

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA APROPIACIÓN TECNOLÓGICA,
DENTRO DEL MERCADO COLOMBIANO,
DE UN AEROGENERADOR DE 400 W.**

**CAROLINA MARÍA DUQUE MEJÍA
LUISA FERNANDA MACÍA SERNA
CATALINA PELÁEZ AGUDELO**

**UNIVERSIDAD EAFIT
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE DISEÑO DE PRODUCTO
MEDELLÍN
2009**

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA APROPIACIÓN TECNOLÓGICA,
DENTRO DEL MERCADO COLOMBIANO,
DE UN AEROGENERADOR DE 400 W.**

**CAROLINA MARIA DUQUE MEJÍA
LUISA FERNANDA MACÍA SERNA
CATALINA PELÁEZ AGUDELO**

Asesor
Msc. JUAN CAMILO HERRERA DELGADO
Ingeniero mecánico
Master en energía

**UNIVERSIDAD EAFIT
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE DISEÑO DE PRODUCTO
MEDELLÍN
2009**

Nota de aceptación:

PRESIDENTE DEL JURADO

Jurado

Jurado

Medellín, octubre 24/2009

Este proyecto de grado va dedicado a nuestras familias, que durante todos estos años han respaldado cada uno de nuestros esfuerzos y han contribuido de múltiples maneras para que todos nuestros proyectos hayan sido posibles

AGRADECIMIENTOS

Mcs. Juan Camilo Herrera Delgado
Asesor del proyecto de grado

David Correa Posada
Estudiante de ingeniería eléctrica y electrónica

Ing. Camilo Jaramillo
Gerente de Hybrytec

Isaac Jaramillo
Encargado de los talleres de Ing. Mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana

Alexander Gil
Encargado del taller de plásticos de la Universidad EAFIT

TABLA DE CONTENIDO

1. RESUMEN.	15
2. INTRODUCCIÓN.	16
2.1. ANTECEDENTES	16
2.2. JUSTIFICACIÓN	20
2.3. OBJETIVO.....	24
2.3.1. Objetivo general.....	24
2.3.2. Objetivos específicos.....	24
2.4. ALCANCE	25
3. VARIABLES RELACIONADAS CON LA ENERGÍA EÓLICA.....	26
3.1. DENSIDAD DEL AIRE, ρ	27
3.2. VELOCIDAD DEL AIRE, v	27
3.3. CLASE Y LONGITUD DE RUGOSIDAD	28
3.4. ALTURA	30
4. METODOLOGÍA.....	31
5. ANÁLISIS DEL MERCADO.....	33
5.1. SITUACIÓN ACTUAL DE LA ENERGÍA EÓLICA A NIVEL MUNDIAL	34
5.2. ESTADO ACTUAL Y PERSPECTIVAS DE LA ENERGÍA EÓLICA DENTRO DEL MERCADO LATINOAMERICANO	35
5.3. ESTADO ACTUAL Y PERSPECTIVAS DE LA ENERGÍA EÓLICA DENTRO DEL MERCADO COLOMBIANO	36
5.3.1. Mercado de la energía eléctrica en Colombia.....	36
5.3.2. Zonas Interconectadas, ZI	39
5.3.2.1 Diagnóstico estadístico ²⁷	39
5.3.2.2 Estructura tarifaria	39
5.3.3. Zonas No Interconectadas (ZNI).....	40
5.3.3.1 Diagnóstico estadístico ²⁷	40
5.3.3.2 Estructura tarifaria	41
5.3.4. Análisis del atlas de vientos colombianos.....	42
5.3.5. Cuantificación del mercado.....	47
6. VIABILIDAD TÉCNICA: PROCESO DE INGENIERÍA INVERSA.....	49

6.1. DEFINICIÓN TÉCNICA DE UNA TURBINA EÓLICA.....	49
6.1.1. Definición y descripción general de una turbina eólica	49
6.1.1.1 Aspas	50
6.1.1.2 Generador	51
6.1.1.3 Multiplicador	52
6.1.2. Definición y descripción general de la conexión eléctrica necesaria para proveer la energía utilizable por el usuario	54
6.2. ENERGÍA EÓLICA	56
6.3. FUNCIONAMIENTO DE UNA TURBINA EÓLICA	56
6.4. CAJA NEGRA DEL SISTEMA.....	57
6.5. ESTRUCTURA DE FUNCIONES PARCIALES	58
6.6. ESTRUCTURA FUNCIONAL SISTEMA.....	59
6.7. SÍNTESIS FUNCIONAL	60
6.8. TURBINA EÓLICA ORIGINAL: AIR X 400W	61
6.8.1. Justificación técnico-económica para la selección de la turbina AIR X 400W.....	61
6.9.1. Hybrytec. Sistemas híbridos de energía	64
6.9.2. Características de la turbina usada para la apropiación tecnológica; Air X 400W.....	64
6.10. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO, REQUERIMIENTOS Y CRITERIOS DE ÉXITO	66
6.11. MATRIZ MORFOLÓGICA.....	69
6.12. EVALUACIÓN Y SELECCIÓN.....	71
6.12.1. Rotor.....	71
6.12.2. Aspas	71
6.12.3. Acople del generador	72
6.12.4. Carcasa y cola.....	72
6.13. PROCESO DE INGENIERÍA INVERSA Y REINGENIERÍA.....	73
6.13.1. Evaluación de alternativas para el generador.....	79
6.13.1.1 Investigación de alternativas de generadores para la selección del generador final	87
6.14. GENERADOR SELECCIONADO	91
6.15. Ensayos en el túnel de viento	100
6.15.1. Especificaciones del túnel de viento de la Universidad Bolivariana.....	100

6.15.2.	Resultados de las pruebas en túnel de viento	101
6.16.	DESARROLLO TÉCNICO DE LA TURBINA FINAL	101
6.16.1.	Modelación	101
6.16.2.	Planos	104
6.16.3.	Tareas y tiempos estimados para el ensamble	112
7.	VIABILIDAD ECONÓMICA.....	113
7.1.	ESTIMADO DE COSTOS DE FABRICACIÓN DE LA TURBINA FINAL	113
7.2.	ANÁLISIS ECONÓMICO.....	115
8.	CONCLUSIONES.....	116
9.	RECOMENDACIONES.	118
10.	BIBLIOGRAFÍA.	120

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Capacidad efectiva por tecnología en MW en Colombia.....	19
Tabla 2. Potencial eólico de la Costa Atlántica colombiana ⁷	19
Tabla 3. Uso y aplicaciones de las diferentes alternativas energéticas	23
Tabla 4. Posibilidades de uso de energía eólica a partir de la velocidad del viento	28
Tabla 5. Clases de rugosidad	29
Tabla 6. Rangos de rugosidad según la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) de Colombia	30
Tabla 7. Valores típicos asociados al parámetro de rugosidad según el tipo de terreno	30
Tabla 8. Top 10 de países con mayor capacidad instalada al 2008	34
Tabla 9. Potencial eólico estimando en Latinoamérica	35
Tabla 10. MW Instalados en Latinoamérica en los años 2008 y 2009	35
Tabla 11. Crecimiento de la capacidad instalada.....	36
Tabla 12. Potencia eólica y velocidad registradas en los mapas mensuales que ilustran el comportamiento del viento en Colombia a 20 metros de altura	44
Tabla 13. Municipios colombianos que cuentan con vientos de velocidades superiores a 5 m/s a 20 m de altura.....	46
Tabla 14. Potencial eólico y población (cantidad de hogares)	48
Tabla 15. Especificaciones técnicas de la turbina Air X 400W	64
Tabla 16. Especificaciones de Diseño de Producto, PDS.....	69
Tabla 17. La matriz morfológica.....	70
Tabla 18. Matriz de evaluación: Rotor	71
Tabla 19. Matriz de evaluación: Aspas	72
Tabla 20. Matriz morfológica: Acople del generador.....	72
Tabla 21. Matriz morfológica: Carcasa y cola	72
Tabla 22. Resultados de las Matrices morfológicas.....	73
Tabla 23. Comparación de las aspas.....	75
Tabla 24. Comparación del rotor.....	76
Tabla 25. Comparación del eje del rotor	76
Tabla 26. Comparación del eje del generador	77
Tabla 27. Comparación del eje del regulador	77
Tabla 28. Comparación del soporte del sistema	78
Tabla 29. Comparación del eje de la torre	78
Tabla 30. Comparación de la carcasa	79
Tabla 31. Potencia y consumo mensual requeridos para suplir las necesidades del usuario	80
Tabla 32. Velocidad del viento, revoluciones por minuto, potencia eólica, voltaje y corriente.....	83
Tabla 33. Relación velocidad del viento y velocidad de giro del generador.....	84

Tabla 34. Resumen de requerimientos de salida para la carga de las baterías según las necesidades del usuario	86
Tabla 35. Resultados pruebas AMETEK 50 VDC ref: 116150-02.....	90
Tabla 36. Resultados pruebas motor AMETEK Ref: 116480-00.....	90
Tabla 37. Resumen de resultados de las pruebas realizadas a los motores	91
Tabla 38. Resultados de la prueba eléctrica sobre generador final	95
Tabla 39. Velocidad de viento, rpm, corriente y voltaje del motor Ametek 30 VDC	97
Tabla 40. Potencia del sistema con un motor Ametek 30 VDC	98
Tabla 41. Posible energía mensual para la turbina desarrollada	99
Tabla 42. Energía mensual producida por una Air X utilizando el programa de cálculo de la asociación danesa de energía eólica	100
Tabla 43. Tareas y tiempos estimados para el ensamble	112
Tabla 44. Costo de las piezas de la turbina	113
Tabla 45. Costos fijos y variables	114
Tabla 46. Características económicas del proyecto.....	114
Tabla 47. Análisis económico	115

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplo de perfil de velocidad para una longitud de rugosidad de 0,1 m.....	28
Figura 2. Esquema metodológico	32
Figura 3. Consumo de energía por sector	36
Figura 4. Demanda nacional de energía (GWh-año)	37
Figura 5. Capacidad instalada y generación de energía eléctrica en Colombia	37
Figura 6. Capacidad efectiva por tecnología en MW a diciembre 31 de 2008	38
Figura 7. Zonas Colombianas: Interconectadas y No Interconectadas.....	38
Figura 8. Precio de la energía eléctrica en Colombia durante los últimos 4 años..	40
Figura 9. Zonas No Interconectadas de Colombia ³¹	41
Figura 10. Estaciones meteorológicas que miden dirección y velocidad del viento	43
Figura 11. Promedio multianual de la potencia o densidad de la energía eólica a 20 de altura	45
Figura 12. Generador de corriente continua (dínamo).....	51
Figura 13. Generador de corriente alterna (alternador)	52
Figura 14. Estructura de un tren planetario.....	53
Figura 15. Multiplicador de poleas	54
Figura 16. Conexión eléctrico para el uso de la energía por el usuario	54
Figura 17. Componentes de un sistema de energía eólica.....	57
Figura 18. Caja negra del sistema	57
Figura 19. Subsistemas de la caja negra	58
Figura 20. Funciones principales de sistema un de energía eólica.....	59
Figura 21. Estructura funcional del sistema	59
Figura 22. Función del aeromotor de 3 aspas	60
Figura 23. Función del eje principal y el acople al generador	60
Figura 24. Función del multiplicador	60
Figura 25. Función del generar eléctrico.....	61
Figura 26. Función de la batería	61
Figura 27. Curva de potencia.....	65
Figura 28. Corriente del aerogenerador en función de la velocidad del viento	66
Figura 29. Velocidad del viento vs. energía mensual con distribución Rayleigh K=2	66
Figura 30. Plano en explosión de la turbina AIR X 400W	73
Figura 31. Plano del aspa	74
Figura 32. Gráfica Velocidad del viento vs. Energía mensual producida	81
Figura 33. Gráfica velocidad del viento vs. Revoluciones del generador	84
Figura 34. Gráfica velocidad del viento vs. Potencia, voltaje y corriente	85
Figura 35. Selección del generador según los requerimientos	85
Figura 36. Entrada instantánea de las baterías	86
Figura 37. Voltaje resultante de un alternador modificado.....	88

Figura 38. Corriente resultante de un alternador modificado	88
Figura 39. Curva de potencia y voltaje del alternador modificado DC-520	92
Figura 40. Vista y dimensiones principales del alternador modificado DC-520	93
Figura 41. Voltaje y Corriente vs. rpm.....	95
Figura 42. Potencia vs. rpm	96
Figura 43. Comparación de la curva de potencia de prueba vs. La del fabricante	96
Figura 44. Motor AMETEK 30 VDC	97
Figura 45. Curva de potencia del motor Ametek 30 VDC	98
Figura 46. Modelación 3D	102

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1. Turbina AIR X 400W	65
Imagen 2. Aspa.....	74
Imagen 3. Rotor	74
Imagen 4. Pruebas de alternadores.....	87
Imagen 5. Exploración y reconocimiento del alternador desarmado para análisis de opciones de modificación.....	89
Imagen 6. Alternador modificado DC-520.....	92
Imagen 7. Secuencia de pruebas eléctricas	94
Imagen 8. Pruebas encendido bombillos, cada uno de 4,6 Amperios	94
Imagen 9. Pruebas en el túnel de viento.....	101

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Consumo promedio de aparatos electrodomésticos	122
Anexo 2. Especificaciones técnicas de la turbina AIR X 400W	124
Anexo 3. Mapas de viento de la velocidad a 10 m y de la densidad a 50 m	125
Anexo 4. Deducción de la fórmula para hallar la velocidad de rotación del eje del generador en función de la velocidad del viento y la velocidad específica de la turbina.....	127

1. RESUMEN.

Este proyecto se desarrolla como trabajo de grado para la carrera Ingeniería de diseño de producto, enmarcándose dentro de las áreas de la ingeniería inversa, desarrollo sostenible y producción. Su objetivo principal es el de estudiar la factibilidad técnica y económica de realizar la apropiación tecnológica de un pequeño aerogenerador de 400 W, para ser utilizado en zonas no interconectadas del país donde las condiciones de viento sean propicias.

El proyecto nace impulsado por la preocupación creciente a nivel mundial, de buscar recursos y alternativas energéticas que tengan un menor impacto ambiental y, que además, den solución a la necesidad de ampliar la oferta energética de una región o país.

A partir de un análisis del mercado se determinó qué tipo de clientes podrían estar más interesados en esta forma de energía, qué necesidades se pretendían cubrir y qué equipo se ajustaba mejor a estos requerimientos, encontrando que la solución energética de una pequeña vivienda, estaba representada en lograr el funcionamiento de cuatro bombillas, un radio, un ventilador y un televisor (32,25 kW-h/mes). Basándose en lo anterior, se buscó una turbina eólica que tuviera las condiciones para lograr satisfacer los requerimientos energéticos mencionados y, a través de Hybrytec¹, se consiguió la turbina AIR X 400W para ser utilizada como base del estudio y de la apropiación; esta turbina tiene un estimado de generación mensual de 32 kW-h/mes para una velocidad promedio de 5,3 m/s.

Teniendo la turbina base para el análisis, se realizó un proceso completo de ingeniería inversa, con la idea de sustituir ciertos componentes mecánicos, eléctricos y materiales, para disminuir los costos, poder ofrecer una solución económicamente viable y suplir las necesidades básicas de zonas que no cuentan con acceso al Sistema Interconectado Nacional.

Se encontró que es posible generar a precios competitivos (entre 420 y 1.350 \$/kW-h) comparados con aquellos de las zonas no interconectadas (700 y 1.300 \$/kW-h) aún con turbinas de tamaño pequeño.

¹Hybrytec: Empresa para el desarrollo de energías alternativas en Colombia; www.hybrytec.com

2. INTRODUCCIÓN.

2.1. ANTECEDENTES

En Colombia, solo en los últimos años se ha comenzado a dar importancia al asunto ambiental, pero indiscutiblemente a nivel mundial es cada vez más creciente la preocupación por este tema y la búsqueda de soluciones y de vías alternativas que tengan un menor impacto y, que además, den solución a la necesidad de ampliar la oferta energética de una región o país.

Por otro lado, gracias a las investigaciones realizadas y a la problemática que se está presentando respecto a la contaminación del aire y los cambios climáticos en el planeta, se decidió desarrollar un trabajo de grado enfocado en establecer la posibilidad de apropiación tecnológica de un aerogenerador de 400 W. (aerogeneradores pequeños) para un contexto colombiano, con el fin de facilitar la incursión en Colombia de este tipo de tecnologías, que no solo ofrece beneficios a nivel ambiental, sino que también lo hacen a nivel económico y social.

Debido a que se va tener en cuenta la energía eólica para el desarrollo del proyecto, resulta importante retomar su definición.

Energía eólica²: El viento es aire en movimiento, una forma indirecta de la energía solar, este movimiento de las masas de aire se origina por diferencia de temperatura causada por la radiación solar sobre la tierra. Cuando el aire se calienta, su densidad se hace menor y sube, mientras que las capas frías descienden, así se establece una doble corriente de aire.

La energía eólica puede transformarse principalmente en energía eléctrica por medio de aerogeneradores, o en fuerza motriz empleando molinos de viento.

Como cualquier sistema o tecnología, los sistemas de turbinas eólicas como tal cuentan con desventajas y ventajas, las cuales serán mencionadas a continuación:

²Ministerio de educación, Colombia, enero de 2007:
<http://www.mineducacion.gov.co/cvn/1665/article-117028.html>

DESVENTAJAS³:

- La energía eólica varía constantemente con el tiempo por la intermitencia del viento. Por tal motivo si se quiere que una turbina eólica cubra la totalidad de la demanda energética de un lugar específico, es indispensable que se cuente con un sistema de almacenamiento el cual puede ser un juego de baterías de buena capacidad, además que las condiciones meteorológicas del lugar en donde operará el sistema sean las indicadas.
- El pretender satisfacer altas demandas energéticas exige implementar turbinas eólicas muy grandes; desde el punto de vista estético el tamaño de los grandes generadores produce un impacto visual inevitable, con la consecuente alteración sobre el paisaje.
- La muerte de aves en accidentes contra las palas de los aerogeneradores ha sido uno de los temas más polémicos sobre la compatibilidad ambiental de esta tecnología. Por ello es importante adelantar estudios sobre la presencia de hábitats o corredores para la localización de parques eólicos. Es de anotar que este impacto es cada vez menor debido a la baja velocidad de rotación de las grandes máquinas modernas.
- Aunque se habla del ruido como impacto ambiental, los aerogeneradores modernos han reducido considerablemente sus emisiones, llegando a niveles casi imperceptibles para el hombre a distancias del orden de 100 m.
- Colombia no cuenta con datos de vientos para análisis energéticos, es necesario usar datos destinados para otros usos para tener una idea inicial.

VENTAJAS³:

- Es una fuente de energía renovable e inagotable que cada vez gana mayor competitividad en el sector eléctrico para la producción de energía a gran escala, ampliando de esta forma las alternativas de suministro y optimización de la canasta energética de un país o región.
- La energía eólica es limpia y compatible con el ambiente, no contamina y puede frenar parcialmente el uso y agotamiento de combustibles fósiles, contribuyendo a evitar el cambio climático, ya que generar energía eléctrica sin que exista un proceso de combustión conlleva a una reducción de emisiones de gases efecto invernadero.

³Empresas públicas de Medellín EPM;
http://www.epm.com.co/epm/institucional/energia/infra_infra_genera_enoper_perqjepi_eolica_02.html?id=2

- La distribución espacial de aerogeneradores se adapta fácilmente a las condiciones, restricciones y usos del terreno, no ocupa grandes espacios y es compatible con otros usos del suelo como agricultura, ganadería y pastoreo.
- En comparación con proyectos energéticos convencionales, la planificación y construcción de instalaciones eólicas requieren períodos de gestación muy cortos.
- La utilización de la energía eólica para la generación de electricidad no presenta incidencias sobre las características fisicoquímicas del suelo o su erosionabilidad, ya que no se produce ningún contaminante, ni requiere de grandes movimientos de tierra.
- Los proyectos de energía eólica responden con mayor flexibilidad al incremento de la demanda energética, pues un parque eólico existente puede ampliarse fácilmente con la incorporación de nuevas turbinas.
- Al finalizar la vida útil de la instalación, su desmantelamiento no deja huellas.
- Es una tecnología de aprovechamiento madura, que ha resuelto muchos de sus inconvenientes asociados a costos e impactos ambientales, y que ofrece grandes posibilidades de desarrollo para mejorar y abaratar su desempeño.

Por otro lado, existen factores externos al sistema de turbina eólica, como son: los geográficos, los gubernamentales (legales) y los económicos; que pueden llegar a incrementar las ventajas y oportunidades que ofrece la implementación de este tipo de sistemas dentro de un país como Colombia, dichas ventajas y oportunidades pueden resumirse en: económicas, sociales y de desarrollo, y se encuentran directamente relacionadas.

En Colombia la producción de energía primaria² proviene de la hidroelectricidad (ver Tabla 1. Capacidad efectiva por tecnología en MW en Colombia), por la abundancia de agua en la mayoría de zonas del país, sin embargo, esto hace que el sistema sea vulnerable a fenómenos hidrolimáticos que pueden, en algún momento, llegar a restringir la disponibilidad del agua, como sucedió en años pasados⁴ (1991-1992, 1997-1998, 2002-2003 y 2006) con el Fenómeno del Niño (alteración en el patrón de lluvia y temperatura en gran parte del planeta generada por el calentamiento del Océano Pacífico)⁵.

⁴Ciencia, tecnología y medio ambiente. Vuelve el fenómeno del niño. 26 de julio de 2009. <http://teknociencia.wordpress.com/2009/07/26/vuelve-el-fenomeno-del-nino/>

⁵Instituto de Energía, Universidad Nacional de Colombia. *Energía eólica en Colombia: Una aproximación desde las opciones reales.* http://simon.uis.edu.co/WebSIMON/Eventos/Encuentro_2004/trabajos/11/documento/11.pdf

Tipo de tecnología	Capacidad efectiva	% de participación
Térmica de Gas	3.702 MW	27,5%
Térmica a Carbón	700 MW	5,2%
Hidráulica	8.994 MW	66,9%
Eólica	18 MW	0,1%
Cogeneración	26 MW	0,2%
Total	13.440 MW	100%

Tabla 1. Capacidad efectiva por tecnología en MW en Colombia⁶

En Colombia, el Gobierno Nacional en los últimos años ha generado políticas que estimulan 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 limpio². Además, el gobierno reconoce que "Cada peso que se pague de más en una empresa pública por el consumo de energía, es un peso menos para la gestión social"⁷.

Por otro lado, Colombia cuenta con áreas que poseen gran potencial (factible de estudio) para la generación de energía eólica, un ejemplo de esto es la zona norte colombiana, que por su posición geográfica, cuenta con las mejores potencialidades para generar este recurso.

Poder potencial eólico en regiones de la Costa Atlántica de Colombia, 10 m de altura	
Lugar	Poder eólico en kilowatt por hora por metro cuadrado por año (kWh/m ² /yr)
Cabo de la Vela	3.043
San Andrés	2.182
Providencia	1.727
Rioacha	829
Soledad	633
Cartagena	587
Valledupar	502

Tabla 2. Potencial eólico de la Costa Atlántica colombiana⁷

Además, en Colombia, 60% de los 40 millones de habitantes vive en zonas no conectadas a la red energética nacional, y el país ya se encuentra en condiciones de emplear fuentes de energía alternativas a la petrolera y la hidroeléctrica⁸, las

⁶ Unidad de Planeación Minero Energética, UPME. Plan de expansión energía eléctrica: Generación-Transmisión 2009-2023, abril de 2009.

http://www.upme.gov.co/Docs/Plan_Expansion/2009/Plan_Expansion_2009-2023.pdf

⁷ *Más consumo de energía menos gestión social*, diciembre de 2007: <http://www.minambiente.gov.co/contenido/contenido.aspx?conID=1260&catID=499>

⁸ GARCÍA, María Isabel. COLOMBIA: Energía eólica augura desarrollo: <http://www.tierramerica.net/2003/1202/noticias1.shtml>

cuales permitirán garantizar la instalación de infraestructura de servicios domiciliarios a las comunidades más necesitadas.

Otra razón que motiva la utilización de estos sistemas de energía, es la implementación de iniciativas como la de las viviendas ecológicas, las cuales buscan ahorrar agua y energía en un 30%, fomentando el uso de sistemas para aprovechar luz natural, agua de lluvia, energía solar y energía eólica en nuevas viviendas, y que tengan además instalaciones sanitarias de menor consumo⁹.

