

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE GENERADOR EÓLICO PARA UNA POTENCIA DE 200 WATTS

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

DIEGO IVAN CEVALLOS CEVALLOS

diegoolski@hotmail.com

ROBERTO CARLOS GUACHO JIMENEZ

robertcg11@hotmail.com

DIRECTOR: Dr. ÁLVARO GONZALO XAVIER AGUINAGA BARRAGÁN

decano.mecanica@epn.edu.ec

Quito, Junio 2013

DECLARACIÓN

Nosotros, Diego Iván Cevallos Cevallos y Roberto Carlos Guacho Jiménez declaramos, bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo los derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo a la Escuela Politécnica Nacional, Según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Diego Iván Cevallos Cevallos

Roberto Carlos Guacho Jiménez

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Diego Iván Cevallos Cevallos y Roberto Carlos Guacho Jiménez, bajo mi supervisión.

Dr. Álvaro Aguinaga
DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

Al director de tesis Dr. Álvaro Aguinaga por su acertada dirección y valiosa colaboración.

A mi familia que siempre me ayudaron durante todos mis estudios.

A Elsita y Greace que siempre estuvieron pendientes, para poder conseguir mis metas.

Diego Cevallos

A Dios por darme la fuerza para seguir cumpliendo mis metas, por darme la perseverancia para luchar por mis sueños, por permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

A mis padres, Carlos y María, quienes con su ejemplo de lucha y amor son los pilares fundamentales para la conclusión de una etapa más de mi vida, gracias porque nunca dejaron de alentarme.

A mis hermanas, Alicia y Miriam; quienes en las buenas y las malas siempre estuvieron presente con sus consejos y brindándome su ayuda.

A mi hermano Daniel quien con su compañía me ayudo a sobrellevar todos los aspectos de mi vida.

A mi hija Hannah Camila, la razón de mi vida, gracias por su sonrisa y amor, quien me alienta a seguir alcanzando las metas planteadas.

Roberto Guacho

DEDICATORIA

Dedico esta obra a mi madre que fue mi inspiración para llegar a culminar este proyecto con éxito, a mi padre y hermano que me apoyaron siempre en todo momento y que no me dejaron decaer frente a los problemas que se presentaron. A mis abuelitos que si estuvieran vivos serian las personas más felices viéndome culminar esta etapa en mi vida

Diego

A Dios por darme la vida y guiar cada paso que doy, a mis padres, que con su amor y esfuerzo diario me brindaron su ayuda para culminar este proyecto, a mis hermanos que estuvieron siempre a mi lado dándome su apoyo y confianza, a mi hija Camila, quien con su amor incondicional me da fuerza para seguir adelante.

Roberto Carlos

CONTENIDO

DECLARACIÓN.....	I
CERTIFICACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
DEDICATORIA.....	IV
CONTENIDO.....	V
INDICE DE FIGURAS	X
CAPITULO I.....	X
CAPITULO II.....	X
CAPITULO III.....	XI
CAPITULO IV	XI
CAPITULO V	XII
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
CAPÍTULO II.....	XIII
CAPÍTULO III.....	XIII
CAPITULO IV	XIII

CAPITULO V XIII

CAPÍTULO I 1

1 GENERALIDADES 1

1.1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.2	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	1
1.3	ANTECEDENTES DEL PROYECTO	2
1.4	ENERGIAS RENOVABLES	3
1.4.1	Energía solar	5
1.4.2	Energía eólica	5
1.4.3	Energía geotérmica.....	6
1.4.4	Energía hidráulica	7
1.4.5	Energía mareomotriz	7
1.4.6	Biomasa	8
1.4.7	Energía undimotriz	8
1.5	TRATADO DE KIOTO	8
1.6	ENERGIA EÓLICA.....	11
1.6.1	Descripción.....	11
1.6.2	Origen de la energía eólica.....	12
1.6.3	Ventajas de la energía eólica	13
1.6.4	Desventajas de la energía eólica	15
1.7	GENERADORES EÓLICOS.....	16
1.7.1	Descripción.....	16
1.7.2	Componentes básicos de un aerogenerador	16
1.7.3	Tipos de generadores eólicos.	20
1.8	GENERADORES EOLICOS DE EJE VERTICAL	20
1.8.1	Darrieus	21
1.8.2	Panemonas.....	22

1.8.3	Savonius	22
1.9	AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL	23
1.9.1	Descripción.....	23
1.9.2	Clasificación.	24
CAPÍTULO II.....		30
2 MARCO TEÓRICO.....		30
2.1	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN AEROGENERADOR.....	30
2.2	POTENCIA GENERADA POR UNA TURBINA EÓLICA.	31
2.2.1	Teorema de Betz.	33
2.2.2	Rendimientos de una turbina eólica	34
2.3	TEORÍA DE LAS PALAS.	35
2.3.1	perfil de la pala.....	36
2.3.2	Fuerzas aerodinámicas en las palas de los generadores eólicos	38
2.3.3	Relación entre el coeficiente de sustentación (C_a) y el de arrastre (C_w).....	40
2.3.4	Relación de velocidad periférica (TSR).....	45
2.3.5	Cálculo de revoluciones por minuto.	48
2.3.6	Ángulos en las palas.....	48
2.3.7	anchura de la pala.....	50
2.3.8	Solidez	51
2.3.9	Palas de chapas curvadas	52
2.3.10	Anclaje de las palas al buje.	54
2.3.11	Número de palas.	55
2.4	SISTEMA DE ORIENTACIÓN.....	56
2.4.1	Orientación por veleta.....	57
2.5	SISTEMAS DE REGULACIÓN.	59
2.5.1	Sistema de orientación y regulación por momento de cola (sopmc)	60
2.6	CARGAS PRESENTES EN LOS GENERADORES EÓLICOS.	62
2.6.1	Cargas en las palas	62

2.6.2	Cargas en la base de la torre	65
2.7	ESTUDIO DE LAS UNIONES EN EL AEROGENERADOR.....	66
2.7.1	Uniones empernadas.....	66
2.8	RODAMIENTO.....	68
2.8.1	Principio para la selección y aplicación de rodamientos.	69
2.9	GENERADORES ELÉCTRICOS	71
2.9.1	Generadores de corriente continua.	72
2.9.2	Generadores síncronos multipolares con imanes permanentes.....	72
CAPÍTULO III.....		74
3 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS.....		74
3.1	ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS	74
3.1.1	Parámetros de diseño.....	74
3.1.2	Parámetros de funcionalidad	74
3.2	ESTUDIO DE ALTERNATIVAS	75
3.2.1	Alternativa N° 1: Generador eólico horizontal con p alas aerodinámicas.....	75
3.2.2	Alternativa n°2: Generador eólico con palas de cha pa curvada.	76
3.2.3	Alternativa N°3: Generador eólico vertical savoni us.....	77
3.3	SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS	78
3.3.1	Criterios de selección de alternativa.....	78
3.3.2	Método de selección de alternativa.	78
3.3.3	Evaluación de factores de diseño	79
CAPÍTULO IV		83
4 DISEÑO DE GENERADOR EÓLICO.....		83
4.1	DISEÑO DE LOS ELEMENTOS MECÁNICOS	83
4.1.1	rotor.	83

4.2	DISEÑO DEL SISTEMA DE ORIENTACIÓN.....	94
4.3	DISEÑO DEL SISTEMA DE REGULACIÓN.....	95
4.4	UNION TORRE- BASTIDOR.....	96
4.4.1	Selección del sistema de rodamiento.....	97
CAPÍTULO V		100
5 PUEBAS Y RESULTADOS.....		100
5.1	EQUIPOS UTILIZADOS.....	103
5.1.1	Anemómetro.....	103
5.1.2	tacómetro.....	104
5.1.3	multímetro.....	105
5.2	GRÁFICAS DE FUNCIONAMIENTO	106
5.2.1	Datos teóricos	106
5.2.2	Datos reales.	109
CAPÍTULO VI		114
6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		114
6.1	CONCLUSIONES.....	114
6.2	RECOMENDACIONES	115
6.3	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.	116
7 ANEXOS.....		121
ANEXO 1.....		121
RECOPIACIÓN DE LOS PLANOS DE CONSTRUCCIÓN DEL PROYECTO.		121

INDICE DE FIGURAS

CAPITULO I

FIGURA 1. 1. DISTRIBUCIÓN DE VIENTOS A ESCALA GLOBAL.....	13
FIGURA 1. 2. GENERADOR ELÉCTRICO ACOPLADO DIRECTAMENTE AL EJE DE LA HÉLICE.	20
FIGURA 1. 3. AEROGENERADOR DARRIEUS.	21
FIGURA 1. 4. PANÉMONA CON TAMBORES METÁLICOS.....	22
FIGURA 1. 5. ROTOR SAVONIUS.....	23
FIGURA 1. 6. AEROGENERADOR DE UNA HÉLICE.	26
FIGURA 1. 7. AEROGENERADOR DE DOS HÉLICES.....	27
FIGURA 1. 8. AEROGENERADOR DE TRES HÉLICES.	28
FIGURA 1. 9. AEROGENERADOR MULTIPALA.....	28

CAPITULO II

FIGURA 2. 1. COMPORTAMIENTO DEL PERFIL AERODINÁMICO.	30
FIGURA 2. 2. RENDIMIENTO DE DIFERENTES AEROGENERADORES.....	35
FIGURA 2. 3. PALA DE CHAPA CURVADA 36	36
FIGURA 2. 4. CARACTERÍSTICAS C_{PW}, Λ_O DE UN ROTOR CON PALAS IDEALES DE DIFERENTE PERFIL.	37
FIGURA 2. 5. RENDIMIENTOS DE DIFERENTES PERFILES 37	37
FIGURA 2. 6. FUERZAS DE ARRASTRE Y SUSTENTACIÓN 39	39
FIGURA 2. 7. LA POLAR DEL PERFIL NACA 4412..... 41	41
FIGURA 2. 8. LA POLAR DEL PERFIL NACA 4412, CON LOS COEFICIENTES DE SUSTENTACIÓN Y RESISTENCIA Y LA FINEZA EN FUNCIÓN DEL ÁNGULO DE ATAQUE, EL FACTOR \square ES LA LLAMADA FINEZA DEL PERFIL ($\square = CA/CW$)..... 42	42
FIGURA 2. 9. POLAR DE UNA CHAPA PLANA 43	43
FIGURA 2. 10. POLAR DE UNA CHAPA CURVADA 5%..... 44	44
FIGURA 2. 11. POLAR DE UNA CHAPA CURVADA 10%..... 45	45
FIGURA 2. 12. VELOCIDAD EN LAS PUNTAS DE LAS PALAS. 46	46
FIGURA 2. 13. ÁNGULOS EN EL SEGMENTO DE UNA PALA..... 48	48
FIGURA 2. 14. ÁNGULO DE CALADO DE DIFERENTES SEGMENTOS DE UNA PALA 50	50

FIGURA 2. 15. RELACIÓN ENTRE EL COEFICIENTE DE SOLIDEZ (Ω) Y EL TSR (CELERIDAD).	51
FIGURA 2. 16. PALAS RECTAS DE CHAPA CURVADA	52
FIGURA 2. 17. VALORES DE β^* Y ϑ^* PARA DETERMINAR	53
FIGURA 2. 18. SISTEMA DE ORIENTACIÓN POR ROTORES AUXILIARES	57
FIGURA 2. 19. AEROGENERADOR ORIENTADO POR VELETA	58
FIGURA 2. 20. VISTA POSTERIOR DE LOS CONJUNTOS DEL AEROGENERADOR CEETA-01.	61
FIGURA 2. 21. VISTA LATERAL EN CORTE DEL AEROGENERADOR CEETA-01	61
FIGURA 2. 22. ESQUEMA DE FUERZAS SOBRE LA COLA DEL AEROGENERADOR CEETA-01.	62
FIGURA 2. 23. ESFUERZO EN LA PALA DE UN AEROGENERADOR	63
FIGURA 2. 24. FLEXIÓN EN LA TORRE	65
FIGURA 2. 25. PERNOS SOMETIDOS A TRACCIÓN	67
FIGURA 2. 26. PERNOS SOMETIDOS A CORTE	68

CAPITULO III

FIGURA 3. 1. PALA DE PERFIL AERODINÁMICO	76
FIGURA 3. 2. PALAS DE CHAPA CURVADA	76
FIGURA 3. 3. CARACTERÍSTICAS PERFIL NACA (A) Y CHAPA CURVADA 5%(B)	77
FIGURA 3. 4. AEROGENERADOR SAVONIUS.	78

CAPITULO IV

FIGURA 4. 1. DISTRIBUCIÓN DE LAS PALAS	84
FIGURA 4. 2. SELECCIÓN DE CP Y TSR	85
FIGURA 4. 3. LONGITUD ÚTIL DE LA PALA	87
FIGURA 4. 4. BUJE – EJE GENERADOR	90
FIGURA 4. 5. UNIÓN PALAS-BUJE	91
FIGURA 4. 6. BASTIDOR	94
FIGURA 4. 7. UNIÓN BASTIDOR SISTEMA DE ORIENTACIÓN	94
FIGURA 4. 8. SISTEMA DE REGULACIÓN POR MOMENTO EN LA VELETA	96
FIGURA 4. 9. ÁNGULO DE POSICIONAMIENTO DE LA COLA.	96

FIGURA 4. 10. ACOPLAMIENTO TORRE-BASTIDOR.....	97
FIGURA 4. 11. RODAMIENTO AXIAL DE BOLAS	98

CAPITULO V

FIGURA 5. 1. PRUEBAS DEL AEROGENERADOR.....	100
FIGURA 5. 2. VELOCIDAD DEL VIENTO EN EL LUGAR DONDE SE VA A INSTALAR.	101
FIGURA 5. 3. LUGAR DONDE SE INSTALO EL AEROGENERADOR.	102
FIGURA 5. 4. PRUEBAS DEL AEROGENERADOR EN SITIO	102
FIGURA 5. 5. ANEMÓMETRO DIGITAL.	103
FIGURA 5. 6. TACÓMETRO FOTO DIGITAL.....	104
FIGURA 5. 7. MULTÍMETRO.....	105
FIGURA 5. 8. VELOCIDAD DEL VIENTO VS POTENCIA.	108
FIGURA 5. 9 . VELOCIDAD DEL VIENTO VS RPM (GRÁFICA TEÓRICA).....	109
FIGURA 5. 10. LUGAR DE PRUEBAS.	110
FIGURA 5. 11. VELOCIDAD VS POTENCIA.....	112
FIGURA 5. 12. CURVAS DE COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA AEROGENERADOR CON RELACIÓN A LA VELOCIDAD DE GIRO DEL ROTOR Y A LA VELOCIDAD DEL VIENTO.	112

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO II

TABLA 2. 1. TSR PARA DIFERENTES PERFILES.....	47
---	----

CAPÍTULO III

TABLA 3. 1. EVALUACIÓN DE FACTORES DE DISEÑO.....	79
TABLA 3. 2. ANÁLISIS DEL FACTOR FACILIDAD DE CONSTRUCCIÓN.....	79
TABLA 3. 3. ANÁLISIS DEL FACTOR OPERACIÓN.....	80
TABLA 3. 4. ANÁLISIS DEL FACTOR COSTOS DE FABRICACIÓN.....	80
TABLA 3. 5. ANÁLISIS DEL FACTOR MANTENIMIENTO.....	81
TABLA 3. 6. ANÁLISIS DEL FACTOR RENDIMIENTO.....	81
TABLA 3. 7. SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA A DISEÑAR.....	81

CAPITULO IV

TABLA 4. 2. PROPIEDADES ACERO INOXIDABLE.....	92
TABLA 4. 3. CARACTERÍSTICAS DE ALGUNOS RODAMIENTOS.....	98

CAPITULO V

TABLA 5. 1. ESPECIFICACIONES ANEMÓMETRO.....	104
TABLA 5. 2. ESPECIFICACIONES TACÓMETRO.....	105
TABLA 5. 3. DATOS TEÓRICOS.....	107
TABLA 5. 4. DATOS REALES.....	111

RESUMEN

La presente investigación surge con el propósito de aprovechar el recurso eólico existente en diferentes zonas del Ecuador. La utilización de esta energía es poco habitual, considerando que la forma de generación existente en la actualidad es la de “generación hidroeléctrica”.

El presente trabajo abarca: 1) el estudio; 2) diseño y 3) la implementación de un “prototipo de aerogenerador de eje horizontal de baja potencia para abastecer de energía eléctrica a zonas con pequeños consumos, aisladas de la red interconectada de energía eléctrica”. El diseño se hace en base a costos de construcción los cuales no deben exceder los 800 dólares, incluido la mano de obra, sin disminuir la eficiencia en la generación de energía.

Una vez construido “el Aerogenerador” se realizan las pruebas de campo, en la parroquia de “San Pablo del Lago”, cantón Otavalo, provincia de Imbabura. El sitio presenta las características necesarias para las que está diseñado “el Aerogenerador”.

Como resultados de las pruebas de campo se tiene: 1) la verificación de las condiciones de diseño y 2) su operación de acuerdo al recurso eólico. Si bien el sistema fue dimensionado para alcanzar una potencia nominal de 200 W a una velocidad de viento de 6 m/s, en campo se ha obtenido dicha potencia a una velocidad de viento de 7 m/s.

En virtud de esto el presente trabajo tiene la siguiente estructura: **Capítulo I**, se expone la importancia creciente de la energía eólica y de su aprovechamiento a partir de la utilización de aerogeneradores. **Capítulo II** se presentan las consideraciones básicas para el diseño y construcción de un aerogenerador de baja potencia. **Capítulo III** se realiza la selección del aerogenerador. En los últimos capítulos se plantea el diseño general del aerogenerador y de su sistema de control; las mediciones de campo propuestas y los tipos de resultados esperados y finalmente se enuncian algunas conclusiones y expectativas del proyecto.

PRESENTACIÓN

Debido a la necesidad que se tiene en la actualidad de reducir el nivel de emisiones de gases contaminantes como el dióxido de nitrógeno y el dióxido de carbono que son los causantes del calentamiento global, y para ponernos acorde con investigaciones similares que se realizan en otras partes del mundo, el presente proyecto está enfocado a generar energía mediante un generador de baja potencia, a través de una fuente renovable de energía como es el viento, con la que se cuenta en todas las posiciones geográficas de nuestro país.

El aprovechamiento de la energía eólica se ha incrementado significativamente, especialmente en aplicaciones de mediana y gran escala, debido principalmente al desarrollo de un competitivo mercado internacional de tecnologías, así como al apoyo de acertadas políticas de promoción especialmente en Europa. Sin embargo, el desarrollo de tecnologías para la aerogeneración a pequeña escala no ha tenido el mismo avance, especialmente en países en vías de desarrollo en donde las energías renovables no constan en los planes energéticos.

En estos países, el grado de cobertura eléctrica en las zonas rurales aisladas es extremadamente baja, ello debido a la existencia de una economía de subsistencia, alta dispersión poblacional y complejidad geográfica, las mismas que impiden la extensión de la red del sistema eléctrico interconectado nacional: Es así que en estas zonas es importante el aprovechamiento estratégico de las energías renovables, según las condiciones y disponibilidades de cada región, utilizando tecnología nacional y bajos costos de inversión.

Las poblaciones rurales más desfavorecidas con potencial eólico aprovechable se encuentran en mayor número en los andes, en donde se desarrollan vientos locales de montaña que se caracterizan por un ciclo diurno que cambia de dirección dos veces por día, producidos por la diferencia horizontal de temperatura del aire.

Por lo tanto este trabajo permite, con el aprovechamiento de la energía renovable, mejorar la forma de vida de las personas apegándose al principio constitucional del BUEN VIVIR (SUMAK KAWSAY).

CAPÍTULO I

1 GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

Los combustibles fósiles han sido la fuente de energía empleada durante la revolución industrial, pero en la actualidad presentan fundamentalmente dos problemas: por un lado son recursos finitos, y se prevé el agotamiento de las reservas especialmente de petróleo en plazos más o menos cercanos, en función de los distintos estudios realizados. Por otra parte, la quema de estos combustibles libera a la atmósfera grandes cantidades de CO₂, que ha sido acusado de ser la causa principal del calentamiento global. Por estos motivos, se estudian distintas opciones para sustituir la quema de combustibles fósiles por otras fuentes de energía carentes de estos problemas.

Debido a este problema mundial surge la necesidad de buscar nuevas formas de generar energía y uno de los más importantes en la actualidad es la creada por el viento, energía eólica que replacen o alternen con las tradicionales provenientes del petróleo y por ende reduzcan la contaminación.

1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El efecto invernadero global debido al uso indiscriminado del petróleo ha incrementado el calentamiento del planeta debido a la pérdida de la capa de ozono, lo cual provoca que la energía que llega a la Tierra sea devuelta más lentamente, por lo que es mantenida más tiempo junto a la superficie y de ahí que se mantenga elevada la temperatura en la superficie. Este calentamiento ha

llevado a que los países más industrializados firmen un tratado para la reducción en la emanación de gases tóxicos denominado “Tratado de Kyoto” el cual fue firmado en 1992 bajo el compromiso mundial de reducir las emanaciones de gases que destruyan la capa de ozono. Países de Europa principalmente ante una falta de energía generada por el petróleo se vio en la necesidad de desarrollar sistemas de producción de energía alternativa, de donde aprovechando el recurso eólico por su posición geográfica, está mejorando su capacidad de producción al punto que en la actualidad se encuentran máquinas eólicas de 3 MW, esta tecnología ha permitido cubrir la demanda siendo este campo el número uno en crecimiento energético a nivel mundial. Ecuador por su parte debido a su posición geográfica dispone de varios sitios puntuales en donde se puede desarrollar este tipo de proyectos de generación de energía eléctrica con energía eólica, sin embargo la falta de decisión política ha hecho que no se empiece a desarrollar el know how en este tipo de energías limpias que aportan notablemente a la conservación del medio ambiente.

De ahí que la empresa privada está empezando a realizar estudios en cuanto a la factibilidad de proyectos y ya se puede encontrar algunos parques eólicos en territorio Nacional.

1.3 ANTECEDENTES DEL PROYECTO

Proyectos de baja potencia en el país no existen, pero gracias a las políticas de estado se están creando parque eólicos grandes.

En la isla San Cristóbal, provincia de Galápagos, se inauguró el primer parque de energía eólica del país.

Este nuevo complejo energético generará 2.5 megavatios de energía, con lo que se reducirá casi en un 50 por ciento el consumo de combustibles en el archipiélago. El sistema como tal provee entre 60 y 80 por ciento de las necesidades energéticas de San Cristóbal, la segunda isla más poblada de Galápagos

Este complejo de energía limpia cuenta con tres aerogeneradores de 80 metros de alto, y están ubicados en una parte elevada de la isla San Cristóbal, y fue presentado a las autoridades de las islas junto a representantes de la comunidad internacional, que resaltaron el beneficio ecológico que representa para las Islas Galápagos.¹

1.4 ENERGÍAS RENOVABLES

Las energías renovables es aquella energía que provienen de una fuente natural e inagotable, son recursos limpios, son amigables con el medio ambiente, y son alternativas diferentes a las tradicionales que implican la quema de combustibles fósiles, poniéndose a nuestra disposición de forma periódica, unas por la inmensa cantidad de energía que contienen, y otras porque son capaces de regenerarse por medios naturales.

El sol es el que origina todas las energías renovables por ejemplo en la energía eólica, el calor que genera el sol provoca en la Tierra diferencias de presión que dan origen a los vientos, fuente de la energía eólica.

El sol ordena el ciclo del agua, causa la evaporación que provoca la formación de nubes y, por tanto, las lluvias. También del sol procede la energía hidráulica.

¹ El Universo, (2008). *Se inauguró primer parque de energía eólica en Ecuador*. Recuperado 2012 de <http://www.eluniverso.com/2008/03/19/0001/12/07864C4FA3224FC5A1507124EB1485D7.html>.

Las plantas se sirven del sol para realizar la fotosíntesis, vivir y crecer. Toda esa materia vegetal es la biomasa.

Por último, el sol se aprovecha directamente en las energías solares, tanto la térmica como la fotovoltaica.

Las energías renovables no generan residuos de difícil tratamiento. La energía nuclear y los combustibles fósiles generan residuos que suponen durante generaciones una amenaza para el medio ambiente. Los impactos ambientales de las renovables son siempre impactos reversibles.

Existe una gran variedad de energías renovables, de las que se pueden obtener diferentes tipos de energía: energía eléctrica, energía térmica y biocarburantes.

En la actualidad se siguen buscando soluciones para resolver esta crisis inminente. Las energías renovables en las que se trabaja actualmente son:

- Energía solar
- Energía eólica
- Energía geotérmica
- Energía hidráulica
- Energía oceánica o mareomotriz
- Biomasa:
- Energía undimotriz

1.4.1 ENERGÍA SOLAR²

Recolectada de forma directa a alta temperatura en centrales solares, o a baja temperatura mediante paneles térmicos domésticos. La energía solar es una fuente de vida y origen de la mayoría de las demás formas de energía en la Tierra. Cada año la radiación solar aporta a la Tierra la energía equivalente a varios miles de veces la cantidad de energía que consume la humanidad.

Hay dos diferentes tipos de energía solar:

- Energía Solar fotovoltaica: captado por células solares que, por el efecto fotovoltaico, genera corriente eléctrica, la cual es almacenada en baterías o se inyecta en la red de distribución eléctrica.
- Energía Solar termoeléctrica: utiliza la radiación solar en forma directa para calentar un fluido que genera vapor para accionar una turbina generadora de electricidad.

1.4.2 ENERGÍA EÓLICA

Es la energía cinética o de movimiento contenida en las masas de aire en la atmósfera, y que se capta por medio de aerogeneradores o molinos de viento. Para poder aprovechar la energía eólica es importante conocer las variaciones de los vientos, etc. Para poder utilizar la energía del viento, es necesario que este alcance una velocidad mínima de 12 km/h, y que no supere los 65 km/h.

