

DESARROLLO DE MICRO-AEROGENERADORES DE BAJO COSTO A PARTIR
DE LA ADAPTACIÓN DE MODELOS EXISTENTES

UBALDO BARRANCO JIMÉNEZ T00015265

MIKE ALBARRACÍN GONZÁLEZ T00014556

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍAS
DIRECCIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA Y MECATRÓNICA
CARTAGENA DE INDIAS D. T. y C.

2013

DESARROLLO DE MICRO-AEROGENERADORES DE BAJO COSTO A PARTIR
DE LA ADAPTACIÓN DE MODELOS EXISTENTES

UBALDO BARRANCO JIMÉNEZ T00015265

MIKE ALBARRACÍN GONZÁLEZ T00014556

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Mecánico
e Ingeniero Mecatrónico

ASESOR

Prof. JAIRO F. USECHE VIVERO, Ph.D.
Grupo de investigación GIMAT

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍAS
DIRECCIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA Y MECATRÓNICA
CARTAGENA DE INDIAS D. T. y C.

2013

ARTÍCULO 105

La **Universidad Tecnológica de Bolívar**, se reserva el derecho de propiedad intelectual de todos los trabajos de grado aprobados, y no pueden ser explotados comercialmente sin su autorización.

Cartagena de Indias, Febrero de 2013

Señores

Universidad Tecnológica de Bolívar

Comité de Evaluación de Proyectos

Programa de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica

La Ciudad

Cordial saludo.

La presente, es con el fin de presentarles el trabajo de grado “DESARROLLO DE MICRO-AEROGENERADORES DE BAJO COSTO A PARTIR DE LA ADAPTACIÓN DE MODELOS EXISTENTES” requisito indispensable para obtener el título de Ingeniero Mecánico y Mecatrónico, así mismo, solicitar de parte de ustedes su evaluación.

Agradecemos de ustedes su atención y esperamos pronta respuesta.

Atentamente,

Ubaldo Barranco Jiménez
C.C. 73.211.624 de Cartagena
Código: T00015265

Mike Albarracín González
C.C. 1.128.060.062 Cartagena
Código: T00014556

Nota de aceptación:

Firma del presidente de jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Cartagena de Indias D. T. y C., Febrero de 2013

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por las oportunidades, a mis padres por la vida, a mi esposa por su compañía y a mis hijos por ser el motor de mi vida.

MIKE ALBARRACIN GONZALEZ

AGRADECIMIENTOS

A los seres que me dieron la vida...

UBALDO BARRANCO JIMENEZ

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. ANTECEDENTES	22
2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	35
2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	35
2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	37
3. JUSTIFICACIÓN	38
4. OBJETIVOS	40
4.1. OBJETIVO GENERAL	40
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	40
5. MARCO REFERENCIAL	42
5.1. MARCO TEÓRICO	42
5.1.1. Características del viento	42
5.1.2. Otros factores condicionantes	44
5.1.3. Velocidad y energía del viento	46
5.1.4. La distribución de Weibull	49
5.1.5. La rugosidad	53
5.2. MARCO CONCEPTUAL	55
5.2.1. Clasificación de los aerogeneradores	55
5.2.1.1. Por la posición del aerogenerador	55
5.2.1.1.1. Aerogeneradores de eje horizontal o HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine)	55
5.2.1.1.2. Aerogeneradores de eje vertical o VAWT (Vertical Axis Wind Turbine)	56
5.2.1.1.2. a. Savonius	56

5.2.1.1.2. b.	Darrieus	57
5.2.1.1.2. c.	Panemonas	57
5.2.1.2.	Clasificación por la posición del equipo con respecto al viento	58
5.2.1.2.1.	A barlovento	58
5.2.1.2.2.	A sotavento	59
5.2.1.3.	Clasificación por el número de palas	60
5.2.1.3.1.	Una pala	60
5.2.1.3.2.	Dos palas	61
5.2.1.3.3.	Tres palas	62
5.2.1.3.4.	Multipalas	62
5.2.1.4.	Clasificación por el modo de orientación del equipo a la dirección del viento instantánea	63
5.2.1.5.	Clasificación según la forma de producir energía eléctrica	64
5.2.1.5.1.	Aplicaciones aisladas	64
5.2.1.5.2.	Conexión directa a la red	64
5.2.2.	Componentes principales de un aerogenerador	65
5.2.2.1.	Rotor	66
5.2.2.1. a.	Los álabes	66
5.2.2.1. b.	El cubo	69
5.2.2.2.	Góndola	69
5.2.2.3.	Generador	69
5.2.2.3.1.	Generador de Corriente Continua (Dínamos)	69
5.2.2.3.2.	Generador de Corriente Alterna	69
5.2.2.3.2. a.	Síncronos o Alternadores	69
5.2.2.3.2. b.	Asíncrono o de inducción	70
5.2.2.4.	Multiplicador	70

5.2.2.5.	Sistema de control	70
5.2.2.5.1.	Sistemas con ángulo de paso fijo y variación del área de captación “Furling”	71
5.2.2.5.2.	Sistema de ángulo de paso fijo por pérdida aerodinámica “stall regulation”	71
5.2.2.5.3.	Sistema con ángulo de paso variable o “pitch regulation”	72
5.2.2.5.3.a.	Sistemas en los que gira toda la pala alrededor de su eje longitudinal	72
5.2.2.5.3. b.	Sistemas en los que el giro se realiza sólo en el tramo final de la pala correspondiente al extremo o punta de la misma	73
5.2.2.5.4.	Sistema de regulación activa por pérdida aerodinámica	73
5.2.2.6.	Sistema de orientación	74
5.2.2.6.1.	Eólicas auxiliares	74
5.2.2.6.2.	Veletas de cola	74
5.2.2.6.3.	Rotor a barlovento con orientación asistida	74
5.2.2.7.	Torre	75
5.2.2.7.1.	Torres tubulares de acero	75
5.2.2.7.2.	Torres de celosía	75
5.2.2.7.3.	Torres de mástil tensado	76
5.2.2.7.4.	Torres híbridas	77
5.2.2.8.	Unidad de refrigeración	78
5.2.2.9.	El eje de baja velocidad	78
5.2.2.10.	El eje de alta velocidad	78
5.2.3.	Otros componentes de un sistema de energía eólica	78
5.2.3.1.	Sistemas de almacenamiento	78
5.2.3.1.1.	Baterías	78
5.2.3.1.2.	Acumulación térmica	79

	pág.
5.2.3.1.3. Bombeo de agua	79
5.2.3.1.4. Generación de hidrógeno y pila de combustible	79
5.2.3.1.5. Volante de inercia	79
5.2.3.1.6. Desalinización del agua	80
5.2.3.2. Inversores	80
5.2.3.2.1. Inversores de onda sinusoidal	80
5.2.3.2.2. Inversores síncronos	80
5.2.3.2.3. Inversores autoconmutados	80
5.2.3.3. Rectificadores y Cargadores de Baterías	81
5.3. MARCO HISTÓRICO	81
5.3.1. Reseña histórica	81
5.3.1.1. Molinos de viento en la edad media y el renacimiento	83
5.3.1.2. Situación actual en el mundo	84
5.3.1.3. Energía eólica en Colombia	87
5.4. MARCO ESPACIAL	89
5.5. MARCO TEMPORAL	89
5.6. MARCO LEGAL	90
6. HIPÓTESIS DE TRABAJO	93
7. METODOLOGÍA	94
7.1. PROCESO GENERAL DEL DISEÑO	94
7.2. LINEAMIENTOS GENERALES DEL PROYECTO	95
7.2.1. Localización	95
7.2.2. Estructura del soporte	95
7.3. DISEÑO MECÁNICO	96
7.3.1. Hélice	96
7.3.1.1. Velocidad de viento nominal	96
7.3.1.2. Velocidad de rotación nominal	96

	pág.
7.3.1.3. Número de palas Aspas	96
7.3.2. Aspas	96
7.3.3. Partes mecánicas	97
8. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E INSTALACION DEL MICRO-AEROGENERADOR	98
8.1. DETERMINACIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA	98
8.2. ESTUDIO POTENCIAL EÓLICO	101
8.3. DESCRIPCIÓN DEL AEROGENERADOR	103
8.3.1. Inductor	106
8.3.2. Inducido	106
8.3.3. Álabes	106
8.4. DISEÑO DE LA TURBINA EÓLICA	108
8.4.1. Cálculo del diámetro del rotor	108
8.4.2. Obtención de la geometría del perfil alar	110
8.4.2.1. Linearización del álabe	114
8.4.2.2. El extremo raíz	118
8.4.3. Esfuerzos sobre las palas	118
8.4.3.1. Cálculo de la Fuerza Centrifuga	118
8.4.3.2. Cálculo de la resistencia aerodinámica de la pala	119
8.4.3.3. Cálculo del momento flector de la pala	120
8.4.4. El cubo	121
8.4.5. El eje	121
8.4.6. El montaje eléctrico	123
8.4.7. Soporte del aerogenerador	124
8.4.8. Montura del buje	126
8.4.9. Tubo de viraje	128
8.4.10. Cola del aerogenerador	128

	pág.
8.4.10.1. Cojinete de baja fricción	128
8.4.11. Funcionamiento de la cola	129
8.4.12. La estructura (mástil)	130
8.4.13. Conexión a las baterías	131
9. ESTUDIO ELÉCTRICO DEL AEROGENERADOR	132
9.1. PRUEBAS EN EL GENERADOR	132
10. MANTENIMIENTO DEL MICROAEROGENERADOR	134
10.1. Mantenimiento Correctivo o no planeado	134
10.2. Mantenimiento Preventivo o planificado	134
11. EL IMPACTO AMBIENTAL DE LA ENERGÍA EÓLICA	136
12. INVERSIÓN DEL PROYECTO	138
12.1. COSTO DE LOS MATERIALES DEL AEROGENERADOR	138
12.2. COSTO TOTAL DEL PROYECTO	138
13. CONCLUSIONES	140
 BIBLIOGRAFÍA	 142
 ANEXOS	 150

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1 Aerogenerador situado en posición barlovento	59
Figura 2 Aerogenerador situado en posición sotavento	60
Figura 3 Terminología asociada a los perfiles alares	69
Figura 4 Consumo aproximado de energía de algunos electrodomésticos	99
Figura 5 Esquema Unifilar de la Instalación	101
Figura 6 Partes de un aerogenerador de baja potencia	104
Figura 7 Partes del un Alternador	105
Figura 8 Ejemplo de perfiles obtenidos	116
Figura 9 Parámetros característicos de la pala	116
Figura 10 Ubicación de las secciones en el álabe	117
Figura 11 Diagrama del rotor	117
Figura 12 Hexágono base para el cubo	121
Figura 13 Funcionamiento de la Cola	130

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1 Rangos de velocidades del viento para diferentes rugosidades de terreno	25
Tabla 2. Relaciones generales entre viabilidad y velocidad del viento para su uso como fuente de energía	33
Tabla 3 Análisis de la energía eólica a 10 m de altura	51
Tabla 4 Rugosidad y paisaje	54
Tabla 5 Coeficientes de rugosidad	54
Tabla 6 Cronograma de actividades	90
Tabla 7 Consumo mensual aproximado de energía de un hogar	100
Tabla 8 Velocidad del viento en Galerazamba – Departamento de Bolívar	102
Tabla 9 TSR de diseño para maquinas eólicas de eje horizontal	109
Tabla 10 Familia de puntos para grafica de perfil alar	113
Tabla 11 Resultado de la linearización del álabe	115
Tabla 12 Costo total del proyecto	139

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1 Mapa de la energía eólica en Colombia	26
Gráfica 2 Satisfacción ciudadana con el servicio de energía eléctrica	36
Gráfica 3 Curva de eficiencia de Betz	49
Gráfica 4 Curva de distribución de viento de Weibull	50
Gráfica 5 Curva de Weibull específica para Cartagena	52
Gráfica 6 Perspectiva de potencial eólico a futuro	85
Gráfica 7 Emisiones globales de CO2 en el escenario de referencia (baseline) y en el escenario BLUE Map	86
Gráfica 8 Velocidad del viento en Galerazamba – Departamento de Bolívar	102
Gráfica 9 Rendimientos Aerodinámicos de aerogeneradores (Coeficiente de Potencia vs celeridad)	110
Gráfica 10 Potencia de Salida en función de las RPM	133

LISTA DE IMÁGENES

	pág.
Imagen 1. Aerogenerador de eje horizontal.	55
Imagen 2. Aerogenerador de eje vertical tipo savonius	56
Imagen 3 Aerogenerador de eje vertical tipo darrieus de dos y tres palas	57
Imagen 4 Aerogenerador de eje vertical tipo panemonas	57
Imagen 5 Aerogenerador de una pala	61
Imagen 6 Aerogenerador de dos palas	61
Imagen 7 Aerogenerador de tres palas	62
Imagen 8 Aerogenerador multipalas	63
Imagen 9 Componentes de un aerogenerador de eje horizontal	65
Imagen 10 Torres tubulares de acero	75
Imagen 11 Torres de celosía	76
Imagen 12 Torres de mástil tensado	77
Imagen 13 Torres híbridas	77
Imagen 14 Caja de balineras de marco de bicicleta	.....122
Imagen 15 Plato dentado	.....122
Imagen 16 Estrella de bicicleta	.....123
Imagen 17 Soporte del aerogenerador	.....124
Imagen 18 Cubo para montaje de álabes	.....127
Imagen 19 Tubo de encastramiento	.....127
Imagen 20 Cola del aerogenerador	.....128
Imagen 21 Cojinete de baja fricción para viraje de orientación	.....129
Imagen 22 Torre del aerogenerador sin ensamblar	.....131
Imagen 23 Pruebas realizadas al Aerogenerador	.....133

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. MANUAL PARA CONSTRUIR UN AEROGENERADOR SIMPLE Y FUNCIONAL CON POCA INVERSIÓN	150
ANEXO B MODELO DEFINITIVO DE PERFILES OBTENIDOS	170

INTRODUCCIÓN

El mundo moderno está viviendo una revolución tecnológica que crece casi exponencialmente, disparando significativamente el consumo de recursos energéticos mundiales. Entre dichos recursos está el energético, según estudios estadísticos anuales realizados por gobiernos o compañías privadas.

Esta creciente demanda energética mundial, junto con el inminente agotamiento de las reservas de combustibles fósiles tales como los hidrocarburos o el carbón; además del tema ambiental concerniente al ineficaz aprovechamiento de la energía química contenida en estos, genera conflictos de intereses y una enorme polución la cual es la principal fuente motriz del calentamiento global debido a las emanaciones de gases invernaderos como el CO₂.

Por otra parte, todos estos problemas económicos, sociales y ambientales y la preocupación que esto puede acarrear, ha generado toda una revolución en cuanto a temas afines a las fuentes alternativas de energía entre las que podemos destacar las actuales torres de energía solar, plantas geotérmicas, convertidores de energía océano-termal "OTEC", células de hidrogeno por electrolisis de urea y la energía eólica.

Dentro de esta última disciplina, existe una vasta cantidad de teoría, la cual, tuvo auge a principios de los 80's, época en la cual, usando la tecnología computacional emergente, se empezaron a diseñar más detalladamente los perfiles aerodinámicos para grandes turbinas y así, de este modo, se enfocó el estudio en el máximo aprovechamiento de la energía cinética del viento, ya que en la generación de energía a partir de la fuerza del viento, el principal inconveniente es la relación peso contra resistencia de los álabes, ya que a medida que aumenta el peso en estos, se necesita mucha más energía cinética

del viento para vencer la inercia, y lo deseado es aprovechar lo más eficazmente posible dicha energía.

Para ello se han realizado diversos estudios de materiales que optimizarían la eficiencia de estos generadores definiendo y parametrizando diseños de álabes a partir de materiales compuestos ultralivianos dentro de los cuales los más óptimos en cuanto a la relación costo contra rendimiento son las fibras de carbono, resinas de fulereno y resinas sintéticas, todas las cuales son ampliamente usadas en las grandes estructuras eólicas que proporcionan parte de la energía a países como Dinamarca, España o Alemania.

En la actualidad, el alto rendimiento de las supercomputadoras, y las grandes cantidades de recursos invertidas en estos estudios, han permitido mejorar las técnicas de diseño y construcción para turbinas de gran escala y del orden de megavatios.

También se debe hacer mención y analizar datos que han sido arrojados por los análisis de la investigación realizada en la agenda universitaria contra la pobreza “AUPO” que se ha venido haciendo en Cartagena de indias en el marco del convenio de la UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR con el INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE MASSACHUSETTS y usando la metodología desarrollada por el MIT llamada PRACTICUM.

“Científicos del Departamento de Planeación Estudios Urbanos del Instituto Tecnológico e Massachusettss (MIT), en conjunto con investigadores de la Universidad Tecnológica de Bolívar, realizan una investigación sobre los problemas que afronta esta ciudad en Cartagena, para fortalecer la planeación urbana de la ciudad.

Este trabajo tiene su origen en la concepción de la Agenda Universitaria contra la Pobreza (Aupo), proyecto institucional de investigación - acción que en su primera fase tiene como objeto el estudio riguroso e interdisciplinario en Cartagena y la Costa Caribe colombiana.

Con la participación de estudiantes y profesores e investigadores de las dos universidades, y los actores de la comunidad, la investigación realiza a través del proyecto Practicum, un ejercicio académico vía trabajo de campo e investigación aplicada a los problemas reales.

En Cartagena se tomarán los dos años de experiencia positiva obtenida en el trabajo realizado con esta metodología con el Tecnológico de Monterrey, en el Distrito Federal de Ciudad de México, durante los años 2006 y 2007.

Este trabajo académico busca mostrar resultados exitosos en el corto plazo, en torno a tres problemas urbanos prioritarios en la ciudad de Cartagena: transporte, seguridad e informalidad”¹.

“La sistematización de las experiencias de intervención social de los proyectos desarrollados por los distintos programas y facultades de la UTB, se convierte en la principal justificación de este proyecto editorial. Adicionalmente se busca consolidar y divulgar las acciones desarrolladas por AUPO (Agenda Universitaria de Lucha Contra la Pobreza) de la UTB. Está pensado para ser distribuido a las personas vinculadas a sectores sociales, entidades públicas y privadas, ONGs, docentes y estudiantes, organismos internacionales de cooperación internacional

¹ <http://noticias.universia.net.co/vida-universitaria/noticia/2008/01/24/245143/mit-tecnologica-bolivar-unieron-estudiar-cartagena.html>

e instituciones de educación superior interesadas en temas de intervención social”².

Este estudio se ha enfocado en buscar alternativas de solución de necesidades para los sectores de la ciudad agobiados por altos niveles de pobreza.

Durante el análisis realizado al sector de Loma fresca se detectó que una de las causas para que la población tenga conexiones fraudulentas, que ponen en riesgo la seguridad, es el alto precio de la energía eléctrica en la ciudad de Cartagena.

Este es uno de los precios más altos en el país y por tal motivo se evidencia la importancia de estudiar la alternativa que se plantea en este trabajo, la cual debe incluirse dentro de aquellas planteadas por el programa AUPO-PRACTICUS, y así, por medio de soluciones alternativas de generación de energía de bajo costo, fomentar el desarrollo de estos sectores y de la comunidad en general.

Es por esto que se considera, un excelente tema de investigación y desarrollo, el estudio del diseño y manufactura sistemas eólicos de generación eléctrica adaptados a necesidades domésticas de iluminación y/o ventilación locales, tomando como base para estos estudios, los materiales y técnicas de fabricación existentes para las mega turbinas eólicas alrededor del mundo, así como también las técnicas de construcción artesanales o rudimentarias que permitan fabricarlo fácil y económicamente; además, los resultados obtenidos permitirán aprovechar más nuestros recursos renovables y fomentar el desarrollo de energías alternativas.

² <http://www.mineduacion.gov.co/cvn/1665/w3-article-237934.html>

1. ANTECEDENTES

El desarrollo de nuevas y mejores tecnologías que ayuden al aprovechamiento de todos los recursos naturales presentes en el planeta, es una carrera forzada debido al gran deterioro que sufre actualmente nuestro medio ambiente debido a la explotación indiscriminada de recursos fósiles para la obtención de energía eléctrica y la falta de control de emisiones en la industria.

Esta competencia tecnológica ha dado paso a estudios profundos en el tema de obtención de energías limpias llamadas también “energía verde”, término que describe la energía generada a partir de fuentes de energía primarias respetuosas con el medio ambiente.

Las energías verdes son energías renovables que no contaminan, es decir, cuyo modo de obtención o uso no emite subproductos que puedan incidir negativamente en el medio ambiente; entre las más conocidas, la hidroeléctrica y la eólica, luego se dio paso a la era solar, después la controversial nuclear además de otras, tales como la océano termal (OTEC, por sus iniciales en inglés) que define José A. Martí (Technical Consulting Group, San Juan, Puerto Rico) como “La conversión de energía océano-termal o termo-oceánica, es una fuente de energía renovable de base continua particularmente apropiada para zonas tropicales”³.

Entre todas las anteriores, luego de revisar varios artículos, una de las mejores por costos, beneficios ambientales o innovación tecnológica que se puede destacar, es la energía eólica que solo depende de la cantidad de viento presente en la zona donde se hará el emplazamiento de las turbinas y de la disponibilidad de espacio suficiente.

3 <http://www.offinf.com/MemorialExplicativoSenadoAbril2010.pdf>

“La energía eólica ha sido aprovechada desde la antigüedad para mover los barcos impulsados por velas o hacer funcionar la maquinaria de molinos al mover sus aspas. En la actualidad, la energía eólica es utilizada principalmente para producir energía eléctrica mediante aerogeneradores.

A finales de 2007, la capacidad mundial de los generadores eólicos fue de 94.1 gigavatios. En 2009 la eólica generó alrededor del 2% del consumo de electricidad mundial, cifra equivalente a la demanda total de electricidad en Italia, la séptima economía mayor mundial, A finales de 2011, la capacidad mundial de los generadores eólicos fue de 238 gigavatios.

En 2011 la eólica generó alrededor del 3% del consumo de electricidad mundial. En España la energía eólica produjo un 16% del consumo eléctrico en 2011. En la madrugada del 19 de abril de 2012, la energía eólica alcanzó el 61,06% de la electricidad producida en España, con una potencia instantánea de 14.889 MW respecto a los 24.384 MW demandados por la red eléctrica”⁴.

“El desarrollo de la energía eólica en los últimos años ha permitido alcanzar unos niveles técnicos avanzados, que se traducen en mayores potencias, mejores rendimientos y altas disponibilidades”⁵.

“Al cierre de 2007 se tenían instalados 93,916 MW de capacidad eólica alrededor del mundo, de los cuales destaca en primer lugar Alemania con el 23.7% (22,289 MW), en segundo EUA con 17.9% (16,189 MW), España con 16.1% (15,145 MW), luego India con 8.4% (7,845 MW), China con el 6.3% (5,903 MW) y Dinamarca con 3.3% (3,139 MW). (SENER, 2008)”⁶.

4 http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_e%C3%B3lica

5 http://www.ingurumena.ejgv.euskadi.net/r49-565/es/contenidos/informacion/plan_energia_eolica/es_8109/adjuntos/documentol/4-situacion_c.pdf

6 http://somi.ccadet.unam.mx/icias2010/memorias/55-CG_memoria.pdf

“Durante los años recientes, la capacidad mundial instalada en sistemas para la generación de electricidad a partir de la energía cinética del viento (aerogeneradores), ha crecido de manera vertiginosa al pasar de 94.1 Gigavatios a 238 Gigavatios durante el periodo 2007-2011.

Colombia, por su posición geoespacial, presenta potenciales de recursos energéticos renovables y alternativos, como son: Sol, viento, pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH), biomasa, energía de los océanos y geotermia”⁷.

“Una aproximación al valor del recurso eólico en el país permite establecer que las costas norte y pacífica cuentan con los mejores potenciales para el aprovechamiento de este recurso. Las escalas planteadas están normalizadas en una superficie de rugosidad plana estableciendo la velocidad del viento en metros por segundo **a 10 metros de altura**. Esta información debe considerarse teniendo en cuenta las características de rugosidad del terreno de acuerdo a la Tabla 1 y Gráfica 1.”⁸

⁷ <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Iluminacion/CarFNCE.pdf>

⁸ Energías Renovables: descripción, tecnologías y usos finales, Pág. 20, 21. UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA – MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA
REPUBLICA DE COLOMBIA

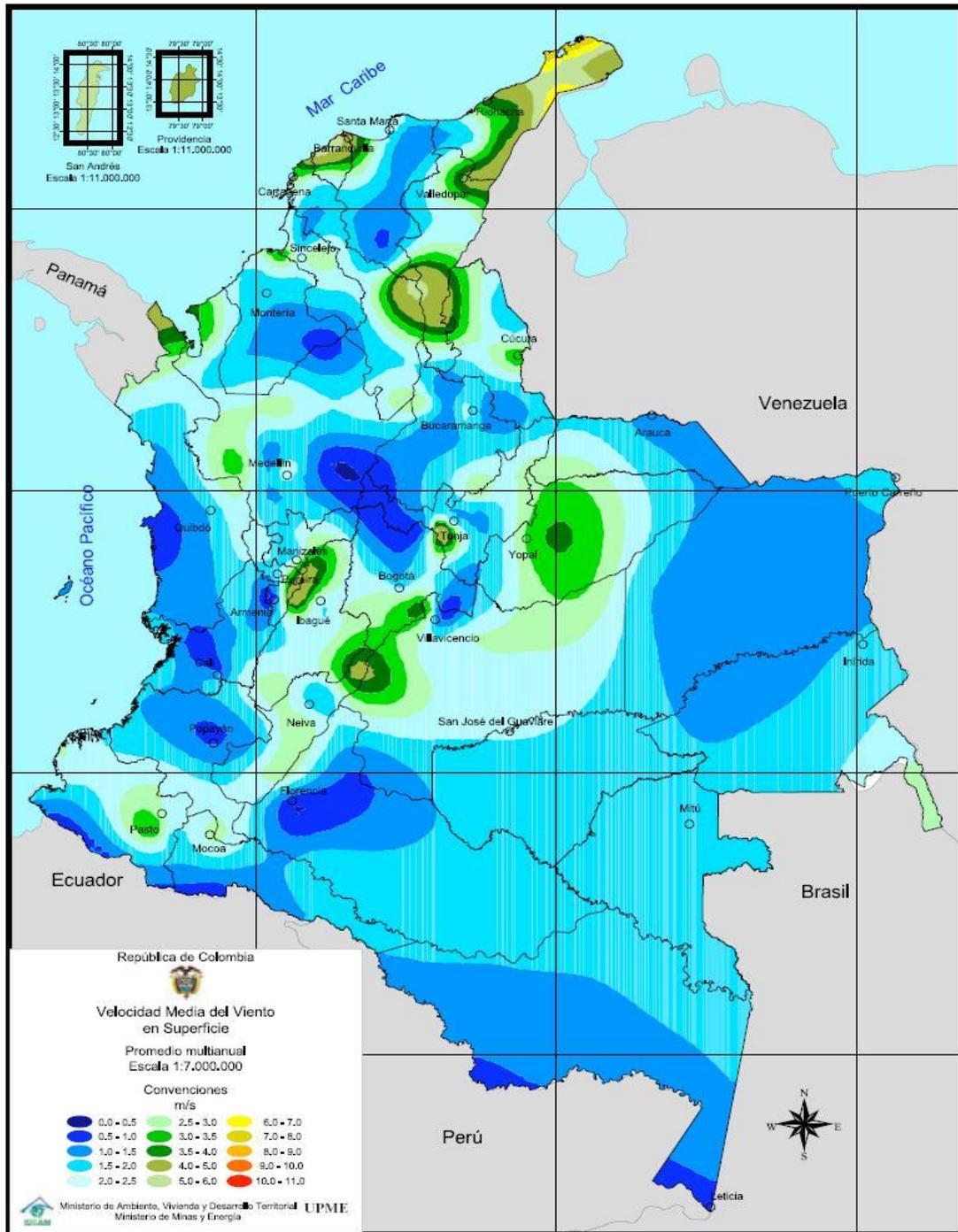
Tabla 1 Rangos de velocidades del viento para diferentes rugosidades de terreno

Rangos de rugosidad	
1	Plana (playa, hielo, paisaje de nieve, oceano)
2	Abierta (pasto corto, aeropuertos, tierra de cultivo vacía)
3	Aspera (Cultivos altos en hilera, arboles bajos)
4	Muy aspera (Bosques y huertos)
5	Cerrada (Pueblos, suburbios)
6	Ciudad (centros de ciudades, espacios abiertos en los bosques)

RANGOS DE VELOCIDADES DEL VIENTO EN m/s PARA DIFERENTES RUGOSIDADES DE TERRENO						
Rangos de rugosidad de la superficie						
Indice	1	2	3	4	5	6
1	0.0 - 1.5	0.0 - 1.3	0.0 - 1.2	0.0 - 1.1	0.0 - 1.0	0.0 - 0.9
2	1.5 - 2.5	1.3 - 2.2	1.2 - 2.1	1.1 - 1.9	1.0 - 1.6	0.9 - 1.5
3	2.5 - 3.5	2.3 - 3.1	2.1 - 2.9	1.9 - 2.6	1.6 - 2.3	1.5 - 2.1
4	3.5 - 4.5	3.1 - 4.0	2.9 - 3.7	2.6 - 3.3	2.3 - 2.9	2.1 - 2.7
5	4.5 - 5.5	4.0 - 4.9	3.7 - 4.6	3.3 - 4.1	2.9 - 3.6	2.7 - 3.3
6	5.5 - 6.5	4.9 - 5.7	4.6 - 5.4	4.1 - 4.8	3.6 - 4.2	3.3 - 3.9
7	6.5 - 7.5	5.7 - 6.6	5.4 - 6.2	4.8 - 5.6	4.2 - 4.9	3.9 - 4.5
8	7.5 - 8.5	6.6 - 7.5	6.2 - 7.1	5.6 - 6.3	4.9 - 5.5	4.5 - 5.1
9	8.5 - 9.5	7.5 - 7.7	7.1 - 8.2	6.3 - 7.3	5.5 - 6.4	5.1 - 5.8
10	9.5 - 10.5	7.7 - 9.3	8.2 - 8.7	7.3 - 7.8	6.4 - 6.8	5.8 - 6.2
11	10.5 - 11.5	9.3 - 10.2	8.7 - 9.6	7.8 - 8.5	6.8 - 7.5	6.2 - 6.8
12	11.5 - 12.5	10.2 - 11.0	9.6 - 10.4	8.5 - 9.3	7.5 - 8.1	6.8 - 7.4
13	12.5 - 13.5	11.0 - 11.9	10.4 - 11.2	9.3 - 10.0	8.1 - 8.8	7.4 - 8.0
14	13.5 - 14.5	11.9 - 12.8	11.2 - 12.1	10.0 - 10.8	8.8 - 9.4	8.0 - 8.6

Fuente: Energías Renovables: descripción, tecnologías y usos finales, Pág. 20, 21. UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA – MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA REPUBLICA DE COLOMBIA.