La iniciativa busca que se implemente el Estándar Único de Construcción Sostenible (EUCS), una medida técnica internacional con la que los constructores se comprometen a emplear tecnologías más limpias que ayuden al medio ambiente. La coordinación de la correcta aplicación de esta norma técnica estaría a cargo del Consejo Colombiano de la Construcción Sostenible y se encargaría, además, de capacitar en tecnologías limpias a las autoridades distritales y a los constructores⁹. En América Latina, sólo dos países tienen certificados sus procesos de construcción en este sentido. Y otros cinco, entre ellos Colombia, están en ese trámite.

Comparativamente, expertos de la Asociación Europea de la Energía Eólica esperan que los costos de este tipo de energía disminuyan un 40% para el viento generado de la costa hacia el mar y un 20% para el viento generado desde el mar hacia la costa entre los años 2003 y 2020¹⁰.

Por último, resulta importante resaltar el hecho de que los tratados, convenios y protocolos, tienen dentro de sus ítems incentivar y promocionar la investigación y desarrollo de formas nuevas y renovables de energía.

2.2. JUSTIFICACIÓN

Con el pasar del tiempo y el consumo irracional de recursos naturales, la humanidad, o por lo menos cierto porcentaje de ésta, se encuentra cada vez más preocupada por controlar este consumo desmedido que ha venido agotando, de manera acelerada e incontrolable, gran parte de los recursos del planeta.

Este cambio de actitud frente a la mala utilización y abuso de los recursos naturales se ha venido gestando en el mundo aproximadamente desde los años 70, con la creación de convenios, movimientos y grupos de personas con la convicción de que pequeños cambios pueden hacer la diferencia¹¹, ejemplos de

⁹Viviendas sostenibles en Colombia, mayo de 2008: http://www.eltiempo.com/bogota/2008-05-10/ARTICULO-WEB-NOTA_INTERIOR-4154137.html

¹⁰Energía eólica zonas colombianas. <http://redenergiaalternativa.org/viento.html>

¹¹Greenpeace: <http://www.greenpeace.org/international/about/history>

esto, son la Organización Internacional Greenpeace², la cual se encuentra constituida desde 1971 y el Convenio de Viena¹², adoptado, a nivel mundial, en 1985. Sin embargo, este tipo de consciencia solo comenzó a darse en los países latinoamericanos a mediados de los años 90.

Particularmente, si se hace referencia a los problemas relacionados con el aire y al cambio de temperatura del planeta, se puede establecer que los principales son: la reducción de la capa de ozono, el calentamiento global y el efecto invernadero. Y se ha determinado que estos problemas se encuentran relacionados entre sí debido a que los tres se presentan por la emisión de ciertos gases, siendo, los siguientes seis, los principales: Dióxido de carbono (CO₂), Metano (CH₄), Óxido nitroso (N₂O), Hidrofluorocarbonos (HFC), Perfluorocarbonos (PFC) y Hexafluoruro de azufre (SF₆).

Esto gases tienen sus principales fuentes¹³ en:

- **Las diferentes formas de producir energía:** Quema de combustible (industrias de energía, industria manufacturera y construcción, transporte, entre otros).
- **Los procesos industriales:** Productos minerales. Industria química. Producción de metales. Producción de halocarbonos y hexafluoruro de azufre. Consumo de halocarbonos y hexafluoruro de azufre.
- **Utilización de disolventes y otros productos.**
- **Agricultura:** Fermentación entérica. Aprovechamiento del estiércol. Cultivo del arroz. Suelos agrícolas. Quema prescrita de sabanas. Quema en el campo de residuos agrícolas.

Y es por esto, que el 11 de diciembre de 1997 fue firmado un acuerdo internacional, denominado el Protocolo de Kyoto sobre el cambio climático¹³; con el cual, los países industrializados se comprometieron a reducir las emisiones de los seis gases, provocadores de los problemas en el aire y los cambios climáticos, en un 5% aproximadamente dentro de un periodo comprendido entre el 2008 y el 2012, en comparación a las emisiones del año 1990. Este protocolo tomó como base para su desarrollo el Protocolo de Montreal, el cual fue suscrito en 1987 y en la actualidad cuenta con 180 naciones comprometidas a cumplir con sus metas de reducción en la producción de gases CFC (clorofluorocarbón), halones y bromuro

¹²Viceministerio del Medio Ambiente, Colombia; Convenio de Viena: <http://www.minambiente.gov.co/contenido/contenido.aspx?conID=746&catID=233>

¹³Protocolo de Kyoto, versión en español: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>

de metilo, cuya presencia en la atmósfera es considerada la principal causa del adelgazamiento en la capa de ozono¹⁴.

El Protocolo de Montreal¹⁵, entró en vigor para Colombia el 6 de Marzo de 1994 bajo la ley 29 de 1992, se encuentra actualmente aceptado por 191 países y busca fijar plazos máximos para la eliminación de la producción y consumo de las principales sustancias agotadoras de la capa de ozono.

Según La Unidad de Planeación Nacional Minero Energética (UPME)², las energías renovables cubren actualmente cerca del 20% del consumo mundial de electricidad, y son: Energía solar. Energía eólica. Energía de biomasa. Energía hidráulica. Energía de los océanos. Energía geotérmica.

- **Energía solar²:** Se usa como fuente la radiación solar que llega a la tierra mediante la captación de luz y calor.
- **Energía eólica²:** La energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire, y que es transformada en otras formas útiles para las actividades humanas. La energía eólica puede transformarse principalmente en energía eléctrica por medio de aerogeneradores, o en fuerza motriz empleando molinos de viento.
- **Energía de biomasa²:** Es cualquier material de tipo orgánico proveniente de seres vivos que puede utilizarse para producir energía. Puede transformarse en energía por combustión directa, por transformación mediante gasificadores o por medio de biodigestores en el caso de desechos orgánicos de animales.
- **Energía hidráulica²:** Es aquella que usa como fuente, la fuerza del agua de ríos y lagos. Se transforma mediante las plantas de generación hidráulica y genera electricidad.
- **Energía de los océanos²:** Los océanos cubren más del 70% de la energía terrestre. En ellos se pueden encontrar dos tipos de energía: la térmica que proviene del calentamiento solar y la mecánica a partir de las mareas y las olas.
- **Energía geotérmica²:** Proviene del calor procedente del centro de la tierra. Se transforma mediante perforaciones muy profundas para usar la fuerza calorífica bajo la superficie de la tierra para producir electricidad.

¹⁴Tierramérica: Medio ambiente y desarrollo. El protocolo de Montreal.
<http://www.tierramerica.net/2002/0922/conectate.shtml>

¹⁵Protocolo de Montreal en Colombia:
<http://www.minambiente.gov.co/contenido/contenido.aspx?conID=1676&catID=233>

ALTERNATIVA ENERGÉTICA	USO Y APLICACIONES
Energía solar	Problemas de electrificación rural. Sistemas de calefacción, destilación, evaporación, control de heladas y fotosíntesis. Energía solar térmica y fotovoltaica.
Energía eólica	Energía eléctrica es la aplicación más frecuente, pero que obliga a su almacenamiento o a la interconexión del sistema de generación autónomo con la red de distribución eléctrica. De forma autónoma (sin batería) se emplean para satisfacer las necesidades de pequeñas comunidades o de tareas agrícola: bombeo de agua y riego, acondicionamiento y refrigeración de almacenes, refrigeración de productos agrarios, secado de cosechas, calentamiento de agua, acondicionamiento de naves de cría de ganado, alumbrado y usos eléctricos diversos.
Energía de biomasa	Aplicación directa: Es la forma de uso tradicional en la que se obtiene energía mediante combustión directa, es decir, la biomasa (residuos y cultivos energéticos) se utiliza como combustible. Aplicación indirecta: Mediante una serie de técnicas de transformación, se convierte en nuevos recursos energéticos, productos industriales sustitutivos de los combustibles fósiles.
Energía hidráulica	Generación de electricidad a nivel doméstico o industrial.
Energía de los océanos	En términos generales, la energía extraída de los océanos presenta muchas semejanzas con el aprovechamiento de las corrientes de aire (energía eólica), ya que se trata de fluidos en movimiento. Entre las formas más estudiadas se encuentran: La energía de las mareas, la energía de las olas, empleo de las corrientes marinas con fines energéticos y producción de energía por diferencias de temperatura en los océanos. Todas estas iniciativas, salvo experiencias que aprovechan los cambios de energía potencial entre mareas, están en etapas de investigación, por lo tanto, aún no son una alternativa real de abastecimiento energético. La utilización de estos recursos no ha sido probada en electrificación rural; sin embargo, la investigación apunta a un mayor desarrollo y posibles usos en el futuro.
Energía geotérmica	Gran uso doméstico, uno de ellos se relaciona con la calefacción y la obtención de agua caliente; estos procesos pueden llevarse a cabo mediante un sistema de captación y una bomba de calor. De la misma forma puede servir para refrigerar, ya que la energía geotérmica puede absorber el calor del ambiente a 40°C y desplazarlos al subsuelo mediante el mismo sistema de captación.

Tabla 3. Uso y aplicaciones de las diferentes alternativas energéticas

En resumen, puede decirse que este proyecto se encuentra justificado desde diversos puntos de vistas, estos son:

- Dar solución a los problemas de energía eléctrica con los que cuentan las zonas no interconectadas y que cuentan con las características geográficas y climáticas adecuadas para la generación energía eólica.

- Disminuir la dependencia que Colombia tiene actualmente de la energía hidráulica (66,9%, ver Tabla 1. Capacidad efectiva por tecnología en MW en Colombia).
- Contribuir al cumplimiento de los diferentes protocolos y acuerdos de tipo ambiental generados con la intención de obtener una reducción de emisiones a nivel mundial y con los cuales Colombia se encuentra comprometido.

2.3. OBJETIVO

2.3.1. Objetivo general

Establecer la factibilidad técnica y económica de la apropiación tecnológica para el mercado colombiano de una turbina de 400 Watts, Air X realizando un análisis técnico-económico, de fabricación, del entorno, de mercado y de funcionamiento.

2.3.2. Objetivos específicos

- Recopilar información acerca de sistemas de turbinas eólicas y la problemática del sector por medio de revisión de papers, libros, revistas, catálogos, internet, y demás investigaciones; con el fin de identificar y establecer las especificaciones del diseño de producto (PDS).
- Generar una metodología que permita lograr un análisis adecuado de los subsistemas, un desarrollo ordenado del proyecto y unas conclusiones confiables.
- Hacer un análisis del contexto colombiano con el fin de establecer posibles mercados para la venta y distribución del sistema eólico y determinar las necesidades específicas de estos.
- Desarrollar un proceso de ingeniería inversa del sistema de un aerogenerador de 400 W.
- Hacer una evaluación financiera del proyecto que permita visualizar la viabilidad económica del proyecto, comparando el valor de la energía generado con la turbina y el precio de generación en zonas no interconectadas.
- Determinar si la apropiación tecnológica del sistema es viable dentro del mercado colombiano establecido, a partir de los resultados obtenidos.

- Construir un modelo funcional del sistema de turbina eólica resultante en escala 1:1.
- Generar un informe que especifique los diferentes aspectos que hacen viable o no (según los resultados obtenidos) la implementación del sistema de turbina eólica estudiado dentro del mercado colombiano seleccionado.

2.4. ALCANCE

- Proceso de investigación que permita establecer el mercado objetivo.
- Presentación del proceso de análisis de ingeniería inversa.
- Modelación 3D, planos de taller y de ensamble del sistema alcanzado.
- Análisis de posibles materiales y procesos a implementar en la fabricación del sistema.
- Resultados de viabilidad técnica y evaluación financiera.
- Resultados de pruebas estáticas y dinámicas (funcionamiento y eficiencia de la turbina) sobre el modelo funcional.
- Modelo funcional en escala 1:1 del sistema de turbina eólica.

3. VARIABLES RELACIONADAS CON LA ENERGÍA EÓLICA.

La energía aprovechable por un Aerogenerador es proporcional a la densidad del Aire, a la superficie en contacto con el viento (es decir, al área de barrido del aspa del aerogenerador, πR^2) y el cubo de la velocidad¹⁶.

$$E = P_{eólica} \times t$$

Donde:

E: Energía producida

P: Potencia eólica máxima

t: Tiempo

La potencia eólica está determinada por:

$$P_{eólica} = \frac{1}{2} \rho \times A \times v^3$$

Dejándolo por unidad de área, la ecuación quedaría:

$$P_{eólica} / A = \frac{1}{2} \rho \times v^3$$

Donde:

$P_{eólica}$: Potencia eólica (W)

ρ : Densidad del aire (kg/m^3)

v: Velocidad del aire (m/s)

A: Área (m^2)

Manejo de unidades:

$$P_{eólica} = \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^3 = \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times \frac{\text{m}^3}{\text{s}^3} = \frac{\text{Kg}}{\text{s}^3} \times \frac{\text{m}^2}{\text{m}^2} = \frac{\text{Kg} \times \text{m}^2}{\text{s}^3} / \text{m}^2 = \frac{\text{Watt}}{\text{m}^2}$$

¹⁶ William Gómez Rivera. Ing. Mec. U. Nacional. Desarrollo de los sistemas de generación eólica; <http://triton.uniandes.edu.co/~depmeccanica/WebSites/apinilla/documentos/revista4/articulos/William%20Gomez.pdf>

Otro de los factores que deben ser tenidos en cuenta (y que no se encuentran directamente expresados en la fórmula de potencia) a la hora de determinar la potencia del viento en una zona específica son el de las características de rugosidad del terreno y la altura, las cuales determinan la velocidad del viento.

3.1. DENSIDAD DEL AIRE, ρ

La energía cinética de un cuerpo en movimiento es proporcional a su masa (o peso). Así, la energía cinética del viento depende de la densidad del aire, es decir, de su masa por unidad de volumen¹⁷.

En otras palabras, cuanto "más pesado" sea el aire más energía recibirá la turbina.

La densidad del aire seco a la presión atmosférica estándar al nivel del mar a 15°C se utiliza como estándar en la industria eólica¹⁷, esta densidad es de 1,225 kg/m³.

3.2. VELOCIDAD DEL AIRE, v

El viento es un recurso cuyo aprovechamiento es sumamente sensible a pequeñas variaciones de la velocidad de éste debido a que la potencia eólica disponible es proporcional al cubo de la velocidad del viento, por esta razón un error del 10% en la medición del viento da como resultado un error del 30% en la salida de energía, de la misma manera cada que se dobla la velocidad del viento, se está multiplicando la salida de energía por un factor de 8.

Otro aspecto a tener en cuenta, relacionado con la velocidad del viento, es que la gran mayoría de aerogeneradores arrancan cuando el viento llega a una velocidad mínima (5 m/s para turbinas grandes y 3 m/s para turbinas pequeñas) y su producción aumenta fuertemente con la velocidad del viento. Llegan a producir a plena potencia alrededor de los 15 m/s (turbinas grandes) y 12 m/s (turbinas pequeñas) y paran por excesiva velocidad del viento a unos 25 m/s¹⁶. A continuación se indican las posibilidades de uso de la energía eólica, con base en valores promedios de velocidad de viento anual.

¹⁷ Danish Wind Industry Association; <http://www.windpower.org/ES/tour/wres/enerwind.htm>

Promedio anual de velocidad de viento a 10 metros de altura	Posibilidad de uso de energía eólica
Menor a 3 m/s	Usualmente no es viable, a menos que existan circunstancias especiales para una mejor evaluación
3-4 m/s	Puede ser una buena opción para equipos de aerobombeo, poco viable para aerogeneración eléctrica
4-5 m/s	Las aerobombas son competitivas económicamente con respecto a los equipos diesel, el bombeo aero-eléctrico es viable
Más de 5 m/s	Viable para aerobombeo y aerogeneración eléctrica
Más de 6 m/s	Viable para aerobombeo, aerogeneración con sistemas autónomos y para sistemas conectados a la red eléctrica

Tabla 4. Posibilidades de uso de energía eólica a partir de la velocidad del viento¹⁸

3.3. CLASE Y LONGITUD DE RUGOSIDAD

La clase y longitud de rugosidad es un parámetro que se utiliza para determinar el perfil de velocidad del viento en un terreno específico. Cuanto más pronunciada sea la rugosidad del terreno mayor será disminución de la velocidad del viento.

El término longitud de rugosidad z_0 define la distancia sobre el nivel del suelo a la que teóricamente la velocidad del viento debería ser cero¹⁹.

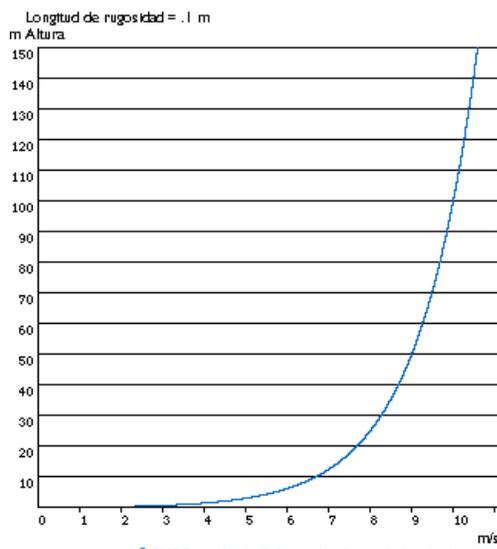


Figura 1. Ejemplo de perfil de velocidad para una longitud de rugosidad de 0,1 m

¹⁸ Unidad de Planeación Minero Energética Colombiana. Energías renovables: Descripción, tecnologías y usos finales; <http://www.udistrital.edu.co/comunidad/profesores/aperez/documentos/upme.pdf>

¹⁹ Danish Wind Industry Association: Manual de referencia. Primera parte: Conceptos sobre la energía eólica; <http://www.windpower.org/ES/stat/unitsw.htm#anchor1345942>

El Atlas Eólico Europeo define esta rugosidad a partir de la longitud de rugosidad medida en metros, z_0 , es decir, la altura sobre el nivel del suelo donde la velocidad del viento es teóricamente cero²⁰.

Si la longitud $<0,03$ m

$$\text{Clase} = 1,699823015 + \frac{\ln(\text{longitud})}{\ln 150}$$

Si la longitud $>0,03$ m

$$\text{Clase} = 3,912489289 + \frac{\ln(\text{longitud})}{\ln 3,33333333}$$

Clase de rugosidad	Longitud de rugosidad (m)	Índice de energía (%)	Tipo de paisaje
0	0,0002	100	Superficie del agua
0,5	0,0024	73	Terreno completamente abierto con una superficie lisa, p.ej., pistas de hormigón en los aeropuertos, césped cortado, etc.
1	0,03	52	Área agrícola abierta sin cercados ni setos y con edificios muy dispersos. Sólo colinas suavemente redondeadas
1,5	0,055	45	Terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 1.250 m
2	0,1	39	Terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 500 m
2,5	0,2	31	Terreno agrícola con muchas casas, arbustos y plantas, o setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 250 m
3	0,4	24	Pueblos, ciudades pequeñas, terreno agrícola, con muchos o altos setos resguardantes, bosques y terreno accidentado y muy desigual
3,5	0,8	18	Ciudades más grandes con edificios altos
4	1,6	13	Ciudades muy grandes con edificios altos y rascacielos

Tabla 5. Clases de rugosidad¹⁹

En Colombia, a partir de un estudio realizado en el 2006 por la Unidad de Planeación Minero Energética, UPME, sobre energías renovables (descripción, tecnologías y usos finales), se establecieron 6 rangos de rugosidad a partir de los cuales se pudieron determinar rangos de velocidad del viento.

²⁰ Danish Wind Industry Association: Manual de referencia. Primera parte: Conceptos sobre la energía eólica; <http://www.windpower.org/ES/stat/unitsw.htm#anchor1345942>

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

Tabla 6. Rangos de rugosidad según la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) de Colombia¹⁸

3.4. ALTURA

Esta variable se refiere a la distancia existente entre el suelo y el punto en el aire en el cual se toma la velocidad del viento.

A mayor altura, resulta menor la incidencia de la rugosidad sobre la velocidad del viento y por tanto, ésta es mayor, es decir la altura y la velocidad del viento son variables directamente proporcionales y la fórmula que las relaciona es la siguiente²¹:

$$\frac{V_h}{V_{ref}} = \left(\frac{h}{h_{ref}} \right)^\alpha$$

Donde:

V_h : Velocidad a la altura requerida (m/s)

V_{ref} : Velocidad a la altura de referencia (m/s)

h : Altura a la velocidad requerida (m)

h_{ref} : Altura de referencia (m/s)

α : Parámetro de rugosidad

Tipo de terreno	α
Arena	0,01
Vegetación baja	0,13
Vegetación alta	0,19
Área de edificios, suburbio	0,32

Tabla 7. Valores típicos asociados al parámetro de rugosidad según el tipo de terreno

Por todo lo anterior, la altura es un factor determinante a la hora de establecer el punto de instalación de una turbina eólica.

²¹ HERRERA, Juan Camilo; Wind power potential assessment from small wind turbines; Tesis de Maestría en Energía, Escuela Politécnica Federal; Lausana, Suiza

4. METODOLOGÍA.

La apropiación tecnológica de un producto en un mercado determinado puede ser utilizada para solucionar una necesidad existente, sin invertir grandes cantidades de dinero y esfuerzo en investigación y desarrollo. Se pueden aprovechar adelantos y tecnologías ya existentes, adaptándolas al mercado y a las condiciones y especificaciones determinadas por el cliente.

Para la apropiación tecnológica del producto, es necesario actualizar las características del producto para poder adaptarlo a un mercado específico, a un entorno cambiante y con requerimientos cada vez más exigentes.

Existen diferentes metodologías y posibilidades que sirven como guía para lograr la actualización de las características deseadas. Dentro de estas, la metodología de diseño para el ensamble y la manufactura representa una opción cuando las características que deseamos modificar consideran materiales, componentes, máquinas, herramientas, procesos y métodos de ensamblaje, con el fin de reducir costos y facilitar la fabricación.

Es entonces esta metodología una de las bases consideradas para desarrollar este trabajo, ya que, será utilizada para buscar otras opciones en materiales y procesos de manufactura que permitan reducir costos en los elementos que componen el sistema de turbina Eólica.

Así mismo, es importante considerar que éste objetivo de reducir costos en la turbina, está impulsado por un objetivo mayor en el que se busca lograr un producto competitivo y atractivo para un mercado Colombiano. Por tanto, es necesario utilizar una metodología mayor que abrace la puramente “técnica” de diseño para el ensamble y la manufactura, y que contenga en sus actividades la guía adecuada para desarrollar el proyecto de una forma lógica y ordenada, que consiga el resultado adecuado. Por lo anterior, es necesario entonces considerar al proyecto como un sistema dinámico con múltiples factores a considerar, tal cómo: el mercado, los costos, el funcionamiento, etc.

Como resultado, se desarrolla entonces una metodología basada en la fusión de las fases y actividades aplicables de cada metodología descrita anteriormente. Ésta, es presentada a continuación y representa un diseño especial para llevar a cabo este proyecto específico.