² Franco, E. *Conocimiento de las fuentes de energía renovable así como su potencial uso para disminuir la dependencia del petróleo extranjero. Recuperado el 2012 de <http://www.monografias.com/trabajos73/fuentes-energia-renovable/fuentes-energia-renovable2.shtml#ixzz2XL64ZKZz>*

1.4.3 ENERGÍA GEOTÉRMICA

Energía almacenada en forma de calor bajo la superficie terrestre, que se obtiene a través de yacimientos de alta temperatura (superiores a los 100-150°C).

La Tierra es una enorme olla de presión que guarda en su interior energía térmica que puede ser aprovechada para la producción de electricidad y calor. En todo el mundo existen fuentes de agua caliente que provienen de la Tierra y se las aprovecha para construir piscinas de aguas termales. Son conocidos los sitios de emisión de vapor o géiseres. La geotermia justamente estudia las formas de utilización comercial de la energía de la Tierra y es una tecnología muy desarrollada. En el mundo se producen en la actualidad más de 8.000 MW de electricidad con la geotermia.

Zonas volcánicas como la de Los Andes son idóneas para la instalación de centrales de este tipo. Estudios efectuados en los años 1980s por el Instituto Ecuatoriano de Electrificación identificaron 12 sitios potenciales en la zona interandina para la instalación de plantas geotérmicas con una capacidad energética equivalente a 634 millones de GWh, suficiente para proporcionar toda la electricidad del Ecuador por 37 años.

Una planta geotérmica es básicamente una planta de vapor convencional donde el vapor se obtiene directamente de la Tierra y no del calentamiento del agua con combustibles fósiles.

Se perfora la superficie de la Tierra hasta encontrar una fuente de agua caliente o vapor y el fluido se dirige a una turbina. El agua o vapor condensado utilizado se vuelve a inyectar a la Tierra.

1.4.4 ENERGÍA HIDRAÚLICA

La energía potencial del agua ha sido aprovechada por los seres humanos desde los inicios de la civilización y, actualmente, la hidroelectricidad constituye el mayor componente del aporte de energía renovable en el mundo para la producción de electricidad. Se conoce también como una energía renovable convencional.

Consiste en la captación de la energía potencial del agua, y que se realiza en centrales hidroeléctricas. Se puede transformar a muy diferentes escalas, existiendo desde hace siglos pequeñas explotaciones en las que la corriente de un río mueve un rotor de palas y genera un movimiento aplicado, por ejemplo, en molinos rurales.

1.4.4.1 Aprovechamiento De La Energía Hidráulica³

La energía hidráulica es puesta a disposición por la naturaleza gracias al Ciclo hidrológico, el cual es monitorizado por la energía solar, comenzando por la evaporación de diversas masas de agua y culminando con la precipitación. Los cauces de agua presentan dos formas fácilmente aprovechables de energía:

- La energía potencial gravitatoria, la cual se obtiene en virtud de un salto geodésico y puede superar los 3.000 J/Kg para más de 300 m de desnivel.
- La energía cinética, la cual es despreciable en comparación con la potencial, ya que en los ríos en general el fluido no supera velocidades de 5 m/s.

1.4.5 ENERGÍA MAREOMOTRIZ

Se obtiene de las mareas y también a través de la energía de las olas. La energía mareomotriz se debe a las fuerzas gravitatorias entre la Luna, la Tierra y el Sol,

³ Mataix, C.(1975). *Turbomáquinas Hidráulicas*, ICAI.

que originan las mareas. Mediante su acoplamiento a un alternador se puede utilizar el sistema para la generación de electricidad, transformando así la energía mareomotriz en energía eléctrica.

1.4.6 BIOMASA

Se obtiene por descomposición de residuos orgánicos o bien por su quema directa como combustible. Mediante la fotosíntesis las plantas que contienen clorofila, transforman el dióxido de carbono y el agua de productos minerales sin valor energético, en materiales orgánicos con alto contenido energético y a su vez sirven de alimento a otros seres vivos. También puede usarse la biomasa para obtener biogás, el cual se hace en depósitos en los que se van acumulando residuos de cosechas, restos orgánicos y otros materiales que pueden descomponerse.

1.4.7 ENERGÍA UNDIMOTRIZ

La Energía undimotriz es la energía producida por el movimiento de las olas. Es menos conocida y extendida que la maremotriz. Su funcionamiento se basa en el aprovechamiento de la energía de la oscilación vertical de las olas a través de unas boyas eléctricas que se elevan y descienden sobre una estructura similar a un pistón, en la que se instala una bomba hidráulica. El agua entra y sale de la bomba con el movimiento e impulsa un generador que produce la electricidad.

1.5 TRATADO DE KIOTO⁴

El Protocolo de Kioto, sucesor de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, es uno de los instrumentos jurídicos internacionales

⁴ Prado, A. (2012). *Ecología Y Ambiente, Protocolo de Kioto*. Recuperado el 2012 de <http://ecologia-azucena.blogspot.com/>

más importantes destinado a luchar contra el cambio climático. Contiene los compromisos asumidos por los países industrializados de reducir sus emisiones de algunos gases de efecto invernadero, responsables del calentamiento global.

El Protocolo de Kioto se aplica a las emisiones de seis gases de efecto invernadero:

- dióxido de carbono (CO₂);
- metano (CH₄);
- óxido nitroso (N₂O);
- hidrofluorocarbonos (HFC);
- perfluorocarbonos (PFC);
- hexafluoruro de azufre (SF₆).

El Protocolo representa un importante paso hacia adelante en la lucha contra el calentamiento del planeta, ya que contiene objetivos obligatorios y cuantificados de limitación y reducción de gases de efecto invernadero.

Bajo los términos del Protocolo de Kioto, los países se agrupan en dos anexos. El anexo I incluye a la mayoría de los países industrializados, mientras que el anexo II incluye a los países en vías de desarrollo. De esta forma, para el periodo de 2008 a 2012 los países del Anexo I se comprometerán a reducir sus emisiones totales de gases de invernadero en al menos 5% respecto a los niveles de 1990. Las metas cuantificadas de emisión son establecidas para cada país de manera diferenciada.

Los Estados que eran miembros de la UE para el 2004 debían haber reducido conjuntamente sus emisiones de gases de efecto invernadero en un 8% entre los

años 2008 y 2012. Los Estados miembros que se hayan incorporado a la UE después de esa fecha se comprometen a reducir sus emisiones en un 8%, a excepción de Polonia y Hungría (6%), así como de Malta y Chipre, que no se encuentran incluidos en el Anexo I de la Convención Marco.

Para alcanzar estas metas de reducción, los países del Anexo I pueden implementar medidas internas de reducción de emisiones o los llamados “mecanismos flexibles” (llamados también “mecanismos de Kioto” o “mecanismos de mercado”), diseñados para ayudar a los países a alcanzar sus metas de reducción de la manera más costo eficiente, a través del mercado. Descritos en forma sucinta, estos mecanismos consisten en lo siguiente:

- Comercio internacional de emisiones. Este mecanismo permite que a partir del 2008 los países del Anexo I transfieran algunas de sus emisiones permitidas hacia otros países del mismo anexo con base en el costo de un crédito de emisión. Por ejemplo, un país del Anexo I que en el año 2010 haya reducido sus emisiones de gases de invernadero en 10 millones de toneladas de CO₂ mas allá de su meta establecida puede vender este “excedente” a otros países del Anexo I que no hayan podido cubrir su cuota de reducción.
- Implementación conjunta. Permite a los países del Anexo I invertir, a través de sus gobiernos u otras instituciones legales, en proyectos de reducción o secuestro de emisiones en otros países del Anexo I. de esta forma, las reducciones “externas” de emisiones representan una ganancia en créditos que se pueden aplicar para alcanzar sus metas internas de reducción de emisiones.

- Mecanismos de desarrollo limpio. Este mecanismo es similar al de la implementación conjunta, con la diferencia de que los países destinatarios de la inversión no pertenecen al Anexo I, lo que abre la posibilidad de que este tipo de proyectos beneficie a economías en desarrollo. Al estar las energías renovables fuertemente vinculadas con el uso de fuentes limpias, este mecanismo representa una gran oportunidad para impulsar su desarrollo en Ecuador.

Los Estados Partes en el Acuerdo establecerán un sistema nacional de estimación de las emisiones de origen humano y de absorción por sumideros de todos los gases de efecto invernadero (no regulados por el Protocolo de Montreal), a más tardar, un año antes del primer período de compromiso.

Para el segundo período de compromisos, se prevé un examen de los mismos, a más tardar, en el año 2005.

El 31 de mayo de 2002, la Unión Europea ratificó el protocolo de Kioto, que entró en vigor el 16 de febrero de 2005, tras la ratificación de Rusia. Sin embargo, varios países industrializados se negaron a ratificar el protocolo, entre ellos, Estados Unidos y Australia

1.6 ENERGIA EÓLICA

1.6.1 DESCRIPCIÓN

La energía Eólica es aquella que podemos obtener de la energía producida por la fuerza del viento. El viento es uno de los recursos renovables más atractivos, a pesar de su naturaleza intermitente y variable. La utilización del viento como una fuente de energía ha sido tema de interés en todo el mundo en la última década.

La energía eólica es un recurso muy variable, tanto en el tiempo como en el lugar, pudiendo cambiar mucho en distancias muy reducidas. En general, las zonas costeras y las cumbres de las montañas son las más favorables y mejor dotadas para el aprovechamiento del viento con fines energéticos.

En el pasado el viento ha sido una importante fuente de energía, que se ha aprovechado en los molinos de viento, y en el bombeo de agua. El mayor interés que existe actualmente es la producción de electricidad a partir del viento con el fin de sustituir los costosos combustibles fósiles.

Uno de los sistemas para el aprovechamiento de la energía eólica más comunes son los generadores eólicos que acoplados a un generador producen energía eléctrica.

1.6.2 ORIGEN DE LA ENERGÍA EÓLICA

La energía eólica está asociada a la energía cinética del viento. La circulación del viento se genera por el calentamiento desigual que sufre la tierra, las diferencias de insolación entre distintos puntos del planeta generan diferentes áreas térmicas y los desequilibrios de la temperatura se traducen en variaciones de presión. El aire como cualquier gas, se mueve desde las zonas de alta presión a la de baja presión.

Generalmente el aire caliente sube, para después circular por la parte superior de la atmósfera y caer en las zonas más frías. A nivel del suelo la circulación es en sentido inverso.

El efecto combinado del desigual calentamiento y de la fuerza centrífuga y la de Coriolis debida a la rotación, da lugar a vientos, con una tendencia más o

menos permanente. En la figura 1.1 se puede observar los vientos alisos, polares y vientos del oeste como ejemplo significativo de vientos con estas características.

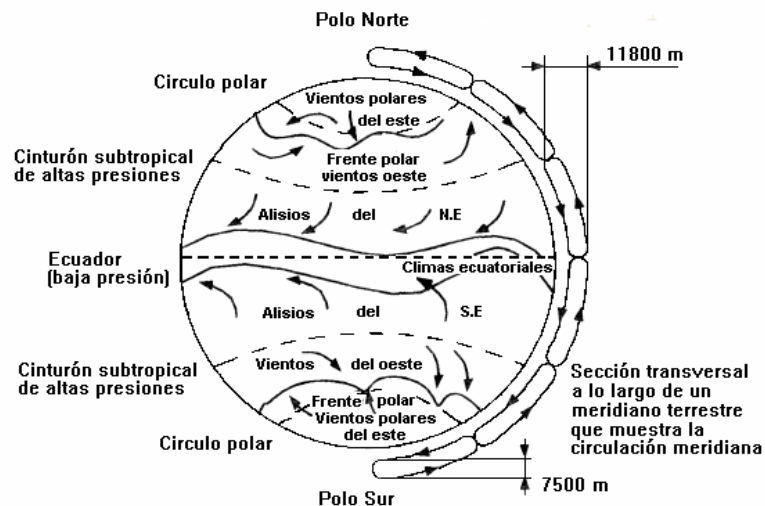


Figura 1. 1. Distribución de vientos a escala global.⁵

1.6.3 VENTAJAS DE LA ENERGÍA EÓLICA

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

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

⁵ UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENRGÉTICA, *Guía para la Utilización de la Energía Eólica para Bombeo del Agua*, Bogotá Febrero 2003, Documento ANC-0603-18-01.

El generar energía eléctrica sin que exista un proceso de combustión o una etapa de transformación térmica supone, desde el punto de vista medioambiental, un procedimiento muy favorable por ser limpio, exento de problemas de contaminación, etc. Se suprimen radicalmente los impactos originados por los combustibles durante su extracción, transformación, transporte y combustión, lo que beneficia la atmósfera, el suelo, el agua, la fauna, la vegetación, etc.

Evita la contaminación que conlleva el transporte de los combustibles; gas, petróleo, gasoil, carbón. Reduce el intenso tráfico marítimo y terrestre cerca de las centrales. Suprime los riesgos de accidentes durante estos transportes: desastres con petroleros (traslados de residuos nucleares, etc.). No hace necesaria la instalación de líneas de abastecimiento: Canalizaciones a las refinerías o las centrales de gas.

La utilización de la energía eólica para la generación de electricidad presenta nula incidencia sobre las características fisicoquímicas del suelo o su erosionabilidad, ya que no se produce ningún contaminante que incida sobre este medio, ni tampoco vertidos o grandes movimientos de tierras.

Al contrario de lo que puede ocurrir con las energías convencionales, la energía eólica no produce ningún tipo de alteración sobre los acuíferos ni por consumo, ni por contaminación por residuos o vertidos. La generación de electricidad a partir del viento no produce gases tóxicos, ni contribuye al efecto invernadero, ni destruye la capa de ozono, tampoco crea lluvia ácida. No origina productos secundarios peligrosos ni residuos contaminantes.

La energía eólica es independiente de cualquier política o relación comercial, se obtiene en forma mecánica y por tanto es directamente utilizable.

Al finalizar la vida útil de la instalación, el desmantelamiento no deja huellas.

1.6.4 DESVENTAJAS DE LA ENERGÍA EÓLICA

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

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

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

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

1.7 GENERADORES EÓLICOS

1.7.1 DESCRIPCIÓN

Los generadores eólicos son máquinas operadoras que convierten la energía cinética del viento en energía mecánica disponible en el eje de la aeroturbina y esta a su vez en energía eléctrica.

Para que un generador eólico se ponga en marcha necesita de un valor mínimo del viento para vencer los rozamientos y comenzar a producir trabajo útil, a este valor mínimo se le denomina velocidad de conexión, sin la cual no es posible arrancar un aerogenerador (esta velocidad está comprendida entre 3-5 m/s). A partir de este punto empezará a rotar convirtiendo la energía cinética en mecánica, siendo de esta forma hasta que alcance la potencia nominal, generalmente la máxima que puede entregar.

La electricidad puede almacenarse en baterías o ser vertida directamente a la red.

1.7.2 COMPONENTES BÁSICOS DE UN AEROGENERADOR⁶

1.7.2.1 La góndola

Contiene los componentes clave del aerogenerador, incluyendo el multiplicador y el generador eléctrico. El personal de servicio puede entrar en la góndola desde la torre de la turbina. A la izquierda de la góndola tenemos el rotor del aerogenerador, es decir las palas y el buje.

⁶ Domínguez, A. B..(2007), *Generadores Eólicos de baja potencia*, Buenos Aires, Tomo III.

1.7.2.2 Las palas del rotor

Capturan el viento y transmiten su potencia hacia el buje. En un aerogenerador moderno de 600 Kw cada pala mide alrededor de 20 metros de longitud y su diseño es muy parecido al del ala de un avión.

1.7.2.3 El buje

El buje del rotor está acoplado al eje de baja velocidad del aerogenerador.

1.7.2.4 El eje de baja velocidad

Conecta el buje del rotor al multiplicador. En un aerogenerador moderno de 600 Kw El rotor gira muy lento, a unas 19 a 30 revoluciones por minuto (r.p.m.) El eje contiene conductos del sistema hidráulico para permitir el funcionamiento de los frenos aerodinámicos.

1.7.2.5 El multiplicador

Tiene a su izquierda el eje de baja velocidad. Permite que el eje de alta velocidad que está a su derecha gire 50 veces más rápido que el eje de baja velocidad.

1.7.2.6 El eje de alta velocidad

Gira aproximadamente a 1.500 r.p.m. lo que permite el funcionamiento del generador eléctrico. Está equipado con un freno de disco mecánico de emergencia. El freno mecánico se utiliza en caso de fallo del freno aerodinámico, o durante las labores de mantenimiento de la turbina.

1.7.2.7 El generador eléctrico

Suele ser un generador asíncrono o de inducción. En los aerogeneradores modernos la potencia máxima suele estar entre 500 y 1.500 Kw

1.7.2.8 El controlador electrónico

Es un ordenador que continuamente monitoriza las condiciones del aerogenerador y que controla el mecanismo de orientación. En caso de cualquier disfunción (por ejemplo, un sobrecalentamiento en el multiplicador o en el generador), automáticamente para el aerogenerador y llama al ordenador del operario encargado de la turbina a través de un enlace telefónico mediante modem.

1.7.2.9 La unidad de refrigeración

Contiene un ventilador eléctrico utilizado para enfriar el generador eléctrico. Además contiene una unidad refrigerante por aceite empleada para enfriar el aceite del multiplicador. Algunas turbinas tienen generadores refrigerados por agua.

1.7.2.10 La torre

Soporta la góndola y el rotor. Generalmente es una ventaja disponer de una torre alta, dado que la velocidad del viento aumenta conforme nos alejamos del nivel del suelo. Una turbina moderna de 600 Kw Tendrá una torre de 40 a 60 metros (la altura de un edificio de 13 a 20 plantas).

Las torres pueden ser bien torres tubulares (como la mostrada en el dibujo) o torres de celosía. Las torres tubulares son más seguras para el personal de

mantenimiento de las turbinas ya que pueden usar una escalera interior para acceder a la parte superior de la turbina. La principal ventaja de las torres de celosía es que son más baratas.

1.7.2.11 El mecanismo de orientación

Está activado por el controlador electrónico, que vigila la dirección del viento utilizando la veleta.

1.7.2.12 El anemómetro y la veleta

Las señales electrónicas de anemómetro son utilizadas por el controlador electrónico del aerogenerador para conectarlo cuando el viento alcanza aproximadamente 5 m/s. El ordenador parará el aerogenerador automáticamente si la velocidad del viento excede de 25 m/s, con el fin de proteger a la turbina y sus alrededores. Las señales de la veleta son utilizadas por el controlador electrónico para girar el aerogenerador en contra del viento, utilizando el mecanismo de orientación.

En la figura 1.2 se indica el diagrama de un aerogenerador, más comúnmente usado en los generadores eólicos de baja potencia, se omiten algunas partes antes mencionadas, para abaratar costos y por funcionalidad.

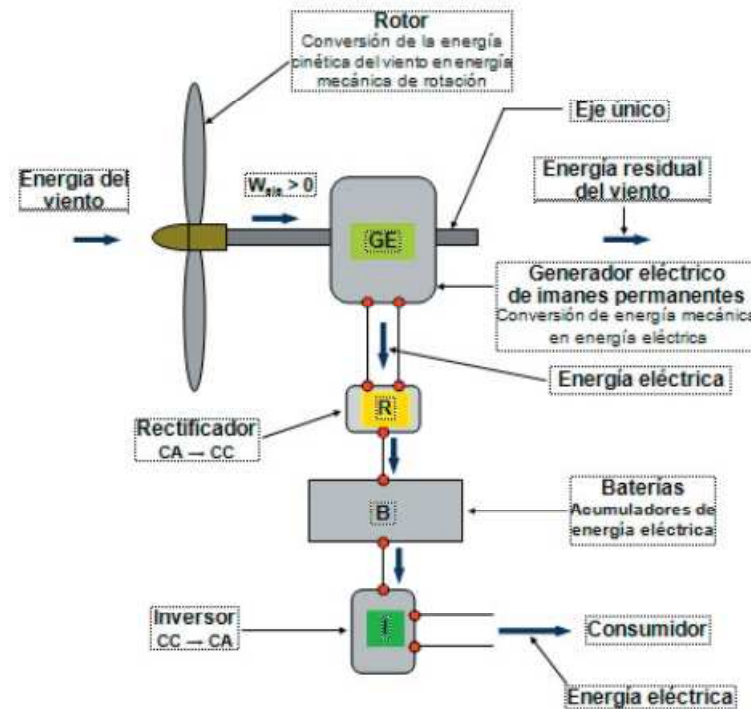


Figura 1. 2. Generador eléctrico acoplado directamente al eje de la hélice.⁷

1.7.3 TIPOS DE GENERADORES EÓLICOS.

Una clasificación general de los aerogeneradores se basa en la posición de su eje principal, existen dos tipos los aerogeneradores de eje vertical y los de eje horizontal.

1.8 GENERADORES EOLICOS DE EJE VERTICAL

Su característica principal es que el eje de rotación se encuentra en posición perpendicular al suelo. Son también llamados "VAWTs", que corresponde a las siglas de la denominación inglesa "vertical axis wind turbines". Existen tres tipos importantes de estos aerogeneradores:

⁷ Domínguez, A. B.(2007), *Generadores Eólicos de baja potencia*. Buenos Aires, Tomo III.

1.8.1 DARRIEUS⁸

Este tipo de aerogeneradores fue patentado por el académico francés G.J.M. Darrieus. Están formados por dos o tres palas de forma ovalada de perfil aerodinámico (Figura 1.3) y tienen características parecidas a las de eje horizontal, presentando un par de arranque muy pequeño. Los laboratorios Sandia construyó en 1974 un primer prototipo de 5 m de diámetro Su potencia es pequeña y aunque su aplicación es similar a los aerogeneradores rápidos de eje horizontal, están poco implantados.

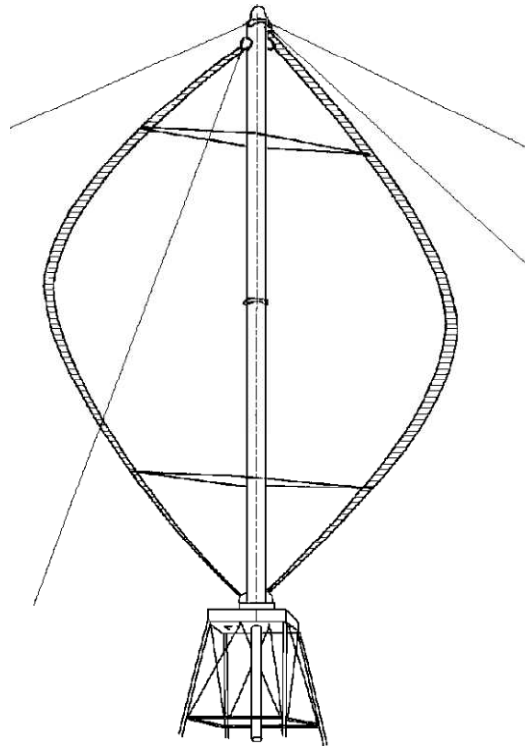


Figura 1. 3. Aerogenerador Darrieus.

⁸ Cuesta Santianes, M. J.(2008), *Aerogeneradores de potencia inferiores a 100 Kw.*

1.8.2 PANEMONAS.

Es un aerogenerador que puede tener cuatro o más semicírculos unidos al eje central (figura 1.4). Su rendimiento es bajo.

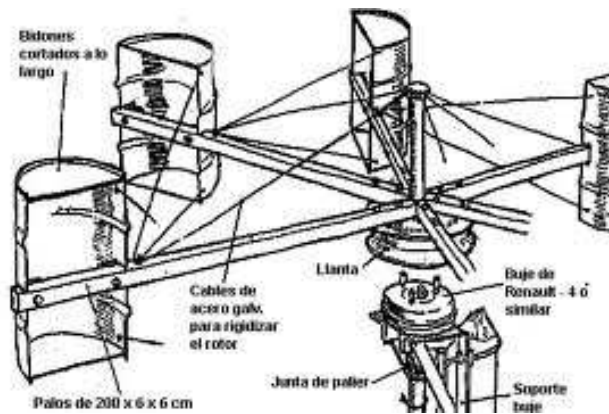


Figura 1. 4. Panémoma con Tambores Metálicos⁹

1.8.3 SAVONIUS

En 1924, el ingeniero Savonius diseñó un rotor cuya principal ventaja consiste en trabajar con velocidades de viento muy bajas. Se compone de dos semicilindros de igual diámetro situados paralelamente al eje vertical de giro (Figura 1.5), en el diseño original estaban separados una pequeña distancia el uno del otro. La fuerza que el viento ejerce en las caras de los cilindros (cara cóncava y cara convexa) es distinta, por lo que las hace girar alrededor del eje. Este sistema presenta buenas características aerodinámicas para el autoarranque y la autorregulación. Su campo de aplicación está en la producción autónoma de electricidad o el bombeo de agua.

⁹ http://panemona.com.ar/panemona-con-tambores-metalicos-turbinas-eolicas-p_119.htm.

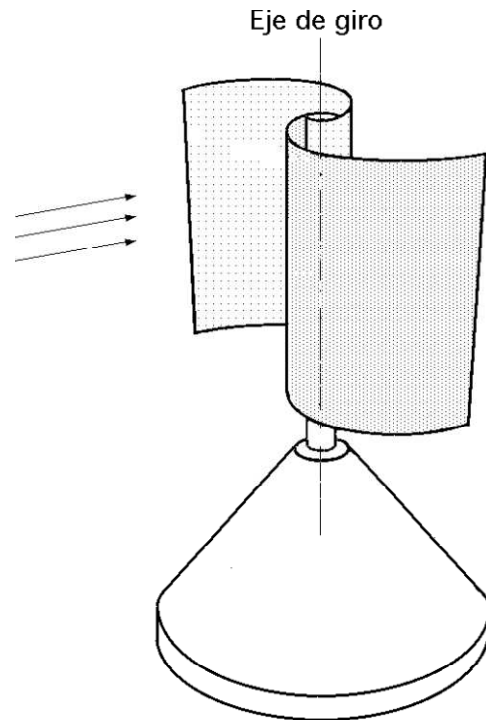


Figura 1. 5. Rotor Savonius.¹⁰

1.9 AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL

1.9.1 DESCRIPCIÓN

Los aerogeneradores de eje horizontal deben su nombre al hecho que poseen su eje principal situado paralelo al suelo, este tipo de aerogeneradores son los más usados y por ende los más estudiados, a estos también se les conoce como "HAWTs", que corresponde a las siglas de la denominación inglesa "horizontal axis wind turbines".

