

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
RECINTO UNIVERSITARIO SIMÓN BOLÍVAR
FACULTAD DE ELECTROTECNIA Y COMPUTACIÓN

INFORME FINAL DE TRABAJO MONOGRÁFICO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO EN ELECTRÓNICA

“Implementar y demostrar la construcción de generador eólico artesanal a pequeña
escala para fomentar el uso de energías renovables en nuestro país”

AUTORES:

Elliott Alexander Machado Cayasso

Engels Abraham Jarquín Garay

TUTOR:

Msc. Ing. Maria Virginia Moncada

Managua Octubre 2014

DEDICATORIA

A mi Madre porque me ha enseñado que la satisfacción se encuentra en mis propios progresos y no en las apreciaciones de los demás. Mary Cayasso.

Una gran persona nos ha dejado y aunque ya no esté con nosotros, guardaremos en nuestros corazones su recuerdo. Nos consuela el saber que desde donde se encuentre nos puede ver y estará velando por nosotros, a nuestro hermano Juan Solís Baltodano.

Dedico este trabajo a mi amada esposa, por su apoyo y ánimo que me brinda día con día para alcanzar nuevas metas, tanto profesionales como personales. Reyna Sanchez

Dedico este trabajo a mi hija que es la luz de mi vida, lo que me anima a seguir, eres el origen de mis desvelos, de mis preocupaciones y de mis ganas de ser mejor persona. No hay día que no agradezca al cielo que te pusiera en mi vida. Natalia Sarai Machado Sanchez.

Elliot Alexander Machado Cayasso.

DEDICATORIA

En memoria al corazón más fuerte, la fe más inquebrantable, el amor más incondicional, la sabiduría y la compasión a mi madre Anisa Garay Juárez.

A mi mentor, consejero, amigo, al hombre que nunca se rinde y nunca abandona, a mi padre Jairo Alejandro Jarquín Pérez.

Al amigo que se fue pronto pero que dejó tanto, a esa emocionante historia que quedo en mitad, a nuestro hermano Juan José Solís Baltodano.

Engels Abraham Jarquín Garay

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos primeramente el apoyo incondicional de nuestra tutora de tesis profesora María Virginia Moncada por la dirección, ánimos y amistad que nos otorgó desde el inicio hasta el final de nuestra vida estudiantil, a ella muchas gracias.

A la empresa SUNERGIA S.A por el apoyo económico sin el cual no se hubiera podido iniciar el proyecto en sí.

A la organización Blue Energy por la invitación y apoyo para asistir al curso de construcción de generadores, pieza fundamental en la adquisición de conocimientos para los autores de este proyecto.

Al señor Hugh Piggott el cual con gran humildad y desinterés nos orientó en gran parte de la construcción del aerogenerador además de ser de gran inspiración.

RESUMEN

Este documento presenta los resultados obtenidos en la construcción de un aerogenerador eólico artesanal en base al diseño de Hugh Piggot. Primeramente la introducción, objetivos y la justificación del presente proyecto se presentan como estructura principal del protocolo monográfico. El marco teórico se introduce a los conceptos de viento, generación eléctrica, velocidad del viento, obtención de energía a partir del viento, principios de aerodinámica en aspas, baterías y otros temas relevantes para entender los principios físicos e ingenieriles con los que se relaciona con el proyecto.

En la sección Análisis y Presentación de resultados se describen de manera detallada el resultado de los cálculos para dimensionar el aerogenerador, el proceso de construcción de cada uno de los componentes, el ensamblaje de las partes, y las primeras pruebas que se le realizaron en campo. Se muestra también el resultado de una segunda prueba realizada con aspas de mayor envergadura y las diferencias de potencia, voltaje y corriente que se pueden alcanzar solamente con la modificación de este componente, aumentando de esta manera la eficiencia.

Las secciones de conclusiones y recomendaciones recogen el resultado de las experiencias y los aportes de los autores para el mejoramiento de los procesos de construcción y diseño.

INDICE

I. INTRODUCCION.....	1
III. OBJETIVOS.....	5
IV. JUSTIFICACION	6
VI. MARCO TEORICO	7
1.0 El Viento.....	7
1.1 Origen del viento:.....	7
1.2 Velocidad del viento	8
.....	8
1.3 Definición de Viento según Intervalo de Medición	9
1.4 Modelo Teórico de Bentz y Energía Útil del Viento	10
2.0 Principios de Aerodinámica en aspas y Perfiles NACA.....	15
3.0 Anemómetros	19
3.1 Anemometría de Hilo Caliente (CTA, Constant Temperature Anemometry)	19
3.2 El anemómetro de presión	20
3.3 Anemómetro de Rotación	20
3.4 Anemómetros de hélice	20
4.0 Velocidad de Arranque de las Máquinas Eólicas	21
5.0 Generador Eólico o Aerogenerador	23
5.1 Tipología de Aerogeneradores	23
6.0 Los Aerogeneradores y el Medio Ambiente	25
6.1 Contaminación visual	25
6.2 Ruido.....	25
6.3 Aves	26
7.0 Alternadores fabricados con imanes permanentes (IP).....	26
7.1 Componentes de un aerogenerador con imanes permanentes	27
7.2 Chasis.....	27
7.4 Imanes de Neodimio (NeFeBo)	28
7.5 Estator	29
7.6 Conexión Estrella.....	30
7.7 Conexión Delta.....	30
7.8 Principio de Generación Eléctrica	31

8.0 Baterías y acumuladores (Ácido Plomo)	33
8.1 Componentes de una batería.....	33
8.2 Tipos de celdas de baterías	34
8.3 Carga de batería de tres estados	35
8.4 Tipos de Ciclos.....	36
8.5 Ciclos de Vida.....	36
9.0 Sistemas de control de aerogeneradores	37
9.1 Métodos de regulación y control del número de revoluciones	37
9.2 Regulación por frenos de acción aerodinámica	38
9.3 Control mediante mecanismos de orientación	38
9.4 Orientación del rotor utilizando pala o veleta auxiliar	38
VII. ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	41
1.0 Metodología de desarrollo	41
2.0 Consideraciones básicas de diseño	41
3.0 Resultados de los cálculos	42
3.1 Construcción de aspas o palas.....	44
3.2 Buje o patente	49
3.3 Construcción del soporte del generador	50
3.4 Construcción del rotor	53
3.5 Moldes	55
3.6 Construcción de estator	58
3.7 Preparación de la resina poliéster	60
3.8 Fabricación del estator	62
3.9 Construcción de la veleta	63
3.10 Construcción de la torre.....	66
4.0 Pruebas de Campo	68
VIII. CONCLUSIONES	72
IX. RECOMENDACIONES	73

XI. BIBLIOGRAFIA.....	75
XII. ANEXOS.....	79

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Presupuesto para el proyecto	42
Tabla 2: Parámetros para modelado de las aspas	43
Tabla 3: Dimensiones del Chasis	51
Tabla 4: Dimensiones de disco a utilizar	56
Tabla 5: Dimensiones de moldes de estator.....	56
Tabla 6: Dimensiones de la torre	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Irradiancia solar	7
Figura 2: Rosas de viento para un flujo dominante	8
Figura 3: Diferencia entre velocidad del viento en un aerogenerador	10
Figura 4: Relación de potencia P/P_0	13
Figura 5: Relación entre el área de las palas del aerogenerador y la potencia	14
Figura 6: Fuerzas sobre un perfil con diferente valor de ángulo	16
Figura 7: Fuerzas sobre un perfil Aerodinámico	16
Figura 8: Parámetros de construcción de un perfil Aerodinámico	17
Figura 9: Anemómetro de Hélice	20
Figura 10: Coeficiente K_u vs velocidad del viento	22
Figura 11: Aerogenerador de eje horizontal	25
Figura 12: Curvas de magnetización de distintos materiales	29
Figura 13: Conexión en Estrella	30
Figura 14: Conexión en Delta	31
Figura 15: Flujo Magnético en un Alternador	32
Figura 16: Señal de voltaje trifásica	33
Figura 17: Proceso de carga de batería	35
Figura 18: Método de desorientación por veleta auxiliar	39
Figura 19: Perfil aerodinámico NACA 4412	44
Figura 20: Estaciones	45
Figura 21: Grosor de estaciones	45
Figura 22: Corte general del aspa	45
Figura 23: (a) (b): Proceso de corte de todas las aspas	46
Figura 24: Marcas de caída	47
Figura 25: Grosor inferior del aspa	48
Figura 26: Forma aerodinámica a alcanzar	48
Figura 27: Unión de discos y aspas	49
Figura 28: Patente	50
Figura 29: Diseño de soporte Hugh Piggott y Soporte implementado	52
Figura 30: Perforación de agujeros y Unión de las piezas mecánicas	52
Figura 31: Corte transversal del rotor	53
Figura 32: Diseño rotor de imanes Hugh Piggott y rotor de imanes implementado	54
Figura 33: Perforación de los agujeros de montaje del rotor	55
Figura 34: Dimensiones de moldes de estator y Moldes implementados	57
Figura 35: Construcción de moldes de estator	57
Figura 36: Diseño de embobinador Hugh Piggott y embobinador Ing. Oscar Pérez	58
Figura 37: Proceso de embobinado y Bobinas terminada	59
Figura 38: Conexión real de las bobinas en serie y circuito equivalente	60
Figura 39: Sellado de Silicón	61
Figura 40: Preparación del molde para resina	61
Figura 41: Resultado final del rotor	61
Figura 42: Fabricación del molde del estator	62
Figura 43: Vertimiento de la resina sobre el molde del Estator	63
Figura 44: Colocación de las bobinas y resultado final	63
Figura 47: Soldadura del tubo de la Veleta	65
Figura 48: Tubo de la veleta terminado	66
Figura 49: Ubicación de las pruebas	68

Figura 50: Comportamiento del viento	68
Figura 51: Potencia vs Viento	69
Figura 52: Rendimiento del generador	70
Figura 53: Parte de los alumnos involucrados en la construcción del generador.....	71
Figura 54: Profesores de la carrera de ingeniería electrónica.....	71
Figura 55: Estudiantes de electrónica en feria de la tierra.....	71
Figura 56: Miembros del Jurador evaluador Tecno-UNI.....	71
Figura 57: Aerogenerador en la Tecno-UNI.....	71
Figura 58: Estudiantes de electrónica exponiendo en Feria de la Tierra.....	71

I. INTRODUCCION

La energía es un elemento esencial para el desarrollo económico y social de cualquier nación del mundo. La energía está presente en todos los bienes y servicios producidos, así como es, por sí misma, un importante ítem de consumo. La búsqueda de formas alternativas de energía en países en vía de desarrollo, oscila de acuerdo con la coyuntura del país, específicamente en relación con el precio internacional del petróleo [Ruiz Caro, 2003, Pág. 74]. Pero la cuestión no es solamente nacional, también "zonal". En zonas remotas la generación descentralizada con recursos energéticos localmente disponibles resulta casi siempre más indicada que el transporte de energía desde lugares *lejanos* [Soderberg, 2003 Pág. 3].

La alta dependencia que el mundo tiene del petróleo y la inestabilidad que caracteriza el mercado internacional y los precios de este producto, han llevado a que se investiguen e implementen fuentes alternativas de energía para el desarrollo sostenible de los países.

La transferencia y utilización de las energías renovables en reemplazo de la generación basada en petróleo, puede ser un elemento clave dentro de las políticas nacionales para así lograr el desarrollo sostenible basado en una generación de energía más limpia, Decremento del riesgo de derrames de combustible, electrificación rural con fuentes alternas renovables para aplicaciones no conectadas a la red, Independencia en las fluctuaciones en el costo del combustible, garantizar y asegurar el suministro de energía, conservación de recursos naturales, optimización de los recursos energéticos y disminución en los costos de producción de electricidad en áreas remotas.

En Nicaragua la población total proyectada para el 2007 era de 5,6 millones de habitantes, de los cuales el 51 % viven en las zonas urbanas y el 49% en las zonas rurales, de los cuales solo el 55 % de la población total cuenta con servicio eléctrico. En el caso específico de la población rural, la situación es peor, ya que únicamente el 17% de dicha población tiene acceso a este servicio. Sin embargo, a pesar de la abundante disponibilidad de fuentes de energía renovable, la generación de energía en Nicaragua se ha caracterizado por una alta dependencia en los hidrocarburos, lo que significa que el 66% de la electricidad es generada por plantas térmicas, alrededor de un 16% es generada por plantas hidroeléctricas, un 12% es por plantas geotérmicas y un 5% es por biomasa. El potencial energético de energías renovables en Nicaragua está constituido: Hidroeléctrico 2021MW, de los cuales solamente 105MW han sido explotados, con respecto a la geotérmica, 1270MW de las cuales 70MW han sido explotados, biomasa 1450MW de los cuales 126MW se han explotado y la energía eólica con un total de 800MW de los cuales 40MW están siendo explotados *[Informe, 2008, Pág.4]*.

Nicaragua debe de enfrentar la tarea de buscar nuevas fuentes de energía para así lograr superar la crisis energética en la que se encuentra actualmente, Nicaragua es un país con la mayor abundancia de recursos renovables, pero el de mayor dependencia en los hidrocarburos en toda América Central. Por lo tanto micro-proyectos de generación eléctrica a partir de energías renovables como el viento, pudiera ser una alternativa de consumo para la población en zonas donde la infraestructura eléctrica no es viable económicamente ejemplo: comunidades costeras, fronterizas, regiones autónomas, asentamientos indígenas, etc.

En la actualidad se han creado leyes (Ley 532, Ley 554, Ley 661) y programas de fuentes alternas de energía, los cuales promoverán e investigarán la tecnología de energía renovable con el propósito de mejorar el bienestar y medioambiente de los nicaragüenses, brindando alternativas de servicios de electrificación rural en aquellas zonas donde no se prevé que llegue a mediano plazo la energía convencional. Esto servirá de mucho ya que la escasa electrificación rural es un freno para la promoción amplia de actividades educativas, de salud y recreación, lo que limita el desarrollo de las comunidades.

En Nicaragua se ha establecido un parque de energía eólica llamado AMAYO el cual generara aproximadamente 40 megavatios, este está compuesto por 19 aerogeneradores, de los cuales se estima que por año producirán 230 millones de kilovatios/hora lo que representa el 6 % del consumo total de energía eléctrica nacional *[UNFCCC, 2010, Pág. 3]*.

La energía eólica es la energía obtenida de la fuerza del viento, mediante la utilización de la energía cinética generada por las corrientes de aire, es una de las fuentes más baratas, puede competir en rentabilidad con otras fuentes energéticas tradicionales como las centrales geotérmicas de carbono, las centrales de combustibles e incluso con la energía nuclear, la utilización de la energía eólica para la generación de electricidad no produce gases tóxicos, ni contribuye al efecto invernadero, ni crea lluvia acida.

El presente trabajo se basa en la construcción de un aerogenerador que no es más que un generador eléctrico movido por la acción del viento, donde la energía cinética del aire en movimiento, se transforma en energía mecánica al mover el rotor de la hélice que, a

través de un sistema de transmisión mecánico hace girar el rotor de un generador, normalmente un alternador trifásico, que convierte la energía mecánica rotacional en energía eléctrica. En nuestro país millones de personas no tienen acceso al suministro convencional de energía eléctrica *[Informe, 2008, Pág.4]*, este sistema puede ser utilizado también para suministrar energía a escuelas rurales, bombeo de agua y pequeños grupos de vivienda.

Además con el traspaso de conocimientos a la comunidad en general, el presente proyecto podría sentar las bases para nuevas iniciativas públicas o privadas para masificar la construcción de pequeños sistemas eólicos que permitan el acceso a la energía eléctrica donde las condiciones de vientos lo permitan y la red eléctrica sea inexistente y demasiado costosa de implementar.

Ejemplos de este tipo de iniciativas a nivel latinoamericano y global se listan a continuación:

- Aerogeneradores en el sitio de Piedra Parada, La Patagonia, Argentina: Para electrificación de infraestructura escolar en zonas altamente aisladas.
- Aerobomba de Mecate (1998) en Nicaragua, Costa Rica, Guatemala: Para concientizar acerca del uso de los generadores para bombeo de agua.
- Pequeños aerogeneradores para electrificación en Filipinas: Electrificación de hogares en islas aisladas (Gonzales Garza, 2010).

II. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL:

- Demostrar la viabilidad, funcionamiento y ventajas de los generadores eólicos a pequeña escala mediante la construcción de un generador eólico artesanal en base a la metodología de Hugh Piggott.

OBJETIVOS ESPECIFICOS:

- Establecer las bases tecnológicas para el desarrollo de proyectos de innovación e investigación, para la generación de electricidad utilizando sistemas eólicos.
- Documentar los procesos de construcción de generadores eólicos, basado en el manual de construcción de Hugh Piggott.
- Comprobar mediante la construcción de aspas de diferente envergadura las diferencias en potencia eléctrica que se pueden obtener en estos sistemas eólicos.
- Presentar alternativas para la reducción de costos de fabricación incurridos en el sistema eólico mediante el uso de materiales alternativos.
- Fomentar el uso de generadores eólicos mediante el traspaso de los conocimientos adquiridos a la comunidad universitaria y personas interesadas en el tema.
- Comprobar la viabilidad de los procedimientos de construcción de la metodología elegida con respecto a la disponibilidad de materiales y mano de obra en Nicaragua.
- Documentar el comportamiento operacional del prototipo implementado realizando pruebas de campo.

III. JUSTIFICACION

A pesar de los esfuerzos por el cambio de la matriz energética del país a un modelo más sostenible, menos contaminante y más barato, la realidad nicaragüense necesita un mayor desarrollo de generación de electricidad masiva con fuentes alternativas.

La mayor parte de iniciativas de generación a pequeña escala en Nicaragua, hasta ahora se limitan a la importación de sistemas eólicos por parte de un puñado de empresas para uso doméstico y/o como complemento al suministro eléctrico comercial o para el bombeo de agua. Entre estas empresas pueden listarse: Tecnosol, Ecamí, Sunisolar, etc.

A parte de los proyectos llevados a cabo por la ONG Blue Energy en la costa atlántica del país, no hay ninguna otra iniciativa privada, pública o sin fines de lucro para llevar este tipo de tecnología a las zonas donde la red eléctrica no está presente o donde las necesidades energéticas son críticas.

El conocimiento de la construcción, mantenimiento e instalación de estos pequeños sistemas eólicos está concentrado en muy pocas personas e instituciones de manera que existe un desconocimiento marcado de las bondades, aplicaciones y viabilidad de estos sistemas para el mejoramiento de la calidad de vida de las comunidades aisladas, la complementación con el suministro eléctrico en las residencias y las aplicaciones como bombeo de agua para el sector agrícola como ejemplo.

Como resultado de las experiencias adquiridas por los autores en los diferentes talleres de construcción de sistemas eólicos, el deseo de compartir los conocimientos adquiridos y el interés de la comunidad estudiantil durante el desarrollo de este proyecto nace este trabajo monográfico.

IV. MARCO TEORICO

1.0 El Viento

1.1 Origen del viento:

El viento es toda masa de aire en movimiento, se produce a causa de la desigualdad del calentamiento por parte del sol de la superficie terrestre, siendo este fenómeno la fuente de energía eólica, en otras palabras, la energía mecánica que en forma de energía cinética, transporta el aire en movimiento. La tierra recibe una gran cantidad de energía procedente del Sol que en lugares favorables puede llegar a ser del orden de 2000 kW/m² anuales; el 2% de ella se transforma en energía eólica capaz de proporcionar una potencia del orden 10¹⁷ kW [Jiménez Cisneros, 2001].