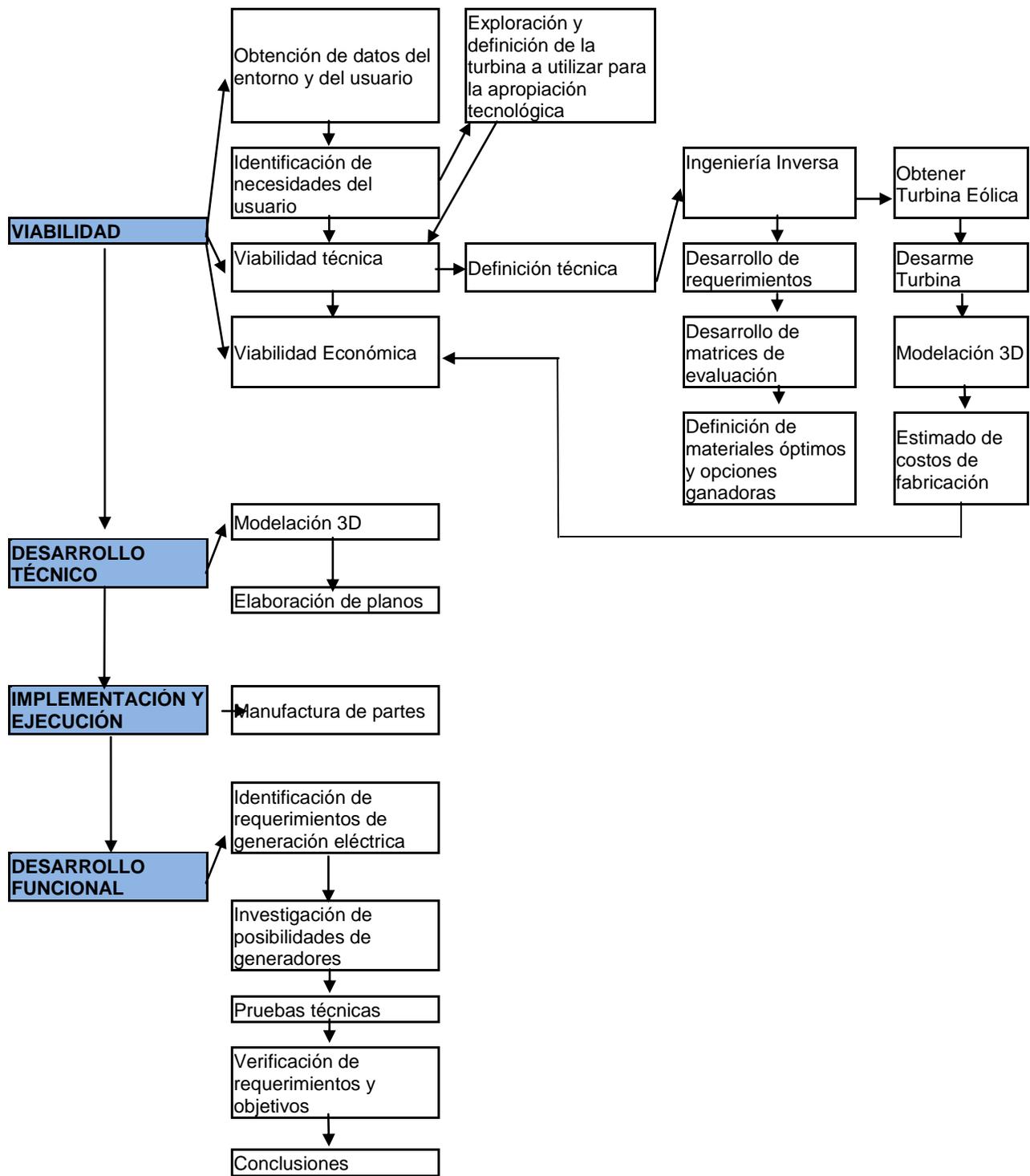


Figura 2. Esquema metodológico

5. ANÁLISIS DEL MERCADO.

Teniendo en cuenta la gran acogida que actualmente está teniendo en el mundo la consciencia ambiental, no es de extrañarse que Latinoamérica, aunque de forma más lenta, se esté uniendo a esta intención, la cual cuenta con un origen institucional, pero que con el pasar del tiempo, luego de superar la masa crítica (se refiere a la cantidad mínima de individuos requeridos para que un fenómeno social se masifique) se vuelva individual, es decir, las actividades y productos o servicios asociados con la protección del medio ambiente comienzan a entrar dentro de las actividades y cotidianidad de las personas.

Es por eso que resulta importante que países como Colombia, y en general los Latinoamericanos, comiencen a proyectar sus intereses en esta dirección, ya que en un futuro este tipo de productos no solo van a contar con una viabilidad ambiental sino también económica.

Uno de los grandes inconvenientes con los que actualmente cuentan las turbinas eólicas para su implementación en Latinoamérica, se encuentra en la poca rentabilidad que dejan debido a los altos costos de importación y es por esta razón que la apropiación de este tipo de tecnologías resulta ser uno de los primeros pasos para que su uso sea una realidad en esta región.

Otro de los pasos importantes se encuentra en el interés que pone cada una de las naciones para incursionar en la producción de este tipo de energía y una gran prueba de que este interés ya se está generando se encuentra en la constitución de la LAWEA (Latin America Wind Energy Association), Asociación Latinoamericana de Energía Eólica, la cual quiere ser protagonista en la revolución tecnológica hacia las energías renovables. Dadas las condiciones favorables que se presentan en muchos sitios del territorio latinoamericano, la energía eólica se presenta como una gran opción para construir una región interconectada con el poder del viento²².

La LAWEA se encuentra constituida por países como: Argentina, Barbados, Bolivia, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, Cuba, Ecuador, El Salvador, Grenada, Guatemala, Guyana, Haití, Honduras, Jamaica, México, Nicaragua, Panamá, Paraguay, Perú, República Dominicana, Surinam, Trinidad y Tobago, Uruguay y Venezuela. Esta gran cantidad de países interesados en el desarrollo de este tipo de energía amplía en gran medida las posibilidades de mercado que ésta tiene.

En Colombia, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, y la Unidad de Planeación Minero Energética, UPME, en un esfuerzo

²² Portal de la Asociación Latinoamericana de Energía Eólica: http://www.laweaa.org/index_esp.php

conjunto han elaborado el Atlas de Viento y Energía Eólica de Colombia (2004), que pone a disposición de toda la sociedad y, en especial, de los planificadores y de los tomadores de decisiones en programas y proyectos de desarrollo energético nacional y regional²³.

5.1. SITUACIÓN ACTUAL DE LA ENERGÍA EÓLICA A NIVEL MUNDIAL

Para tener claro el contexto de la energía eólica resulta importante hacer una pequeña mención de su desarrollo en los diferentes países del mundo, como éste determina su peso dentro del mercado energético y conocer algunos valores generales que establecen el gran potencial que este recurso tiene.

Aproximadamente 1,5% de la energía eléctrica mundial proviene de la eólica. La capacidad eólica instalada actualmente supera los 120 GW y su implementación ha llegado a generar más de 440.000 empleos alrededor del mundo, además, de las mejoras de la calidad de vida de cientos de personas²⁴.

	MW	%
USA	25,170	20.8
Germany	23,903	19.8
Spain	16,754	13.9
China	12,210	10.1
India	9,645	8.0
Italy	3,736	3.1
France	3,404	2.8
UK	3,241	2.7
Denmark	3,180	2.6
Portugal	2,862	2.4
Rest of world	16,693	13.8
Total top 10	104,104	86.2
World total	120,798	100.0

Tabla 8. Top 10 de países con mayor capacidad instalada al 2008²⁴

Adicionalmente, los costos de generación de la energía eólica han disminuido dramáticamente durante los últimos 15 años, acercándose cada vez más a los costos de las fuentes de energía convencionales, lo cual mejora sus perspectivas financieras a futuro.

²³Ministerio de Minas y Energía de la República Colombia: Unidad de Planeación Minero Energética; www.upme.gov.co/Docs/MapaViento/PROLOGO.pdf

²⁴GWEC, Global Wind Energy Council (Consejo Global de Energía Eólica) <http://www.gwec.net/index.php?id=13>

5.2. ESTADO ACTUAL Y PERSPECTIVAS DE LA ENERGÍA EÓLICA DENTRO DEL MERCADO LATINOAMERICANO

En este orden de ideas, resulta bueno resaltar que son Brasil, Argentina, México, Costa Rica, Chile y Perú los países que más esfuerzos han realizado por aumentar su producción eólica en América Latina. Sin embargo, en términos comparativos, Colombia se encuentra dentro del grupo de los que cuentan con mayor potencial.

PAIS	MW POTENCIALES
Brasil	140.000
México	40.000
Centro América y el Caribe	>100.000
Colombia	20.000
Argentina	10.000
Venezuela	10.000
Chile	5.000
Total	>>200.000

Tabla 9. Potencial eólico estimando en Latinoamérica²⁵

Aunque la relación MW potenciales vs. los MW instalados, aún es desproporcionada, actualmente, los países latinoamericanos cuentan con una tendencia incremental importante año a año (20% entre 2008 y 2009, ver Tabla 10. MW Instalados en Latinoamérica en los años 2008 y 2009²⁵), con desarrollos a nivel de respaldo normativo y económico y perspectivas interesantes de crecimiento de la capacidad instalada (para el 2012 se espera más de 4.500 MW)²⁶.

PAIS	MW INICIOS 2008	MW 2009
Argentina	27	29
Brasil	247	≈450
Chile	20	20
Colombia	20	20
Costa Rica	70	70
Cuba	7	12
Ecuador	2,4	2
México	88	≈320
Nicaragua	0	39
Perú	0,7	1
Uruguay	0,7	21
Caribe	53	53,2
TOTAL	536	>1000

Tabla 10. MW Instalados en Latinoamérica en los años 2008 y 2009²⁵

²⁵Portal de la Asociación Latinoamericana de Energía Eólica: <http://www.lawea.org/energia.php>

²⁶Portal de la Asociación Latinoamericana de Energía Eólica: <http://www.lawea.org/energia.php?secc=pais>

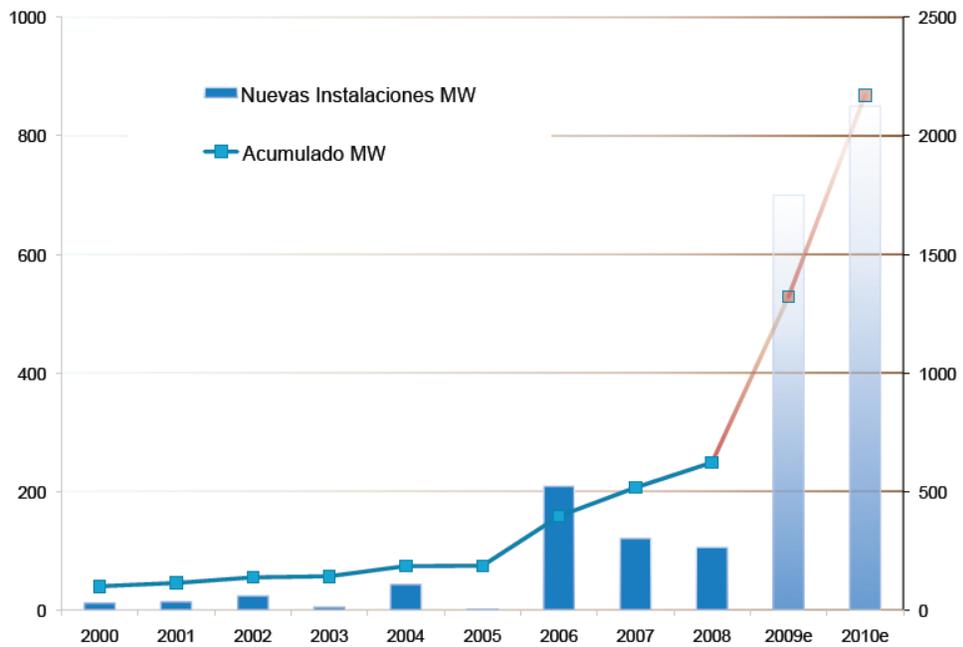


Tabla 11. Crecimiento de la capacidad instalada²⁵

5.3. ESTADO ACTUAL Y PERSPECTIVAS DE LA ENERGÍA EÓLICA DENTRO DEL MERCADO COLOMBIANO

5.3.1. Mercado de la energía eléctrica en Colombia

Canasta energética²⁷

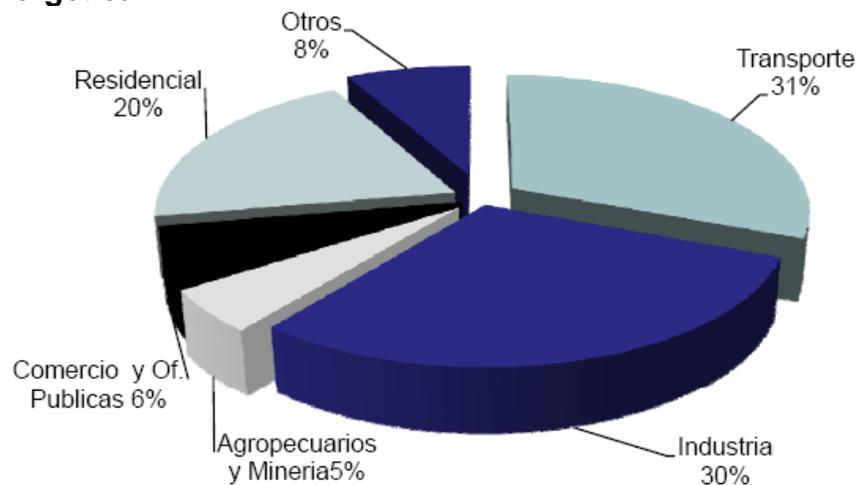


Figura 3. Consumo de energía por sector

²⁷ Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las ZNI, IPSE; Proyectos de energías renovables para Colombia; Seminario Universidad EAFIT; 19 de septiembre de 2009

Evolución histórica de la demanda de electricidad²⁸

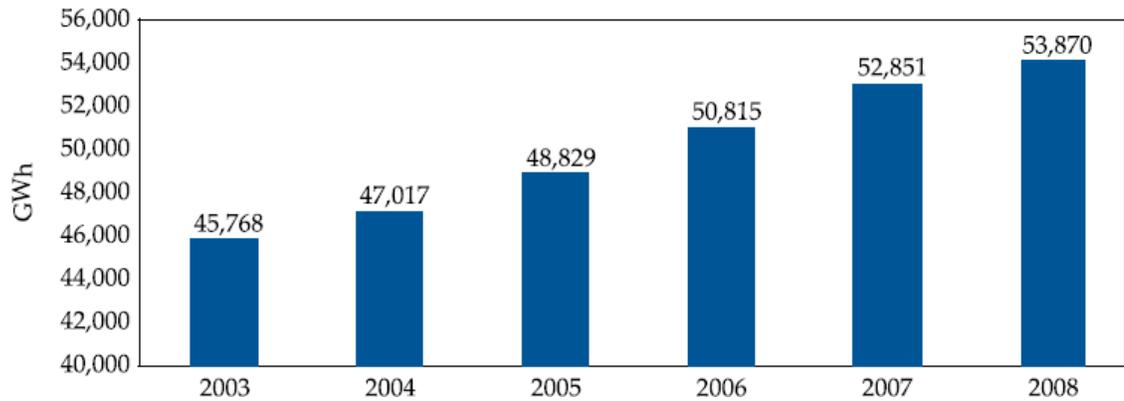


Figura 4. Demanda nacional de energía (GWh-año)

Capacidad instalada y generación²⁸

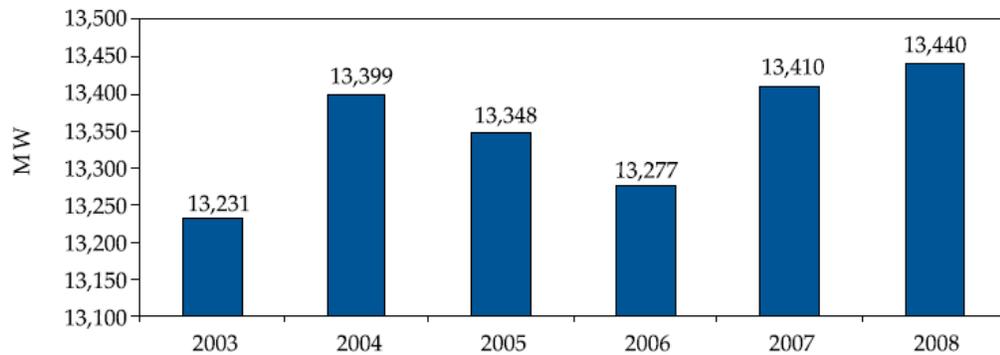


Figura 5. Capacidad instalada y generación de energía eléctrica en Colombia

²⁸ Unidad de Planeación Minero Energética, UPME; Plan de expansión de referencia: Generación-Transmisión 2009-2023; http://www.upme.gov.co/Docs/Plan_Expansion/2009/Plan_Expansion_2009-2023.pdf

Tecnologías empleadas para la generación de energía eléctrica²⁸

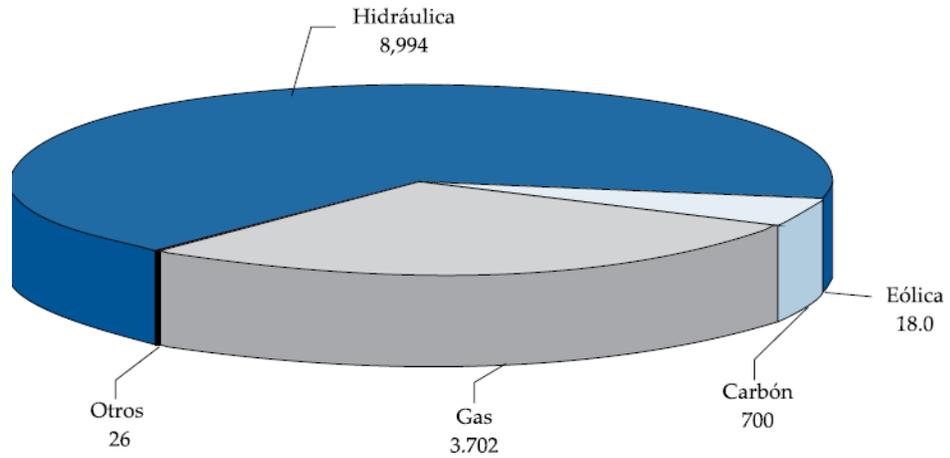


Figura 6. Capacidad efectiva por tecnología en MW a diciembre 31 de 2008

División energética del territorio colombiano²⁷

En términos de energía eléctrica, Colombia divide su territorio en dos zonas: Interconectada y No Interconectada (ver Figura 7. Zonas Colombianas: Interconectadas y No Interconectadas).



Figura 7. Zonas Colombianas: Interconectadas y No Interconectadas

5.3.2. Zonas Interconectadas, ZI

5.3.2.1 Diagnóstico estadístico²⁷

- 34% territorio nacional
- 9 millones de usuarios aproximadamente
- Cobertura: 93,6%
- Demanda anual: 50,81 GWh
- Empresas prestadoras: Generación, 37; transmisión, 8; distribución, 25 y comercialización, 61.
- Capacidad instalada: 13.371,3 MW
- Longitud red de transmisión: 23.290 km
- Interconexiones internacionales: 5

5.3.2.2 Estructura tarifaria²⁹

La identificación del costo del servicio y el precio que se cobra a los distintos usuarios (tarifas) se denomina estructura tarifaria.

El costo del servicio es el resultado de agregar los costos de cada una de las etapas (producción, transmisión, distribución, comercialización y administración).

La determinación de la tarifa (Costo Servicio) está explicado en la resolución CREG 119 de 2007.

En las zonas interconectadas puede venderse la energía en la bolsa o por medio de de contratos de larga duración PPA (Power Purchase Agreement). Desde agosto del 2005 hasta agosto del 2009, el precio promedio (en bolsa y en contratos) de la energía eléctrica, ha presentado el siguiente comportamiento:

²⁹ Comisión de Regulación de Energía y Gas, CREG;
http://www.creg.gov.co/html/i_portals/index.php?p_origin=internal&p_name=content&p_id=MI-61&p_options=

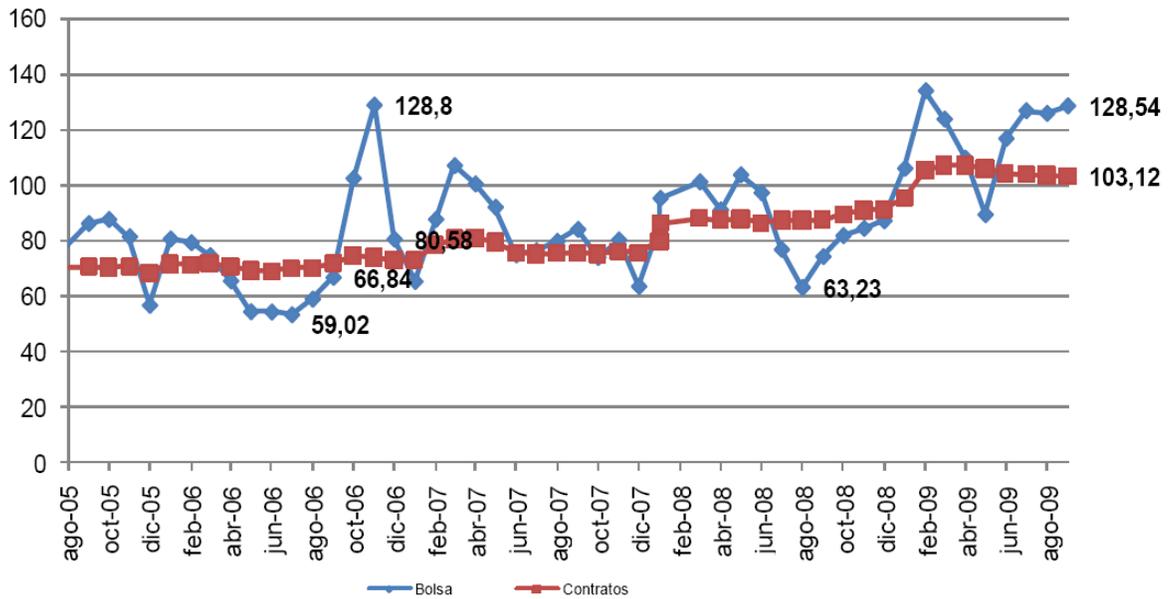


Figura 8. Precio de la energía eléctrica en Colombia durante los últimos 4 años

Durante el mes de agosto se registró un aumento de 2,73% en el precio en bolsa, ubicándose en \$128,54 kWh con relación al mes de julio de 2009.

En este periodo el precio promedio de contratos despachados registró estabilidad al no presentarse variación, al ubicarse en \$103,12 kWh tomando como referencia el mes anterior.

5.3.3. Zonas No Interconectadas (ZNI)

5.3.3.1 Diagnóstico estadístico²⁷

- 66% territorio nacional
- 89% población carácter rural
- 15 departamentos
- 4 capitales departamentales
- 13 grupos territoriales
- 44 cabeceras municipales
- 91 municipios
- 1.186 localidades
- 114.232 usuarios atendidos
- 95 entes prestadores
- 110 mega plantas Diesel
- 2 Mega PCH, Pequeñas Centrales Hidráulicas

5.3.3.2 Estructura tarifaria

Las Zonas No Interconectadas (ZNI) son los municipios, corregimientos, localidades y caseríos no conectados al Sistema Interconectado Nacional. (Artículo 1 de la Ley 855 de 2003). Por ejemplo el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, Leticia en el Amazonas, Capurganá en el Chocó, Puerto Carreño en el Vichada y Mitú en el Vaupés³⁰.

La metodología tarifaria aplicable a estas zonas está en la Resolución CREG-091 de 2007, excepto para el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. En dicha resolución se establecen las fórmulas para determinar los costos de las actividades de generación, distribución y comercialización de energía y en función de las variables tenidas en cuenta (ver Figura 9. Zonas No Interconectadas de Colombia) el valor de producción de la energía para las ZNI oscila entre \$500 y \$1.300 kWh³¹. Por esta razón existe un subsidio muy elevado por parte del gobierno para la prestación del servicio.

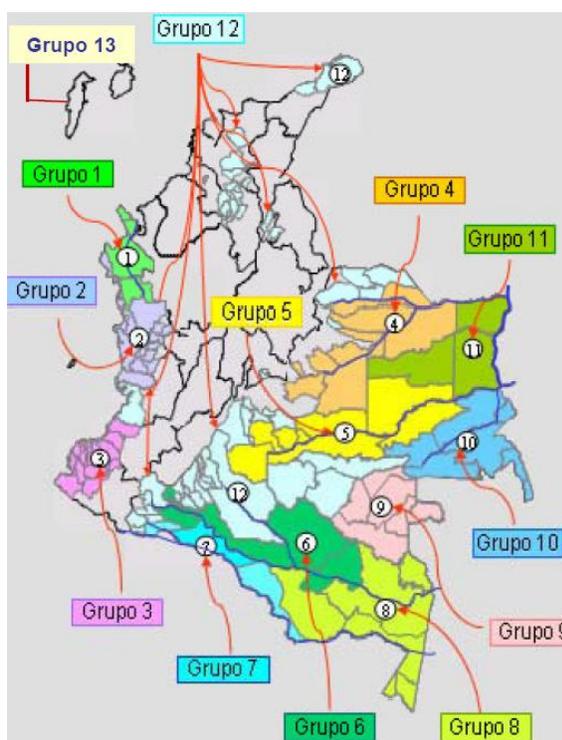


Figura 9. Zonas No Interconectadas de Colombia³¹

³⁰ Comisión de Regulación Energía y Gas, Creg; http://www.creg.gov.co/html/i_portals/index.php?p_origin=internal&p_name=content&p_id=MI-129&p_options=

³¹ BENAVIDES, Jairo Alberto; Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las ZNI, IPSE; Proyectos de energías renovables para Colombia; Seminario Universidad EAFIT; 19 de septiembre de 2009

5.3.4. Análisis del atlas de vientos colombianos

Resulta importante aclarar que, en general, los atlas de viento solo indican cuales son las áreas más adecuadas para la implementación de turbinas eólica, en ningún momento son el criterio único o absoluto para la instalación de las mismas, ya que no cuentan con el nivel de detalle que permita conocer información concreta sobre el comportamiento del viento en un punto específico, el cual solo puede llegar a determinarse con una investigación detallada y localizada del sitio, que a partir del atlas se ha logrado establecer como adecuado para la generación de energía eólica.