Este tipo de aerogeneradores necesitan un sistema de control de orientación al viento (normalmente un pequeño motor eléctrico para aerogeneradores de más de 50 Kw), para generadores de baja potencia como el presentado en este proyecto el sistema de orientación consiste en un sistema aerodinámico que

¹⁰ Cuesta Santianes, M. J.(2008), *Aerogeneradores de potencia inferiores a 100 Kw.*

actúa como veleta. Los elementos de conexión, multiplicador y generador) se encuentran alojados a la altura del rotor en la góndola situado en lo alto de la torre.

1.9.2 CLASIFICACIÓN.

En este tipo de aerogeneradores ya que son los más estudiados existen varias clasificaciones, y estas se las realiza tomando en cuenta diferentes aspectos, indicaremos las más importantes.

1.9.2.1 Por la posición del equipo con respecto al viento

1.9.2.1.1 A barlovento upwind

Las máquinas corriente arriba tienen el rotor de cara al viento. La principal ventaja de los diseños corriente arriba es que se evita el abrigo del viento tras la torre. Con mucho la mayoría de los aerogeneradores tienen este diseño.

Por otro lado, también hay algo de abrigo enfrente de la torre, es decir, el viento empieza a desviarse de la torre antes de alcanzarla, incluso si la torre es redonda y lisa. Así pues, cada vez que el rotor pasa por la torre, la potencia del aerogenerador cae ligeramente.

El principal inconveniente de los diseños corriente arriba es que el rotor necesita ser bastante inflexible, y estar situado a una cierta distancia de la torre. Además una máquina corriente arriba necesita un mecanismo de orientación para mantener el rotor de cara al viento.

Se debe indicar que los aerogeneradores de baja potencia la mayoría, son todos de barlovento, ya que su fabricación es más sencilla y barata y sus esfuerzos más compensados y homogéneos.

1.9.2.1.2 A sotavento downwind

Las máquinas corriente abajo tienen el rotor situado en la cara a sotavento de la torre.

La ventaja teórica que tienen es que pueden ser construidos sin un mecanismo de orientación, si el rotor y la góndola tienen un diseño apropiado que hace que la góndola siga al viento pasivamente.

Sin embargo, en grandes máquinas ésta es una ventaja algo dudosa, pues se necesitan cables para conducir la corriente fuera del generador. Si la máquina ha estado orientándose de forma pasiva en la misma dirección durante un largo periodo de tiempo y no dispone de un mecanismo de orientación, los cables pueden llegar a sufrir una torsión excesiva.

Un aspecto más importante es que el rotor puede hacerse más flexible. Esto supone una ventaja tanto en cuestión de peso como de dinámica de potencia de la máquina, es decir, las palas se curvarán a altas velocidades del viento, con lo que quitarán parte de la carga a la torre.

El inconveniente principal es la fluctuación de la potencia eólica, debida al paso del rotor a través del abrigo de la torre. Esto puede crear más cargas de fatiga en la turbina que con un diseño corriente arriba.

1.9.2.2 Por el numero de palas¹¹

1.9.2.2.1 Una pala

Al tener sólo una pala estos aerogeneradores precisan un contrapeso en el otro extremo para equilibrar. La velocidad de giro es muy elevada. Su gran inconveniente es que introducen en el eje unos esfuerzos muy variables, lo que acorta la vida de la instalación.

Una aplicación de este tipo de máquinas puede verse en la figura 1.6.



Figura 1. 6. Aerogenerador de una hélice.

1.9.2.2.2 Dos palas

Los diseños bipala de aerogeneradores 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

¹¹ <http://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0226-01/capitulo4b.html>

para producir la misma energía de salida. Esto supone una desventaja tanto en lo que respecta al ruido como al aspecto visual.

Una aplicación de este diseño se presenta en la figura 1.7.



Figura 1. 7. Aerogenerador de dos hélices.

1.9.2.2.3 Tres palas

La mayoría de los aerogeneradores modernos tienen este diseño, con el rotor mantenido en la posición corriente arriba, usando motores eléctricos en sus mecanismos de orientación. Este diseño tiende a imponerse como estándar al resto de los conceptos evaluados. La gran mayoría de las turbinas vendidas en los mercados mundiales poseen este diseño.

Un espectacular ejemplo de 72 m de diámetro del rotor y 80 m de altura hasta el eje puede verse en la figura 1.8.



Figura 1. 8. Aerogenerador de tres hélices.

1.9.2.2.4 *Multipalas*

Con un número superior de palas o multipalas. Se trata del llamado modelo americano, debido a que una de sus primeras aplicaciones fue la extracción de agua en pozos de las grandes llanuras de aquel continente.

Una aplicación de este diseño se presenta en la figura 1.9.

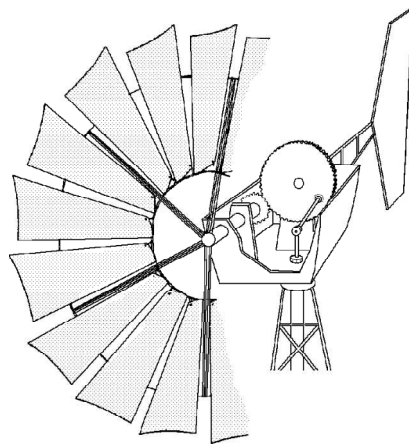


Figura 1. 9. Aerogenerador multipala.¹²

¹² Scribd. (2012.) *Mecanismos aprovechamiento eólico*. Recuperado noviembre del 2012 de <http://es.scribd.com/doc/82805686/Mecanismos-Aprovechamiento-Eolico-Maquinas>.

1.9.2.3 Por la manera de adecuar la orientación del equipo a la dirección del viento en cada momento

El mecanismo de orientación de un aerogenerador es utilizado para girar el rotor de la turbina en contra del viento. Se dice que la turbina tiene un error de orientación si el rotor no está perpendicular al viento.

Un error de orientación implica que una menor proporción de la energía del viento pasará a través del área del rotor (esta proporción disminuirá con el coseno del error de orientación) Por tanto, la eficiencia del mecanismo de orientación es fundamental para mantener el rendimiento de la instalación.

CAPÍTULO II

2 MARCO TEÓRICO

2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN AEROGENERADOR.

Como se estudia en el capítulo anterior, el generador eólico es una máquina que convierte la energía cinética del viento en energía mecánica la cual es aplicada de diferentes formas.

La captación de la energía eólica se produce mediante la acción del viento sobre las palas. El principio aerodinámico por el cual el conjunto de palas gira, es similar al que hace que los aviones vuelen. Según este principio, el aire es obligado a fluir por las caras superior e inferior de un perfil inclinado figura. 2.1, generando una diferencia de presiones entre ambas caras, y dando origen a una fuerza resultante que actúa sobre el perfil.

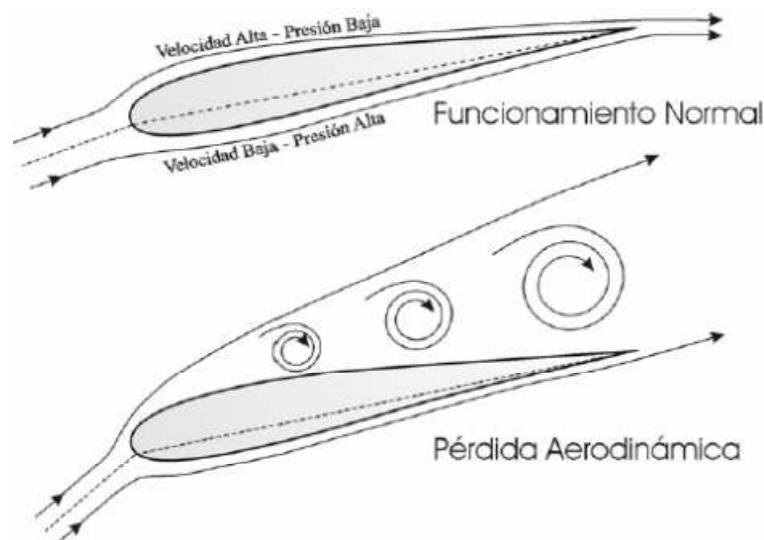


Figura 2. 1. Comportamiento del Perfil Aerodinámico.¹³

¹³ Ferrer Gallardo, F. (2011). *Análisis de la viabilidad de conexión de parques eólicos a la red eléctrica*. Recuperado el 2012 de <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/2682/1/36090-1.pdf>.

Esta fuerza se descompone en una fuerza de sustentación (perpendicular al viento) y una de arrastre (paralela al viento), el momento de estas fuerzas con respecto al eje geométrico del rotor es el que produce la rotación del rotor, este movimiento es transmitido al eje del generador eléctrico y de esta transforma la energía mecánica se transforma en energía eléctrica.

“Para que un aerogenerador se ponga en marcha necesita de un valor mínimo del viento para vencer los rozamientos y comenzar a producir trabajo útil, a este valor mínimo se le denomina velocidad de conexión, sin la cual no es posible arrancar un aerogenerador (esta velocidad está comprendida entre 3-5 m/s). A partir de este punto empezará a rotar convirtiendo la energía cinética en mecánica, siendo de esta forma hasta que alcance la potencia nominal, generalmente la máxima que puede entregar. Llegados aquí empiezan a actuar los mecanismos activos o pasivos de regulación para evitar que la máquina trabaje bajo condiciones para las que no fue concebida. Aunque continúe operando a velocidades mayores, la potencia que entrega no será diferente a la nominal, y esto se producirá hasta que alcance la velocidad de corte, donde, por razones de seguridad, se detiene (esta velocidad se considera de 25 m/s)”¹⁴.

2.2 POTENCIA GENERADA POR UNA TURBINA EÓLICA.

La capacidad que tiene una turbina eólica para generar energía depende de las características del viento. El viento como se conoce es una masa de aire en movimiento y como tal posee una energía, los generadores eólicos utilizan esta

¹⁴ Pineda, J. A. (2009). *Funcionamiento De Los Aerogeneradores*. Recuperado el 2012 de <http://fuentesrenovables.blogspot.com/2009/10/funcionamiento-de-los-aerogeneradores.html>

energía para producir directamente electricidad. Por lo tanto, antes de instalar un generador eólico es conveniente conocer el potencial del viento.

La potencia que genera el viento soplando con una cierta velocidad V_1 a través del área A perpendicular a V_1 es:

$$P_{viento} = \frac{1}{2} \rho V_1^3 A \quad (2.1)$$

Donde:

P_{viento} potencia generada por el viento (W).

ρ densidad del aire, 1.25 kg/m³.

V_1 velocidad del viento (m/s).

A área perpendicular a la incidencia del viento (m²).

Como se conoce que el área barrida creada por una máquina eólica (asas) de eje horizontal es circular, se tiene.

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (2.2)$$

Donde

D es el diámetro (m).

De la ecuación 2.1 y 2.2 se obtiene que la potencia disponible en el viento sea:

$$P_{viento} = \left(\frac{\pi}{8}\right) \rho D^2 V^3 \quad (2.3)$$

Bajo condiciones normales (temperatura 10°, presión 1 bar) la densidad ρ es 1.25 kg/m³, introduciendo este dato en la ecuación 2.3 nos quedaría una sencilla relación:

$$P_{viento} = 0.49D^2V^3 \quad (2.4)$$

La ecuación 2.4 indica la energía contenida en una masa de aire en movimiento. Ahora bien, el cumplimiento de la ecuación de conservación de la masa hace que no toda esa potencia disponible en el aire pueda aprovecharse. Existe un límite de energía que el rotor puede captar del viento, este viene determinado por la ley de Betz.

2.2.1 TEOREMA DE BETZ.¹⁵

Este teorema concluye que la energía máxima que se puede captar del viento para que el rendimiento sea máximo es del 59% ($C_p=16/27$). El equivalente sería ralentizar el viento que pasa a través de la hélices hasta 1/3 de su velocidad inicial. Por tanto solo podemos aprovechar hasta un máximo de 2/3 de la energía del viento. Nuestra ecuación nos queda:

$$P_{generada} = C_p P_{viento} \quad (2.5)$$

$$P_{generada} = 0.49C_p D^2 V^3 \quad (2.6)$$

Donde:

¹⁵ Escudero López, J. M. *Manual de Energía Eólica*. pág.128.

C_p coeficiente de potencia (su valor máximo viene dado por el límite de Betz= 0.593).

La ecuación 2.6 representa la potencia que podría alcanzar un rotor ideal ya que no considera factores reales de operación como son:

- Pérdidas mecánicas.
- Pérdidas eléctricas
- Resistencias aerodinámicas que presentan las palas.

2.2.2 RENDIMIENTOS DE UNA TURBINA EÓLICA

Considerando las diversas pérdidas de energía presentes en el sistema (pérdidas del rotor, del generador y del multiplicador), se determina el rendimiento total o nominal. Para el análisis se estima un rendimiento mecánico (η_m) de 80%, se considera para ello las pérdidas de energía que se producen en los descansos, acoplamientos y el sistema de transmisión (multiplicador), producidas por el contacto entre los elementos (roce), se asume también un rendimiento eléctrico (η_e) de 90% en la etapa de generación, junto con calcular un rendimiento del rotor se procede a determinar la potencia nominal de diseño de la turbina eólica.

El rendimiento aerodinámico máximo de varios tipos de aerogeneradores para una relación de velocidad (TSR^{tip speed ratio}) viene dado en la figura 2.2 además en esta gráfica nos podemos dar cuenta que el máximo valor de C_p son para rotores basados en la sustentación en los cuales están comprendidos los rotores Diarreus, bipala y tripala.

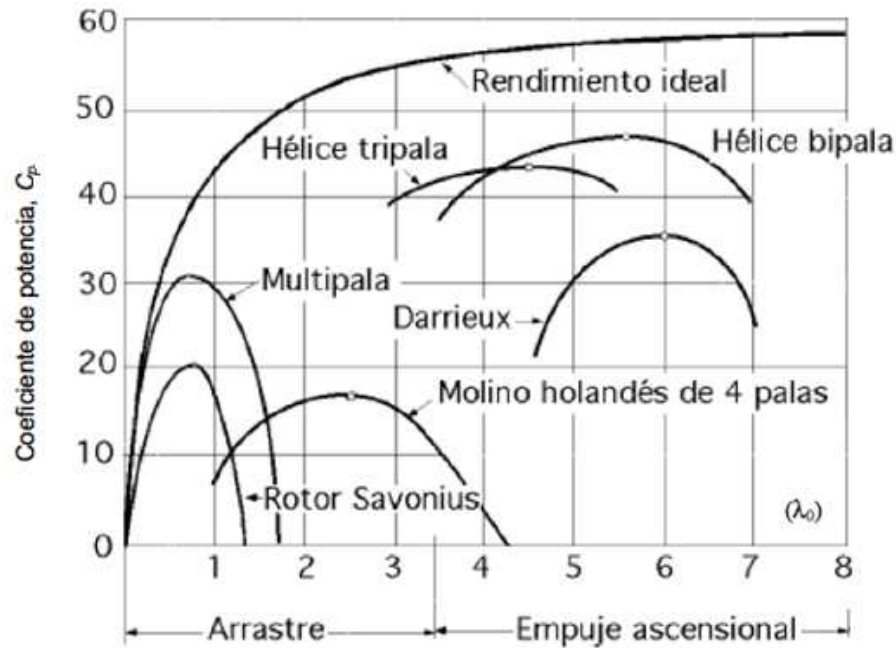


Figura 2. 2. Rendimiento de diferentes aerogeneradores.¹⁶

En conclusión nuestra ecuación para la obtención de la potencia generada por un generador eólico será:

$$P_{generada} = \eta_t 0.49 C_p D^2 V^3 \quad (2.7)$$

En donde $\eta_t = \eta_m + \eta_e$.

2.3 TEORÍA DE LAS PALAS.

La parte principal de un aerogenerador son las palas (aspas). La construcción de las palas plantea un estudio aerodinámico, en el cual intervienen varios factores de estudio como la elección del perfil, la anchura del perfil, el número de palas, el ángulo de sustentación, ángulo de incidencia o de ataque y el ángulo de inclinación.

¹⁶ <http://libros.redsauce.net/>

2.3.1 PERFIL DE LA PALA

Los perfiles aerodinámicos más utilizados en generación de potencia alta, mediana y baja tienen la forma de gota de agua alargada figura 2.1 Se caracterizan por su elevada fineza.

Existe otra posibilidad en la construcción de las palas y es la de utilizar chapas metálicas ligeramente curvadas (figura 2.3), estas tienen un rendimiento menor a las palas indicadas anteriormente.

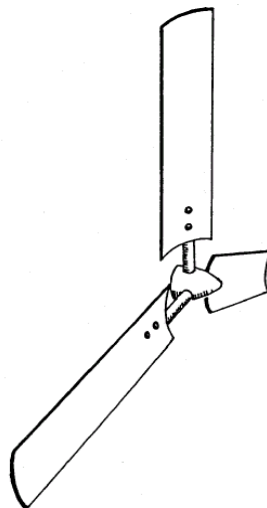


Figura 2. 3. Pala de chapa curvada ¹⁷

Cabe mencionar que las palas de chapa curvada son una posibilidad aceptable de diseño en la generación de baja potencia, como se puede observar en la figura 2.4 y 2.5 estas muestran las características de C_p y λ_o tanto de los perfiles llenos como los de chapa curvada.

¹⁷ Voneschen, M. F.(2009), *Introducción a la Teoría de las Turbinas Eólicas*. pág. 67.

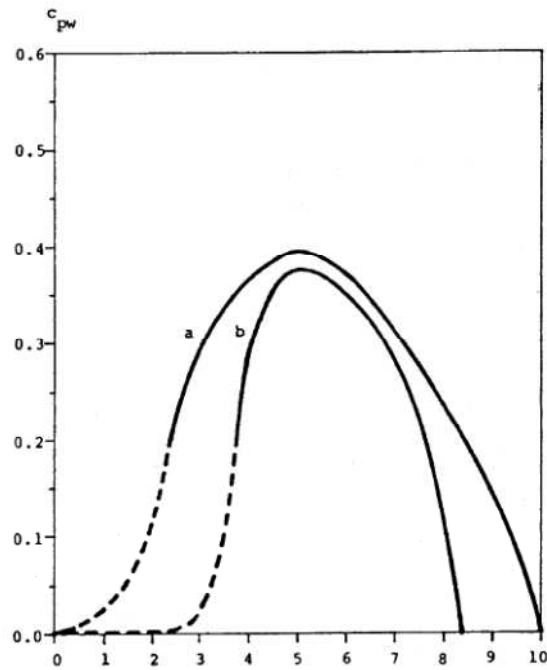


Figura 2. 4. Características c_{pw}, λ_0 de un rotor con palas ideales de diferente perfil.¹⁸

a: perfil NACA 4412
b: chapa curvada (5%)

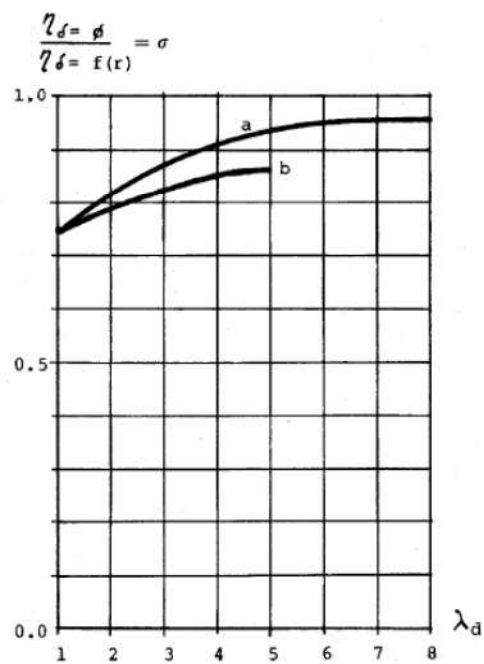


Figura 2. 5. Rendimientos de diferentes perfiles¹⁹

a: perfiles llenos
b: perfiles de chapa curvada.

¹⁸ Voneschen, M. F. (2009), *Introducción a la Teoría de las Turbinas Eólicas*. pág. 102.

¹⁹ *Ibidem*, pág. 102.

De la figura 2.5 se puede concluir que las chapas curvadas se puede utilizar hasta un $\lambda_d=5$, para valores mayores se debería utilizar perfiles llenos.

2.3.2 FUERZAS AERODINÁMICAS EN LAS PALAS DE LOS GENERADORES EÓLICOS

“Cuando un cuerpo está sujeto a la acción de un flujo de fluido, se produce una fuerza que es altamente dependiente de la forma del cuerpo. La dirección de la fuerza resultante de interacción entre el fluido y el cuerpo varía dentro de $\pm 90^\circ$ de la dirección del flujo. Si la forma del cuerpo es irregular la fuerza resultante tiende a ser paralela a la dirección del flujo. Por el contrario si el cuerpo tiene una forma aerodinámica similar figura 2.1, la fuerza tiende a ser perpendicular a la dirección del flujo.

Es así como la fuerza aerodinámica puede ser expresada por dos componentes: una componente totalmente perpendicular al flujo, conocida como fuerza aerodinámica de sustentación y otra componente que es paralela al flujo, conocida como la fuerza aerodinámica de arrastre.

En términos físicos, la fuerza sobre un cuerpo causada por su interacción con un fluido se produce por cambios en la velocidad y dirección del flujo alrededor del contorno del mismo. Estos cambios en velocidad se ven representados en cambios de presión alrededor de cuerpo y estas diferencias de presión es lo que producen la fuerza aerodinámica. La Figura 2.6 ilustra las fuerzas sobre un perfil aerodinámico”.²⁰

²⁰ Ccramos. *Guía para la utilización de la energía eólica para generación de energía eléctrica*. Recuperado 2012 de <http://www.slideshare.net/ccramos22/guia-para-la-utilizacion-de-la-energia-eolica-para-generacion-de-energia-electrica>.

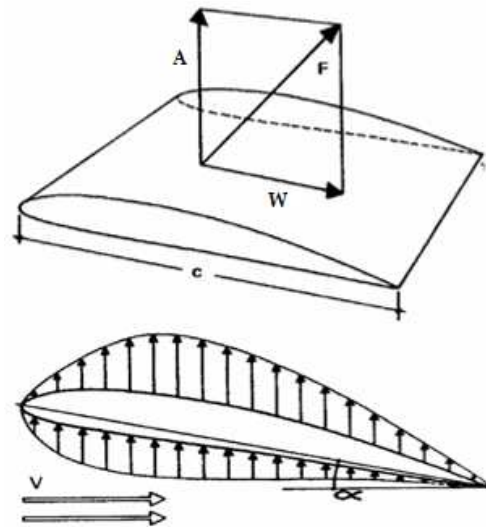


Figura 2. 6. Fuerzas de Arrastre y Sustentación²¹

De la siguiente figura se debe reconocer varias partes del perfil.

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

A: fuerza de sustentación.

W: fuerza de arrastre.

Las fuerzas de sustentación y de arrastre se encuentran relacionadas por la ecuación 2.8 y 2.9 respectivamente.

$$A = \frac{1}{2} C_a \rho v^2 A \quad (2.8)$$

$$W = \frac{1}{2} C_w \rho v^2 A \quad (2.9)$$

Donde:

C_a coeficiente de sustentación, adimensional.

C_w coeficiente de arrastre, adimensional.

²¹ Lorenhey. (2011). Energías Alternativas. Recuperado 2012 de <http://www.taringa.net/posts/ciencia-educacion/14336569/Energias-alternativas-Energia-eolica-Parte-4.html>.

Para poder describir las propiedades de sustentación y arrastre se introducen los coeficientes dimensionales del mismo:

Estos coeficientes matemáticamente están definidos por:

$$C_a = \frac{A}{(\pi/8)\rho V^2 A} \quad (2.10)$$

$$C_w = \frac{W}{(\pi/8)\rho V^2 A} \quad (2.11)$$

Estos factores dependen de la forma del perfil, del ángulo de ataque, de la relación longitud anchura del aspa (llamada alargamiento del ala) y de la superficie de la misma

2.3.3 RELACIÓN ENTRE EL COEFICIENTE DE SUSTENTACIÓN (C_A) Y EL DE ARRASTRE (C_W).

El funcionamiento de la pala tiene un mejor rendimiento para un ángulo de ataque α en el que la relación C_a/C_w sea máxima, para que esto suceda, el coeficiente de sustentación tiene que ser grande, pero no necesariamente el máximo absoluto, al tiempo que el coeficiente de arrastre tiene que ser lo más pequeño posible, sin llegar a ser el mínimo absoluto, para así llegar a obtener un ángulo de ataque óptimo, para un mejor desempeño del alabe.

Existen gráficas, que relacionan los coeficientes de sustentación y arrastre con el ángulo de ataque, a este tipo de gráficas se llaman polar de perfil.

2.3.3.1 POLARES DE UN PERFIL

Las curva, $C_a = f(C_w)$, se denomina polar de un perfil, y se determina midiendo los valores de A y W mediante una balanza de torsión en un túnel de viento, para diversos valores del ángulo de ataque.

Existen manuales que tienen polares de infinidad de perfiles. Por regla general los perfiles se designan con un nombre seguido por un número característico, por ejemplo NACA 4412, SCWMITZ 417 etc.