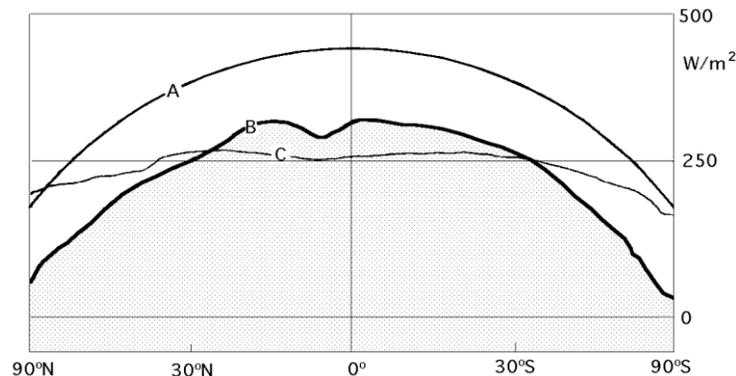


Figura 1: Irradiación solar
A) Irradiación solar sobre una superficie horizontal
B) Irradiación solar absorbida por la Tierra
C) Irradiación radiada al espacio exterior

La tierra funciona como una gran máquina térmica que transforma parte del calor solar en la energía cinética del viento, **Fig. 1**. La energía eólica tiene como ventajas la de ser inagotable, gratuita y no lesiva al medio ambiente ya que no produce emisiones de gases de efecto invernadero, ni desechos sólidos en su producción, pero presenta los

inconvenientes de ser dispersa y aleatoria. Bajo la acción de la presión, el aire de la atmosfera se desplaza de un lugar a otro a diferentes velocidades, dando lugar al viento. El gradiente de velocidades es mayor cuanto mayor sea la diferencia de presiones y su movimiento viene influenciado por el movimiento de la tierra. Las causas principales del origen del viento son:

- a) La radiación solar incide más en la línea del ecuador que en los polos.
- b) La rotación de la tierra que provoca desviaciones hacia la derecha del hemisferio norte, y hacia la izquierda en el hemisferio sur.
- c) Perturbaciones atmosféricas.

1.2 Velocidad del viento

El viento está definido por varios parámetros pero los más esenciales son su dirección y su velocidad [Met. Handbook, 2005]. La dirección del viento y su valoración a lo largo del tiempo condujeron a la ejecución de la llamada **rosa de los vientos**, figura usada para mostrar la orientación de las direcciones cardinales, **Fig. 2**.

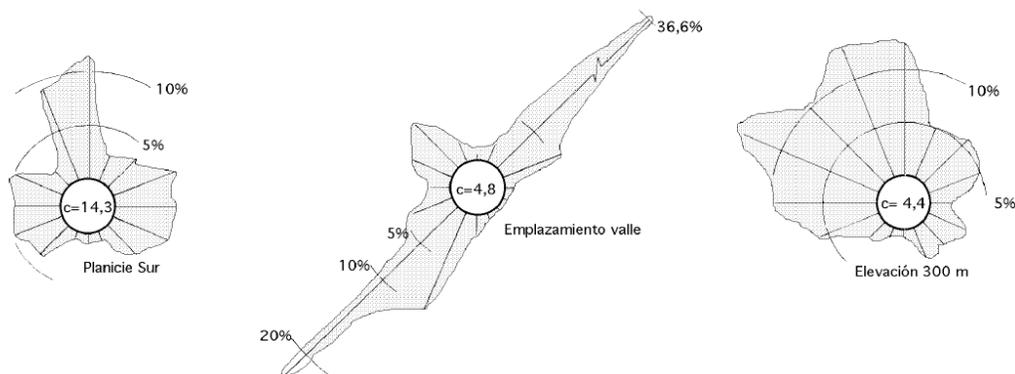


Figura 2: Rosas de viento para un flujo dominante

La velocidad media del viento varía entre 3 y 7 m/seg, según diversas situaciones meteorológicas; es elevada en las costas, más de 6 m/seg, así como en algunos valles

más o menos estrechos. En otras regiones es, en general, de 3 a 4 m/seg, siendo bastante más elevada en las montañas, dependiendo de la altitud y de la topografía [Pedro Fernández Díez, 2003].

La velocidad del viento varía según la temperatura y la hora del día, “La velocidad media del viento es más débil durante la noche, variando muy poco, aumenta a partir de la salida del Sol y alcanza un máximo entre las 12 y 16 horas solares”. [Serrano Collazo, 2011].

1.3 Definición de Viento según Intervalo de Medición

Se puede considerar 3 tipos de definiciones según el intervalo de medición del viento:

- Viento instantáneo: Es el máximo instantáneo de velocidad medido en un intervalo de tiempo determinado [Met. Handbook, 2005].

- Viento medio aeronáutico: Mide la velocidad promedio del viento durante 2 minutos [Met. Handbook, 2005].

- Viento medio meteorológico: Mide la velocidad promedio del viento durante 10 minutos y es usado para evaluar la ocurrencia de ráfagas. [Met. Handbook, 2005]

Se precisa establecer la diferencia entre picos de viento y ráfagas ya que estos términos usualmente tienden a confundirse el uno con el otro.

Una **ráfaga** es un aumento brutal y de corta duración de la velocidad del viento, propio de tormentas [Pedro Fernández Díez, 2003].

El **golpe de viento** concierne a la velocidad media del viento, cuando sobrepasa los 34 nudos, 62 km/hora, y es una señal de advertencia, sobre todo para la navegación marítima. Un golpe de viento se corresponde con una velocidad media del viento comprendida entre 75 y 88 km/hora [\[Pedro Fernández Díaz, 2003\]](#).

1.4 Modelo Teórico de Betz y Energía Útil del Viento

El modelo matemático más utilizado en la práctica para definir la energía proporcionada por una masa de aire en movimiento a una turbina eólica, es el propuesto por Albert Betz su libro “Wind Energie” publicado en 1926. Betz define la potencia captada por un obstáculo (en este caso se considera un aerogenerador por conveniencia) como la diferencia entre la energía cinética antes y después de pasar por el obstáculo a como se observa en la **Fig. 3**.

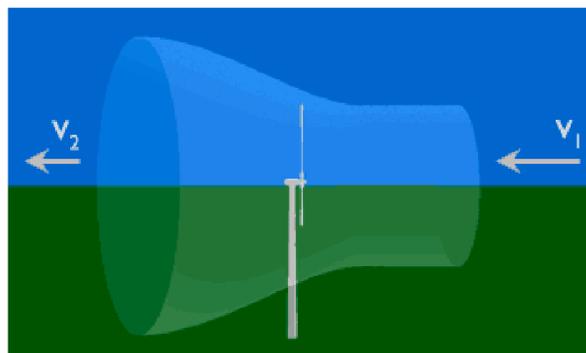


Figura 3: Diferencia entre velocidad del viento en un aerogenerador

Como se muestra en la figura para mantener la masa del aire constante la vena se ensancha y se observa una mayor superficie de la masa del aire después de pasar por el aerogenerador.

La igualdad que se puede plantear es la siguiente:

$$S_1 V_1 = SV + S_2 V_2$$

Donde

S_1 = Superficie ocupada por la masa de aire antes de pasar por el obstáculo

V_1 = Velocidad del viento antes de pasar por el obstáculo

S = Superficie ocupada por la masa de aire en el obstáculo

V = Velocidad del viento en el obstáculo

S_2 = Superficie ocupada por la masa de aire después de pasar por el obstáculo

V_2 = Velocidad del viento después de pasar por el obstáculo

Utilizando la fórmula de Euler se tiene la siguiente igualdad en términos de la fuerza F que ejerce el aerogenerador sobre el aire en movimiento:

$$F = \rho Q(V_1 - V_2) = \rho SV(V_1 + V_2)$$

Dónde:

ρ = Densidad del aire

Q = Caudal (m^3/s)

Ahora la potencia absorbida por la fuerza F cuyo punto de aplicación se desplaza a la velocidad V respecto de las moléculas del aire en movimiento es:

$$P = FV = \rho S V^2 (V_1 - V_2)$$

Ahora si asumimos que la potencia absorbida es igual a la variación del tiempo Δt de la energía cinética de la masa del aire que atraviesa por segundo el generador tenemos que:

$$\Delta t = \frac{1}{2} \rho S V (V_1^2 - V_2^2) = P = \rho S V^2 (V_1 - V_2)$$

De donde se puede deducir que:

$$V = (V_1 - V_2)/2$$

Si se sustituye este valor en las ecuaciones F y P se obtienen las siguientes expresiones:

$$F = \frac{1}{2} \rho S (V_1^2 - V_2^2)$$

$$P = 1/4 \rho S (V_1^2 - V_2^2) (V_1 + V_2)$$

Para estudiar la variación de la potencia P en función de la velocidad residual V_2 y se supone constante la velocidad antes de pasar por el aerogenerador V_1 se tiene que:

$$\frac{\delta P}{\delta V_2} = 1/4 \rho S (V_1^2 - 2V_2 V_1 - V_2^2)$$

Como la derivada admite dos raíces al igualarse a 0: $V_2 = -V_1$ la cual no tendría ningún significado y $V_2 = V_1/3$ que es un punto característico.

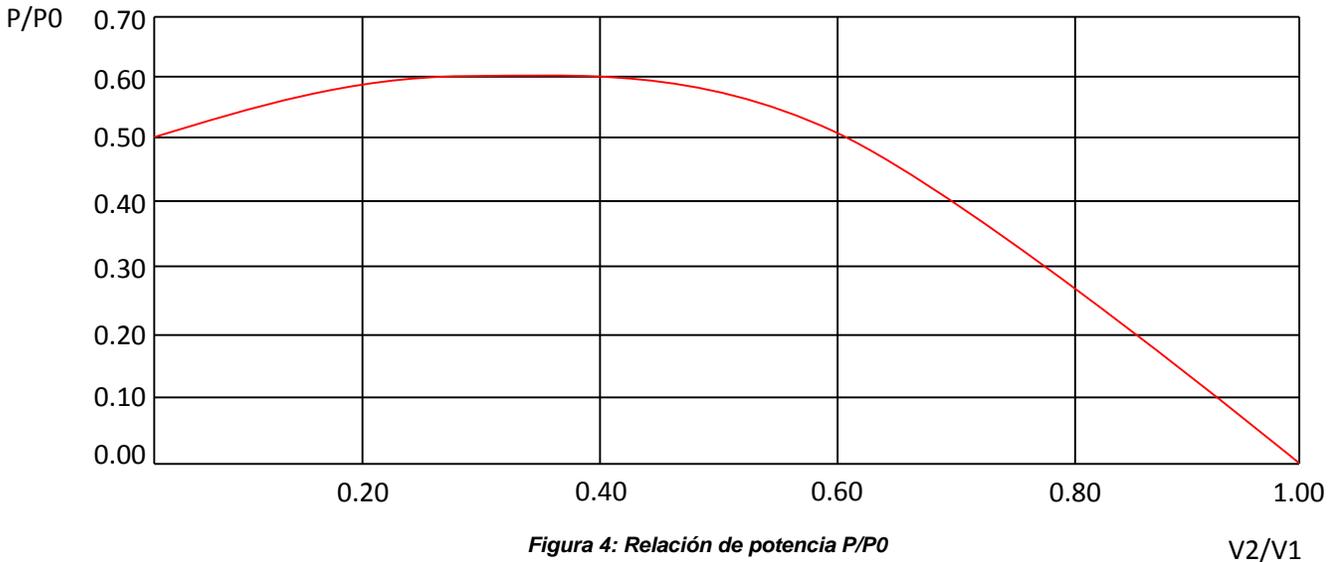
Si se supone que la velocidad V_2 después que ha pasado el generador es 0 se puede decir que la potencia obtenida es máxima. Entonces se obtendría:

$$P_o = 8/27\rho SV_1^3$$

La relación entre la potencia obtenida del viento y la máxima obtenible ante un viento no perturbado por el paso a través del generador sería la siguiente:

$$\left(\frac{P}{P_o}\right) = 1/2 \left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right) \left(1 + \left(\frac{V_2}{V_1}\right)\right)$$

Podemos graficar esta función y se obtiene lo siguiente:



De la **Fig. 4** se puede deducir que la función tiene una máxima a $\frac{V_2}{V_1} = 1/3$ y que el máximo valor de potencia obtenible es aproximadamente 0.5926 o 16/27 (teóricamente) del total de la potencia que posee el viento.

De acuerdo con verificaciones realizadas con equipos de medición modernos (Iannini, 2010) la potencia a obtener en grupos eólicos de dos palas se ubica en $P = 0.10D^2V^3$ $P = kW, D = m$ y $V = m/s$. El coeficiente 0.10 puede alcanzar 0.13 para diámetros superiores a 60m.

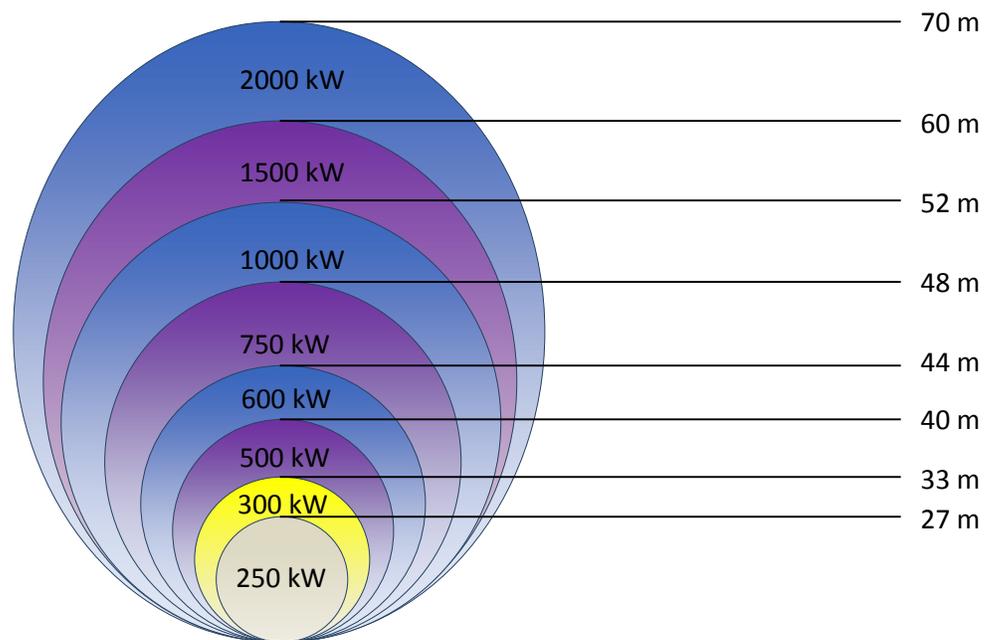


Figura 5: Relación entre el área de las palas del aerogenerador y la potencia

2.0 Principios de Aerodinámica en aspas y Perfiles NACA

El viento está compuesto por diferentes moléculas que se mueven de manera muy aleatoria pero si se miden las velocidades instantáneas de cada uno de estos flujos estos se pueden aproximar a un valor medio.

Al colocar un objeto en un flujo de viento se observará una resistencia al paso del flujo deformándolo dependiendo de la posición de este con respecto al flujo y a su forma.

La resultante R de las fuerzas aplicadas a una placa plana es un vector cuyo punto de aplicación es su centro aerodinámico o centro de empuje siendo su dirección, perpendicular a la placa, su sentido el del viento y su intensidad proporcional a la superficie S expuesta y al cuadrado de la velocidad del viento v, en la forma [Pedro Fernández

Díez, 2003]:

$$R = C_w \rho \frac{Sv^3}{2} = kSv^2$$

Donde k es un coeficiente que depende del ángulo de incidencia de las unidades elegidas y de la turbulencia del movimiento

C_w: coeficiente de resistencia (penetración)

p: densidad del aire

S: Sección frontal del perfil

Si el ángulo de incidencia es pequeño, la sobrepresión aparece en la parte inferior de la placa y la depresión por encima, por lo que aparece una fuerza que tiende a elevarla conocida como fuerza de sustentación o elevación ver figura 6.

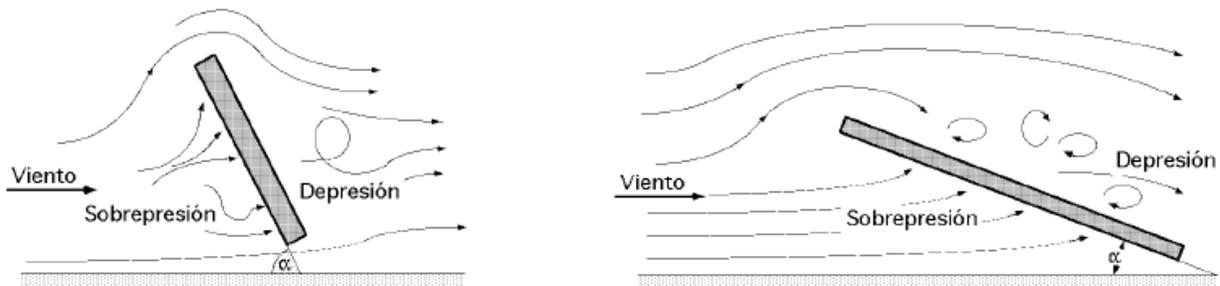


Figura 6: Fuerzas sobre un perfil con diferente valor de ángulo

Para un perfil diseñado en forma aerodinámica se definen dos zonas que son:

- El Extradós: Parte del perfil en donde el flujo de aire está en depresión
- El Intradós: Parte del perfil en donde los filetes de aire están en sobrepresión

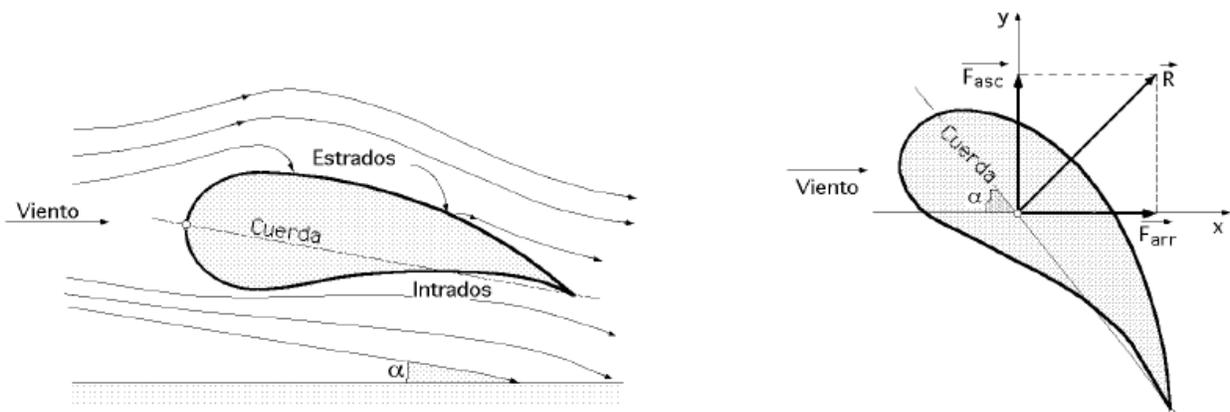


Figura 7: Fuerzas sobre un perfil Aerodinámico

Las fuerzas de arrastre y de ascensión en un perfil están definidas por las componentes del vector R ver figura 7. Dónde:

Farr: es la fuerza de arrastre

Fasc: es la fuerza ascensional

$$F_{arr} = R \operatorname{sen} \alpha = k_x S v^2$$

$$F_{asc} = R \operatorname{cos} \alpha = k_y S v^2$$

La cuerda es la longitud del perfil la cual es perpendicular al vector R, el empuje ascensional aumenta a medida que en ángulo α disminuye, la cuerda se considera desde el borde de ataque del perfil al borde de salida posterior.