Gráfica 1 Mapa de la energía eólica en Colombia



Fuente: <http://generador-eolico.blogspot.com/2010/11/mapa-distribucion-de-vientos-colombia.html>

“La dependencia del petróleo, el carbón y el gas han creado conflictos de orden político (conflictos entre naciones) y ambiental (emisiones de dióxido de carbono, azufre, etc.); por esta razón, en los últimos años se ha hecho necesario invertir en el desarrollo y aplicación de tecnologías alternativas de producción de energía que funcionen con recursos renovables”⁹.

“Para el ser humano es claro que estas fuentes de energía están disponibles en su entorno, entonces su interés por explotarlas también radica en una mejor administración de los recursos locales. Además, en el mundo entero el término renovable se asocia con la disminución de emisiones contaminantes y con la "no-producción" de desechos, lo cual garantiza un medio ambiente más limpio y apropiado para las presentes y futuras generaciones”¹⁰.

“Así como otras fuentes de energía renovable, la energía eólica presenta ventajas importantes para cualquier matriz energética debido a sus costos, a que no produce emisiones de gases de efecto invernadero y que no está sujeta a la volatilidad de los precios de los combustibles. En cambio, presenta desventajas en su intermitencia, la distancia entre las zonas de viento y las redes eléctricas, la contaminación visual y auditiva que produce y el impacto que puede tener en la fauna que habita las zonas de viento ya que utilizan este recurso como guía en sus migraciones estacionales”¹¹.

“La energía eólica es en la actualidad un sistema de obtención de energía asentado; según la *Agencia Internacional de la Energía (AIE)*, ésta alcanzará el 14% de la producción eléctrica europea en 2030 y supondrá un 60% del incremento total de la generación eléctrica entre 2006 y 2030. Asimismo, la AIE

9 <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Iluminacion/CarFNCE.pdf>

10 <http://www.equilibriummedicinatural.com/las-energias-renovables-en-colombia/>

11 <http://www.sedesoh.oaxaca.gob.mx/sedesoh/recursos/relatorias/tema%206-Fuentes%20Alternativas%20de%20Energia/3-tema-ponencia-maq.pdf>

considera que la eólica va ser energía que más se va a desarrollar en el mundo de aquí a 2050, si se quiere lograr un escenario de sostenibilidad.

Así, se estima que la potencia anual a instalar hasta 2050 se situará por encima de los 70.000 MW, de los que el 30% corresponderían a la eólica marina u "offshore" (muy por encima del ritmo de instalación de los últimos años). Gonzalo Sáenz, director de Prospectiva Regulatoria de la compañía multinacional IBERDROLA en España, asegura que la energía eólica, por sus perspectivas de reducción de costos y el encarecimiento de los combustibles fósiles, es una de las opciones más económicas y con mayor potencial de desarrollo. Por ello, este experto cree que la eólica podría ser muy útil para hacer frente a los retos que plantea el modelo energético actual en términos de seguridad energética y cambio climático en un escenario, plausible, de incremento y mayor volatilidad de los precios de los combustibles fósiles.

La energía eólica supone también importantes oportunidades de generación de valor añadido y de empleo. El último informe de la Comisión Europea al respecto (publicado en 2005) apuntaba que sólo la eólica generó un valor añadido a la economía europea de más de 9 billones de euros y casi 200.000 empleos, con unas perspectivas crecientes, ya que se muestra a la eólica como la tecnología renovable con mayor potencial de crecimiento hasta 2030 en la UE 15 (el 42% del crecimiento renovable será eólico).

La instalación de aerogeneradores debe cumplir una estricta normatividad, así como un control en su funcionamiento y mantenimiento para producir el menor impacto medioambiental posible, ya que éste posee una vida útil de 30 años y cada vez son construidos de menor tamaño.

Por otra parte, otro de los problemas que más preocupa a los ecologistas, son los efectos negativos en las aves, los expertos en esta tecnología indican que las

aves terminan acostumbrándose a la presencia de los aerogeneradores y los esquivan como cualquier otro obstáculo que encuentran a su paso.

A pesar de estas buenas expectativas, la Agencia Europea de la Energía Eólica (EWEA, por sus siglas en inglés) señala que el flujo intermitente de generación a la red es una dificultad que frena su desarrollo, aunque se muestra optimista en que pueda solucionarse gracias al respaldo político nacional y regional.

Sin embargo, como explican Sáenz de Miera y su compañero de IBERDROLA Miguel Muñoz Rodríguez, este reto es perfectamente asumible y no compromete las ventajas de esta opción tecnológica frente a las alternativas convencionales. La variabilidad de la energía eólica, argumentan, se ve mitigada por los grandes avances que se están produciendo en la predicción de la producción y la magnitud de la variación en su producción, que se puede afrontar con cierto grado de sobrecapacidad como la del caso español, y comparable a otros factores que también introducen variabilidad en el sistema (fallos en centrales convencionales, problemas de suministro de combustibles, etc.).

En concreto, Sáenz de Miera argumenta que será imprescindible que la tecnología eólica alcance la competitividad plena en el mercado, y que se asiente el marco regulador, incentivar las mejoras de eficiencia y la reducción de costos, y redefinir la planificación energética para compatibilizar el fomento de las renovables con la seguridad y la eficiencia en el sistema eléctrico”¹².

“El mercado eólico mundial ha demostrado que esta tecnología y la industria asociada a ella pueden convertirse en una importante fuente de empleos, inversión, desarrollo tecnológico, integración industrial y creadora de nuevas empresas e infraestructura para el país, con beneficios ambientales”¹³.

¹² http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2009/07/09/146989.php

¹³ <http://www.sedesoh.oaxaca.gob.mx/sedesoh/recursos/relatorias/tema%206-Fuentes%20Alternativas%20de%20energia/3-tema-ponencia-maq.pdf>

“Según el Ministerio de Relaciones Exteriores, en su informe *Colombia: un país con diversidad energética*; Colombia es el cuarto país de América Latina y el Caribe en generación hidroeléctrica.

En 2010, el total de generación eléctrica fue de 56.887,4 GWh. La generación de energías renovables fue de: 40.557,3 GWh de energía hidroeléctrica, 227.7GWh GWh de biomasa sólida y 38,6 GWh de energía eólica.

La zona norte de Colombia cuenta con las mejores potencialidades para generar este recurso. Así, en la Alta Guajira, Empresas Públicas de Medellín (EPM) puso en funcionamiento el primer parque eólico, Jepírachi, con 15 aerogeneradores que aportan 19.5 megavatios al Sistema Interconectado Nacional.

Jepírachi, en La Guajira, es el único parque eólico en Colombia. Empezó a operar en abril del 2004 y desde el 2010 cuenta con una capacidad de generación eléctrica de 19,5 megavatios, que representan el 0,15% del potencial nacional”¹⁴.

Cabe anotar que, la energía renovable poco a poco va tomando auge a nivel mundial, pues ésta muestra competitividad debido a las características geográficas y climáticas de la región, sin embargo, en Colombia se ha implementado una política sólida orientada a la generación de un marco normativo y a la creación de instrumentos y condiciones financieras para el fomento de la producción sostenible de hidrocarburos y biocombustibles, ya que Colombia lidera la mesa de biocombustibles del Proyecto Mesoamérica y “el país cuenta con un sistema de transporte de crudo oleoducto y poliducto con una extensión de 4928 Km”¹⁵.

Según Walter Del Río Duque, coordinador de este parque que pertenece a las Empresas Públicas de Medellín (EPM), en septiembre del 2009 Jepírachi batió su

¹⁴ <http://www.cancilleria.gov.co/sites/default/files/DocEstrategicos/EnergiaWeb.pdf>

¹⁵ UPME. Cadena de Petróleo 2009.

propia marca de generación de energía, pues aumentó su productividad en un 30%, mientras en octubre la acrecentó en un 60%. “Esto coincidió con la disminución del nivel de los embalses de las centrales hidráulicas. Si, por ejemplo, en lugar de 15 máquinas el parque hubiese tenido 300, el país no habría recurrido con tanta urgencia a las fuentes térmicas”, indicó Del Río.

Fabio González, catedrático del Departamento de Física de la Universidad Nacional, respalda esta posición: “El Estado debería pagar más alto el kilovatio/hora producido con el viento que el generado a partir de hidroeléctricas. Esto con el fin de hacer más rentables los parques eólicos, ya que el dinero que reciben estos proyectos por certificados de reducción de emisiones de CO₂ no es suficiente para mitigar el impacto económico de una inversión tan grande”.

Según Luis Fernando Rico, gerente general de Isagén, esta compañía adelanta la fase inicial de estudios de un parque eólico que estaría ubicado muy cerca a Jepírachi, y cuya capacidad, en primera instancia, sería de 31,5 MW. Aun con un número mínimo de aerogeneradores (Jepírachi tiene 15), dicho parque requeriría una inversión aproximada de USD\$ 60.000.000, lo que contribuiría con una reducción de emisión de gases de efecto invernadero cercana a 40.000 toneladas anuales equivalentes de CO₂.

“En la isla de San Andrés, la empresa SOPESA proyecta instalar un sistema eólico con una capacidad de 7,5 MW. Ya se iniciaron los procesos de medición de los vientos y alrededor de cinco aerogeneradores serían ubicados en una longitud de un kilómetro durante los próximos tres años.

Definitivamente la gran ganadora con este aparente auge de parques eólicos es la diversificación energética en Colombia. La experiencia ha demostrado, por ejemplo, que ante fenómenos como El Niño no es bueno depender en un porcentaje tan alto de una fuente inestable como la hidráulica que, sin ningún

inconveniente, podría ser complementada con más energía proveniente de alternativas limpias”¹⁶.

Este tipo de desarrollo tecnológico puede brindar muchas ventajas y darle muchas beneficios a las comunidades de Cartagena de indias, debido a que se podría aprovechar un recurso público ilimitado para solventar la demanda de energía y aminorar los gastos de consumo en los hogares, cabe destacar que en “el estudio AUPO-PRACTICUS que se hace en la zona de Loma Fresca”¹⁷ se detectó que la gente no tiene las necesidades básicas satisfechas entre estas resalta el ítem de energía que para el caso de la costa Caribe colombiana posee como característica una de las tarifas más caras del mercado energético nacional y que esto impacta negativamente la comodidad y estilo de vida de las personas.

Es de mencionar que Loma Fresca es un gran escenario donde empezar a implantar la idea de uso de energías alternativas, ya que es un sector de Cartagena donde el nivel de pobreza de sus habitantes es alarmante y cuenta con un emplazamiento propicio para esta tecnología eólica.

Esta es una muy buena opción que solo es opacada por el costo inicial pero que a largo plazo rinde muchos resultados, y que también ha sido duramente criticada por la llamada contaminación visual que produce.

Estos dos problemas podrían ser minimizados con el uso de turbinas eólicas a pequeña escala, la cuales no pretenderían abastecer por completo la demanda energética de un hogar, sino aportar parte de la potencia eléctrica requerida para iluminación y ventilación durante las noches y de este modo contribuir a la disminución de la sobreexplotación de combustibles fósiles brindando a las familias la comodidad necesaria para un estilo de vida saludable.

¹⁶ UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, Bogotá D.C., abr. 30 de 2010 - Agencia de Noticias

¹⁷ CENTRO VIRTUAL DE NOTICIAS DE LA EDUCACIÓN CVNE. Ministerio de Educación Nacional. Proyecto AUPO-PRACTICUS

Según datos estadísticos publicados por el IDEAM y la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) en el “Atlas de Viento y Energía Eólica”, Cartagena de Indias cuenta con una velocidad de viento promedio multianual comprendida en el rango de los 3.5 a 4.5m/s, la cual es una frecuencia de viento aceptable según tabla publicada por el Instituto de Ciencia Nucleares y Energía Alternativas de Colombia (INEA) en su manual de aplicación de la energía eólica para aero-generación con equipos autónomos (ver Tabla 2).

Tabla 2. Relaciones generales entre viabilidad y velocidad del viento para su uso como fuente de energía

<i>Promedio Anual de Velocidad de Viento 10 metros de altura</i>	<i>Posibilidad de Uso de la Energía Eólica</i>
Menor a 3 m/s	Usualmente no es viable, a menos que existan circunstancias especiales para evaluar mejor el recurso (Ver Sección 2.4.1)
3 - 4 m/s	Puede ser una buena opción para equipos eólicos de bombeo de agua (Aerobombeo), poco viable para generación eléctrica con equipos eólicos (Aerogeneración)
4 - 5 m/s	Aerobombas son competitivas económicamente a los equipos Diesel, aerogeneración con equipos autónomos es viable.
Más de 5 m/s	Viable para aerobombeo y aerogeneración con sistemas autónomos
Más de 6 m/s	Viable para aerobombeo, aerogeneración con sistemas autónomos y para sistemas conectados a la red eléctrica.

Fuente: MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA REPUBLICA DE COLOMBIA. INSTITUTO DE CIENCIAS NUCLEARES Y ENERGIAS ALTERNATIVAS INEA. Estimación de la energía eólica. Pág. 20

Evidencia de esto es que existe en Cartagena hace varios años una urbanización de interés social llamada Ciudad del Bicentenario, cuyas viviendas cuentan con un sistema de ventilación forzada por cúpulas extractoras eólicas y cielo rasos adaptados que funcionan en conjunto para permitir el flujo de corrientes de convección para aminorar los consumos generados por ventiladores eléctricos que ya no resultan indispensables.

Todo lo anterior es evidencia de que el tema de investigación propuesto como trabajo de grado está enmarcado dentro de las políticas de la misión de la Universidad Tecnológica de Bolívar, de la cual un aparte específicamente cita: *“...con un sentido de responsabilidad social conducente al mejoramiento de la calidad de vida de nuestra ciudad y del Caribe...”*

2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

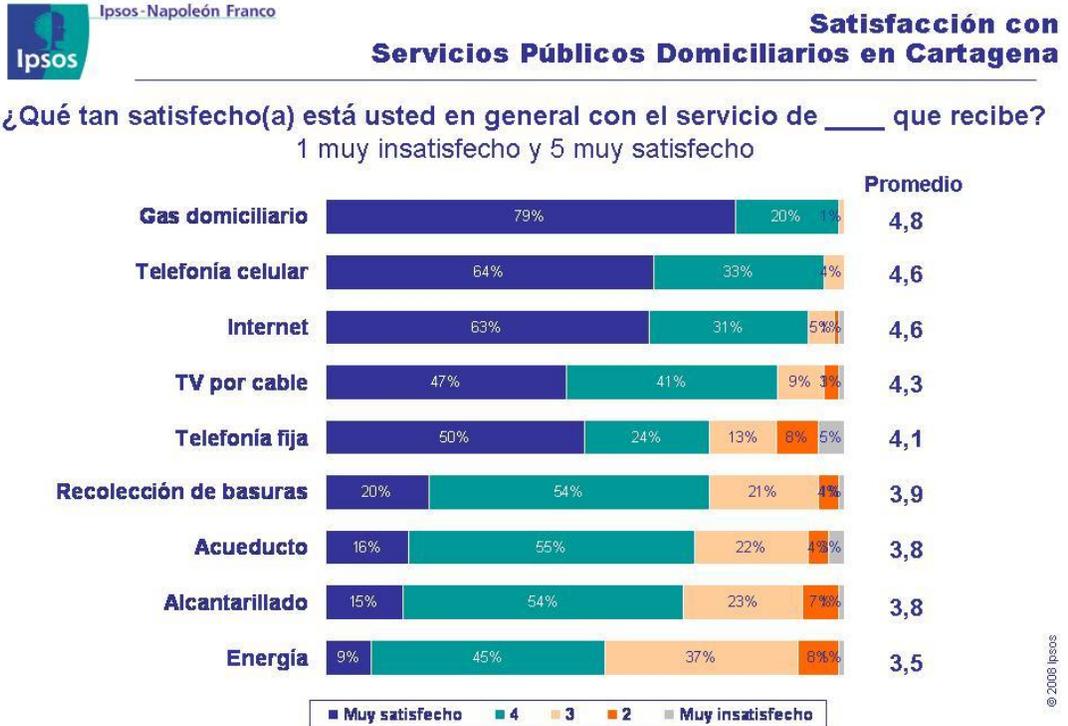
Bolívar, desde el punto de vista económico se encuentra en una posición alta de pobreza con respecto al desarrollo de otros departamentos; al ser esta posición desfavorable, las consecuencias internas son grandes y variadas, e inciden directamente en la población y sus medios de subsistencia.

Uno de estos medios es sin discusión la energía eléctrica; “Al indagar sobre el acceso a los servicios públicos, los que tradicionalmente registran las mayores coberturas en la encuesta son energía, aseo, acueducto y gas domiciliario. Como ocurre desde el año 2005, la mayor satisfacción ciudadana se presenta con el servicio de gas natural, seguido por la telefonía celular e Internet y tv cable.

El servicio de energía eléctrica obtuvo el menor nivel de satisfacción ciudadana con 3.5/5.0 frente a los demás servicios calificados. Los argumentos de los ciudadanos para calificar así la energía eléctrica fueron en su orden: el servicio es demasiado costoso, se baja el voltaje y se va la luz”.¹⁸ (Ver Gráfica 2).

¹⁸ <http://www.cartagenacomovamos.org/cartagenometroDetail.php?ilD=3>

Gráfica 2 Satisfacción ciudadana con el servicio de energía eléctrica



Base: Quienes reciben cada uno de los servicios.
En el caso de energía eléctrica la base es 1.000; el 100% de encuestados.

Ipsos Public Affairs

© 2006 Ipsos

Fuente: <http://www.cartagenacomovamos.org/cartagenometroDetail.php?iID=3>

A pesar de que Cartagena cuenta con interconexión de los sistemas eléctricos de alta calidad, el abastecimiento del mismo no lo es, y a su vez es muy caro; con este proyecto, se busca abastecer pequeños consumos en zonas aisladas que tienen un potencial eólico apreciable.

A nivel de costo se busca que este modelo presente ventajas respecto a generadores comerciales de similar capacidad, pero no pretende dar soluciones

de mayor envergadura o competir con las inmensas torres y granjas que otorgan su energía a sistemas interconectados de un país.

Tampoco se pretende determinar el comportamiento del aerogenerador al modificar sus parámetros estructurales tales como dimensiones del rotor o perfil alar.

Todo esto conlleva a desarrollar una investigación para proporcionar una serie de herramientas que permitan la construcción de un aerogenerador de eje horizontal a pequeña escala, y a su vez enmarcada hacia la búsqueda de mejores recursos alternativos y económicos que abastezcan las necesidades de energía eléctrica, ya que la energía eólica es una de las fuentes de energía más económica.

2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Luego de identificar la problemática existente, se procede a definir de forma general el interrogante problema:

¿Cómo desarrollar un sistema de generación eléctrica de bajo costo, adaptado a la demanda de consumo, fácil de construir y asequible a sectores marginados de Cartagena, capaz de hacer uso eficiente de nuestro recurso eólico?

3. JUSTIFICACIÓN

A lo largo de los años, la energía eólica se ha convertido en un principal foco de desarrollo, la cual apunta a ser una de las fuentes de energía sostenible más construidas y operadas del futuro en el mundo.

Este proyecto promueve la utilización de la energía eólica en los hogares de más escasos recursos para colaborar con la reducción de las Emisiones de Gases Efecto Invernadero de las centrales térmicas de Cartagena, así como de las importaciones de electricidad procedentes de otros países.

Uno de los objetivos particulares del proyecto, es suministrar energía eléctrica renovable a los hogares a través de microaerogeneradores, los cuales generarán 100 W/h por hogar, de energía limpia, así se reducirá la dependencia de la energía proveniente de los combustibles fósiles convencionales y su importación desde otros países.

Los efectos socioeconómicos derivados del Proyecto estarán relacionados con la creación de nuevos puestos de trabajo y oportunidades de negocio para proveedores de servicios durante la construcción o el mantenimiento de los micro aerogeneradores, así como la mejora de la seguridad energética local.

“Con la creación del microaerogenerador se fortalecerá la conciencia ecológica y ambiental de la población acerca del uso de los sistemas de suministro de energía sostenible. En este sentido, se buscará que las comunidades estén informadas en todo momento y que sus opiniones sean respetadas y aplicadas”¹⁹.

¹⁹ http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/accion_viento/EIAPEVA_001_09_SOW.pdf

Los efectos positivos del proyecto en la ciudad estarán relacionados con el desarrollo de un mercado con oportunidades para la creación de nuevas empresas de servicios y mantenimiento.

Por otro lado se garantizará la formación y la educación, no sólo en la transmisión de la tecnología, sino también en una amplia transferencia de conocimientos. Así, el proyecto propiciará y favorecerá el desarrollo de nuevos proyectos eólicos.

El proyecto cumplirá con las normas y requisitos relativos a los impactos sociales y tendrá en cuenta la participación de la comunidad.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un micro-aerogenerador de bajo costo a través de la adaptación de diseños existentes para generación eléctrica en sectores marginados de Cartagena.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar perfiles alares de micro-aerogeneradores existentes en el mercado.
- Determinar las características de viento en los distintos sectores de la ciudad de Cartagena.
- Analizar la demanda energética promedio de los hogares cartageneros.
- Enunciar de acuerdo a los tipos de aerogeneradores existentes cuales son viables para la ciudad de Cartagena.
- Diseñar un prototipo eólico que sea capaz de suministrar energía eléctrica, usando materiales comunes y económicos.
- Demostrar que usando materiales caseros o comunes y un mínimo aporte económico se puede construir un prototipo eólico.

- Sugerir a la población cartagenera el consumo de energías renovables a través de aerogeneradores.
- Diseñar una guía de paso a paso para construir un aerogenerador simple y funcional con poca inversión.

5. MARCO REFERENCIAL

5.1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo, se tratarán los temas necesarios para dimensionar matemáticamente el viento y la estructura de un aerogenerador.

5.1.1. Características del viento

El viento es la consecuencia tangible del flujo de la masa de los gases atmosféricos que se dan en la tierra; este gas atmosférico en la tierra es comúnmente denominado aire y no es más que la mezcla de gases que constituyen la atmósfera terrestre y que permanecen alrededor de la Tierra por la acción de la fuerza de gravedad.

“El aire es esencial para la vida en el planeta, es particularmente delicado y está compuesto en proporciones ligeramente variables por sustancias tales como el nitrógeno (78%), oxígeno (21%), vapor de agua (variable entre 0-7%), ozono, dióxido de carbono, hidrógeno y algunos gases nobles como el criptón o el argón, es decir, 1% de otras sustancias”²⁰.

Es del dominio público el saber que el viento puede ser una gran fuente de energía y se considera inagotable y que el hombre lo ha usado a su favor desde épocas remotas.

“El viento es una consecuencia de la radiación solar ya que las diferencias de captación de la energía solar en diversos puntos del planeta generan diferenciales de temperatura, además, al tener en cuenta la ley general de

²⁰ http://www.parquesnacionales.gov.co/PNN/portel/libreria/php/frame_detalle.php?h_id=5611

gases ideales, se puede establecer que también se genera una diferencia de presión, y el aire como cualquier gas, se mueve de las zonas de alta presión a las zonas de baja presión; Günter D. Roth define el viento como la compensación de las diferencias de presión atmosférica entre dos puntos distantes del planeta”²¹.

“Durante el día, el agua de los océanos permanece relativamente más fría que la superficie terrestre. De la radiación solar que incide sobre la superficie del agua se emplea parte en el calentamiento, y parte en la evaporación; pero debido a la gran capacidad del agua para absorber calor, la temperatura de las capas superficiales apenas varía y lo mismo ocurre con la temperatura del aire que se encuentra en contacto con ellas.

Sobre la tierra, en cambio, la radiación solar que se recibe sobre el suelo se traduce en una elevación de la temperatura, tanto del sustrato terrestre como del aire que la rodea; el aire caliente se dilata, pierde presión y es reemplazado por aire fresco proveniente de los océanos; durante la noche, el ciclo se invierte.

En las montañas el proceso es similar pero es impulsado por la diferencia de la topografía del terreno que favorece o desfavorece la exposición a la energía solar de algunas zonas, creando así diferencias de presión que ponen en movimiento las masas de aire local”²².

“De acuerdo con la escala o dimensión del recorrido de los vientos tenemos tres tipos de vientos: los vientos planetarios, los vientos regionales y los locales, aunque hay algunos tipos, como los monzones, que son más difíciles de determinar y que ocupan variantes dentro de esta simple clasificación.

21 <http://vidacotidianitica.blogspot.com/2011/04/puede-el-viento-solar-proporcionar.html>

22 <http://www.taringa.net/posts/ciencia-educacion/13987031/Megapost-Energias-alternativas-Energia-eolica-Parte-2.html>

Otro tipo de manifestación son los vientos globales o planetarios que se generan principalmente como consecuencia del movimiento de rotación terrestre, que origina un desigual calentamiento de la atmósfera por la insolación y proceden de centros de acción dispuestos en franjas latitudinales de altas y bajas presiones. Estos cinturones se disponen aproximadamente en las latitudes ecuatoriales, subtropicales y polares (círculos polares) y se encargan de transportar una cantidad de energía realmente enorme; estos vientos son conocidos como alisios en las latitudes intertropicales y vientos del oeste en las zonas templadas.

Finalmente, los vientos locales presentan un desplazamiento del aire desde zonas de alta presión a zonas de baja presión, determinando los vientos dominantes y los vientos reinantes de un área más o menos amplia, aun así hay que tener en cuenta numerosos factores locales que influyen o determinan los caracteres de intensidad y periodicidad de los movimientos del aire.

Estos factores, difíciles de simplificar por su multiplicidad, son los que permiten hablar de vientos locales, los cuales son en muchos lugares más importantes que los de carácter general, estos tipos de vientos son los siguientes: brisas marinas y terrestres, brisa de valle o brisa de montaña”²³.

5.1.2. Otros factores condicionantes

A nivel local, se deben tener en cuenta los efectos producidos por el mar y/o las montañas, y aun más críticos son los efectos derivados de la *orografía* del terreno que pueden perturbar notablemente el movimiento de las capas bajas de la atmósfera.

²³ <http://es.wikipedia.org/wiki/Viento>

La orografía de un emplazamiento eólico es muy importante para la determinación de la velocidad del viento; el aire que se desplaza sobre la superficie terrestre debe sortear un sinnúmero de obstáculos y discontinuidades que encuentra a su paso, alterando las líneas de flujo y sus velocidades correspondientes.

Las montañas constituyen un gran obstáculo al paso de aire y la interacción del flujo con estas puede resultar muy complejo para una interpretación matemática exacta, algunos estudios no concluyentes estiman que las montañas pueden disminuir entre un 30 a un 50 por ciento el valor de la velocidad promedio del viento en comparación con la misma corriente eólica en condiciones de espacio abierto.

El efecto de frenado también se ejerce en espacios libres de obstáculo debido a las fuerzas de rozamiento que se ejercen en la interface entre la tropósfera y la atmósfera que tienden a disminuir la velocidad del aire, siendo este efecto menos apreciable a medida que se consideran alturas mayores.

En resumen, se puede decir que los parámetros que definen el régimen de vientos en un punto dado son efectos de:

- La situación geográfica
- Características micro climáticas locales
- Estructura topográfica del emplazamiento
- Irregularidades o rugosidad general del terreno
- La altura considerada sobre el nivel terrestre

5.1.3. Velocidad y energía del viento

Un punto de arranque para cualquier proyecto de generación eléctrica a partir de la energía eólica debe ser la selección del emplazamiento adecuado para los aerogeneradores con que se cuenta para posteriormente determinar la capacidad energética eólica local y comparar y determinar si es verdaderamente viable.

Para el desarrollo de este proyecto, se usará una metodología diferente, satisfaciendo una demanda de energía eléctrica de un sistema a microescala impuesto con anterioridad, que para el caso es de 100 watts, que puede cubrir una zona geográfica más extensa o que permita flexibilidad y sea trasladable a locaciones con regímenes de viento similares.