Ya que el proyecto que se está realizando se refiere a generadores de baja potencia, se indica polares de perfiles más utilizadas para nuestros propósitos desde la figuras 2.7 hasta la figura 2.11.

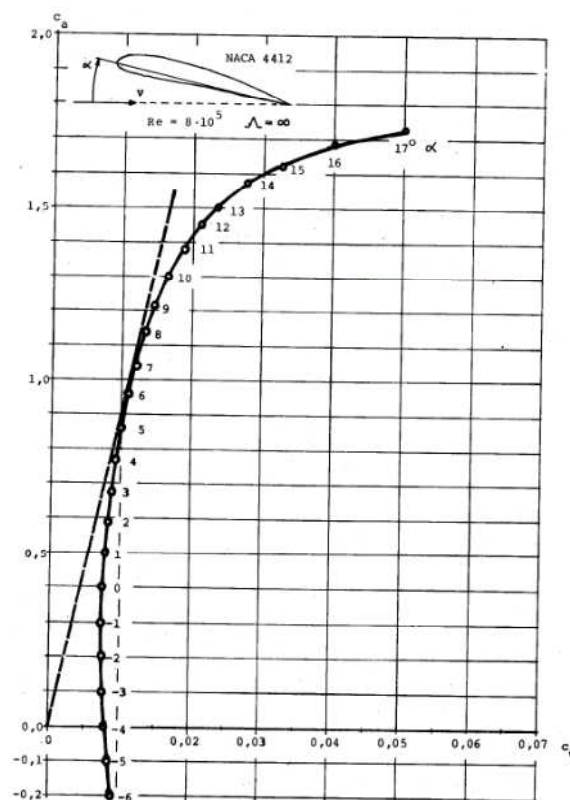


Figura 2. 7. La polar del perfil NACA 4412²²

²² Voneschen, M. F.(2009), *Introducción a la Teoría de las Turbinas Eólicas*. pág. 59.

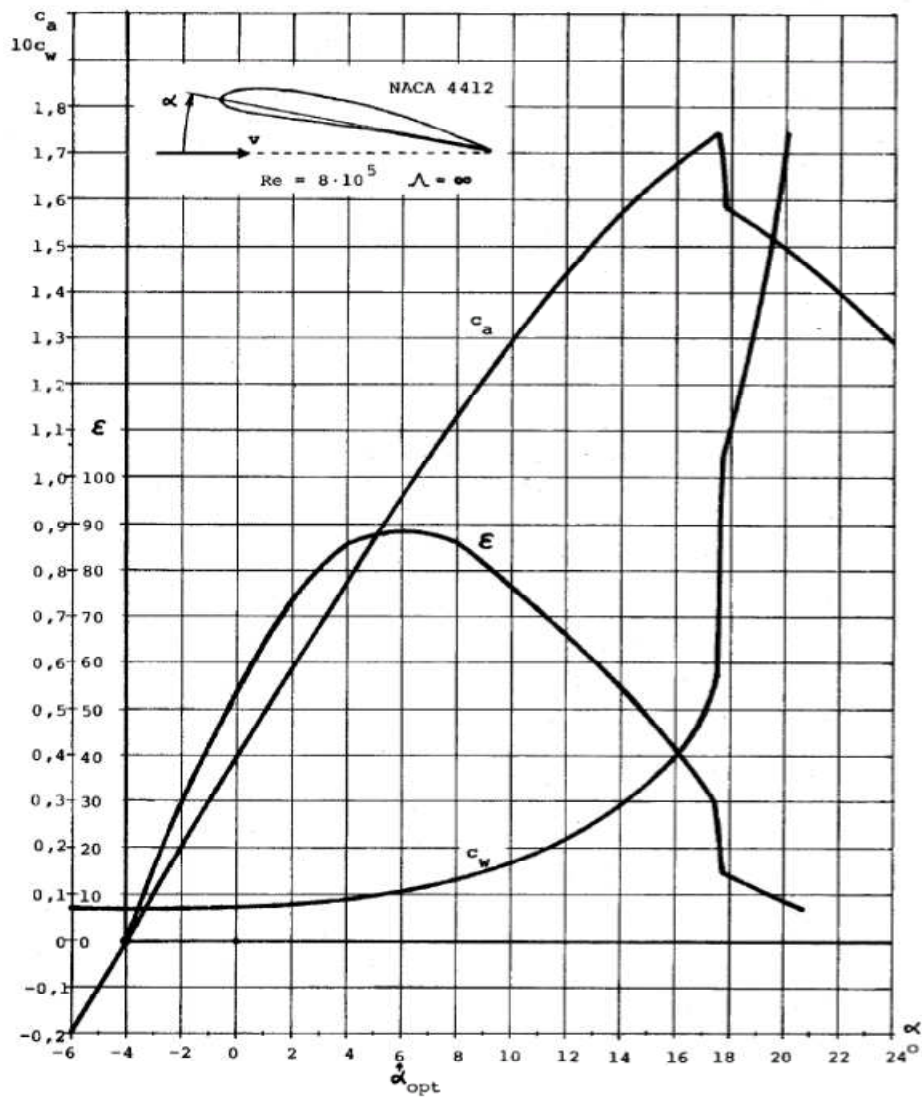


Figura 2. 8. La polar del perfil NACA 4412, con los coeficientes de sustentación y resistencia y la fineza en función del ángulo de ataque, El factor \square es la llamada fineza del perfil ($\square = Ca/Cw$)²³

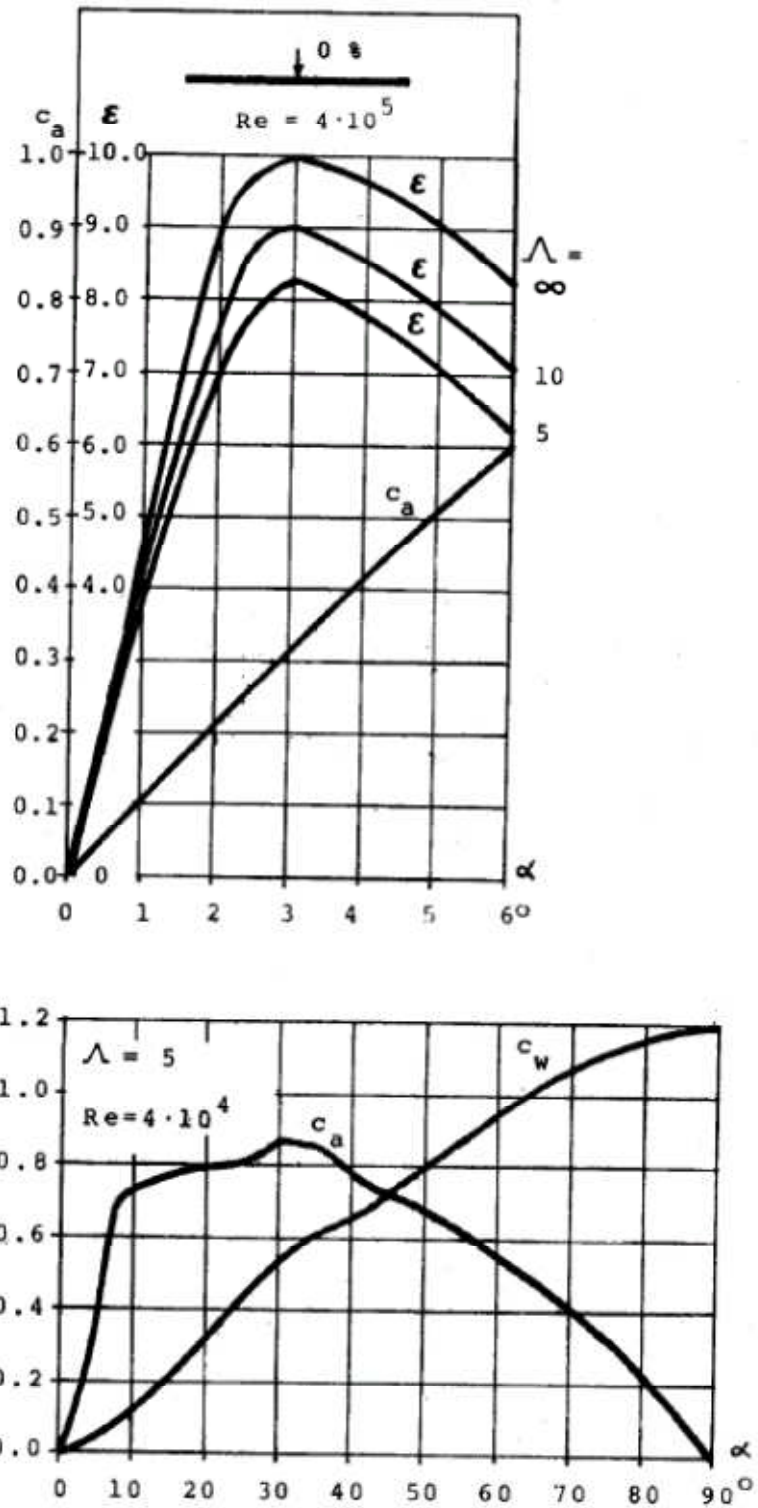


Figura 2. 9. Polar de una chapa plana²⁴

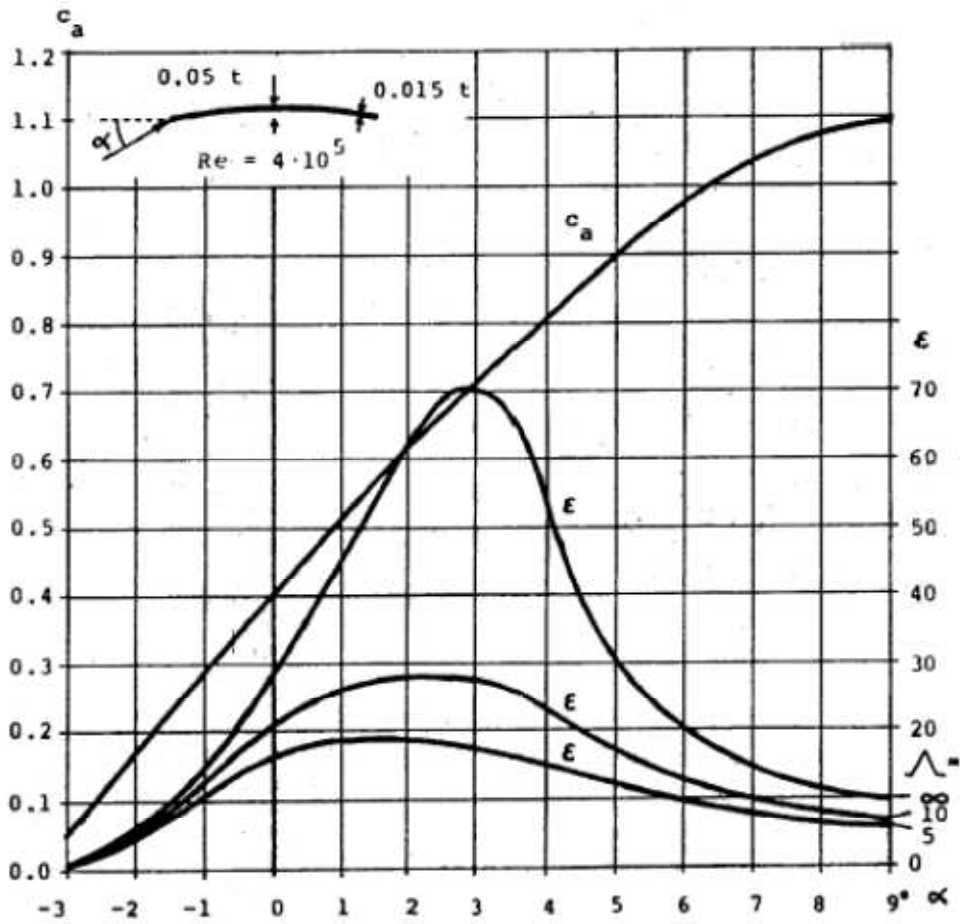


Figura 2. 10. Polar de una chapa curvada 5%.²⁵

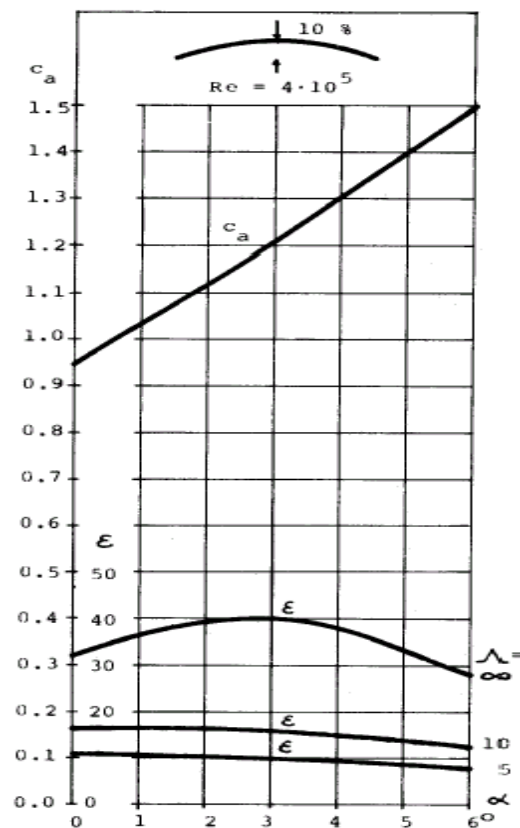


Figura 2. 11. Polar de una chapa curvada 10%.²⁶

2.3.4 RELACIÓN DE VELOCIDAD PERIFÉRICA (TSR)²⁷

La relación de velocidad específica o periférica TSR, TipSpeed-Ratio, es un término que sustituye al número de revoluciones por minuto n del rotor; sirve para comparar el funcionamiento de máquinas eólicas diferentes, por lo que también se le suele denominar velocidad específica. El TSR indica que la periferia de la pala circula a una velocidad TSR veces mayor que la velocidad del viento v y es la relación entre la velocidad más exterior $u_0 = R \omega$ (la del punto más exterior sobre la misma a partir del eje de rotación) figura 2.12, y la velocidad del viento v , en la forma:

²⁶ Voneschen, M. F. (2009), *Introducción a la Teoría de las Turbinas Eólicas*. pág. 69.

²⁷ <http://libros.redsauce.net/EnergiasAlternativas/eolica/PDFs/04Eolo.pdf>

$$TSR = \frac{\text{Velocidad de la periferia de la pala}}{\text{Velocidad del viento}} = \frac{u_o}{V} = \frac{WR}{V} \quad (2.12)$$

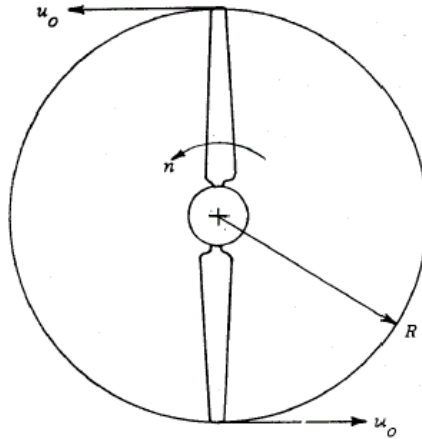


Figura 2. 12. Velocidad en las Puntas de las Palas.²⁸

La velocidad específica puede ser calculada a partir de la velocidad de rotación del rotor. Según las leyes de la mecánica, la velocidad de un punto que gira alrededor de un eje es:

$$u_o = \frac{2\pi Rn}{60 V} \quad (2.13)$$

Esta ecuación remplazamos en la ecuación 2.12.

$$TSR = \frac{2\pi Rn}{60 V} \quad (2.14)$$

A continuación se describe en la tabla 2.1 los TSR utilizados comúnmente en la mayoría de aerogeneradores de eje horizontal según el tipo de aplicación.

²⁸ Voneschen, M. F.(2009), *Introducción a la Teoría de las Turbinas Eólicas*. pág. 25.

Tabla 2. 1. TSR para diferentes perfiles.²⁹

Tipo de máquina	TSR de diseño	Tipo de pala
Bombeo de agua.	1	Placa plana.
Bombeo de agua.	1	Placa curvada.
Bombeo de agua.	1	Ala de tela.
Generadores eólicos pequeños.	3-4	Perfil simple.
Generadores eólicos pequeños.	4-6	Perfil alabeado.
Generadores eólicos pequeños.	3-5	Ala de tela.
Grandes aerogeneradores.	5-15	Perfil alabeado.

Si se conoce la velocidad v del viento, el radio de la pala y el número n de rpm a las que funciona, se puede calcular el TSR a cualquier distancia r comprendida entre el eje de rotación del rotor y la periferia de la pala, relación entre velocidades que se conoce como SR, y es de la forma:

$$SR = \frac{2\pi r n}{60 k v} \quad (2.15)$$

En la que k es una constante de ajuste de las diversas unidades que se pueden emplear, tomando los siguientes valores:

$k =$

1,47 cuando la velocidad del viento v venga en millas por hora y el radio en ft

1 cuando v venga en ft/seg y el radio en ft

1 cuando v venga en metros/seg y el radio en metros

3,6 cuando v venga en km/hora y el radio en metros

²⁹ <http://www.tecnofilos.org/Energia/Eolica/TSR/tsr.html>.

2.3.5 CÁLCULO DE REVOLUCIONES POR MINUTO.

Al momento de calcular las revoluciones por minuto (rpm) que tendrá el aerogenerador se debe tomar en cuenta el TSR. Una consideración más es la cantidad de alabes que serán usados para cubrir el área de barrido, hay que saber elegir bien el número de palas ya que ayudará a evitar problemas de ruido, vibraciones mecánicas y balanceo en el rotor del mismo. Para el cálculo de las rpm se puede realizar con la ecuación 2.14 de la cual despejamos n nos queda:

$$n = \frac{60.TSR.V}{\pi.D} \quad (2.16)$$

2.3.6 ÁNGULOS EN LAS PALAS.

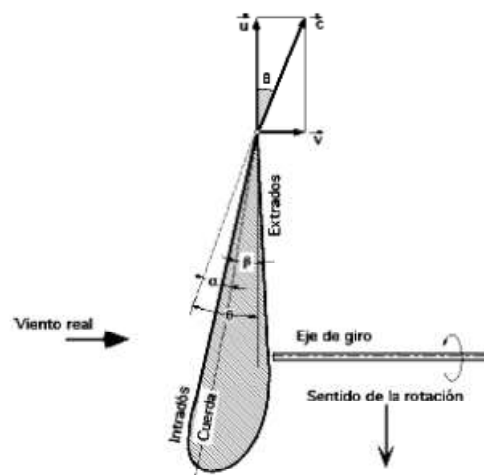


Figura 2. 13. Ángulos en el segmento de una pala³⁰

En la figura 2.13 observamos que:

- β es el ángulo que forma una cuerda del perfil con el plano de rotación; es el ángulo de calaje o de inclinación.

30 Scribd.(2012.) *Mecanismos aprovechamiento eólico*. Recuperado noviembre del 2012 de <http://es.scribd.com/doc/82805686/Mecanismos-Aprovechamiento-Eolico-Maquinas>.

- α es el ángulo que forma la cuerda del perfil con la velocidad aparente del viento c , (ángulo de ataque).
 - θ es el ángulo que forma el plano de rotación con la dirección aparente del viento que pasa por el borde de ataque; se conoce como ángulo de incidencia.
- Lysen³¹ ofrece una fórmula que permite calcular el ángulo óptimo de incidencia en cualquier radio.

$$\beta = \frac{2}{3} \arctan\left(\frac{1}{\lambda_d r}\right) \quad (2.17)$$

Entre el ángulo de calado, el ángulo de ataque y el de incidencia existe una relación (figura).

$$\beta = \theta - \alpha \quad (2.18)$$

De las ecuaciones se saca conclusión que β depende de r , α depende del perfil elegido, por lo tanto nuestro ángulo θ dependerá de r , es decir unas palas óptimamente diseñadas tendrán un ángulo de calado variable, a estas se las llama palas torsionadas figura 2.14.

31 Autor del Libro "Adaptación de rotores eólicos a generadores eléctricos de baja potencia"

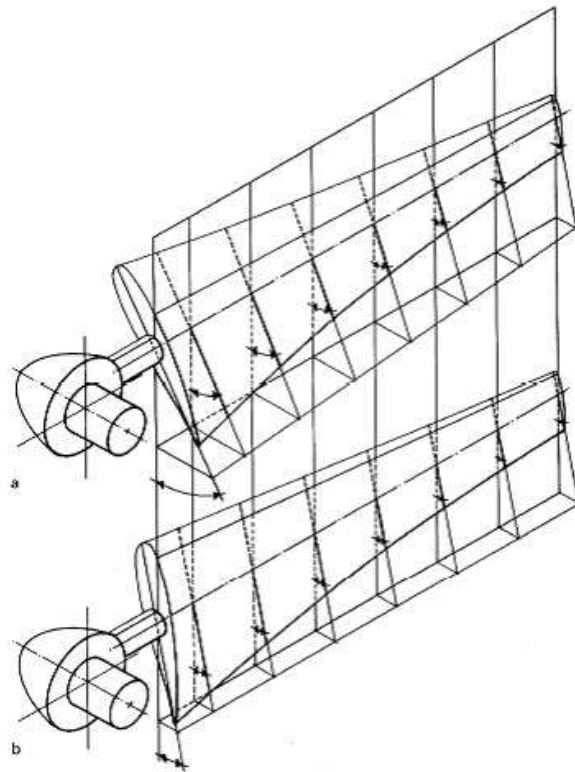


Figura 2. 14. Ángulo de calado de diferentes segmentos de una pala³²

a : pala con torsión

b: pala sin torsión

2.3.7 ANCHURA DE LA PALA

La anchura de la pala a la distancia r se puede calcular con la siguiente fórmula propuesta por Lysen.

$$t = \frac{8\pi r}{z.C_a} (1 - \cos \beta) \quad (2.19)$$

Donde z es el número de las palas y C_a el coeficiente de sustentación correspondiente al ángulo de ataque α .

³² Lorenhey. (2011). Energías Alternativas. Recuperado 2012 de <http://www.taringa.net/posts/ciencia-educacion/14336569/Energias-alternativas-Energia-eolica-Parte-4.html..>

2.3.8 SOLIDEZ

Se define como la relación entre la superficie proyectada por las palas y la superficie descrita por las mismas en su movimiento de rotación.

Los molinos antiguos y en general todos los que utilizan las fuerzas de resistencia para generar el par motor suelen funcionar con una solidez bastante elevadas, próximas a 1, mientras que los modernos generadores eólicos de alta velocidad trabajan con solidez de 0.1 e incluso mucho menores figura 2.15

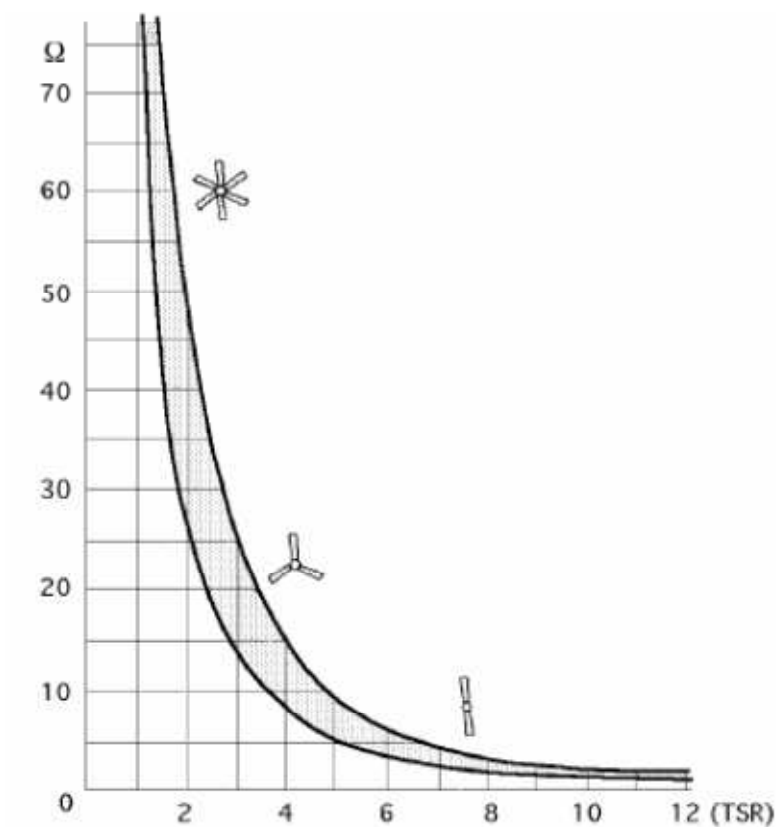


Figura 2. 15. Relación entre el coeficiente de solidez (ω) y el TSR (Celeridad).³³

La solidez Ω se lo representa con la siguiente ecuación:

33 Scribd.(2012.) *Mecanismos aprovechamiento eólico*. Recuperado noviembre del 2012 de <http://es.scribd.com/doc/82805686/Mecanismos-Aprovechamiento-Eolico-Maquinas>.

$$\Omega = \frac{\text{Área total de las palas}}{\text{Área barrida por las palas}} = \frac{Z*S}{\pi*R^2} \quad (2.20)$$

De donde.

Z Número de palas

S Superficie de cada pala

2.3.9 PALAS DE CHAPAS CURVADAS

Sabiendo que las palas es uno de los puntos más críticos para ser construidas, ya que se toma en cuenta tres variables en función a su radio (anchura, espesor y ángulo de calado), esta característica hace que el precio de fabricación sea elevada, se estudia la posibilidad de abaratar costos con palas las cuales su elaboración sean más sencillas, estas son palas rectas de forma trapezoidal o rectangular. Figura 2.16

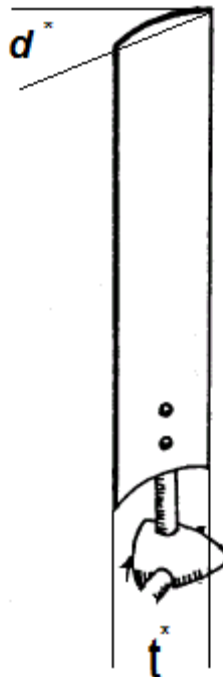


Figura 2. 16. Palas Rectas de Chapa Curvada³⁴

34 Elaboración propia

2.3.9.1 Ángulo de calado (d^*).