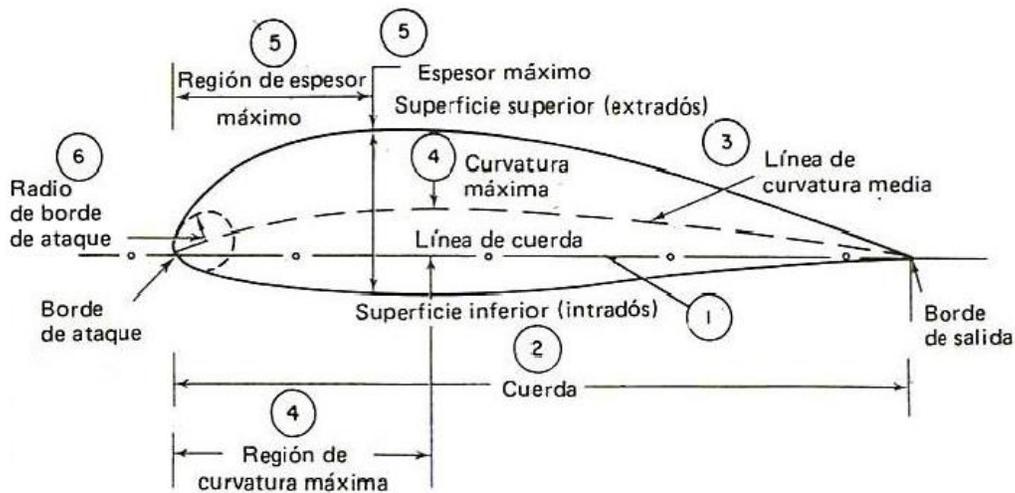


Figura 8: Parámetros de construcción de un perfil Aerodinámico

Los parámetros más usados para describir un perfil se enlistan:

- 1- La línea de cuerda es una línea recta que une el borde de ataque y el borde de fuga del perfil.
- 2- La cuerda es la longitud de la línea anterior.

- 3- La línea de curvatura media es la línea media entre el extradós y el intradós.
- 4- Curvatura máxima es la distancia máxima entre la línea de curvatura media y la línea de cuerda.
- 5- Espesor máximo es la distancia máxima entre la superficie superior e inferior (extradós e intradós).
- 6- Radio del borde de ataque es una medida delafilamiento del borde de ataque. Puede variar desde 0, para perfiles supersónicos afilados, hasta un 2 por 100 (de la cuerda) para perfiles más bien achatados.

Los perfiles usados en las aspas para generadores eólicos tienen distintos nombres según su geometría. Biconvexos son aquellos en el que tanto el intradós como el extradós son convexos, plano convexos son aquellos donde el extradós es convexo y el intradós plano y los de doble curvatura aquellos donde tanto el intradós como el extradós son cóncavos, esto está determinado por la línea de curvatura media del perfil.

Los perfiles más utilizados en las máquinas eólicas de alta velocidad son de la serie NACA (National Advisory Committee of Aeronautics) y vienen determinados por un conjunto de cifras que definen su geometría. Las cifras que van detrás del sobrenombre NACA indican por su cantidad (cuatro o cinco cifras) y por su valor, los datos necesarios para poder determinar o construir el perfil completamente, dibujando primero la línea de curvatura media y distribuyendo después sobre ella el espesor correspondiente a un perfil simétrico, esto es, dan una ley de curvatura y una distribución de espesor [Carmona, 2004].

Ejemplo: **NACA 4412**

1ra cifra (4) expresa la ordenada máxima de la línea de curvatura media en porcentaje de la cuerda (o longitud del perfil): 4%

2da cifra (4) Expresa la posición de dicha ordenada máxima en decimas de la cuerda medida desde el borde de ataque: En el 40%

3ra y 4ta cifra (12) Expresan el espesor máximo del perfil en porcentaje de la cuerda: 12%

3.0 Anemómetros

Un anemómetro es un dispositivo utilizado para medir la velocidad del viento descrito primeramente por Leon Battista Alberti [*J.H Press, 1969*]; existen de diversos tipos, y a su vez estos se pueden clasificar en: anemómetros de rotación, de hélice y anemómetros de presión [*Allaby, 2002*], y se utilizan también para ver la dirección del viento mediante una veleta anexa a ellos.

3.1 Anemometría de Hilo Caliente (CTA, Constant Temperature Anemometry)

Se basa en el siguiente principio: Se hace pasar una corriente por un hilo muy fino. El paso de la corriente hace que se caliente. El hilo se refrigera por el paso de fluido, por convección. Así, la “cantidad” de enfriamiento será función de la velocidad del fluido. Cuando un conductor se calienta varía su resistencia, así variaciones en la velocidad del fluido producirán variaciones en la refrigeración del hilo, y por tanto en su temperatura, la cual afecta a la resistencia.

Así, de forma electrónica el anemómetro intenta mantener constante la temperatura del hilo, y para ello controla la corriente que circula por el hilo. La medida de esa corriente se puede correlacionar con la velocidad del fluido. Para el estudio del flujo turbulento o no estacionario el anemómetro de hilo caliente es muy superior a cualquier otro sistema excepto, quizás, los anemómetros de láser.

Entre los anemómetros más comúnmente utilizados están los siguientes:

- El anemómetro de presión
- Anemómetro de Rotación
- Anemómetros de hélice

Estos últimos están diseñados para medir vientos de velocidades entre 1 a 25 mph (1-40 km/h), La velocidad de rotación de las hélices es proporcional a la velocidad del viento y puede ser medida de la misma manera que en un anemómetro de rotación [Marshall, 2002]. La experiencia ha demostrado que este tipo de dispositivo es más preciso en la medición que un anemómetro de rotación.



Figura 9: Anemómetro de Hélice

4.0 Velocidad de Arranque de las Máquinas Eólicas

Las máquinas eólicas arrancan a una determinada velocidad del viento. Para ciertos tipos, esta velocidad de arranque puede ser muy pequeña, del orden de 2 m/s y para otros del orden de 3 m/s hasta 5 m/s (Iannini, 2010). Se puede deducir entonces que la energía del viento cuya velocidad es menor a cierto valor V_m no es utilizable al tiempo que proporcionan la máxima potencia para unas velocidades iguales o superiores a una dada V_n (Velocidad Nominal). Se ha concluido también que la potencia proporcionada por el aerogenerador permanece constante e igual a la potencia nominal (potencia capaz de ser producida por la instalación en funcionamiento permanente).

Investigadores han estudiado la relación entre la energía del viento susceptible de ser suministrada por una máquina y la energía calculada tomando el cubo de la velocidad media (Iannini, 2010). Llegando a la siguiente ecuación.

$$K_u = \frac{V_N^3(T_1 - T_2) + \int_{T_1}^{T_3} V^3 dt}{V^3 T}$$

Dónde:

V = Velocidad Media ($V = \frac{1}{T} \int_0^T V dt$)

v = Velocidad instantánea

V_N = Velocidad nominal de la máquina

T_1 = Tiempo durante el cual la velocidad del viento es superior a la velocidad máxima del viento V_M capaz de ser soportada por la máquina.

T_2 = Tiempo durante el cual la velocidad del viento es superior a la velocidad nominal del viento V_N para la que se ha calculado el generador eólico.

T_3 = Tiempo durante el cual la velocidad del viento es suficiente para que el generador produzca energía.

El conocimiento del coeficiente K_u permite obtener la energía capaz de ser suministrada en lugares donde solo existen anemómetros totalizadores. Es necesario además que la variación K_u haya sido determinada para la región a partir de registros anemométricos de estaciones próximas sometidas a vientos de similares características (Iannini, 2010).

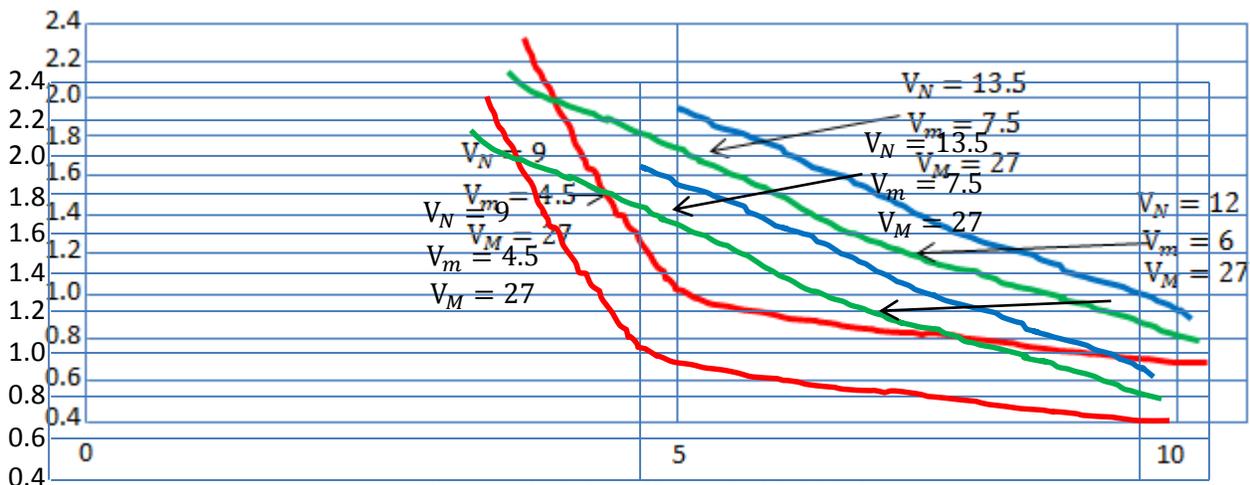


Figura 10: Coeficiente K_u vs velocidad del viento

En general se consideran tres velocidades para obtener el potencial energético de una máquina eólica.

La velocidad de conexión V_{conex} aquella por encima de la cual se genera energía. Por debajo de esta velocidad toda la energía extraída del viento se gastaría en pérdidas y no habría generación de energía [Pedro Fernández Díez, 2003].

La velocidad nominal V_N descrita anteriormente es la velocidad para la que la máquina eólica alcanza su potencia nominal. También se ha dicho que por encima de esta velocidad la potencia extraída del viento se puede mantener constante.

La velocidad de desconexión V_{emb} es aquella velocidad del viento por encima de la cual la máquina eólica deja de generar, porque se embala, los sistemas de seguridad comienzan actuar frenando la máquina, desconectándose de la red a la que alimenta [Pedro Fernández Díez, 2003]. En la práctica esto se utiliza cuando se presentan vientos extremadamente fuertes que consideran un peligro para la estructura del sistema.

5.0 Generador Eólico o Aerogenerador

Un aerogenerador es una máquina que convierte la energía eólica en energía eléctrica [Manwell, 2010]. La energía eólica (energía cinética del aire en movimiento), proporciona energía mecánica a un rotor de la hélice que, a través de un sistema transmisión mecánico hace girar el rotor de un generador, normalmente un alternador trifásico, que convierte la energía mecánica rotacional en energía eléctrica.

5.1 Tipología de Aerogeneradores

Los aerogeneradores se han clasificado de diferentes maneras en dependencia de su potencia proporcionada, el número de palas o la interconexión con la distribución

eléctrica (aisladamente o en conexión directa con la red de distribución convencional) pero en su mayor parte se han clasificado:

- Por la posición del aerogenerador
- Por la posición del equipo con respecto al viento
- Por el número de palas

Los generadores de *eje horizontal* son los más habituales y en ellos se ha centrado el mayor esfuerzo de diseño en los últimos años. Se los denomina también "HAWTs", que corresponde a las siglas de la denominación inglesa "horizontal axis wind turbines". Los rotores HAWT son usualmente clasificados de acuerdo a la orientación del rotor (barlovento o sotavento), siendo la barlovento la más utilizada porque *se evita el abrigo del viento tras la torre* [Leal, 2010]. Existen sin embargo otros diseños como el de *eje vertical* en donde 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". Este tipo de aerogeneradores a pesar de poseer algunas características atractivas, tienen algunos problemas de confiabilidad y nunca fueron capaces de igualar a los aerogeneradores HAWTs en costos de producción de energía [Manwell, 2010].

Entre el número de aspas (usualmente dos o tres) se utiliza mayormente el de *3 palas* ya que existe un equilibrio entre las velocidades que puede alcanzar con respecto a la potencia, sin tener la desventaja de utilizar un contrapeso como en el diseño de *una pala* o exigir mayor velocidad de giro para generar la misma cantidad de energía como en el diseño de *2 palas*.



Figura 11: Aerogenerador de eje horizontal

6.0 Los Aerogeneradores y el Medio Ambiente

6.1 Contaminación visual

Los aerogeneradores son siempre elementos muy visibles en el paisaje. En todo caso el impacto visual es algo consustancial a esta forma de producir energía. Puede minimizarse en lo posible, por ejemplo pintando las torres de gris, pero nunca evitarse totalmente. En áreas llanas suele ser una buena estrategia disponer las turbinas según una distribución geométrica simple, fácilmente perceptible por el espectador.

6.2 Ruido

Hay dos fuentes de ruido asociadas al funcionamiento de los aerogeneradores: ruido aerodinámico, causado por las palas pasando a través del aire, y ruidos mecánicos, debidos al funcionamiento de elementos mecánicos en la góndola (el generador, la caja de cambios, etc.). El ruido aerodinámico es función de muchos factores que interactúan, incluido el diseño de las palas, la velocidad de rotación, la velocidad del viento y la turbulencia en el flujo de aire. El ruido aerodinámico es generalmente similar a un “silbido”. [Hulshorst, 2011].

Generalmente a velocidades de 8 m/s y superiores llega a ser una cuestión bastante difusa el discutir las emisiones de sonido de los modernos aerogeneradores, dado que el ruido de fondo enmascarará cualquier ruido de la turbina, al menos este es el punto de vista definido por los fabricantes de equipos eólicos, que en diseños modernos declaran niveles de ruido de 48dB a 200 metros del aerogenerador [Leal, 2010].

6.3 Aves

Las aves pueden chocar con las palas del rotor de la turbina, o quedar atrapados en la turbulencia que hay detrás del rotor. *Las investigaciones han mostrado que el riesgo de choque es relativamente pequeño, el número estimado de choques accidentales para una potencia instalada de 1.000 MW es aproximadamente de 21.000 anuales si bien esto puede parecer a primera vista un número bastante grande, cuando lo consideramos anualmente, esta cifra es en realidad muy pequeña en comparación con el número de aves que son víctimas mortales del tráfico de automóviles cada año (2 millones anualmente) o el número de pájaros que perecen cada año debido a las líneas eléctricas (1 millón anualmente) [Hulshorst, 2011].* No obstante, cuando se instalan aerogeneradores, es aconsejable prestar atención a las zonas de cría y forrajeo de las aves.

7.0 Alternadores fabricados con imanes permanentes (IP)

Los generadores axiales se llaman así porque consisten en una plancha redonda de imanes permanentes que giran sobre otra plancha plana de bobinas. Los generadores axiales se fabrican haciendo que los imanes estén en el radio de las bobinas, que

entonces se asemejan a un motor inducido. *Una de las ventajas de las máquinas con imanes permanentes, radica en que se reduce su volumen y peso en comparación con una máquina equivalente con devanado de excitación en el rotor. Las máquinas con imanes permanentes logran altos rendimientos con reducido tamaño. Esto posibilita la aplicación de generadores con flujo axial e imanes permanentes para la producción de energía eléctrica mediante turbinas eólicas [Murillo-Julián, 2012].* Este tipo de alternadores generan corriente alterna (CA), la que es convertida a corriente directa (CD) por medio de rectificadores insertados entre el alternador y la batería.

7.1 Componentes de un aerogenerador con imanes permanentes

Los generadores eólicos con imanes permanentes se utilizan para sistemas de pequeña escala, debido a que producen un voltaje alterno trifásico bajo ideales para cargar baterías y su construcción se realiza de manera artesanal. Los componentes de un aerogenerador con imanes permanentes son:

7.2 Chasis

Es la estructura metálica donde estará ensamblado el alternador eólico completo y la veleta. La función principal es sostener el buje, rotor, estator, aspas, y la veleta la base donde estará incrustado en la torre le permitirá pivotear para buscar el viento.

7.3 Buje o patente

En el sector de los aerogeneradores el buje (*hub* en inglés) es el elemento que se encuentra en la parte frontal del aerogenerador. En la patente están conectados el rotor y las aspas. Su principal función es ser el eje rodante movido por la acción del viento ejercido a las aspas.

7.3 Rotor

Los rotores son dos discos acero (frontal y posterior) con un diámetro y espesor determinados en el diseño, aquí se colocarán los imanes de neodimio. Los discos se apoyan en el buje de tal manera que los imanes se encaren en polos opuestos. La función principal del rotor es a través del movimiento giratorio generado por las aspas, crear un flujo magnético aprovechable. Los que provocan el flujo magnético son los imanes permanentes. Los imanes permanentes se ubican sobre la superficie de los rotores, de tal forma que el flujo magnético pasa de un rotor a otro a través de las bobinas del estator mientras el eje del rotor gira [Murillo-Julián, 2012].

7.4 Imanes de Neodimio (NeFeBo)

Los imanes de neodimio-hierro-boro (**NeFeBo**) son de alta potencia energía tiene apariencia metálica. Alcanzan lo máximo en un imán en potencias de hasta 12300 gauss ver Fig 8, han sido magnetizados en su grosor para producir un polo norte en una de las caras y un polo sur en la otra cara. Polos norte y polos sur se atraen, mientras que dos polos norte se repelen, lo mismo que dos polos sur.

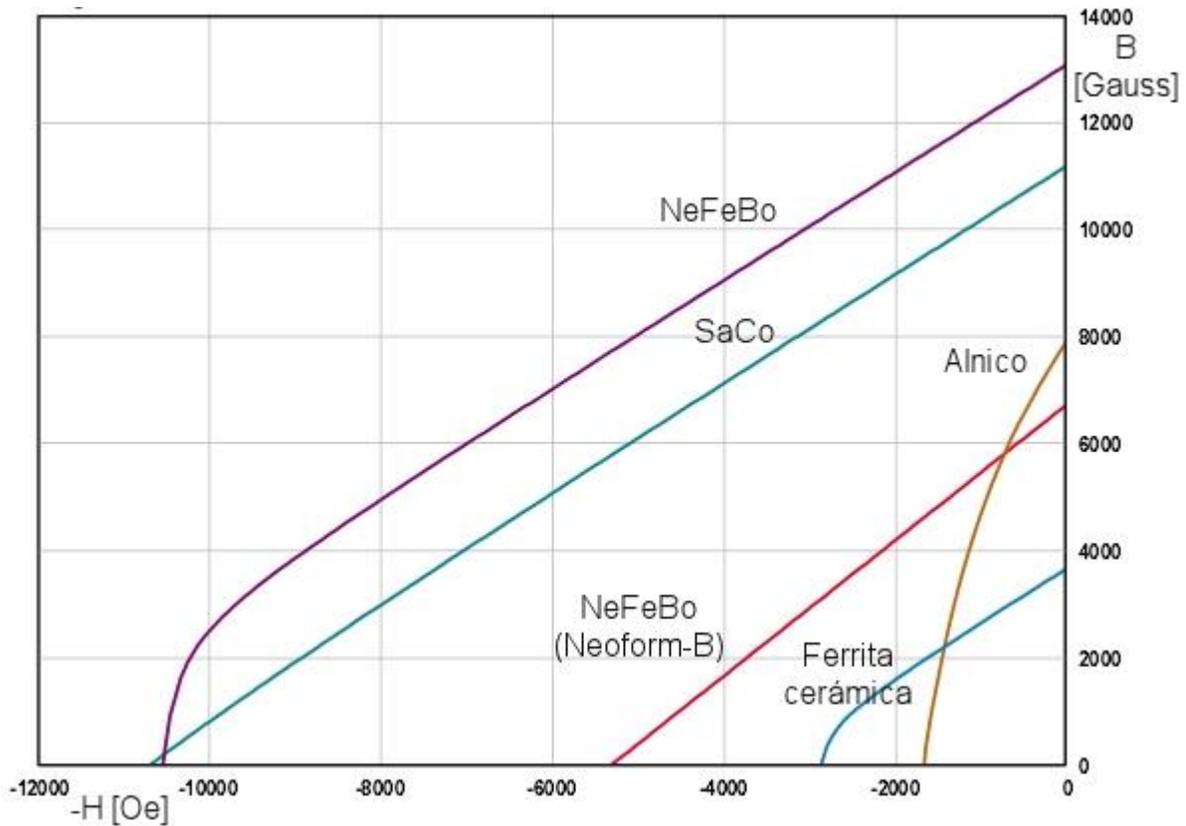


Figura 12: Curvas de magnetización de distintos materiales

7.5 Estator

Es la conexión de bobinas conectadas en series-paralelo ubicadas al diámetro que forman los imanes. El estator es el elemento estático del alternador. Su principal función es capturar el flujo magnético generado por la fuerza de atracción de los imanes o campo magnético y convertirla a través de sus bobinas en corriente alterna. También es envuelto con resina poliéster y fibra de vidrio, en el centro del estator lleva un eje hueco porque a través del eje hueco pasaran los sostenedores del buje.