El emplazamiento de este proyecto será toda la región del litoral del departamento de Bolívar y zonas que cuenten con condiciones atmosféricas similares.

Luego de exponer la metodología de la escogencia del emplazamiento, se puede decir que lo que interesa del viento desde el punto de vista práctico, es el contenido energético.

Para una corriente de aire en movimiento, la expresión matemática que define la energía cinética viene dada por la ley del cubo que se demuestra a continuación:

La cantidad de energía transferida al rotor por el viento depende de la densidad del aire " ρ ", del área de barrido del rotor, "A", y de la velocidad del viento, "V"; la energía cinética de una masa de aire, "m", moviéndose a una velocidad, "V", respondiendo a la expresión newtoniana:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2$$

Si el volumen de aire que se mueve es " V_{ol} " y tiene una densidad " ρ " su masa será: $m = \rho \cdot V_{ol}$, con lo que su energía cinética será:

$$E = \frac{1}{2} \cdot (\rho \cdot V_{ol}) \cdot V^2$$

La cantidad de aire que llegará al rotor de un aerogenerador en un tiempo "t" dependerá del área de barrido del rotor "A" y de la velocidad del viento V . El volumen del aire que llega al rotor será:

$$V_{ol} = A \cdot V \cdot t$$

Entonces, la energía cinética que aporta el aire al rotor en un tiempo "t" será:

$$E = \frac{1}{2} \cdot (\rho \cdot V) A \cdot t \cdot V^2$$

Finalmente, la potencia aportada al rotor será:

$$E = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$$

Donde: E = Energía por unidad de tiempo (Watt)

ρ = Densidad del aire ($\frac{Kg}{m^3}$)

A = Área interceptada (m^2)

V = Velocidad del viento ($\frac{m}{s}$)

Como se observa, la potencia del viento es proporcional al cubo de la velocidad del viento pero el aerogenerador ralentiza el viento al pasar por el rotor, hasta 2/3 de su velocidad inicial; lo que significa que no se aprovecha toda la energía

cinética que el viento aporta al rotor, existiendo una ley, llamada Ley de Benz demostrada a continuación:

Supongamos que la velocidad a la que entra el viento al tubo de corriente es V_1 y la velocidad a que sale es V_2 , podemos suponer que la velocidad a la que el viento entra al aerogenerador es de:

$$\frac{(V_1 + V_2)}{2}$$

El flujo másico que entra al rotor entonces tendrá el valor de:

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot \frac{(V_1 + V_2)}{2}$$

Dado que en tubo imaginario de corriente se debe conservar la potencia, la potencia que entra a velocidad V_1 tiene que ser igual a la suma de la potencia que sale a velocidad V_2 y la que se extrae en el rotor. Entonces la potencia extraída será:

$$P_{rotor} = \frac{1}{2} m(V_2^2 - V_1^2)$$

Y reemplazando la masa queda:

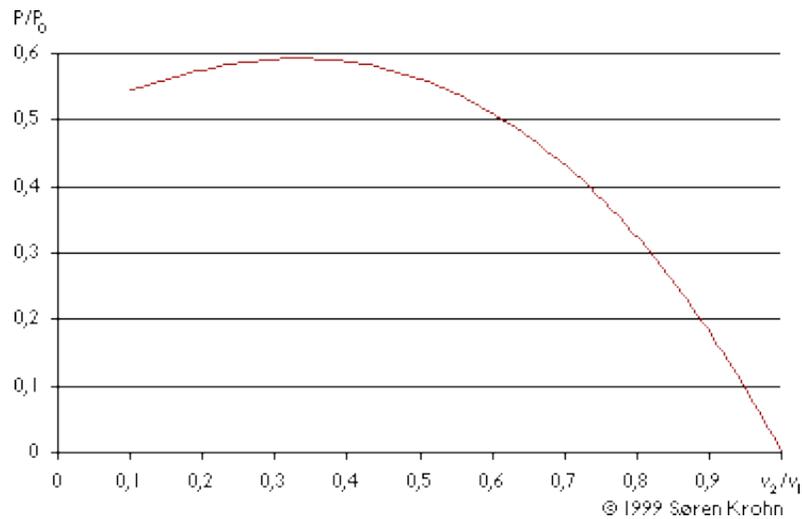
$$P_{rotor} = \frac{\rho}{4} (V_1^2 - V_2^2)(V_1 + V_2)A$$

La potencia que lleva el viento antes de llegar al rotor viene dado por:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$$

Ahora, comparando las expresiones de potencia del viento se obtiene la Gráfica 3, que se muestra a continuación:

Gráfica 3 Curva de eficiencia de Betz



Fuente: <http://web.ing.puc.cl/~power/alumno03/alternativa.htm>

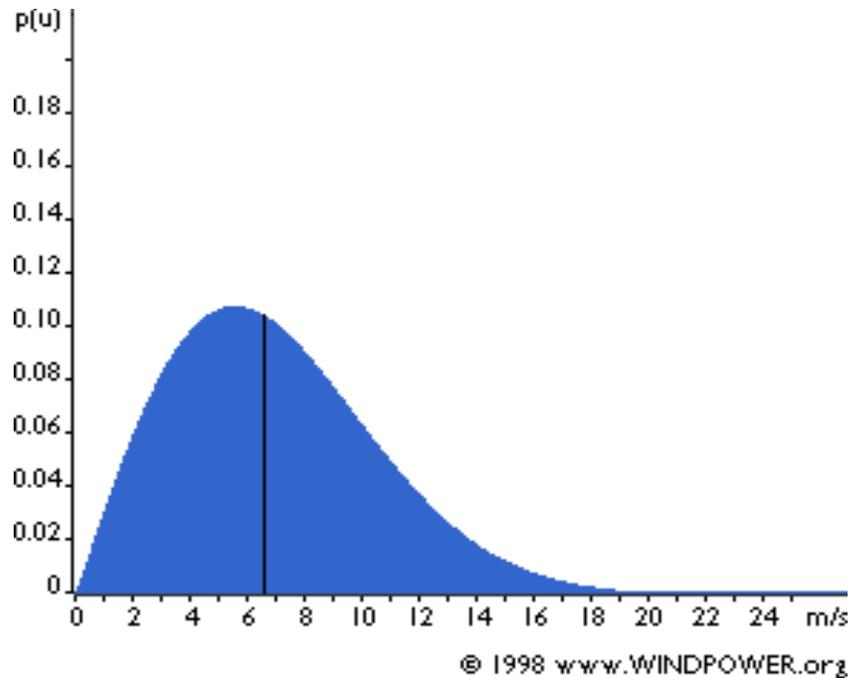
Cuyo máximo viene dado por 0.59 aproximadamente, es decir que únicamente puede convertirse menos de 16/27 (el 59%) de la energía cinética en energía mecánica usando un aerogenerador.

5.1.4. La distribución de Weibull

La curva de distribución de Weibull es la que mejor se adapta a los datos estadísticos de las velocidades de los vientos que se pueden registrar en una zona a lo largo de un año. Tal como se puede apreciar en la Gráfica 4, esta curva indica con qué probabilidad se puede observar una determinada velocidad de viento dentro del universo de muestras obtenidas.

El área bajo la curva vale 1. El viento promedio se define como aquel que corta el área bajo la curva justo en la mitad. Esto significa que el área a la derecha del viento promedio es igual al área de la izquierda.

Gráfica 4 Curva de distribución de viento de Weibull



Fuente:

http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/es/tour/wres/weibull.htm

La Tabla 3 muestra las características del viento para Cartagena, estudiada desde 10 m de altura:

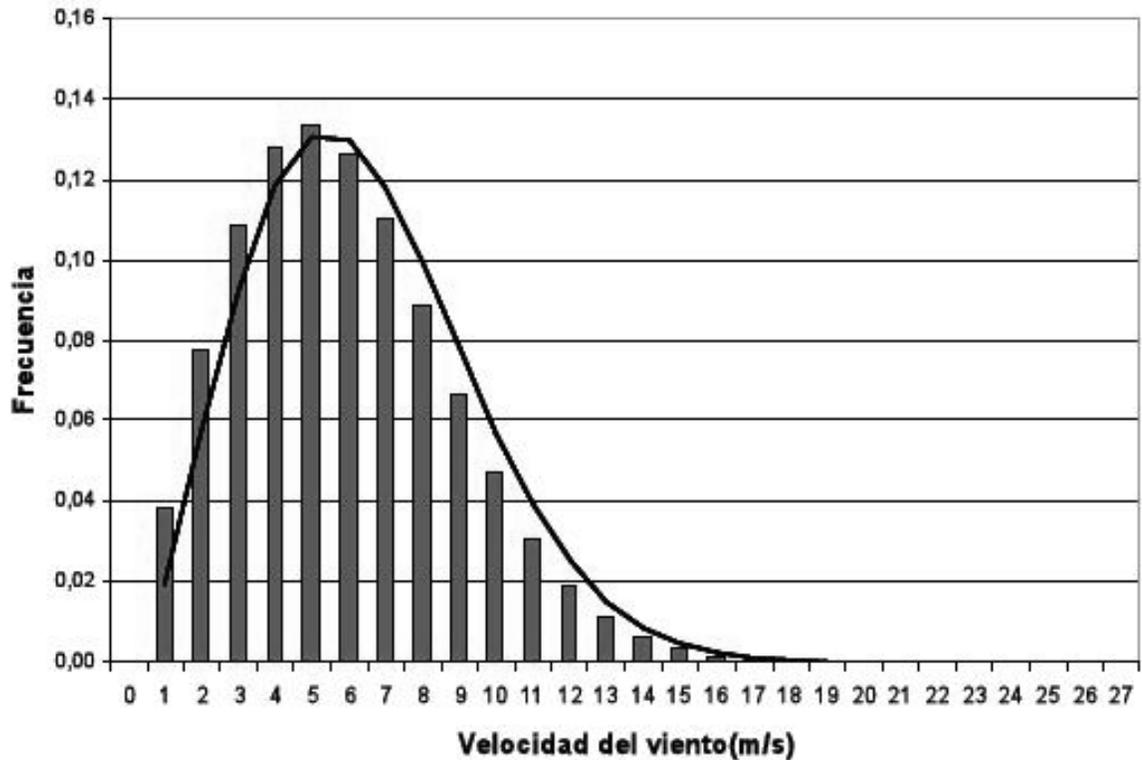
Tabla 3 Análisis de la energía eólica a 10 m de altura

NOMBRE ESTACION	CODIGO	LATIT	LONGI	ALTITU	DENSI.AIRE		
RESPO	1401502	10.27	75.31	2	1.2255		
MES	Horas con informac	Horas calma	<-----RE YENDO V media (m/s)	k	c	p media (W/m ²)	CALMA----> energia * (kWh/m ²)
ENE	632	71	4.82	2.36	5.44	112.96	63.37
FEB	618	90	5.90	2.43	6.65	202.73	107.04
MZO	686	104	5.66	2.42	6.38	179.44	104.44
ABR	668	100	5.48	2.55	6.18	157.20	89.29
MYO	606	171	3.92	2.43	4.42	59.50	25.88
JUN	620	193	3.84	2.60	4.32	53.26	22.74
JUL	673	173	3.93	2.60	4.42	56.95	28.48
AGO	628	192	3.84	2.29	4.34	58.83	25.65
SEP	640	237	3.65	2.77	4.10	43.82	17.66
OCT	685	246	3.46	2.28	3.90	42.84	18.81
NOV	689	189	3.72	2.29	4.20	53.51	26.75
DIC	692	142	4.57	2.16	5.16	103.67	57.02
Maximo	692	246	5.90	2.77	6.65	202.73	107.04
Minimo	606	71	3.46	2.16	3.90	42.84	17.66
AÑO	7837	1908				99.03	587.13

Fuente: <http://www.corpoema.com/CDenergia/Wind.PDF>

Con los datos de la tabla anterior, se obtiene la siguiente gráfica específica para Cartagena:

Gráfica 5 Curva de Weibull específica para Cartagena



El viento promedio no entrega el promedio de la potencia que este recurso es capaz de aportar.

La Ecuación $P = \frac{1}{2} \rho A V^3$ define la potencia del viento en función de su velocidad al cubo. Esto implica que la función de distribución de la potencia del viento tendrá que sufrir un cambio de variable no lineal al obtenerla de la curva de distribución del viento.

“Esta alteración deforma bastante la curva, la cual por ser distribución debe seguir manteniendo la relación del área igual a 1. En consecuencia, la potencia promedio es definida, en base a su curva, respecto a una velocidad de viento distinta de la velocidad de viento promedio. Esto se puede explicar de forma intuitiva considerando que los raros vientos de mayor velocidad pueden aportar una potencia bastante más considerable que vientos más moderados que se verifican más a menudo. Todo esto, simplemente por el factor al cubo que liga la velocidad del viento a la potencia”²⁴.

5.1.5. La rugosidad

“Es importante cuantificar el efecto de la morfología del territorio circundante al aerogenerador sobre la velocidad del viento. Para esto se define la “rugosidad” expresada por la siguiente Ecuación:

$$v(z) = v_{(ref)} \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)}$$

Donde:

z es la altura desde el suelo

$v_{(ref)}$ es la velocidad medida a una altura z_{ref}

z_0 es la longitud de la rugosidad (Ver Tabla 4)²⁵.

Esta función se modifica dependiendo de los obstáculos físicos presentes en el entorno que inciden sobre el desplazamiento del aire (Ver Tabla 5).

24 http://www.unac.edu.pe/documentos/organizacion/vri/cdcitra/Informes_Finales_Investigacion/Febrero_2011/IF_CARRASCO_VENEGAS_FIQ.PDF

25 <http://itzamna.bnct.ipn.mx:8080/dspace/bitstream/123456789/10070/1/32.pdf>

Tabla 4 Rugosidad y paisaje

Clase de rugosidad	Tipo de paisaje
0	Superficie del agua
0,5	Terreno completamente abierto con una superficie lisa
1	Agrícola abierta sin cercados ni setos y con edificios muy dispersos
1,5	Agrícola con algunas casas y setos (dist. 1250 m)
2	Agrícola con algunas casas y setos (dist. 500 m)
2,5	Agrícola con muchas casas, arbustos y planta (dist. 250 m)
3	Pueblos, ciudades pequeñas, terreno agrícola
3,5	Ciudades más grandes con edificios altos
4	Ciudades muy grandes con edificios altos y rascacielos

Fuente: <http://es.scribd.com/doc/98738759/Coeficientes-de-Rugosidad-Haestad>

Tabla 5 Coeficientes de rugosidad

Clase de Rugosidad	Longitud de Rugosidad (m)	Índice de energía (%)
0	0,0002	100
0,5	0,0024	73
1	0,03	52
1,5	0,055	45
2	0,1	39
2,5	0,2	31
3	0,4	24
3,5	0,8	18
4	1,6	13

Fuente: <http://es.scribd.com/doc/98738759/Coeficientes-de-Rugosidad-Haestad>

5.2. MARCO CONCEPTUAL

5.2.1. Clasificación de los aerogeneradores

Actualmente existe una gran variedad de modelos de aerogeneradores, los cuales se diferencian entre sí bien sea por la potencia, por la posición, por el número de palas o por la forma de producir la energía eléctrica. Su clasificación es:

5.2.1.1. Por la posición del eje del aerogenerador: Dependiendo de la posición del eje de giro de los aerogeneradores respecto a la dirección del viento, las turbinas eólicas se pueden clasificar en dos grandes grupos:

5.2.1.1.1. Aerogeneradores de eje horizontal o HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine): Son los más comunes y en ellos se ha centrado el mayor esfuerzo de diseño en los últimos años; en estos modelos el eje de rotación es paralelo al suelo, de forma similar a la de los clásicos molinos de viento europeos. Son los más costosos, sus aspas no soportan ni están diseñadas para grandes velocidades, pero son los más eficientes. (Ver Imagen 1.).

Imagen 1. Aerogenerador de eje horizontal.



Fuente:

<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia36/HTML/articulo03.htm>

5.2.1.1.2. Aerogeneradores de eje vertical o VAWT (Vertical Axis Wind Turbine): En estos modelos su principal característica es que el eje de rotación es perpendicular al suelo; existen tres diseños básicos:

5.2.1.1.2. a. Savonius: Está compuesto de dos semicilindros de igual diámetro situados paralelamente al eje vertical de giro (ver Imagen 2.). La fuerza que el viento ejerce en las caras de los cilindros (cara cóncava y cara convexa) es distinta, por lo que las hace girar alrededor del eje. Este sistema presenta buenas características aerodinámicas para el autoarranque y la autorregulación. Su campo de aplicación está en la producción autónoma de electricidad o el bombeo de agua. La principal ventaja del rotor es que puede trabajar con velocidades de viento muy bajas.

Imagen 2. Aerogenerador de eje vertical tipo savonius



Fuente: http://www.gea.usm.cl/?page_id=73

5.2.1.1.2. b. Darrieus: Están formados por dos o tres palas de forma ovalada de perfil aerodinámico (ver Imagen 3) y tienen características parecidas a las de eje horizontal, presentando un par de arranque muy pequeño. Su potencia es pequeña y aunque su aplicación es similar a los aerogeneradores rápidos de eje horizontal, están poco implantados.

Imagen 3 Aerogenerador de eje vertical tipo darrieus de dos y tres palas



Fuente: <http://ctmaestella.blogspot.com/2009/01/aerogeneradores-darrieus.html>

5.2.1.1.2. c. Panemonas: Están formados por cuatro o más semicírculos unidos al eje central. Su rendimiento es bajo. (Ver Imagen 4).

Imagen 4 Aerogenerador de eje vertical tipo panemonas



Fuente: <http://ctmaestella.blogspot.com/2009/01/panemonas.html>

Los aerogeneradores de eje vertical presentan algunas ventajas sobre las de eje horizontal. Debido a su simetría vertical, no necesitan sistemas de orientación para alinear el eje de la turbina con la dirección del viento, su mantenimiento es más sencillo, dada su poca altura con respecto al suelo y en el caso de que se trabaje a velocidad constante, no es necesario incorporar ningún mecanismo de cambio de paso, menor costo de instalación. Pero no todo son ventajas ya que necesitan un motor de arranque, presentan menor velocidad de giro y su rendimiento es menor que el de las máquinas de eje horizontal a igual potencia.

“Los adelantos tecnológicos que se han empleado sobre los aerogeneradores de eje horizontal y las constantes mejorías en las prestaciones técnicas y económicas de los mismos, han dejado en segundo plano el desarrollo de los aerogeneradores de eje vertical. Sin embargo, a pequeña escala, los aerogeneradores de eje vertical vuelven a ser competitivos respecto a los de eje horizontal si se consideran las ventajas anteriormente citadas”²⁶.

5.2.1.2. Clasificación por la posición del equipo con respecto al viento:

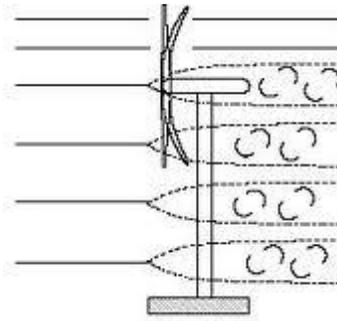
Estos aerogeneradores se clasifican en dos tipos:

5.2.1.2.1. A barlovento: Las máquinas en posición corriente arriba tienen el rotor de cara al viento, la principal ventaja de estos diseños es que se evita el abrigo del viento tras la torre, también hay algo de abrigo enfrente de la torre, es decir, el viento empieza a desviarse de la torre antes de alcanzarla, incluso si la torre es redonda y lisa. Así pues, cada vez que el rotor pasa por la torre, la potencia del aerogenerador cae ligeramente. El principal inconveniente de los diseños corriente arriba es que el rotor necesita ser bastante inflexible, y estar situado a una cierta distancia de la torre. Además una máquina corriente arriba

26 <http://www.uv.es/~navasqui/OtrosAerogeneradores/Aerogen-vertical.pdf>

necesita un mecanismo de orientación para mantener el rotor de cara al viento. (Ver Figura 1).

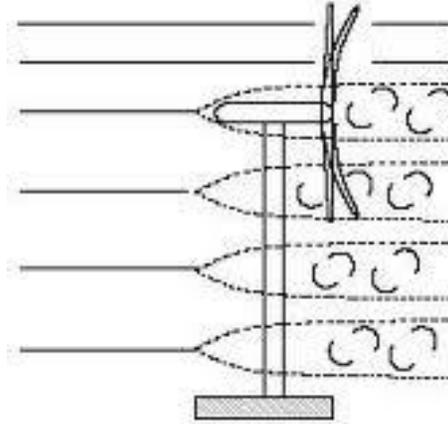
Figura 1 Aerogenerador situado en posición barlovento



Fuente: http://www.opex-energy.com/eolica/tipos_aerogeneradores.html

5.2.1.2.2. A sotavento: Las máquinas en posición corriente abajo las cuales tienen el rotor situado en la cara a sotavento de la torre. Tienen como ventaja que pueden ser construidos sin un mecanismo de orientación, si el rotor y la góndola tienen un diseño apropiado que hace que la góndola siga al viento pasivamente. Sin embargo, en grandes máquinas ésta es una ventaja algo dudosa, pues se necesitan cables para conducir la corriente fuera del generador. Si la máquina ha estado orientándose de forma pasiva en la misma dirección durante un largo periodo de tiempo y no dispone de un mecanismo de orientación, los cables pueden llegar a sufrir una torsión excesiva. Un aspecto más importante es que el rotor puede hacerse más flexible. Esto supone una ventaja tanto en cuestión de peso como de dinámica de potencia de la máquina, es decir, las palas se curvarán a altas velocidades del viento, con lo que quitarán parte de la carga a la torre. El inconveniente principal es la fluctuación de la potencia eólica, debida al paso del rotor a través del abrigo de la torre. Esto puede crear más cargas de fatiga en la turbina que con un diseño corriente arriba. (Ver Figura 2).

Figura 2 Aerogenerador situado en posición sotavento



Fuente: http://www.opex-energy.com/eolica/tipos_aerogeneradores.html

5.2.1.3. Clasificación por el número de palas: Las palas del aerogenerador son unas de las partes más importantes de él, ya que son las encargadas de recoger la energía del viento, convertir el movimiento lineal de éste en un movimiento de rotación, esta energía es transmitida al eje, de este, pasa a un sistema de transmisión mecánica y de ahí al generador que transforma el movimiento de rotación en energía eléctrica. Existen varios tipos de aerogeneradores según el número de palas:

5.2.1.3.1. Una pala: Al tener sólo una pala estos aerogeneradores precisan un contrapeso en el otro extremo para equilibrar. La velocidad de giro es muy elevada. Su gran inconveniente es que introducen en el eje unos esfuerzos muy variables, lo que acorta la vida de la instalación. (Ver Imagen 5).

Imagen 5 Aerogenerador de una pala



Fuente: <http://es.globedia.com/instalan-aerogenerador-pala-250-ceder-ciemat-soria>

5.2.1.3.2. Dos palas: Estos diseños también son llamados bipalas y tienen la ventaja de ahorrar el costo de una pala y, por supuesto, su peso. Sin embargo, suelen tener dificultades para penetrar en el mercado, en parte porque necesitan una mayor velocidad de giro para producir la misma energía de salida. Esto supone una desventaja tanto en lo que respecta al ruido como al aspecto visual. (Ver Imagen 6).

Imagen 6 Aerogenerador de dos palas



Fuente: <http://html.rincondelvago.com/aerogeneradores.html>

5.2.1.3.3. Tres palas: La mayoría de los aerogeneradores modernos tienen este diseño, con el rotor mantenido en la posición corriente arriba, usando veletas o motores eléctricos en sus mecanismos de orientación. Este diseño tiende a imponerse como estándar al resto de los conceptos evaluados. La gran mayoría de las turbinas vendidas en los mercados mundiales poseen este diseño. (Ver Imagen 7).

Imagen 7 Aerogenerador de tres palas



Fuente: http://www.opex-energy.com/eolica/palas_aerogenerador.html

5.2.1.3.4. “Multipalas: Estos aerogeneradores tienen 4 o más palas y también es llamado modelo o tipo americano, debido a que una de sus primeras aplicaciones fue la extracción de agua en pozos de las grandes llanuras de este continente”²⁷. (Ver Imagen 8).

²⁷ <http://html.rincondelvago.com/aerogeneradores.html>

Imagen 8 Aerogenerador multipalas



Fuente: <http://fuentesrenovables.blogspot.com/>

Los materiales (madera, acero y aluminio) que habitualmente se han utilizado en la fabricación de las palas de los aerogeneradores han sido reemplazados por la utilización de plásticos y resinas, la fibra de vidrio se aplica al 99% de los grandes aerogeneradores. Existe una tendencia clara hacia el uso de epoxi (generalmente resina de poliéster) reforzado de fibra de vidrio o carbono. En cuanto a las turbinas pequeñas, igualmente el 99 % usan materiales plásticos, solo algunos fabricantes usan madera, la mayoría son de materiales plásticos inyectados.

5.2.1.4. Clasificación por el modo de orientación del equipo a la dirección del viento instantánea: “El mecanismo de orientación de un aerogenerador es utilizado para girar el rotor de la turbina en contra del viento pueden ser activos (rotor eléctrico dotado de sensores) y pasivo (tipo veleta). Se dice que la turbina tiene un error de orientación si el rotor no está perpendicular al viento. Un error de orientación implica que una menor proporción de la energía del

viento pasará a través del área del rotor (esta proporción disminuirá con el coseno del error de orientación), por tanto, la eficiencia del mecanismo de orientación es fundamental para mantener el rendimiento de la instalación”²⁸.

5.2.1.5. Clasificación según la forma de producir energía eléctrica: Los aerogeneradores pueden producir energía eléctrica de dos formas: en conexión directa a la red de distribución convencional o de forma aislada:

5.2.1.5.1. Aplicaciones aisladas: estas se utilizan para usos domésticos o agrícolas (iluminación, pequeños electrodomésticos, bombeo, irrigación, etc.), Incluso en instalaciones Industriales para desalinización, repetidores aislados de telefonía, TV, instalaciones turísticas y deportivas, etc. por medio de pequeña o mediana potencia. En caso de estar condicionados por un horario o una continuidad se precisa introducir sistemas de baterías de acumulación o combinaciones con otro tipo de generadores eléctricos (grupos diesel, placas solares fotovoltaicas, centrales mini-hidráulicas). También se utilizan aerogeneradores de gran potencia en instalaciones aisladas, desalinización de agua marina, producción de hidrógeno, etc.

5.2.1.5.2. Conexión directa a la red: “viene representada por la utilización de aerogeneradores de potencias grandes (más de 10 ó 100 kW). Aunque en determinados casos y gracias al apoyo de los estados a las energías renovables, es factible la conexión de modelos más pequeños, siempre teniendo en cuenta los costos de transmisión a la red (equipos y permisos). La mayor rentabilidad se obtiene a través de agrupaciones de máquinas de potencia conectadas entre sí y que vierten su energía conjuntamente a la red eléctrica, estos sistemas se

28 <http://zaguan.unizar.es/TAZ/EUITIZ/2010/5484/TAZ-PFC-2010-418.pdf>

denominan parques eólicos. Por sus condiciones de producción está limitada en porcentaje al total de energía eléctrica (en la conexión directa a la red)”²⁹.

5.2.2. Componentes principales de un aerogenerador.

“Las turbinas de bajo potencial eólico técnicamente tienen una estructura similar a las grandes, solo que su diseño es más simple. Como en general, el aerogenerador más empleado es el de eje horizontal (ver Imagen 9), a continuación se hace una descripción de los componentes principales que constituyen ese tipo de aerogenerador”³⁰:

Imagen 9 Componentes de un aerogenerador de eje horizontal



Fuente: <http://ingenieriamontaje.blogspot.com/2010/10/generador-eolico.html>

²⁹ <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/es/flujodegases/energiaeolica/energiaeolica.html>

³⁰

http://www.ciemat.es/CIEMATportal/recursos/doc/Areas_Actividad/Prospectiva_Tecnologica/34301686_211200911951.pdf

5.2.2.1. Rotor: “La función del rotor es transformar la energía cinética del viento en energía mecánica. Cuanto mayor sea el área barrida por el rotor mayor será la producción de energía”³¹.

El rotor está formado por dos partes bien diferenciadas:

5.2.2.1. a. Los álabes: Se denomina álabe a cada una de las palas curvadas de una turbina. Los álabes forman parte de las turbinas de gas, de vapor, los turbocompresores y generadores eólicos.

“El perfil aerodinámico de los álabes es similar al perfil del ala de un avión. Los álabes emplean el mismo principio de la fuerza de empuje que actúa por la parte de abajo del ala. El flujo de aire produce presión en la parte inferior y vacío en la parte superior. Estos efectos combinados provocan una fuerza de empuje que hace girar la turbina”³².

Para el presente proyecto se debe conocer la terminología relacionada a los alabes:

- “La línea de cuerda es una línea recta que une el borde de ataque y el borde de fuga del perfil.
- La cuerda es la longitud de la línea anterior. Todas las dimensiones de los perfiles se miden en términos de la cuerda.
- La línea de curvatura media es la línea media entre el extradós y el intradós.