En el caso particular del atlas de viento colombiano³², si bien es cierto que es una buena herramienta para hacer una estimación inicial acerca de los lugares del país con potencial para el desarrollo de energía eólica, deben tenerse en cuenta las siguientes observaciones:

- Los resultados de la misión mostraron diferencias en las mediciones simultáneas bajo idénticas condiciones físicas comprendidas dentro de un rango de ± 1 m/s. Este rango es particularmente significativo, sobre todo si se tiene en cuenta que la potencia eólica cuenta con una relación cúbica respecto a la velocidad del viento.
- En la toma de datos correspondiente al atlas, fue determinado un valor representativo de la velocidad del viento por cada hora, y este debe tomarse por cada 10 minutos, con el fin de contar con un análisis más detallado y real del comportamiento del viento en un sitio determinado, además de que para este caso también tiene incidencia la relación cúbica existente entre potencia y velocidad del viento.
- Los anemómetros empleados para medir la velocidad del viento no fueron instalados con la intención de realizar análisis de energía.
- Si se tienen en cuenta los puntos de ubicación de las diferentes estaciones meteorológicas empleadas para el desarrollo del atlas de viento (ver Figura 10. Estaciones meteorológicas que miden dirección y velocidad del viento), estas coinciden más con aquellas zonas del país que se encuentran interconectadas a la red de energía, y como pudo verse en el punto 5.3.3 (Zonas No Interconectadas (ZNI)), son las ZNI las que cuentan con particular relevancia a la hora de estimar la instalación de nuevas alternativas energéticas.

³² Unidad de Planeación Minero Energética, UPME del Ministerio de Minas y Energía de Colombia; Atlas de viento y energía eólica de Colombia, 2006; <http://www.upme.gov.co/Docs/MapaViento/PROLOGO.pdf>

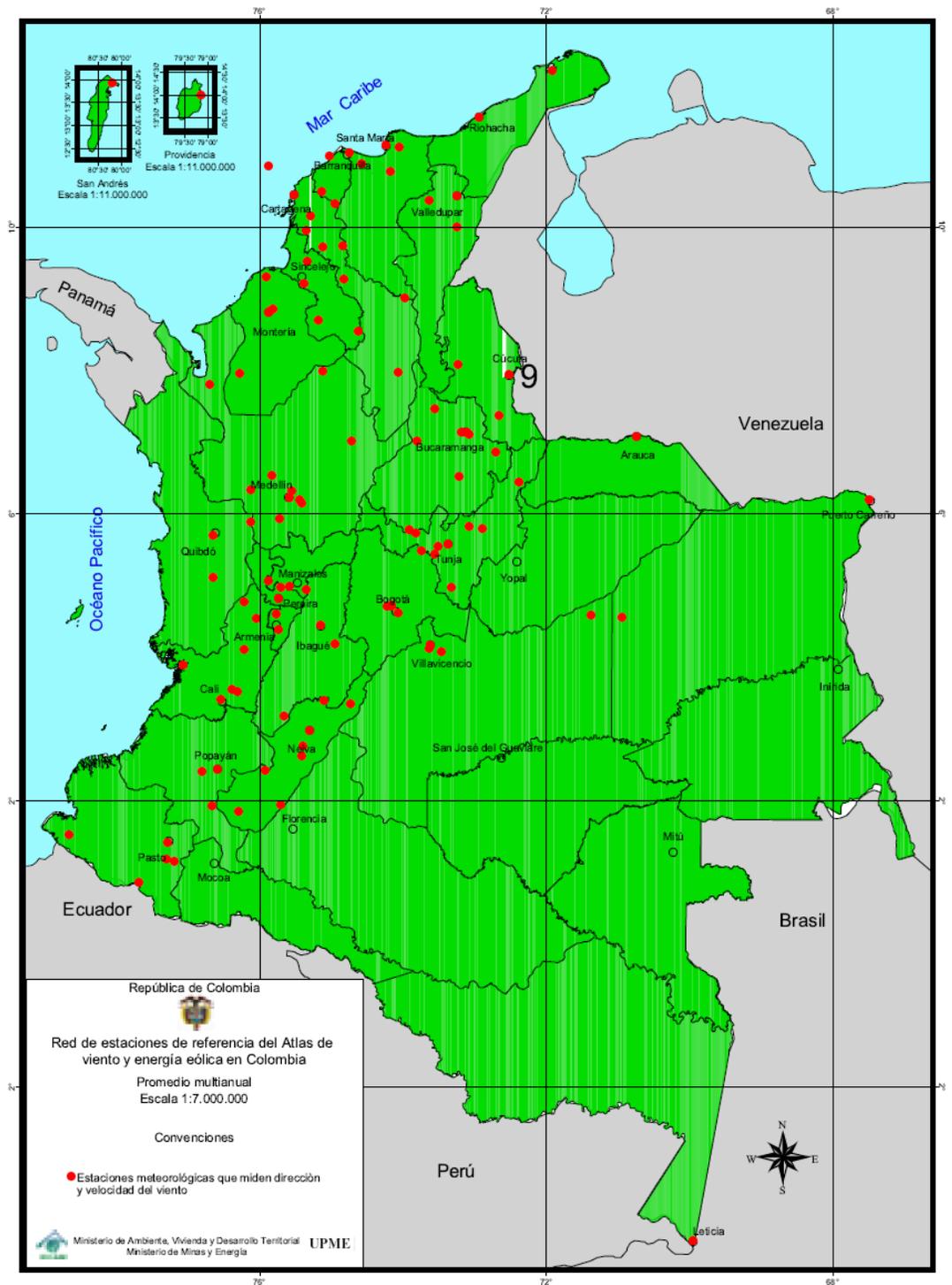


Figura 10. Estaciones meteorológicas que miden dirección y velocidad del viento³²

Ahora bien, retomando el análisis del atlas de viento colombiano, se debe partir de la fórmula original de potencia eólica:

$$P_{eólica} / A = \frac{1}{2} \rho \times v^3$$

Despejando la variable de velocidad, se obtiene:

$$v = \sqrt[3]{\frac{2 \times P_{eólica}}{\rho}}$$

Si se tiene en cuenta que para el desarrollo del atlas de vientos colombiano se asumió la densidad del aire igual a 1 Kg/m³, la velocidad finalmente queda igual a:

$$v = \sqrt[3]{2 \times P_{eólica}}$$

Y a partir de esta fórmula, se establece que la relación entre la velocidad del viento y la potencia eólica que se presenta a 20 m de altura es la siguiente:

Conversión de los rangos de potencia eólica a velocidad del viento a 20 metros de altura								
Código de color	Potencia (W/m2)	Velocidad (m/s)	Código de color	Potencia (W/m2)	Velocidad (m/s)	Código de color	Potencia (W/m2)	Velocidad (m/s)
	0-1	0,0-1,3		125-216	6,3-7,6		1000-1331	12,6-13,9
	1-8	1,3-2,5		216-343	7,6-8,8		1331-1728	13,9-15,1
	8-27	2,5-3,8		343-512	8,8-10,1		1728-2197	15,1-16,4
	27-64	3,8-5,0		512-729	10,1-11,3		2197-2744	16,4-17,6
	64-125	5,0-6,3		729-1000	11,3-12,6		2744-3375	17,6-18,9

Tabla 12. Potencia eólica y velocidad registradas en los mapas mensuales que ilustran el comportamiento del viento en Colombia a 20 metros de altura³²

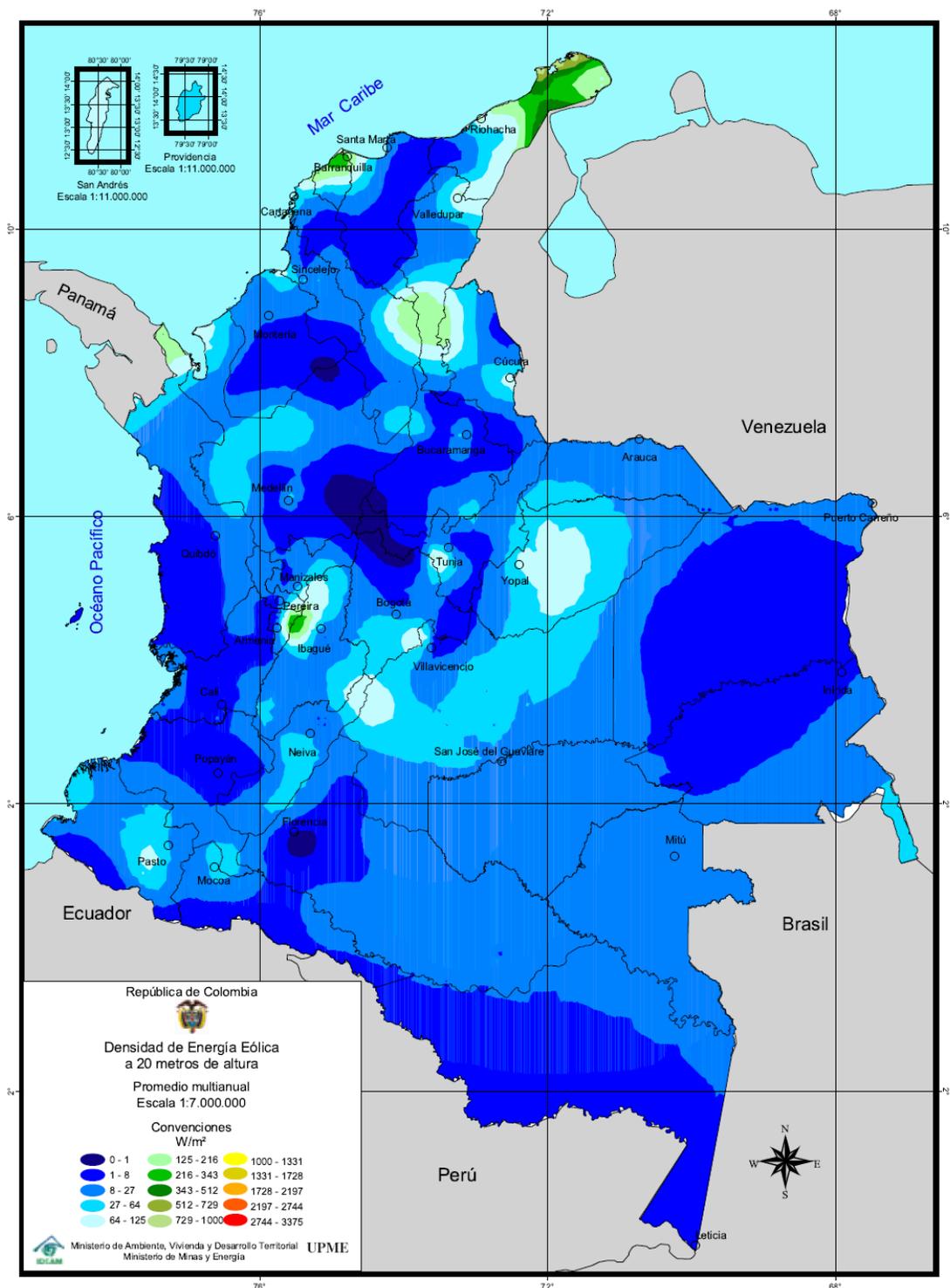


Figura 11. Promedio multianual de la potencia o densidad de la energía eólica a 20 de altura³²

Teniendo en cuenta que la velocidad del aire adecuada para el funcionamiento de la turbina es como mínimo de 5 m/s y luego de evaluar los mapas mes a mes del Atlas (ver Figura 11. Promedio multianual de la potencia o densidad de la energía eólica a 20 de altura³²), se logró determinar que los municipios colombianos que cuentan con esta característica a 20 m de altura son:

MUNICIPIO	DPTO.
91,7%-100% (11-12 meses) del año con v>5 m/s	
Uribe	Guajira
Manaure	Guajira
Maicao	Guajira
Uribe	Meta
75%-83,3% (9-10 meses) del año con v>5 m/s	
Albania	Guajira
Barrancas	Guajira
Fonseca	Guajira
San Andrés	San Andrés
Puerto Colombia	Atlántico
Juan de Acosta	Atlántico
Piojó	Atlántico
El Peñón	Bolívar
Regidor	Bolívar
S. Martin de Loba	Bolívar
Tamalameque	Cesar
Cajamarca	Tolima
Ibagué	Tolima
Pijao	Quindío
Córdoba	Quindío
Calarcá	Quindío
Salento	Quindío
66,7% (8 meses) del año con v>5 m/s	
Rioacha	Guajira
S. Juan del Cesar	Guajira
El Molino	Guajira
Villanueva	Guajira
Urumita	Guajira
Tubará	Atlántico
El Banco	Magdalena
Santa Catalina	Bolívar
Hatillo de Loba	Bolívar
Chimichagua	Cesar
Pailitas	Cesar
Pelaya	Cesar
La Gloria	Cesar
Aguachica	Cesar
El Carmen	N. Santander

Tabla 13. Municipios colombianos que cuentan con vientos de velocidades superiores a 5 m/s a 20 m de altura

De la Tabla 13 (Municipios colombianos que cuentan con vientos de velocidades superiores a 5 m/s a 20 m de altura), el departamento de San Andrés y los municipios de Uribe (Meta), Regidor (Bolívar) y Manaure y Uribia (Guajira) hacen parte de las zonas no interconectadas del país y por esto son los primeros a tener en cuenta a la hora de pensar en un desarrollo de mercado para la turbina. Sin embargo, los demás municipios indicados en la Tabla 13 (Municipios colombianos que cuentan con vientos de velocidades superiores a 5 m/s a 20 m de altura), son una buena opción a la hora pensar en una expansión dentro del mercado colombiano, sobre todo si se tiene en cuenta que muchos de estos municipios cuentan con una amplia zona rural a la cual, en muchas ocasiones, es difícil extender el cableado eléctrico (ejemplo de esto son las fincas con grandes extensiones de tierra).

5.3.5. Cuantificación del mercado

A partir del análisis del atlas de vientos colombiano (ver punto 5.3.4 Análisis del atlas de vientos colombianos), se logró determinar aquellos municipios con potencial eólico durante el transcurso del año, de manera total o parcial (de 8 a 12 meses).

Y luego, con el soporte del censo nacional desarrollado por el DANE en el 2005³³ y su desarrollo estadístico de proyección de la población 2006-2020³⁴, se pudo determinar un estimado de la cantidad de hogares con la que dichos municipios cuentan en el 2009.

Mezclando ambos factores, potencial eólico y población, se puede tener una idea de la posible penetración que puede tener esta tecnología, teniendo en cuenta que la disponibilidad eólica no sea menor al 66,7%.

³³ Departamento Administrativo Nacional de Estadística, DANE; Censo general 2005; <http://www.dane.gov.co/censo/files/libroCenso2005nacional.pdf>

³⁴ Departamento Administrativo Nacional de Estadística, DANE; Proyecciones nacionales y departamentales 2006-2020 http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/proyepobla06_20/7Proyecciones_poblacion.pdf

	Departamento	Municipio	Cantidad Hogares 2009	% del año con v>5 m/s
ZNI	Guajira	Uribia	27,349	91,7%-100%
		Manaure	15,919	
	Meta	Uribe	3,642	91,7%-100%
	Bolivar	Regidor	2,049	75%-83,3%
	San Andrés	San Andrés	18,370	
	Guajira	Maicao	27,172	91,7%-100%
		Albania	4,574	
		Barrancas	5,842	
		Fonseca	5,808	
	San Andrés	San Andrés	18,370	75%-83,3%
	Atlántico	Puerto Colombia	6,189	
		Juan de Acosta	3,460	
		Piojó	1,134	
	Bolivar	El Peñón	1,855	
		Regidor	2,049	
		S. Martin de Loba	3,373	
	Cesar	Tamalameque	3,174	
	Tolima	Cajamarca	5,319	
		Ibagué	139,870	
	Quindío	Pijao	1,780	
		Córdoba	1,482	
Calarcá		20,739		
Salento		1,984		
Guajira	Rioacha	37990	66.7%	
	S. Juan del Cesar	7081		
	El Molino	1557		
	Villanueva	4979		
	Urumita	2977		
Atlántico	Tubará	2456		
Magdalena	El Banco	12306		
Bolivar	Santa Catalina	2750		
	Hatillo de Loba	2564		
Cesar	Chimichagua	7009		
	Pailitas	3731		
	Pelaya	3879		
	La Gloria	3155		
	Aguachica	19660		
N. Santander	El Carmen	3758		
	TOTAL	394087		

Tabla 14. Potencial eólico y población (cantidad de hogares)

Cabe anotar que para las zonas donde el viento no está presente el 100% del año se hace necesaria otra fuente alterna de energía (Energía Solar, plantas Diesel, gasificadores de biomasa, entre otros).

En el Anexo 3 (Mapas de viento de la velocidad a 10 m y de la densidad a 50 m) se incluyen 2 mapas donde se presenta la velocidad promedio multianual a 10 m de altura y el potencial eólico a 50 m de altura.

6. VIABILIDAD TÉCNICA: PROCESO DE INGENIERÍA INVERSA.

6.1. DEFINICIÓN TÉCNICA DE UNA TURBINA EÓLICA

Para poder desarrollar la metodología de diseño para el ensamble y la manufactura, se realizará un estudio técnico que considere todas las partes que constituyen el generador eólico, de forma que se puedan plantear opciones en materiales y procesos de manufactura que permitan reducir costos en los elementos que componen el sistema de la turbina.

6.1.1. Definición y descripción general de una turbina eólica

Un generador eólico de tres aspas está constituido principalmente por:

- **Aspas:** Las aspas están unidas al rotor para convertir la energía del viento en movimiento mecánico de rotación. Actualmente la mayoría de los rotores tienen tres palas, ya que, permiten una rotación más estable.
- **Rotor:** El rotor es el componente que ayuda a las palas o aspas a convertir la energía del viento en movimiento mecánico rotacional. El rotor está compuesto en su centro por el buje, el cual une las aspas con el árbol principal.

Si el aerogenerador tiene caja multiplicadora, el buje se conecta directamente al eje de baja velocidad de la caja multiplicadora y convierte la energía del viento en energía en rotación. Si la turbina no posee caja multiplicadora, la energía se transmite directamente al generador.

- **Un generador eléctrico:** El generador de una turbina convierte la energía mecánica en energía eléctrica. Éste puede estar directamente acoplado al rotor y las aspas o puede estar acoplado a un multiplicador que esté dentro del rotor y el generador.
- **Mecanismo de giro:** Permite a la máquina estar siempre orientada en la dirección del viento, ya que, habilita la rotación según la masa de aire que empuje a la cola.
- **Carcasa:** Envuelve y protege todas las piezas del conjunto (sobre todo las eléctricas) de los factores climáticos.

- **Cola:** Obtiene una orientación de la máquina según los movimientos de la masa de aire.

6.1.1.1 **Aspas**

El tamaño del aspa da el área de barrido del rotor, y por lo tanto, la energía extraíble del viento.

Hay muchos elementos que caracterizan las palas como; la longitud, el ancho, el ángulo de ataque, el perfil y los materiales, sin embargo, el objetivo de rediseño a partir de la metodología de diseño para el ensamble que se está utilizando, se centrará en el planteamiento de encontrar un material que pueda utilizarse en la fabricación de las palas en Colombia, ya que la forma será la misma a la empleada para el desarrollo de las aspas la turbina AIR X 400W.

Materiales:

La dificultad de lograr una pala adecuada para el servicio de un aeromotor se presenta en la construcción, la resistencia de los materiales y su aerodinámica.

El material de las aspas debe responder en los aeromotores modernos a frecuentes elevaciones de rotación y a otras exigencias como; que sea ligero, homogéneo, indeformable, resistente a la fatiga, resistente a la erosión, de producción sencilla y de coste bajo.

- *Madera*

Es sencilla, ligera, fácil de trabajar y resiste bien la fatiga. Sin embargo, es susceptible a los agentes corrosivos.

- *Metal*

Normalmente, en las palas se emplea una aleación ligera con silicio o con magnesio, ya que con estos materiales se pueden obtener costes muy bajos si se producen series grandes. Así mismo, puede usarse aluminio moldeado, hilado o repujado.

- *Materiales sintéticos, resinas y fibras*

Algunos Aeromotores funcionan con palas de materiales plásticos, pero estos materiales, siendo muy interesantes en aspectos como el poco peso, insensibilidad a la corrosión, buena resistencia a la fatiga, presentan en algunos casos inconvenientes en el costo y en la falta de homogeneidad en la construcción (las características dimensionales pueden variar de una pala a otra).

- *Palas o aspas compuestas*

Esta es una buena solución, sobre todo para los aeromotores de pequeña y mediana potencia. Algunas combinaciones posibilidades son: Aleación Ligera + Espuma de poliuretano, Aleación ligera + Poliéster y fibra de vidrio, Resina + Fibra de vidrio y fibra de carbono.

6.1.1.2 Generador

El aeromotor puede accionarse directamente o indirectamente (a través de un multiplicador). Existen 2 tipos de generadores eléctricos que transforman la energía mecánica en energía eléctrica:

- *Generador de corriente continua (Dínamo)*

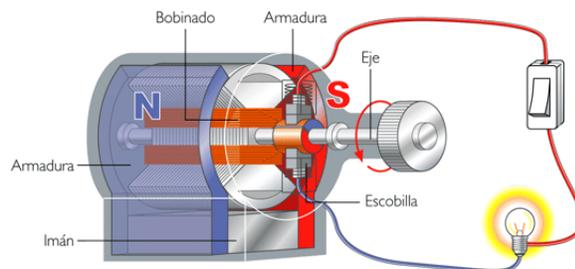


Figura 12. Generador de corriente continua (dínamo)

La máquina está formada por dos partes diferentes:

- La bobina de inducción o circuito magnético: Éste crea un campo de inducción y recibe el nombre de inductor. La bobina o inductor, por su forma (espiras de alambre enrollado), almacena energía en forma de campo magnético. El campo magnético circula por el centro del inductor y cierra su camino por su parte exterior.
- El bobinado de inducido: En él se colecta la energía eléctrica que se produce por la rotación del rotor accionado por el aeromotor. Está constituido por un colector y escobillas, situadas una en frente de otra, que permiten que la corriente circule siempre en el mismo sentido en la utilización.

La presencia de escobillas y colectores en el bobinado, requieren de un mantenimiento periódico.

El paso de la corriente en un solo sentido, como se presenta en el dínamo, evita que la batería pueda ser cortocircuitada por el inducido, cuando esté detenido.

- *Generador de corriente alterna (Alternador)*



Figura 13. Generador de corriente alterna (alternador)

Una espira de alambre, llamada armadura, se hace girar mecánicamente dentro de un campo magnético, con propulsión externa. La rotación de la espira hace que cambie el flujo magnético que la atraviesa, y se induce en ella una corriente. Los extremos de la espira se conectan a un circuito externo mediante anillos rasantes y escobillas. Los alternadores tienen varias espiras en sus armaduras.

El alternador convierte la energía mecánica en energía eléctrica a través de las siguientes partes:

- La bobina de excitación: Crea el campo magnético.
- El inducido: Es el conductor que es atravesado por las líneas de fuerza de dicho campo magnético.

El alternador, principalmente del tipo de rotor de imanes permanentes, no requiere de mantenimiento, ya que, no existen piezas en rozamiento.

En general, los alternadores son ligeros, económicos y fáciles de conseguir.

La mayoría de los alternadores comerciales, deben girar a una velocidad elevada y estable para su correcto funcionamiento (1.800 a 3.600 rpm) y además requieren de un rectificador para pasar la corriente de AC a DC y poder cargar las baterías.

6.1.1.3 Multiplicador

La caja multiplicadora de velocidades es un multiplicador de velocidad, ubicada entre el eje principal (de baja velocidad) y el generador. Si la turbina no cuenta con caja multiplicadora la energía va directamente al generador.

Su función principal es aumentar la baja velocidad inicial que se produce en el rotor para lograr las altas velocidades a las que el generador comienza a producir corriente; es decir, de aproximadamente 300 rpm a 1.500 ó 1.800 rpm

(determinado por las características del generador); además de soportar las variaciones del viento).

El multiplicador es diseñado de acuerdo a las características de cada turbina eólica en aspectos geográficos, de velocidades de viento, tipo de generador, etc. Por ello existen diferentes tipos de multiplicadores:

a. De engranajes:

Es un mecanismo que se usa para transmitir potencia. Están formados por un conjunto de ruedas dentadas cilíndricas (de ejes paralelos), cuyos dientes al engranar unen sus fuerzas de rotación.

La caja de engranajes tiene siempre una constante de aumento de la velocidad, por lo tanto debe ser calculada de acuerdo a las rpm que se tienen y las que se esperan alcanzar. Su principal ventaja con respecto a las poleas es que no patinan y hay mejor exactitud en la relación de transmisión.