7.6 Conexión Estrella

A los voltajes medidos en dos extremos de las tres puntas libres se les llama tensión o voltaje de línea y al voltaje medido entre una de las tres puntas libres y el punto en común a los tres se le llama voltaje de fase.

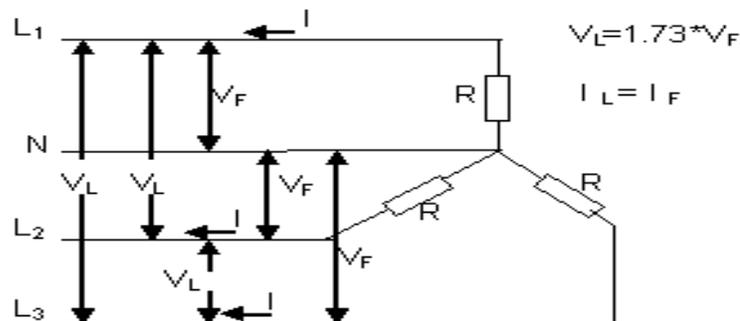


Figura 13: Conexión en Estrella

El voltaje de línea es mayor que el voltaje de fase. El voltaje de línea es 1.73 veces mayor que el voltaje de fase.

$$V_L = \sqrt{3} * V_F$$

La corriente en cualquier línea es igual a la corriente en cualquier fase del devanado:

$$I_L = I_F$$

Por lo tanto, la conexión estrella suministra un aumento de voltaje pero no hay aumento en la corriente.

7.7 Conexión Delta

En este tipo de conexión los tres devanados están conectados en serie y forman un circuito cerrado. Las tres puntas que salen de la conexión delta se usan para conectar la salida del generador a la carga. El voltaje existente entre dos de las puntas es llamado voltaje de línea.

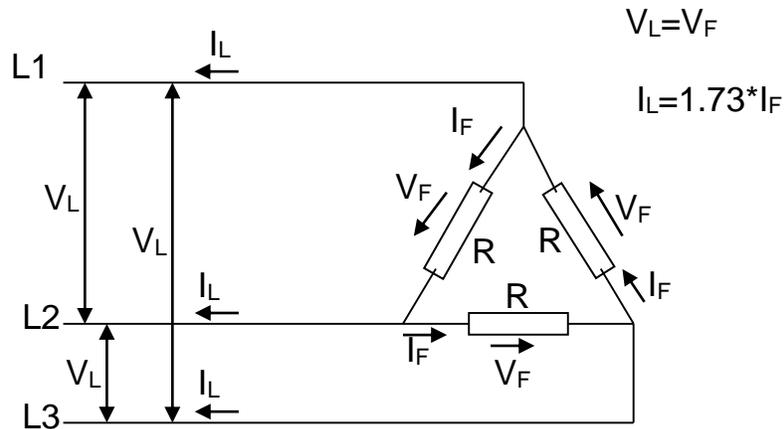


Figura 14: Conexión en Delta

El voltaje de línea, es igual al voltaje generado en un devanado, recibe el nombre de voltaje de fase:

$$V_L = V_F$$

La corriente de línea es $\sqrt{3}$ veces mayor que la corriente de fase:

$$I_L = \sqrt{3} * I_F$$

Por lo tanto, la conexión en delta suministra un aumento de corriente pero no un aumento en el voltaje.

7.8 Principio de Generación Eléctrica

De manera muy sencilla, alternador eólico son bobinas de alambre de cobre que pasa a través de un campo magnético. Como se muestra en la **Fig. 15**.

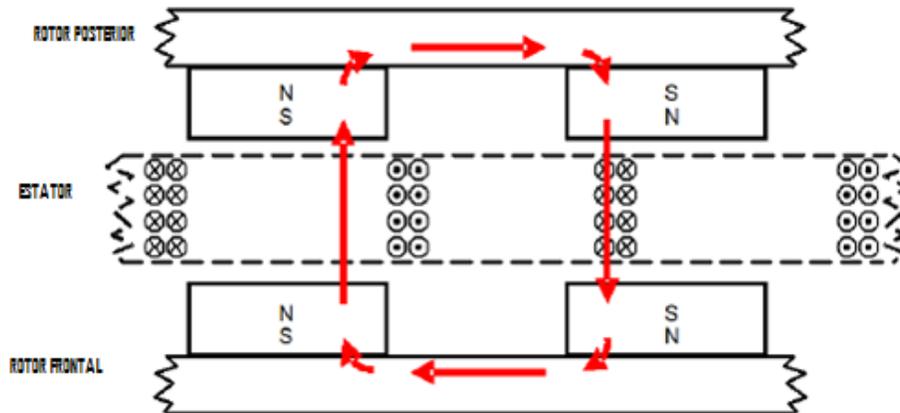


Figura 15: Flujo Magnético en un Alternador

Según la ley de Faraday, la tensión inducida en vacío se expresa:

$$E_A = \sqrt{2} * \pi * N * m * \varphi * f_{gen}$$

Dónde:

E_A : Tensión inducida.

N : Número de vueltas por bobina.

m : Número de bobinas.

Φ : Flujo que atraviesa una bobina.

f_{gen} : Frecuencia de giro del generador.

La expresión anterior nos dice que al momento que una o más bobinas atraviesan el campo magnético generado por los imanes de Neodimio (NeFeB), la tensión inducida es directamente proporcional al número de vueltas por bobina, al número de bobinas, a la

densidad del flujo del campo magnético, y a la velocidad o frecuencia de giro que la bobinas pasa a través del campo magnético.

Entonces, las bobinas del estator están conectadas con la configuración estrella cuando se produce la inducción del campo magnético en las bobinas, el alternador eólico tiene tres voltajes de salidas en desfasados 120° . Este tipo de generador se le llama generador trifásico debido a que tienen tres fases.

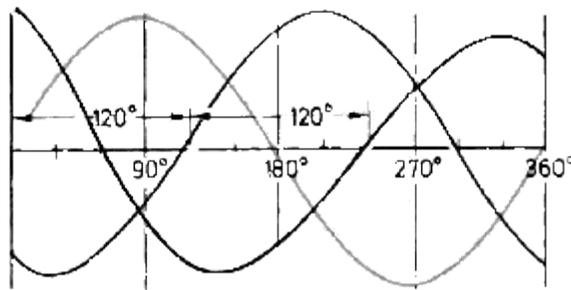


Figura 16: Señal de voltaje trifásica

8.0 Baterías y acumuladores (Ácido Plomo)

Es un equipo el cual puede almacenar y suplir a la misma vez energía eléctrica donde sea que se requiera. Durante la operación de carga la energía eléctrica suplida es almacenada en forma química y durante la descarga se lleva a cabo la conversión de energía química a eléctrica mediante el flujo de corriente hacia la carga [POET, 1997].

8.1 Componentes de una batería

- 1- Placas Positivas – las cuales actúan como cátodos cuando la batería está en proceso de descarga

- 2- Placas Negativas – las cuales actúan como ánodos cuando la batería está en proceso de descarga
- 3- Electrolito Químico – el cual conduce la corriente hacia dentro de la batería mediante la ionización
- 4- Separador – previene el contacto metálico entre las placas de polaridad opuesta dentro de la celda pero permitiendo al electrolito de desplazarse libremente.

8.2 Tipos de celdas de baterías

Dos tipos básicos de baterías están disponibles:

- 1- Batería de ácido de plomo
- 2- Baterías Alcalinas
- 3- Niquel Camio
- 4- Selladas o de Gel

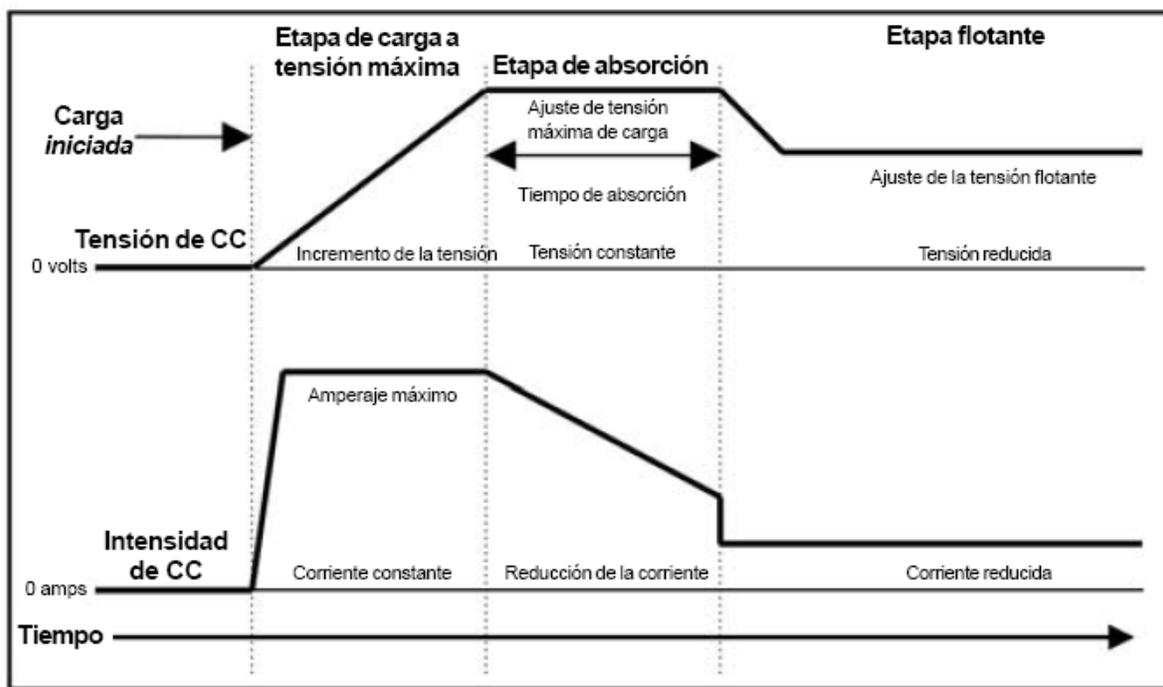
Entre las características relevantes para este proyecto de las baterías de ácido plomo están:

- Tensión: 1.8V por elemento. En general no se desciende por debajo del 20% de la capacidad de a batería, ya que si se rebasa este valor se producen importantes sulfataciones en las placas negativas. Entonces se produce una pérdida de capacidad, aumento de la resistencia interna y, por tanto, descenso de tensión. Este es un aspecto importante ya que se diseña el sistema de control para evitar que el voltaje de la batería no descienda al nivel en donde pueda dañar la batería [POET, 1997].

- Corriente de carga: si el fabricante no indica lo contrario, debe ser como máximo, igual a $C/10$, siendo C la capacidad de la batería de acumuladores.
- Vida útil: 10 a 20 años según la calidad del acumulador.

8.3 Carga de batería de tres estados

Durante el proceso de carga de tres estados, la tensión y la corriente de la batería oscilan del modo que se indica a continuación.



3553-G04-00A

Figura 17: Proceso de carga de batería

Cuando la tensión de la batería está por debajo del ajuste FLOAT durante un período acumulado de una hora, se iniciará un nuevo ciclo BULK. Esto es normal que se produzca cada noche. Si la batería está cargada al comienzo del día, recibirá una carga de

ABSORCIÓN (ABSORPTION) durante una hora y se mantendrá con el ajuste FLOAT durante el resto del día. Si la tensión de la batería cae por debajo del ajuste FLOAT durante un período acumulado de una hora, se iniciará un nuevo ciclo BULK y ABSORPTION [POET, 1997].

Este proceso de carga en tres estados facilita una carga más rápida si se compara con el de los reguladores de estado sólido de tensión constante o del tipo relé sí/no. Una recarga más rápida incrementa el rendimiento del sistema almacenando más de la salida limitada de la matriz FV. El ajuste final de tensión FLOAT reduce la gasificación de la batería, disminuye las necesidades de adición de agua y asegura una recarga completa de la batería.

8.4 Tipos de Ciclos

Existen tres tipos primarios de ciclos de descarga de las baterías, pequeña, moderada y profunda. Estos términos nos ayudaran para comprender el tipo de ciclo que las baterías requerirán. El ciclo pequeño ocurre cuando solo un pequeño porcentaje del total de la capacidad de la batería es descargado. Los ciclos moderado y profundo es donde las baterías son descargadas a un mayor porcentaje del total de la capacidad de la batería respectivamente [POET, 1997].

8.5 Ciclos de Vida

La vida útil de una batería de ciclo profundo depende de muchos factores: el mantenimiento preventivo, el porcentaje de descarga, temperatura de la batería, cantidad de veces que se descarga, vibración, etc.

El DOD significa la cantidad de descarga de una batería de ciclo profundo (en porcentaje) [POET, 1997]. Unos de los factores más importantes DOD por ciclo. Cuando la cantidad de DOD es incrementada por ciclo. Resulta en una reducción del total de ciclos de la batería.

Ciclos de Vida Aproximados	
% de descarga DOD	Ciclos
25	2200
50	1000
75	550
100	325

Tabla 1. DOD vs Ciclos

9.0 Sistemas de control de aerogeneradores

El principal objetivo del sistema de control en un aerogenerador es limitar la generación de potencia y las rpm en condiciones de vientos intensos. A medida que las turbinas evolucionaron, los requerimientos de control aumentaron y los mecanismos ganaron en complejidad por ejemplo en grandes turbinas, los objetivos del sistema de control incluyen: mayor captación de energía dentro de las condiciones y límites previstos, la reducción de cargas mecánicas y estructurales sobre el sistema y la calidad de la potencia generada, para poder cumplir especificaciones estándar de conexión al fluido eléctrico [Scarabino, del Pezzo, Menghini, 2007].

9.1 Métodos de regulación y control del número de revoluciones

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 superiores a las admisibles bajo el punto de vista estructural.

A una determinada velocidad nominal, el rotor gira a las revoluciones precisas para que la turbina 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 continuase aumentando, el rotor corre peligro desde el punto de vista estructural debido a las vibraciones, por eso el motor debe frenar [Pedro Fernández Díaz, 2003].

Entre los métodos más utilizados están:

- Regulación por frenos de acción aerodinámica
- Control mediante mecanismos de orientación

Uno de los principales problemas que plantean los aerogeneradores de eje horizontal es la necesidad de ser orientados, de forma que el viento incida perpendicularmente al disco de barrido por el rotor, con el fin de obtener la máxima potencia a base de hacer incidir la mayor cantidad posible de masa de aire en movimiento y así obtener la mayor cantidad posible de energía cinética.

Entre los métodos mayormente utilizados están:

- Servomotor o motor paso a paso controlado electrónicamente.
- Por cabeceo – El eje del rotor se desalinea con el plano vertical respecto a la dirección de viento incidente.

Orientación del rotor utilizando pala o veleta auxiliar

La orientación con veleta colocada al extremo del cuerpo del generador ayudan a dirigirlo hacia el viento. Se construyen usualmente con materiales ligeros ejemplo: metal o

madera. Cuando el viento incide sobre su superficie la fuerza de empuje presente crea un giro que direcciona al rotor de cara al viento.

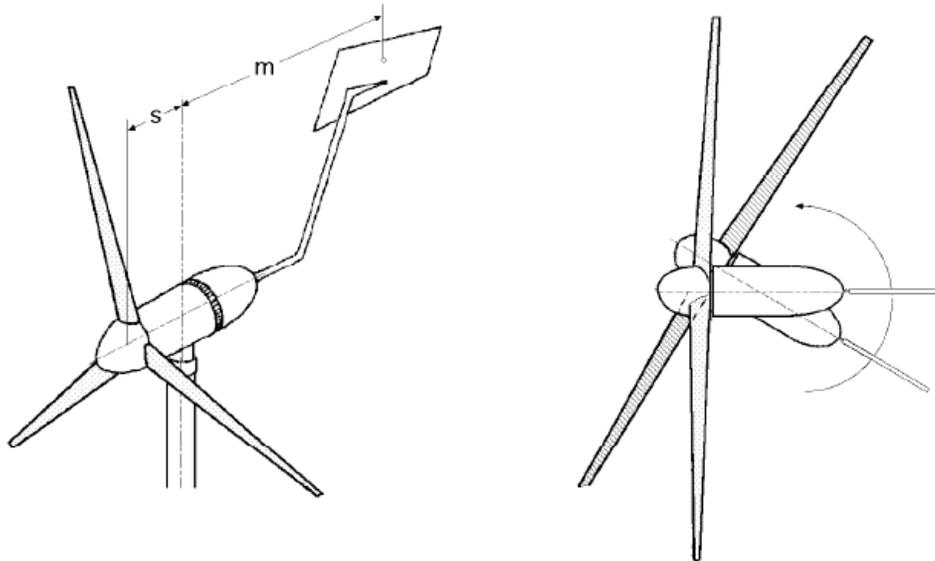


Figura 18: Método de desorientación por veleta auxiliar

Como se observa en la figura entre el eje de giro del generador y el centro de sus aspas existe una distancia **s** y desde el eje de giro y el centro de gravedad de la veleta existe una distancia **m**. Para que la orientación sea exitosa se debe cumplir que **m=4s**.

Esta adición a la máquina crea dos ventajas, la primera como se dijo anteriormente direcciona la máquina hacia el viento para aumentar la generación de energía y la segunda es que a medida que la velocidad del viento se incrementa, también se incrementa la fuerza de sustentación que se crea entre la cola y el rotor, cuando esta alcanza una cierta magnitud mueve la cola a una nueva posición. En esta posición el rotor puede desorientarse del viento evitando así daños producidos por revoluciones

excesivas de la máquina, sobrecalentamiento en los devanados y desgastes en las partes mecánicas móviles.

V. Análisis y Presentación de Resultados

La metodología utilizada fue la base para realizar el análisis y cálculos necesarios para proceder a construir el sistema. Una vez las variables de construcción fueron analizadas con Hugh Piggott los resultados obtenidos de ese análisis se obtuvieron y se presentan a continuación.

1.0 Metodología de desarrollo

La Metodología usada en este proyecto se basó en el manual de construcción de aerogeneradores artesanales de Hugh Piggot “Cómo construir un generador Eólico – Planos para un generador de flujo axial” para un generador de 1.6 mts y 2 mts de diámetro entre aspas.

2.0 Consideraciones básicas de diseño

Para determinar las dimensiones del generador eólico artesanal se tomó en consideración primeramente el presupuesto con el que se contaba para el proyecto, siendo este de \$500 los cuales fueron donados por la Empresa Sunergia. A partir de este presupuesto se calculó la cantidad de imanes de neodinium que se podían adquirir dejando suficientes recursos para adquirir los demás materiales a utilizar.