31

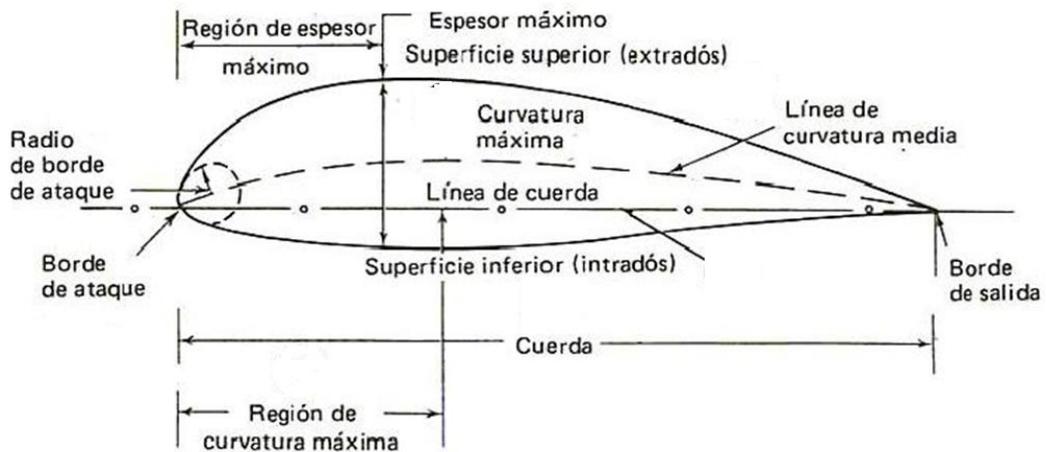
http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_10374_Energia_eolica_06_d9231f5c.pdf

32 <http://energi aunam.wordpress.com/page/4/>

- Curvatura máxima es la distancia máxima entre la línea de curvatura media y la línea de cuerda. La posición de la curvatura máxima es importante en la determinación de las características aerodinámicas de un perfil.
- Espesor máximo es la distancia máxima entre la superficie superior (extradós) e inferior (intradós). La localización del espesor máximo también es importante.
- Radio del borde de ataque es una medida del afilamiento del borde de ataque. Puede variar desde 0, para perfiles supersónicos afilados, hasta un 2 por 100 (de la cuerda) para perfiles más bien achatados³³.

Todos estos términos se pueden apreciar en la Figura 3.

Figura 3 Terminología asociada a los perfiles alares



Fuente: http://www.oni.escuelas.edu.ar/2003/buenos_aires/62/tecnolog/perfiles.htm

³³ <http://sandglasspatrol.com/IIGM-12oclockhigh/EI%20Ala%20y%20el%20Perfil.htm>

“El número de palas en una turbina eólica es muy variable, una, dos, tres o multipalas. A la hora de diseñar un aerogenerador hay que considerar que **el rotor girará a mayor velocidad cuanto menor sea el número de palas que posee** y que para la generación de electricidad es aconsejable que el rotor gire al mayor número de revoluciones posibles. Por lo tanto, el número de palas debe de ser bajo, 1, 2 ó 3 palas”³⁴.

“En general, los aerogeneradores constan de tres palas ya que es el menor número de palas que permite ahorrar más material y peso sin complicar el sistema. Algunos modelos utilizan rotores bipalas o monopalas, que logran un ahorro todavía mayor pero tienen el inconveniente de que son menos eficientes y deben introducir sistemas de control más complicados para mejorar su estabilidad”³⁵.

“Además, en el caso de los aerogeneradores tripalas cabe destacar que producen menor ruido aerodinámico que los monopalas y bipalas, propiedad que es muy importante, sobre todo, cuando este tipo de turbinas son utilizadas para el abastecimiento eléctrico en puntos aislados, o lugares urbanos donde generalmente la máquina se debe emplazar en las cercanías de la población y se debe minimizar la perturbación introducida en el hábitat natural”³⁶.

34 http://www.ciemat.es/CIEMATportal/recursos/doc/Areas_Actividad/Prospectiva_Tecnologica/34301686_211200911951.pdf

35

<http://books.google.com.co/books?id=pAa5hR2cz0oC&pg=PA159&lpg=PA159&dq=En+general,+los+aerogeneradores+constan+de+tres+palas+ya+que+es+el+menor+n%C3%BAmero+de+palas+que+permite+ahorrar+m%C3%A1s+material+y+peso+sin+complicar+el+sistema.+Algunos+modelos+utilizan+rotores+bipalas+o+monopalas,+que+logran+un+ahorro&source=bl&ots=kJdSxSgrQX&sig=AOAt-caxLN5--WRIGZWBdRZTy1I&hl=es&sa=X&ei=t44qUYLoJlqy8ATRmoDYDA&ved=0CC0Q6AEwAA#v=onepage&q=En%20general%2C%20los%20aerogeneradores%20constan%20de%20tres%20palas%20ya%20que%20es%20el%20menor%20n%C3%BAmero%20de%20palas%20que%20permite%20ahorrar%20m%C3%A1s%20material%20y%20peso%20sin%20complicar%20el%20sistema.%20Algunos%20modelos%20utilizan%20rotores%20bipalas%20o%20monopalas%2C%20que%20logran%20un%20ahorro&f=false>

36 http://www.ciemat.es/CIEMATportal/recursos/doc/Areas_Actividad/Prospectiva_Tecnologica/34301686_211200911951.pdf

5.2.2.1. b. “El cubo: Es el elemento al que se encuentran unidas las palas y a través del cual la potencia eólica captada por el rotor se transmite a la caja multiplicadora, variador de velocidad o directamente al generador.

5.2.2.2. Góndola: La góndola es el compartimiento en cuyo interior se encuentra el generador eléctrico, la caja multiplicadora y los sistemas de control, regulación, orientación y frenado o simplemente las conexiones eléctricas requeridas.

5.2.2.3. Generador: La función del generador es transformar la energía mecánica procedente del rotor en energía eléctrica. Existen diferentes tipos de generadores:

5.2.2.3.1. Generador de Corriente Continua (Dínamos): Son máquinas eléctricas sencillas que tienen la ventaja de no necesitar sistemas especiales para cargar baterías y generan corriente aún para bajas velocidades de giro.

Sin embargo, su uso cada vez es menor, se han ido reemplazando por los generadores de corriente alterna ya que presentan el inconveniente de que necesitan un mantenimiento periódico y son más pesadas y caras que los generadores de corriente alterna de igual potencia, aunque hay que tener en cuenta que son idóneos para los aerogeneradores de muy pequeño tamaño (decenas de vatios).

5.2.2.3.2. Generador de Corriente Alterna: Es un dispositivo que convierte la energía mecánica en energía eléctrica. Éstos se clasifican en:

5.2.2.3.2.a. Síncronos o Alternadores: Estos generadores síncronos o alternadores son de velocidad variable, es decir suministran corrientes de frecuencia variables. Por lo tanto, para conectarlos directamente a la red de corriente alterna es preciso utilizar un convertidor de frecuencia como elemento

intermedio entre el generador y la red. Esta desventaja se compensa con una mayor eficiencia de la turbina y una mejor compatibilidad con la red. Principalmente, este tipo de generadores se usan en máquinas que alimentan instalaciones autónomas, como en aplicaciones para iluminación, calefacción, etc., y la mayoría utilizan alternadores de imán permanente ya que se trata de la configuración más sencilla y robusta.

5.2.2.3.2. b. Asíncrono o de inducción: Se caracteriza porque usa corriente de la red eléctrica para crear su campo magnético. En principio, este tipo de generador no es capaz de operar sin la red. Sin embargo, sistemas electrónicos pueden engañar a los generadores de inducción por medio de condensadores para cargar el campo, permitiendo así a estos generadores ser utilizados en sistemas de potencias aislados.

5.2.2.4. Multiplicador: El acoplamiento entre el rotor eólico y el generador, en la mayoría de los casos, se realiza a través de una caja multiplicadora y su función es multiplicar la velocidad de giro que llega del rotor para adaptarla a las necesidades del generador. Su empleo es necesario a medida que crece el diámetro del rotor, pues se deben limitar las rpm del rotor para evitar que las puntas de las palas trabajen a velocidades que comprometen la resistencia de los materiales empleados o induzcan vibraciones perjudiciales. Pero en el caso de las turbinas con una potencia inferior a 10 kW, generalmente, no se usa el multiplicador ya que el rotor está conectado directamente al generador.

5.2.2.5. Sistema de control: Toda turbina eólica necesita un sistema de control que permita por un lado detener la máquina y limitar su velocidad por razones de seguridad y por el otro optimizar el funcionamiento. Además, en el caso de generación eléctrica a frecuencia constante es necesario mantener la velocidad de giro del rotor dentro de ciertos límites para obtener un alto

rendimiento. El sistema de control es diferente en función del tamaño del aerogenerador. Los sistemas de control se clasifican en:

5.2.2.5.1. Sistemas con ángulo de paso fijo y variación del área de captación “Furling”: Su principio fundamental es reducir el área de captación o área del rotor en posición perpendicular a la corriente de aire incidente cuando la velocidad de éste supera cierto valor crítico. El sistema de detección de la energía en exceso y el de actuación lo forman el mismo rotor y su vinculación a la torre a través de la góndola. El rotor oscila lateralmente fuera del viento (alrededor de un eje vertical) para disminuir la potencia. En la práctica, esta técnica sólo se usa en aerogeneradores muy pequeños (< 5 kW), pues somete al rotor a fuerzas que varían cíclicamente y que a la larga pueden dañar toda la estructura, y en lugares que se encuentren alejados de la población debido a la gran emisión de ruido acústico que producen.

5.2.2.5.2. Sistema de ángulo de paso fijo por pérdida aerodinámica “stall regulation”: Este es un sistema de control pasivo que reacciona con la velocidad del viento. En este tipo de sistema de control, las palas están unidas al buje en un ángulo fijo. El perfil de la pala ha sido aerodinámicamente diseñado para asegurar que a medida que aumente la velocidad real del viento en la zona, el ángulo de ataque de la pala del rotor también aumente hasta llegar al punto donde empieza a perder sustentación. La pala está ligeramente torsionada a lo largo de su eje longitudinal. Esto es así en parte para asegurar que la pala pierda la sustentación de forma gradual, en lugar de hacerlo bruscamente, cuando la velocidad del viento alcanza su valor crítico. La principal ventaja de este sistema es que se evitan las partes móviles del rotor y un complejo sistema de control. Sin embargo, la regulación por pérdida aerodinámica representa un problema de diseño muy complejo y comporta retos en el diseño de la dinámica estructural de toda la turbina, para evitar las vibraciones provocadas por la pérdida de sustentación. Alrededor de las dos terceras partes de los aerogeneradores que actualmente se

están instalando en todo el mundo son máquinas de regulación por pérdida aerodinámica.

5.2.2.5.3. Sistema con ángulo de paso variable o “pitch regulation”. Este método de control consiste en que las palas varían su ángulo de incidencia con respecto al viento. En este tipo de sistema, un ordenador comprueba varias veces por segundo la potencia generada. Cuando ésta alcanza un valor demasiado alto, el controlador envía una orden al mecanismo de cambio del ángulo de paso, que inmediatamente hace girar las palas del rotor ligeramente fuera del viento y a la inversa, las palas son vueltas hacia el viento cuando éste disminuye de nuevo. El diseño de aerogeneradores controlados por este tipo de sistema requiere una ingeniería muy desarrollada, para asegurar que las palas giren exactamente el ángulo deseado. En este tipo de aerogeneradores, el ordenador generalmente girará las palas unos pocos grados cada vez que el viento cambie, para mantener un ángulo óptimo que proporcione el máximo rendimiento a todas las velocidades de viento. El mecanismo de cambio del ángulo de paso suele funcionar de forma hidráulica. Este tipo de sistema es más frecuente en eólicas de gran potencia, con diámetros superiores a 20 m, así como en aerogeneradores que trabajan en paralelo con grupos electrógenos (sistemas mixtos eólico-diesel).

En estos sistemas activos de paso variable, se encuentran a su vez dos posibles configuraciones:

5.2.2.5.3.a. Sistemas en los que gira toda la pala alrededor de su eje longitudinal, cambiando el ángulo de paso de la misma para situarse siempre en condiciones de máximo rendimiento o para sacar a la pala de la acción del viento y parar el rotor.

5.2.2.5.3. b. Sistemas en los que el giro se realiza sólo en el tramo final de la pala correspondiente al extremo o punta de la misma, de forma similar al funcionamiento del alerón en un avión.

5.2.2.5.4. Sistema de regulación activa por pérdida aerodinámica: Un número creciente de grandes aerogeneradores (a partir de 1 MW) están siendo desarrollados con un mecanismo de regulación activa por pérdida aerodinámica. Técnicamente, las máquinas de regulación activa por pérdida aerodinámica se parecen a las de regulación por cambio del ángulo de paso, en el sentido de que ambos tienen palas que pueden girar.

Para tener un momento de torsión (fuerza de giro) razonablemente alto a bajas velocidades del viento, este tipo de máquinas serán normalmente programadas para girar sus palas como las de regulación por cambio del ángulo de paso a bajas velocidades del viento (a menudo sólo utilizan unos pocos pasos fijos, dependiendo de la velocidad del viento). Sin embargo, cuando la máquina alcanza su potencia nominal, este tipo de máquinas presentan una gran diferencia respecto a las máquinas reguladas por cambio del ángulo de paso: si el generador va a sobrecargarse, la máquina girará las palas en la dirección contraria a la que lo haría una máquina de regulación por cambio del ángulo de paso. En otras palabras, aumentará el ángulo de paso de las palas para llevarlas hasta una posición de mayor pérdida de sustentación, y poder así consumir el exceso de energía del viento.

Una de las ventajas de la regulación activa por pérdida aerodinámica es que la producción de potencia puede ser controlada de forma más exacta que con la regulación pasiva, con el fin de evitar que al principio de una ráfaga de viento la potencia nominal sea sobrepasada.

Otra de las ventajas es que la máquina puede funcionar casi exactamente a la potencia nominal a todas las velocidades de viento. Un aerogenerador normal de regulación pasiva por pérdida aerodinámica tendrá generalmente una caída en la producción de potencia eléctrica a altas velocidades de viento, dado que las palas alcanzan una mayor pérdida de sustentación. El mecanismo de cambio del ángulo de paso suele operarse mediante sistemas hidráulicos o motores eléctricos paso a paso.

5.2.2.6. Sistema de orientación: A fin de optimizar el aprovechamiento energético del viento, el plano de rotación del rotor debe mantenerse perpendicular a la dirección del viento. En el caso de que el rotor esté situado a sotavento, como ya se comentó anteriormente, no es necesario un sistema de orientación ya que mediante una conicidad adecuada de las palas el sistema es auto-orientable. En cambio en los rotores situados a barlovento, delante de la torre, si se debe incorporar algún sistema de orientación. Entre estos sistemas cabe distinguir los siguientes:

5.2.2.6.1. Eólicas auxiliares: En particular molinos de cola, usados sólo en algunas eólicas pequeñas. Es un sistema poco fiable.

5.2.2.6.2. Veletas de cola: Se usan en pequeñas turbinas, formando parte del conjunto timón-veleta. La orientación del rotor se realiza de forma mecánica, al incidir el viento sobre el timón-veleta y ejerciendo sobre éste un par de fuerzas que hace que el rotor se coloque perpendicularmente a la dirección del viento.

5.2.2.6.3. Rotor a barlovento con orientación asistida: Es el sistema más utilizado en grandes aerogeneradores. Incorpora un sensor con un ordenador y, en función de la dirección y la velocidad del viento, envía las correspondientes órdenes de control a un servomotor para la orientación del plano de giro del rotor. El servomotor (eléctrico o hidráulico), acciona a través de un sistema de piñones,

una corona dentada que a su vez hace girar el plano del rotor para colocarlo perpendicularmente a la dirección del viento. Debido a sus dimensiones, las pequeñas turbinas eólicas no pueden acomodar los mecanismos de transmisión y los motores de orientación que se emplean en las turbinas más grandes.

5.2.2.7. Torre: Las máquinas eólicas deben estar situadas sobre una estructura de soporte capaz de aguantar el empuje del viento. Existen varios tipos de torres, entre ellas tenemos:

5.2.2.7.1. Torres tubulares de acero: En el caso de los grandes aerogeneradores generalmente se utilizan torres tubulares de acero, fabricadas en secciones de 20-30 metros con bridas en cada uno de los extremos, y son unidas con pernos "in situ". Las torres son tronco-cónicas, es decir con un diámetro creciente hacia la base, con el fin de aumentar su resistencia y al mismo tiempo ahorrar material. (Ver Imagen 10).

Imagen 10 Torres tubulares de acero



Fuente: http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/es/tour/wtrb/tower.htm

5.2.2.7.2. Torres de celosía: Son fabricadas utilizando perfiles de acero soldados. La ventaja básica de las torres de celosía es su costo, puesto que para

su fabricación se requiere sólo la mitad de material que en una torre tubular. La principal desventaja de este tipo de torres es su apariencia visual. En cualquier caso, por razones estéticas, las torres de celosía han desaparecido prácticamente en los grandes aerogeneradores modernos. Son muy comunes en la India, aunque se encuentran en otros países como Alemania y EE.UU. (Ver Imagen 11).

Imagen 11 Torres de celosía



Fuente:

http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/es/tour/wtrb/tower.htm

5.2.2.7.3. Torres de mástil tensado: Muchos de los aerogeneradores pequeños están contruidos con delgadas torres de mástil sostenidas por cables tensores. La ventaja es el ahorro de peso y, por lo tanto, de costo. Las desventajas son el difícil acceso a las zonas alrededor de la torre, lo que las hace menos apropiadas para zonas agrícolas. Las torres tubulares son las que ofrecen una vista más agradable, pero son las más costosas y, a menos que estén articuladas para arriarlas, son también las que ofrecen más dificultades a la hora de efectuar el mantenimiento de la turbina. Las torres con tensores son las menos costosas. (Ver Imagen 12).

Imagen 12 Torres de mástil tensado



Fuente:

http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/es/tour/wtrb/tower.htm

5.2.2.7.4. Torres híbridas: Algunas torres están hechas con diferentes combinaciones de las ya mencionadas. Un ejemplo es la torre de tres patas Bonus 95 kW, de la que podría decirse que es un híbrido entre una torre de celosía y una torre tensada con vientos³⁷ (Ver Imagen 13).

Imagen 13 Torres híbridas



Fuente:

http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/es/tour/wtrb/tower.htm

³⁷ http://www.ciemat.es/CIEMATportal/recursos/doc/Areas_Actividad/Prospectiva_Tecnologica/34301686_211200911951.pdf

5.2.2.8. “Unidad de refrigeración: Contiene un ventilador eléctrico, utilizado para enfriar el generador eléctrico. Además puede contener una unidad refrigerante por aceite empleada para enfriar el aceite del multiplicador. Algunos aerogeneradores son enfriados por agua.

5.2.2.9. El eje de baja velocidad: Conecta el buje del rotor al multiplicador. En un aerogenerador moderno de 600 kW, el rotor gira muy lento a unas 19-30 rpm. El eje contiene conductos del sistema hidráulico para permitir el funcionamiento de los frenos aerodinámicos.

5.2.2.10. El eje de alta velocidad: Gira aproximadamente a 1.500 rpm, lo que permite el funcionamiento del motor eléctrico. Está equipado con un freno de disco mecánico de emergencia. El freno mecánico se utiliza en caso de fallo del freno aerodinámico o bien durante las labores de mantenimiento del aerogenerador³⁸.

5.2.3. “Otros componentes de un sistema de energía eólica

Para poner en marcha un sistema de energía eólica es necesario, además del aerogenerador, un equipo que esté constituido por algunos de los siguientes componentes alternos:

5.2.3.1. Sistemas de almacenamiento: En sistemas que no se encuentran conectados a red generalmente se dispone de algún sistema de almacenamiento con el objeto de disponer de la energía en periodos de viento flojo o de calma. Éste sistema está compuesto por:

5.2.3.1.1. Baterías: Actualmente, es el sistema más utilizado para almacenar la electricidad generada por la turbina. Permite construir sistemas de muy pequeño tamaño, adecuados para balizas, repetidores de señal,

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

estaciones de recogidas de datos y puestos de socorro remotos. Su rendimiento es del 60 % al 75 %. Se emplean baterías especiales que permitan reducciones de su carga hasta el 60 % sin daños. Su vida en estas condiciones es del orden de 5 a 7 años. No es adecuado para tamaños grandes por su elevado coste y dificultades de mantenimiento.

5.2.3.1.2. Acumulación térmica: La energía extraída del viento se usa para calentar agua, directamente por medio de un freno hidráulico o por calentamiento de resistencias eléctricas tras la conversión a electricidad. El agua se almacena y el aprovechamiento energético posterior sería solo adecuado si se requiere en forma calorífica.

5.2.3.1.3. Bombeo de agua: Durante períodos con exceso de producción de energía se puede usar la energía eléctrica para bombear agua hasta un depósito elevado. Durante períodos de viento insuficiente la carga podría alimentarse con una minicentral hidráulica cuyo generador síncrono se conectaría en paralelo con el aerogenerador a través de un sistema de protección y control adecuado. Este método proporciona una eficiencia de energía eléctrica recuperada entre el 50 % y el 80 %.

5.2.3.1.4. Generación de hidrógeno y pila de combustible: Se descompone el agua en hidrogeno y oxígeno por electrolisis. El hidrógeno se almacenaría y posteriormente se podría utilizar directamente como combustible o bien para generar electricidad de corriente continua mediante una pila de combustible. El rendimiento de recuperación varía entre el 50 % y el 70 %.

5.2.3.1.5. Volante de inercia: Almacenar en una volante capaz de girar a elevado régimen en un recinto al vacío, que impida la resistencia aerodinámica, es un sistema conveniente para fluctuaciones fuertes en la energía eólica ya que es capaz de absorber potencias instantáneas elevadas.

5.2.3.1.6. Desalinización del agua: En lugares donde coincida la demanda de agua potable con la disponibilidad de energía eólica y su impacto ecológico sea aceptable, es posible recurrir a emplear la energía sobrante en desalinizar agua, la cual es fácilmente almacenable y proporciona una utilidad completa.

5.2.3.2. Inversores: Los inversores se utilizan para convertir la corriente continua (CC) generada por los aerogeneradores eólicos, paneles solares fotovoltaicos, acumuladores o baterías, etc., en corriente alterna (CA) y de esta manera poder ser inyectada en la red eléctrica o usada en instalaciones eléctricas aisladas. Existen diferentes tipos de inversores:

5.2.3.2.1. Inversores de onda sinusoidal: Se utiliza en los sistemas que no están conectados a la red. Emplean la corriente continua de un sistema de almacenamiento con baterías y producen una corriente alterna de onda sinusoidal similar a la de la red, aunque no idéntica.

5.2.3.2.2. Inversores síncronos: Usan conmutadores RCS (Rectificador Controlado de Silicio) con controles analógicos para señalar cuando deben enviar pequeñas señales eléctricas a la red, debidas a que necesitan la presencia de la red eléctrica para su funcionamiento.

5.2.3.2.3. Inversores autoconmutados: Éstos pueden producir electricidad compatible con la red usando su propio circuito interno, con controles IGBT (compuerta integrada con transistores bipolares) y digitales, mejorando notablemente la fiabilidad y la calidad de la potencia con respecto a los modelos sincronizados mediante la propia red. Estos inversores usan exactamente la misma tecnología que los inversores de orden sinusoidal vistos anteriormente.

En los nuevos sistemas, cuando la demanda eléctrica excede al suministro y las baterías están cerca de la descarga total, el inversor automáticamente toma potencia de la red hasta que éstas resultan recargadas, pero, cuando hay un exceso de generación con respecto a la demanda y las baterías están totalmente cargadas, el inversor puede también suministrar el exceso de potencia a la red. Incluso, si el sistema de potencia de la red falla, por ejemplo durante una tormenta, el inversor y las baterías dan un suministro de potencia ininterrumpido. El inversor automáticamente cambia a un sistema aislado con baterías convencional.

5.2.3.3. Rectificadores y Cargadores de Baterías: Los rectificadores son opuestos a los inversores, convierten la energía de corriente alterna en corriente continua. Además, si el generador no dispone de una salida de la carga de la batería, un cargador de batería es obligatorio. Algunos inversores pueden actuar como cargadores de baterías³⁹.

5.3. MARCO HISTÓRICO

5.3.1. Reseña histórica

“Energía eólica es la energía obtenida del viento, es decir, la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire, y que es transformada en otras formas útiles de energía para las actividades humanas, como ejemplo de estos artefactos, están los molinos de viento”⁴⁰.

“Según la real academia española -RAE- en su diccionario, el término *eólico* viene del latín *aeolicus*, perteneciente o relativo a Eolo, dios de los vientos en la

39 http://www.ciemat.es/CIEMATportal/recursos/doc/Areas_Actividad/Prospectiva_Tecnologica/34301686_211200911951.pdf

40 http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_e%C3%B3lica

mitología griega con lo que este adjetivo se usa para todo aquello referido al viento y sus efectos asociados”⁴¹.

“El viento, ha sido una de las fuentes de energía más utilizada por el hombre a través de su historia, aprovechándolo desde la navegación a vela, pasando por diferentes aplicaciones con los llamados molinos de viento, en labores como molienda de grano, bombeo de agua y sistemas de fuerza motriz, hasta llegar en la actualidad a la generación de energía eléctrica desde sistemas individuales de algunos vatios de potencia, hasta sistemas de varios Megavatios conectados a las redes nacionales de energía”⁴².

“La primera máquina eólica conocida por la historia aparece en el año 1700 a.C. en Babilonia, usándose para bombear agua, aunque parece que en la antigua Persia se utilizaban ya molinos de eje vertical para moler grano.

Hasta el siglo X no es posible encontrar documentos que mencionen los molinos de viento como práctica generalizada, pero a partir del siglo XI, aparecen en la zona mediterránea molinos con rotores a vela, que derivan en los típicos molinos manchegos y mallorquines, probablemente por influencias llegadas de Europa, cuya característica era el rotor de cuatro aspas de entramado de madera recubierto de tela.

Aunque la evolución en la historia de los molinos de viento transcurre de forma continua, a finales de la Edad Media las innovaciones y las aplicaciones de las máquinas eólicas se producen con rapidez. Entre la segunda mitad del siglo XVIII y la segunda mitad del XIX, los molinos de viento europeos alcanzan su más alto nivel de perfeccionamiento, dentro de las limitaciones de la tecnología

⁴¹ http://www.granma.cubaweb.cu/secciones/espanol_cuba/2008-03.html

⁴² <http://www.enertres.com/es/minieolica/0/concepto.html>

artesanal. Los sistemas de orientación y regulación se ven completados por mecanismos internos, convirtiendo los molinos de viento en factorías mecanizadas con un alto grado de automatización.

En la segunda mitad del siglo XIX aparece una nueva generación de máquinas eólicas, con una concepción de diseño diferente: el "multipala americano" abrió el camino hacia mejoras en el rendimiento de estas máquinas, que no se produjo realmente hasta principios del siglo XX, cuando se aplicaron al diseño de los rotores las teorías aerodinámicas para usos aeronáuticos.

A lo largo del siglo XX, las aplicaciones basadas en el aprovechamiento del viento fueron declinando, a medida que se hacía más popular el uso del petróleo. Sin embargo, la crisis energética ha iniciado de nuevo un período en el campo del aprovechamiento eólico, habiéndose elaborado innumerables programas de estudio que han centrado su interés en dos grandes aspectos:

- Elaboración de mapas eólicos y localización de emplazamientos
- Cálculo, diseño y construcción de plantas eólicas de gran potencia

Paralelamente se ha pretendido crear incentivos que motiven a la iniciativa privada a fabricar y comercializar pequeñas máquinas de funcionamiento autónomo, que permitan cubrir las necesidades de explotaciones agrícolas o industriales situadas en zonas apartadas⁴³.

5.3.1.1. “Molinos de viento en la edad media y el renacimiento: En el siglo XI D.C, los molinos de viento fueron de extensivo uso en el este medio, y fueron introducidos en Europa en el siglo XIII por los miembros de las

43 <http://www.grupoblas Cabrera.org/ter/eolic/eolic03.htm>

cruzadas romanas. Durante la edad media, muchos de los jefes feudales se reservaban el derecho de permitir o no la construcción de molinos de viento obligando así, a los campesinos a pagar por moler el grano en los molinos privados. Además de esto, se prohíba la plantación de árboles cerca de los molinos ya que esto obstaculizaba el flujo de aire hacia las aspas de los molinos.

Para el siglo XIV, los holandeses tenían una tremenda ventaja tecnológica en cuanto a la construcción eficaz de sistemas eólicos para bombeo y molienda, este desarrollo tecnológico lo emplearon para drenar diques y con esto pudieron ganarle territorio al mar muy útil para la siembra, se puede destacar la eficacia de estos sistemas debido a que fueron capaces de bombear y secar una región pantanosa del delta del río Rin que estaba sumergida poco más de 3 metros por debajo del agua.

Luego, los holandeses construyeron el primer molino para la obtención de aceite y el 1586 implementaron el sistema para agilizar el proceso de la elaboración del papel; más adelante, a finales de siglo XVI, se usó la tecnología eólica para el aserrado de madera. Ya para esta época, se usaban más de nueve mil molinos en los países bajos para diversos propósitos.

Con la implementación de los sistemas impulsados por la energía de vapor, la energía eólica sufrió un declive en su auge y a raíz de esto, para mediados del siglo XIX solo estaban en condiciones operables alrededor de mil molinos⁴⁴.