Este ángulo es constante a lo largo de la pala. Figura 2.16. Se puede determinar con la ecuación siguiente:

$$\delta^* = \beta^* - \alpha^* \quad (2.21)$$

De donde la β^* se puede obtener de la figura 2.17.

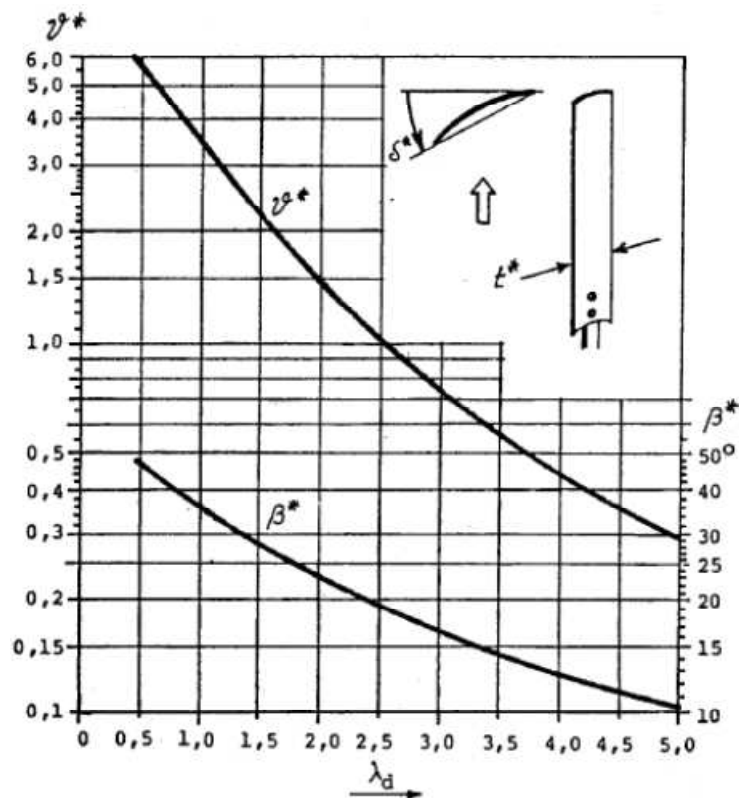


Figura 2. 17. Valores de β^* y ϑ^* para determinar

*El ancho y el ángulo de calado.*³⁵

2.3.9.2 Ancho de las palas.

El cálculo del ancho de las palas se realiza aplicando la ecuación siguiente.

$$t^* = \vartheta^* \frac{R}{Z^* Ca} \quad (2.22)$$

De donde ϑ^* se obtiene de la figura 2.17

Si se desea aumentar el rendimiento y el par de arranque de nuestro aerogenerador se puede dar una forma trapezoidal, logrando una variación lineal entre la cuerda de la punta de la pala c_{pp} y la cuerda de la raíz $c_{raíz}$ con las siguientes ecuaciones.

$$c_{pp} = \bar{c} - 0,025 * l \quad (2.23)$$

$$c_{raíz} = \bar{c} - 0,025 * l \quad (2.24)$$

De donde:

\bar{c} Es la cuerda media de la pala.

l Es la longitud útil de la pala.

El valor de la cuerda media de una pala se puede deducir a partir de la siguiente ecuación:

$$\bar{c} = \frac{\Omega * \pi * R}{Z} \quad (2.25)$$

La longitud útil de la pala

$$l = 0.86 * R \quad (2.26)$$

2.3.10 ANCLAJE DE LAS PALAS AL BUJE.

Existen dos posibles soluciones de anclaje de la pala al buje.

2.3.10.1 Palas de paso variable.

Son las que admiten rotación controlada sobre su eje a través de unos rodamientos. Esta solución precisa de un equipo de control de paso electrónico.

El controlador electrónico comprueba varias veces por segundo la potencia generada. Cuando ésta alcanza valores demasiado altos, el controlador envía ordenes al mecanismo de cambio de ángulo de paso, que hace girar las palas ligeramente. Este sistema precisa de una ingeniería muy desarrollada para asegurar que las palas giren exactamente el ángulo deseado.

2.3.10.2 Palas de paso fijo.

Este tipo de palas no admiten rotación sobre su eje, realizándose el control de potencia mediante un diseño de pérdida aerodinámica de las palas. Esto se consigue torsionando la pala a lo largo de su eje figura 2.14 (a), es decir, aumentando el ángulo de ataque del perfil de la pala a lo largo de su eje. Gracias a esto, la pala pierde sustentación de forma gradual y se evita que se transmita un par excesivo sobre el rotor. Este tipo de solución es la más adoptada en aerogeneradores de baja potencia ya que comparada con las palas de paso variable, en esta se evitan instalar partes móviles del rotor y un complejo sistema de control, que aumentan los costes considerablemente.

2.3.11 NÚMERO DE PALAS.

Los generadores eólicos, al contrario de lo que puede parecer lógico, no por tener más palas dará más potencia. Se creía que si cada pala ayuda a captar la potencia del viento, entonces su número aumenta la potencia captada. En realidad esto no sucede, si nos fijamos en la figura 2.2 los valores de C_p son mayores para rotores con menor número de palas.

Para elegir que número de palas, además de fijarnos que el C_p sea alto, se debe tomar en cuenta factores económicos, vibraciones, ruidos.

2.3.11.1 Hélice de una pala: Estas hélices requieren un contrapeso que compense a la pala y el balanceo debe realizarse con mucho cuidado y precisión debido a la extremada sensibilidad que tienen a las vibraciones. Resultan atractivas económicamente por necesitar sólo una pala, que es un elemento costoso pero las dificultades producidas por las vibraciones, las hacen poco prácticas.

2.3.11.2 Hélice de dos palas: Son más económicas que las de 3 palas pero son más sensibles que éstas a las vibraciones. En turbinas de baja potencia, con hélice de 2 palas y de paso fijo, la hélice puede construirse entera con un solo larguero pasante, mientras que si es de paso variable esto ya no es posible pero todo el mecanismo de cambio de paso resulta más simple que en una de mayor número de palas.

2.3.11.3 Hélices de tres palas: Su característica principal es su mayor suavidad de funcionamiento y ésta es una importante cualidad.

Por todo lo que antecede, para hélices rápidas, de alta velocidad de giro, son recomendables las hélices de dos o tres palas.

2.4 SISTEMA DE ORIENTACIÓN

Los aerogeneradores de eje horizontal necesitan de algún sistema que orienten, de forma que el viento incidiese perpendicularmente al disco barrido por el rotor, con el fin de hacer incidir la mayor cantidad posible de masa de aire en movimiento y así obtener la mayor cantidad posible de energía cinética; con este fin, existen diversos sistemas que permiten la orientación de la máquina, como:

- Un sistema de orientación accionado por rotores auxiliares. Figura 2.18
- Un servomotor controlado electrónicamente.
- Un sistema de orientación por efecto de la conicidad.

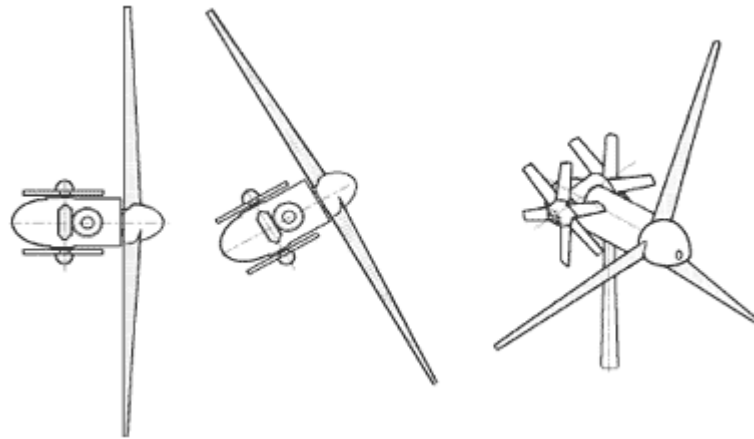


Figura 2. 18. Sistema de orientación por rotores auxiliares³⁶

Pero como este documento trata sobre un generador eólico de baja potencia, las posibilidades anteriores encarecen el costo de la máquina, y existe un sistema más sencillo de orientación y de muy buenos resultados es:

- Una cola aerodinámica que actúa como una veleta.

2.4.1 ORIENTACIÓN POR VELETA.

La solución con veleta estabilizadora se emplea principalmente para la orientación de eólicas hasta diámetros de 6 m. Esta solución consiste en una aleta que se acopla al rotor de la eólica tal como se observa en la Fig. 2.19 y mantiene el plano

³⁶ Máquinas Eólicas. Recuperado el 2012 de <http://exa.unne.edu.ar/fisica/maestria/modulo2/eolica/eolo32002.pdf>

de rotación de las palas perpendicular al viento. Es una solución sencilla y de bajo coste, por eso se utiliza para aerogeneradores de baja potencia

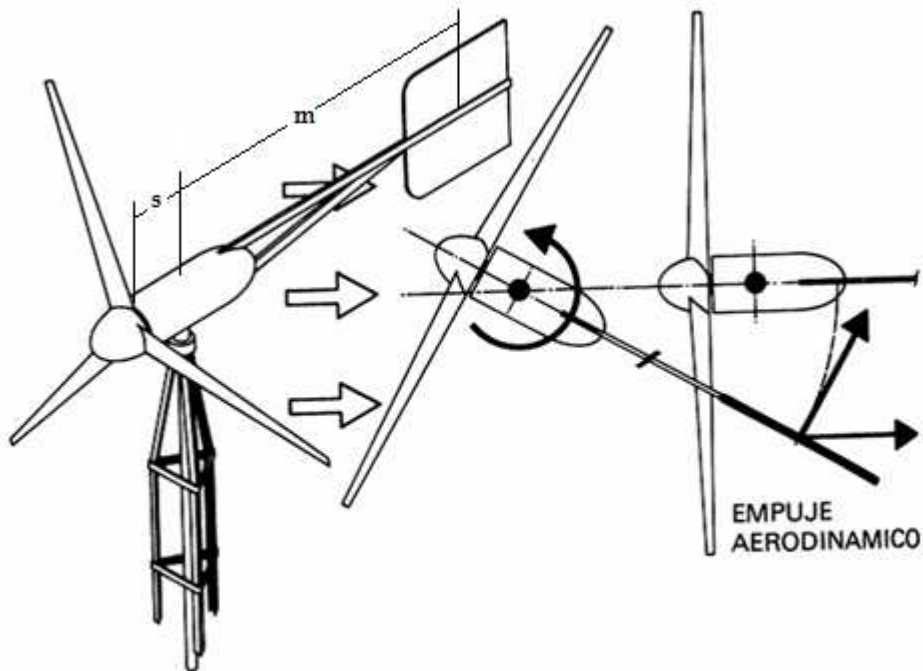


Figura 2. 19. Aerogenerador Orientado por Veleta³⁷

2.4.1.1 Cálculo de la veleta

Para diámetros de palas menores a 6 metros se recomienda que la distancia mínima entre el eje de rotación de la góndola y la ubicación de la veleta sea aproximadamente de 4 veces la distancia entre el eje de rotación de la góndola y el plano del rotor en referencia a la figura 2.19 quedaría:

$$m = 4s \quad (2.27)$$

³⁷ Energía Eólica. Recuperado el 2012 de <http://soloenergia.com.ar/aprendamos/energiaeolica/asptecnicos.html>

La superficie de la veleta depende del área barrida por las palas, en el caso de los generadores eólicos compuestos por dos y tres palas se recomienda que la superficie mínima de la veleta tiene que ser el 4% del área total barrida por las palas.

$$A_{barrida\ por\ las\ palas} = \pi R^2$$

$$A_{veleta} = 0.4\pi R^2 \quad (2.28)$$

2.5 SISTEMAS DE REGULACIÓN.

El sistema de regulación es un dispositivo fundamental en un aerogenerador eólico es el que permite la regulación y control del número de revoluciones, que además sirve de protección de dicha máquina para velocidades del viento superiores a las admisibles bajo el punto de vista estructural.

Cuando una máquina está sometida a una determinada velocidad del viento, comienza a girar; dicha velocidad es la velocidad de conexión, pero su giro es lento y la máquina está lejos de generar su máxima potencia.

A medida que la velocidad del viento aumenta el rotor gira más deprisa y la potencia que produce también aumenta; a una determinada velocidad (nominal), el rotor gira a las revoluciones precisas para que la máquina proporcione su potencia nominal y a partir de este momento, aunque aumente la velocidad del viento, no interesa que la velocidad de giro aumente, por lo que hay que actuar sobre ella regulando su velocidad.

Si la velocidad del viento sigue aumentando, el rotor puede peligrar desde el punto de vista estructural siendo muy importante disminuir las vibraciones; por

eso, cuando esta velocidad aumenta mucho, el rotor se tiene que frenar, para lo cual durante la historia se han creado diferentes tipos de regulación, pero en este apartado se estudiará los utilizados en generadores eólicos de baja potencia

- Sistemas de regulación por orientación del rotor, accionado por una veleta auxiliar.
- Sistema de orientación y regulación por momento de cola (SOPMC)

2.5.1 SISTEMA DE ORIENTACIÓN Y REGULACIÓN POR MOMENTO DE COLA (SOPMC)³⁸ .

Para caracterizar el comportamiento de un aerogenerador con SOPMC, se utilizó el aerogenerador CEETA-01 Figura 2.20. El autor agrupa sus componentes en cuatro conjuntos a partir de los grados de libertad en su movimiento. La figura 2.21 muestra detalles del conjunto sistema de orientación y protección, compuesto por el pivote de cola, el cual está inclinado formando un ángulo b respecto a la vertical. Cuando se observa la proyección del mecanismo sobre un plano horizontal Figura 2.22, se distingue que los soportes son instalados a un ángulo d , con valores entre 10 y 45° [Piggott, 2001].

Esta Sistema de regulación del motor fue realizada por prueba y error.

38 Fariñas, E., Jáuregui, S. & Betancourt, J. (sf). *Posicionamiento del rotor y la cola de un pequeño aerogenerador de eje horizontal debido a la influencia de los coeficientes de arrastre y sustentación que afectan la veleta de cola*. Recuperado el 2013 de <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar27/HTML/articulo06.htm>

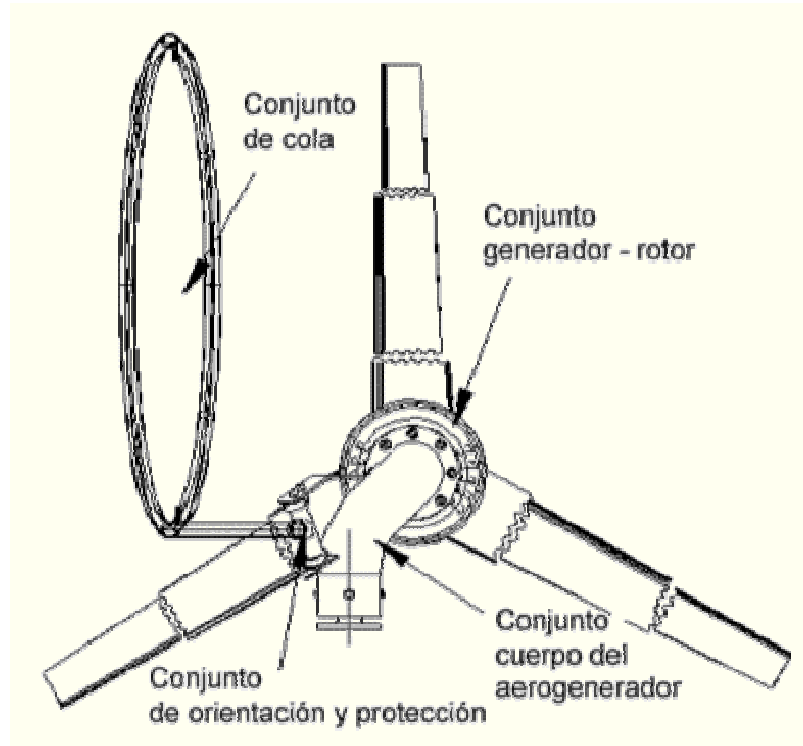


Figura 2. 20. Vista posterior de los conjuntos del aerogenerador CEETA-01.

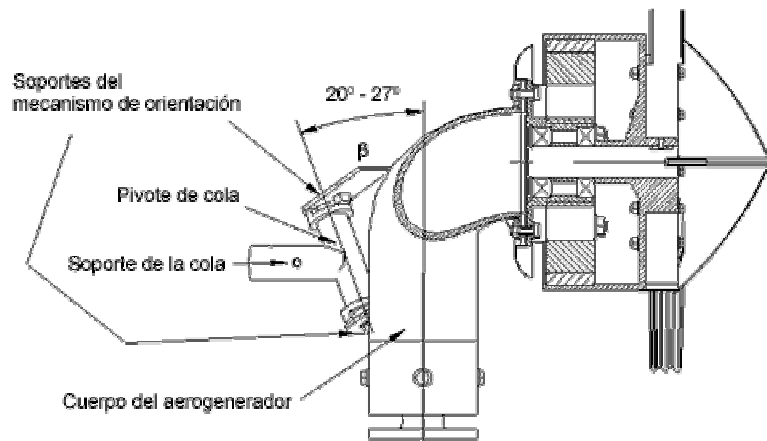


Figura 2. 21. Vista lateral en corte del aerogenerador CEETA-01.

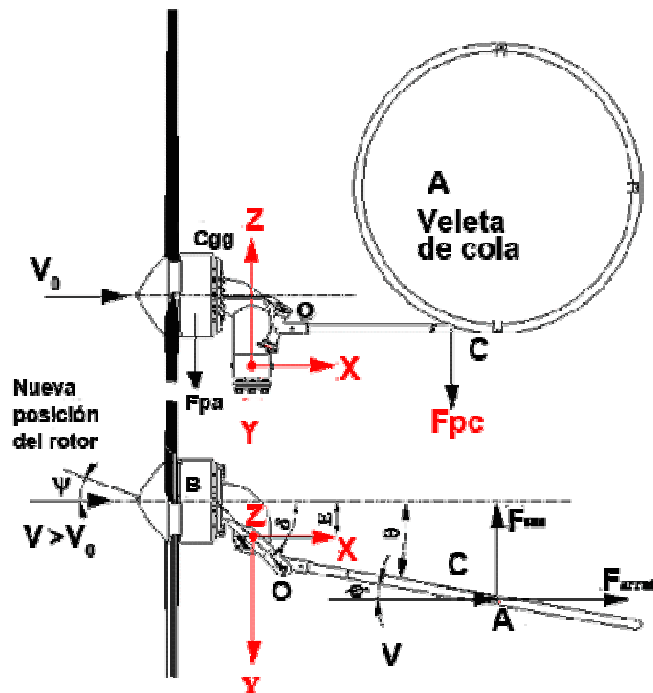


Figura 2. 22. Esquema de fuerzas sobre la cola del aerogenerador CEETA-01.

2.6 CARGAS PRESENTES EN LOS GENERADORES EÓLICOS.

2.6.1 CARGAS EN LAS PALAS

Existen 2 fuerzas que actúan sobre la pala, la fuerza Axial y la fuerza centrífuga.

La fuerza axial (F_{axial}) es la que intenta doblar a la pala creando un momento en el punto O figura, mientras que la fuerza centrífuga (F_{cent}) intenta sacarle a la pala del rotor figura 2.23.

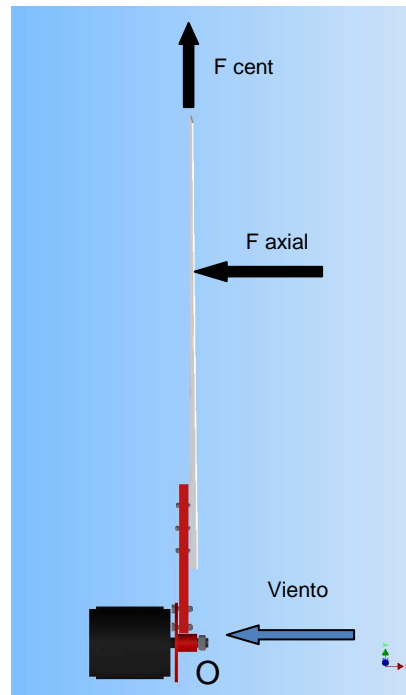


Figura 2. 23. Esfuerzo en la Pala de un Aerogenerador³⁹

Para el cálculo de la fuerza Centrífuga suponemos que el centro de gravedad de la pala esta en el medio de la misma, y recordando que la fuerza centrífuga que tiene un objeto de masa m , moviéndose en una trayectoria circular de radio r con velocidad angular w , la ecuación nos quedaría.

$$F_{cent} = \frac{1}{2} m_{pala} \frac{v_g^2}{r_g} \quad (2.29)$$

La velocidad en el centro de gravedad se expresa

$$v_g = n \frac{2\pi}{60} r_g \quad (2.30)$$

Reemplazando la ecuación nos queda que la fuerza centrífuga es

³⁹ Elaboración propia (diseño autodesk inventor)

$$F_{cent} = \frac{\pi^2}{1800} m_{pala} n^2 r_g \quad (2.31)$$

Donde:

F_{cent} Fuerza Centrífuga.

m_{pala} Peso de la pala.

n Número de revoluciones.

r_g Distancia hasta el centro de gravedad de la pala.

Para el cálculo de la fuerza axial se toma en cuenta 2 casos el primero cuando el aerogenerador esta en movimiento y el segundo cuando el generador se encuentra parado.

Para cuando el generador esta en movimiento, recomiendan el uso de la ecuación 2.20⁴⁰.

$$F_{axial} = 0,062Av^2 \quad (2.32)$$

Siendo A el área circular que forman las palas

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (2.33)$$

La ecuación para el cálculo de la fuerza axial cuando el aerogenerador esta en movimiento nos quedaría

$$F_{axial} = 0,062 \frac{\pi D^2}{4} v^2 \quad (2.34)$$

Donde:

40 Fernández, P.(2002). *Parámetros de Diseño*. Recuperado el 2012 <http://www.Pfernandezdiez.es/Energias Alternativas/eolica/PDFs/04Eolo.pdf>

F_{axial} Fuerza axial.

v Velocidad del viento.

D Diámetro.

El valor que se obtiene de esta ecuación es dividido para el número de palas del aerogenerador y se obtendrá la fuerza axial en cada pala.

El momento flector que se produce en la pala por la fuerza axial se calcula con.

$$M_{flector\ de\ la\ pala} = F_{axial} \times r_g \quad (2.35)$$

2.6.2 CARGAS EN LA BASE DE LA TORRE

La fuerza axial S sobre la torre en movimiento genera un momento flector en la base de la torre M_s figura 2.24.

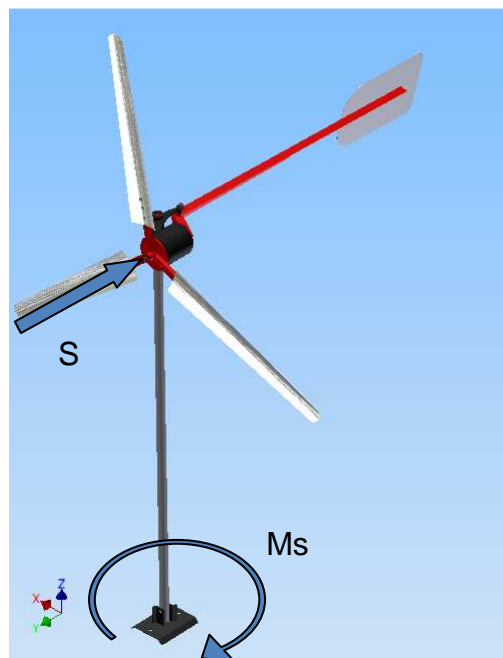


Figura 2. 24. Flexión en la Torre⁴¹

⁴¹ Elaboración propia (diseño autodesk inventor)

La forma de cálculo para una torre de altura h es la siguiente.

$$M_s = S \times h \quad (2.36)$$

2.7 ESTUDIO DE LAS UNIONES EN EL AEROGENERADOR

Tan importante como diseñar los elementos individuales para que resistan los efectos producidos por las cargas, es de suma importancia diseñar la forma de unión de estos elementos, de hecho grandes estructuras y máquinas han colapsado por fallas en pequeños elementos de unión.

Por lo tanto, las uniones juegan un papel muy importante en el buen funcionamiento de las máquinas.

Existen uniones en las que se transmiten fuerzas axiales, otras en las que se transmiten fuerzas cortantes y otras que pueden transmitir esas fuerzas con momentos, en el presente proyecto para unir 2 o más elementos mecánicos se usan uniones empernadas y soldaduras.

2.7.1 UNIONES EMPERNADAS.⁴²

De acuerdo como se transmiten la carga las uniones pernadas simples pueden ser de dos tipos, pernos a tracción y pernos a corte.

Se puede observar en la figura 2.25 en el caso que un perno está sometido a tracción.

⁴² *Diseño de uniones apernadas.* Recuperado de <http://www2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/uniones/union2.html>.