MATERIAL	PRECIO
PATENTE	C\$ 350.00
TUBOS	C\$ 296.00
DISCOS METALICOS	C\$ 200.00
IMANES NEODIMIO	C\$4,200.00
PLYWOOD	C\$ 500.00
MADERA	C\$ 750.00
RESINA Y FIBRA DE VIDRIO	C\$ 765.00
ALAMBRE DE COBRE	C\$ 929.29
TUERCAS Y TORNILLOS	C\$ 370.30
COMPONENTES ELECTRONICOS	C\$ 400.00
PINTURA Y SPRAY	C\$ 146.25
COMBUSTIBLE PARA COMPRA	C\$ 100.00
TRANSPORTE DE MADERA	C\$ 100.00
TOTAL	C\$9,106.84

Tabla 1: Presupuesto para el proyecto

Se optó por construir un aerogenerador de 16 imanes la cual es la cantidad mínima de imanes que existe para los generadores propuestos en el manual de Hugh Piggott.

Después de determinar la cantidad de imanes se procedió a hacer los cálculos correspondientes de la cantidad de bobinas necesarias, el tamaño del rotor y el tamaño de las aspas.

Las fórmulas utilizadas para calcular estas dimensiones y cantidades fueron extraídas del manual de Hugh Piggott y algunos de estos cálculos se realizaron con ayuda de él mismo. Debido a petición explícita de Hugh Piggott las fórmulas utilizadas no se presentan en este documento siendo propiedad intelectual del autor.

3.0 Resultados de los cálculos

Número de imanes en total = 16

Diámetro estator = 307mm

Número de bobinas = 6

Diámetro del alambre para los embobinados = $[(\text{tamaño alambre}) * 4 / \pi]^{1/2} = 1.66\text{mm}$

Volt (rms)/rpm = 0.03 V

Volt DC/rpm = 0.043 V

Corriente en DC = 25 A

Eficiencia de generación eléctrica (Potencia de salida deseada versus pérdidas en los devanados y diodos) = 63.1%

La velocidad de embalamiento y de arranque son determinadas ecuaciones de Hugh Piggott resultando:

Velocidad de embalamiento: a 480 rpm

Velocidad Nóminal: 313 rpm

Velocidad de viento para arranque: 4 m/s

Se construyeron dos juegos de aspas de diámetros distintos para observar el comportamiento que el diámetro del rotor tiene en la obtención de energía a partir del viento.

Generador eólico con aspas de 2 metros de diámetro			
Estación	Anchura	Caída	Grosor
1	16cm		4.9cm
2	16cm	4.5cm	2.2cm
3	10.5cm	1.9cm	1.4cm
4	8.4cm	1cm	1cm
5	6.8cm	0.6cm	0.8cm
6	5.75cm	0.3cm	0.6cm
Generador eólico con aspas de 1.62 metros de diámetro			
Estación	Anchura	Caída	Grosor
1	15.3cm		4.9cm
2	15.3cm	4.5cm	2.2cm
3	10cm	1.9cm	1.4cm
4	8.0cm	1.0cm	1.0cm
5	6.5cm	0.6cm	0.8cm
6	5.5cm	0.3cm	0.6cm

Tabla 2: Parámetros para modelado de las aspas

Estos valores representan los parámetros a seguir en la construcción de las aspas a partir de un bloque de madera donde las estaciones son puntos equidistantes donde el ángulo de calado de la madera cambia y la caída es el ángulo respectivo que hace al aspa tener una forma aerodinámica.

3.1 Construcción de aspas o palas

Son tres aspas, capturan al viento y producen energía mecánica que harán girar el alternador a diferentes revoluciones, las dimensiones de las aspas están en dependencia del diámetro del rotor. Su principal función es transformar la energía de la fuerza del viento en energía mecánica.

La eficiencia del generador dependen de que tan aerodinámicas sean las aspas, esta actividad es de suma importancia. Para realizar las aspas se recomienda usar madera suave (cedro real – fácilmente encontrado en Nicaragua). Con el Manual de Hugh Piggott presenta pasos para fabricar aspas aerodinámicas sin necesidad de ser carpintero.

El perfil aerodinámico utilizado por Hugh Piggott en su manual para todas las aspas sin importar el tamaño del generador es el perfil NACA 4412 como el mostrado en la figura 19:

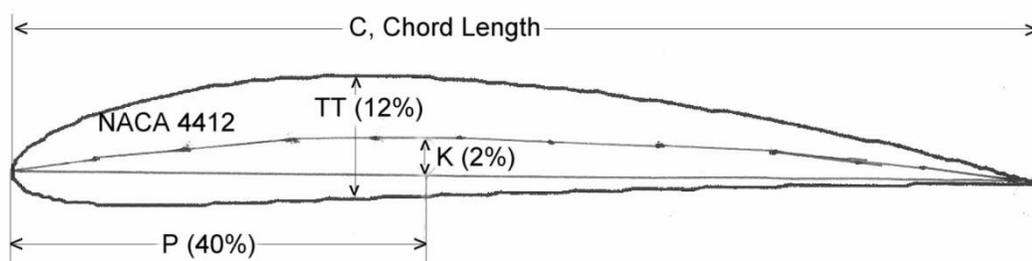


Figura 19: Perfil aerodinámico NACA 4412

El proceso de calar este perfil aerodinámico sobre un bloque de madera es crítico ya que la cualquier error en el ángulo de calaje de cualquiera de las estaciones significaría que pérdidas y/o no aprovechamiento eficiente de la fuerza del viento.

Se encontró en la práctica que este proceso además de ser complejo debe ser verificado repetida y minuciosamente para evitar cometer errores de calado excesivo o insuficiente.

El primer paso fue crear la forma del aspa realizando marcas equidistantes a 200mm que se denominan estaciones ver figura 20.

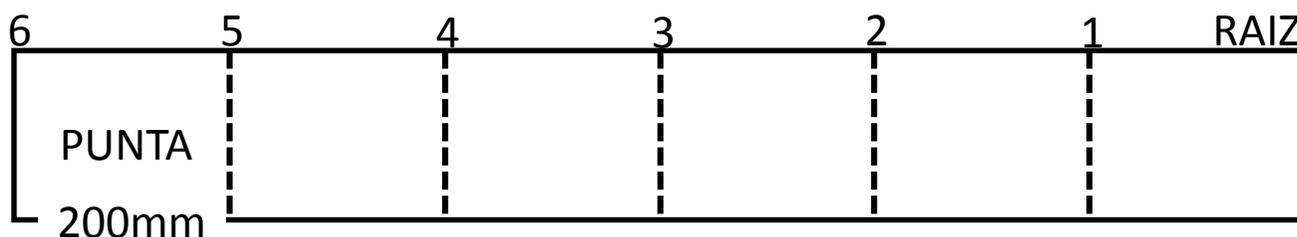


Figura 18: Estaciones

En cada una de las estaciones se marcó una anchura correspondiente a la expresada en la tabla se marcó una línea uniendo todos los puntos en cada una de las estaciones a como se observa en la figura 21 y se procedió a remover la madera por debajo de esta línea.

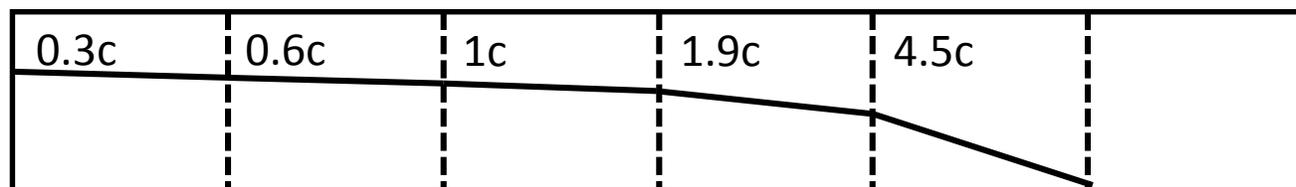


Figura 21: Grosor de estaciones



Figura 22: Corte general del aspa



(a)



(b)

Figura 23: (a) (b): Proceso de corte de todas las aspas

Después de haber cortado la madera de esta manera se procedió al tallado de la cara que encara al viento la cual es angulada. El ángulo de la aspa es mayor junto a la raíz que en el punto. El ángulo debe cambiar debido a que la velocidad de giro es menor conforme se acerca al centro.

Se marcaron las caídas de cada una de las estaciones de acuerdo con la tabla 2 quedando la pieza de madera como se muestra en la figura 24:

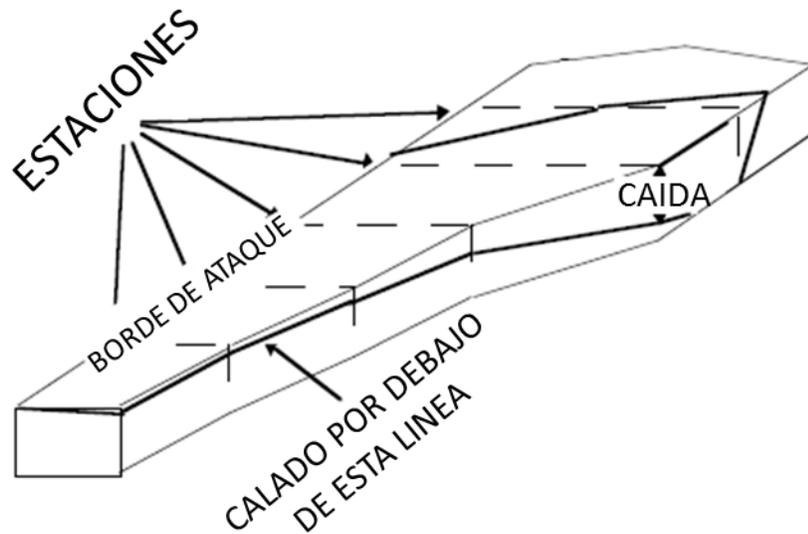


Figura 24: Marcas de caída

La “caída” en la estación 1 no es lo suficientemente amplia para proporcionar el ángulo necesario y continuar con el perfil NACA 4412 sobre la superficie del asa. Dicha cuña crea el ángulo adecuado sin que tengamos que usar una pieza demasiado gruesa. [Piggot, 2004].

Una vez calada la caída de la parte que encara el viento se procedió a realizar el calado de la parte posterior del asa según los parámetros de grosor encontrados en la tabla 2. Ambas caras del asa son planas y paralelas entre sí.

Se dibujan las líneas correspondientes al grosor en cada estación y se procedió a calar la superficie ver figura 25.

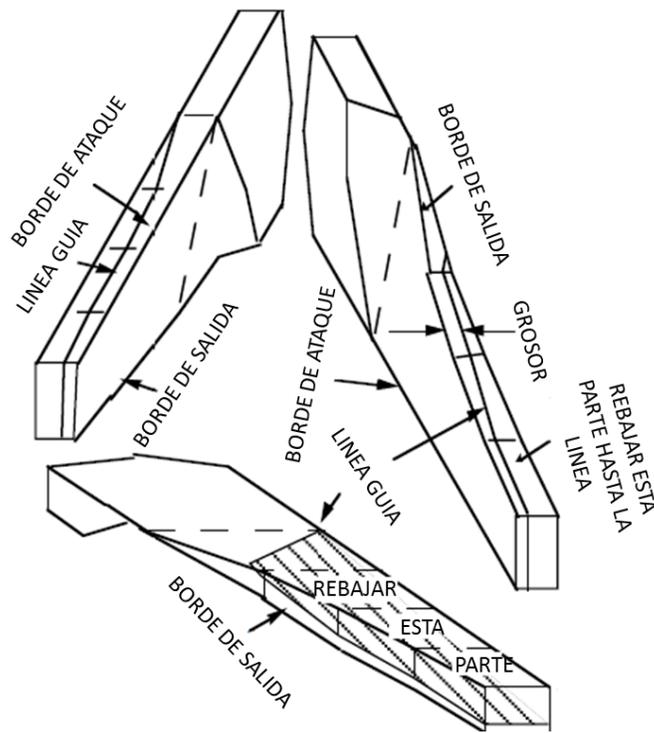


Figura 25: Grosor inferior del aspa

Estas líneas tuvieron el propósito de guiar el proceso de tallado de la sección para obtener el grosor correcto. A medida que nos acercábamos a las líneas debimos comprobar el grosor de cada estación con un calibrador.

Una vez tallados los dos lados del aspa el siguiente paso fue rebajar desde el borde de salida creando una superficie curvada, de esta forma se crea una sección aerodinámica apropiada en cada estación para evitar una elevada resistencia al aire, lo que podría limitar el correcto funcionamiento del aspa a altas velocidades [Piggot, 2004].

Para esto se trazaron dos líneas a lo largo de la parte posterior del aspa, a 30% y 50% de la anchura medidas desde el borde de ataque al de salida, ver figura 26.

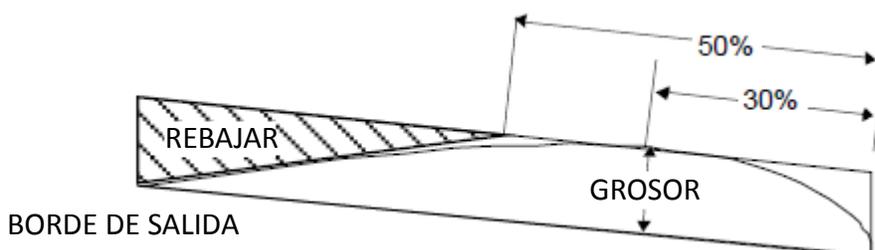


Figura 26: Forma aerodinámica deseada

Terminado el moldeo de las aspas el siguiente procedimiento fue crear un corte de 120° en la terminación de las aspas para unir las, colocar los discos de unión y atornillarlas a como se muestra en la figura 27.

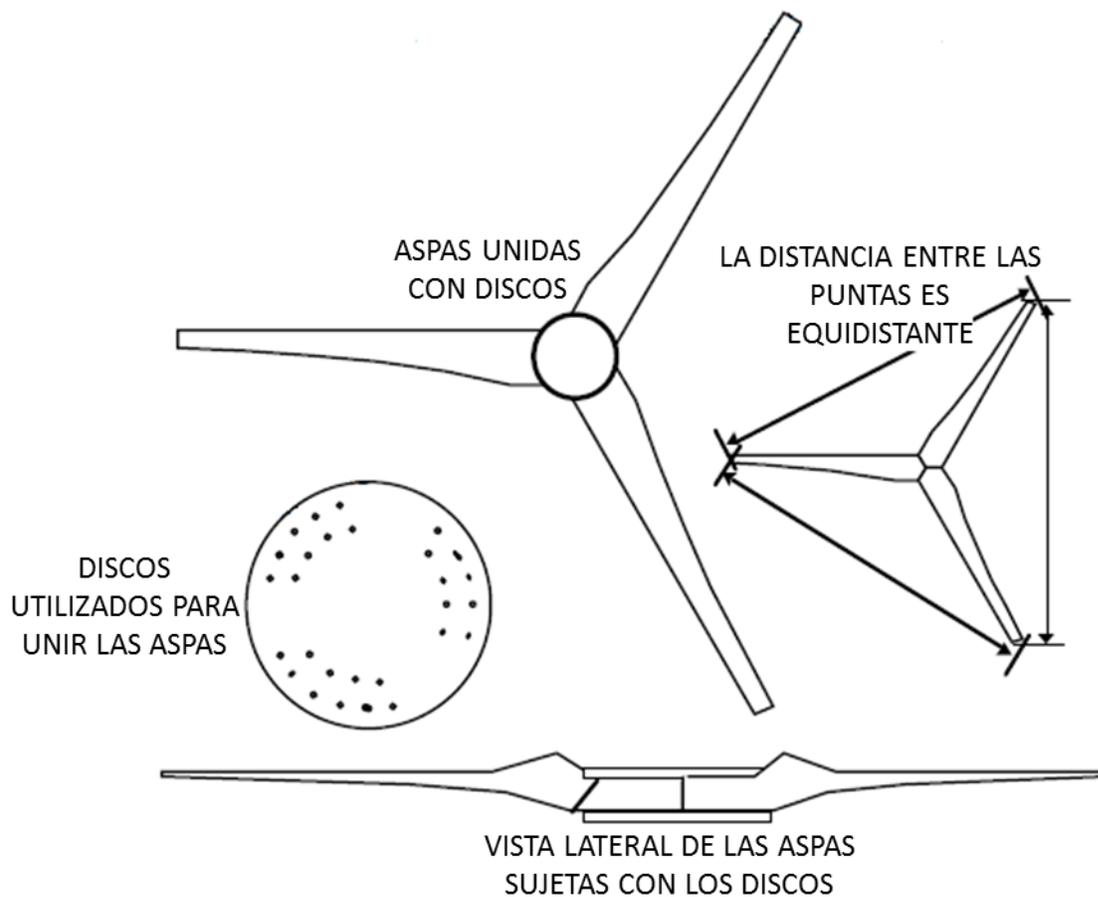


Figura 27: Unión de discos y aspas

3.2 Buje o patente

En los aerogeneradores pequeños el buje (hub en inglés) es el elemento que se encuentra en la parte frontal del aerogenerador. En la patente están conectados el rotor y las aspas. Su principal función es ser el eje rodante movido por la acción del viento ejercido a las aspas.

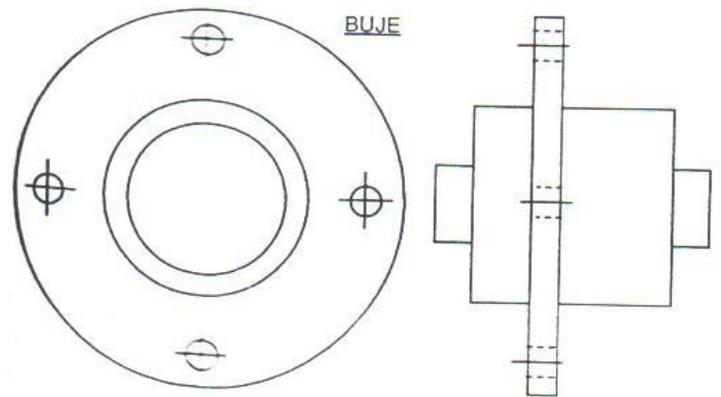


Figura 28: Patente

Se utilizó una patente de vehículo ya que construir una podría haber llevado mucho tiempo y la patente de vehículo será óptima para el propósito que desempeña el buje en el generador.

3.3 Construcción del soporte del generador

Una de las primeras partes que se construyeron fue el chasis o soporte del generador, el cual está compuesto por hierro, metal y acero.

El soporte consiste de un tubo de 2" de diámetro con una chapa de 1/8" y una longitud de 46cm (tubo pivotante), esto es la parte central del generador eólico y también es el pivote de orientación y está encajado en la torre donde se instala.

Además de esto, angulares con dimensiones 6cm x 6cm x 0.5cm unidos entre sí, tienen la tarea de sostener el buje y al estator. Junto al tubo pivotante se soldaron angulares. El soporte del buje o patente vehicular son dos piezas de angulares de acero de 6cm x 6cm x 0.5cm y tienen una longitud de 25cm cada una, formando un canal donde se atornilló la patente vehicular. Estas dos piezas de angulares deben tener una inclinación

de 4° grados con respecto al tubo pivotante para incrementar la distancia entre la torre y las puntas de las aspas.

El soporte del estator se utilizó angulares más cortos pero con las mismas dimensiones 6cm x 6cm x 0.5cm. Dos piezas de 5cm de longitud que se soldaran en el tubo pivotante y una pieza de 35cm de longitud que se soldara al final del canal de angulares.