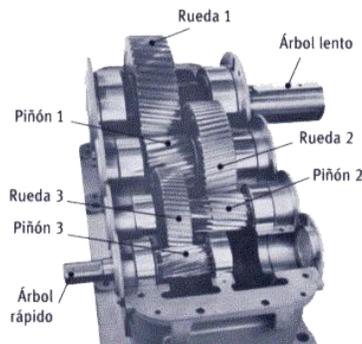


Figura 14. Estructura de un tren planetario

Existen reductores comerciales que pueden ser usados como multiplicadores, ya que, están hechos a partir de engranajes, mecanismos circulares y dentados con diferentes formas y geometrías de acuerdo a la función de cada motor. Estos reductores permiten que los motores eléctricos funcionen a diferentes velocidades agregando potencia y fuerza.

Para seleccionar la unidad de reducción más adecuada se deben tener presente la potencia de entrada y salida, la velocidad de entrada y salida, el torque máximo en la salida y la relación de reducción.

b. De poleas:

Rueda maciza y acanalada en el borde, que con un cable que atraviesa su canal transmite fuerza. Son usadas como elementos de transmisión pero también pueden aumentar velocidades, por medio de conjuntos que sirven para reducir la magnitud de la fuerza que produce el viento y mover el juego de aspas variando su velocidad.

Las poleas son el punto de apoyo de las cuerdas, las cuales se mueven alrededor de ellas sin dar una vuelta completa actuando de un lado la resistencia y en otro lado la potencia.

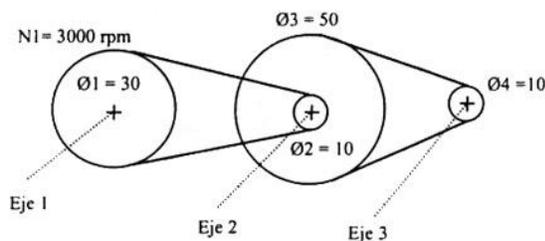


Figura 15. Multiplicador de poleas

6.1.2. Definición y descripción general de la conexión eléctrica necesaria para proveer la energía utilizable por el usuario

El generador de la turbina eólica, debe estar conectado a una batería que le permita almacenar la energía hasta el momento en que el usuario la necesite.

El montaje eléctrico final, para que el usuario pueda utilizar la energía, debería estar conformado de la manera representada a continuación:

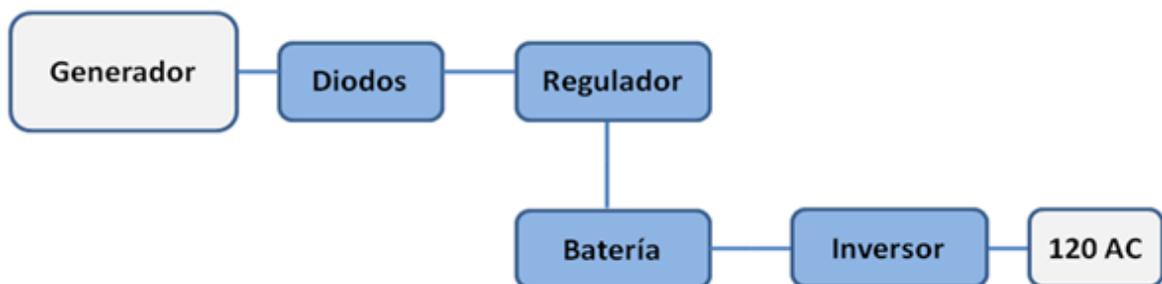


Figura 16. Conexión eléctrica para el uso de la energía por el usuario

- Diodo:** Dispositivo semiconductor que permite el paso de la corriente eléctrica en una única dirección.

- b. **Regulador:** Dispositivo electrónico creado para obtener el valor de la tensión (Voltaje) de salida deseado. Los valores de salida típicos son 9, 12, 15, 18 ó 24 Voltios.
- c. **Batería:** Batería, acumulador eléctrico o simplemente acumulador, se le denomina al dispositivo que almacena energía eléctrica, usando procedimientos electroquímicos y que posteriormente la devuelve casi en su totalidad; este ciclo puede repetirse por un determinado número de veces. Se trata de un generador eléctrico secundario; es decir, un generador que no puede funcionar sin que se le haya suministrado electricidad previamente mediante lo que se denomina proceso de carga.

Se pueden emplear dos tipos de baterías para la acumulación de energía renovable; las primeras son en plomo-ácido son mas económicas y las hay de dos tipos abiertas (requieren mantenimiento) y cerradas (no requieren mantenimiento). Por otro lado, se encuentran las baterías en gel, más costosas pero de mayor duración; estas cuentan con las siguientes características:

- No es necesario el mantenimiento: Trabajan sin agua, por ello no es una preocupación las altas o bajas temperaturas.
- Energía de larga duración: Son aptas para uso interno, son menos sensibles a las vibraciones y mantienen la corriente más tiempo.
- Recarga rápida: Necesitan menos tiempo del generador para cargarse, logrando ser cargada con una corriente igual al 50% de la capacidad.
- Auto descarga baja.
- No tienen formación de gases, ni derramamiento de ácidos al resultar dañadas o puestas en ángulo ya que la electrólisis queda retenida en el gel.

En los proyectos de energía renovable, cada tecnología condiciona la batería que debe usarse, por ello existen diferentes baterías para diferentes aplicaciones.

- d. **Inversor:** El inversor es un circuito utilizado para convertir corriente continua en corriente alterna. La función de un inversor es cambiar un voltaje de entrada de corriente directa a un voltaje simétrico de salida de corriente alterna, con la magnitud y frecuencia deseada por el usuario o el diseñador. Los inversores se utilizan en una gran variedad de aplicaciones,

entre ella, para convertir la corriente continua generada por los aerogeneradores, acumuladores o baterías, etc., en corriente alterna y de esta manera poder ser inyectados en la red eléctrica o usados en instalaciones eléctricas aisladas.

6.2. ENERGÍA EÓLICA

El viento puede ser usado para hacer trabajo. La energía cinética del viento puede ser transformada en otras formas de energía, ya sea mecánica o eléctrica. La energía del viento es abundante, renovable, ampliamente distribuida, limpia, y mitiga los efectos de invernadero si es usado para remplazar electricidad derivada de fuentes fósiles.

Un estimado del 1% al 3% de la energía proveniente del sol al golpear la tierra es convertida en energía de viento. Esto es aproximadamente 50 a 100 veces más energía que la que es convertida en biomasa por todas las plantas de la tierra a través de la fotosíntesis.

La energía es hoy más que nunca uno de los ejes centrales de las relaciones internacionales tanto por sus implicaciones estratégicas como medioambientales. Hay tres factores principales impulsores de la energía renovable: *sostenibilidad, competitividad y seguridad del abastecimiento.*

Las energías renovables prometen mejoras estratégicas en la seguridad del abastecimiento, reducen la inestabilidad de los precios a largo plazo y podrían ofrecer una mayor ventaja competitiva a la industria de la tecnología energética.

Además, las energías renovables reducen la contaminación atmosférica y las emisiones de gases de efecto invernadero. Así mismo mejoran las perspectivas socioeconómicas de las regiones rurales y aisladas en los países industrializados y ayudan a satisfacer las necesidades energéticas básicas de los países en desarrollo. El efecto acumulado de todos estos beneficios constituye un sólido argumento a favor del apoyo a las energías renovables.

6.3. FUNCIONAMIENTO DE UNA TURBINA EÓLICA³⁵

El viento hace girar las hélices conectadas a una turbina de viento. Estas hélices mueven un eje interno que en algunos casos está conectado a una serie de piñones para incrementar su revolución. Por medio de un campo magnético, el generador interno convierte la energía de rotación en energía eléctrica. Si el viento es muy fuerte, la turbina tiene un freno que impide que las hélices den

³⁵ Hybrytec: Empresa para el desarrollo de energías alternativas en Colombia; www.hybrytec.com

vueltas demasiado rápido y se dañen. Por último, la energía es enviada a un banco de baterías en donde esta energía es almacenada para ser utilizada en horas de alta demanda.

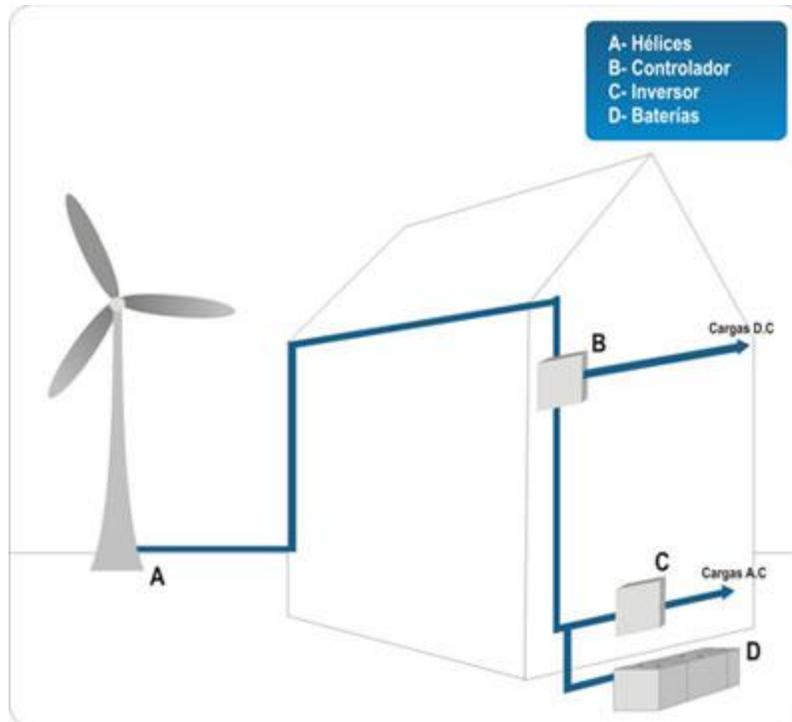


Figura 17. Componentes de un sistema de energía eólica

6.4. CAJA NEGRA DEL SISTEMA

El flujo principal para el sistema sería la energía eólica o cinética del aire que se transforma para generar una energía eléctrica resultante.

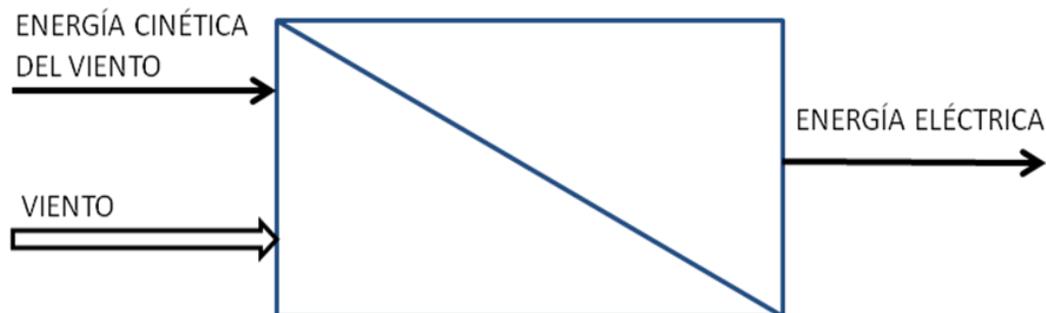


Figura 18. Caja negra del sistema

La caja negra principal (ver Figura 18. Caja negra del sistema) se puede desglosar en 2 subsistemas que al funcionar juntos o interrelacionarse, permiten generar y lograr la salida principal del sistema (energía eléctrica).

El flujo principal a la entrada del primero de los subsistemas es el aire (Mezcla de gases que constituye la atmósfera terrestre), el cual, a la entrada, se manifiesta de 2 formas; como viento (Aire en movimiento) y como energía eólica (Energía cinética generada por efectos de las corrientes de aire). Estos dos flujos entran a uno de los subsistemas, se genera una transformación y se obtiene una energía mecánica resultante. La salida de energía mecánica resultante entrará nuevamente a un segundo subsistema interconectado, que la transformará en energía eléctrica utilizable y almacenable.

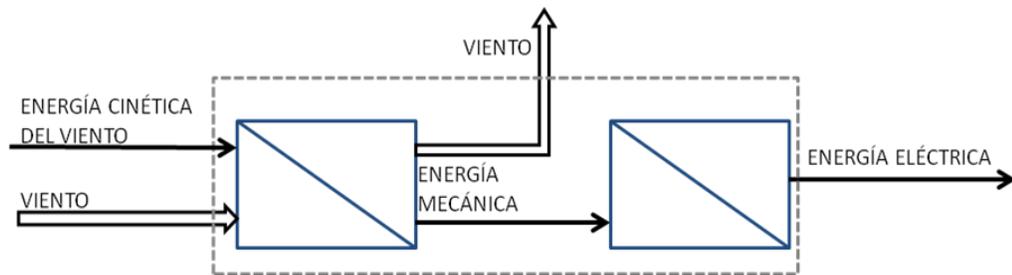


Figura 19. Subsistemas de la caja negra

- La función principal que debe realizar el sistema completo es Generar Energía Eléctrica.
- El sistema deberá generar electricidad por sí sólo. No deberá haber manipulación humana durante el proceso.
- Es importante que las entradas tengan condiciones específicas para obtener la electricidad esperada, es decir, la velocidad de entrada del viento debe ser no menor a 5 m/s y la energía eólica suficiente para accionar el movimiento de las aspas.

6.5. ESTRUCTURA DE FUNCIONES PARCIALES

La función principal del sistema es generar energía eléctrica, sin embargo, para que esto ocurra, es necesario que la turbina y sus partes, realicen otras funciones parciales que serán fundamentales, por tanto, dentro del sistema (turbina eólica) deben existir partes y elementos específicos que permitan alcanzar y cumplir con cada una de las funciones parciales.

Las funciones que deben realizarse para poder generar energía eléctrica se expresan en el siguiente mapa:

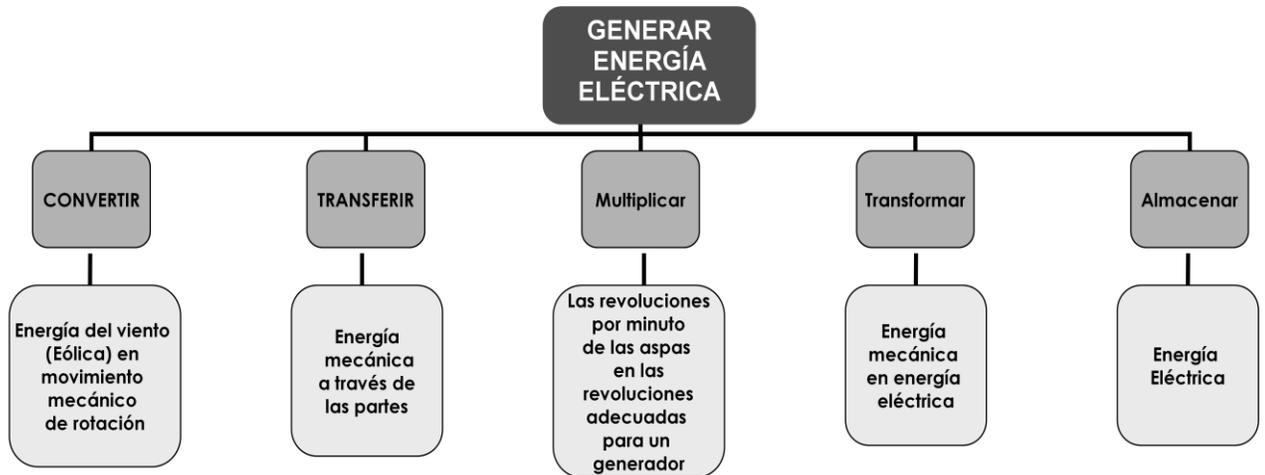


Figura 20. Funciones principales de sistema un de energía eólica

6.6. ESTRUCTURA FUNCIONAL SISTEMA

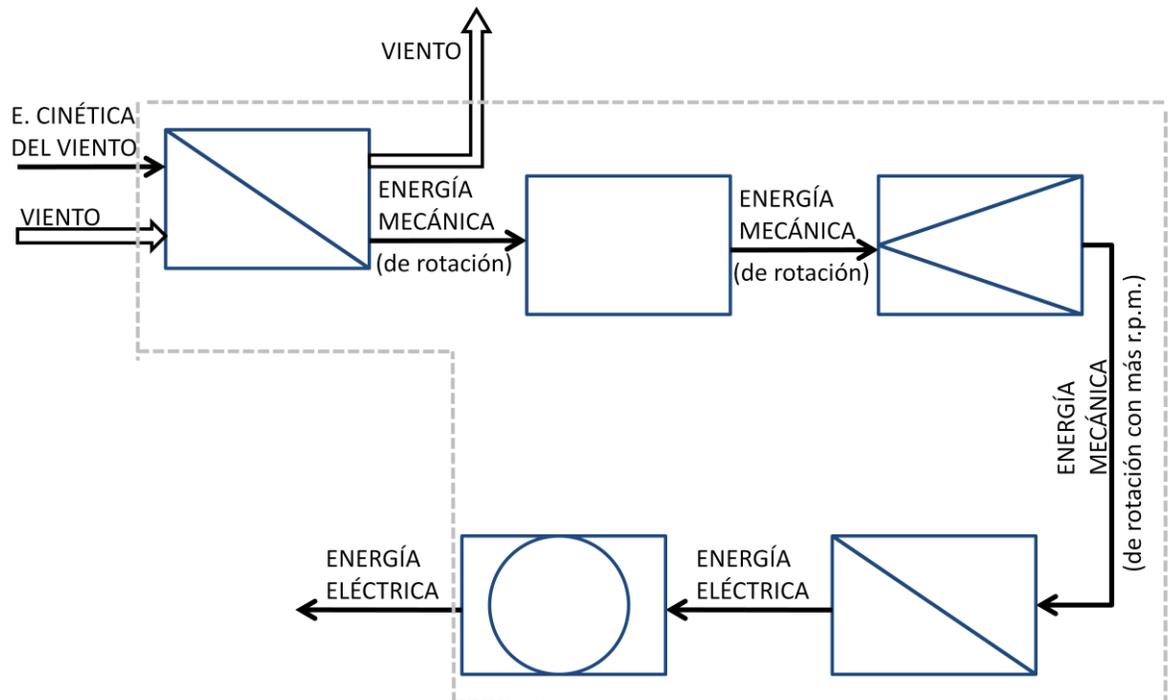


Figura 21. Estructura funcional del sistema

6.7. SÍNTESIS FUNCIONAL

Funciones parciales por elementos

Aeromotor de 3 aspas – transformar:

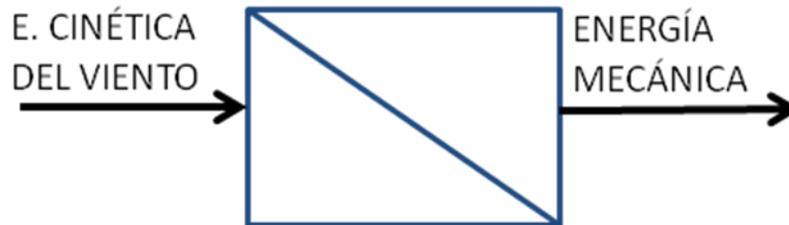


Figura 22. Función del aeromotor de 3 aspas

Eje principal y acople al generador – transferir:

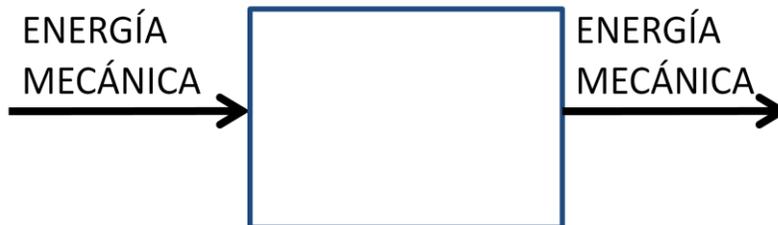


Figura 23. Función del eje principal y el acople al generador

Multiplicador – incrementar:

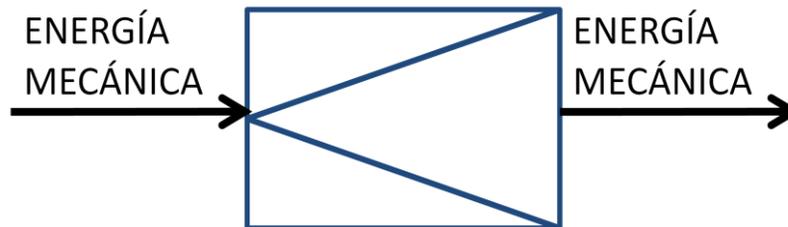


Figura 24. Función del multiplicador

Generador Eléctrico – transformar:

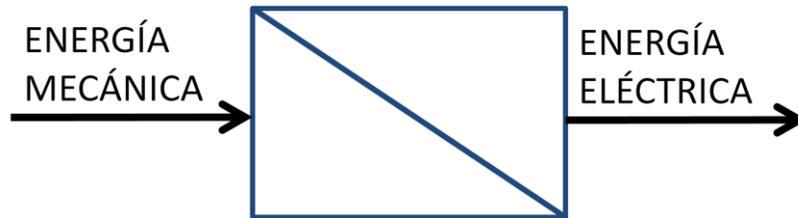


Figura 25. Función del generador eléctrico

Baterías – almacenar:

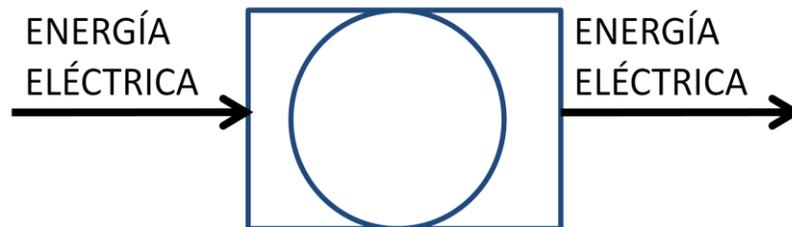


Figura 26. Función de la batería

6.8. TURBINA EÓLICA ORIGINAL: AIR X 400W

6.8.1. Justificación técnico-económica para la selección de la turbina AIR X 400W

Las turbinas eólicas pequeñas se pueden caracterizar como aquellas para aerogeneradores con una potencia nominal entre los 200 W y los 10 kW, sin embargo, las turbinas del orden de 10 kW, tienen diámetros aproximados de 7 m, cuestan más de US \$20.000 y necesitan velocidades superiores a 10 m/s para ser eficientes; por tanto, aunque serían buenas para dar solución a algunas comunidades o fincas con altos consumos energéticos, el solo análisis de vientos requerido las hacen estar fuera del alcance de este estudio.

Al hacer un análisis riguroso de las condiciones de viento en Colombia, son muy pocos los lugares en el país que se caracterizan por tener fuertes y constantes vientos durante todo el año (ver punto 5.3.4 Análisis del atlas de vientos colombianos).

El Atlas eólico realizado por el IDEAM y la UPME a manera de indicativo para determinar y estudiar el mercado, presenta algunos problemas, ya que, como se dijo anteriormente están desarrollados a partir de promedios horarios de

velocidades del viento, donde lo ideal sería promedios cada 10 minutos para determinar el potencial eólico y la intensidad de la turbulencia; pues, la energía es directamente proporcional al cubo de la velocidad del viento, y, no sería lo mismo la energía producida con velocidades del viento de 2, 4 y 6 m/s a la energía producida por velocidades de 1, 3 y 8 m/s; ya que, ambas series tienen el mismo promedio 4 m/s pero la energía producida por la segunda serie tiene un potencial 1.875 veces mayor (Aunque es importante considerar la variación de la velocidad-intensidad del viento, lo ideal es un lugar con velocidades elevadas sostenidas en el tiempo).

Fuera de los problemas anteriores, estos estudios sólo tienen mediciones de pocas estaciones meteorológicas, lo que hace, que la gran mayoría del territorio Colombiano no sea cubierto de manera adecuada; y, son tomados a 10 m de altura en estaciones de aeropuertos y otras estaciones con fines climáticos y no energéticos. Sin embargo, aunque estos estudios tengan algunos problemas, es la única base existente y es por medio de estos mapas construidos por el IDEAM que se pueden concluir las zonas de mayor potencial en Colombia y los rangos de velocidades del viento aprovechables para enmarcar el mercado.

Según el estudio de los mapas de viento realizados por el IDEAM, se concluye que lo más común en Colombia es encontrar velocidades del viento aprovechables desde 5 m/s hasta 10 m/s, por tanto, lo ideal sería concentrarse sólo en pequeños aerogeneradores que puedan funcionar y producir energía eficientemente con estos vientos moderados.