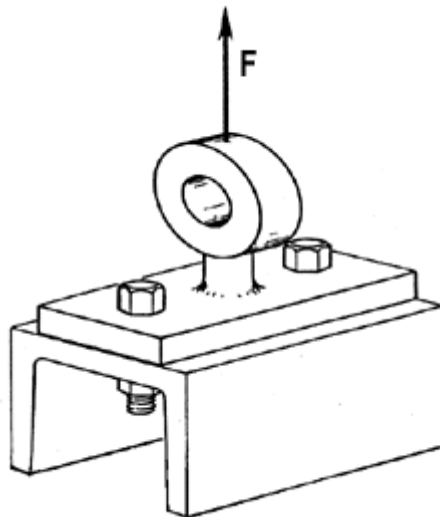


Figura 2. 25. Pernos sometidos a tracción

Cada perno soporta $F/2$ y el cálculo de su resistencia sería:

$$\frac{F}{2A} = \frac{Q}{n} \quad (2.37)$$

Donde

Q es la resistencia a la fluencia o la carga de prueba en su defecto

A es la sección transversal del perno

n es el factor de seguridad

En uniones a corte figura 2.26, el objetivo es aplicar una precarga al perno para generar un apriete de magnitud tal, que el roce equilibre la carga cortante. En caso que dicho preapriete se suelte por vibraciones, corrosión, dilataciones térmicas, etc., el perno recibe la carga en corte.

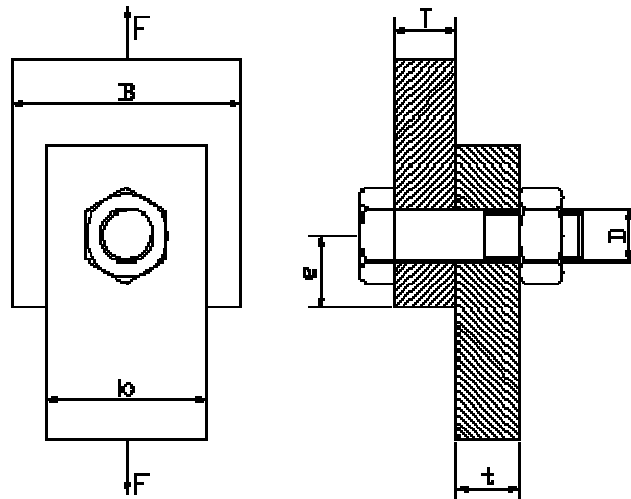


Figura 2. 26. Pernos sometidos a Corte

Considerando la unión de las planchas de la figura 2.25, el criterio para el diseño del perno sería:

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{Q}{2n} \quad (2.38)$$

Donde

F es la fuerza aplicada al perno en corte

Q es la carga de fluencia o la carga de prueba en su defecto

A es la sección transversal del perno

n es el factor de seguridad

2.8 RODAMIENTO

Es un elemento mecánico que sirve para soportar las cargas, tanto estáticas como dinámicas de un sistema que está sometido a movimientos rotativos.

Existen varios tipos de rodamiento los cuales se clasifican en dos grupos básicos:

- De bolas
- De rodillos

En cualquiera de los dos tipos soportan cargas axiales, cargas radiales o la combinación de estas.

2.8.1 PRINCIPIO PARA LA SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE RODAMIENTOS.⁴³

Para disponer de rodamientos no solo consta de los rodamientos. También los demás componentes que lo acompañan forman una parte integral de la disposición completa. Para que un rodamiento funcione a pleno rendimiento, debe estar lubricado adecuadamente y protegido contra la corrosión y la entrada de contaminantes. La limpieza tiene una gran influencia sobre la vida útil de un rodamiento.

Para diseñar una disposición de rodamiento es necesario:

- Seleccionar un tipo de rodamiento adecuado
- Determinar un tamaño de rodamiento adecuado

Seleccionar un tipo de rodamiento adecuado se basa en el análisis de los principales parámetros de funcionamiento y las exigencias del usuario. Estos parámetros pueden ser:

- Cargas aplicadas.
- Espacio disponible y entorno.
- Condiciones de funcionamiento.
 - Velocidad.
 - Temperatura.
 - Lubricación.

⁴³ Castro Ruiz, S. (2010). *Rodamiento de bolas*. Recuperado el 2012 de http://www.slideshare.net/bolo_1990/rodamientos-de-bolas.

2.8.1.1 Cargas

Este es un factor importante para conocer el tamaño del rodamiento, para un mismo tamaño, los rodamientos de rodillo soportan mayor carga que los de bolas, además es importante conocer la dirección de la carga.

Los rodamientos de bolas son los más usados cuando las cargas son pequeñas y moderadas, los rodamientos de rodillo son la elección para cargas pesadas y ejes de grande diámetro

2.8.1.2 Espacio disponible.

En muchos casos al menos una de las dimensiones del rodamiento viene definido por el espacio disponible dentro de la máquina o bien el diámetro del eje.

Para pequeños montajes, normalmente se emplean rodamiento de bolas.

Para grandes dimensiones deben emplearse rodamiento de rodillos.

2.8.1.3 Selección del tamaño de rodamiento

El tamaño de rodamiento se selecciona en base a su capacidad de carga y las exigencias en cuanto a duración y fiabilidad requeridas para la aplicación en cuestión. En todos los catálogos se puede encontrar valores para capacidad de carga estática C_o y capacidad de carga dinámica C .

La capacidad de carga estática se utiliza en los cálculos en que los rodamientos giran a velocidades muy baja, están sometidos a movimientos lentos de oscilación o cuando están estacionarios bajo carga durante ciertos periodos de tiempo.

2.9 GENERADORES ELÉCTRICOS⁴⁴

En un aerogenerador se transforma energía cinética del viento en energía mecánica mediante el giro del rotor eólico. Esta energía mecánica que aparece en el eje de éste rotor en forma de par y vueltas por unidad de tiempo, se transforma en energía eléctrica mediante una máquina eléctrica, que opera en modo generador de energía eléctrica, gracias al giro del eje del rotor del aerogenerador, provocado por la acción del viento sobre las palas.

La maquina eléctrica puede ser de distinto tipo dependiendo del tipo de aerogenerador y su modo de operación (operación a velocidad de rotación del rotor cuasi-constante o a velocidad de rotación variable). La velocidad de rotación típica del rotor de un aerogenerador se encuentra en el rango de 20 a 100 rpm para aerogeneradores de gran potencia y de entre 100 y 400 rpm para aerogeneradores de pequeña potencia. Las máquinas eléctricas convencionales (con bajo número de polos) suelen tener velocidades de sincronismo de entre 750 y 3000 rpm. La solución de acoplamiento pasa por utilizar una transmisión o caja multiplicadora que acople la relación par/vueltas del rotor de la turbina y del generador eléctrico o utilizar generadores eléctricos específicos que tengan velocidades de sincronismo bajas equivalentes al rango de velocidades de rotación del rotor (generadores con gran número de polos).

Los generadores eléctricos son generadores que proporcionan corriente continua como los dínamos, o corriente alterna como los alternadores que a su vez pueden ser de inducción (asíncronos) o de excitación (síncronos) se analizará los más usados para aerogeneradores de potencia baja.

44 UTE. *Sistemas de generación eléctrica para aerogeneradores. Recuperado el 2012 de http://www.ute.com.uy/empresa/entorno/Energias_Renovables/eolica/Actividad_2002/Eolica_Generadores.pdf*

2.9.1 GENERADORES DE CORRIENTE CONTINUA.

Los aerogeneradores con generador eléctrico de corriente continua o dinamos están totalmente descartados para máquinas de alta potencia, ya que sólo se pueden conectar a la red eléctrica mediante convertidores electrónicos que conviertan la corriente continua a alterna. Únicamente, en aplicaciones aisladas de baja potencia (100 a 500 watts), en las cuales el sistema de acumulación eléctrica utilizado sea una batería se han utilizado. El alto precio de la máquina y el alto coste de mantenimiento (cambio de escobillas, etc.) hacen también que su uso sea marginal y hayan sido sustituidos por alternadores síncronos de imanes permanentes que junto a un puente rectificador son muy útiles para aplicaciones en corriente continua.

2.9.2 GENERADORES SÍNCRONOS MULTIPOLARES CON IMANES PERMANENTES.

En aerogeneradores de pequeña potencia (hasta 12 kW) se utilizan mayormente generadores síncronos de imanes permanentes. Esto es debido principalmente a su robustez y su bajo mantenimiento, evitan el uso de cajas multiplicadoras, aunque su precio es algo mayor. Este tipo de generadores se está utilizando cada vez más en aerogeneradores de gran potencia debido a lo reducido de su peso y volumen al utilizar imanes de alto magnetismo.

En éste tipo de generadores la tensión de salida depende únicamente de la velocidad de giro del rotor, al no poder variar la corriente de excitación del circuito inductor. Para una determinada velocidad de rotación el generador se saturará

Existen distintas topologías de generadores de imanes permanentes. La mayor diferencia estriba en el camino de flujo magnético. Este puede ser radial (normalmente en generadores de pequeña potencia) o axial.

Es típico ver generadores de imanes permanentes de dos, de tres y de hasta seis o más fases. Sin embargo el número de imanes es mucho más flexible, desde 2 a 30 en generadores de pequeña potencia, debido a su geometría y de hasta 90 imanes en generadores de gran potencia. Hay que tener en cuenta que un mayor número de imanes ofrece un mayor par para el mismo nivel de corriente. Por otro lado, un mayor número de imanes implica un menor sitio para implementarlo. El número ideal de imanes dependerá de la geometría del generador y de las propiedades de los materiales utilizados

CAPÍTULO III

3 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

3.1 ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Para realizar una buena selección de alternativas, se toma en cuenta los parámetros de diseño, y los parámetros de funcionalidad.

3.1.1 PARÁMETROS DE DISEÑO

Para considerar los parámetros de diseño debemos tomar en cuenta que el generador eólico por su baja potencia de generación es para uso doméstico, y su uso se puede dar en granjas, en casas alejadas de la red del sistema eléctrico ecuatoriano, debido a eso se toma los siguientes parámetros.

- Trabajo sometido a bajas velocidades de viento.
- Generación superior a 200 watts.
- Costos de fabricación: Este valor no debe exceder al valor propuesto en los objetivos del proyecto 800 dólares americanos.
- Facilidad de montaje y desmontaje.
- Facilidad de construcción.
- Facilidad de mantenimiento

3.1.2 PARÁMETROS DE FUNCIONALIDAD

La máquina a diseñar debe tener características tales que permita:

- El traslado de la máquina.
- No debe presentar ruido excesivo cuando está funcionando.

- Fácil instalación.

3.2 ESTUDIO DE ALTERNATIVAS

Después del análisis de los parámetros de diseño y funcionalidad se presentan las siguientes alternativas que van acorde a los parámetros requeridos:

- Generador eólico horizontal con palas de diseño aerodinámico.
- Generador eólico con palas chapas de curvada.
- Generador eólico vertical Savonius.

3.2.1 ALTERNATIVA N°1: GENERADOR EÓLICO HORIZONTAL CON PALAS AERODINÁMICAS

Son los más utilizados en la construcción de generadores de alta potencia y mediana potencia por su alta eficiencia, funcionan con valores de TSR entre 4 y 15 Tabla2.1.

Su fabricación es compleja ya que depende de los ángulos, espesor y ancho figura 3.1, los cuales van variando con el radio, esto hace que sus costos sean elevados.

En los generadores de baja potencia es factible su uso, siempre y cuando se use perfiles linealizados.

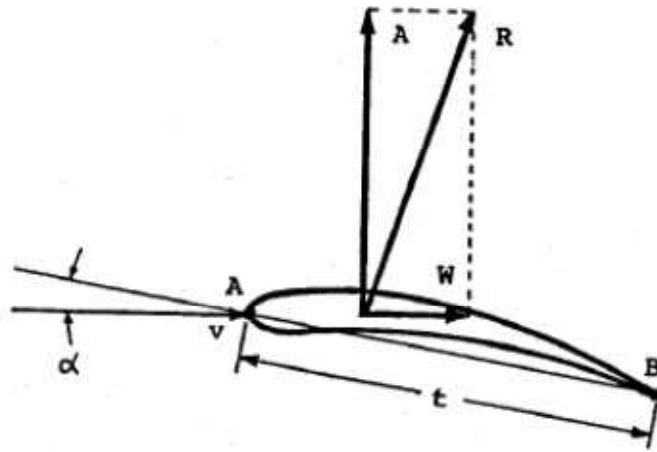


Figura 3. 1. Pala de perfil aerodinámico⁴⁵

3.2.2 ALTERNATIVA N²: GENERADOR EÓLICO CON PALAS DE CHAPA CURVADA.

Las palas de chapa curvada (figura 3.2) se utiliza con el fin de abaratar costos de construcción en este tipo de palas se utiliza $\lambda_o = \lambda_d = 5$ como máximo valor.

A través de la figura 3.3 se puede observar que una chapa con 5% de curvatura puede ser aceptada para un aerogenerador de baja potencia.

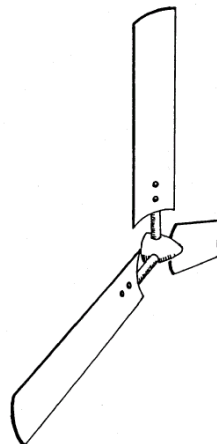


Figura 3. 2. Palas de Chapa Curvada⁴⁶

45 Voneschen, M. F.(2009), *Introducción a la Teoría de las Turbinas Eólicas*. pág.57

46 *Ibidem*, pág.67

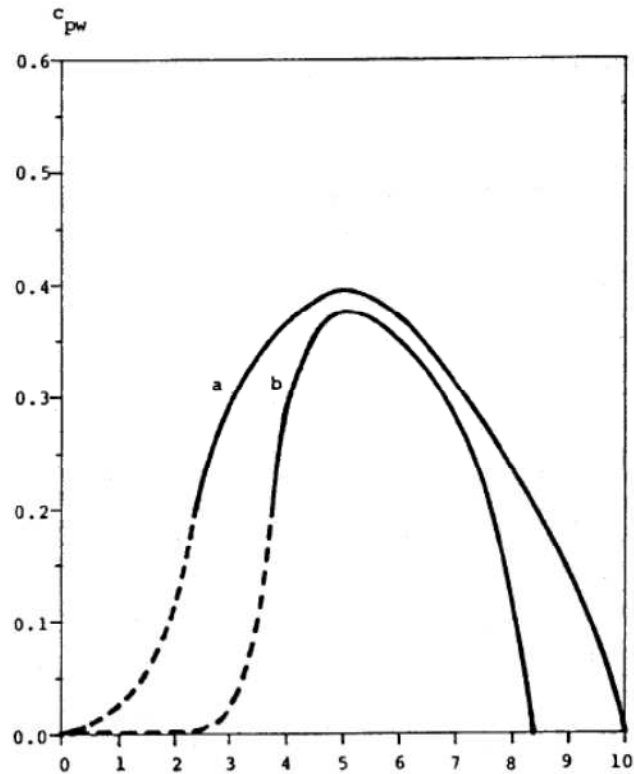


Figura 3. 3. Características perfil NACA (a) y Chapa curvada 5%(b)⁴⁷

3.2.3 ALTERNATIVA N°3: GENERADOR EÓLICO VERTICAL SAVONIUS

El generador Savonius (figura 3.4), cumple con algunos parámetros propuestos en su diseño y funcionalidad sus costos de fabricación son bajos, fácil diseño, fácil construcción y no necesita de mantenimiento.

A pesar de que tiene varias ventajas existe un parámetro muy importante de diseño y es su eficiencia, si observamos en la figura 2.2 la eficiencia del generador eólico Savonius es cercano al 15 % lo cual en referencia a los generadores eólicos horizontales es bajo, siendo esta una desventaja grande.

⁴⁷ Voneschen, M. F.(2009), *Introducción a la Teoría de las Turbinas Eólicas*. pág. 67.

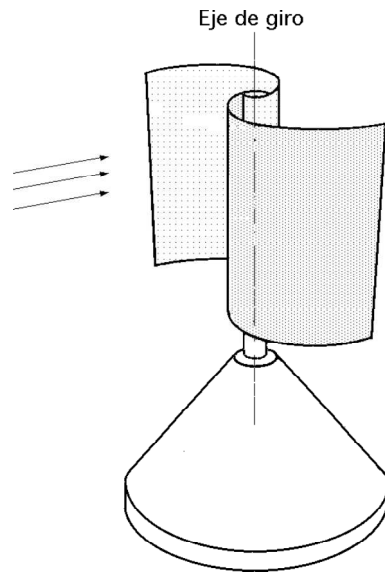


Figura 3. 4. Aerogenerador Savonius.⁴⁸

3.3 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

3.3.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVA

La selección del generador eólico, se basa en diferentes criterios de comparación.

- Facilidad de construcción.
- Operación.
- Costos de fabricación.
- Mantenimiento.
- Rendimiento

3.3.2 MÉTODO DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVA.

Para la selección se utilizará “el método ordinal corregido de criterios ponderados”⁴⁹, el cual permite obtener resultados globales suficientemente significativos. La forma de evaluar los criterios es enfrentándolos en una tabla con los siguientes valores.

⁴⁸ Cueste Santianes, M. J.(2008), *Aerogeneradores de potencia inferiores a 100 Kw*,
⁴⁹ RIBAS I Carles, 202, *Diseño Concurrente*, pág. 59.

1 si la opción de diseño de la fila es superior al de la columna.

0.5 si la opción de diseño de la fila es igual al de la columna.

0 si la opción de diseño de la fila es inferior al de la columna.

3.3.3 EVALUACIÓN DE FACTORES DE DISEÑO

Tabla 3. 1. Evaluación de Factores de Diseño.⁵⁰

FACTORES	FACILIDAD DE CONSTRUCCIÓN	OPERACIÓN	COSTOS DE FABRICACIÓN	MANTENIMIENTO	RENDIMIENTO	Σ	PONDERADO
FACILIDAD DE CONSTRUCCIÓN		1	0.5	1	0.5	3	0.28
OPERACIÓN	0		0	0.5	0	0.5	0.04
COSTOS DE FABRICACIÓN	0.5	1		1	0.5	3	0.28
MANTENIMIENTO	0	0.5	0		0	0.5	0.04
RENDIMIENTO	1	1	0.5	1		3.5	0.33
					TOTAL	10.5	1

Tabla 3. 2. Análisis del Factor Facilidad de Construcción⁵¹

FACILIDAD DE CONSTRUCCIÓN	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	Σ	PONDERADO
ALTERNATIVA 1		0	0	0	0
ALTERNATIVA 2	1		0.5	1.5	0.5
ALTERNATIVA 3	1	0.5		1.5	0.5
			TOTAL	3	1

⁵⁰ Elaboración propia.

⁵¹ Elaboración propia.

Tabla 3. 3. Análisis del Factor Operación⁵²

OPERACIÓN	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	Σ	PONDERADO
ALTERNATIVA 1		0.5	0	0.5	0.16
ALTERNATIVA 2	0.5		0	0.5	0.16
ALTERNATIVA 3	1	1		2	0.66
			TOTAL	3	1

Tabla 3. 4. Análisis del Factor Costos de Fabricación⁵³

COSTOS DE FABRICACIÓN	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	Σ	PONDERADO
ALTERNATIVA 1		0	0	0	0
ALTERNATIVA 2	1		0.5	1.5	0.5
ALTERNATIVA 3	1	0.5		1.5	0.5
			TOTAL	3	1

52 Elaboración propia.

53 Elaboración propia.

Tabla 3. 5. Análisis del Factor Mantenimiento⁵⁴

MANTENIMIENTO	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	Σ	PONDERADO
ALTERNATIVA 1		0	0	0	0
ALTERNATIVA 2	1		0	1	0.33
ALTERNATIVA 3	1	2		2	0.66
			TOTAL	3	1

Tabla 3. 6. Análisis del Factor Rendimiento⁵⁵

RENDIMIENTO	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	Σ	PONDERADO
ALTERNATIVA 1		1	1	2	0.66
ALTERNATIVA 2	0		1	1	0.33
ALTERNATIVA 3	0	0		0	0
			TOTAL	3	1

Tabla 3. 7. Selección de la Alternativa a Diseñar⁵⁶

CONCLUSIONES	FACILIDAD DE CONSTRUCCIÓN	OPERACIÓN	COSTOS DE FABRICACIÓN	MANTENIMIENTO	RENDIMIENTO	TOTAL
ALTERNATIVA 1	0	0.0064	0	0	0.21	0.216
ALTERNATIVA 2	0.14	0.0064	0.14	0.0132	0.10	0.39
ALTERNATIVA 3	0.14	0.026	0.14	0.0264	0	0.30

54 Elaboración propia.

55 Elaboración propia.

56 Elaboración propia.

Una vez realizada la evaluación de criterios de diseño, mediante “el método ordinal corregido de criterios ponderados” llegamos a la conclusión de que la mejor alternativa para diseño es la “Alternativa N2” la cual es un generador horizontal con palas de chapa curvada.

CAPÍTULO IV

4 DISEÑO DEL GENERADOR EÓLICO.

Una vez que se ha seleccionado el generador eólico más apropiado, se diseña y se selecciona los diferentes componentes mecánicos y eléctricos que intervienen en nuestro diseño.

4.1 DISEÑO DE LOS ELEMENTOS MECÁNICOS

Para empezar a realizar los cálculos se debe tener presente los diferentes parámetros establecidos

Velocidad de viento: 6 m/s

Potencia generada: 200 watts.

Densidad del aire: 1.25 Kg / m³

Perfil elegido: palas de chapa curvada 5%

4.1.1 ROTOR.

Como se indico anteriormente el rotor es la base de un generador eólico, este consta de los alabes y el buje.

Una base principal para empezar hacer los cálculos es determinar el número de los alabes

4.1.1.1 Selección número de álabes.

Como se ve en los capítulos anteriores el número de alabes que mejor se adapta a un generador eólico de baja potencia es 3 alabes, las mismas que irán situadas

a 120° para tener un sistema equilibrado (figura 4. 1), Los alabes a su vez van ajustados al buje.

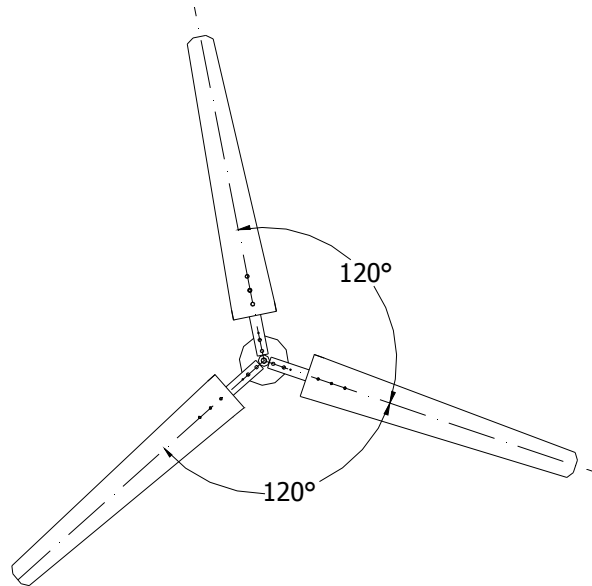


Figura 4. 1. Distribución de las Palas⁵⁷

4.1.1.2 Cálculo del diámetro.

Se utiliza la ecuación 2.7 simplificada de la cual se despeja el diámetro y nos queda:

$$D = \sqrt{\frac{P_{\text{generada}}}{0.49 \cdot \rho \cdot C_p \cdot V^3}}$$

Para lo cual nuestro $C_p = 0.42$ se obtiene de la gráfica 4.2 con el número de alabes que es de 3 que ya ha sido seleccionado.

⁵⁷ Elaboración propia.

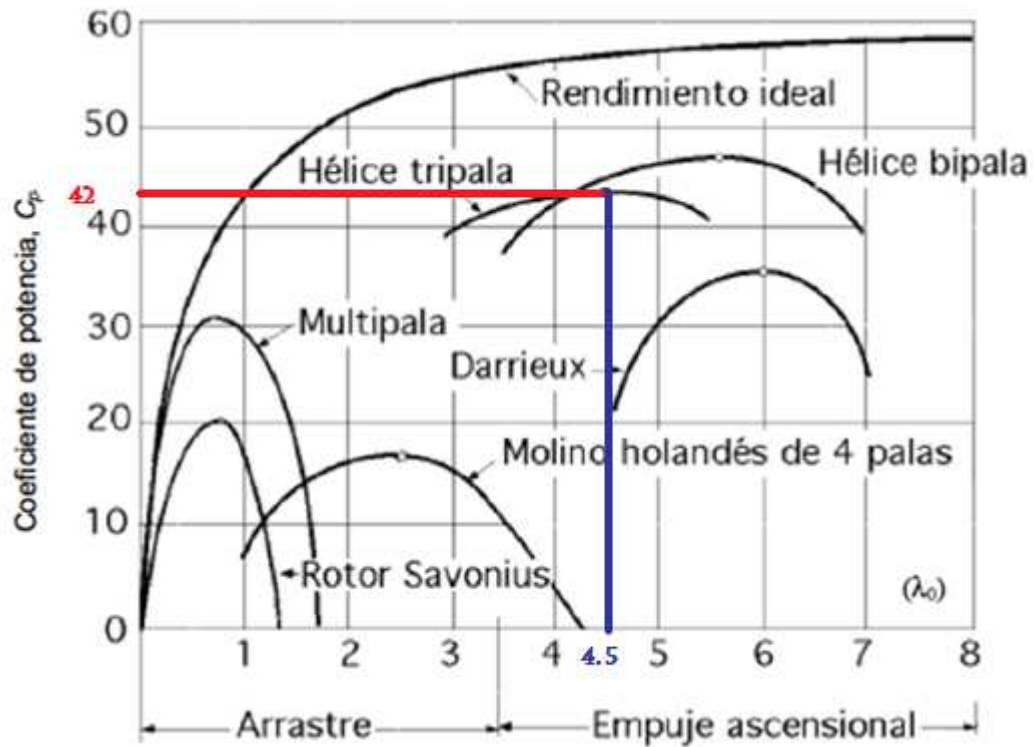


Figura 4. 2. Selección de C_p y TSR ⁵⁸

El rendimiento total de un aerogenerador es

$$\eta_t = \eta_m + \eta_e$$

$$\eta_t = 0.9 \times 0.85$$

$$\eta_t = 0.76$$

Con lo cual el diámetro del rotor será de la ecuación 4.1:

$$D = 2.43 \text{ m}$$

4.1.1.3 Velocidad de giro del eje.

La velocidad de giro de la turbina eólica se obtiene de la ecuación 2.14:

$$n = \frac{60 \cdot TSR \cdot V}{\pi \cdot D}$$

⁵⁸ Elaboración propia.