Por último, se soldó al tubo pivotante en posición diagonal una bisagra, es un tubo de ½" de 20cm de longitud. El ángulo entre el tubo de ½" (bisagra) y plano del rotor es de 35 grados. La inclinación de la bisagra es de 20 grados con respecto al tubo pivotante. Esto sirve como el soporte de la veleta.

Chasis			
Descripción	Dimensiones	Aplicación	Cantidad
Tubo de acero grado 35	Longitud = 12"	Se ancla en la torre y gira conforme a la dirección del viento	1
	Diámetro= 2 3/8"		
Angulares metálicos	Longitud = 32"	Se sostiene el buje y también se mantiene el estator	1
	Angulo = 90		

Tabla 3: Dimensiones del Chasis

Comparación entre el diseño Hugh Piggott y el implementado se pueden apreciar en la figura 29.

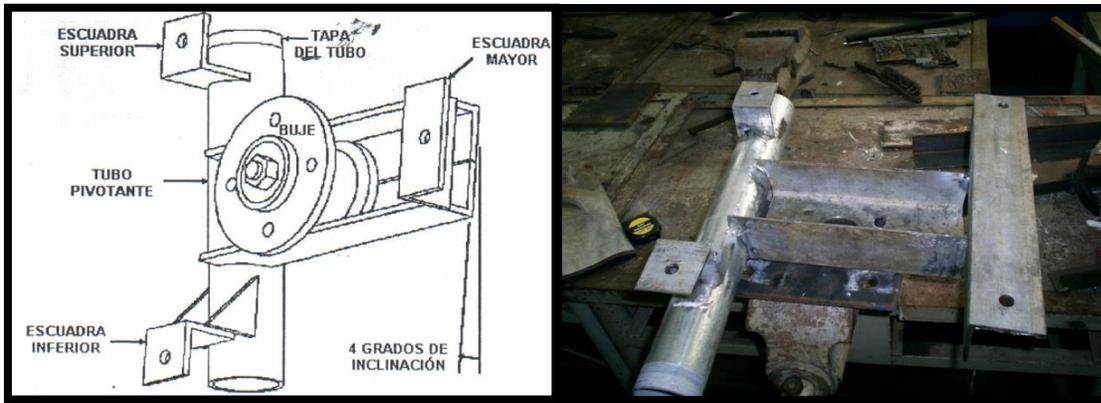


Figura 29: Diseño de soporte según metodología Hugh Piggott y Soporte implementado

Para realizar esta actividad se solicitó permiso de las autoridades universitarias para el uso del taller de mecánica del RUPAP. Se procedió a cortar los trozos de angulares, una vez terminado se procedió a realizar agujeros en los extremos donde se sujeta el alternador en el torno del taller de mecánica, para con esto realizar el trabajo de soldadura para unir todas estas piezas metálicas. De esta manera obtuvimos el soporte del generador.



Figura 30: Perforación de agujeros y Unión de las piezas mecánicas

3.4 Construcción del rotor

El rotor consiste en dos discos acero con un diámetro 275mm y de grosor 7.8mm, los cuales están colocados los imanes de neodimio, para aislar los imanes de la intemperie se envuelven en resina poliéster. Los discos se montan en el buje de tal manera que los imanes se encaren en polos opuestos. La función principal del rotor es a través del movimiento generado por las aspas, crear un flujo magnético aprovechable. Estos discos de acero fueron comprados en una recicladora de hierro local.

La figura 31 muestra un corte transversal del rotor donde se puede apreciar como los discos se encuentran instalados.

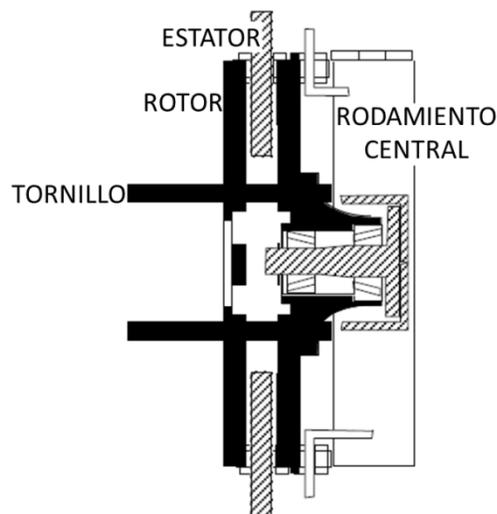


Figura 31: Corte transversal del rotor

Para lograr construir el rotor se utilizaron 16 imanes de Neodimio, 8 imanes en cada disco de acero separados a 33 grados de esta forma estarán repartidos de manera equitativa y simétrica. Las dimensiones de los imanes de Neodimio son 2"x1"x0.5", estos imanes de Neodimio fueron importados desde EEUU. Esta actividad se realizó en el taller de

Mecánica del RUPAP, solamente se realizaron los huecos donde estarán fijos a la patente. Se requirió del torno y el taladro industrial.

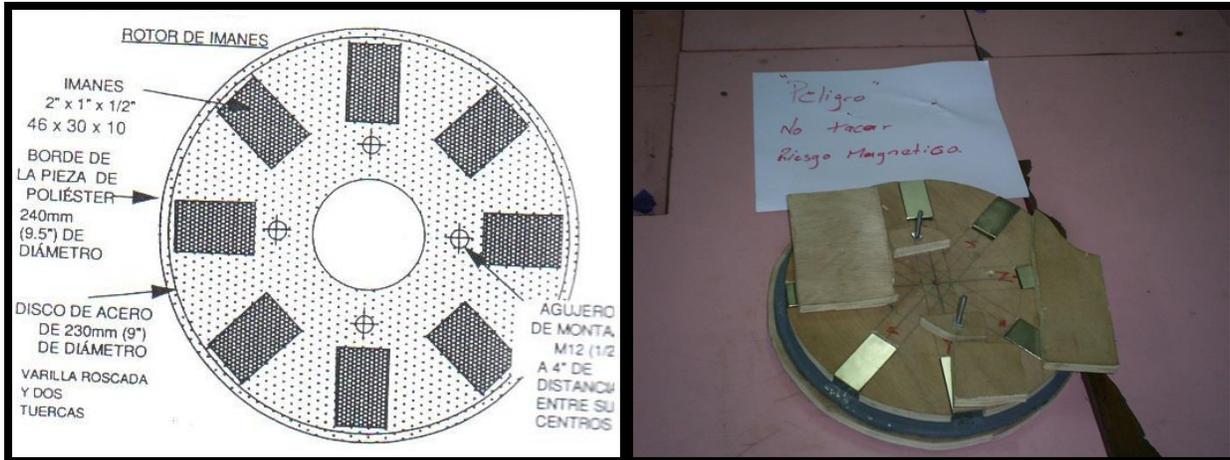


Figura 32: Diseño rotor de imanes Hugh Piggott y rotor de imanes implementado

Se utilizaron imanes de neodimio debido a que estos presentan un mayor flujo magnético que se traduce en mayor energía aprovechada por cada revolución de las aspas. Se pueden utilizar imanes de ferrita de bario los cuales son más comunes y baratos. Debido a la gran fuerza magnética de los imanes de neodimio se recomienda que sean tratados con cuidado ya que se observó que si existe otro imán en la cercanía u algún material metálico estos se verán atraídos a él con mucha fuerza pudiendo lesionar al que los manipule.

También se tomaron las precauciones de no acercar dispositivos magnéticos y electrónicos como cintas, celulares, tarjetas de crédito etc. Los cuales también pueden ser afectados por el flujo magnético.

Cada imán tiene un polo norte y un polo sur. Los polos están alternados, es decir, el polo norte encarta al estator en un imán y el polo sur lo hace en el siguiente. Los polos en el

otro rotor están dispuestos en polaridades opuestas de modo que polos norte y sur están encarados a través del estator, creando el flujo magnético.

La actividad de conectar los imanes de Neodimio al rotor se llevó a cabo en el Laboratorio de Circuitos Eléctricos del recinto RUSB-UNI.



Figura 33: Perforación de los agujeros de montaje del rotor

3.5 Moldes

El rotor está conformado por dos discos de acero lo cuales también fueron extraídos de materiales reciclado los que tienen una medida de 26cm de diámetro y 1.2cm de grosor (cabe destacar de que las medidas de estos va depender de la cantidad de imanes que se deseen utilizar), estos discos de acero se montaron a la patente vehicular.

Rotor			
Descripción	Dimensiones	Aplicación	Cantidad
Discos Metálicos grado 35	Diámetro= 12" o menos	se ensamblaron los imanes permanentes y se cubrieron de resina	2

Tabla 4: Dimensiones de disco a utilizar

Para realizar el aislamiento con la resina se requirió de moldes para dar forma a ésta, para esto se utilizaron moldes de madera (Plywood). Estos moldes de madera fueron utilizados para el rotor y el estator respectivamente. En el rotor aparte de su aislamiento también se usó un molde para ubicar los imanes a distancias simétricas de tal manera que ambas caras encuentren su polo opuesto. El material que se utilizó fueron láminas de Plywood ver dimensiones en tabla 5 fue comprado en una ferretería ubicada en el Mercado Oriental:

Moldes del Estator			
Descripción	Dimensiones	Aplicación	Cantidad
Madera plywood	Área= 30"x30"	Hacer la forma del molde del estator envuelta en resina	1
	Grosor= 1/2 "		
Madera plywood	Área= 30"x30"	Hacer la forma de la tapa del estator	2
	Grosor= 1/4 "		
Madera plywood	Área =10"x10"	Hacer el centro para los imanes	2
	Grosor= 1/2"		

Tabla 5: Dimensiones de moldes de estator

Las medidas que se tomaron fueron del disco de acero (Rotor), después se procedió a realizar una pieza de Plywood circular con un diámetro de 280 mm y 2 moldes cuadrados de 300mm x 300 mm que se utilizaron. 1 molde de base y 1 molde superior que tendrá un área circular libre de las medidas del disco de acero del rotor (28mm de diámetro),

ambos moldes de base y superior se juntaron con el fin de crear un solo molde de Plywood para el aislamiento del rotor con resina liquida.

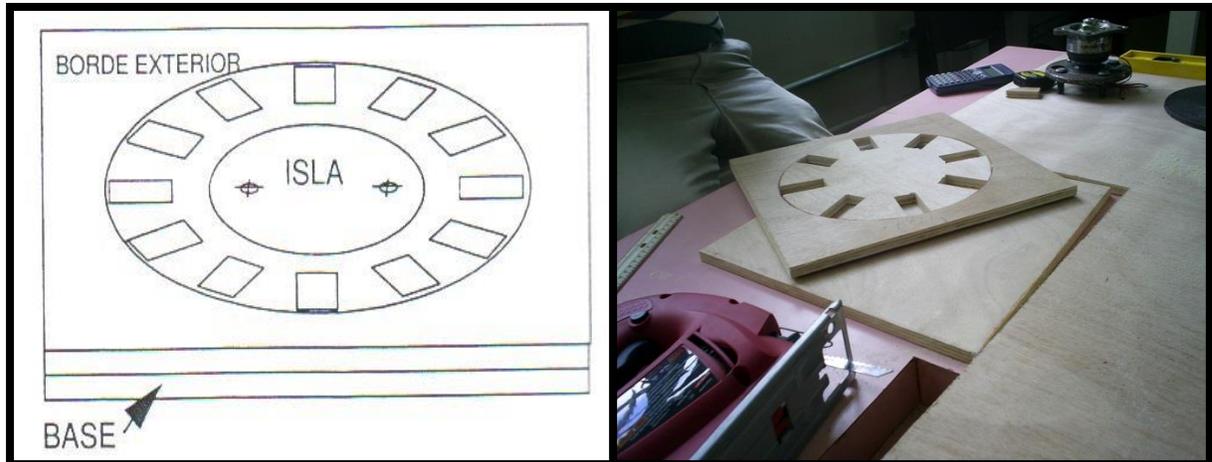


Figura 34: Dimensiones de moldes de estator y Moldes implementados

Esta actividad fue realizada en el laboratorio de Circuitos Eléctricos y se tomaron medidas del rotor para su aislamiento y medidas de los imanes de Neodimio, también se realizaron medidas del estator. Se utilizó un serrucho eléctrico y un taladro eléctrico.



Figura 35: Construcción de moldes de estator

3.6 Construcción de estator

Es la conexión de bobinas conectadas en series-paralelo ubicadas al diámetro que forman los imanes. El estator es el elemento estático del alternador. Su principal función es capturar el flujo magnético generado por la fuerza de atracción de los imanes y convertirla a través de sus bobinas en corriente alterna. Se utilizaron 6 libras de alambre de cobre esmaltado descubierto No. 14 AWG, fue comprado en una tienda local SELSA.

Para lograr realizar las bobinas se construyó un bobinador artesanal que fue diseñado por el Ing. Oscar Danilo Perez. Este bobinador está conformado por una base metálica con 2 tubos de $\frac{1}{2}$ " soldados a la base, cada tubo tiene en su punta una balinera de bicicleta por la cual pasa una maneral que sirve para realizar movimientos giratorios, y en el extremo derecho se instalaron 2 moldes madera en forma de H para sostener el alambre de cobre embobinado (figura 36) con el propósito de crear así 6 bobinas con 75 vueltas cada una.

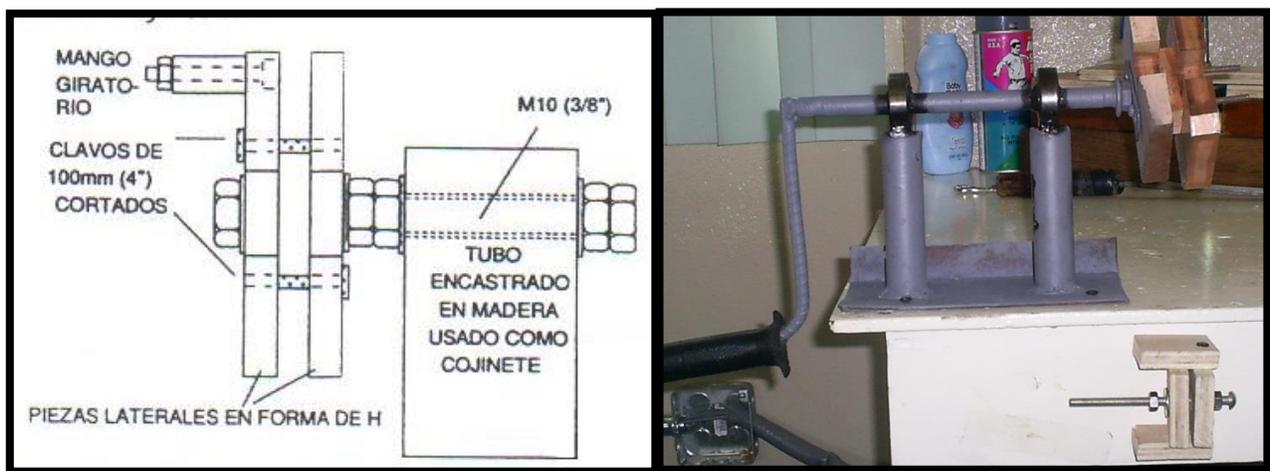


Figura 36: Diseño de embobinador Hugh Piggott y embobinador Ing. Oscar Pérez

Esta actividad fue ejecutada en el laboratorio de Circuitos Eléctricos, solamente se utilizó el bobinador artesanal con una corta-cable.

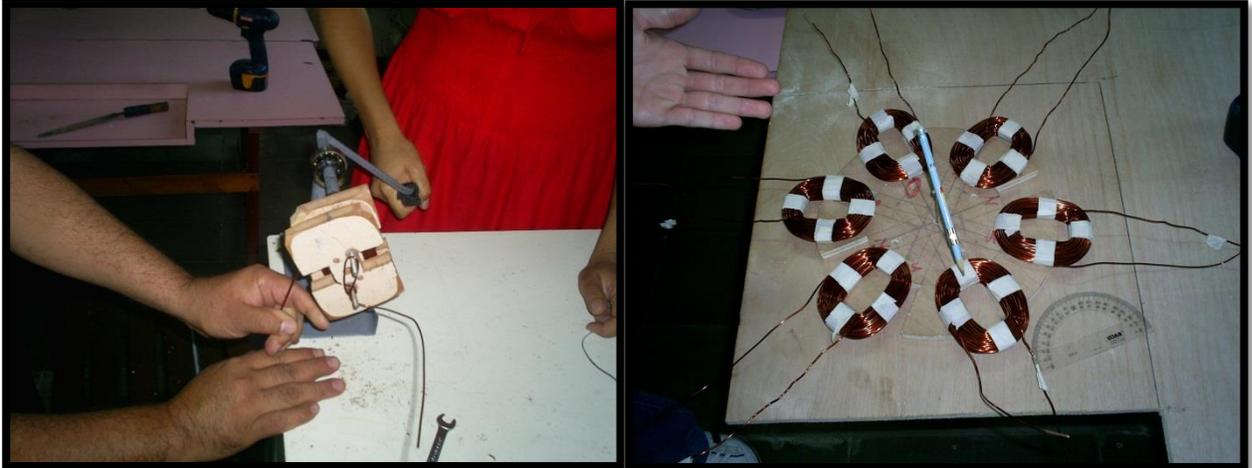


Figura 37: Proceso de embobinado y Bobinas terminada

Las conexiones de las bobinas son en serie/estrellas agrupando 2 bobinas por fase. Las conexiones de las bobinas por fases quedaron conformadas de la siguiente manera:

- La fase 1 - La bobina 1 con la bobina 4
- La fase 2 - La bobina 2 con la bobina 5
- La fase 3 - La bobina 3, con la bobina 6

En la figura 38 se puede apreciar el diagrama real de las bobinas conectadas y el diagrama de circuito.

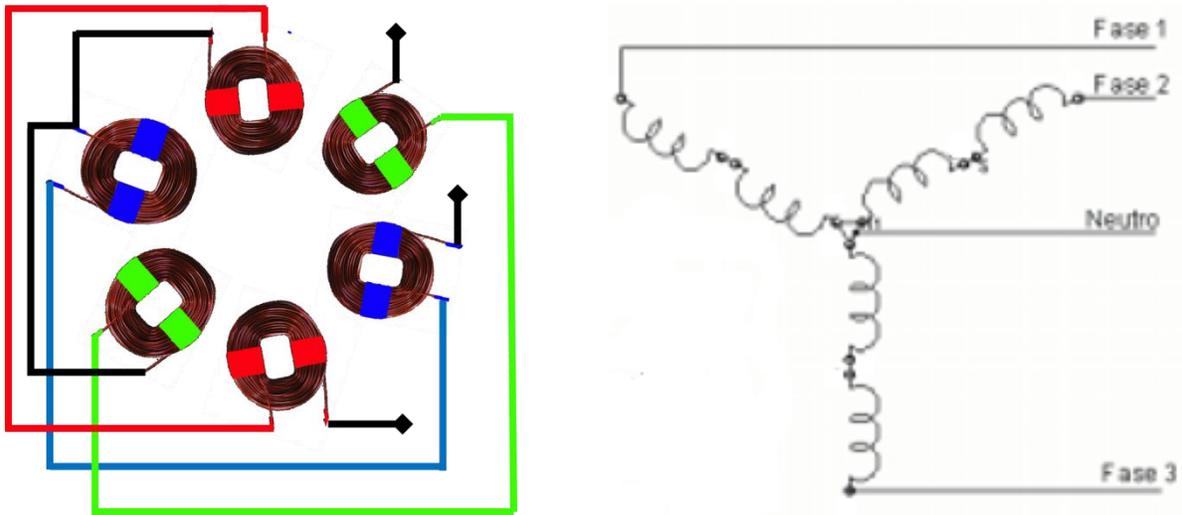


Figura 38: Conexión real de las bobinas en serie y circuito equivalente

3.7 Preparación de la resina poliéster

Una vez colocado los imanes de Neodimio en los discos de aceros, fabricadas las bobinas y los moldes de madera, se procedió a realizar el aislamiento del rotor y fabricación del estator con resina verde poliéster. Este proceso es muy delicado y riesgoso debido a los disolventes y químicos que se utilizan.