5.3.1.2. Situación actual en el mundo: Según la empresa SENER Ingeniería y Sistemas S.A de España, en *1st International Congress on Instrumentation and Applied Sciences*, la energía eólica representa una fuente

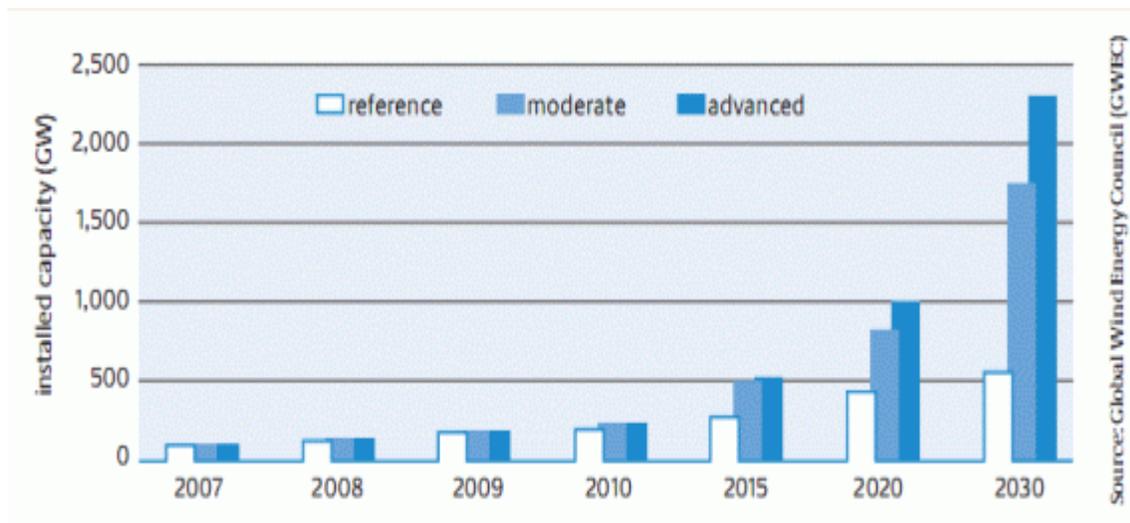
⁴⁴ <http://www.pfernandezdiez.es/EnergiasAlternativas/eolica/PDFs/08Molinos.pdf>

de energía con grandes expectativas de desarrollo para la generación de electricidad, dadas sus ventajas respecto a otras fuentes en términos de abundancia, limpieza en su utilización, ausencia de combustible, entre otras.

“A finales de 2011, la capacidad mundial de los generadores eólicos fue de 238 Gigavatios. En 2011 la eólica generó alrededor del 3% del consumo de electricidad mundial”⁴⁵.

“Tras el descenso en el mercado eólico internacional, se espera un ligero auge en los próximos años. En el año 2020, ya podrá cubrirse un 12 % del suministro eléctrico con energía eólica. El Consejo Mundial de Energía Eólica (GWEC), parte de la suposición de que la energía eólica podrá cubrir en 2050 más del 34 % de la demanda de electricidad mundial”⁴⁶. (Ver Gráfica 6).

Gráfica 6 Perspectiva de potencial eólico a futuro



Fuente: <http://www.renewables-made-in-germany.com/es/renewables-made-in-germany-pagina-de-inicio/energia-eolica/energia-eolica/perspectivas.html>

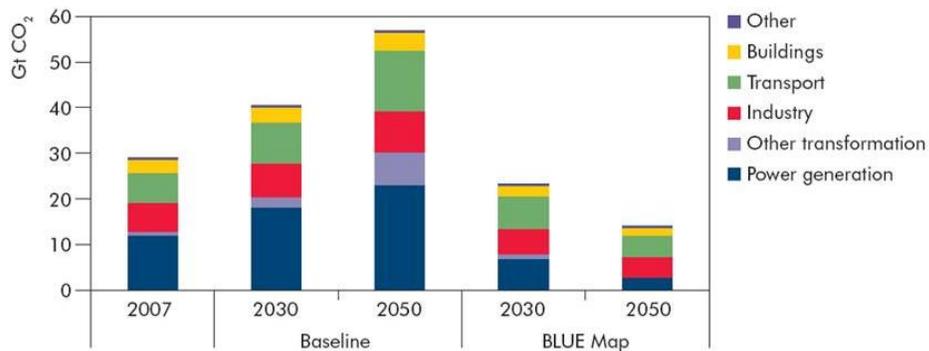
⁴⁵ http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_e%C3%B3lica

⁴⁶ <http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/4a47d684c60ae.pdf>

Según el Energy Technology Perspectives 2010 (ETP 2010), las emisiones de CO₂ seguirán creciendo, llegando a 57 Gt en 2050, es decir, casi el doble que en 2007.

“El logro de las reducciones de las emisiones de CO₂ requerirá del desarrollo y el despliegue de una amplia gama de tecnologías bajas en carbono y eficiencia energética en todos los sectores de la economía. Según el escenario Blue Map, las emisiones de CO₂ en el 2050 se podrían reducir hasta alcanzar las 14 Gt, alrededor de la mitad emitido en 2005”⁴⁷. (Ver Gráfica 7).

Gráfica 7 Emisiones globales de CO₂ en el escenario de referencia (baseline) y en el escenario BLUE Map



Fuente:

<http://www.gasnaturalfenosa.es/es/inicio/grandes+clientes/eficiencia+y+sostenibilidad/aprende+y+ponete+al+dia/pildoras+de+conocimiento/en+la+gestion+de+los+recursos/por+que+es+importante+la+transicion+a+una+empresa+baja+en+carbono/1285341491730/datos+claves.html>

47

http://www.cedesu.org/attachments/article/221/Resumen%20ejecutivo%20trabajando%20resumido_LL_3_FINAL14%2015%20hs%20%20jce%20_3_.pdf

5.3.1.3. “Energía eólica en Colombia: El sector eléctrico en Colombia está mayormente dominado por generación de energía hidráulica (64% de la producción) y generación térmica (33%). No obstante, el gran potencial del país en nuevas tecnologías de energía renovable (principalmente eólica, solar y biomasa) apenas si ha sido explorado”⁴⁸.

A pesar de que Colombia tiene una capacidad instalada de energía renovable de 28.1 MW (excluyendo grandes plantas hidroeléctricas) que consiste principalmente en energía eólica; La ley de 2001 diseñada para promover energías alternas carece de disposiciones claves para lograr este objetivo, tales como la “*feed in tariffs*” implementada en los estados unidos que no es más que un instrumento normativo que impulsa el desarrollo de las energías renovables no contaminantes llamadas de aquí en adelante *ERNC*, mediante el establecimiento de una tarifa especial, premio o sobre precio, por unidad de energía eléctrica inyectada a la red por unidad de generación *ERNC*.

El país tiene importantes recursos de pequeña hidráulica, eólica, y solar que permanecen en gran parte sin explotar. De acuerdo con un estudio del Programa de Asistencia en Gestión del Sector Energético del Banco Mundial (ESMAP), “la explotación del gran potencial eólico del país podría cubrir más de la totalidad de sus necesidades actuales de energía”.

Colombia cuenta con una ambiciosa agenda de reforma del sector energético. El país pretende fomentar la inversión extranjera, con énfasis en hidrocarburos y expansión de la capacidad energética.

⁴⁸ http://es.wikipedia.org/wiki/Sector_el%C3%A9ctrico_en_Colombia

Teniendo en cuenta las proyecciones del IDEAM para los próximos meses, en los que pronostica el debilitamiento del fenómeno de La Niña se obtiene un escenario medio en donde se espera para los años 2011 y 2012 crecimientos de la demanda de energía eléctrica de 2.3% y 3.2%, respectivamente. Entre los años 2010 y 2020 una tasa media de crecimiento de 3.5%, y de 3.1% en el periodo 2021 a 2030.

El incremento en la demanda se refiere específicamente a la utilización de la electricidad, del carbón, el gas natural, el petróleo y sus derivados (diésel, gasolina, entre otros), y la leña o el bagazo.

Para realizar las proyecciones, la UPME tiene en cuenta las estimaciones de crecimiento económico del país, los hábitos de consumo y el aumento de la población, entre otros.

El agotamiento de las fuentes tradicionales de energía (combustibles fósiles) ha puesto a la mayoría de países del mundo a encontrar soluciones en energías alternativas. Colombia tiene un gran potencial en la generación de este tipo de energías por su posición geográfica y ya está trabajando en ello.

La Agencia Internacional de Energía (AIE) dice que la base de la vida moderna del mundo depende en un 80% del petróleo y que a medida que los países se industrializan y sus poblaciones aumentan, también crece el consumo de energía.

En Colombia la producción de energía primaria proviene de la hidroelectricidad, por la abundancia de agua en la mayoría de zonas del país, y en un segundo lugar de los combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón).

Por eso el Gobierno Nacional en los últimos años ha invertido en el desarrollo y aplicación de tecnologías alternativas de producción de energía, que funcionen

con recursos renovables, para solucionar el problema de la crisis energética mundial y contribuir a un medio ambiente más limpio.

Según La Unidad de Planeación Nacional Minero Energética (UPME), las energías renovables cubren actualmente cerca del 20% del consumo mundial de electricidad.

5.4. MARCO ESPACIAL

El presente estudio ha de desarrollarse en la ciudad de Cartagena de Indias.

5.5. MARCO TEMPORAL

El tiempo estimado para la realización de la investigación, comprende el periodo de doce (12) semanas a partir de la fecha de inicio; entendiéndose en éste el desarrollo y presentación de propuesta, anteproyecto y proyecto de grado, como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6 Cronograma de actividades

ACTIVIDADES	TIEMPO EN SEMANAS											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Introducción y Conceptos Básicos	■	■	■	■								
Historia de la tecnología eólica	■											
marco de referencia tecnológico		■										
Comparación de perfiles existentes			■									
Definición de parámetros de diseño				■								
Teoría para la Construcción					■	■	■					
Selección del tipo de generador					■							
Investigación y selección de potenciales materiales y elementos para la construcción						■						
Selección de la tecnología de manufactura adecuada							■					
Diseño y construcción								■	■	■		
Generación de un modelo de álabe a partir de los conceptos previos								■				
Construcción de un prototipo usando guía paso a paso									■			
Montaje y emplazamiento final del prototipo										■		
Ensayo del micro-aerogenerador											■	■
Recopilación de datos y Comparación de valores teóricos y reales											■	
Calculo de rendimiento y generación de las conclusiones												■
Tiempo total	12 SEMANAS											

5.6. MARCO LEGAL

En el 2001, se promulgó la Ley 697 que promueve el uso eficiente y racional de energía y las energías alternas. Esta Ley fue regulada mediante el Decreto 3683, emitido en 2003. La Ley y el Decreto contemplan aspectos importantes tales como el estímulo a la educación e investigación en fuentes de energía renovable (FER).

No obstante, el programa creado por esta Ley carece de aspectos fundamentales para impulsar el desarrollo de dichas fuentes de manera significativa, como por ejemplo un sistema de apoyo regulativo para fomentar la inversión, la definición de políticas para promover energía renovable, o el establecimiento de metas cuantitativas sobre el porcentaje de energía renovable.

Limitaciones como las descritas anteriormente representan un significativo vacío legal para energía renovable en Colombia. Si bien ha habido algunas iniciativas en materia del uso eficiente y racional de energía, no existen iniciativas recientes relativas a nuevas tecnologías de energía renovable.

En Colombia, el rector de este tipo de tecnologías es el Ministerio de Minas y Energías avalado por la Constitución Nacional; y el encargado de hacer las normas técnicas es el Instituto Colombiano de Normas Técnicas ICONTEC asesorado por el Instituto de Ciencias Nucleares y Energía Alternativas INEA y la Unidad de Planeación Minero Energética UPME. Algunas normas que aplican en Colombia son:

- GTC 113 “Guía para la utilización de energía eólica para bombeo de agua”
- GTC 172 “Energía eólica - guía para generación de energía eléctrica”
- GTC 139 “Sistemas de aerogeneradores protección contra descargas eléctricas atmosféricas”.
- NTC 2050 “Código Eléctrico Colombiano”
- NTC 5343 “Aerogeneradores. Ensayo de curva de potencia”
- NTC 5363 “Aerogeneradores. Requisitos de seguridad”.
- NTC 5412 “Aerogeneradores. Medida y evaluación de las características de la calidad de suministro de las turbinas eólicas conectadas a la red”.

- NTC 5467 “Aerogeneradores. Técnicas de medida de ruido acústico”
- NTC ISO 500001 Sistemas de Gestión de la Energía.

En estos momentos, existen proyectos de normas que están actualmente en estudio dentro del programa de normalización del Comité 185 Energía Eólica, ellos son:

- Aerogeneradores. Seguridad de aerogeneradores pequeños. DR (Documento de Referencia): IEC 61400-2: 2006.
- Aerogeneradores. Diseño y especificación de cajas multiplicadoras. DR: ISO 81400-4: 2005.
- Aerogeneradores. Medidas de cargas mecánicas. DR: IEC 61400-13: 2001.
- Aerogeneradores. Ensayo estructural de palas de rotores. DR: IEC 61400-23: 2001.

6. HIPÓTESIS DE TRABAJO

Se considera que utilizando micro-aerogeneradores se puede desarrollar un sistema de generación eléctrica de bajo costo que pueda ser construido por una persona sin muchos conocimientos o destrezas de manufactura, usando materiales comúnmente hallados en un hogar o de fácil adquisición, que aproveche eficientemente el recurso eólico de Cartagena de indias y que permita satisfacer necesidades básicas como ventilación o iluminación, disminuyendo notoriamente el gasto monetario en energía y mejorando así la calidad de vida de la comunidad.

"Es posible, aprovechar la energía eólica, en Cartagena, como un medio alternativo de abastecimiento interno de energía eléctrica a pequeña escala."

7. METODOLOGÍA

La presente tesis tiene un enfoque cualitativo que se inicia con una fase exploratoria de recopilación de información y datos para tener un panorama amplio del tema. Luego tiene un alcance descriptivo en el que el procesamiento de la información recopilada establece el estado de la situación actual concluyendo con la propuesta para el desarrollo de micro-aerogeneradores de bajo costo.

Con la finalidad de alcanzar los objetivos planteados en la presente investigación, se describen las herramientas que se consideran relevantes para el análisis, diagnóstico, el proceso integral de diseño, construcción y ensayo, para el desarrollo de micro-aerogeneradores.

7.1. PROCESO GENERAL DEL DISEÑO

Las actividades que se llevan a cabo para diseñar y dimensionar un micro-aerogenerador son las siguientes:

- a. Definir la necesidad energética a satisfacer. Los factores a tener en cuenta para ella son:
 - Interconexión a la red de transmisión o instalación aislada.
 - Magnitud de la instalación (micro, pequeña, mediana o grande):
 - Potencia máxima a instalar
 - Energía anual media a entregar
 - Realizar un estudio anemométrico
- b. Elegir un generador eléctrico acorde y realizar los ensayos correspondientes.
- c. Diseñar los procesos y seleccionar materiales de construcción para la hélice.
- d. Calcular los esfuerzos mecánicos que debe soportar la estructura y dimensionarla en consecuencia.

7.2. LINEAMIENTOS GENERALES DEL PROYECTO

Para este proyecto, se considera que la potencia nominal del aerogenerador debe ser igual o superior a 100W, sabiendo que aquellos micro-aerogeneradores que los superan presentan similares problemas técnicos, imposibilitando su creación con los tiempos y recursos disponibles para este proyecto.

De acuerdo a los objetivos planteados, el generador eléctrico debe poseer las siguientes características:

- Capacidad de generar energía a bajas revoluciones (200 a 250 rpm)
- Potencia acorde a las dimensiones del proyecto (micro aerogenerador).
- Pequeñas dimensiones.
- Bajo peso.
- Bajo costo.
- Robustez adecuada.

7.2.1. Localización

Es necesario elegir un lugar alto (unos 15 m sobre cota de suelo), abierto a los vientos, seguro y que facilite la construcción y mantenimiento del micro-aerogenerador.

7.2.2. Estructura de soporte

Para evitar las dificultades y problemas al acceder al micro-aerogenerador desde la base de la torre, se debe diseñar un sistema que permita simplificar las tareas de instalación, ensayos y reparaciones para alcanzar el micro-aerogenerador sin necesidad de trabajar en altura.

7.3. DISEÑO MECÁNICO

7.3.1. Hélice

Para la elaboración de la hélice se definieron las siguientes cuantificaciones:

- 7.3.1.1. **Velocidad de viento nominal:** A partir del estudio anemométrico se encontró la velocidad media de 5.0 m/s, valor adecuado para pequeños aerogeneradores en aplicaciones aisladas (no conectadas a la red de distribución).
- 7.3.1.2. **Velocidad de rotación nominal:** Se determinó un valor de 207 rpm, en la sección 8.4.1 del presente documento.
- 7.3.1.3. **Número de palas:** Se decidió construir un aerogenerador de tres álabes. Cualquier cantidad diferente mayor tendría un costo de construcción demasiado elevado comparado con la poca ganancia en eficiencia. Aerogeneradores de una o dos, fueron descartados porque, si bien se ahorra considerablemente en costo, estos presentan mayores problemas de alineación, balanceo y vibraciones.

7.3.2. Aspas

En primer lugar, es necesario elegir el perfil de aspa a utilizar. En este proyecto, se optó por un perfil NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) 4412, porque tiene muy buen comportamiento estructural y aerodinámico, debido a su forma cóncavo-convexa. “Ha sido utilizado con éxito en otros aerogeneradores, entre ellos el PMG realizada por el ITDG Perú, y el proyecto de Sry Lanka por Hugo Piggot”⁴⁹.

49 D. Elliott, Wind Energy Resource Atlas of Oaxaca, National. Renewable Energy Laboratory NREL. USA 2003

7.3.3. Partes mecánicas

Para la construcción del prototipo, se utilizaron elementos en desuso en muy buen estado adquiridos en chatarrerías, entre estos, se hizo uso de un alternador, un marco, biela y piñones de bicicleta, bloque de poliestireno expandido, alambre de ferroníquel, clavos, perfiles y tubos de acero chatarrizados

8. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MICRO-AEROGENERADOR

Para el diseño del micro-aerogenerador se utilizo un perfil estandarizado NACA 4412 para la sección de los álabes, debido a las cualidades que este brinda, estos alabes serán fabricados siguiendo el lineamiento principal del proyecto usando pocos recursos y métodos de construcción simples.

8.1. DETERMINACIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA

Para calcular en forma eficiente el consumo eléctrico de un hogar humilde en Cartagena, se efectuó la sumatoria de los consumos individuales de los artefactos a los que podría estar sometido el prototipo y luego se dividió por el voltaje.

Cabe destacar que por el poco presupuesto y escasos de recursos, este proyecto no pretenderá suplir toda la demanda energética sino una parte de ella como por ejemplo iluminación usando sistemas LED de bajo consumo o ventilación de espacios con extractores.

Como muestras de los consumos aproximados de energía por cada electrodoméstico en cada hogar, se utilizaron los datos que aparecen en la Figura 4.

Figura 4 Consumo aproximado de energía de algunos electrodomésticos



Fuente:

<http://www.electricaribe.com/MiHogar/Seguritoenloscuidadesdelaenerg%C3%ADa/tabid/3221/language/es-ES/Default.aspx>

De acuerdo a lo dicho anteriormente, la Tabla 7, indica que el consumo basico mensual aproximado de energía de un hogar es de 305,9 kW, siendo 173kW/h- mes el consumo de subsistencia para un estrato 3 y el costo unitario/kW/h es de \$347,29 Pesos M/L.

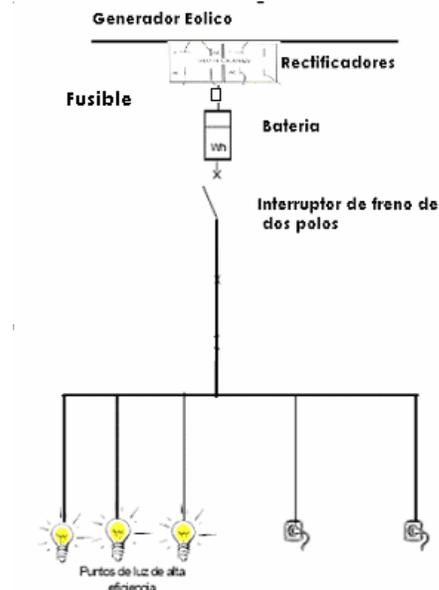
Tabla 7 Consumo mensual aproximado de energía de un hogar

ARTEFACTOS ELÉCTRICOS QUE SE UTILIZAN NORMALMENTE	CANTIDAD DE ARTEFACTOS	HORAS DE CONSUMO DIARIO POR MES	CONSUMO MENSUAL (kW/h)
Bombilla 100 W	5	5	75
Televisor convencional	1	5	15
Equipo de sonido	1	1	3
Computador	1	4	68
Ventilador	2	12	40
Lavadora	1	0,7	9
Plancha	1	0,2	0,7
Licuadaora	1	0,1	1,2
Nevera	1	24	94
			305,9

Fuente: Elaboración propia

Partiendo de todas estas consideraciones se propone un diseño previo de lo que pudiera ser la instalación doméstica interior de las viviendas, un pequeño esquema unifilar indicando los elementos principales del sistema (ver Figura 5).

Figura 5 Esquema Unifilar de la Instalación.



Fuente: http://www.geocities.ws/isf_mx/Documentos/proyecto_eolica.pdf

8.2. ESTUDIO POTENCIAL EÓLICO

“La velocidad del viento en superficie se refiere a la velocidad que alcanza esta variable meteorológica a 10 metros de altura, que es la norma internacional establecida por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) como estándar para la medición y seguimiento del viento”⁵⁰.

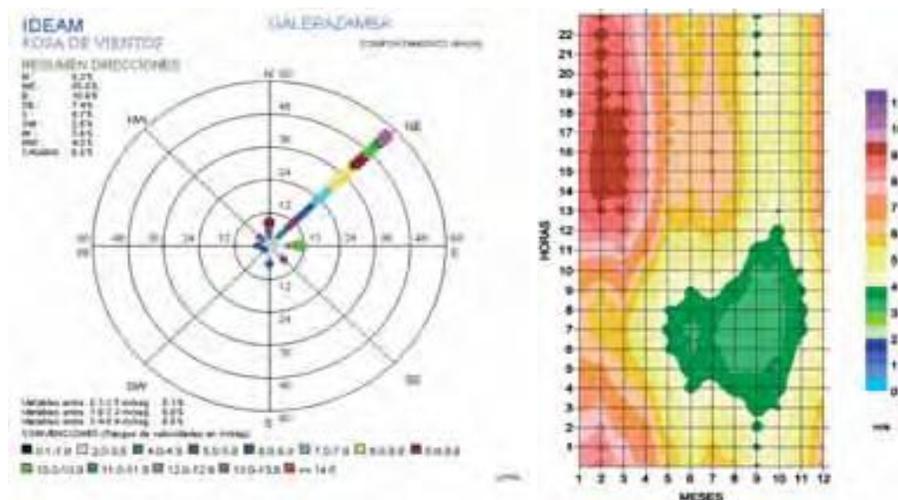
Según el Atlas de viento y energía de Colombia, en Bolívar para el período comprendido entre diciembre y abril se observan vientos que pueden superar los 5 m/s; para esta misma época en el litoral central las velocidades del viento pueden llegar alrededor de 11m/s. En el ciclo temporal comprendido entre mayo y septiembre, los vientos están cercanos a los 6 m/s y, en octubre y noviembre los

⁵⁰ <http://www.upme.gov.co/Docs/MapaViento/CAPITULO1.pdf>

vientos se mantienen con intensidades que alcanzan los 6 m/s en el litoral central de Bolívar.

Una muestra fue tomada en Galerazamba, como indica la Tabla 8 y La Gráfica 8.

Gráfica 8 Velocidad del viento en Galerazamba – Departamento de Bolívar



Fuente: Atlas de viento y energía de Colombia, pág. 64

Tabla 8 Velocidad del viento

ID	LONGITUD	LATITUD	ESTACIÓN	DEPARTAMENTO	VELOCIDAD PROMEDIO DEL VIENTO
1	75°16'W	10°47'N	GALERAZAMBA	BOLÍVAR	5.9

Fuente: Atlas de viento y energía de Colombia, pág. 62

“Esto indica que las intensidades que superan los 5 m/s se observan hacia la tarde en todo el año, especialmente los tres primeros meses cuando pueden alcanzar intensidades promedio superiores a 8 m/s entre las 2 y 6 de la tarde. La dirección predominante de donde sopla el viento es del noreste.

El patrón de densidad de energía eólica está influenciado por el resultado del viento en superficie, el cual está modulado por los principales sistemas atmosféricos que regulan las condiciones del tiempo en el país; es decir, en lugares donde la intensidad del viento es débil, se ubican valores menores de densidad de energía, mientras que donde los valores promedio del viento son mayores, la densidad de energía crece de forma potencialmente al cubo de dicha velocidad. Por ello, la escala diseñada va desde 1 a 3375 respondiendo a este principio físico de la densidad de energía eólica, en unidades de W/m² de superficie horizontal sobre territorio colombiano.

Los vientos con intensidades iguales o superiores a 5 m/s proporcionan una alternativa para uso de energía, que en términos teóricos de densidad de energía eólica es proporcional a $\frac{1}{2}$ de la densidad del aire, que como valor medio es 1 kg/m³, por la velocidad del viento al cubo ($\sim \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 5^3$); es decir, que valores promedios mensuales de densidad de energía por encima de 62.5 W/m² podrían ser importantes para pequeños proyectos que requieran el recurso viento cerca de superficie, como en este proyecto⁵¹.

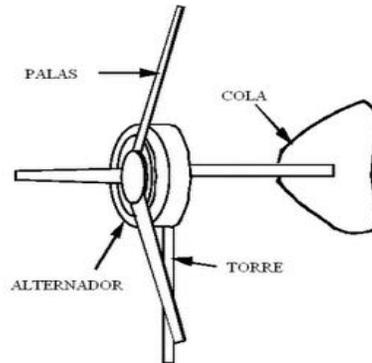
8.3. DESCRIPCIÓN DEL AEROGENERADOR

El tipo de aerogenerador de este proyecto ha sido diseñado para hogares familiares en zonas de vientos moderados. Se ha pensado su construcción

51 ATLAS DE VIENTO Y ENERGÍA EÓLICA DE COLOMBIA. República de Colombia. Ministerio de Minas y Energía. Unidad de planeación minero energética UPME. Insitute de hidrología, meteorología y estudios ambientales IDEAM.

rudimentaria y artesanal y ha sido diseñado para ser lo más económico posible. La apariencia de éste se muestra en la Figura 6, la cual es una configuración muy común a la mayoría de los pequeños aerogeneradores existentes.

Figura 6 Partes de un aerogenerador de baja potencia



Fuente: http://esfgalicia.blogspot.com/2007_12_01_archive.html

“El aparato eólico se compone de: generador (alternador), el rotor eólico (los alabes), la montura del aerogenerador y la cola veleta (formando ambos el mecanismo de cola de veleta) y la estructura que soportará el esfuerzo del peso de todo el conjunto y el momento flector derivado del empuje del viento sobre las palas.

Un alternador es una máquina eléctrica, capaz de transformar energía mecánica en energía eléctrica, generando una corriente alterna mediante inducción electromagnética”⁵².

“Los alternadores están fundados en el principio de que en un conductor sometido a un campo magnético variable se crea una tensión eléctrica inducida cuya polaridad depende del sentido del campo y su valor del flujo que lo atraviesa”⁵³.

⁵² <http://ingeniatic.euitt.upm.es/index.php/tecnologias/item/373-alternador>

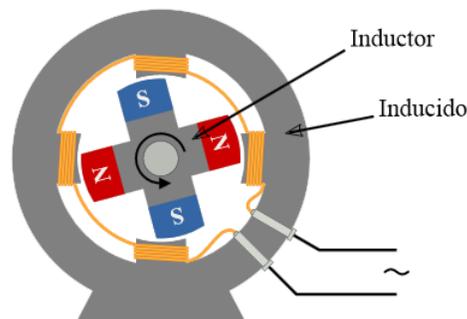
“Un alternador consta de dos partes fundamentales, el inductor que crea el campo magnético y el inducido que es el conductor atravesado por las líneas de fuerza de dicho campo magnético”⁵⁴.

“Funciona cambiando constantemente la polaridad para que haya movimiento y genere energía y que tendrá el propósito de extraer potencia del giro lento de las palas con la mejor eficiencia y la mínima complejidad.

El campo magnético induce tensión en las bobinas, tensión que ha de permitir alimentar una batería. A velocidades de giro bajas la tensión es insuficiente para cargar la batería, pero cuando se alcanza un cierto umbral en la velocidad del viento, se establece una corriente eléctrica que permitirá la carga de la batería”⁵⁵.

La Figura 7 muestra más detalladamente la disposición y funcionalidad de cada elemento componente del generador.

Figura 7 Partes del un Alternador



Fuente:

<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/03/Alternador.svg?uselang=es>

53 <http://es.wikipedia.org/wiki/Alternador>

54 <http://ingeniatic.eiitt.upm.es/index.php/tecnologias/item/373-alternador>

55 Hugh Piggott-Scoraig Wind Electric-February 2001. PMG construction Manual.

8.3.1. “Inductor: El rotor, que en estas máquinas coincide con el inductor, es el elemento giratorio del alternador, que recibe la fuerza mecánica de rotación.