Para saber las rpm a las que gira el eje del rotor será preciso saber el valor de TSR de diseño regresamos a la figura 4.2 observamos la línea azul que nos da el valor de:

$$\text{TSR} = 4.5$$

Con las rpm será:

$$n = 213.96 \text{ rpm}$$

4.1.1.4 Cálculo de la sección del perfil

Cabe indicar que el perfil que se va a utilizar en nuestro diseño son perfiles de chapa curvada 5%, por lo tanto se utilizara las fórmulas que este tipo de palas nos permitan.

Lo primero que se debe definir es la longitud útil de la pala⁵⁹ que es el 86% de la pala total figura 4.3.

Se tiene el Diámetro.

$$D = 2.43 \text{ m}$$

Por lo tanto

$$R = 1.215 \text{ m}$$

La longitud útil es

$$\text{longitud útil} = 0.86 R$$

$$\text{longitud útil} = 1 \text{ m}$$

59 BASTIANON Ricardo, *Cálculo Simple de la Hélice de un Aerogenerador*, PAG 2

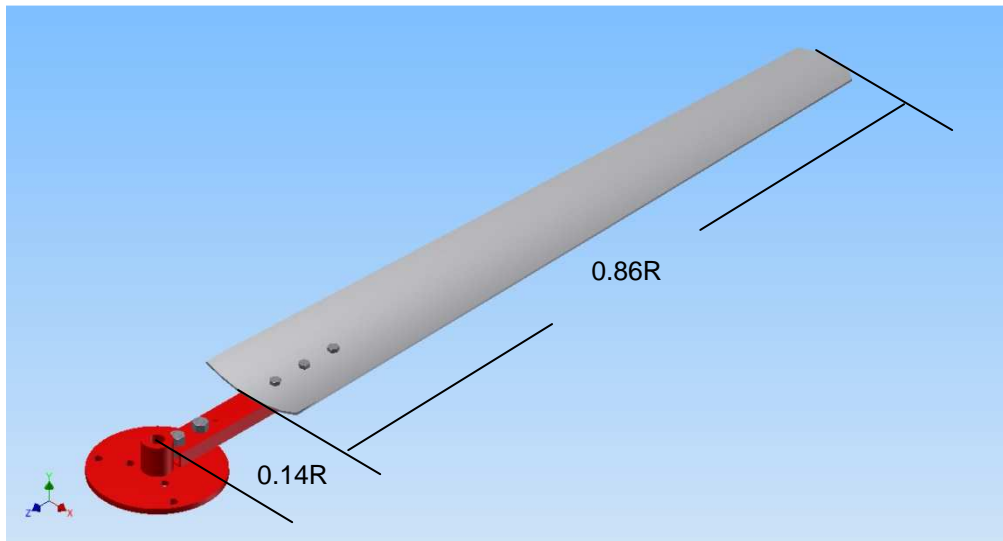


Figura 4. 3. Longitud útil de la pala⁶⁰

El ancho de la pala en función de su radio se puede calcular con la ecuación 2.22

$$t^* = \vartheta^* \frac{R}{Z * Ca}$$

De donde el valor de $\vartheta^* = 0.34$ que se obtiene de la figura 2.17, ya que sabemos que $\lambda_d = 4.5$.

El valor de Ca se puede obtener de la figura 2.10, conociendo el ángulo óptimo de ataque para un alabe de chapa curvad 5% es $\alpha = 3^0$, por lo tanto nuestro Ca=0.7.

Por lo tanto nuestra ecuación quedaría.

$$t^* = 0.34 \frac{1.215}{3 * 0.7}$$

$$t^* = 0.19 \text{ m}$$

⁶⁰ Elaboración propia (diseño autodesk inventor)

Para aumentar el rendimiento de nuestro aerogenerador, hacemos una variación lineal desde la raíz de la pala hasta la punta de la misma utilizando las ecuaciones 2.23 y 2.24

$$c_{pp} = \bar{c} - 0,025 * l$$

$$c_{raíz} = \bar{c} + 0,025 * l$$

Para poder utilizar estas ecuaciones necesitamos conocer la cuerda media, cuyo valor se puede obtener de la ecuación 2.25.

$$\bar{c} = \frac{\Omega * \pi * R}{Z}$$

La solidez para un TSR=4.5 es $\Omega = 0.1$ se obtiene de la gráfica 2.15. Por lo tanto:

$$\bar{c} = \frac{0.1 * \pi * 1.215}{3}$$

$$\bar{c} = 0.127 \text{ m}$$

$$c_{pp} = 0.127 - 0,025 * 1$$

$$c_{pp} = 0.10 \text{ m}$$

$$c_{raíz} = 0.127 + 0,025 * 1$$

$$c_{raíz} = 0.15$$

Para calcular el alto de la curvatura conocido como flecha (f) observamos en la figura 2.10 en la parte superior.

$$f = 0.05 t$$

$$f = 0.05 * 16 \text{ cm}$$

$$f = 0.8 \text{ cm}$$

El espesor de la placa también se puede observar en la figura 2.10.

$$e = 0.015 t$$

$$e = 0.015 * 15$$

$$e = 2.2 \text{ mm}$$

Para que la geometría de la pala quede completa se calcula el ángulo de calado con la ecuación 2.21.

$$\delta^* = \beta^* - \alpha^*$$

$\beta^* = 12^\circ$ Se obtiene de la figura 2.17 conocemos que el ángulo óptimo de ataque para una placa de chapa curvada 5% es $\alpha = 3^\circ$ entonces se tiene que el ángulo de calado es:

$$\delta^* = 12^\circ - 3^\circ$$

$$\delta^* = 9^\circ$$

4.1.1.5 Buje

Es el que se encarga de transmitir la potencia al eje, además permite la unión de las palas al eje.

El diseño del buje se lo realiza partiendo de las dimensiones del eje del generador, ya que la transmisión de potencia va a ser directa, además se toma en

cuenta las dimensiones de la pala en relación con la del diámetro total, la forma de unión entre el eje transmisor de potencia y el buje se observa en la figura 4.4.

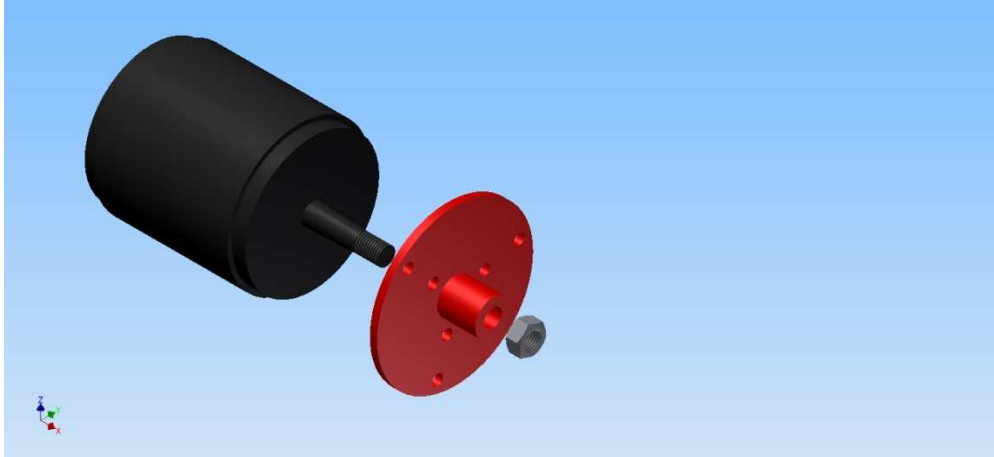


Figura 4. 4. Buje – Eje generador⁶¹

Debido a la fuerza centrífuga que soportan las palas debemos tomar en cuenta que la unión palas buje debe ser precisa figura 4.5, y que los pernos utilizados soporten las fuerzas de corte a los que van a estar sometidos.

El material utilizado en la fabricación del buje es acero A-36.

⁶¹ Elaboración propia (diseño autodesk inventor).

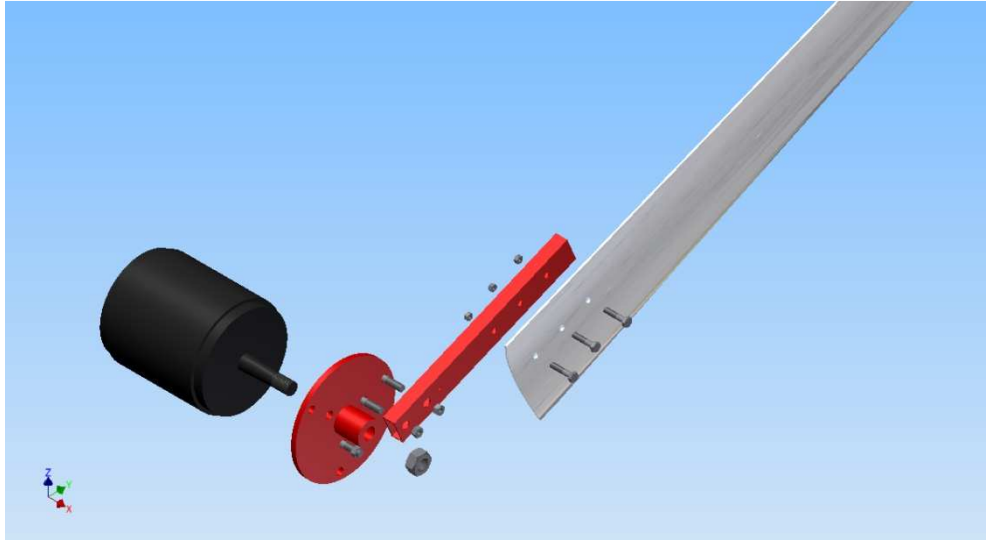


Figura 4. 5. Unión palas-buje⁶²

4.1.1.5.1 Cálculo de pernos

Los pernos van estar sometidos a corte, por lo tanto su diseño se lo realiza para este caso en particular.

Se utiliza la ecuación 2.33.

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{Q}{2n}$$

Para realizar nuestros cálculos se indica que $F = C_{\text{entrífuga}}$, que es la fuerza a la que están sometido los pernos.

Para el cálculo de la fuerza centrífuga tenemos la ecuación 2.26.

$$F_{\text{cent}} = \frac{\pi^2}{1800} m_{\text{pala}} n^2 r_g$$

Tenemos que:

⁶² Elaboración propia (diseño autodesk inventor)

$$m_{\text{pala}} = 2 \text{ lbs} = 0.907 \text{ kg}$$

$$n = 530.96 \text{ rpm}$$

$$r_g = 0.6075 \text{ m}$$

$$F_{\text{cent}} = 851.73 \text{ N}$$

$$\tau = \frac{F}{A}$$

Se utiliza pernos de acero inoxidable 304, que son los más utilizados en el mercado ecuatoriano, sus características se puede ver en la tabla 4.2.

Tabla 4. 1. Propiedades Acero inoxidable ⁶³

PROPIEDADES MECÁNICAS	VALORES
Resistencia a la fluencia	310 MPa 45 KSI
Resistencia mecánica	620 MPa 90 KSI
Elongación (30%)	En 50 mm
Reducción de Área	40 %
Módulo de la elasticidad	200 GPa 29000 KSI

$$\tau_{\text{admissible}} = 0.5 S_Y$$

$$S_Y = 310 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\text{admissible}} = 155 \text{ Mpa} = 155 \text{ N/mm}^2$$

63 Sumitec. *Acero inoxidable*. Recuperado 2013 de <http://www.sumiteccr.com/Aplicaciones/Articulos/pdfs/AISI%20304.pdf>.

$$A = \frac{F}{\tau}$$

$$A = \frac{851.73}{155}$$

$$A = 5.49 \text{ mm}^2$$

Con este valor podemos encontrar el diámetro del perno.

$$A = \frac{\pi * D^2}{4}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}}$$

$$D = 2.64 \text{ mm}$$

Con este valor demostramos que el valor elegido en los pernos es el adecuado.

4.1.1.6 Bastidor

El bastidor es una parte muy importante del aerogenerador ya que es la pieza que sostiene a todo el aerogenerador, está compuesto por dos placas las que van soldadas a bocín grande en donde va la torre, tiene dos bocines pequeños, que son los que permiten la conexión con la cola figura 4.6

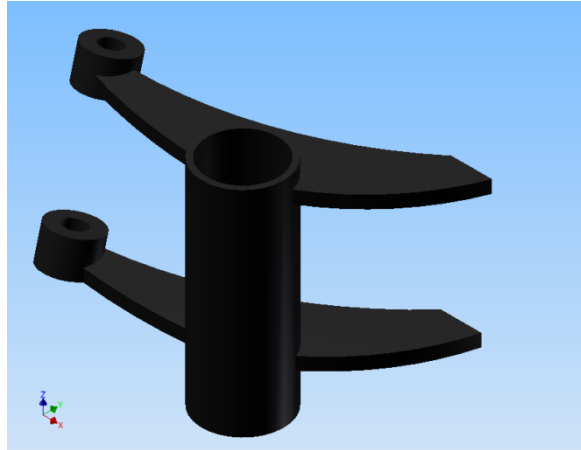


Figura 4. 6. Bastidor⁶⁴

4.2 DISEÑO DEL SISTEMA DE ORIENTACIÓN

En el capítulo 2 se estudio los diferente sistemas de orientación existentes para aplicar en un aerogenerador, de donde por su simplicidad y sus bajos costos de fabricación se a escogido el sistema de orientación por veleta (figura 4.7).

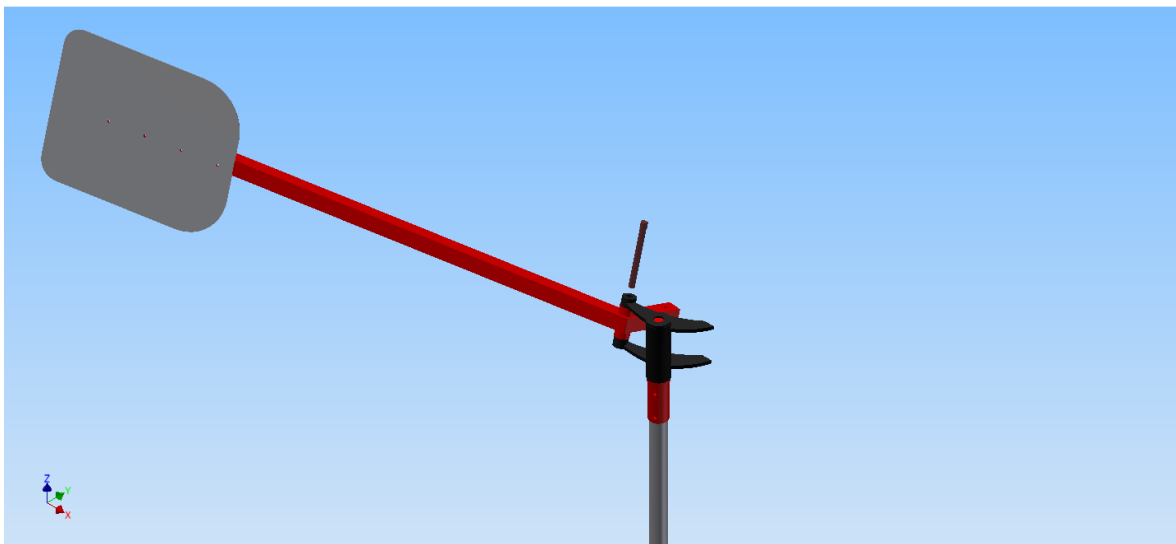


Figura 4. 7. Unión Bastidor Sistema de Orientación.⁶⁵

Para dimensionar la veleta se utiliza la ecuación 2.23.

⁶⁴ Elaboración propia (diseño autodesk inventor)

⁶⁵ Elaboración propia (diseño autodesk inventor).

$$A_{\text{veleta}} = 0.4\pi R^2$$

$$A_{\text{veleta}} = 0.4\pi(1.215)^2$$

$$A_{\text{veleta}} = 1.85 \text{ m}^2$$

La forma de la veleta, su único requerimiento es que su área sea como mínima la calculada, el material con el que se fabrica es acero inoxidable.

El dimensionamiento de la cola se obtiene a partir de la ecuación 2.22.

$$m = 4s$$

Para recordar que es m y s podemos observar la figura 2.19.

La primera distancia que se obtuvo fue **s** cuyo valor es 24 cm, con este valor se calculo m.

$$m = 4 * 24$$

$$m = 96 \text{ cm}$$

Los valores que se obtienen son los mínimos con los cuales puede ser construido nuestro aerogenerador por lo tanto se le puede variar.

El material que se utiliza en la fabricación de la cola es acero estructural A 36, en perfil L. se le puso un refuerzo en la cola para mayor seguridad.

La forma de unión del sistema de orientación al resto de generador es mediante un pasador entre los bocines figura 4.7.

4.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE REGULACIÓN

El sistema de regulación se diseño basado en uno ya existente, el del Aerogenerador CEETA-01 explicado en capítulo 2. Figura 4.8 y 4.9.

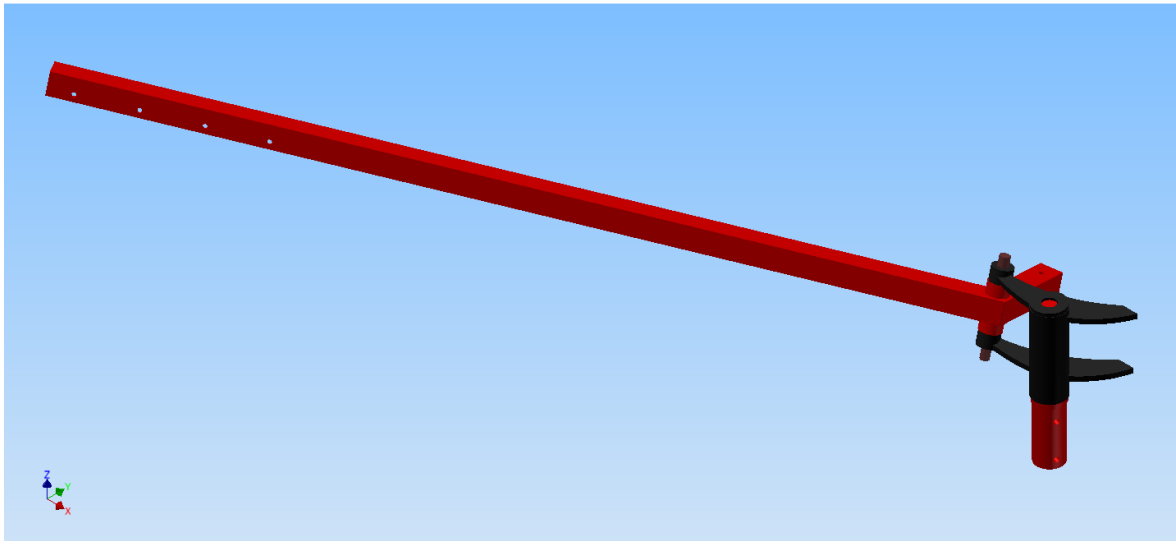


Figura 4. 8. Sistema de Regulación por momento en la veleta⁶⁶

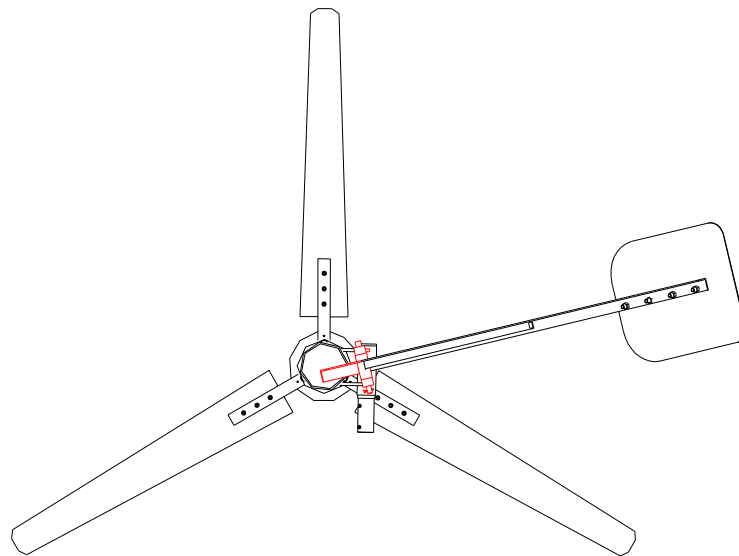


Figura 4. 9. Ángulo de posicionamiento de la cola.⁶⁷

4.4 UNION TORRE- BASTIDOR

Para realizar el diseño de esta unión, se toma en cuenta el grado de movimiento que el bastidor debe tener respecto a la torre.

⁶⁶ Elaboración propia (diseño autodesk inventor)

⁶⁷ Elaboración propia (diseño autodesk inventor)

La unión se realiza mediante un eje el cual va acoplado al bocín del bastidor mediante un sistema de rodamiento figura 4.10.

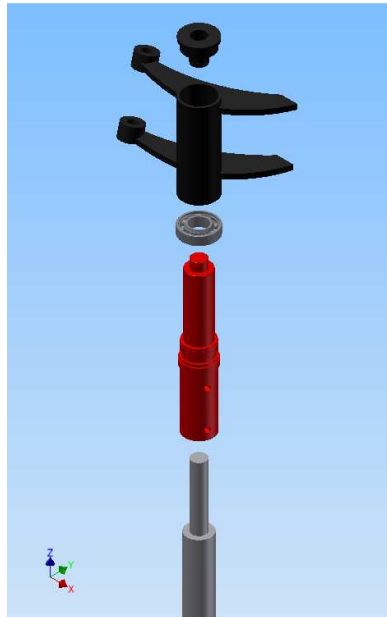


Figura 4. 10. Acoplamiento torre-bastidor⁶⁸

4.4.1 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE RODAMIENTO⁶⁹

Debido a que nuestro rodamiento va estar sometido a:

- Cargas axiales.
- Bajo número de revoluciones < 10 rpm.
- Cargas son moderadas.

Se selecciona rodamiento axial de bolas ya que cumple con nuestras características.

Además se conoce el diámetro externo D y diámetro interno d del rodamiento figura 4.11 ya que este deberá ingresar en el bocín del bastidor (diámetro externo), y además entrar en el eje conector bastidor-torre (diámetro interno),

⁶⁸ Elaboración propia (diseño autodesk inventor)

⁶⁹ NTN. *Rodamiento de bolas y de Rodillos*. Recuperado 2013 de http://www.ntnmexico.com.mx/catalogo/catalogos/cat4_2202-VII-S_CAT_Rodam_Bolas_y_Rodillos-esp.pdf

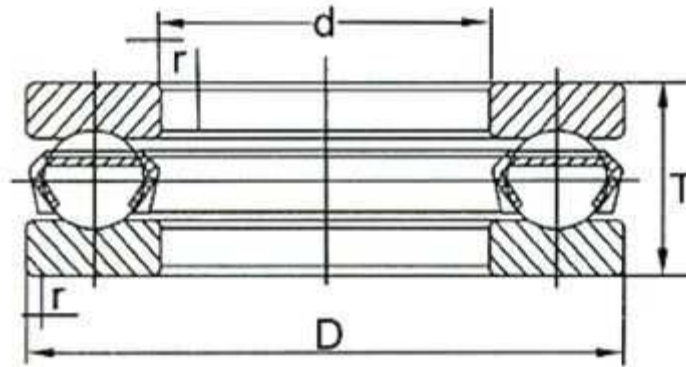


Figura 4. 11. Rodamiento axial de bolas⁷⁰

Los datos de diámetro que estamos buscando son:

$d = 35 \text{ mm}$

$D = 52 \text{ mm}$

Buscando en el catálogo, en la sección de rodamientos axiales de bolas, encontramos que el rodamiento buscado es el **51107**. Que tiene las siguientes características tabla 4.3.

Tabla 4. 2. Características de algunos Rodamientos⁷¹

Dimensiones principales			Capacidad Básica de Carga				Velocidades Límites		Designación
Mm			Dinámica	Estática	Dinámica	Estática	Rpm		
d	D	T	kN	kN	Kgf	Kgf	Grasa	aceite	
			Ca	Coa	Ca	Coa			
35	52	12	20.4	44.5	2080	4550	3900	5600	51107
	62	18	39.0	78.0	4000	7950	2900	4200	51207
	68	24	55.5	105	5650	10700	2400	3500	51307
	80	32	87.0	155	8850	15800	1900	2800	51407

70 NTN. *Rodamiento de bolas y de Rodillos*. Recuperado 2013 de http://www.ntnmexico.com.mx/catalogo/catalogos/cat4_2202-VII-S_CAT_Rodam_Bolas_y_Rodillos-esp.pdf.

71 *Ibidem*, pág.B274.

Se toma el dato de carga estática, ya que nuestro rodamiento va a estar trabajando a muy bajas revoluciones, llegando a estar parte del tiempo totalmente en reposo.

$$C_{0a} = 44,5 \text{ kN} = 2080 \text{ kgf} = 20384 \text{ N}$$

Calculamos la carga estática en el aerogenerador y comparamos con la del catálogo.

Pesos en el aerogenerador

Peso del generador 38 lb

Peso del buje con las palas 8 lb

Peso total 46 lbs= 20 Kg

$$C_{0a} = S_o * P_0$$

Sabiendo que este rodamiento efectúa movimientos a muy bajas revoluciones

Se tiene que $S_o = 1.6$.

$$P_0 = m * g$$

$$P_0 = m * g$$

$$P_0 = 20 * 9.8 = 196 \text{ N}$$

$$C_{0a} = 1.6 * 196$$

$$C_{0a} = 313.6 \text{ N}$$

Este valor de carga estática es mucho menor al presentado por el rodamiento 51107, por lo tanto el rodamiento elegido es el correcto.