En el caso de la energía eólica, como en la gran variedad de energías, existe un factor de escala que se traduce en una relación directa entre el tamaño de los equipos y la energía que producen, es decir, que entre más grandes sean los equipos mayor energía se produce. Por lo tanto, una turbina pequeña que se fabrique para un rango de vientos entre 5 y 8 m/s, podrá sólo producir la energía para satisfacer las comodidades básicas de una sola vivienda y no de grupos de viviendas, lo que delimita y ajusta el mercado seleccionado.

Para casos en que las velocidades del viento son óptimas y no varían demasiado, (alcanzando niveles altos de energía producida), las turbinas eólicas pueden ir conectadas directamente a la red eléctrica, sin embargo, cuando las velocidades del viento son variantes a través del día y el mes, la turbina debe ir conectada un juego de baterías donde la energía producida pueda ser acumulada, para después ser utilizada y extraída por el consumidor, en el momento en que lo necesite. Al analizar las condiciones de vientos en el territorio nacional, se concluye que es difícil encontrar zonas con pocas variaciones de vientos, por tanto, la turbina debería ir conectada a juegos de baterías que permitan la acumulación y el uso de la energía. Según lo anterior, se descarta la aplicación de fabricar y conectar la turbina a la red eléctrica para competir directamente con la energía actualmente ofrecida en el país (que en su gran mayoría proviene de

centrales hidráulicas 70% y térmicas 30%) y se determina ofrecer una solución a partes no interconectadas del país donde una cierta cantidad de energía mejoraría considerablemente la calidad de vida de las personas.

Un estudio realizado por la empresa Hybrytec de Medellín estableció que la mayoría de clientes que solicitaban sus servicios (venta e instalación de turbina eólicas) querían dar solución a partes no interconectadas donde los consumos de energía eran generados por comodidades básicas, tales como, un televisor, un ventilador, una grabadora y Bombillos. De acuerdo a las tablas realizadas por la comisión federal de electricidad de México (ver Anexo 1. Consumo promedio de aparatos electrodomésticos) se define el siguiente consumo utilizando cada uno de los electrodomésticos durante 4 horas diarias: 4 bombillos ahorradores de 15 Watts, un televisor de color de 13 a 17", una radio grabadora y un ventilador de mesa; que generan consumos del orden de 32,25 kWh/mes (ver Tabla 31. Potencia y consumo mensual requeridos para suplir las necesidades del usuario). Esto puede alcanzarse con una turbina de potencia nominal del orden de 400 W con aspas alrededor de 1 m de diámetro y velocidades del viento de 5 m/s (ver Anexo 2. Especificaciones técnicas de la turbina).

Como conclusión se decide analizar y estudiar la factibilidad económica de rediseñar y realizar la apropiación tecnológica de una turbina de 400 W de Potencia nominal para ser utilizada en zonas no interconectadas del país donde las condiciones de viento favorezcan su empleo y sea solución para mejorar la calidad de vida de las personas residentes. Se buscó una turbina eólica con las condiciones anteriormente mencionadas y, a través de Hybrytec³⁶, se consiguió la turbina AIR X 400W para ser utilizada como base del estudio y de la apropiación.

6.9. JUSTIFICACIÓN INGENIERÍA INVERSA Y REINGENIERÍA

El objetivo de la ingeniería inversa en este proyecto es obtener información a partir de un Aerogenerador comercial; determinar de qué está hecho, qué lo hace funcionar y como fue fabricado. Este método avanza en dirección opuesta a las tareas habituales de ingeniería, que consisten en utilizar datos técnicos para elaborar un producto determinado. El resultado es un producto que puede fabricarse y distribuirse legalmente.

Aplicar ingeniería inversa supone profundizar en el estudio del funcionamiento del Aerogenerador, hasta el punto en el que se pueda llegar a entender, modificar, y adecuar dicho modo de funcionamiento.

En la parte de Reingeniería se revisan los pasos de funcionamiento y fabricación de cada sistema y se tratan de adecuar a las realidades colombianas.

³⁶ Hybrytec: Empresa para el desarrollo de energías alternativas en Colombia; www.hybrytec.com

6.9.1. Hybrytec. Sistemas híbridos de energía

¿Quiénes son?³⁶

Hybrytec es una empresa dedicada al diseño, desarrollo, comercialización e instalación de soluciones de energía limpia y renovable. Ofrecen sistemas de energía solar fotovoltaica y solar térmica económicamente rentables que ayudan a cubrir la creciente demanda, contribuyendo también con el mejoramiento del medio ambiente y los espacios sociales.

Su equipo de Ingeniería altamente calificado se enfoca en soluciones específicamente para los diferentes usos y necesidades del mercado Colombiano. El agudo enfoque en eficiencia y maximización del rendimiento permite reducir el costo de los sistemas que diseñan, asegurando siempre el uso de la mejor tecnología a nivel mundial. Además, cuentan con alianzas comerciales internacionales de gran envergadura con los mejores fabricantes de componentes y empresas de ingeniería solar de alto calibre.

6.9.2. Características de la turbina usada para la apropiación tecnológica; Air X 400W

AIR es la serie de pequeños generadores de viento contruidos por Southwest Windpower. Los generadores de viento “Air” se recomiendan para pequeñas aplicaciones de cargue de baterías; como veleros, casas remotas y zonas del mundo en desarrollo sin conexionado o servicio eléctrico.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS		
Diámetro del Rotor	1,15 m	46 in
Peso	5,85 kg	13 lb
Velocidad del viento para arranque	3,58 m/s	8 mph
Voltaje	12 V y 48 VDC	
Poder y capacidad nominal	400 W a 12,5 m/s	
Cuerpo	Fundición de aluminio con cubrimiento anticorrosivo	
Palas	Compuesto fibra-carbono	
Kilowatt hora por mes	38 kWh/mes a 5,4 m/s	
Velocidad de viento de supervivencia	49,2 m/s	
Garantía	3 años	

Tabla 15. Especificaciones técnicas de la turbina Air X 400W

Nota: La turbina AIR X 400W no requiere de multiplicador debido a que el generador con el que cuenta es especializado y comienza a generar energía eléctrica con pocas revoluciones (500 rpm).

Otras características:

- Abrazadera robusta para fijación de la base.
- Regulador de carga de batería.
- Libre de mantenimiento, consta de dos partes móviles.
- Modo seguro contra vientos fuertes: interruptor, que actúa bajando las revoluciones.



Imagen 1. Turbina AIR X 400W

Curva de potencia y producción mensual de energía

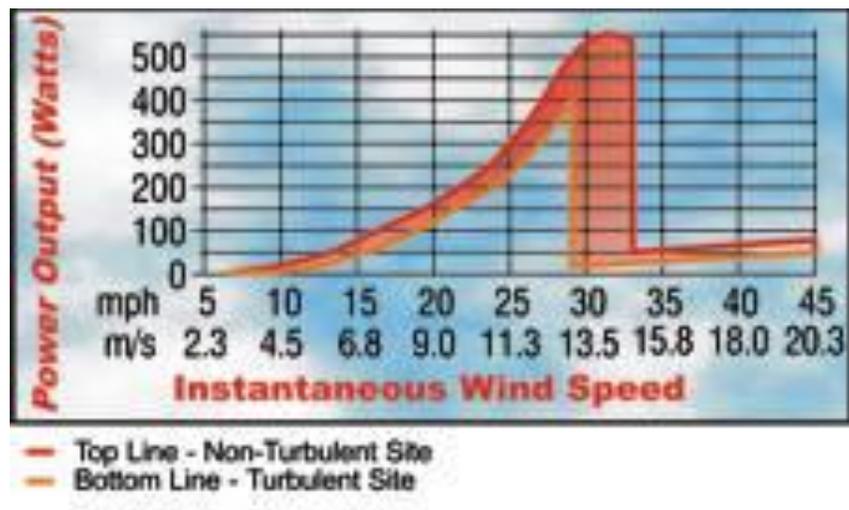


Figura 27. Curva de potencia

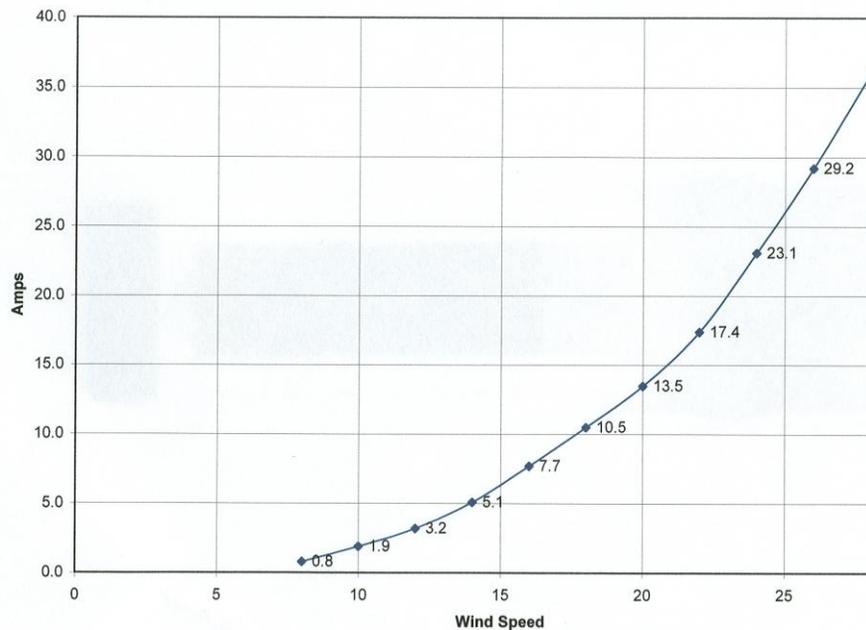


Figura 28. Corriente del aerogenerador en función de la velocidad del viento

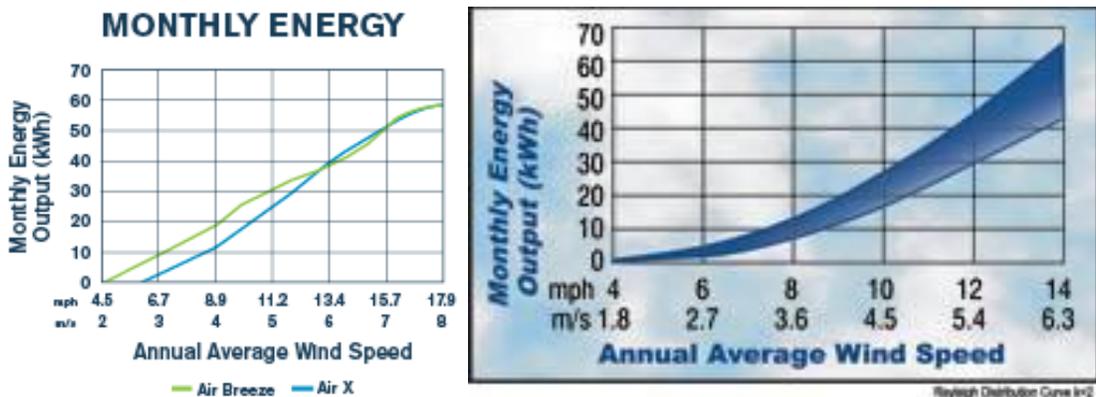


Figura 29. Velocidad del viento vs. energía mensual con distribución Rayleigh K=2

6.10. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO, REQUERIMIENTOS Y CRITERIOS DE ÉXITO

Los requerimientos y especificaciones para el diseño y fabricación de la turbina, deben sustentarse y fundamentarse en la turbina utilizada para la apropiación tecnológica, donde las especificaciones deben estar basadas en la turbina AIR X 400W, ya que, cambios sustanciales podrían generar inconvenientes funcionales en la nueva turbina.

La matriz de requerimientos y especificaciones de diseño es al mismo tiempo la matriz de criterios de éxito; su positivo cumplimiento y éxito dependerá sí es

factible la apropiación tecnológica de la turbina AIR X 400W, de la forma y con el rediseño (a partir de la metodología de diseño para el ensamble) que se haya realizado.

Nota: Al ser este un rediseño de una turbina existente todas las especificaciones son demandas y no deseos y por lo tanto requerimientos específicos que debe cumplir la turbina fabricada.

	NECESIDAD	INTERPRETACIÓN	MÉTRICA	UNI.	Criterio de Éxito	IM.
DIMENSIONES Y PESO	Las dimensiones y formas de las aspas deben ser las mismas de la turbina AIR X 400W	Las medidas y formas de las Aspas de la turbina deben respetarse, de forma que su comportamiento con las corrientes de aire sea óptimo y el funcionamiento y aerodinámica de las mismas no se afecte	Longitudes y radios principales	m	- Diametro del rotor general con aspas: 1,15 +/-5%	5
ERGONOMIA Y SEGURIDAD	Las partes con las que el usuario pueda tener contacto, no deben representar ningún riesgo	Que no existan superficies filosas, punzantes o mecanismos peligrosos expuestos al usuario	Número de superficies corto punzantes	Unidades	0	5
DESEMPEÑO	El rotor y sistema anterior al generador, alcanzan las revoluciones por minuto necesarias para hacer funcionar al generador	El rotor y el sistema anterior al generador alcanzan las revoluciones por minuto necesarias para hacer funcionar el generador y transformar la energía mecánica en eléctrica	El generador transforma energía mecánica de rotación en energía eléctrica	Si / No	Si	5
	Con las condiciones de viento mínimas que se tomaron en cuenta para el análisis del mercado, la turbina debería ser capaz de funcionar y lograr la energía para suplir requerimientos básicos de zonas no interconectadas	Con las velocidades del viento desde la cual fue seleccionado el mercado (desde 5m/s) deben lograrse los kWh por mes necesarios para hacer funcionar un televisor pequeño, un ventilador, 4 bombillos y una grabadora pequeña	kWh por mes logrados	kWh/mes a 5,4 m/s	38	5

	El sistema, al final, es capaz de producir la energía necesaria para cargar las baterías a 12 Voltios	El sistema es capaz de generar la energía suficiente para cargar la batería	Voltaje y Corriente	Si / No	Genera la energía suficiente para cargar baterías	5
CONTEXTO	No requiere de energía eléctrica ni de ningún otro combustible para comenzar a funcionar	La turbina no debe necesitar energía eléctrica ni ningún combustible para comenzar a funcionar	Corriente eléctrica o combustible	Voltios, m ³ , galones	0	5
CALIDAD	Las aspas deben ser en un material ligero	Las aspas deben ser en un material ligero que les permita responder a las necesidades aerodinámicas	Peso de las aspas	kg	Mx 0,8 kg	5
	Las aspas y el rotor (Buje) deben ser resistentes a la corrosión y a la erosión	Los materiales en que está construido el aspa y el rotor deben ser resistentes a las condiciones ambientales, deben tener buena resistencia a la corrosión por agua, oxígeno y microorganismos	Si o no presenta corrosión al exponerse a condiciones ambientales	Si / No	No	5
USUARIO	El usuario no necesita estar durante ningún momento	El usuario no tiene que realizar ninguna tarea para que la turbina funcione. La turbina debe, por si misma, transformar la energía cinética del aire en energía mecánica	Cantidad de operaciones que realiza el usuario durante el funcionamiento de la turbina	Pasos	0	5
COSTO	El valor total y final de la turbina fabricada es menor al de la turbina original AIR X 400W	El valor total y final de la turbina fabricada y rediseñada es menor que el precio de compra de la turbina original AIR X 400W puesta en Colombia	Dinero	\$	<2'494.000 (precio base cotizado por Hybrytec) ó 700 dólares en EEUU	5

	El valor de kWh/mes de la turbina en las zonas no interconectadas es más bajo que lo que valdría produciéndolo por otros medios comunes de producción eléctrica (Por ejemplo, plantas eléctricas accionadas por gasolina, etc.)	El valor de kWh/mes de la turbina es más bajo que el valor de producirlo por otros métodos comunes (utilizando otros medios para generación de energía eléctrica) en el mercado seleccionado (Zonas no interconectadas)	% de diferencia entre el valor kWh/mes de la turbina y otros	%	>5%	5
CONSUMO	La turbina no necesita consumir energía eléctrica ni ningún combustible fósil para funcionar	La turbina no necesita consumir energía eléctrica ni ningún combustible fósil, como gasolina, para funcionar	Consumo de energía eléctrica, gasolina, gas u otro combustible	Voltios, m ³ , galones	0	5

Tabla 16. Especificaciones de Diseño de Producto, PDS

6.11. MATRIZ MORFOLÓGICA

Posibilidades de rediseño para la manufactura y el ensamble

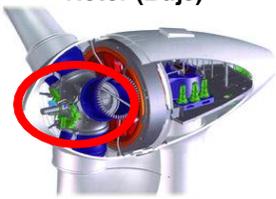
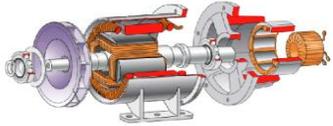
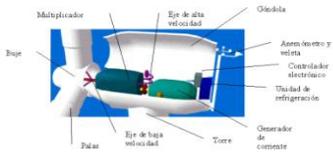
Posibilidades de rediseño para la manufactura y el ensamble.					
MATRIZ DE ALTERNATIVAS					
Rotor (Buje) 	Fabricación en Hierro fundido	Fabricación en Acero fundido	Fabricación en Aluminio fundido.		
Aspas 	Aluminio	Madera de Pino, o similar	Sintéticos	Resina polyester Ref:851 y fibra de vidrio	Fibra de carbono
Generador Eléctrico 	Generador de corriente continua (Dinamo)	Generador de corriente Alterna (Alternador)	Alternador modificado con imanes permanentes.	Motor de corriente continua invertido	
Acople del generador 	Acoplado al rotor	Acoplado a un multiplicador y de ahí al rotor			
Carcasa 	Aluminio	Resina y Fibra de vidrio			
Cola 	Aluminio	Resina y Fibra de vidrio			

Tabla 17. La matriz morfológica

La matriz morfológica desarrollada, define las posibilidades de rediseño que podrían existir para la fabricación y ensamble de las diferentes partes de la turbina.

Las posibilidades de rediseño de las partes, no pueden ser en elementos funcionales ni en formas, ya que, se podría afectar la capacidad funcional de la turbina, por tanto, las modificaciones y rediseños deben solamente estar representados por diferentes materiales y procesos de manufactura.

El rediseño de la turbina, permite explorar entre los diferentes tipos de generadores, ya que, cumplen la misma función de transformación de energía mecánica en eléctrica y no se estaría afectando directamente los diseños principales de la turbina.

6.12. EVALUACIÓN Y SELECCIÓN

A continuación se presentan las matrices de evaluación con las cuales se seleccionaron las opciones más adecuadas para fabricar cada uno de los componentes de la turbina eólica.

Cada elemento cuenta con diferentes factores de calificación con su respectiva importancia, y cada opción fue evaluada en cada uno de estos factores bajo una escala de 1,0 a 5,0.

6.12.1. Rotor

Factores de calificación	Ponderación	Hierro	Acero	Aluminio
Ligero	20%	3	4	5
Rígido	15%	5	5	4
Resistencia a la fatiga mecánica	20%	5	5	4
Resistencia a la erosión y a la corrosión	20%	5	4	5
Rápida y fácil fabricación	15%	5	3	4
Bajo costo de fabricación	10%	5	3	5
TOTAL	100%	4,6	4,1	4,5

Tabla 18. Matriz de evaluación: Rotor

6.12.2. Aspas

Factores de calificación	Ponderación	Aluminio	Madera	Sintéticos	Resina y fibra de vidrio	Fibra de carbono
Ligero	20%	2	3	4	5	5
Homogéneo	20%	5	3	4	4	3

Resistencia a la fatiga mecánica	20%	5	3	4	4	5
Resistencia a la erosión y a la corrosión	15%	5	2	4	5	5
De uso y producción sencillos	15%	4	3	4	4	2
Bajo costo de construcción	10%	3	5	4	4	2
TOTAL	100%	4,05	3,05	4,0	4,35	3,85

Tabla 19. Matriz de evaluación: Aspas

6.12.3. Acople del generador

Factores de calificación	Ponderación	Directo al rotor	Multiplicador
Ligero	20%	5	3
Facilidad de ensamble	20%	5	1
Eficiencia mecánica	20%	5	3
Resistencia a la fatiga mecánica	20%	5	4
Rápida y fácil fabricación	10%	5	3
Bajo costo de fabricación	10%	5	4
TOTAL	100%	5,0	2,9

Tabla 20. Matriz morfológica: Acople del generador

6.12.4. Carcasa y cola

Factores de calificación	Ponderación	Aluminio	Resina y fibra de vidrio
Ligero	20%	4	5
Excelente acabado	20%	5	4
Resistencia a la erosión y a la corrosión	30%	4	5
Rápida y fácil fabricación	10%	4	5
Bajo costo de fabricación	10%	3	5
TOTAL	100%	3,7	4,8

Tabla 21. Matriz morfológica: Carcasa y cola

Según lo anterior, los materiales y opciones de partes seleccionados; serían:

Rotor	Hierro Fundido
Aspas	Resina y fibra de vidrio
Acople al generador	Directo al rotor
Carcasa y cola	Resina y fibra de vidrio

Tabla 22. Resultados de las Matrices morfológicas

6.13. PROCESO DE INGENIERÍA INVERSA Y REINGENIERÍA

Proceso de reingeniería del Aerogenerador

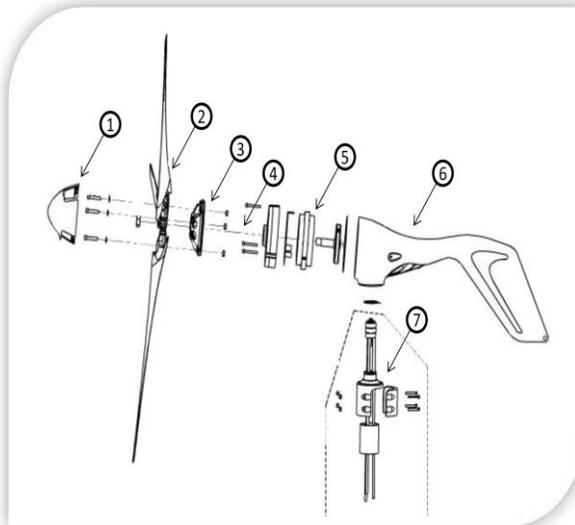


Figura 30. Plano en explosión de la turbina AIR X 400W

1. Cubierta de aspas
2. Aspar
3. Rotor
4. Eje de rotor
5. Generador + regulador
6. Carcasa
7. Sistema de sujeción a la estructura y cables de electricidad.

Detalle de ingeniería inversa:

- **Aspas:** Las aspas cuentan con una Aerodinámica especial de acuerdo a las velocidades del viento y a las necesidades del usuario.



Imagen 2. Aspa

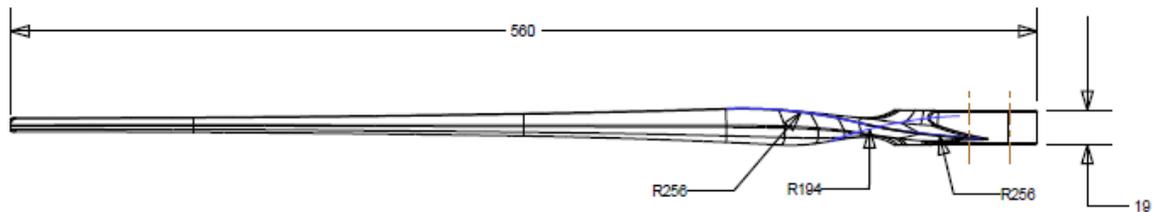


Figura 31. Plano del aspa

Tiene 3 dimensiones características:

- Sección transversal de la pala.
- El radio local (distancia entre el centro del aspa y el eje de rotación).
- El ángulo de la pala (Beta) que va desde una línea en la parte más alta del aspa al plano donde gira el rotor.

El Aspa está dividida en dos partes, una es el perfil del ala (parte que recibe la energía del viento) y otra es el extremo grueso que es la parte donde se ensambla con el rotor.



Imagen 3. Rotor

Su resistencia es calculada de acuerdo a las condiciones geográficas y de contexto a las que esté expuesta. Debe tener un margen de seguridad y considerar aspectos como el desgaste, el esfuerzo y la fatiga.

	AIR- X	APROPIACIÓN TECNOLÓGICA
Comparación de ASPAS		
Material	Fibra de Carbono	Resina Polyester 851 + Fibra de vidrio
Proceso	Inyección	Molde y Vaciado
Acabado	Del material y pintura anticorrosiva	Pintura Anticorrosiva
Peso	178gr	175gr
Dimensiones	56 x 2 cm	56 x 2 cm

Tabla 23. Comparación de las aspas

- **Rotor:** Los rotores verticales constan por lo regular de dos o tres aspas. A mayor número de palas mayor fuerza en el giro; aunque es difícil que logre girar lo suficiente el generador como para obtener la tensión requerida ya que iría más lento.