Aislamiento del Rotor: Ambos discos de acero con sus respectivos imanes deberán ser aislados y pegados con resina, para evitar los imanes salgan del disco de aceros cuando estos mismos (discos de aceros) estén frente a frente en polos opuestos. Lo primero es aplicar capa de cera en todo el molde para que la resina no quede pegada al molde y luego silicón en los bordes para evitar filtración de la resina.



Figura 39: Sellado de Silicón



Figura 40: Preparación del molde para resina

Se colocaron trozos de tejidos de fibra de vidrio, para luego mezclarse 200 gramos de resina con 3cc de catalizador (activador), se mezcló de tal manera que no pudiesen quedar burbujas en su interior. La resina mezclada se extendió sobre la base del molde, aplicándola más resina por encima. Para ahorrar resina se utilizó talco para hacer más espesa la resina.



Figura 41: Resultado final del rotor

Con la ayuda de una brocha se dan los retoques y detalles, ya que la resina se fragua en pocos minutos. Luego se deja en una superficie nivelada para evitar que la resina se deforme y se deja cubierto para protección de las mismas.

3.8 Fabricación del estator

Se llevó a cabo el mismo proceso realizado en el aislamiento del rotor. Se aplicaron capas de cera y silicón a los bordes para evitar que la resina se adhiriera a los moldes del estator y también filtración de resina.



Figura 42: Fabricación del molde del estator

Se colocaron trozos de fibra de vidrio, luego se mezclaron 400 gramos de resina con 6cc de catalizador (activador), se mezcló de tal manera que no quedaron burbujas en su interior. La resina mezclada se extiende sobre la base del molde, aplicándola más resina por encima. Para ahorrar resina se utiliza talco para hacer más espesa la resina.



Figura 43: Vertimiento de la resina sobre el molde del Estator

Las bobinas tienen que estar colocadas en referencia a la posiciones de los imanes, y los tres hilos o fases deberán permanecer fuera del molde de resina, debido que los tres hilos o fases serán el resultado de inducción eléctrica que pasara a través de la bobinas.



Figura 44: Colocación de las bobinas y resultado final

Se observó que el trabajo con resina requiere de un lugar ventilado ya que la resina y sus disolventes emanan olores tóxicos y fuertes. Usar guantes y máscaras de protección personal de estos químicos.

3.9 Construcción de la veleta

La veleta o cola del generador tiene como principal función regular la potencia de viento entrante al generador, cuando la potencia del viento alcance cierto nivel máximo, la veleta desorientara al generador de la potencia máxima del viento con el objetivo de evitar que el alternador se quemara al girar a máximas RPM.

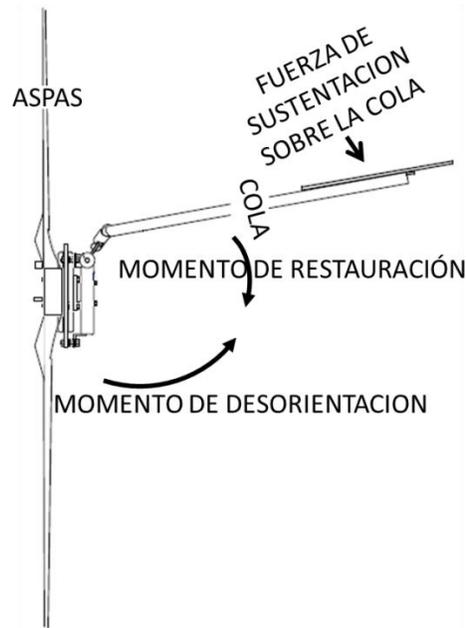


Figura 45: Momentos en la cola

El diseño de aerogenerador de Hugh Piggot utilizado en este proyecto tiene su centro desplazado de modo que el empuje del viento (centrado en el alternador) siempre trata de volver a la máquina lateralmente. Si la hélice no se encuentra totalmente perpendicular a la dirección del viento (está ligeramente desplazada) se reducirá la cantidad de energía que la máquina puede capturar. El alternador se desplaza de manera que el empuje del viento actúa a un radio de 125mm desde el centro del pivote de desorientación, sobre el que la máquina pivota para encarar al viento. Esto significa que

el empuje crea un momento de desorientación y oscilación sobre el eje del pivote. El empuje del viento tratará siempre de volver la hélice lateralmente [Piggot, 2004].

A velocidades de viento operativas, la fuerza del viento sobre la cola contrarresta el momento de desorientación. Cuando la máquina intenta girar, la cola oscila hasta una posición en la que se produce una fuerza de sustentación. Dicha fuerza crea un momento de restauración que iguala el momento de desorientación y hace que la máquina se equilibre.

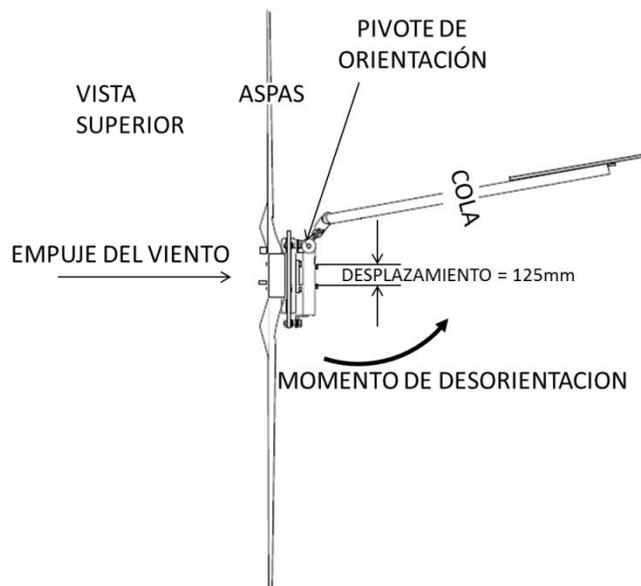


Figura 46: Movimiento de desorientación

Para fabricar la veleta o cola de desorientación se fabricó una bisagra en el soporte del generador.



Figura 47: Soldadura del tubo de la Veleta

La fabricación de la veleta constó de un tubo 1 ½” a su extremo final que está soldado con dos laminas metálicas para colocar la paleta de la veleta.



Figura 48: Tubo de la veleta terminado

Esta actividad se ejecutó en casa solamente se requirió de varillas de soldar y un máquina para soldar.

3.10 Construcción de la torre

La estructura donde ira fijado el generador eólico es una mini torre para realizar pruebas de campo.

Torre			
Descripción	Dimensiones	Aplicación	Cantidad
Tubo de acero	Longitud = 120"	Es la torre donde ira anclado el chasis con el aerogenerador completo	1
	Chapa = 1/4"		
	Diámetro= 2"		
Tubos de acero	Longitud = 160"	Serán el apoyo de la torre.	1
	Chapa= 1/4"		
	Angulo = 2"		

Tabla 6: Dimensiones de la torre

La torre no pretende ser el montaje final del generador, esta solamente se construyó para hacer las pruebas correspondientes a una altura adecuada para manipular los cables y el rotor. Según Hugh Piggott se debe montar el generador a una altura de 20 metros sobre una estructura diseñada para soportar el peso del generador y los vientos que inciden sobre ella.

4.0 Pruebas de Campo

Las pruebas se realizaron en el departamento de Managua municipio del Crucero, Carretera panamericana. Se eligió este lugar debido a su cercanía con Managua, su ubicación sin obstáculos, la fuerza y la constancia de sus vientos.



Figura 49: Ubicación de las pruebas

Para las mediciones se utilizaron dos multímetros, uno para medir el voltaje en circuito cerrado y otro para medir la corriente, además de un anemómetro de hélice para medir la velocidad del viento. Una batería de 12 voltios de automóvil estándar también fue utilizada en las pruebas.



Figura 50: Comportamiento del viento

El aerogenerador fue anclado a tierra para prevenir la caída del mismo, se hicieron las conexiones correspondientes y con las mediciones de voltaje y corriente, se calculó la potencia entregada por el generador. Se puede apreciar cada una de estas mediciones en el gráfico a continuación.

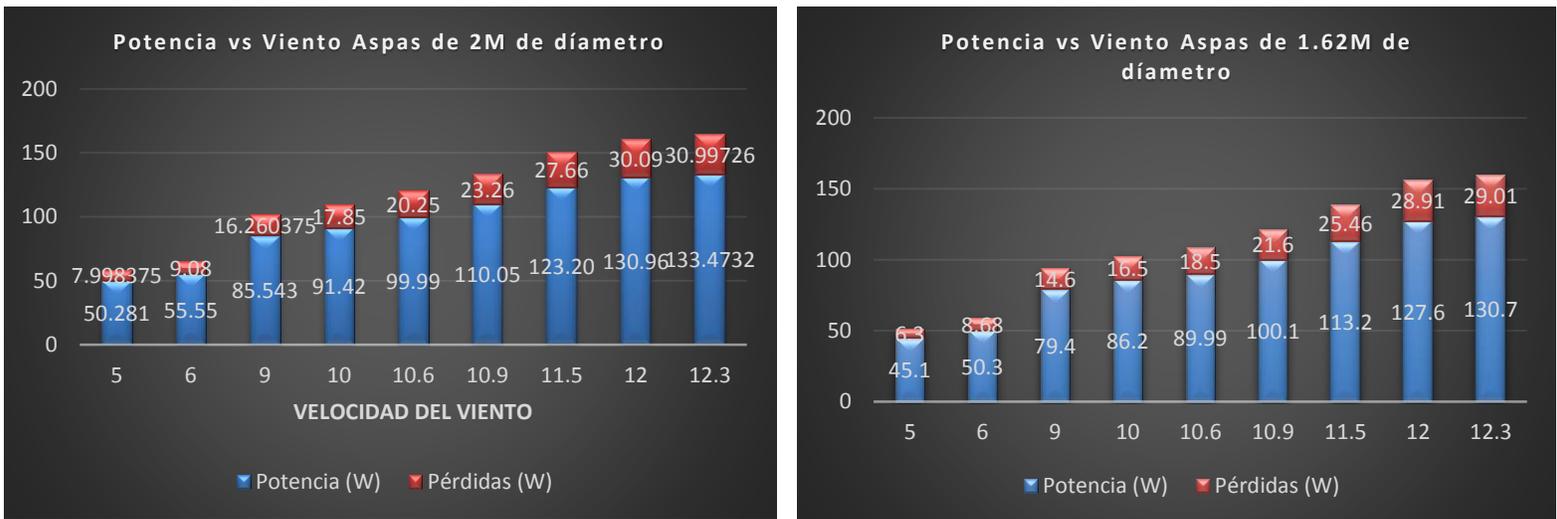


Figura 51: Potencia vs Viento Para Aspas de 2mts y 1.62mts de diámetro respectivamente

Se puede apreciar que a medida que la velocidad del viento aumenta la potencia entregada por el generador aumenta proporcionalmente.

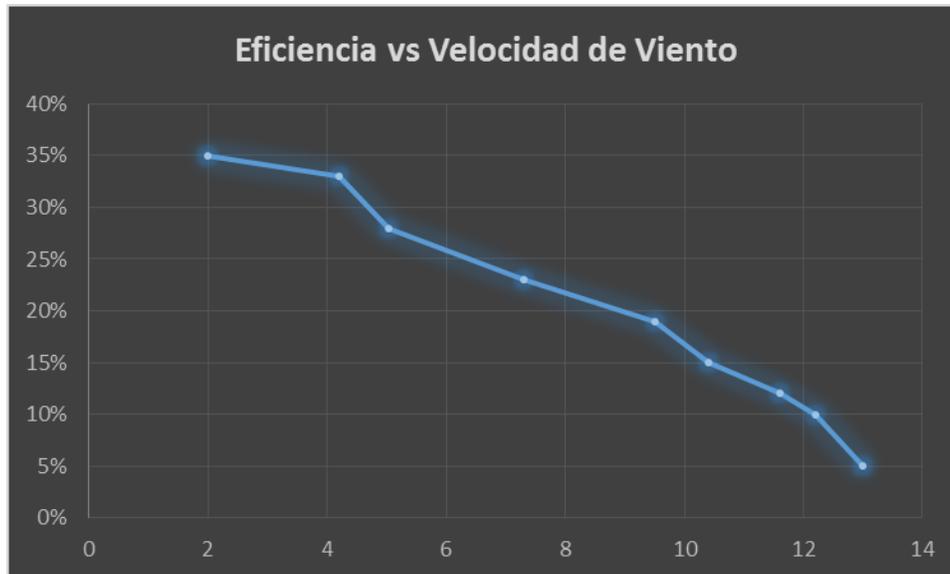


Figura 52: Rendimiento del generador

Según los datos de medición del viento y utilizando la fórmula para obtener la eficiencia del generador se obtuvo los resultados de la figura anterior donde se puede observar que a medida que la velocidad del viento alcanza cierto valor, el rendimiento del generador disminuye conforme a los establecido teóricamente en la ley de Betz.

5.0 Integración de estudiantes y ferias tecnológicas

Durante el transcurso de la implementación del proyecto, alumnos y profesores de la carrera de ingeniería electrónica estuvieron interesados en apoyar a los autores en las tareas de construcción. Un total de 10 alumnos fueron capacitados en la metodología de construcción de Hugh Piggot. Entre las tareas en las que estos estudiantes realizaron están: Modelado de las aspas, corte y soldadura del soporte del aerogenerador, embobinado, colocación de bobinas e imanes en el estator y rotor respectivamente, construcción de la veleta, apoyo logístico en pruebas de campo, participación en eventos y ferias tecnológicas.



Figura 53: Parte de los alumnos involucrados e construcción del generador



Figura 54: Profesores de la carrera de ingeniería electrónica



Figura 55: Estudiantes de electrónica en feria de la tierra



Figura 56: Miembros del Jurador evaluador Tecno-UNI



Figura 57: Aerogenerador en la Tecno-UNI



Figura 58: Estudiantes de electrónica exponiendo en Feria de la Tierra

VI. CONCLUSIONES

Mediante la construcción exitosa de un aerogenerador funcional y su documentación se estableció un precedente para el desarrollo posterior de otros proyectos de innovación e investigación en sistemas eólicos en la Universidad Nacional de Ingeniería.

Se logró documentar e ilustrar los pasos seguidos por los autores en la construcción del sistema eólico.

Se comprobó mediante pruebas de campo con aspas 1.62 metros y 2 metros de diámetro se obtiene una mejora en la capacidad del sistema de generar energía eléctrica.

Gracias a las elecciones de materiales reciclados se logró reducir costos de fabricación en los componentes de metal del sistema.

El involucramiento de los estudiantes de la carrera de ingeniería electrónica en la construcción de los componentes, el ensamblaje y las pruebas dio como resultado un satisfactorio traspaso de conocimientos y la participación de estos alumnos diferentes ferias tecnológicas concientizó al público en general acerca de la viabilidad y utilidad de los pequeños sistemas eólicos.

Se comprobó que mediante la utilización de materiales locales que la construcción del sistema es viable en Nicaragua con los materiales elegidos y la mano de obra disponible.

Los resultados de las pruebas de campo a las que se sometieron el aerogenerador, tanto con aspas de 1.62 mts y 2 mts demostró que el sistema es funcional y consistente con la generación eléctrica prevista y también se demostraron las bases teóricas.

VII. RECOMENDACIONES

La inclusión de un mayor número de estudiantes a talleres de construcción de aerogeneradores permitiría una mayor transferencia de conocimientos a la comunidad estudiantes y permitiría incentivar otros proyectos relacionados con electrificación rural en comunidades aisladas, bombeo de agua, entre otros.

Un curso de fabricación de generadores en la Universidad Nacional de Ingeniería permitiría un traspaso de conocimiento centralizado y formal, permitiendo que personas externas a la universidad puedan capacitarse.

Otras recomendaciones con respecto a la construcción del generador:

- La construcción de una torre elevada permitiría al sistema alcanzar vientos de mayor velocidad cuando se utilice en terrenos de baja altura, esta torre podría ser construida de materiales autóctonos de la zona.
- La introducción de un sistema inversor ayudaría a introducir la energía almacenada en las baterías hacia el sistema eléctrico residencial.
- Un sistema de control electrónico sería ventajoso para controlar la carga de las baterías conforme a la generación y la demanda eléctrica de las cargas conectadas, de esta manera protegiendo los bancos de baterías aumentando su vida útil y protegiendo al generador de la sobre-generación y permitiendo el freno automático en caso de vientos excesivos que pudieran dañar la estructura o el sistema.

- La fabricación del aerogenerador podría realizarse en talleres ya constituidos con herramientas dedicadas a diferentes tipos de trabajos, dentro los cuales están: metal-mecánica, carpintería, electricidad, trabajos con químicos.

VIII. BIBLIOGRAFIA

Tendencias recientes del mercado internacional del Petróleo

Ariela Ruiz Caro
Publicación de las Naciones Unidas
Diciembre 2003, Santiago de Chile
ISBN: 92-1-322300-5

Estudio de Factibilidad para la Implementación de una Pequeña Central de Hidrogeneración

Axel Soderberg
Development Associates, Inc
Noviembre 2003
San Salvador, El Salvador, C.A

Informe público de las políticas y regulaciones relativas a los Servicios de Energía, alivio de la pobreza y promoción de recursos renovables en las municipalidades de Nicaragua

Masaya, Nicaragua 2008
[www.masaya.gob.ni/pdf/Informe Publico Energy.pdf](http://www.masaya.gob.ni/pdf/Informe_Publico_Energy.pdf)

UNFCCC Clean Development Mechanism Monitoring Report Version 5

Mariana Barrios Jackman
Issue Date: February 19th, 2010

La contaminación ambiental en México: causas, efectos y tecnología apropiada

Jiménez Cisneros, Blanca E.
México: Limusa Colegio de ingenieros Ambientales de México A.C, Instituto de Ingeniería de la UNAM y FEMISCA, 2001
ISBN: 6042-X
Página 795

Energías Alternativas

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética
Universidad de Cantabria
Energía Eólica
Pedro Fernández Díez, 2003
<http://personales.ya.com/universal/TermoWeb/EnergiasAlternativas/eolica/index.html>

La dinámica Atmosférica en el Flanco suroccidental de Europa: La Península Ibérica

José Jaime Capel Molina
Ma. José Romacho Romero
NIMBUS, N° 5-6, 2000

Climatología y medio ambiente

Luis Miguel Albentosa Sánchez
Barcelona, Universidad de Barcelona, 1990

Física de las nubes

R.R Rogers
Editorial Reverté S.A, Marzo de 2003
ISBN: 84-291-4143-X

Los mapas del tiempo

Martín Vide, J.
Davinci Continental, Mataró, 2005.