CAPÍTULO V

5 PUEBAS Y RESULTADOS

Una vez construido el generador eólico se realiza las pruebas y se obtiene gráficas de funcionamiento.

Las pruebas idóneas para un aerogenerador se realizan en un túnel de viento, pero al no tener un laboratorio equipado con un túnel de viento lo suficientemente amplio que vaya de acuerdo al tamaño del aerogenerador diseñado, se instala el aerogenerador en un camioneta y se hace variar la velocidad del viento, variando la velocidad del vehículo. Figura 5.1.



Figura 5. 1. Pruebas del Aerogenerador.⁷²

⁷² Elaboración propia.

También se instaló el generador en sitio, en la Parroquia de San Pablo del Lago provincia de Imbabura, ya que se observó que se tenía vientos que llegaban a los 12 m/s siendo el valor más alto alcanzado, con un promedio de viento de 7 m/s figura 5.2, viento suficiente para que el aerogenerador trabaje eficientemente.



Figura 5. 2. Velocidad del viento en el lugar donde se va a instalar.⁷³

El aerogenerador se instaló en un lugar alto donde no existan obstáculos en el flujo libre del viento figura 5.3 y 5.4

⁷³ Elaboración propia.



Figura 5. 3. Lugar donde se instalo el Aerogenerador.⁷⁴



Figura 5. 4. Pruebas del Aerogenerador en sitio⁷⁵

⁷⁴ Elaboración propia.
⁷⁵ Elaboración propia.

5.1 EQUIPOS UTILIZADOS.

Para medir los parámetros potencia, voltaje, las rpm del eje, velocidad del viento se utilizo instrumentación apropiada:

- Anemómetro
- Tacómetro
- Multímetro
- Vatímetro

5.1.1 ANEMÓMETRO.

Es un aparato meteorológico, el cual mide la velocidad del viento, el utilizado en las pruebas es un anemómetro digital figura 5.2.

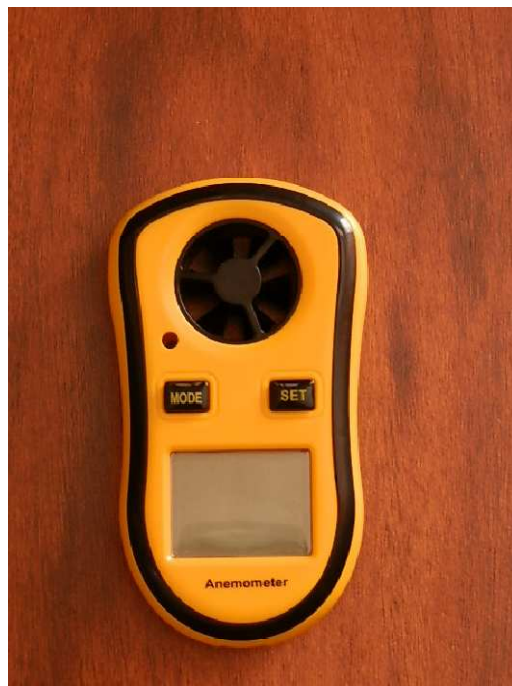


Figura 5. 5. Anemómetro Digital.⁷⁶

Las especificaciones del anemómetro observamos en la tabla 5.1.

⁷⁶ Elaboración propia.

Tabla 5. 1. Especificaciones Anemómetro⁷⁷

Unidad	Rango	Resolución	Umbral	Precisión
m/s	0-30	0.1	0.1	5 %
Km/hr	0.90	03	39	5 %
Ft/min.	0.5860	19	0.3	5 %

5.1.2 TACÓMETRO.

Mide la velocidad de giro de un eje, este valor mide en rpm, el tacómetro utilizado en las pruebas es un tacómetro foto digital. Figura 5.6.

Figura 5. 6. Tacómetro Foto Digital.⁷⁸

Las especificaciones del tacómetro se pueden ver tabla 5.2.

⁷⁷ DIGITAL ANEMOMETER INSTRUCTION MANUAL.

⁷⁸ Elaboración propia.

Tabla 5. 2. Especificaciones Tacómetro⁷⁹

Unidad	Rango	Resolución	Umbral	Precisión
m/s	0-1000	1 rpm		0.05 % + 1 digito

5.1.3 MULTÍMETRO.

También denominado polímetro, es un instrumento eléctrico para medir magnitudes eléctricas activas como corriente o potencia, o magnitudes pasivas como resistencias capacidades y otras (figura 5.7).

Figura 5. 7. Multímetro.⁸⁰

79 DIGITAL PHOTO TACHOMETER OPERATION MANUAL.

80 Elaboración propia.

5.2 GRÁFICAS DE FUNCIONAMIENTO

Estas gráficas nos dan la idea del rendimiento del aerogenerador al comparar las gráficas teóricas con las prácticas.

5.2.1 DATOS TEÓRICOS

Para realizar el cálculo de la potencia, y las rpm teóricas se empleó las ecuaciones 2.7 y 2.16 respectivamente a continuación damos un ejemplo de cómo se obtuvo los datos.

$$P_{generada} = \eta_t 0.49 C_p D^2 V^3$$

Se conoce que:

$$\eta_t = 0.76$$

$$C_p = 0.42$$

$$D = 2.43$$

Datos analizados en el capítulo II.

Tomamos un valor de $V = 6 \text{ m/s}$ para el ejemplo.

En donde el valor de la potencia teórica generada es.

$$P_{generada} = 199.49 \text{ watts}$$

Para el cálculo de las rpm.

$$n = \frac{60 \cdot TSR \cdot V}{\pi \cdot D}$$

Se conoce que:

$$TSR = 4.5$$

$$D = 2.43$$

Para el mismo valor de viento.

$$n = 213 \text{ rpm}$$

En la tabla 5.3 se presentan los resultados obtenidos para velocidades de viento entre 0 y 15 m/s.

Tabla 5. 3. Datos Teóricos.⁸¹

Velocidad del viento(m/s)	RPM TEÓRICAS	POTENCIA TEÓRICA(watts)	POTENCIA DISPONIBLE(watts)
0	0	0	0
1	35,36768	0,9	3
2	70,73536	7	23
3	106,103	24	78
4	141,4707	59	185
5	176,8384	115	362
6	212,2061	200	624
7	247,5738	316	992
8	282,9415	472	1481
9	318,3091	673	2109
10	353,6768	924	2893
11	389,0445	1229	3851
12	424,4122	1595	4999
13	459,7799	2029	6356
14	495,1476	2534	7939
15	530,5152	3117	9765

Con estos datos se procede a realizar las curvas de velocidad del viento vs potencia y velocidad del viento vs RPM, las cuales ayudarán a observar el comportamiento de un generador eólico similar al diseñado pero en condiciones ideales.

⁸¹ Elaboración propia.

La curva de potencia se compara con la curva de la energía disponible en el viento.

Gráfica velocidad del viento vs potencia

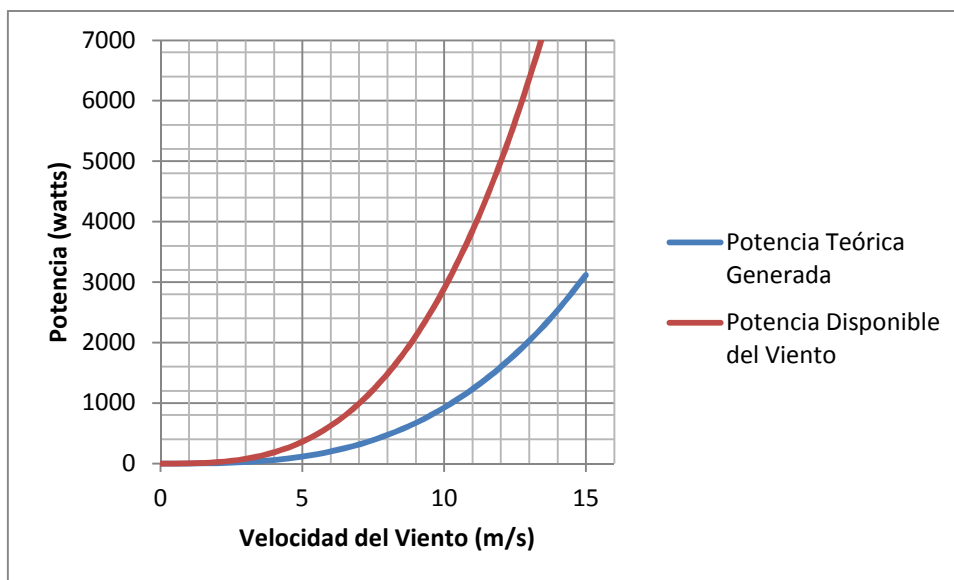


Figura 5. 8. Velocidad del viento vs Potencia.⁸²

La curva de potencia teórica generada muestra la generación de potencia del sistema eólico a lo largo de todo su intervalo de velocidad del viento en el cual se mantiene en operación.

La curva potencia disponible del viento nos indica la potencia que se puede extraer es decir, la que está “contenida en el aire”, la que obtendríamos si pudiéramos convertir el 100% en electricidad.

Si nos fijamos en las curvas, debido a la dependencia cúbica de la velocidad, la curva tiende a crecer en forma descontrolada observando que se puede llegar a obtener potencia infinita lo cual es ilógico ya que es imposible diseñar un aparato

⁸² Elaboración propia.

que desarrolle potencia infinita. Por eso los aerogeneradores tienen una potencia máxima denominada potencia nominal.

Gráfica velocidad del viento vs rpm gráfica

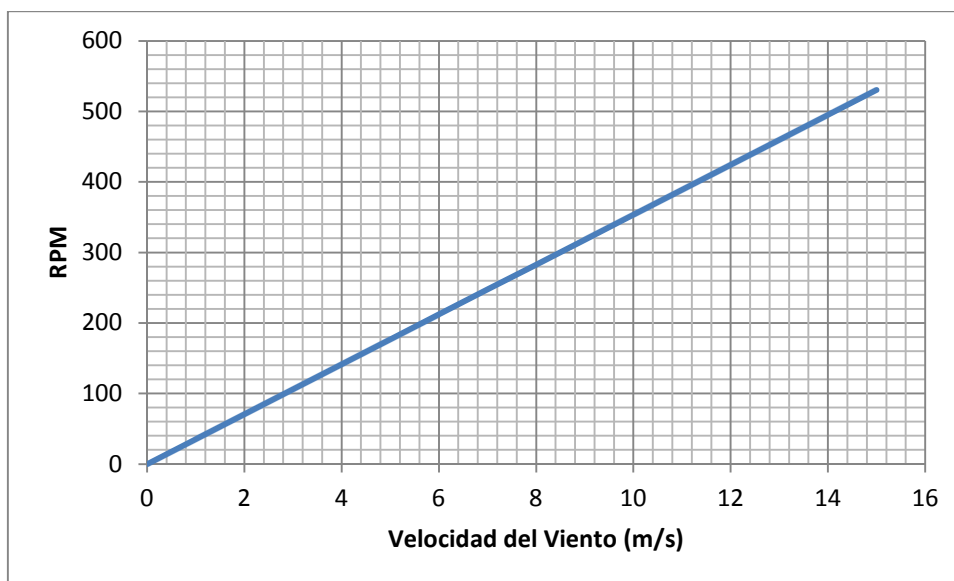


Figura 5. 9 . Velocidad del viento vs RPM (Gráfica teórica).⁸³

5.2.2 DATOS REALES.

La evaluación del sistema de generación eólica se realizó en campo con la instrumentación apropiada para medir los parámetros de salida: potencia, rpm. Para obtener los datos, se creó un ambiente ideal, tratando de asemejarnos al de un laboratorio.

⁸³ Elaboración propia.



Figura 5. 10. Lugar de pruebas.⁸⁴

La prueba se realizó en una recta de aproximadamente 1 km de distancia figura 5.10, esto ayudó para que la camioneta pueda variar gradualmente la velocidad sin cambios bruscos al momento de frenar por curvas existentes, también se tomó en cuenta las condiciones ambientales al momento de realizar las pruebas, verificando con la ayuda del anemómetro que no exista mucha variación en la intensidad de viento para evitar altos porcentajes de error en los datos obtenidos. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 5.4.

84 Elaboración propia.

Tabla 5. 4. Datos Reales.⁸⁵

Velocidad del viento(m/s)	RPM REAL	POTENCIA REAL
0	0	0
1	0	0
2	0	0
3	65	5
4	80	19
5	103	68
6	137	103
7	197	206
8	223	290
9	254	336
10	263	372
11	300	402
12	345	403
13	360	398
14	366	410
15	360	404

Con estos datos se procede a realizar las curvas de velocidad del viento vs potencia y velocidad del viento vs RPM reales, las cuales se comparan con las curvas teóricas.

Como observamos en los datos la velocidad a la que empieza a generar nuestro sistema eólico es a la velocidad de viento de 3 m/s alcanzando una potencia nominal a partir de los 11 m/s.

⁸⁵ Elaboración propia.

Gráfica velocidad del viento vs potencia

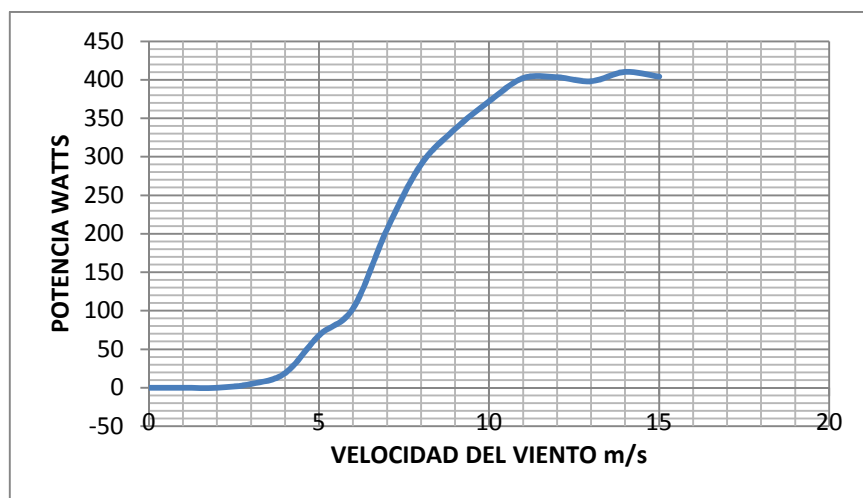


Figura 5. 11. Velocidad vs Potencia.⁸⁶

Gráfica velocidad del viento vs rpm

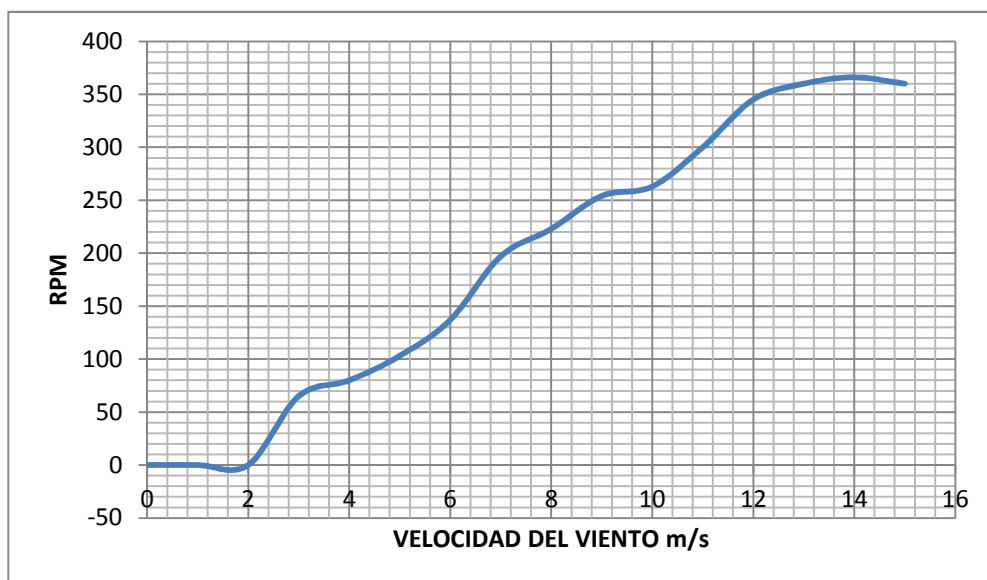


Figura 5. 12. Curvas de comportamiento del sistema aerogenerador con relación a la velocidad de giro del rotor y a la velocidad del viento.⁸⁷

⁸⁶ Elaboración propia.

⁸⁷ Elaboración propia.

Los datos obtenidos en las pruebas de campo, dan las curvas de nuestro sistema de generación eólica las cuales reflejan el comportamiento real del mismo figura 5.11 y 5.12.

A simple vista se observa que las curvas tanto de potencia como de rpm no son bien definidas, esto se debe a que las pruebas al no tener un laboratorio suficientemente equipado son realizadas a campo abierto y se tiene incidencia del viento no creado por el vehículo, la velocidad del viento siempre fluctúa y por más que nosotros tratemos de realizar las pruebas en condiciones semejantes al de un laboratorio no se puede ya que el viento va a estar variando.

CAPÍTULO VI

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Después de haber concluido con éxito el proyecto y haber realizado las pruebas de funcionamiento, se pueden extraer varias conclusiones y dar recomendaciones para una mejora del Aerogenerador.

6.1 CONCLUSIONES

- El seleccionar alabes de chapa curvada, abarató el costo, el proceso de construcción, y simplifico el diseño.
- Debido a que el diseño se realizó con transmisión directa, se evitó pérdidas de potencia, generadas por elementos de transmisión.
- De las pruebas realizadas en campo se tiene que, si bien el sistema fue diseñado para alcanzar una potencia de 200 watts a una velocidad de viento de 6m/s, de acuerdo a las mediciones en campo esta potencia se obtiene a partir de los 7 m/s. Esto se debe a la incertidumbre en la toma de datos.
- El costo total del proyecto es de 800 dólares, considerando mano de obra, materiales, equipos (generador eléctrico) e insumos de fabricación, este costo es muy atractivo para implantar generadores eólicos de baja potencia a nivel rural, considerando que el valor del generador es el que eleva en su mayor porcentaje el costo del proyecto.

- Comparando las gráficas teóricas vs las reales, se observa que los valores reales de potencia son menores a los teóricos. Debido a las pérdidas ocasionadas por la utilización de palas de chapa curvada y a la incertidumbre de los datos.
- El diseño realizado se termino con éxito, ya que se cumplió con todo los objetivos planteados.

6.2 RECOMENDACIONES

Después de haber realizado las diferentes pruebas en campo se ve oportuno tomar algunas recomendaciones, para una mejora en el prototipo que ha sido diseñado.

- Después de una semana de funcionamiento en sitio, la tuerca que ajusta el buje al eje del generador se aflojo, se recomienda buscar la forma más adecuada para que las palas no salgan volando ya que puede causar daños materiales y personales.
- Las pruebas realizadas en campo se debe hacerlo con mucha cautela y evitando elevar la velocidad del vehículo en forma brusca, el anemómetro debe ser la herramienta principal para poder indicar al conductor como debe variar la velocidad.
- Para poder instalar el aerogenerador en sitio, se recomienda hacerlo con dos personas por su peso, para que no exista lesiones de columna.
- La torre que se instale con el aerogenerador debe tener tensores para su seguridad.

- El rendimiento del aerogenerador es bajo, por lo tanto se recomienda instalar baterías para poder almacenar energía eléctrica, para poder en todo momento suministrar energía que demande la casa.
- Al momento de fabricar este aerogenerador se recomienda visitar depósitos de material reutilizable, ya que se encuentra material que nos puede servir y abaratar los costos de fabricación.
- Se recomienda pintar las palas con colores visibles para evitar que las aves se choquen con el aerogenerador.

6.3 REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA.

1. Bastianon, R. *Cálculo Simple de la Hélice de un Aerogenerador*.
2. Cuesta Santianes M. J.(2008), *Aerogeneradores de potencia inferiores a 100 K*.
3. Domínguez, A. B. (2007), *Generadores Eólicos de Baja Potencia*, Buenos Aires, Tomo III.
4. Escudero López J. M. (2004), *Manual de Energía Eólica*.
5. José Chiroque, C. D. (2008). *Microaerogeneradores IT-PE-100*, Lima.
6. Santillán, H. (1986), *Fuentes Renovables de Energía*, Riobamba, Ecuador.
7. Mataix, C. (1975). *Turbomáquinas Hidráulicas*. ICAI.
8. Mur Amada, J. *Curso de Energía Eólica*, Departamento de Energía Eléctrica de la Universidad de Zaragoza.
9. Ruiz Hernández V. *Introducción a la Sostenibilidad de Andalucía*, Ed. Akron.

10. Urquá L. S. (1982) *Manual Práctico para la Construcción de Molinos de Viento*, España.
11. UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENRGÉTICA, *Guía para la Utilización de la Energía Eólica para Bombeo del Agua*, Bogotá Febrero 2003, Documento ANC-0603-14-01.
12. UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENRGÉTICA, *Guía para la Utilización de la Energía Eólica para Bombeo del Agua*, Bogotá Febrero 2003, Documento ANC-0603-18-01.
13. Vargas, J. (2003). *Dibujo Industrial*. Ecuador.
14. Voneschen, M. F. (2009) *Introducción a la Teoría de las Turbinas Eólicas*.
15. Voneschen, M. F. *Como Empezar a Construir un Sencillo Generador Eólico*.
16. DIGITAL PHOTO TACHOMETER OPERATION MANUAL.
17. DIGITAL ANEMOMETER INSTRUCTION MANUAL.
18. Castro Ruiz, S. (2010). *Rodamiento de bolas*. Recuperado el 2012 de http://www.slideshare.net/bolo_1990/rodamientos-de-bolas.
19. Ccramos. *Guía para la utilización de la energía eólica para generación de energía eléctrica*. Recuperado 2012 de <http://www.slideshare.net/ccramos22/guia-para-la-utilizacion-de-la-energia-eolica-para-generacion-de-energia-electrica>.
20. *Diseño de uniones apernadas*. Recuperado de <http://www2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/uniones/union2.html>.
21. El Universo, (2008). *Se inauguró primer parque de energía eólica en Ecuador*. Recuperado 2012 de

<http://www.eluniverso.com/2008/03/19/0001/12/07864C4FA3224FC5A1507124EB1485D7.html>.

22. *Energía Eólica*. Recuperado el 2012 de <http://soloenergia.com.ar/aprendamas/energiaeolica/asptecnicos.html>.
23. Fariñas, E., Jáuregui, S. & Betancourt, J. (sf). *Posicionamiento del rotor y la cola de un pequeño aerogenerador de eje horizontal debido a la influencia de los coeficientes de arrastre y sustentación que afectan la veleta de cola*. Recuperado el 2013 de <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar27/HTML/articulo06.htm>
24. Fernández, P. (2002). *Parámetros de Diseño*. Recuperado el 2012 de <http://www.Pfernandezdiez.es/Energias Alternativas/ eolica/PDFs/04Eolo.pdf>
25. Ferrer Gallardo, F. (2011). *Análisis de la viabilidad de conexión de parques eólicos a la red eléctrica*. Recuperado el 2012 de <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/2682/1/36090-1.pdf>.
26. Franco, E. *Conocimiento de las fuentes de energía renovable así como su potencial uso para disminuir la dependencia del petróleo extranjero*. Recuperado el 2012 de <http://www.monografias.com/trabajos73/fuentes-energia-renovable/fuentes-energia-renovable2.shtml#ixzz2XL64ZKZz>
27. Lorenhey. (2011). *Energías Alternativas*. Recuperado 2012 de <http://www.taringa.net/posts/ciencia-educacion/14336569/Energias-alternativas-Energia-eolica-Parte-4.html>.

28. *Máquinas Eólicas. Recuperado el 2012 de*
<http://exa.unne.edu.ar/fisica/maestria/modulo2/eolica/eolo32002.pdf>.
29. NTN. *Rodamiento de bolas y de Rodillos. Recuperado 2013 de*
http://www.ntnmexico.com.mx/catalogo/catalogos/cat4_2202-VII-S_CAT_Rodam_Bolas_y_Rodillos-esp.pdf
30. Prado, A. (2012). *ECOLOGÍA Y AMBIENTE, PROTOCOLO DE KIOTO. Recuperado el 2012 de* <http://ecologia-azucena.blogspot.com/>
31. Pineda, J. A. (2009). *Funcionamiento De Los Aerogeneradores. Recuperado el 2012 de*
<http://fuentesrenovables.blogspot.com/2009/10/funcionamiento-de-los-aerogeneradores.html>
32. Scribd. (2012.) *Mecanismos aprovechamiento eólico. Recuperado noviembre del 2012 de*
<http://es.scribd.com/doc/82805686/Mecanismos-Aprovechamiento-Eolico-Maquinas>.
33. Sumitec. *Acero inoxidable. Recuperado 2013 de*
<http://www.sumiteccr.com/Aplicaciones/Articulos/pdfs/AISI%20304.pdf>.
34. UTE. *Sistemas de generación eléctrica para aerogeneradores. Recuperado el 2012 de*
http://www.ute.com.uy/empresa/entorno/Energias_Renovables/eolica/Actividad_2002/Eolica_Generadores.pdf

35. <http://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0226-01/capitulo4b.htm>.
36. <http://es.libros.pfernandezdiez.es/index.php?pageID=16>.
37. <http://libros.redsauce.net/>
38. http://panemona.com.ar/panemona-con-tambores-metalicos-turbinas-eolicas-p_119.htm.
39. <http://www.tecnofilos.org/Energia/Eolica/TSR/tsr.html>

7 ANEXOS

ANEXOS

ANEXO 1

Recopilación de los planos de construcción del proyecto