Las palas y el rotor son diseñados paralelamente buscando siempre la mejor eficiencia y aprovechamiento del viento con que se cuenta; para lograr, una buena potencia que logre finalmente cargar baterías y suplir las necesidades del usuario.

Los rotores se diseñan dependiendo de las palas. El diámetro está determinado por las características iniciales del proyecto; a mayor tamaño de las aspas, mayor es el requerimiento de superficie de contacto, ya que, se produce mayor potencia a igual velocidad de viento.

Las velocidades en el sistema rotor y palas están directamente relacionadas; es decir, la velocidad del viento, la velocidad en el extremo de las aspas y la velocidad en el centro del rotor.

	AIR- X	APROPIACIÓN TECNOLÓGICA
Comparación de ROTOR		
Material	Hierro fundido	Resina y fibra de vidrio
Proceso	Molde y vaciado	Molde y vaciado
Acabado	Pintura Anticorrosiva	Pintura Anticorrosiva
Peso	195.2 gr	271.7 gr
Dimensiones	12.7 x 2.5 cm	12.7 x 2.5 cm

Tabla 24. Comparación del rotor

- **Eje del rotor:** Es un eje maquinado que integra las aspas con el generador, debe cumplir con dos requerimientos:

Tener la menor fricción posible en el rotor ya que cualquier roce detiene el giro y disminuye el rendimiento.

Contar con una adecuada sujeción al generador.

	AIR- X	APROPIACIÓN TECNOLÓGICA
Comparación de EJE DE ROTOR		
Material	Acero	Acero
Proceso	Maquinado	Maquinado
Acabado	Textura acero	Textura acero
Dimensiones	1cm de diámetro	1,7cm de diámetro

Tabla 25. Comparación del eje del rotor

- **Generador:** Se diseña o se apropia tecnológicamente contando con los siguientes parámetros:

Potencia Requerida (Voltaje y Corriente).

Necesidades en rpm del sistema.

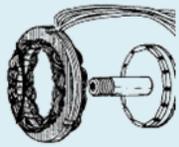
	AIR- X	APROPIACIÓN TECNOLÓGICA
Comparación de GENERADOR		
Producto	Generador	Alternador Modificado con Imanes de neodimio.
Proceso	Desarrollado en la empresa Southwest Windpower	
Adquisición		Importado

Tabla 26. Comparación del eje del generador

- **Regulador:** Es el elemento que se usa para controlar el Voltaje y la corriente de salida para que no dañe las baterías. Permite desconectar el generador cuando la batería está cargada, e impide el flujo de corriente de la batería a la turbina.

	AIR- X	APROPIACIÓN TECNOLÓGICA
Comparación de REGULADOR		
Producto	Regulador	Regulador 12V 25A
Proceso	Desarrollado en la empresa Southwest Windpower	
Adquisición		Importado

Tabla 27. Comparación del eje del regulador

- **Soporte:** Se emplea para soportar las piezas (alternador, regulador), con el fin de que no se desplace el centro de masa de la turbina y permanezca siempre estable.

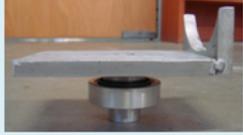
	AIR- X	APROPIACIÓN TECNOLÓGICA
Comparación de SOPORTE DEL SISTEMA		
Material	Acero	Acero
Proceso	Maquinado	Maquinado
Acabado	Pintura de Poliuretano	Pintura de poliuretano
Peso		545 gr
Dimensiones		3.5 x 3.5 cm

Tabla 28. Comparación del soporte del sistema

- **Eje de la torre:** Este sistema es desarrollado para que al girar el aerogenerador los cables no se tensionen y se desconecte de la parte eléctrica. Cuenta con un rodamiento de canastillas y dos ejes maquinados que lo cubren y dirigen los cables del generador a las baterías por el tubo de la torre.

	AIR- X	APROPIACIÓN TECNOLÓGICA
Comparación de EJE DE LA TORRE		
Material	Acero	Acero
Proceso	Maquinado	Maquinado
Acabado	Pintura de Poliuretano	Pintura de poliuretano
Peso		82.4 gr
Dimensiones		3.56 x 6.3 cm

Tabla 29. Comparación del eje de la torre

- **Carcasa:** Es el sistema de soporte final y de unión de piezas, cubre todas las partes eléctricas y le da una mejor apariencia al producto.

Cuenta con una cola que hace girar la turbina de acuerdo a la dirección del viento; es importante que la turbina pueda orientarse de acuerdo a las diferentes direcciones y velocidades de este; ya que, las aspas deben estar debidamente alineadas y equilibradas para que giren sin inconveniente.

	AIR- X	APROPIACIÓN TECNOLÓGICA
Comparación de LA CARCASA		
Material	Acero	Resina epóxica y fibra de vidrio
Proceso	Fundición	Molde y vaciado
Acabado	Pintura de poliuretano	Pintura de poliuretano
Peso	6 kg	
Dimensiones	68 x (14.2 diámetro) cm	

Tabla 30. Comparación de la carcasa

6.13.1. Evaluación de alternativas para el generador

Para la selección del generador, los criterios de selección deben estar basados en lograr el desempeño necesario para suplir las necesidades del usuario, es decir, lograr la energía suficiente para que el cliente pueda usar mínimo, durante cuatro horas al día, 4 bombillos ahorradores, un televisor de color de 13 a 17”, una radio grabadora y un ventilador de mesa; que generan consumos del orden de 32,25 kWh/mes (ver Tabla 31. Potencia y consumo mensual requeridos para suplir las necesidades del usuario).

Así mismo, la selección del generador debe basarse en las revoluciones que alcanza la turbina original AIR X 400W en ciertas condiciones de viento, ya que, definirá las revoluciones a las que el generador debe producir las condiciones eléctricas necesarias.

La siguiente tabla muestra las velocidades a las que la turbina original comienza a cargar una batería con energía eléctrica:

De acuerdo a las velocidades anteriores, se define que a partir de 500 rpm, el generador debe ser capaz de lograr la energía necesaria para los requerimientos del usuario. Es necesario que logre producir un voltaje superior a 12 V para empezar a cargar baterías.

Estudio de las condiciones eléctricas para la selección del generador, con base a los requerimientos de energía del usuario.

La siguiente tabla resume la potencia y el consumo mensual (kWh/mes) para suplir las necesidades del usuario especificado, de acuerdo al estudio de mercadeo realizado con Hybrytec y al nicho al que la aplicación va dirigida. Se establece que la potencia requerida por el usuario para suplir sus necesidades básicas es de 215 W, que en el día (para 4 horas) representaría un consumo energético de 32,25 kWh/mes.

Aparato	Potencia (Promedio) Watts/Unidad	Cantidad (unidades)	Tiempo de uso para estudio	Demanda de potencia (Watts) Total Diaria	Consumo mensual kilowatts-hora (Watts/1000) x Hora
ELECTRODOMÉSTICOS					
Bombillos ahorradores (15W c/u)	15	4	4 hr/día	240	7,2
Radio grabadora	40	1	4 hr/día	160	4,8
TV color (13-17 pulg)	50	1	4 hr/día	200	6
Ventilador de mesa	65	1	4 hr/día	260	7,8
Máxima potencia requerida por usuario (W)	215				
Energía media requerida al día (x 4 hr/día)	860 W-h/día				
Energía requerida en kWh/mes					25,8 kW-h/mes
Energía requerida con pérdida del 25% por batería, inversor y cables	1.075 W-h/día				32,25 kW-h/mes

Tabla 31. Potencia y consumo mensual requeridos para suplir las necesidades del usuario

Para el estudio no se tendrá en cuenta que hay elementos que no pueden ser conectados con corriente continua (CC) y otros con corriente alterna (CA), se asume que la carga será toda la proporcionada por el sistema, baterías a inversor y luego conexión a equipos.

Estudio de la potencia Eólica del sistema (Con relación al viento):

La potencia está determinada por la fuerza del viento actuando con las aspas del rotor. La máxima energía que el viento puede darle al rotor depende de la densidad del aire, el área de barrido del rotor y la velocidad del viento. Para que el

rotor pueda obtener esta energía es necesario provocar una reducción de la velocidad del viento, convirtiendo esta energía eólica en rotacional.

- La Energía producida por el aerogenerador es el producto de la potencia por el tiempo que sea producida:

$$E = P_{\text{eólica}} \times t$$

E: Energía producida (Wh)

P: Potencia eólica máxima (W)

t : Tiempo (h)

Sería necesario calcular la energía para cada velocidad por el tiempo que esté presente o conocer la distribución de velocidades del viento

Se puede observar que para una velocidad promedio de 5,5 m/s con un factor de distribución de forma de energía eólica K^{37} igual a 2 (conocida como distribución de Rayleigh) una turbina AIR X 400W puede proporcionarnos el consumo requerido por el cliente.

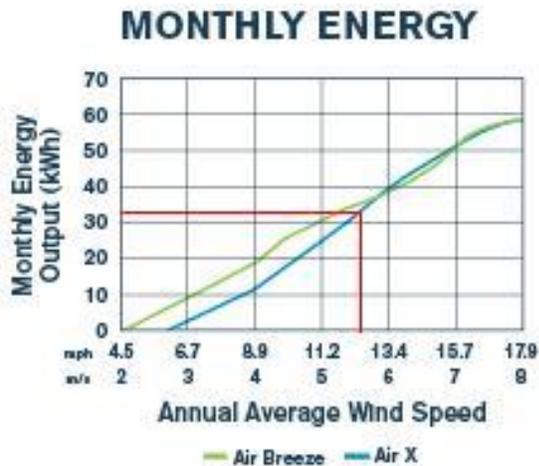


Figura 32. Gráfica Velocidad del viento vs. Energía mensual producida

- La potencia de un aerogenerador está dada por el producto entre la potencia extraíble del viento y la eficiencia de la turbina para cada velocidad:

³⁷ **Factor de distribución de forma de energía eólica K:** se define como la relación entre la energía obtenida en un año, N_{anual} , y la energía, \hat{N} , que se obtendría en ese año si la velocidad del viento se mantuviera constante e igual a la velocidad media. *Fuente:* Energía eólica en la industria argentina; <http://www.e-eolicasargentinas.com.ar/estadistic.htm>

$$P_{eólica} = \frac{1}{2} \rho \times A \times v^3 \times \eta$$

Donde:

$P_{eólica}$: Potencia eólica (W)
 ρ : Densidad del aire (kg/m^3)
 v : Velocidad del aire (m/s)
 A : Área de barrido del rotor ($\pi (D^2/4)$)
 η : Eficiencia de la turbina

La máxima potencia teórica está dada por el límite de Betz³⁸ igual a 0,593; lo que significa que sólo el 59,3% de energía contenida en el viento podría ser aprovechada por una turbina eólica.

En la realidad, los aerogeneradores pequeños están diseñados para alcanzar eficiencias entre el 20% y el 35% a lo largo de su curva de potencia.

- Después de haber obtenido la potencia a partir de la velocidad del viento y asumiendo que se cargarán baterías de 12 V, entonces se puede deducir la corriente teórica que proporcionaría el sistema usando la siguiente fórmula.

$$P = V \times A$$

Donde:

P : Potencia (W)
 V : Voltaje (V)
 A : Corriente (A)

Se calcula a continuación las variables del aerogenerador en función del viento, donde la potencia se obtiene de la Figura 27. Curva de potencia) y se determina la corriente que sería necesaria obtener de un generador para cada velocidad del viento:

³⁸ **Límite de Betz:** es una ley física que indica que la potencia teórica máxima recuperable por un generador eólico es igual a 16/27 de la potencia incidente del viento. Prandt y Betz demostraron analíticamente que el rendimiento máximo de los rotores eólicos no podía sobrepasar 59,3 % (límite de Betz). En los momentos actuales, los rotores más modernos no rebasan 45 %, lo cual certifica la validez de aquellos estudios. *Fuente:* MORENO, Conrado Figueredo; Producción de electricidad con energía eólica. <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia32/HTML/articulo03.htm>

V (m/s)	P (W)	Voltios	Corriente (A)
3,5	10	12	0,83
4	15	12	1,25
5	30	12	2,50
6	50	12	4,16
7	80	12	6,67
8	125	12	10,41
9	165	12	13,75
10	225	12	18,75
11	290	12	24,16
11,5	320	12	26,67
12	350	12	29,16
12,5	400	12	33,33

Tabla 32. Velocidad del viento, revoluciones por minuto, potencia eólica, voltaje y corriente

Cálculo de las rpm del aerogenerador

Todo generador posee una velocidad específica que depende de la aerodinámica de las aspas, Dependiendo de esta velocidad específica, el generador tendrá una velocidad del rotor en función de la velocidad del viento (ver Anexo 4. Deducción de la fórmula para hallar la velocidad de rotación del eje del generador en función de la velocidad del viento y la velocidad específica de la turbina):

$$\omega = (60 * Vv) / \pi \varnothing_{\text{rotor}} * \lambda$$

Donde:

ω : Velocidad del Aerogenerador (rpm)

Vv: (Velocidad del Viento (m/s)

π : Pi (Constante 3,1416)

$\varnothing_{\text{rotor}}$: Diámetro del Rotor (m)

λ : Constante de Velocidad específica. Depende de la aerodinámica del aspa, ángulo de ataque y ancho de las palas.

Basándose en la información técnica de la turbina original (500 rpm a 3,58 m/s) se haya el λ necesario para plantear la curva teórica de n (rpm del rotor) con base a la velocidad del viento (m/s).

Despejando λ tenemos:

$$\lambda = \omega / ((60 * Vv) / \pi \varnothing_{\text{rotor}})$$

Reemplazando en la fórmula:

$$\lambda = 500 \text{ rpm} / (60 * 3,58 \text{ m/s}) / (3,1416 * 1,14 \text{ m})$$

$$\lambda = 8,43$$

Para hallar las rpm a diferentes velocidades se vuelve a reemplazar λ en la fórmula:

Velocidad del viento (m/s)	Revolución del Aerogenerador (rpm)
3	424
4	565
5	706
6	847
7	989
8	1130
9	1271
10	1412
11	1554
11.5	1624
12	1695
12.5	1765

Tabla 33. Relación velocidad del viento y velocidad de giro del generador

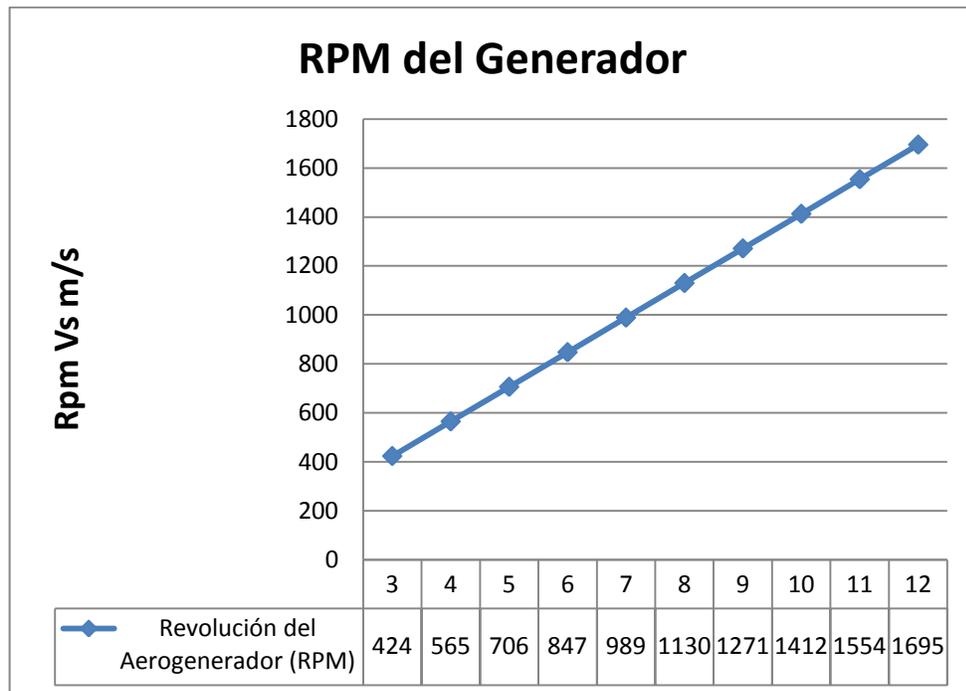


Figura 33. Gráfica velocidad del viento vs. Revoluciones del generador

A continuación se muestra una grafica con los parametros de velocidad del viento (el cual esta ligado a las rpm del generador), potencia de la turbina y corriente necesarias en el generador para cargar una batería de 12 V.

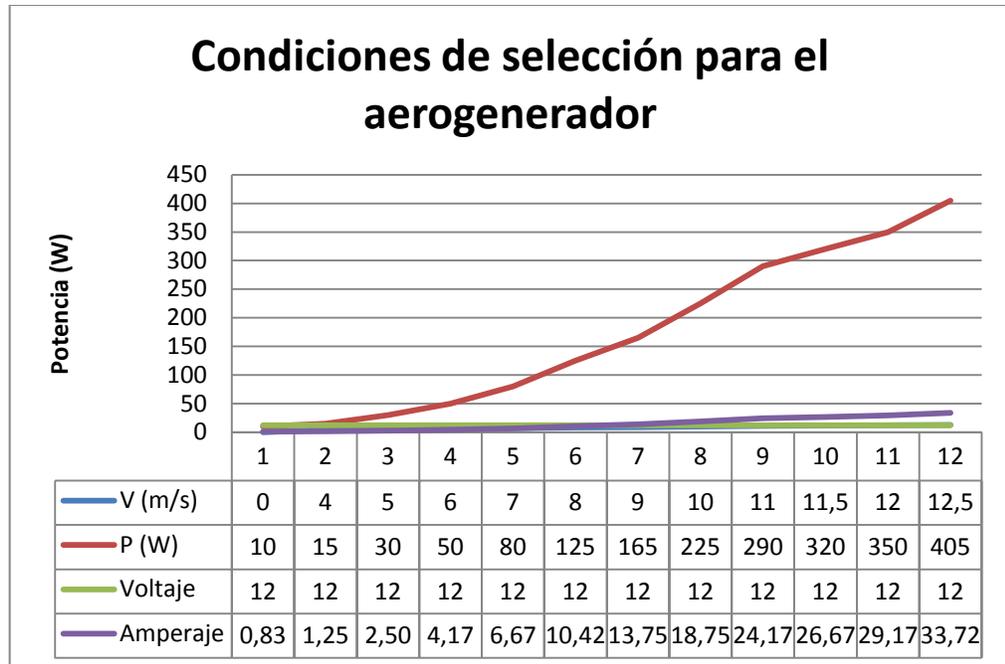


Figura 34. Gráfica velocidad del viento vs. Potencia, voltaje y corriente

- Adicionalmente se muestra una tabla con un estimado del tiempo que se demoraría cargando una batería de 12V para cubrir una demanda de 1075 Wh/día (Energía media requerida al día durante 4 hr con una pérdida aproximada por batería del 25%) y una eficiencia del sistema del 33%.

Selección del generador según requerimientos.				
Voltaje nominal	Corriente	P (Watts)	Horas de carga teórica	Horas de carga real (Eficiencia del Sistema de 33%)
12	1	12	89,6	149,6
12	2	24	44,8	74,8
12	4	48	22,4	37,4
12	6	72	14,9	24,9
12	9	108	10,0	16,6
12	13	156	6,9	11,5
12	17	204	5,3	8,8
12	23	276	3,9	6,5
12	26	312	3,4	5,8
12	30	360	3,0	5,0
12	34	408	2,6	4,4

Figura 35. Selección del generador según los requerimientos

Se recomienda contar con un juego de dos baterías instaladas con el fin de alargar su vida útil y optimizar el sistema, ya que, la exigencia de las baterías es menor si mientras se carga una batería se consume energía de la segunda.

El siguiente diagrama, muestra la entrada instantánea de las baterías.

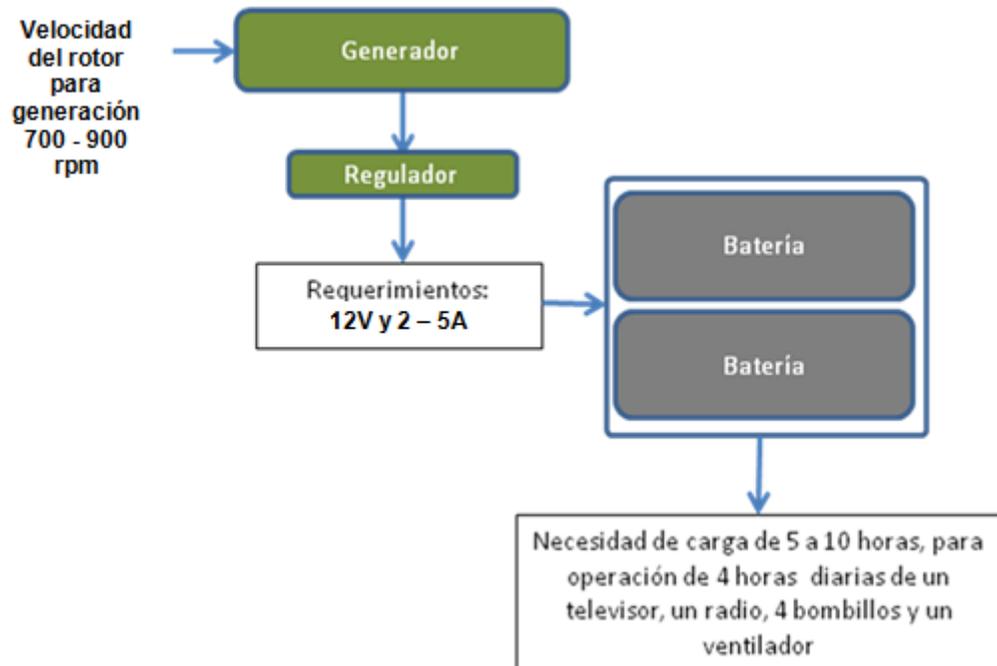


Figura 36. Entrada instantánea de las baterías

La salida de Voltaje y Corriente más exigente a la que podría estar expuesto el sistema, es el caso en que el usuario utilice la energía de la batería operando al mismo tiempo el televisor, el radio, los 4 bombillos y el ventilador.

Es requerido mantener siempre conectado el aerogenerador a la batería, ya que de no hacerlo el viento puede hacer girar más rápido las aspas y colapsar en algún momento el sistema.

La siguiente tabla, muestra el resumen de los requerimientos de salida del sistema para cargar las baterías y generar los 1.075 W necesarios para cumplir los requerimientos diarios del usuario.

Velocidad media del Rotor (RPM) para generación	Velocidad media del viento (m/s) de arranque	Voltios mínimos para cargue de batería	Amperios	Horas de carga real (factor de disponibilidad 33%)
700 - 900	5 - 6	12	2 - 5	15 - 24

Tabla 34. Resumen de requerimientos de salida para la carga de las baterías según las necesidades del usuario

6.13.1.1 Investigación de alternativas de generadores para la selección del generador final

Ya que en Colombia los generadores eólicos especializados no son comerciales, se plantearon e investigaron varias ideas:

- **Dinamo de carro viejo:** El dínamo de los carros viejos no se puede utilizar, ya que, este solo funciona para cargar baterías a las velocidades de diseño, por debajo de estas velocidades el voltaje no es suficiente.

Además, la presencia de escobillas y colectores en el bobinado requieren de un mantenimiento periódico.

- **Alternador:** La mayoría de los alternadores comerciales, deben girar a una velocidad elevada y estable para su correcto funcionamiento, sin embargo, se analizó la posibilidad de utilizar un alternador de carro. Éste alternador está diseñado para producir energía a altas rpm, entre 1.800 y 3.600.

Se probó un alternador de un carro Sprint para analizar las Revoluciones mínimas a las que generaba y analizar la posibilidad de utilizar un multiplicador que lograra incrementar las revoluciones resultantes del movimiento de las aspas. El alternador comenzaba a generar energía a partir de 1.800 rpm.