Assessment of the wind behavior in the northern coast of santa catarina

Eliane Cristina Truccolo
Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar,
Laboratório de Oceanografia Física (UFC, Labomar),
Fortaleza, CE, Brasil
Recebido Abril 2010 – Aceito Janeiro 2011
Revista Brasileira de Meteorologia, v.26, n.3, 287 - 294, 2011

Glossary of Meteorology (2009)

«Wind vane».
American Meteorological Society
Federal Meteorological Handbook No.1, September 2005
Office of the Federal Coordinator of Meteorology
8455 Colesville Road, suite 1500
Silver Spring, MD 20910

Desarrollo de un banco de ensayo para la evaluación de las prestaciones de aerogeneradores de pequeña potencia

Juan Carlos Serrano Collazo
Cartagena 8, de Julio 2011

Invention of the Meteorological Instruments

W.E. Knowles Middleton, Johns Hopkins Press,
Baltimore, 1969

Encyclopedia of Weather and climate

Michael Allaby
New York, NY 10001, 2002
ISBN 0-08160-4801-0

Meteorology: a text-book on the weather, the causes of its changes, and weather forecasting, for the student and general reader

Willis Isbister Milham
The Macmillan Company, 1912
Universidad de California
How It Works: Science and Technology
How We Lived Series
Marshall Cavendish Corporation
Marshall Cavendish, 2002
ISBN 0761473149, 9780761473145

Methodologies Used in the Extrapolation of Wind Speed Data at Different Heights and Its Impact in the Wind Energy Resource Assessment in a Region

Francisco Bañuelos Ruedas, César Ángeles Camacho, Sebastián Ríos Marcuello
Instituto de Ingeniería de la UNAM
Escuela de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile
México-Chile

Energía Eólica

Teoría y Características de Instalaciones
Ing. Ricardo Iannini - Ing. Jorge Gonzalez - Ing. Sabino Mastrángelo
Boletín Energético N 13

Wind Energy Explained: Theory, Design and Application

James F. Manwell, Jon G. McGowan, Anthony L. Rogers
John Wiley & Sons, 2010
ISBN 0470015004, 9780470015001

Diseño de un Alternador de Flujo Axial con Imanes Permanentes

Julio Javier Murillo Julián
Director de Proyecto: Vicente Alcalá Heredia
Zaragoza, Febrero de 2012

Major Equipment Course

Battery & Battery Charger
POET Consultants Pvt. Ltd.
Bangalore, State of Karnataka, India – 1997

Pulse Width Modulation

Manu Prakash
Massachusetts Institute of Technology

October 2000

<http://fab.cba.mit.edu/classes/MIT/961.04/topics/pwm.pdf>

Development of a 1.5 kW Multipole Generator for Wind Turbines.

6th World Wind Energy Conference and Exhibition

Martínez del Pezzo A., Sacchi J., Patanella A., Garaventa G., Scarabino A., Actis M,
(2007)

Mar del Plata, Argentina, 2007

Introducción al Control de Aerogeneradores

Joaquín Mur Amada

Zaragoza, 2005

<http://www.windygrid.org/IntroControlAEpresencial2006.pdf>

Control de un Aerogenerador

Memoria técnica

Jesús Salinas Martínez

Departamento ESII (707)

Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

Barcelona, 12 de Enero de 2011

Aerodinámica y Actuaciones del Avión (12ª ed.)

Anibal Isidoro Carmona

Ediciones Paraninfo, S.A, 2004

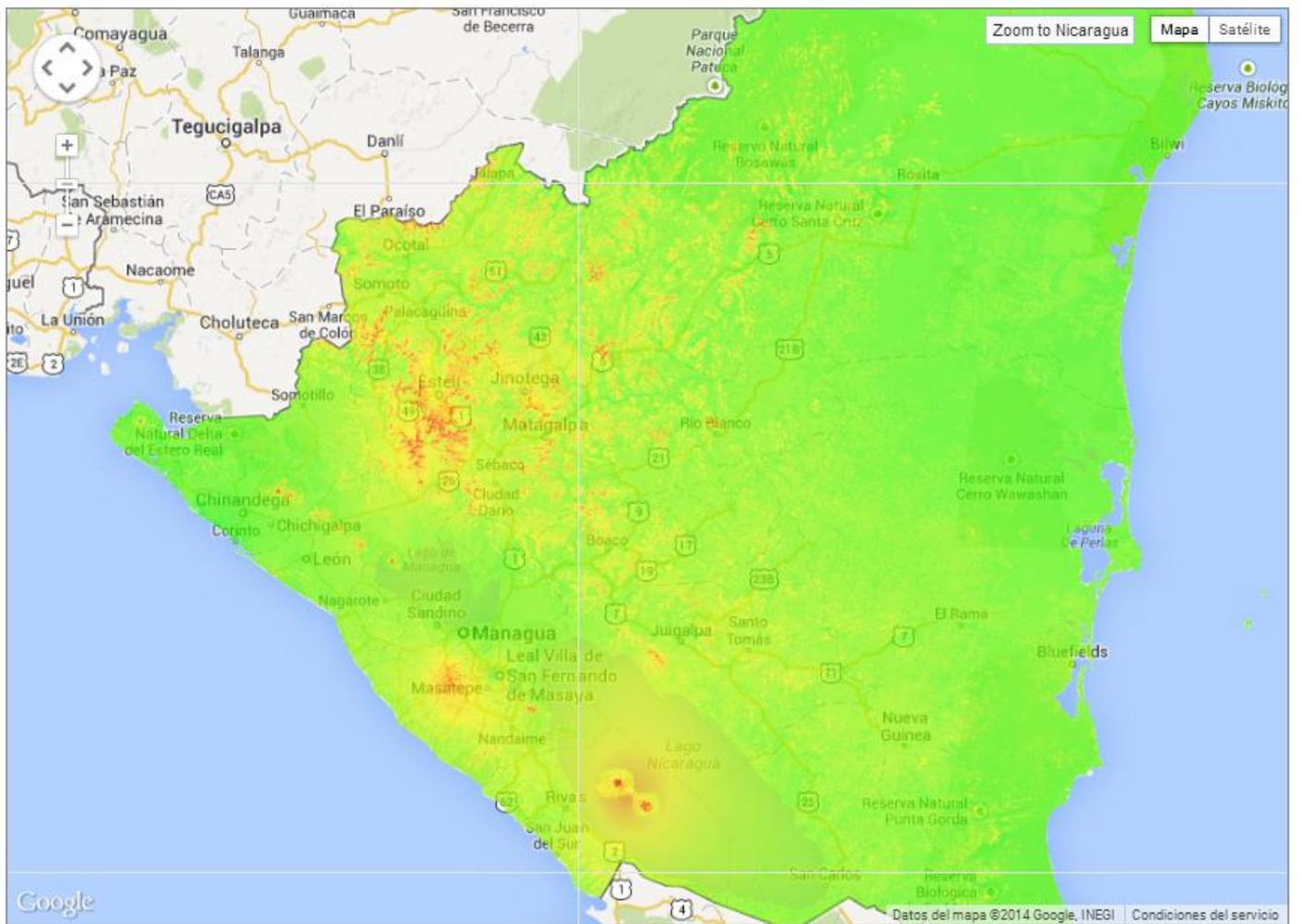
ISBN 9788428328883

Gonzales Garzas

Raúl González Galarza, IIE Insituto de Investigaciones Eléctricas, Reforma 113, Col.
Palmira, Apartado Postal 475, Temixco (Mor), CP 62000, México

http://www.arrakis.nl/newsletters/sw991_sp.htm

IX. ANEXOS



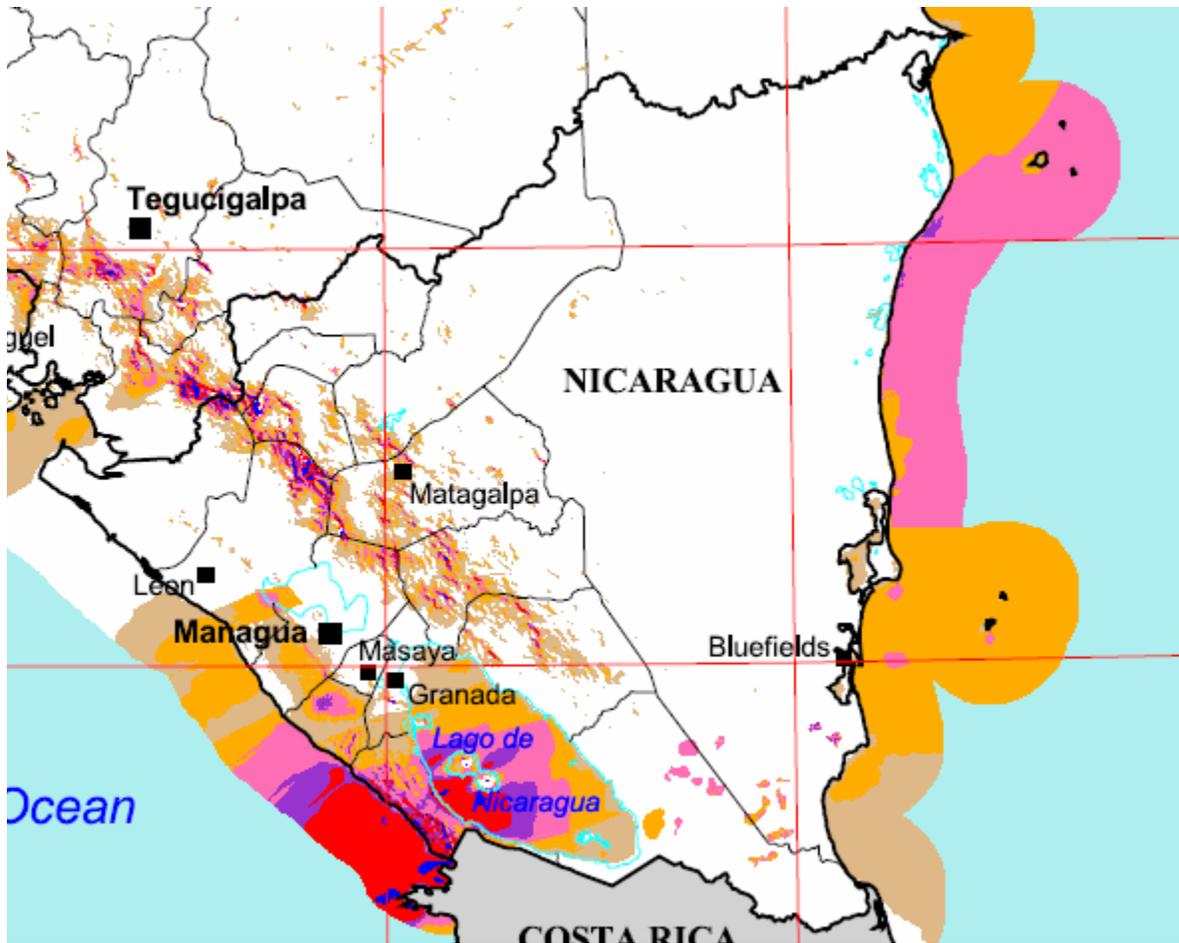
Mapa de Velocidad de Vientos Nicaragua

TABLA CLIMÁTICA III

ESTACIONES	VELOCIDAD DEL VIENTO (m/seg)								
		NORMA	ANOMALIA	ANOMALIA	MAX.ABS	RÉCORD	MIN.ABS	RÉCORD	DIRECCIÓN
	MEDIA	HISTÓRICA	(m/seg)	(%)	m/seg	HISTÓRICO	m/seg	HISTÓRICO	VIENTO
Corinto	3,4	3,7	-0,3	-8,1	12,0	18,0	2,0	1,0	E
Chinandega	3,0	2,4	0,6	25,0	8,0	14,0	2,0	1,0	E
León	4,0	3,0	1,0	33,3	8,0	15,0	2,0	1,0	E
Aeropuerto Intern. Augusto C. Sandino (Managua)	4,4	3,2	1,2	37,5	10,0	15,0	2,0	1,0	E
Campos Azules (Masatepe)	7,3	4,2	3,1	73,8	12,0	18,0	2,0	1,0	NE
Ingenio Javier Guerra Báez (Nandaime)	7,1	5,4	1,7	31,5	14,0	18,0	2,0	1,0	NE
Rivas	4,7	4,0	0,7	17,5	9,0	23,0	2,0	1,0	E
Ocotal	3,2	3,2	0,0	0,0	6,0	16,0	2,0	1,0	E
Condega	2,9	2,7	0,2	7,4	10,0	14,0	2,0	1,0	SE
Jinotega	1,4	2,6	-1,2	-46,2	5,0	10,0	1,0	1,0	N
Raúl González (San Isidro)	3,5	2,7	0,8	29,6	10,0	22,0	2,0	1,0	SE
Muy Muy	1,8	1,5	0,3	20,0	6,0	16,0	1,0	1,0	NE
Juigalpa	3,3	2,9	0,4	13,8	7,0	18,0	2,0	1,0	E
San Carlos	3,6	3,1	0,5	16,1	11,0	22,0	2,0	2,0	E
Puerto Cabezas	4,2	5,0	-0,8	-16,0	7,0	18,0	2,0	2,0	E
Bluefields	4,8	4,3	0,5	11,6	9,0	18,0	2,0	1,0	NE

**VELOCIDAD (M/S) Y DIRECCIÓN (RUMBO) DEL VIENTO A 10 METROS DE
ALTURA 2014 Informe INETER**

<http://webserver2.ineter.gob.ni/Direcciones/meteorologia/Boletines/Boletin%20Climatico/bolclim2012/boletin%20climatico%20marzo%202012.pdf>



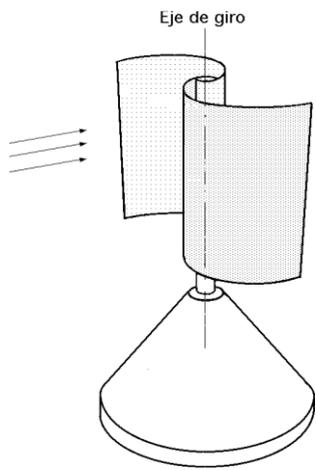
Wind Power Classification

Wind Power Class	Resource Potential	Wind Power Density at 50 m W/m ²	Wind Speed ^a at 50 m m/s
1	Poor	0 - 200	0 - 5.6
2	Marginal	200 - 300	5.6 - 6.4
3	Moderate	300 - 400	6.4 - 7.0
4	Good	400 - 500	7.0 - 7.5
5	Excellent	500 - 600	7.5 - 8.0
6		600 - 800	8.0 - 8.8
7		> 800	> 8.8

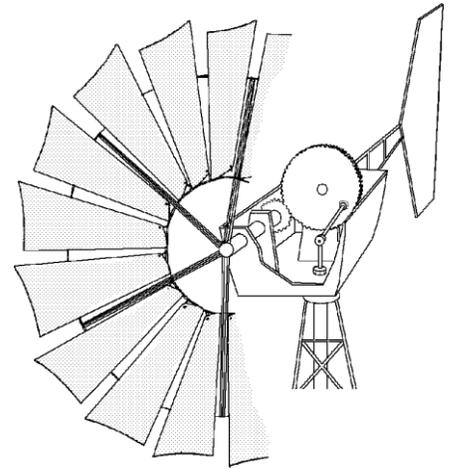
^aWind speeds are based on a Weibull k value of 2.0

Distribución del viento en Nicaragua, Fuente SWERA (<http://www.bionica.info/biblioteca/Jochem2005.pdf>)

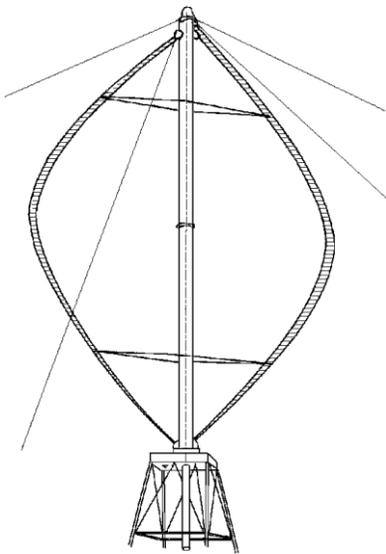
Tipos de Aerogenerador



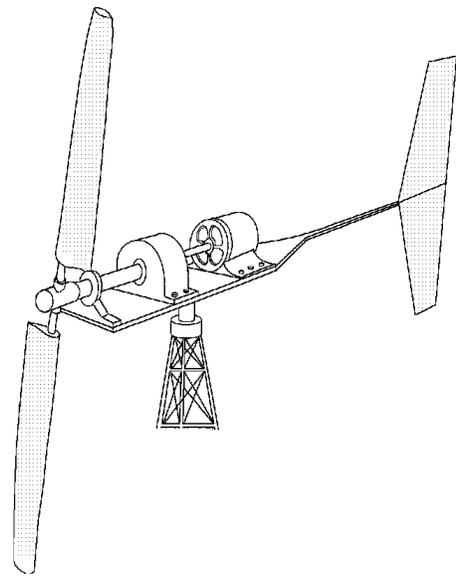
Rotor Savonius



Molino multipala



Aerogenerador Darrieux



Aerogenerador de hélice

Proyectos Energía Eólica Centro America

PAIS	PROYECTO	POTENCIA	ESTADO DE AVANCE
Belice	Estación repetidora de Cocesna	10 kW	En operación
Guatemala	Parque eólico Buenos Aires	20 MW	Factibilidad
	Parque eólico de Huité	15-60 MW	Factibilidad
	Cerro Miramundo	3,2 MW	Factibilidad
	Parque eólico San Marcos	3 MW	Factibilidad
	Proyecto Quince	4 kW	Factibilidad
	Sistemas aldeas Chacula, Nenton, Huehuetenango	18 kW	Factibilidad
	Sistemas Santa Bárbara	10-15 kW	Factibilidad
	Amatitlán		Pre -Factibilidad
El Salvador	San Marcelino	3,6 06,3 MW	Factibilidad
Honduras	Cerro Hule	60 MW	Factibilidad
	Varios sistemas aislados en la Isla de Roatán	2-3 MW	Viabilidad
	Utila	0,75 -1 MW	Factibilidad
	Sistemas aislados Mosquita	10-20 MW	Viabilidad
	Varios Privados	10-20 MW	Medición
Nicaragua	Consorcio europeo	25 MW	En concesión
	Enron Wind Corporation en Rivas	30 MW	En concesión
	Ventus en Chontales	20-30 MW	En concesión
	Enisa	25 - 30 MW	En concesión
Costa Rica	Plantas eólicas S.R.L.	20 MW	En operación
	Aeroenergías	6 MW	En operación
	MOVASA	20 MW	En operación
	Tejona (ICE)	20 MW	En operación
	Valle Central, CNFL S.A.	20 MW	Pre -Factibilidad
	Chorotega, Coope Guanacaste	10-15 MW	Factibilidad
	La Ventoleras, JASEC	10-15 MW	Factibilidad
	Puerto Azul, San Ramón	20 MW	Factibilidad
	Varios privados	60 MW	Factibilidad
	Panamá	Quijada del Diablo en Chiriquí	30 MW
Cerro Homitos		n.d	Medición
Boquete		n.d	Medición
Varios privados		n,d	Medición
Cerro Tute en Veraguas		20 MW	Factibilidad

Algunas publicaciones recomendadas

American Wind Energy Association, disponible en AWEA (2001). The most frequently asked questions about wind energy. <http://www.awea.org>

ECN (2001). Generación de electricidad por medio de energía eólica. Curso organizado por ICE, ERA, ECN y BUN-CA. Costa Rica, marzo del 2001.

ERAC (1999). Desarrollo de energías renovables en el proceso de liberalización del mercado energético en América Central. Primer y segundo informe del proyecto “Energías Renovables en América Central”.

ERAC (2000). Energías renovables en América Central, el mercado potencial de la energía eólica. Memoria del seminario regional. Tegucigalpa, Honduras, mayo del 2000.

FENERCA (2001). Modelos empresariales para servicios energéticos aislados. Programa “Financiamiento de Empresas de Energía Renovable en Centroamérica (FENERCA)”. E+CO, BUN-CA, PA Government Services, San José, Costa Rica.

FENERCA (2001). Promoción de energía renovable en Centroamérica: oportunidades para el planteamiento de políticas. Programa “Financiamiento de Empresas de Energía Renovable en Centroamérica (FENERCA)”. E+CO, BUN-CA, PA Government Services, San José, Costa Rica.

Gipe, P. (2000). Energía eólica práctica. Promotora General de Estudios S.A., Sevilla, España.

Progresa (2001). Energía eólica. Monografías técnicas de energía renovable. Promotora General de Estudios S.A., Sevilla, España.