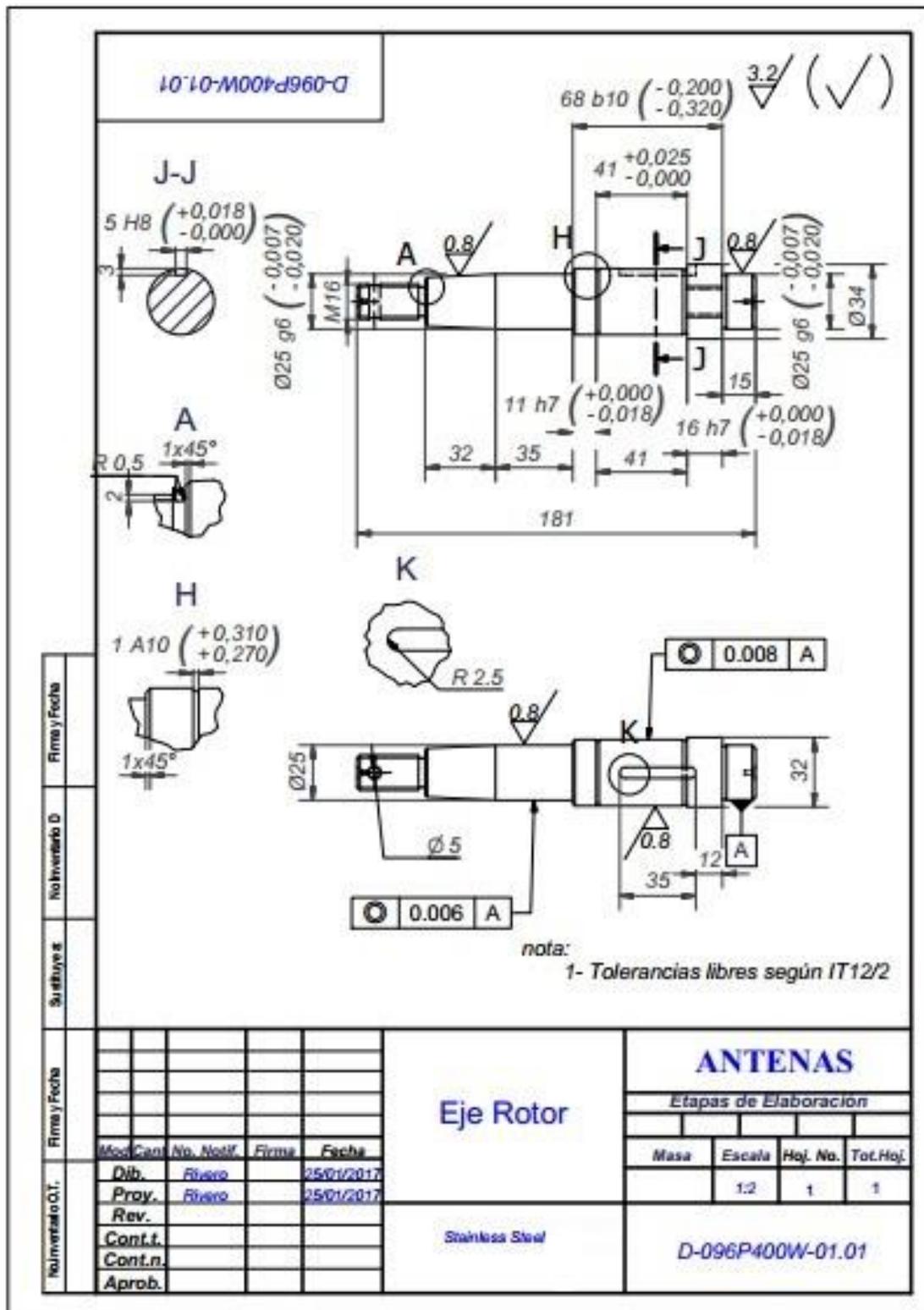
Vega, D. M. (2014). "Eficiencia Energética de Motores Trifásicos de media tensión tipo jaula de ardilla"