8.3.2. Inducido: El inducido o estator, es donde se encuentran una serie de pares de polos distribuidos de modo alterno y, en este caso, formados por un bobinado en torno a un núcleo de material ferromagnético de característica blanda, normalmente hierro dulce.

La rotación del inductor hace que su campo magnético, formado por imanes fijos, se haga variable en el tiempo, y el paso de este campo variable por los polos del inducido genera en él una corriente alterna que se recoge en los terminales de la máquina”⁵⁶.

8.3.3. Álabes: Se seleccionan álabes de paso linear variable debido a su mayor simplicidad y su menor costo. El material utilizado para las palas debe responder a frecuentes variaciones en la velocidad del viento y a ráfagas de vientos fuertes. Por ello el material de las palas debe ser:

- Ligero
- Perfectamente homogéneo
- Indeformable
- Resistente a la fatiga mecánica
- Resistente a la erosión y a la corrosión
- De baja inversión para que el aerogenerador sea competitivo en cuanto a precio.

⁵⁶ <http://es.wikipedia.org/wiki/Alternador>

Para estas solicitaciones hay varias alternativas:

- Madera: Práctica, ligera, fácil de trabajar y resiste muy bien la fatiga.
- Metales: El acero es muy económico y fácil de trabajar pero representa un aumento de peso muy significativo, aleaciones ligeras de aluminio son muy económicas si se produce en grandes volúmenes pero una de sus desventajas es que se fatigan, lo cual limita su aplicación en este proyecto.
- Materiales sintéticos, resinas, fibras y plásticos: se destacan por su relación peso-resistencia, insensibilidad a la corrosión y su buena resistencia a la fatiga pero pueden representar costos un poco más elevados comparados con las otras alternativas.

Para este proyecto se selecciona el poliestireno expandido para el alma de los álabes debido a su facilidad para trabajar, su costo y la facilidad para adquirirlo; en cuanto al recubrimiento de este se selecciona la fibra de vidrio debido a su gran relación entre peso y resistencia mecánica, su amplia gama de presentaciones en el mercado, la facilidad de compra y el gran número de personas que hacen de la aplicación de esta un arte, además de esto se necesita una interfase de resina acrílica que permita recubrir el alma de poliestireno debido a la afinidad molecular entre la resina epoxi (fibra de vidrio) y el poliestireno.

Se selecciona un perfil NACA 4412 por su buen coeficiente de sustentación, su facilidad para la fabricación y porque tiene una sección relativamente gruesa que permite soportar los esfuerzos en la raíz del álabe, aunque esta rigidez tiene que ver también y está intrínsecamente relacionada con los materiales que se utilizan.

8.4. DISEÑO DE LA TURBINA EÓLICA

8.4.1. Cálculo del diámetro del rotor

Para este cálculo se utilizó la Ecuación de potencia de las turbinas eólicas.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 C_p \cdot \eta$$

Donde: $A = \left(\pi \frac{d^2}{4}\right)$

Despejamos a $d = \sqrt{\left(\frac{8P}{\pi \cdot \rho \cdot V^3 \cdot C_p \cdot \eta}\right)}$ Ecuación 1

Donde:

d : Diámetro del rotor de la turbina eólica (m)

P : Potencia de diseño del aerogenerador (W)

ρ : Densidad del aire, variable con la a.s.n.m (1.23 kg/m³ a nivel del mar)

V : Velocidad del viento (m/s)

A : Area barrida por la turbina (m²)

C_p : Coeficiente de potencia (adimensional)

η : Eficiencia del generador

$$\lambda = \frac{U}{V_D} = \frac{\pi \cdot N \cdot d}{60 \cdot V_D}$$

Es posible obtener el valor del TSR de diseño, para este caso se asume de 4 siguiendo la tabla desarrollada en estudios previos del comportamiento ideal de maquinas eólicas de eje horizontal (ver Tabla 9).

Tabla 9 TSR de diseño para maquinas eólicas de eje horizontal

Tipo de máquina	TSR de diseño	Tipo de pala	C_y/C_x
Bombeo de agua	1	Placa plana	10
	1	Placa curvada	20-40
	1	Ala de tela	10-25
Generadores eólicos pequeños	3-4	Perfil simple	10-50
	4-6	<u>Perfil alabeado</u>	20-100
	3-5	Ala de tela	20-30
Generadores eólicos grandes	5-15	Perfil alabeado	20-100

Fuente: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd27/microgeneradores.pdf>

Siendo:
$$N = \left(\frac{60 \cdot \lambda \cdot V_D}{\pi \cdot d} \right) \text{ Ecuación 2}$$

Donde:

N : Velocidad de giro de la turbina eólica (r.p.m.)

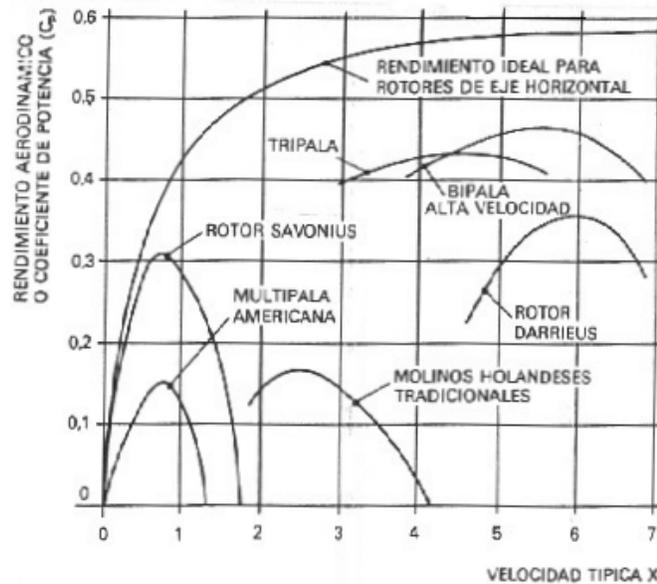
U : Velocidad tangencial al extremo de la pala (m/s)

V_D : Velocidad de diseño (m/s)

λ : Celeridad o TSR

Utilizando la Ecuación 1, con un $C_p=0.43$ (ver Gráfica 9), velocidad de viento igual a la velocidad de diseño de 4.2 m/s, densidad del aire de 1.23 kg/m³, potencia de diseño 100 W a la salida del eje y una eficiencia del 75% para el conjunto (valor aceptable en pequeños generadores), se obtiene un diámetro de 2.92 m.

Gráfica 9 Rendimientos Aerodinámicos de aerogeneradores (Coeficiente de Potencia vs celeridad)



Fuente:

<http://intranet2.minem.gob.pe/web/archivos/dge/publicaciones/uso/1/01/02/02/05.htm>

De la Ecuación 2, seleccionando el valor 4 de la Tabla 9 para la celeridad λ de diseño, (valor más conservador para zonas de regímenes de viento moderados, como es el caso las de zonas de posible aplicación de esta turbina) se obtiene la velocidad de giro de 110 rpm.

Por tanto se tiene una turbina de tres álabes, de 2.92 m de diámetro y una velocidad de giro de 110 rpm.

8.4.2. Obtención de la geometría del perfil alar

Como se ha explicado con anterioridad, los perfiles NACA son modelos matemáticos que obedecen a ecuaciones establecidas por la extinta entidad que

llevaba el mismo nombre, dichas ecuaciones son de dominio público, *Los perfiles NACA de 4 dígitos combinan una distribución de espesor con una línea de curvatura. En el principio de los años treinta, La NACA encontró que los perfiles alares exitosos de aquella época tenían distribuciones similares de espesor una vez sus líneas de curvatura eran enderezadas o aplanadas. Los datos disponibles fueron usados para crear una ecuación de distribución de espesor que era, de hecho idéntica a aquellos perfiles*⁵⁷, Esta ecuación es:

$$y = \pm \frac{t (0.29690x^{0.5} - .012600x - 0.35160x^2 + 0.28430x^3 - 0.10150x^4)}{0.20}$$

Donde “t” es el espesor expresado como función de la cuerda.

La línea de curvatura para un perfil alar de cuatro dígitos está dada por:

$y_c = m (2px - x^2)$ Después de la máxima ordenada, y

$$y_c = \frac{m [(1-2p)+2px-x^2]}{(1-p)^2} \text{ Antes de la máxima ordenada}$$

Donde “m” es la máxima ordenada de la línea media expresada como fracción de la cuerda y “p” es la ubicación de la dirección de la cuerda de la máxima ordenada.

Con la anterior información, se tiene un punto de partida para la obtención de la geometría del perfil alar deseado; sabiendo que un sinnúmero de análisis matemáticos ya han sido desarrollados y que el presente trabajo solo está centrado a escoger el perfil más adecuado y desarrollar su fácil construcción, se usarán herramientas

⁵⁷ Tomado de: <http://aerofoilengineering.com/Help/HelpNaca4.htm>

computacionales para la generación del modelo en 2D de la sección transversal del perfil alar.

Para ello se hará uso de software dedicado al estudio de los perfiles aerodinámicos, entre ellos se pueden conseguir diversas clases enfocados a distintos tipos de análisis de datos o de mayor complejidad, entre los más completos y de *carácter gratuito* se tienen *DESIGNFOIL® R6 DEMO* desarrollado por DreeseCode software LLC⁵⁸. y *Aerofoil® V3.0*⁵⁹ desarrollado por Donald L. Reid.

Usando el *DESIGNFOIL® R6 DEMO* se puede llegar a obtener la familia de puntos para desarrollar el perfil del alabe, la tabla que este proporciona puede ser exportada a Microsoft excel^{®60} donde se puede desarrollar la grafica requerida.

El uso de este programa es muy sencillo y solo requiere ingresar la clase de perfil a obtener, si es NACA y de cuantos dígitos, luego de esto se le dictan los cuatro parámetros y a continuación se da el comando de obtener grafico, luego en el comando de CAD_xport se selecciona exportar a Excel con lo que se obtienen los datos de la Tabla 10 mostrada a continuación.

En Excel, se hace el graficado del perfil y se superpone con el obtenido en el programa hasta que la silueta encaje y posterior a esto se guarda la imagen obtenida para poder hacer la impresión de los moldes con los que finalmente se generaran las matrices de laminilla metálica para el corte de los bloques de poliestireno expandido.

⁵⁸ Disponible en: <http://www.designfoil.com/>

⁵⁹ Disponible en: <http://aerofoilengineering.com/download.htm>

⁶⁰ EXCEL es una marca registrada de Microsoft Corporation

Tabla 10 Familia de puntos para grafica de perfil alar.

NACA 4412					
INDEX	X_Coord	Y_Coord	INDEX	X_Coord	Y_Coord
1	1.000000	0.001249	36	0.000000	0.000000
2	0.998024	0.001796	37	0.003542	-0.007286
3	0.992110	0.003425	38	0.010985	-0.013468
4	0.982300	0.006095	39	0.022233	-0.018558
5	0.968663	0.009739	40	0.037160	-0.022580
6	0.951298	0.014270	41	0.055617	-0.025574
7	0.930328	0.019579	42	0.077429	-0.027591
8	0.905908	0.025542	43	0.102406	-0.028701
9	0.878218	0.032026	44	0.130339	-0.028990
10	0.847464	0.038885	45	0.161009	-0.028561
11	0.813880	0.045973	46	0.194187	-0.027535
12	0.777723	0.053139	47	0.229632	-0.026045
13	0.739272	0.060236	48	0.267099	-0.024239
14	0.698827	0.067117	49	0.306329	-0.022269
15	0.656710	0.073643	50	0.347057	-0.020292
16	0.613254	0.079677	51	0.389004	-0.018458
17	0.568812	0.085092	52	0.432397	-0.016762
18	0.523745	0.089771	53	0.476552	-0.014958
19	0.478424	0.093607	54	0.520946	-0.013115
20	0.433225	0.096509	55	0.565232	-0.011311
21	0.388346	0.098381	56	0.609063	-0.009606
22	0.343811	0.098793	57	0.652089	-0.008048
23	0.300545	0.097600	58	0.693966	-0.006665
24	0.258945	0.094852	59	0.734352	-0.005473
25	0.219396	0.090643	60	0.772916	-0.004472
26	0.182261	0.085107	61	0.809339	-0.003654
27	0.147877	0.078410	62	0.843317	-0.003002
28	0.116549	0.070747	63	0.874562	-0.002494
29	0.088545	0.062333	64	0.902808	-0.002108
30	0.064098	0.053392	65	0.927811	-0.001821
31	0.043398	0.044151	66	0.949355	-0.001612
32	0.026594	0.034823	67	0.967249	-0.001464
33	0.013799	0.025602	68	0.981336	-0.001363
34	0.005083	0.016649	69	0.991489	-0.001297
35	0.000483	0.008089	70	0.9976179	-0.00126049

Fuente: Elaboración propia

Todos los cálculos, que pueden definir la geometría del perfil y su sección de barrido longitudinal para desarrollar el sólido, arrojan valores variables no lineales tanto para la cuerda así como para el ángulo de posición respecto a la estación tomada, lo que hace complejo el proceso para fabricación de los álabes; para

simplificar lo anterior se puede usar el concepto explicado en lo que continua del presente trabajo.

Con toda la familia de puntos generada en la Tabla 10 y usando datos del software de análisis de perfiles, se obtiene finalmente el modelo del perfil deseado; cabe destacar que este será el modelo para el perfil en la raíz del alabe y que para generar aquel modelo en la punta del mismo se hará uso del concepto de linearización, el cual es usado comúnmente en el desarrollo de alabes rudimentarios para microaerogeneradores, y que en otras palabras, no es más que usar el porcentaje de reducción por metro de longitud de alabe y aplicarlo como función a la familia de datos para generar un perfil más pequeño y que obedece a la proporción deseada raíz-extremo.

8.4.2.1. Linearización del álabe: Este método transforma tanto a la cuerda (C) como al ángulo (β) en parámetros lineales dependientes de la posición del radio (estación). Las rectas de linearización toman como puntos de paso el radio de la raíz del alabe y el radio en el extremo, es decir, se obtienen las dos parejas de valores tanto para la raíz como para el extremo del alabe y el resto de valores de cada una de las secciones se obtiene por regresión lineal sencilla.

Luego a partir de las rectas obtenidas se procede al cálculo de la cuerda y ángulo definitivos, los ángulos " β " no serán tenidos en cuenta para la fabricación de este alabe debido a que esto implicaría imprimir una ligera torsión al alabe en su recorrido a través de la sección transversal con lo cual se complicaría mucho la construcción del mismo y cuyo efecto sobre la eficiencia será mínimo (1.03% aprox. por metro de longitud), con esto se concluye que la sección transversal será linealmente variable con una relación de $1 : 0.544$ por metro longitudinal. Ver resultados en la Tabla 11.

Tabla 11 Resultado de la linearización del álabe a construir (NACA 4412)

r (mm)	112	211	310	409	508	607	706	805	904	1003	1102	1201	1300
β	14,3	13,2	12,1	11	9,9	8,8	7,7	6,6	5,5	4,4	3,3	2,2	1,1
C (mm)	170,00	160,83	151,67	142,50	133,33	124,17	115,00	105,83	96,67	87,50	78,33	69,17	60,00

Fuente: Elaboración Propia

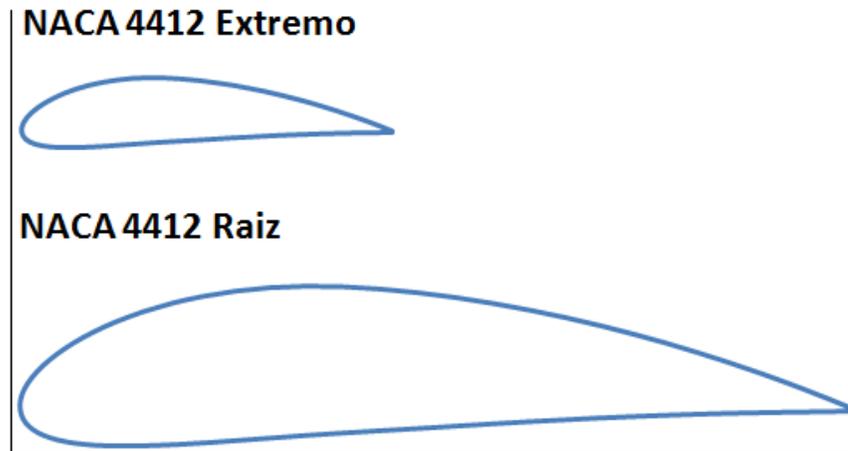
Las dimensiones características de un álabe se pueden definir también por medio de secciones. Cada una de estas constituiría una sección transversal de álabe (Ver Figuras 8, 9 y 10), y se distingue con un numero.

De este modo se podría desarrollar un modelo, únicamente determinando las dimensiones características para un conjunto establecido de (secciones):

- El radio local, el cual es la distancia de la estación al centro del rotor. (Ver Figura 11).
- La anchura de cuerda, que es la anchura de la pala de un extremo al otro en una estación determinada. La línea de cuerda es la línea más larga dentro de la sección de la pala, y es la que une el borde principal o de ataque con el borde posterior o de fuga.
- El ángulo de la pala (beta), que es el ángulo entre la línea de cuerda de una estación determinada y el plano sobre el que gira el rotor.

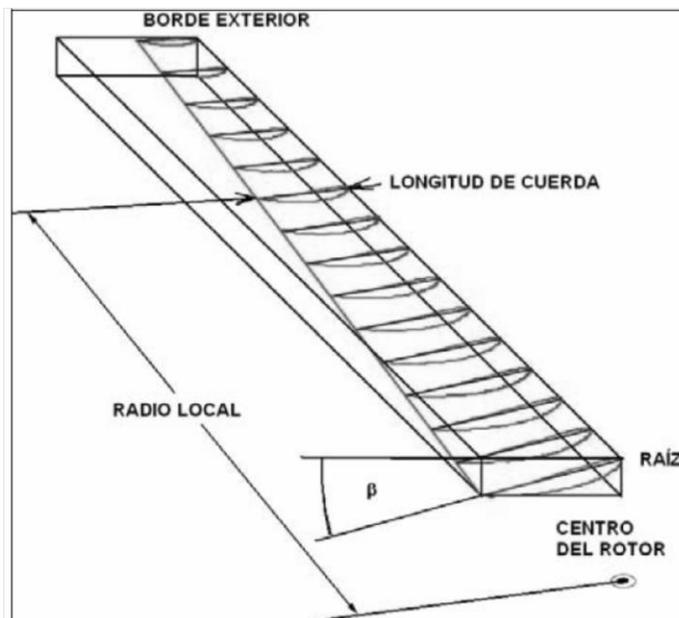
El resultado de ambas gráficas se muestra como ejemplo en la siguiente figura a manera ilustrativa (ver Figura 8), pero el modelo definitivo se encuentra en el Anexo B.

Figura 8 Ejemplo de perfiles obtenidos



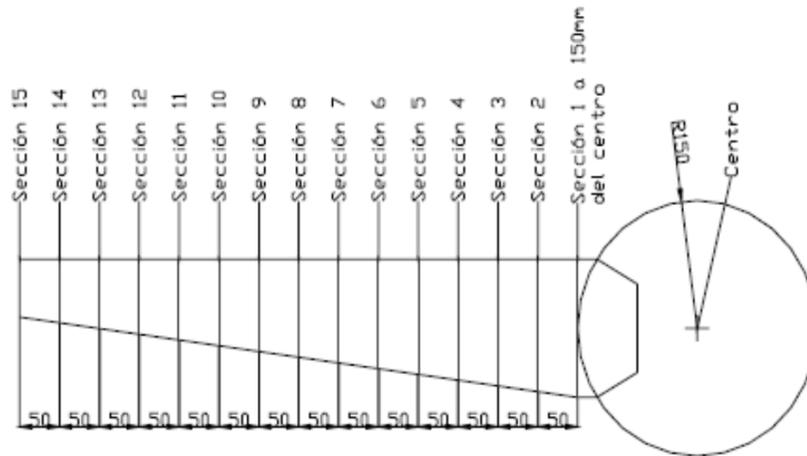
Fuente: elaboración propia, datos obtenidos de DESIGNFOIL® R6 DEMO

Figura 9 Parámetros característicos de la pala



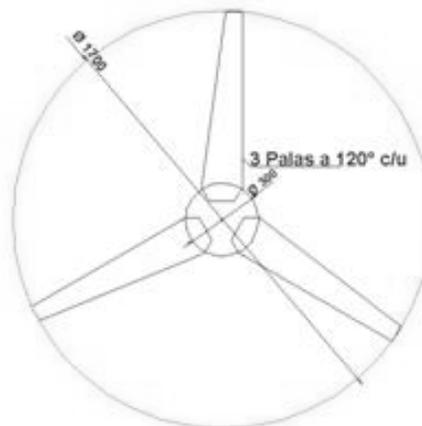
Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos77/aplicacion-teoria-disco-poroso-aerogenerador/aplicacion-teoria-disco-poroso-aerogenerador2.shtml>

Figura 10 Ubicación de las secciones en el álabe



Fuente: DESARROLLO TECNOLÓGICO DE MICROGENERADORES EOLICOS.
Autores: MSc. Ing. Teodoro Sánchez Campos, Ing. Saúl Ramírez

Figura 11 Diagrama del rotor



Fuente: DESARROLLO TECNOLÓGICO DE MICROGENERADORES EOLICOS.
Autores: MSc. Ing. Teodoro Sánchez Campos, Ing. Saúl Ramírez

www.solucionespracticas.org.pe

8.4.2.2. El extremo raíz: éste es idéntico en cada pala y es necesario para ajustar cada pala al rotor del generador. Es por eso que las palas tienen dos partes, una primera que es perfil de ala de la pala que es la parte que capta la energía eólica, y una segunda parte en el extremo grueso donde se produce una suave transición entre el final del perfil de ala hacia la forma del extremo raíz.

8.4.3. Esfuerzos sobre las palas

8.4.3.1. Cálculo de la Fuerza Centrífuga: La fuerza centrífuga empuja las palas hacia afuera del centro de rotación y tiende a arrancarlas del cubo del rotor viene dada por la Ecuación:

$$F_{cent} = \frac{1}{2} m_{pala} \frac{v_G^2}{r_G} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

m_{pala} : Masa de la pala.

r_G : Distancia del centro del rotor al centro de gravedad de la pala.

v_G^2 : Velocidad en el c.d.g.

La velocidad en el c.d.g. está dada por la Ecuación:

$$v_G = \omega r_G = n \frac{2\pi}{60} r_G \quad \text{Ecuación 11}$$

Como no se conoce la geometría de la pala, se supone que el c.d.g. de la pala se encuentra a la mitad de su longitud.

Sustituyendo Ecuación 10 en Ecuación 11 se obtiene la fórmula final para el cálculo de fuerza centrífuga en la Ecuación 12.

$$F_{cent} = \frac{1}{2} m_{pala} \frac{\left(\frac{n \cdot 2\pi}{60} r_G\right)^2}{r_G} = \frac{\pi^2}{1800} m_{pala} n^2 r_G \quad \text{Ecuación 12}$$

Sabiendo que la masa de cada pala es 1,35 kg, que la distancia del rotor al c.d.g. de la pala es 0,6 m (El valor de 0,6 m es asumido para facilitar calculos) y que la velocidad de giro media de funcionamiento (@5.0 m/s) es de 207 min se calcula la F_{cent} en Ec. 12 dando como resultado 60.6 Nm.

8.4.3.2. Cálculo de la resistencia aerodinámica de la pala: Una fórmula aproximada para determinar la resistencia de un aerogenerador en rotación, inmerso en una corriente de aire de velocidad v_m se puede expresar según Ecuación 13, donde A representa el área de barrido de las palas.

$$F_{aerod} = 0.062 A v^2 = 0.062 \left[\frac{\pi \cdot (2,4)^2}{4} \right] \cdot (5.2)^2 = 7.59 Nm \quad \text{Ecuación 13}$$

En cambio si la turbina eólica se encuentra en reposo, pero inmersa en la corriente de aire, la resistencia estática aerodinámica por pala se calcula mediante la expresión que se indica en Ecuación 14, donde Ω es el coeficiente de solidez.

$$F_{est-aerod} = 2 \Omega F_{aerod} \quad \text{Ecuación 14}$$

La solidez indica la relación entre el área geométrica de la pala y el área barrida por ella en su giro respecto al eje de baja velocidad. En la Ecuación 15 se muestra la expresión de la solidez.

$$\Omega = \frac{n_{pala} S_{pala}}{A_{rotor}} = \frac{n_{pala} S_{pala}}{\pi R^2} \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde la superficie de las palas S_{pala} tiene un valor de 1199,46 m²:

$$\Omega = \frac{3 * 1,1199}{\pi (1,2)^2} = 0,007$$

Finalmente se calcula la fuerza estática aerodinámica en la Ecuación 14.

$$F_{est-aerod} = 2 \Omega F_{aerod} = 2(0,07)(7,59) = 1,06 \text{ N}$$

8.4.3.3. Cálculo del momento flector de la pala: El momento flector de la pala se calcula a partir de las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre las palas, que son paralelas al eje de giro, a la distancia d_G del mismo según Ecuación 16.

$$M_{flector} = d_G F_{est-aerod} \quad \text{Ecuación 16}$$

En la Ecuación 17 y en la Ecuación 18 se muestran los momentos flectores para el modo operativo (máquina en funcionamiento) y para el modo estacionario (máquina parada) respectivamente.

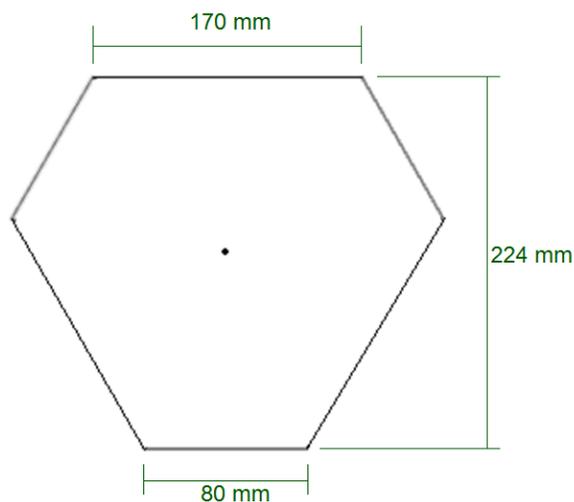
$$M_{flector} = d_G F_{aerod} = 0,6 * 7,59 = 4,554 \text{ Nm} \quad \text{Ecuación 17}$$

$$M_{flector-est} = d_G F_{est-aerod} = 0,6 * 1,06 = 0,636 \text{ Nm} \quad \text{Ecuación 18}$$

8.4.4. El cubo

Es aquel donde se fijan los álabes y que es concéntrico con el eje del alternador, este cubo se hace tomando como base un triángulo equilátero al que se le hacen tres cortes sobre los vértices con lo que nos queda un hexágono no regular con lados opuestos de diferente longitud (150 mm y 100 mm); en los lados mayores se atornillaran las raíces de los álabes y en estos estarán elaboradas ranuras radiales respecto el centro de las cara de esa arista para poder hacer ajuste del ángulo de ataque de cada uno de los álabes. (Ver Figura 12).

Figura 12 Hexágono base para el cubo



Fuente: Elaboración propia.

8.4.5. El eje

Para este proyecto se hará uso de un sistema de relación de cadenas y ruedas dentadas extraído de una bicicleta, el mecanismo conductor será un elemento del marco de la bicicleta denominado comúnmente en su ámbito como “caja” (ver Imagen 14), donde se alojan las dos canastillas con balineras que sostienen el

conjunto de platos dentados, bielas y pedales, este elemento del marco presenta excelente rigidez estructural y es capaz de soportar a una persona adulta en rutinas de pedaleo y de pies lo cual representa una gran ventaja para el proyecto debido a que se puede inferir que será capaz de soportar el peso combinado de el hexágono base para el cubo, los alabes y los pernos de sujeción de los alabes, en el estará el eje central que a su vez estará acoplado al plato dentado que para este proyecto será de 48 dientes (ver Imagen 15).

Imagen 14 Caja de balineras de marco de bicicleta



Fuente: <http://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-404117291-venpermuto-marco-de-bicicleta-antigua-phillips-barra-caida-JM?redirectedFromParent=MCO403295208>

Imagen 15 Plato dentado



Fuente: http://23061.pl.all.biz/es/goods_rueda-de-estrella-de-bicicletas_138965

Por otra parte, el elemento conducido será el alternador al cual se le hará un acople directo a un elemento denominado estrella (ver Imagen 16) de la bicicleta la cual solo permite la transmisión de potencia en un sentido debido a su sistema interno de trinquetes esta estrella es de 18 dientes; el alternador estará en un soporte que permitirá que el plato acoplado a hexágono base y la estrella acoplada al alternador tengan sus ejes a una distancia por determinar y sobre un mismo plano para permitir a la cadenilla girar sobre ellos sin descarrilamientos.

Imagen 16 Estrella de bicicleta



Fuente: <http://www.btt.com.ar/nota/237/237888.shtml>

8.4.6. El montaje eléctrico

Es fundamental un soporte eléctrico para el funcionamiento del aerogenerador. Como ya se ha comentado, el funcionamiento del aerogenerador consiste en que la fuerza del viento hace girar la turbina eólica (las palas) que al estar montada en el cubo que se acopla, por medio de una sencilla transmisión de cadena obtenida de una bicicleta, al alternador; lo hace girar y por consiguiente efectúa la generación de corriente eléctrica.