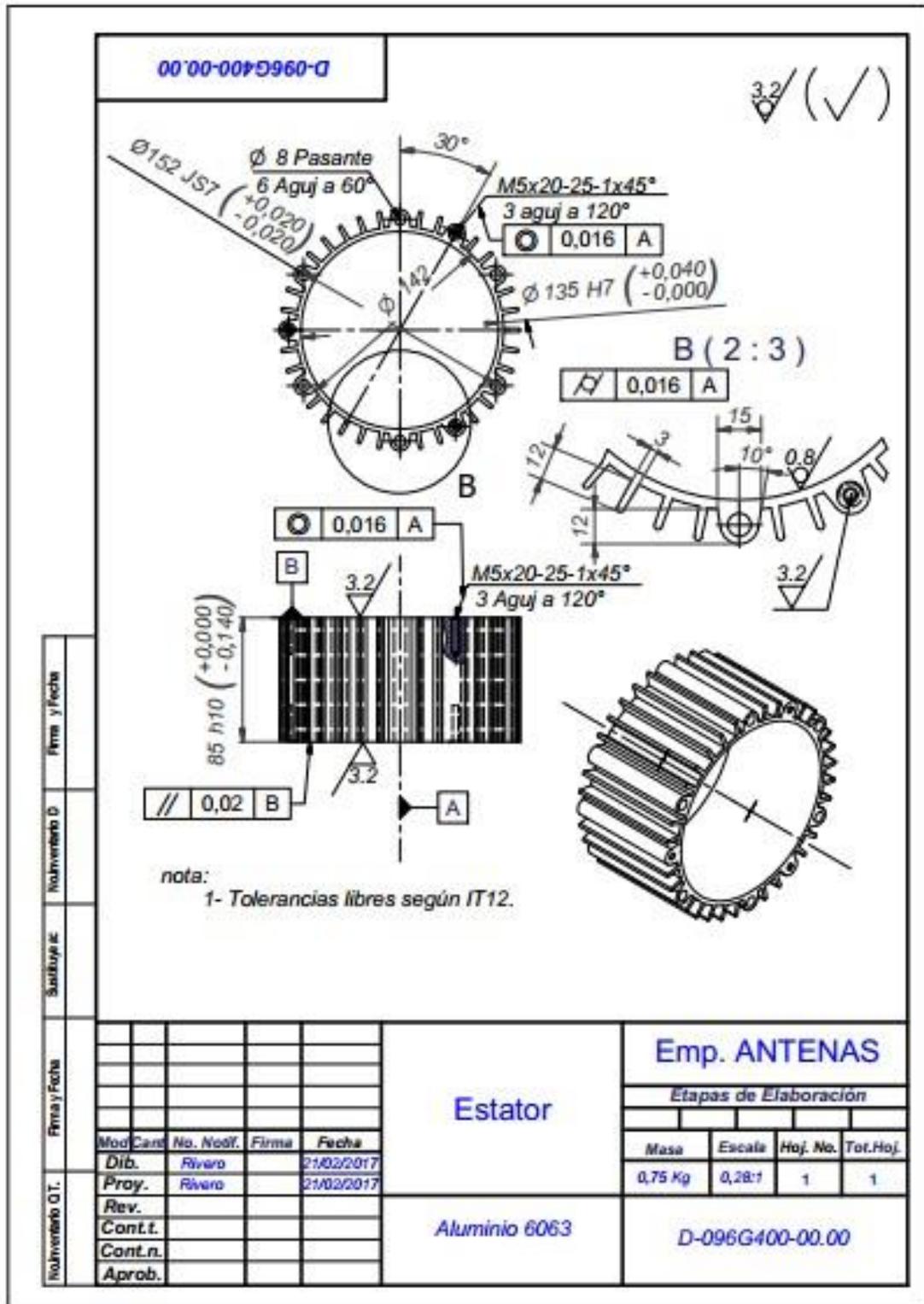
Martin. C. F. (2011). "Estudio de Implantación de una industria de motores de baja tensión ubicada en Catalunya"

E. Peralta Porcela, C. G. V. G. Jeandrevin (2008). "Fabricación de pala de un generador eólico de baja potencia para zonas de vientos leves."

Figueredo, C. M. (2006). "El recurso eólico en Cuba y en el mundo"

Silva, I. F. F. (2012). "Comportamiento mecánico de materiales de paletas de aerogeneradores de potencia"





Firma y Fecha											
No. Inventario D											
Sustituye a:											
Firma y Fecha											
No. Inventario Q.T.											
Mod. Cant.	No. Modif.	Firma	Fecha	Estator				Emp. ANTENAS			
Dib.	Rivero		21/02/2017					<i>Etapas de Elaboración</i>			
Proy.	Rivero		21/02/2017	Masa	Escala	Hoj. No.	Tot. Hoj.				
Rev.				0,75 Kg	0,28:1	1	1				
Cont.t.				Aluminio 6063				D-096G400-00.00			
Cont.n.											
Aprob.											