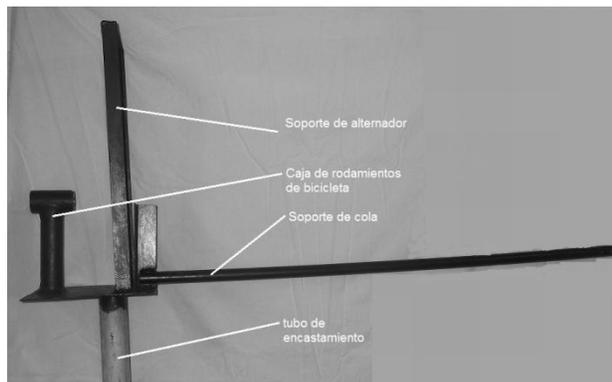
Para aprovechar la inducción de corriente se requiere una conexión de elementos eléctricos para que la transporten, transformen y controlen de manera correcta y controlada.

Para este montaje se usará un alternador de chevrolet modelo 80, el cual está formado por rotor excitado e incorpora un puente rectificador, esto a su vez estará conectado a una fuente rectificadora compacta y todo el conjunto almacenara la energía en un acumulador de plomo.

8.4.7. Soporte del aerogenerador

Es una pieza de acero sobre la cual va montado el conjunto transmisión de alternador-caja de bicicleta, cubo y álabes así como también el mecanismo de orientación y viraje del aerogenerador formado por la cola-veleta y el mecanismo de acople con la torre de soporte tubular. (Ver Imagen 17)

Imagen 17 Soporte del aerogenerador



Fuente: Elaboración propia

Para calcular éste se procede de la siguiente manera:

$$l = 10 \text{ m}$$

$$\phi_e = 2.5^p = 73.03 \text{ mm}$$

$$\phi_i = 62.71 \text{ mm}$$

$$SCH = 40$$

$$\sigma_f = 400 \text{ MPa}$$

$$E = 2.1 * 10^5 \text{ MPa}$$

$$I = \frac{n(R^4 - r^4)}{4} = \frac{n[(36.515)^4 - (31.355^4)]}{4}$$

$$I = 75.91 * 10^{-8} \text{ m}^4$$

$$P = (80 \text{ Kg}) \left(9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) = 784 \text{ N}$$

$$EI^k = P(f + R - y); \quad -\frac{l}{2} \leq x \leq \frac{l}{2}$$

$$y^k k^2 y = k^2(f + e)$$

$$k^2 = \frac{P}{EI} \rightarrow k = \sqrt{\frac{P}{EI}} = \sqrt{\frac{784 \text{ N}}{(2.1 * 10 \text{ MPa})(75.91 * 10^{-8} \text{ m}^4)}}$$

$$k = 0.070 \text{ m}^{-2}$$

La Solución integral es:

$$y = A \sin kx + B \cos kx + f + e$$

Condiciones de fronteras

$$x = 0; y = 0 \rightarrow 0 = B + f + e \rightarrow B = -(f + e)$$

$$x = 0; y = 0 \rightarrow 0 = Ak \rightarrow A = 0$$

$$x = \frac{l}{2}; y = f \rightarrow f = B \cos \frac{kl}{2} + f + e \rightarrow B = -\frac{e}{\cos \frac{kl}{2}}$$

$$y = -(f + e) \cos kx + f + e = (f + e)(1 - \cos kx)$$

f en funcion de e

Momento flector máximo

$$M_{max} = P_e \cdot sec\left(\frac{l}{2r} \cdot k\right)$$

$$M_{max} = 780(0.4) \sec\left[\frac{10 \text{ m}}{\left(\frac{73.03}{1000}\right)} * 0.07 \text{ m}^{-2}\right]$$

$$M_{max} = 316.42 \text{ Nm}$$

$$\sigma_{max} = \frac{P}{A} + \frac{M}{I} d$$

$$\sigma_{max} = \frac{780 \text{ N}}{n[(73.03 * 10^{-3})^2 - (62.71 * 10^{-3})^2]} + \frac{316.42 \text{ Nm}}{75.91 * 10^{-8} \text{ m}^4} (7.303 * 10^{-3} \text{ m})$$

$$\sigma_{max} = 30.62 \text{ MPa} \rightarrow \text{Esfuerzo máximo al que la columna está sometido}$$

$$\sigma_f = 400 \text{ MPa} > \sigma_{max} \quad \text{Este diseño soportará la carga sin problemas}$$

8.4.8. Montura del buje.

Es aquella formada por un hexágono irregular el cual se generó a partir de las medidas finales de la raíz del álabe, su construcción debió ser hecha por un troquel y luego se unieron las partes con proceso SMAW como se muestra en la Imagen 18.

Imagen 18 Cubo para montaje de álabes



Fuente: Elaboración propia

8.4.9. Tubo de encastramiento.

El tubo de viraje es la pieza central del aerogenerador, ya que se encaja sobre la torre, y soporta por un lado toda la montura del cubo con el generador y las palas, y por otro lado toda la cola con la veleta. Consiste en una pieza tubular de 300 mm de longitud con un diámetro exterior de 60,3 mm y un espesor de 3 mm. (Ver Imagen 19).

Imagen 19 Tubo de encastramiento



Fuente: elaboración propia

8.4.10. Cola del aerogenerador

La cola de veleta se usa para encarar la máquina al viento (ver Imagen 20). Forma parte de un mecanismo que hace girar el generador y las palas para enfrentar toda la fuerza del viento, oscilando toda la máquina sobre un cojinete (una esfera de acero de 25mm de diámetro soldada a la punta del mástil como se muestra en la Imagen 21) en el extremo superior de la torre.

Imagen 20 Cola del aerogenerador



Fuente: Elaboración propia

8.4.10.1. Cojinete de baja fricción: Para el elemento de auto-orientación se hará uso de dos tuberías concéntricas, una soldada a la base del conjunto del aerogenerador y otra que se encastrada en ella la cual corresponde a la punta del mástil; para poder tener una baja fricción durante la rotación de orientación se hace uso del concepto de disminución del área de contacto para reducir la fricción al mínimo, para esto solo basta soldar una esfera de acero de 25,4mm de diámetro a la punta del mástil la cual hará contacto en la superficie plana de la base del conjunto que queda dentro de la tubería que a ella se suelda.

Imagen 21 Cojinete de baja fricción para viraje de orientación



Fuente: Elaboración propia

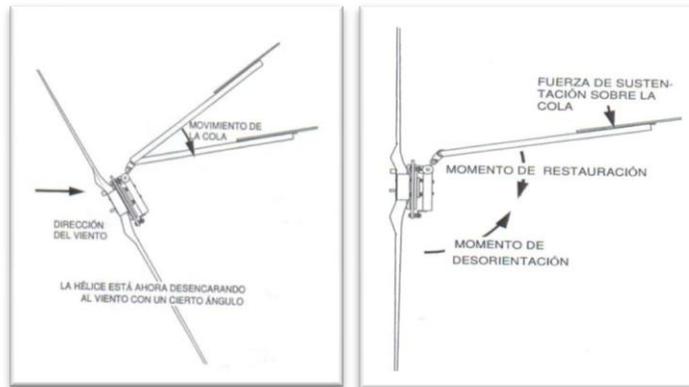
8.4.11. Funcionamiento de la cola: El empuje del viento sobre la hélice es indicativo de la cantidad de energía capturada por el aerogenerador. Cuando ese empuje alcanza un cierto nivel y el viento va incrementando su velocidad, el generador con su centro de gravedad y pivote se desplazan con respecto al punto de acople con el mástil, tratando de volver la máquina lateralmente.

Esto significa que el empuje eólico crea un par de oscilación sobre el eje de acople. El empuje del viento tratará siempre de rotar el aerogenerador de lado a la dirección de flujo del viento.

Es por esto que se necesita que la fuerza del viento sobre la cola contrarreste ese momento de oscilación creado por el efecto descrito; entonces, cuando el prototipo tienda a rotar, la cola oscilará a un ángulo donde se equilibren los dos pares torsionales (de oscilación y de orientación) con lo que se consigue equilibrar el modelo para aprovechar la fuerza del viento.

A medida que el flujo del viento aumenta, también se incrementa el empuje y el par de oscilación. Sin embargo, el empuje sobre la cola de orientación también aumentará en la misma proporción por lo que siempre habrá equilibrio de fuerzas que mantendrán el plano de álabes de cara al viento. (Ver Figura 13).

Figura 13 Funcionamiento de la Cola



Fuente: Hugh Piggott-Scoraig Wind Electric-February 2004. PMG construction Manual

8.4.12. La estructura (mástil)

El diseño escogido por cuestiones de economía y disponibilidad ha sido un mástil de cuatro metros de altura conformado por dos partes de dos metros cada una, las cuales se ensamblan fácilmente por un sistema de tubería exterior concéntrica que luego se fijan con dos pernos. Estos dos tramos se fijan a la base que estará anclada por cuatro pernos y en su parte superior irá arriostrada por medio de tres cables tensores que restringirán el movimiento de cabeceo causado por el empuje del viento incidente sobre la superficie de los álabes; dicha torre estará situada sobre una construcción (azotea) a siete metros de altura con lo que se supera la meta de 10 metros sobre la cota del suelo. (Ver Imagen 22).

Imagen 22 Torre del aerogenerador sin ensamblar



Fuente: Elaboración propia

8.4.13. Conexión a las baterías

El cable que va del alternador a la batería debe de ser muy resistente y flexible que pueda ser retorcido durante la orientación de la veleta para este caso se usa cable dúplex CPE SPT 12 WAG 300V 60 °C, el cual se puede conseguir en cualquier ferretería.

9. ESTUDIO ELÉCTRICO DEL AEROGENERADOR

El principal problema que se busca solucionar con el uso del alternador es que su funcionamiento sea adecuado aún en condiciones de bajas velocidades de rotación, debido a que los alternadores automotrices están diseñados para cargar baterías de 12V o 24V cuando su velocidad de rotación se encuentra en ralentí a 1000 RPM o superior.

La Ecuación que rige el comportamiento de generación de voltaje interno en un alternador es:

$$E = k * F_i * w \quad \text{Ecuación 19 donde:}$$

E = El voltaje interno generado

k = Constante de construcción de la máquina

F_i = Flujo magnético a través del estator

w = Velocidad angular de giro

La tensión generada por el devanado del alternador tendrá forma sinusoidal, debido a que la variación del flujo magnético, que es la causa de que se produzca una fuerza electromotriz inducida, puede aproximarse a sinusoidal.

9.1. PRUEBAS EN EL GENERADOR

Una de las características de este proyecto es su adaptabilidad al entorno, usando materiales de fácil adquisición. Las pruebas realizadas consisten en el montaje del alternador en la base correspondiente en un automotor (Volkswagen escarabajo) y por medio de un multímetro, se analizan los valores de voltaje y tensión de carga para rangos de 200 RPM (ver Imagen 23), con lo que se podrá determinar potencia eléctrica en función de las rpm (ver Gráfica 10).

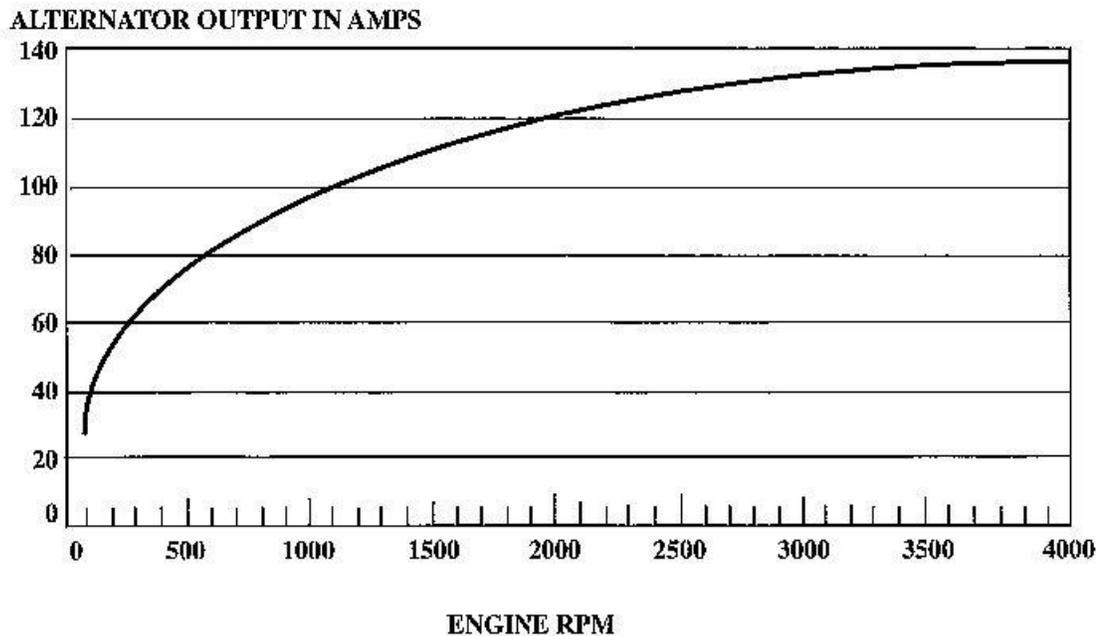
Imagen 23 Pruebas realizadas al Aerogenerador



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 10 Potencial de Salida en función de las RPM

Alternator Output vs. Engine Speed



Fuente: <http://www.hummerknowledgebase.com/hidgraph/alt-out.jpg>

10. MANTENIMIENTO DEL MICROAEROGENERADOR

Para que la vida útil del micro aerogenerador sea prolongada, es indispensable y necesario que se elabore y efectúe periódicamente un plan de mantenimiento preventivo que tendrá como objetivo mantenerlo o restaurarlo a un estado óptimo de operación; para ello existen tres tipos de mantenimiento, los cuales están en función del momento en el tiempo en que se realizan, el objetivo particular para el cual son puestos en marcha, y en función a los recursos utilizados, los cuales se enuncian a continuación.

10.1. Mantenimiento Correctivo o no planeado

Se hace cuando ocurre una falla o avería, es decir, solo se ejecutará cuando se presenta mal función del prototipo; las actividades y repuestos necesarios en este dependen únicamente de la naturaleza de la avería o desperfecto.

10.2. Mantenimiento Preventivo o planificado

Se realiza antes de que ocurra una falla o avería y durante la vida útil del elemento, se efectúa bajo condiciones controladas. Se realiza a razón de la experiencia y pericia generada en proyectos similares, que también determina el intervalo de tiempo y momento necesario para llevar a cabo dicho procedimiento.

Dentro de las tareas de mantenimiento se deben realizar inspecciones trimestrales periódicas rutinarias en:

- Inspección y ajuste de tuercas y tensores
- Inspección de los álabes

- Inspección de los ejes
- Inspección del alternador
- Engrasar los rodamientos del soporte de la góndola y caja de bicicleta
- Inspección de las conexiones y dispositivos eléctricos

11. EL IMPACTO AMBIENTAL DE LA ENERGÍA EÓLICA

“Retomando la idea de los aerogeneradores como una *fuentes limpia* de energía renovable, debido a que no necesitan combustión para la producción de energía, la cual produciría residuos y/o gases contaminantes que provocan el efecto invernadero. También surge el tema de que su uso no está exento de impacto ambiental. Entre los contaminantes y daños que provoca la instalación y puesta en marcha de un aerogenerador están:

Su localización, porque frecuentemente se da en lugares apartados que son de gran valor ecológico, como por ejemplo las cumbres montañosas, que por no encontrarse habitadas conservan su riqueza paisajística y faunística, puede provocar efectos perniciosos.

El impacto visual en la línea del horizonte, ya que los aerogeneradores deben estar en áreas expuestas y por lo tanto están visibles. La reacción a la vista de un aerogenerador es altamente subjetiva. Muchas personas lo ven como un símbolo de bienvenida a una fuente limpia de energía y otras la ven como una adición no deseada al paisaje.

Las interferencias electromagnéticas, puesto que las ondas de radio y las microondas son usadas para una variedad de propósitos en comunicación. Cualquier estructura grande que se mueva puede producir interferencia electromagnética (IEM). Las turbinas eólicas pueden causar IEM por reflexión de la señal en las palas del rotor y por lo tanto un receptor cercano puede captar señal directa y reflejada. La interferencia ocurre porque la señal reflejada sufre un retraso debido a la diferencia en la longitud del camino recorrido y un corrimiento Doppler debido al movimiento de las palas, este efecto no aplica a este proyecto por la naturaleza de las dimensiones del mismo

El controversial efecto potencial sobre las aves, pues frecuentemente éstas colisionan con las estructuras, se debate entre especialistas ornitólogos de los cuales la vasta mayoría argumenta que con el tiempo estos animales se acostumbran y evitan las colisiones”⁶¹.

“El calentamiento global debido a las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero es un hecho generalmente aceptado. Cada unidad (kWh) de electricidad producida con turbinas eólicas puede desplazar una unidad de electricidad generada por una central térmica”⁶².

Por otro lado, el empleo de la energía eólica genera un ahorro en el uso de las reservas de combustible fósiles en general, un aporte al uso racional de la energía URE, y en general para muchos países un ahorro de divisas, contribuyendo a la efectividad y diversidad en el suministro de energía eléctrica.

⁶¹ <http://www.iae.org.ar/renovables/renovables60.pdf>

⁶² <http://www.iae.org.ar/renovables/renovables60.pdf>

12. INVERSIÓN DEL PROYECTO

12. 1. COSTO DE LOS MATERIALES DEL AEROGENERADOR

Para la ejecución de este proyecto, el presupuesto se descompuso en las siguientes partes: el costo de los materiales para el aerogenerador, el costo de los materiales para construir los moldes y plantillas, el costo de las horas dedicadas para la construcción y montaje y el costo operacional.

12.2. COSTO TOTAL DEL PROYECTO

Teniendo en cuenta todos los conceptos descritos, desde el diseño hasta la construcción del aerogenerador del proyecto, se obtiene el costo total, como lo indica la Tabla 12.

Tabla 12 Costo total del proyecto

CONCEPTO	APORTE UNITECNOLÓGICA	APORTE ESTUDIANTES
Equipos de Computo y medición	GIMAT	\$ 300.000
Libros , revistas y publicaciones	GIMAT	\$ 200.000
Materiales para fabricación, costos de manufactura.		\$ 800.000
Materiales		
Alambre de ferróníquel		\$ 8.000
Cubo de poliestireno expandido		\$ 10.000
Alternador		\$ 40.000
Fibra de vidrio (resina - tela)		\$ 60.000
Tubería		\$ 48.000
Caja de bicicleta		\$ 25.000
Soldaduras para cubo de alabes		\$ 92.000
Lámina de 200x200x5mm para base		\$ 8.500
Total Materiales		\$ 291.500
Costo mano de obra (384 h/h)		\$ 1.179.000
Equipos de Laboratorio	GIMAT	-
Útiles de Escritorio y Papelería		\$ 400.000
Software	GIMAT	-
Transporte y comunicación		\$ 300.000
SUB TOTAL		\$ 3.470.500
Imprevistos (A.U.I.) %10		\$ 347.050
COSTO TOTAL DEL PROYECTO		\$ 3.817.550

13. CONCLUSIONES

El consumo de energía es esencial para el bienestar y desarrollo económico y social de las poblaciones marginadas en la ciudad de Cartagena de indias. El acceso a la energía permite mejorar las condiciones de vida, incluyendo mejoras en la salud, la alimentación y la educación.

Se puede decir que este tipo de tecnología sirve como apoyo a la gran dependencia energética actual, y que puede ser usada ampliamente en poblaciones que cuenten con recursos eólicos moderados lo cual la hace aplicable a todo el litoral caribe colombiano ya que es versátil en cuanto a emplazamientos se refiere.

Podrían convertirse en fuente de empleo creando un proyecto que permita a las comunidades menos favorecidas trabajar en la construcción de los mismos para la venta al público con lo que mejora la calidad de vida y se disminuyen las emisiones de gases invernadero.

La instalación del aerogenerador, deberá hacerse en lugares donde el recurso eólico sea moderado, recomendándose velocidades promedio de 6 m/s.

Al ser un prototipo, el costo del total es un poco elevado, superando a algunos modelos ya existentes, pero que a través de la experiencia arrojada por este trabajo, se confirmó que puede ser construido de materiales enteramente reciclados y que también se podría solucionar con programas de apoyo e inversión de organismos gubernamentales.

Todas las dimensiones fueron someramente calculadas lo que podría traducirse en sobrepeso del mástil y el soporte de conjunto, lo cual puede convertirse en

tema para otra propuesta de trabajo de grado y así perfeccionar la construcción de los mismos, tema que no se trató en el presente debido a que éste no demarca mejoras sustanciales en el rendimiento aerodinámico de los alabes que son el eje del trabajo.

El punto más destacable es el relacionado con el aprovechamiento eléctrico del modelo, se recomienda ampliamente este tema para proyectos venideros debido a que los generadores para este tipo de aplicaciones son bastantes costosos y los alternadores para automóviles están diseñados para operar a regímenes de rotación elevados que está por mucho, fuera del rango de operación permisible para el modelo, se deja abierto el presente trabajo para presentar un manual para modificar un alternador incluyendo imanes permanentes en él o simplemente un manual que detalle cómo construir un generador de bajas revoluciones con elementos reciclados.

Para este trabajo se da por sentado que se logró el objetivo de construir un prototipo con materiales comúnmente encontrados en la casa, ferreterías, o cementerios de chatarra y se invita a los lectores a desarrollar como trabajo de grado cualquier tema que imperfecciones del modelo, bien sea en cuanto a rendimiento, durabilidad o costos y que esté enmarcado dentro de una manufactura simple y rudimentaria.

BIBLIOGRAFÍA

- AERODYNAMIC MODELING AND DEVELOPMENT OF A MICRO WIND TURBINE GENERATOR BLADES. 1st. International congress on instrumentation and applied sciences. México. 2010.
- ATLAS DE VIENTO Y ENERGÍA EÓLICA DE COLOMBIA. República de Colombia. Ministerio de Minas y Energía. Unidad de planeación minero energética UPME. Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales IDEAM.
- AYESTARÁN, Alejandro C. BODOIRA, Jorge A. y ZIMMERMANN, Nicolás. Diseño, construcción y ensayo De un micro aerogenerador. Instituto Tecnológico de Buenos Aires. 2004.
- CENTRO VIRTUAL DE NOTICIAS DE LA EDUCACIÓN CVNE. Ministerio de Educación Nacional. Proyecto AUPO-PRACTICUS
- CUESTA SANTIANES, María José. Aerogeneradores de potencia inferior a 100kW. España. 2008.
- D. Elliott, Wind Energy Resource Atlas of Oaxaca, National. Renewable Energy Laboratory NREL. USA 2003.
- http://23061.pl.all.biz/es/goods_rueda-de-estrella-de-bicicletas_138965
- <http://aerofoilengineering.com/download.htm>
- <http://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-404117291-venpermuto-marco-de-bicicleta-antigua-phillips-barra-caida-JM?redirectedFromParent=MCO403295208>
- <http://books.google.com.co/books?id=pAa5hR2cz0oC&pg=PA159&lpg=A159&dq=En+general,+los+aerogeneradores+constan+de+tres+palas+y+a+que+es+el+menor+n%C3%BAmero+de+palas+que+permite+ahorrar+m%C3%A1s+material+y+peso+sin+complicar+el+sistema.+Algunos+mo>

delos+utilizan+rotores+bipalas+o+monopalas,+que+logran+un+ahorro&source=bl&ots=kJdSxSgrQX&sig=AOAt-caxLN5--WRIGZWBdRZTy1I&hl=es&sa=X&ei=t44qUYLoJlqy8ATRmoDYDA&ved=0CC0Q6AEwAA#v=onepage&q=En%20general%2C%20los%20aerogeneradores%20constan%20de%20tres%20palas%20ya%20que%20es%20el%20menor%20n%C3%BAmero%20de%20palas%20que%20permite%20ahorrar%20m%C3%A1s%20material%20y%20peso%20sin%20complicar%20el%20sistema.%20Algunos%20modelos%20utilizan%20rotores%20bipalas%20o%20monopalas%2C%20que%20logran%20un%20ahorro&f=false

- [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alternator_\(cut-away\)_01.JPG?uselang=es](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alternator_(cut-away)_01.JPG?uselang=es)
- <http://ctmaestella.blogspot.com/2009/01/aerogeneradores-darrieus.html>
- <http://ctmaestella.blogspot.com/2009/01/panemonas.html>
- <http://energiaunam.wordpress.com/page/4/>
- <http://es.globedia.com/instalan-aerogenerador-pala-250-ceder-ciemat-soria>
- <http://es.scribd.com/doc/98738759/Coeficientes-de-Rugosidad-Haestad>
- <http://es.wikipedia.org/wiki/Alternador>
- http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_e%C3%B3lica
- http://es.wikipedia.org/wiki/Sector_el%C3%A9ctrico_en_Colombia
- http://es.wikipedia.org/wiki/Sector_el%C3%A9ctrico_en_Colombia#Pol.C3.ADtica_y_Regulaci.C3.B3n
- <http://es.wikipedia.org/wiki/Viento>
- http://esfgalicia.blogspot.com/2007_12_01_archive.html
- <http://esfit100.blogspot.com/>
- <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/flujodegases/energiaeolica/energiaeolica.html>
- <http://fuentesrenovables.blogspot.com/>

- <http://hdosoconsultores.com/la-mortandad-de-aves-en-aerogeneradores/>
- <http://html.rincondelvago.com/aerogeneradores.html>
- <http://ingeniatic.euitt.upm.es/index.php/tecnologias/item/373-alternador>
- <http://ingenieriamontaje.blogspot.com/2010/10/generador-eolico.html>
- <http://intranet2.minem.gob.pe/web/archivos/dge/publicaciones/uso/1/01/02/02/05.htm>
- <http://itzamna.bnct.ipn.mx:8080/dspace/bitstream/123456789/10070/1/32.pdf>
- <http://monica-mundocientifico.blogspot.com/2012/01/energia-eolica.html>
- <http://noticias.universia.net.co/vida-universitaria/noticia/2008/01/24/245143/mit-tecnologica-bolivar-unieron-estudiar-cartagena.html>
- <http://sandglasspatrol.com/IIGM-12oclockhigh/EI%20Ala%20y%20el%20Perfil.htm>
- http://somi.ccadet.unam.mx/icias2010/memorias/55-CG_memoria.pdf
- <http://thales.cica.es/rd/Recursos/rd99/ed99-0226-01/capitulo4b.html>
- <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/2979/1/54392-1.pdf>
- <http://vidacotidianitica.blogspot.com/2011/04/puede-el-viento-solar-proporcionar.html>
- <http://web.ing.puc.cl/~power/alumno03/alternativa.htm>
- <http://windgenerators.zipperfrenc.net/wind-generator-using-car-alternator/>
- <http://www.agenciadenoticias.unal.edu.co/.../energia-eolica-vale-la-pena-para-colombia-1/>
- <http://www.bdigital.unal.edu.co/8084/1/01186670.2012.pdf>
- <http://www.btt.com.ar/nota/237/237888.shtml>
- <http://www.cancilleria.gov.co/sites/default/files/DocEstrategicos/EnergiaWeb.pdf>
- <http://www.cartagenacomovamos.org/cartagenometroDetail.php?iID=3>

- http://www.cedesu.org/attachments/article/221/Resumen%20ejecutivo%20trabajando%20resumido_LL_3_FINAL14%2015%20hs%20%20jce%20_3_.pdf
- http://www.ciemat.es/CIEMATportal/recursos/doc/Areas_Actividad/Prospectiva_Tecnologica/34301686_211200911951.pdf
- http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2009/07/09/146989.php
- <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia36/HTML/articulo03.htm>
- <http://www.designfoil.com>
- <http://www.electricaribe.com/MiHogar/Seguritoenloscuidadesdelaenerg%C3%ADa/tabid/3221/language/es-ES/Default.aspx>
- <http://www.eluniversal.com.co/cartagena/economica/demanda-energetica-crecera-un-26-por-ciento-cada-ano>
- <http://www.enertres.com/es/minieolica/0/concepto.html>
- <http://www.gasnaturalfenosa.es/es/inicio/grandes+clientes/eficiencia+y+sostenibilidad/aprende+y+ponte+al+dia/pildoras+de+conocimiento/en+la+gestion+de+los+recursos/por+que+es+importante+la+transicion+a+una+empresa+baja+en+carbono/1285341491730/datos+claves.html>
- http://www.gea.usm.cl/?page_id=73
- http://www.granma.cubaweb.cu/secciones/espanol_cuba/2008-03.html
- <http://www.grupoblascabrera.org/ter/eolic/eolic03.htm>
- <http://www.iae.org.ar/renovables/renovables60.pdf>
- <http://www.idae.es/index.php>
- http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_10374_Energia_eolica_06_d9231f5c.pdf
- <http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/4a47d684c60ae.pdf>

- http://www.ingurumena.ejgv.euskadi.net/r49-565/es/contenidos/informacion/plan_energia_eolica/es_8109/adjuntos/documento/4-situacion_c.pdf
- http://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/accion_viento/EIAPEVA_001_09_SOW.pdf
- <http://www.kabytes.com/tutoriales/como-elegir-un-cooler-para-nuestra-pc/>
- <http://www.mineduccion.gov.co/cvn/1665/w3-article-117028.html>
- <http://www.mineduccion.gov.co/cvn/1665/w3-article-237934.html>
- <http://www.mitecnologico.com/Main/TiposDeMantenimiento>
- <http://www.monografias.com/trabajos77/aplicacion-teoria-disco-poroso-aerogenerador/aplicacion-teoria-disco-poroso-aerogenerador2.shtml>
- <http://www.monografias.com/trabajos82/aerogeneradores-generadores-electricidad-y-productores-agua/aerogeneradores-generadores-electricidad-y-productores-agua2.shtml>
- http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/es/tour/wres/weibull.htm
- http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/es/tour/wtrb/ower.htm
- <http://www.offinf.com/MemorialExplicativoSenadoAbril2010.pdf>
- http://www.opex-energy.com/eolica/palas_aerogenerador.html
- http://www.opex-energy.com/eolica/tipos_aerogeneradores.html
- <http://www.pfernandezdiez.es/EnergiasAlternativas/eolica/PDFs/08Molinos.pdf>
- <http://www.reddelconocimiento.org/profiles/blogs/manual-de-usuarios-para-micro>
- <http://www.renewables-made-in-germany.com/es/renewables-made-in-germany-pagina-de-inicio/energia-eolica/energia-eolica/perspectivas.html>

- http://www.repoweringsolutions.com/productos/aerogeneradores_domesticos/index.htm
- <http://www.si3ea.gov.co/Portals/0/Iluminacion/CarFNCE.pdf>
- http://www.siel.gov.co/siel/documentos/documentacion/Demanda/proyeccion_demanda_ee_mar_2011.pdf
- <http://www.taringa.net/posts/ciencia-educacion/13987031/Megapost-Energias-alternativas-Energia-eolica-Parte-2.html>
- http://www.tecnicsuport.com/index.php?pagina=http://www.tecnicsuport.com/enerenov/taulesconsulta/reactiva_eolicos/articulo1.htm
- <http://www.ucm.es/BUCM/tesis/der/ucm-t26892.pdf>
- http://www.unac.edu.pe/documentos/organizacion/vri/cdcitra/Informes_Finales_Investigacion/Febrero_2011/IF_CARRASCO_VENEGAS_FIQ.PDF
- <http://www.unperiodico.unal.edu.co/dper/article/energia-eolica-vale-la-pena-para-colombia-1.html>
- <http://www.upme.gov.co>
- <http://www.upme.gov.co/Docs/MapaViento/CAPITULO1.pdf>
- <http://www.uv.es/~navasqui/OtrosAerogeneradores/Aerogen-vertical.pdf>
- http://www.vidasostenible.org/observatorio/f2_final.asp?idinforme=831
- <http://zaguan.unizar.es/TAZ/EUITIZ/2010/5484/TAZ-PFC-2010-418.pdf>
- <http://zeitgeistmdp.com.ar/z/2010/12/10/proyecto-aerogenerador/>
- HUGH PIGGOTT-SCORAIG WIND ELECTRIC. PMG construction Manual. 2001.
- HUGH PIGGOTT-SCORAIG WIND ELECTRIC. PMG construction Manual. 2004
- Hugh Piggott-Scoraig Wind Electric-February 2004. PMG construction Manual
- INDUSTRIAS JOBBER, Características técnicas para la implementación de molinos de viento para bombeo de agua. Duitama Colombia.

- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. Sexta actualización. Santafé de Bogotá D. C.: ICONTEC, 2008, 41p, NTC 1486.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Referencias bibliográficas. Contenido, formas y estructura. Santafé de Bogotá D. C.: ICONTEC, 2008, 38p, NTC 5613.
- LEAL RUBIO, Manuel. Diseño de aerogeneradores.
- MARCO IBAÑEZ, Natxo; MONTEERRUBIO MONTESÓ, Juan Antonio UPC, Especificación técnica para la réplica en la UPC de un aerogenerador de baja potencia destinado a la cooperación para el desarrollo humano ETSEIB (UPC). Ingeniería Industrial.
- MINISTERIO DE INDUSTRIA, TURISMO Y COMERCIO DE ESPAÑA. Manuales de energías renovables: Energía eólica. 2006.
- MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA REPUBLICA DE COLOMBIA. INSTITUTO DE CIENCIAS NUCLEARES Y ENERGIAS ALTERNATIVAS INEA. Estimación de la energía eólica. Pág. 20.
- MINISTERIO DE RELACIONES EXTERIORES. Colombia: un país con diversidad energética. 2009.
- MSC TEODORO SÁNCHEZ C., ING. JOSÉ E. CHIROQUE B. Evaluación y mejoras de aerogenerador ITDG modelo IT-PE-100 . ITDG-CONCYTEC-UNI, Perú, Junio 2005
- MSC TEODORO SÁNCHEZ C., ING. JOSÉ E. CHIROQUE B. Evaluación y mejoras de aerogenerador ITDG modelo IT-PE-100 . ITDG-CONCYTEC-UNI, Perú, Junio 2005.
- PEREZ RAMIREZ, Rodrigo. Diseño y construcción de un pequeño aerogenerador de 100 W para su aplicación en zonas indígenas de México. España. Universidad de Zaragoza. 2006.

- RUIZ GUILLÉN, Javier. Electrificación de comunidad rural situada en país en vías de desarrollo mediante energías renovables. Tesis de grado, Universidad de Cali, Colombia, 1999.
- SANCHEZ CAMPOS, Teodoro y RAMIREZ ATAHUI, Sául. Desarrollo tecnológico de microgeneradores eólicos. Perú. 2001.
- SISKIND, Charles Seymour. Electrical machines; direct & alternating current. 1897.
- UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA – MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA REPUBLICA DE COLOMBIA. Energías Renovables: descripción, tecnologías y usos finales, Pág. 20, 21.
- UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, Bogotá D.C., abr. 30 de 2010 - Agencia de Noticias.
- UPME. Cadena de Petróleo 2009

ANEXOS

ANEXO A. MANUAL PARA CONSTRUIR UN AEROGENERADOR SIMPLE Y FUNCIONAL CON POCA INVERSIÓN

Este manual pretende de forma sencilla y práctica que una persona, sin tener vastos conocimientos de ingeniería, pueda a través de algunos pasos construir un generador eólico de 100Watts para su hogar.

Para la realización de un proyecto eólico, se debe verificar la velocidad del viento en el sitio donde se va a instalar el microaerogenerador. Esta información se puede tomar directamente de un anemómetro o se puede consultar con un centro de investigaciones donde puedan brindar esta información. Cabe resaltar que la velocidad del viento requerida para que el generador funcione debe ser mayor o igual a 5.0 m/s.

Para empezar a construir el prototipo, solo se necesitan los siguientes materiales que se pueden conseguir fácilmente en chatarrerías, ferreterías, papelerías o en casa:

Materiales:

- 1 cubo de poliestireno expandido de 1500mm x 600mm x 200mm.
- 3 m de alambre de ferroníquel cal.0.45 mm.
- 3 palos de madera de 2"x1"x400 mm.
- 1 tabla de madera de 400mm x 1400mm.
- 1 resorte de 100mm longitud, 8mm diámetro de espiral y cal. 1mm
- Papel higiénico.
- 500gr de pegante tipo colbon.

- 2 brochas de 2".
- 6.0kg de tela de fibra de vidrio.
- 1/2 gal de resina.
- 1 fuente de reguladora de voltaje 12VDC.
- Un alternador de automóvil.
- 1 Esfera de acero de 1" de diámetro (balín de rodamiento).
- 6m de Tubo de 3" de diámetro CS.
- 0.6m Tubo de 3.25" de diámetro CS
- 6 Tornillos de 3/8" x4
- 6 Tornillos de acero de 3/4" x 3" con doble arandela y tuerca INOX
- 4 Chazos expandibles de 3/8"

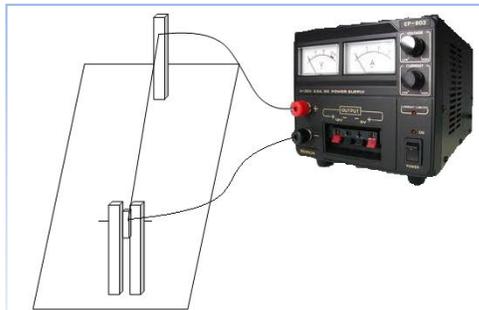
La fabricación del prototipo eólico se divide en los siguientes pasos:

1. Fabricación de la herramienta de corte.
2. Corte de los perfiles de poliestireno expandido
3. Aplicación de fibra de vidrio a los perfiles de poliestireno expandido.
4. Fabricación de soporte de alabes.
5. Fabricación de base soporte.
6. Soporte vertical generador eólico.
7. Instalación del generador eólico.

1. Fabricación de herramienta de corte

Como primer paso, se debe fabricar la herramienta con la que se cortará el poliestireno expandido con las especificaciones necesarias (ver Imágenes 1 y 2).

Imagen 1 Diagrama de Herramienta de corte de las láminas de poliestireno expandido



Fuente: <http://www.rclatino.com/phpBB3/viewtopic.php?t=5200>

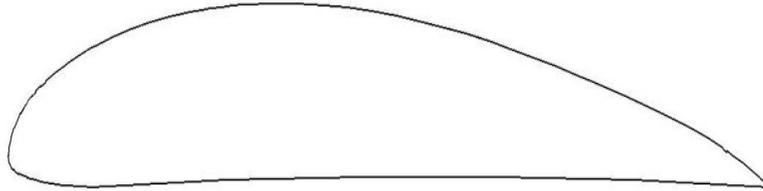
Imagen 2 Prototipo herramienta de corte



Fuente: Elaboración propia

El perfil aerodinámico que se usará es el NACA 4412, este perfil tiene la siguiente forma:

Figura 1 Muestra del Perfil de álabe



Fuente: NACA profile table- dominio publico

Este perfil permitirá construir el alabe de sección linealmente variable con una relación de 1:0.175 por metro longitudinal (es decir, que si la base del álabe midiera 100mm, en un metro de álabe su extremo mediría 17,5mm)

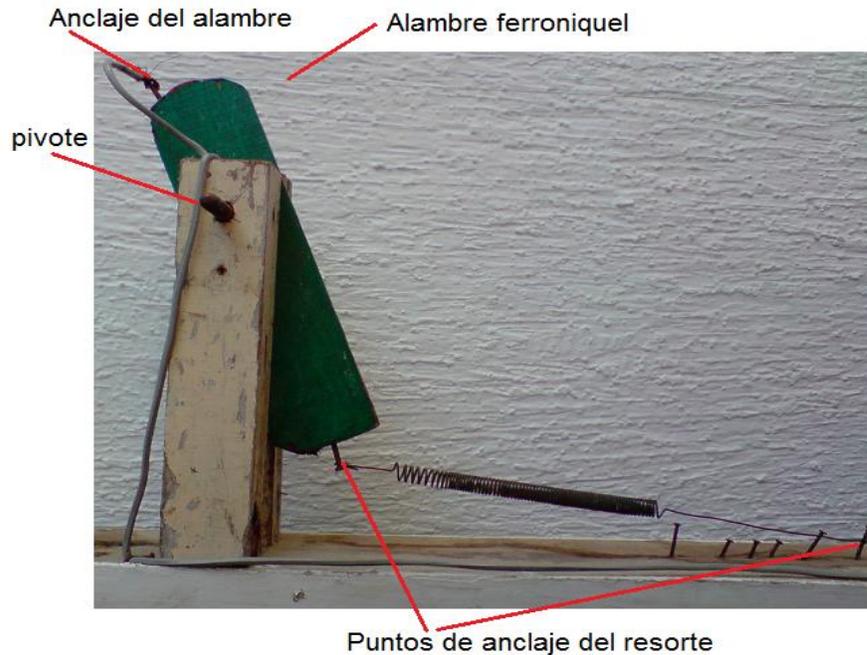
La fuente de poder se debe graduar a 70 Voltios corriente directa. Para este proyecto se cortarán 3 perfiles aerodinámicos.

Se debe tener en cuenta la tensión mecánica a la que debe estar sometido el alambre de ferroníquel, debido a que cuando es sometido a alta temperatura se dilata y su longitud aumenta, aquí es donde entra a jugar el resorte, este resorte debe ser de baja resistencia para que no rompa el alambre cuando éste se caliente.

El resorte debe estar anclado a la tabla base tensionando el alambre levemente, y el otro extremo del resorte estará sujeto al pivote de madera que está articulado en el centro y donde se anida uno de los extremos del alambre.

Para iniciar los cortes el alambre debe estar tensionado en su mínimo valor y al rojo vivo.

Imagen 3 Esquema de armado de marco de corte



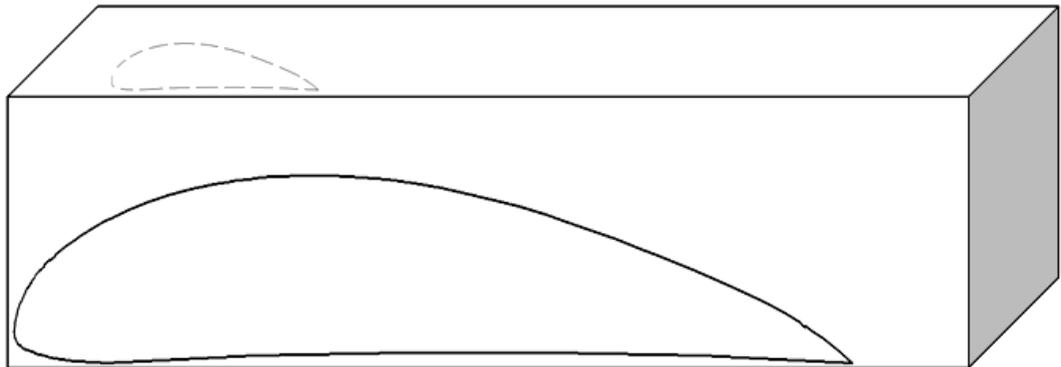
2. Corte de los perfiles de poliestireno expandido

Se recomienda cortar longitudinalmente el bloque poliestireno expandido de medidas 1500mm x 600mm x 200mm en tres partes iguales de 1500mm x 200mm x 200mm antes de realizar el corte del perfil, esto ayudará a que sea mucho más fácil el modelado del álabe.

Para el corte de los álabes se deben elaborar dos plantillas metálicas (pueden ser hechas con lámina de galones de pintura), una para la base y una para el extremo con las formas respectivas según la proporción de 1:0.175 por metro de longitud, estas dos matrices pueden ser obtenidas luego de imprimir y recortar el archivo mostrado en el anexo B y plasmar dichos moldes en la laminilla metálica para su corte final.

Una vez obtenidas las dos plantillas metálicas definitivas, se procede a realizar dos agujeros a cada una donde se introducirán dos clavos de 1", estos clavos permitirán fijar las laminillas a cada extremo de 200mm x 200mm del cubo de poliestireno, para fijar las matrices, se debe tener en cuenta que deben coincidir sobre el mismo plano los ángulos de ataque y sobre el plano adyacente debe ir apoyada la base del perfil, tal como se aprecia en la Figura 2.

Figura 2 Esquema de montaje de laminillas metálicas.



Para cortar los alabes solo se debe apoyar el bloque de poliestireno al alambre caliente hasta que se toquen ambas laminillas metálicas más o menos en el mismo punto de la periferia y empezar a hacer el desplazamiento a una velocidad uniforme todo alrededor.

Estos cortes se deben realizar entre dos personas, es muy importante que los movimientos que hagan sean sincronizados, esto para que el corte sea preciso (ver Imagen 4).

Imagen 4 Perfil de poliestireno expandido definitivo.



Fuente: Elaboración propia

3. Aplicación de fibra de vidrio a los perfiles de poliestireno expandido

Luego de haber cortado los tres perfiles, se procede a recubrir cada uno de ellos con dos capas gruesas de papel con pegamento en toda la superficie de los mismos, esto se hace con el fin de que el catalizador de la fibra de vidrio no entre en contacto directo y disuelva el poliestireno, ya que éste es un químico fuerte y corrosivo; una vez terminado este proceso ubique los modelos para que sequen al sol.

Para la manipulación de la fibra de vidrio y su resina se debe tener mucho cuidado, debe realizarse con guantes pues las fibras de vidrio causan irritación en la piel.

Para aplicar este producto procedemos a esparcir un poco de resina y se va adhiriendo una fina capa de fibras hasta recubrir completamente el modelo, luego de esto se hace todo el proceso nuevamente hasta que se obtenga un espesor que brinde la rigidez deseada (más o menos 2.0mm) (ver Imagen 5).

Durante la aplicación de la fibra de vidrio se debe tallar en la base del perfil una cavidad para cada tuerca de $\frac{3}{4}$ ", luego de incrustar las tuercas se debe asegurar que queden bien firmes a la base y que los orificios se puedan recuperar (aplicar grasa) ya que en ellos es donde se sujetaran los tornillos de sujeción a la base; dichas tuercas deberán ser sujetas con la resina para que queden firmes en su lugar.

Se debe recordar que el remate del borde del perfil y la base debe ser muy bien hecho y se le debe dedicar tiempo y suficiente material ya que en él es donde se concentrarán la mayor parte de los esfuerzos del aerogenerador

Imagen 5 Aplicación de la fibra de vidrio



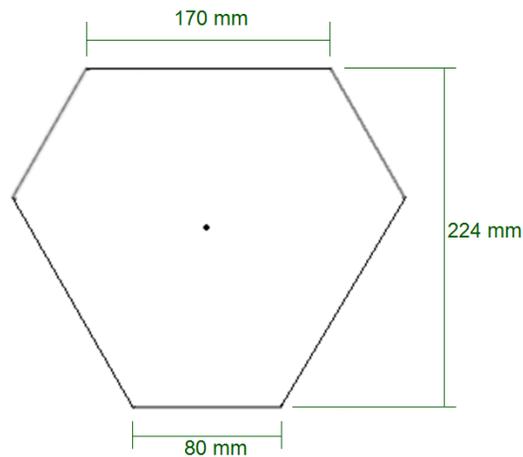
Fuente: Elaboración propia

Luego de aplicar la fibra de vidrio y que ésta se haya secado completamente, debemos pulir toda la superficie de los tres alabes para que quede sin grumos, sin poros y apta para la aplicación de la pintura final.

4. Fabricación de soporte de álabes-eje generador

La fabricación de este elemento debe ser muy cuidadosa, este debe estar completamente balanceada, cada alabe debe estar ubicado a 120 grados de su centro uno de otro como podemos apreciar en el esquema de la Figura 3.

Figura 3 Esquema del soporte alabes-eje generador



Fuente: Elaboración propia.

Esta es la pieza de mayor costo en el aerogenerador debido a que debe mandarse a hacer en una metalistería por medio de corte con pantógrafo en lamina de 3mm de espesor, luego de tener el modelo se deben recortar tres laminas de 80mm x 60mm y tres de 170mm x 60mm en lamina de 3mm de espesor para ser soldadas en los bordes del modelo obtenido anteriormente y así tener conformada la pieza central de soporte de los alabes.

Una vez se tenga esto, se debe identificar el centro del soporte para hacer un agujero de 20mm de diámetro que permitirá introducir el tornillo de fijación, luego, se procede a hacer el corte de la biela del pedal para obtener el cuadrante cónico ver Imagen 6.

Imagen 6. Corte de la biela del pedal



Fuente: Elaboración propia.

Este elemento resultante del corte de la biela es lo que se suelda por la parte externa del soporte de alabes ver Imagen 7. Cuidando de que el lado asiento del tornillo quede visible desde la parte interna el soporte de alabes para posteriormente atornillarlo al eje de la caja de bicicleta.

Imagen 7. Elemento soldado al soporte de alabes



Fuente: Elaboración propia.

5. Soporte del aerogenerador

Este elemento soporta el multiplicador, alternador y cubo. Se compone de una base horizontal, en la parte posterior tiene una caja de bicicleta donde va el plato dentado, frente a este, esta la base vertical del alternador, fabricada en ángulos de $\frac{1}{2}$ "x $\frac{1}{2}$ "x $\frac{3}{16}$ " de hierro, fue diseñada con múltiples agujeros a lo largo de cada paral vertical para la fijación adecuada del alternador. Junto al soporte del alternador encontramos la guía o cola del aerogenerador que fue fabricado en tubo de $\frac{1}{2}$ " de diámetro de acero al carbono. Todos estos elementos fueron soldados y no se pueden dar más especificaciones, cotas o indicaciones al respecto porque la ubicación de los mismos solo depende únicamente de los elementos que el ejecutor pueda conseguir y los cuales pueden diferir tanto en características como en configuraciones (Ver Imagen 8).

Imagen 8. Soporte del aerogenerador



Fuente: Elaboración propia

6. Eje plato dentado

En la caja de bicicleta, se instala el eje que permitirá el movimiento del plato dentado, para la rotación, se deben colocar los respectivos rodamientos y engrasarlos para evitar el desgaste y optimizar la rotación del eje; este eje tiene en ambos extremos un cuadrante cónico que permite el ajuste por interferencia de los cuadrantes hembras de las bielas de pedal (Ver Imagen 9).

Imagen 9. Eje central de la caja de bicicleta instalado



Fuente: Elaboración propia

7. Plato dentado

Este es un plato dentado de bicicleta de fácil consecución, va instalado en el extremo interno del eje en el conjunto, es decir, aquel que está ubicado dentro del conjunto soporte, está fijado a través de un cuadrante cónico y tornillo de apriete concéntrico al eje de la caja; para aumentar la relación y así la generación de energía se utilizará el plato dentado de mayor diámetro. (Ver Imagen 10).

Imagen 10 Instalación del plato dentado

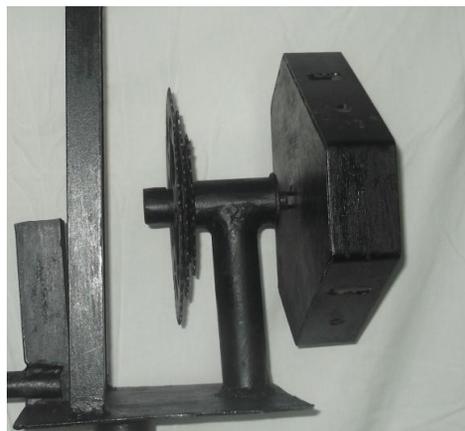


Fuente: Elaboración propia

8. Acople cubo con conjunto base generador

El acople del cubo con el resto del conjunto se hace en el extremo externo del eje en el conjunto soporte, se fija de la misma manera que el plato dentado, con cuadrante cónico y tornillo de apriete concéntrico al eje de la caja, ver Imagen 11.

Imagen 11. Acople cubo con conjunto base generador



Fuente: Elaboración propia

9. Fijación de alternador y cadena

El alternador es puesto en los agujeros ya hechos en el soporte vertical a través de tornillos pasantes de $\frac{1}{4}$ "x1 $\frac{1}{2}$ " , de acuerdo a la longitud de cadena que se va a emplear depende la ubicación de este, la cadena empleada es una cadena de bicicleta.

En el extremo del eje saliente del alternador está ubicado un piñón de bicicleta, este debe quedar alineado respecto al plato dentado. Antes de soldar las bases de alternador y plato dentado, se deben ubicar en la lámina horizontal del conjunto soporte de tal forma que los dientes de ambos piñones queden en el mismo plano para posteriormente fijarse con cordones de soldadura. (Ver Imagen 12).

Imagen 12 Fijación de alternador y cadena



Fuente: Elaboración propia

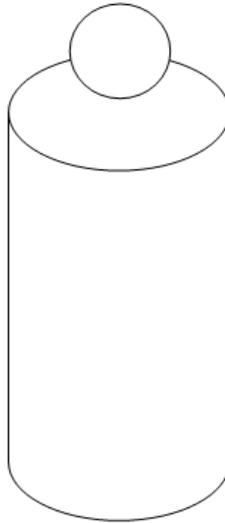
10. Soporte vertical generador eólico

El soporte vertical se hará con tubos de 2" cedula 40. Se debe tener en cuenta que el generador debe estar ubicado en un lugar de una altura igual o mayor a 10 metros, no debe tener elementos a su alrededor que puedan obstaculizar el flujo de viento.

El soporte vertical o mástil estará compuesto por tubo base, al que se le suelda el flanche cuadrado con cuatro agujeros en un extremo y al que se le taladra un agujero radial pasante de 12,7 mm a 100 mm de su otro extremo, tubo de giro con una esfera soldada en el extremo ciego y un agujero de igual características que el del tubo cae en su otro extremo, tubería de unión de 600 mm de longitud a la que se le taladran los mismos agujeros distanciados del centro a 100 mm y entre sí a 200 mm, y dos pernos de ajuste para encastrar ambos mástiles base como extremo junto con el tubo de unión. Ver Imágenes 13, 14 y 15.

Para garantizar que el generador gire y se ubique siempre frente a la corriente de viento, en el extremo del tubo que embona en el tubo que está empotrado a la caja protectora, se coloca una esfera metálica soldada en el centro del tubo, después de haber cegado la salida de ese tubo, esto hace que la superficie de contacto se reduce a un solo punto (esfera y lámina) y hace posible el movimiento rotatorio del aerogenerador (ver Figura 4 e Imagen 13).

Figura 4 Esfera soldada en extremo ciego del tubo



Fuente: Elaboración propia

Imagen 13 Extensión soporte vertical con esfera metálica para reducir superficie de contacto



Fuente: Elaboración propia

Imagen 14 Soporte vertical generador



Fuente: Elaboración propia

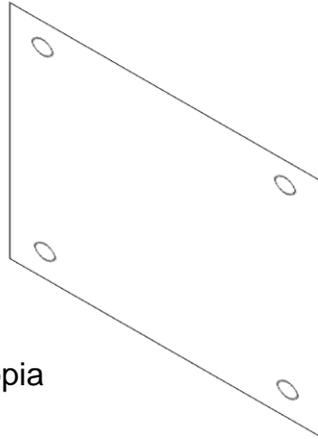
Imagen 15 Tubo de unión



Fuente: Elaboración propia

Para fijarse al suelo se necesita de un flanche o placa con agujeros, que con pernos o chazos de anclaje se sujeten al suelo y pueda darle estabilidad al generador como lo muestra la Figura 5.

Figura 5 Brida base generador eólico

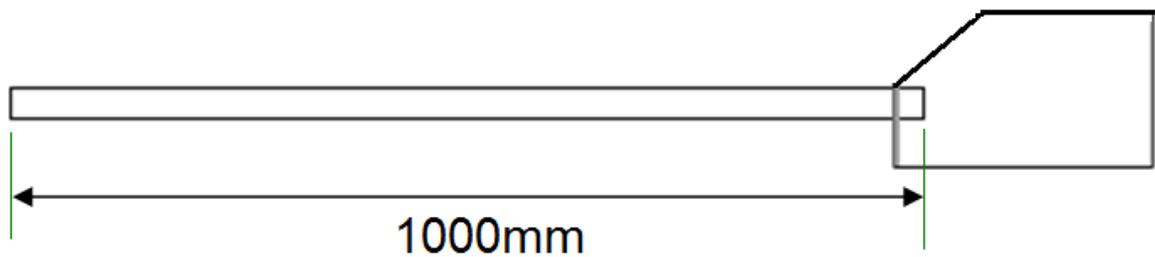


Fuente: Elaboración propia

11. Guía

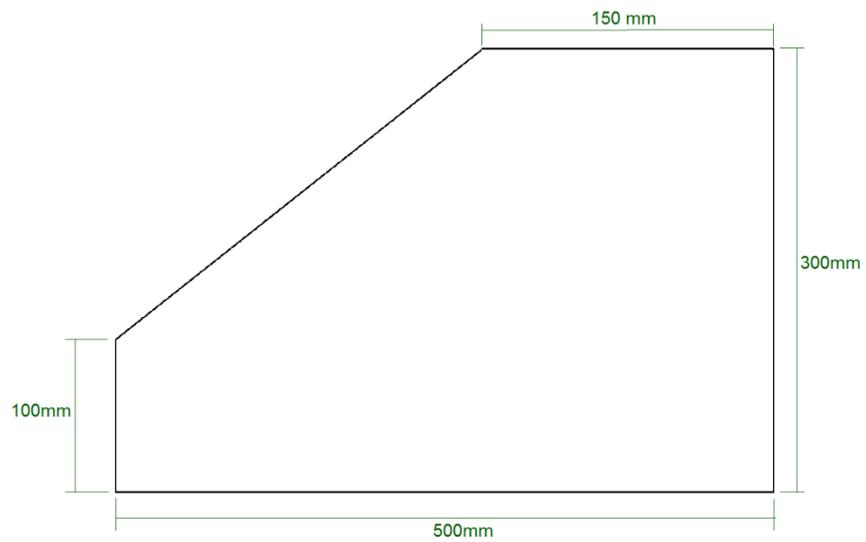
El tubo de soporte de la cola veleta va soldado a el soporte del conjunto del aerogenerador y solo basta fijar la cola de madera que se muestra en el esquema de la Figura 7 la cual está hecha con lámina de madera contrachapada de 5 mm.

Figura 6 Dimensión de la guía



Fuente: Elaboración propia

Figura 7 Dimensiones de la pala de la guía



Fuente: Elaboración propia

12. Ensamblado

Luego de tener todos estos elementos, hechos según las especificaciones que se han dado en este manual, se ensamblan para obtener el generador eólico (ver Imagen 16).

Imagen 16 Generador ensamblado



Fuente: Elaboración propia

ANEXO B. MODELO DEFINITIVO DE PERFILES OBTENIDOS

Imprimir y recortar las siguientes figuras para generar las plantillas metálicas