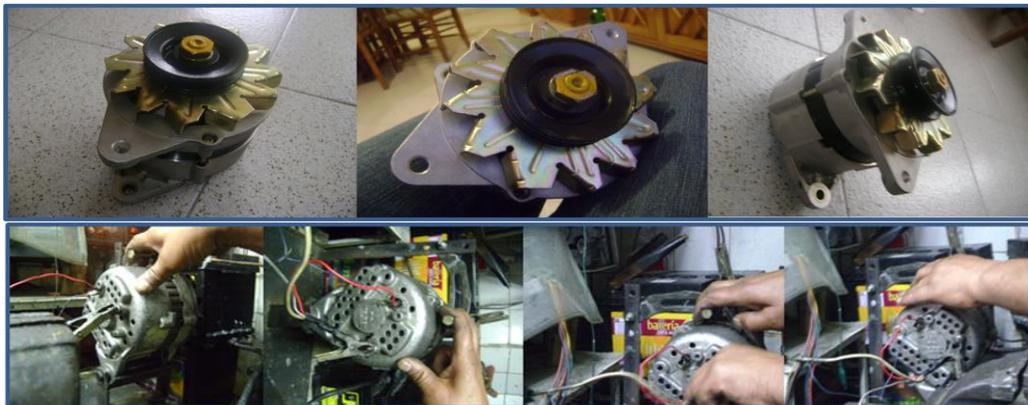


Imagen 4. Pruebas de alternadores

Al analizar la posibilidad del multiplicador, se miraron 2 opciones; un multiplicador de poleas y uno de engranajes. La relación de poleas no era suficiente para lograr las revoluciones necesarias (1.800 rpm) y la mayor transmisión requería de poleas de gran tamaño. El multiplicador de engranajes, aunque representaba una mejor opción, requería de un torque muy alto que imposibilita el movimiento de la turbina utilizada (esta solución es adecuada para turbinas de mayor tamaño).

Para utilizar un alternador comercial, se recomienda entonces modificar un alternador, introduciendo un juego de imanes permanentes y cambiando el bobinado por espiras más pequeñas (Aumento del número de espiras por bobina en el inducido), utilizando un diámetro de alambre calibre 23 con 40 vueltas).

Un resultado típico de lo que uno puede esperar con esta modificación se muestra a continuación.

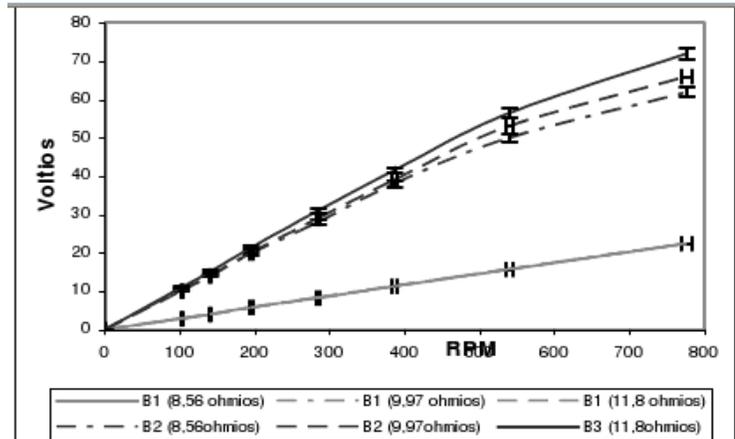


Figura 37. Voltaje resultante de un alternador modificado³⁹

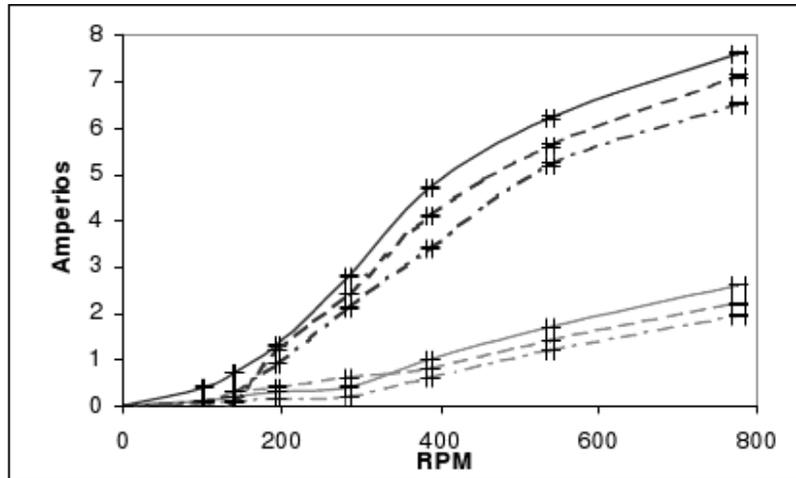


Figura 38. Corriente resultante de un alternador modificado³⁹

“La utilización de Imanes permanentes (Neodimios, Hierro y Boro) que poseen una alta inductancia magnética permiten la obtención de voltajes (50-120 V), corriente (3-8A) y potencia eléctrica (200-1200W) con el bobinado modificado a bajas revoluciones del rotor (300-700RPM) del generador”³⁹.

³⁹ SEPÚLVEDA PINILLA, Álvaro Enrique; SANTOS, Jaime Alfonso, Ingeniero Mecánico; Adaptación de un Generador Eléctrico de Imanes Permanentes y flujo radial; Universidad de los Andes; Columbus.uniandes.edu.co:5050/dspace/bitstream/.../mi_1187.pdf

Se consideró modificar el alternador según recomendaciones, sin embargo, por la dificultad de conseguir los imanes y debido a la dificultad y a que el propósito del proyecto no es diseñar el generador, lo cual debe considerarse en el caso de realizar un proyecto de turbinas eólicas a mayor escala, se decidió analizar otras opciones.



Imagen 5. Exploración y reconocimiento del alternador desarmado para análisis de opciones de modificación

- **Motor de corriente continua de imanes permanentes:** Cualquier motor de CC puede ponerse a trabajar de manera inversa y producirá algún voltaje y determinada corriente, el problema es que han sido diseñados para trabajar como motores y no como generadores, por tanto, es necesario ensayar una gran variedad y mirar cómo se comportan.

Lo que se busca es un motor con alta salida de voltaje, bajas rpm y alto corriente, ya que, para cargar baterías de 12 V necesitaremos un motor que genere 12V a bajas rpm y una cantidad de amperios útiles.

Por ejemplo un motor especificado para 325 rpm y 30 V cuando es usado como generador puede producir 12 V a algunas RPM inferiores, pero un motor especificado con 24 V a 7.200 rpm no producirá 12 V hasta estar en algunos miles de rpm.

Para el objetivo de este trabajo y en búsqueda de los requerimientos eléctricos planteados anteriormente serian de más de 12 Voltios a bajas revoluciones (entre 400 y 500 rpm) y de 6 a 8 amperios a revoluciones medias (Entre 1.000 y 1.200 rpm).

Se ensayaron varios motores de corriente continua marca AMETEK, algunos no cumplían con las necesidades ya que el voltaje caía por debajo

de 12V al conectar una carga o simplemente no producían los amperios requeridos. El montaje para los ensayos se muestra a continuación:

MOTOR AMETEK (Lamb 50VDC ref: 116150-02)			
Motor Corriente Continua, de imanes permanentes Ametek			
			
Velocidad (v)	Voltaje en vacio (V)	Voltaje con carga (V)	Resistencia (R)
r.p.m	Voltios, V	Voltios, V	ohmnios, Ω
990	15,3	11,6	20

Tabla 35. Resultados pruebas AMETEK 50 VDC ref: 116150-02

MOTOR AMETEK (Lamb Electric Division Ref: 116480-00)				
Motor Corriente Continua de imanes permanentes Ametek				
				
Velocidad (v)	Voltaje en vacio (V)	Voltaje con carga (V)	Resistencia (R)	Corriente en corto
r.p.m	Voltios, V	Voltios, V	ohmio, Ω	Amperios, A
510	15	14,7	52	0,28
600	17,46	17,0	52	0,32
650	18,2	17,76	52	0,33
990	27,82	27,1	52	0,51

Tabla 36. Resultados pruebas motor AMETEK Ref: 116480-00

Con base en una investigación en Internet, se encuentran las siguientes 3 opciones de motores de corriente continua con cumplen con las necesidades de rpm, voltaje y corriente.

rpm	Ametek 99VDC		Indiana 24VDC		Ametek 30 VDC	
	Voltaje	Amperaje	Voltaje	Amperaje	Voltaje	Amperaje
100			6.12	1.64	3.36	1.00
200			12.24	3.28	6.71	2.00
300			18.36	4.93	10.07	3.00
350	13,2	13,7				
400			24.48	6.57	13.24	3..95
500			30.60	8.21	16.60	4.88
550	21	24,7			18.50	5.30
600			36.72	9.85	19.92	5.85
650	24,5	23,6				
700			42.84	11.49	23.24	6.83
750	28,3	26,2				
800					26,90	7,20
850	31,9	28,2				
900					30,00	8,00
950	35,5	29,3				
1000	37,2	30,8			33,50	8,70
1050	39	31,2				

Tabla 37. Resumen de resultados de las pruebas realizadas a los motores

Como el propósito del proyecto no es diseñar el generador, lo cual debe considerarse en el caso de realizar un proyecto de turbinas eólicas a mayor escala y, debido a los resultados poco satisfactorios de los motores de corriente continua, se decide comprar un generador diseñado específicamente para turbinas eólicas, ofrecido por Windpower en Estados Unidos (Generador DC 520), que según su curva teórica de Voltaje y Amperaje alcanza los requerimientos eléctricos planteados.

6.14. GENERADOR SELECCIONADO

Se analizaron 2 opciones, un alternador modificado y un motor AMETEK de 30 VDC.

ALTERNADOR DC-520

Según datos del fabricante, este generador se realizo modificando un alternador de un Chevy Camaro de 8 cilindros con aire acondicionado, con la inclusión de imanes de neodimio y cableando el bobinado.



Imagen 6. Alternador modificado DC-520

El alternador DC-520 es adecuado para aplicaciones en áreas donde el promedio de velocidad del viento sea de 10 MPH (4,47 m/s) o más.

El gráfico a continuación representa los resultados reales en un soporte de prueba. Las lecturas de voltaje fueron tomadas con el circuito abierto (sin carga) mientras la corriente fue tomada en corto.

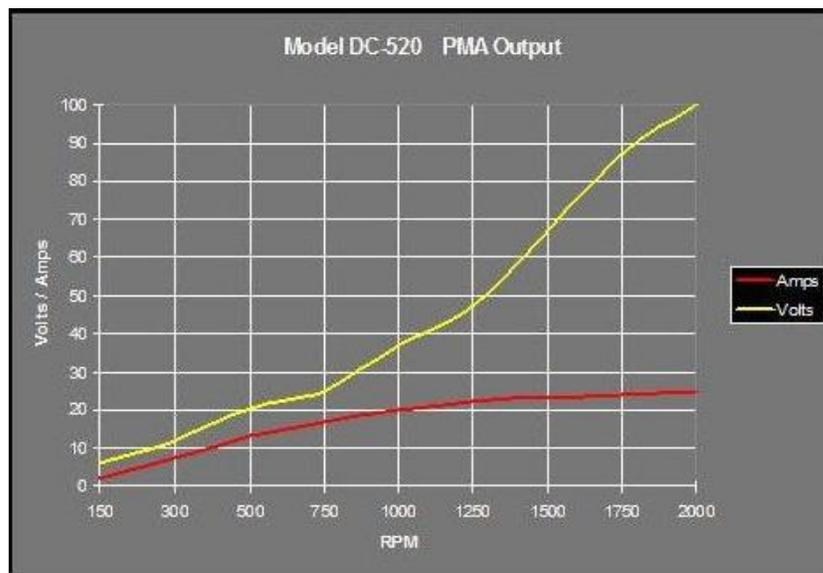


Figura 39. Curva de potencia y voltaje del alternador modificado DC-520

Características principales⁴⁰:

- Diseñado sin escobillas lo que elimina la necesidad de mantenimiento y reduce la fricción.
- Núcleo de imanes de neodimio (Grado N40) que reemplazan la bobina de campo electromagnético ineficiente.

⁴⁰ Wind blue power; Model 520.DC;
http://www.windbluepower.com/Permanent_Magnet_Alternator_Wind_Blue_High_Wind_p/dc-520.htm

- Incorporado rectificador. (La salida de DC es no regulada).
- Alcanza una salida de 12 Voltios a sólo 275 rpm, y desde allí, el voltaje sigue subiendo con las rpm. Produce 25 AMPS en una batería de 12 voltios a 2.000 rpm.

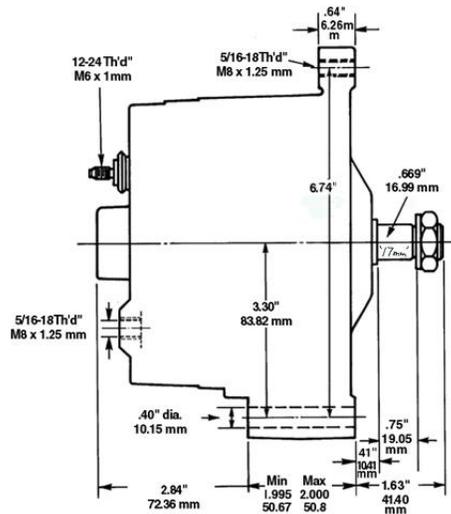


Figura 40. Vista y dimensiones principales del alternador modificado DC-520

Pruebas del generador

Curva real de corriente y de Voltaje vs. rpm

Se realizó la prueba eléctrica sobre el sistema, utilizando una resistencia de $0,5 \Omega$ y midiendo el voltaje sin carga.

Registro fotográfico de las pruebas

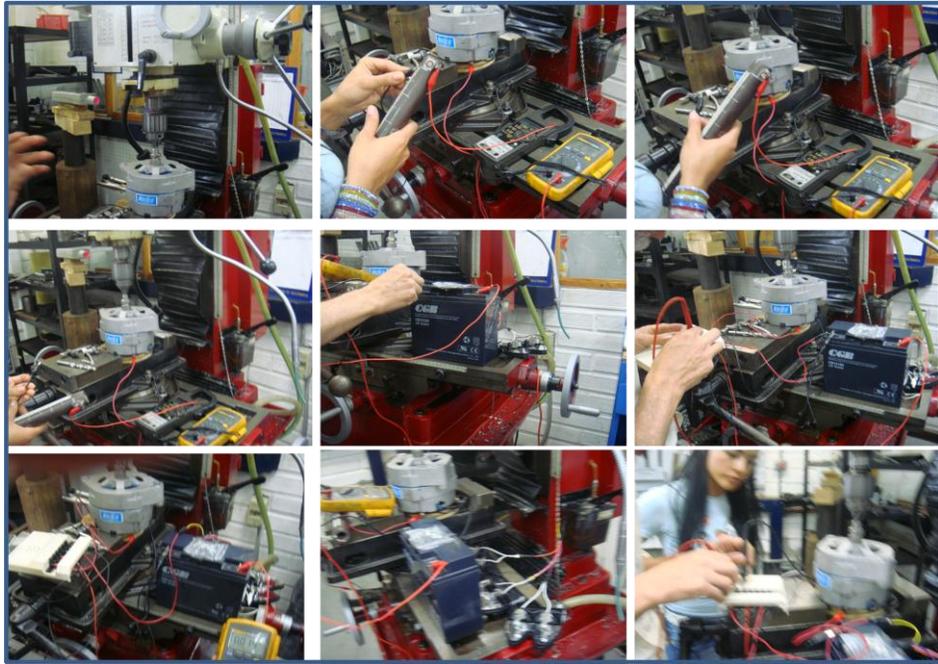


Imagen 7. Secuencia de pruebas eléctricas

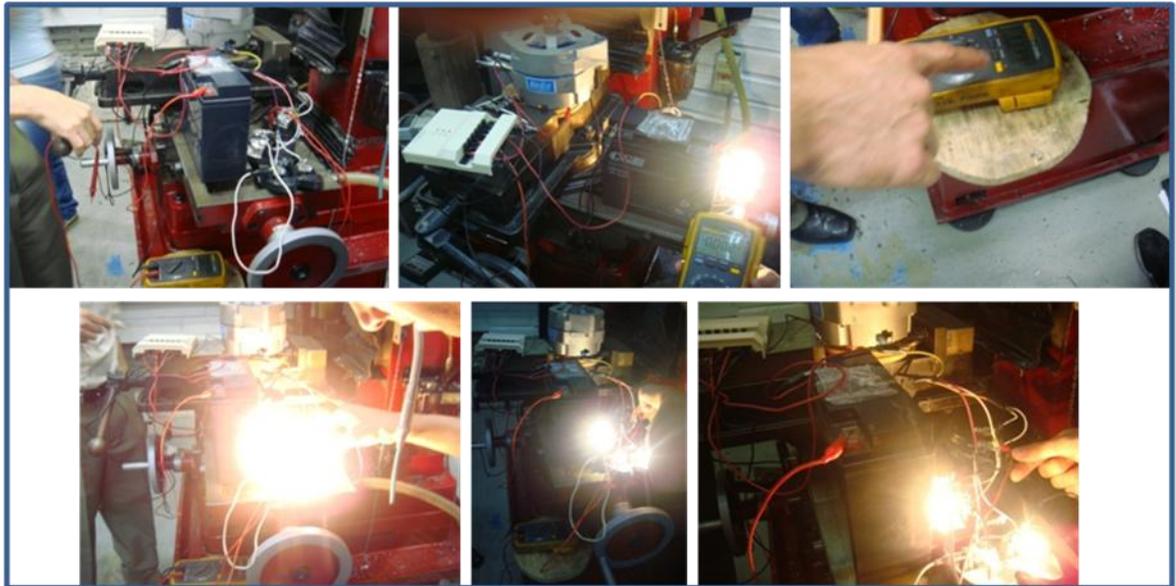


Imagen 8. Pruebas encendido bombillos, cada uno de 4,6 Amperios

Se halló la potencia del sistema utilizando la fórmula de potencia

$$P = I^2R$$

Donde:

P: Potencia del generador

I: Corriente en amperios

R: Resistencia: Ohm

Los resultados obtenidos se registran en la siguiente tabla y los siguientes gráficos:

rpm	Corriente (A)	Voltaje (V)	$P=I^2R$
214	6,8	11,6	23,1
359	12,2	19,7	74,4
690	21	38,5	220,5
1090	28,4	69	403,3
2020	32,6	115	531,4

Tabla 38. Resultados de la prueba eléctrica sobre generador final

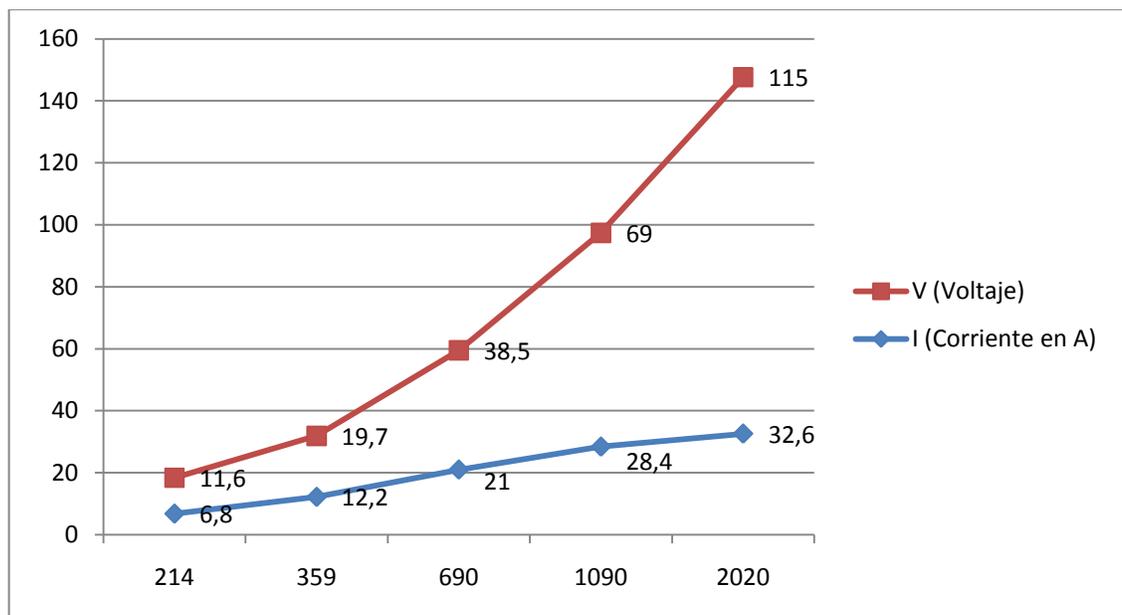


Figura 41. Voltaje y Corriente vs. rpm

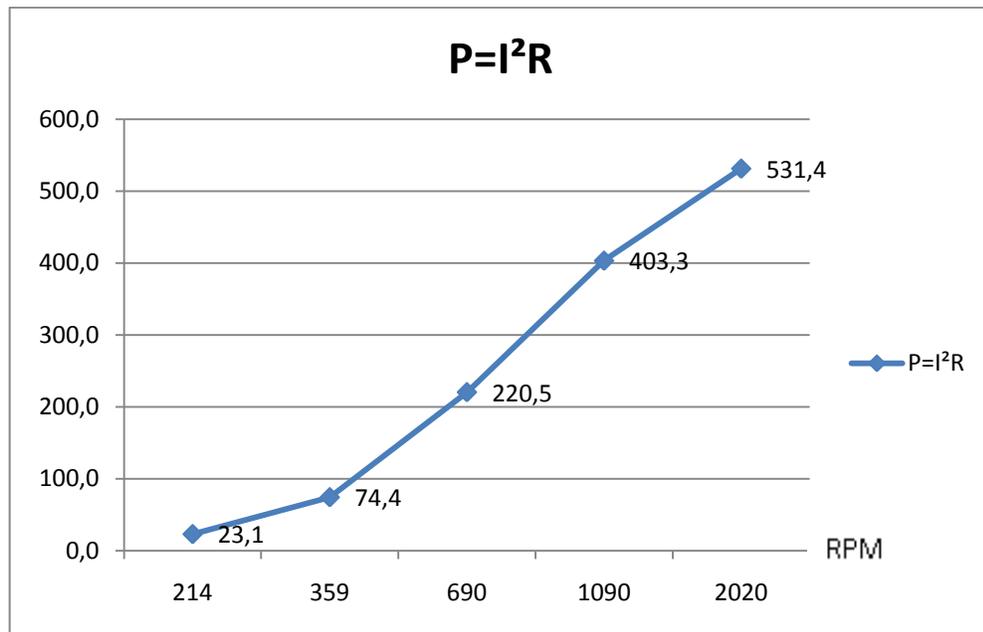


Figura 42. Potencia vs. rpm

Se puede observar que el generador cumple con las expectativas y sus resultados son muy similares a los obtenidos en la investigación teórica. Las curvas de potencia del fabricante del alternador modificado y la de los resultados de pruebas son muy similares y satisfactorias.

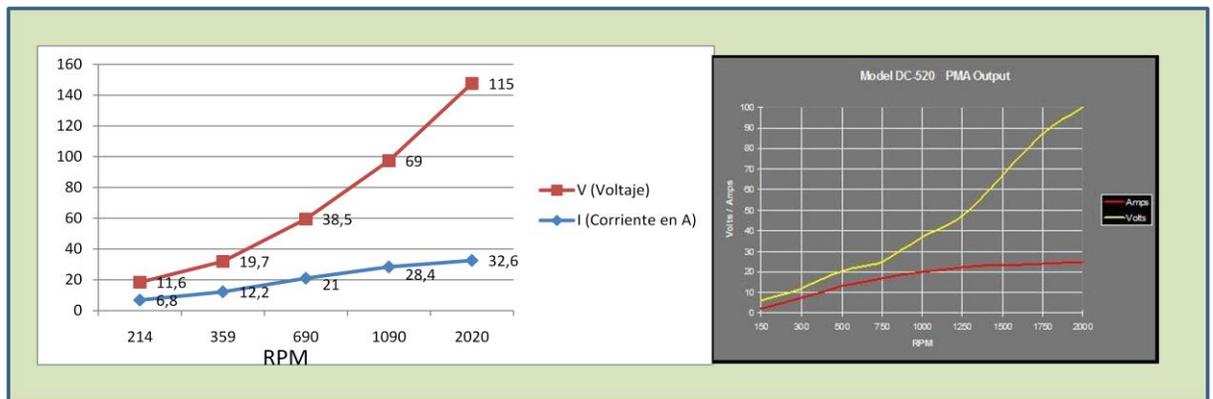


Figura 43. Comparación de la curva de potencia de prueba vs. La del fabricante

El problema con este alternador es el torque necesario para mover el eje. Al hacer unas pruebas experimentales de movimiento se llega a la conclusión de que sería necesario construir unas aspas mucho más grandes para que el torque generado por la fuerza del viento venza la inercia del alternador.

Motor AMETEK 30VDC Ref: 170483K7

Este es el motor mencionado anteriormente en la tabla 42, es un motor de imanes permanentes que funciona bien cuando trabaja como generador, Aunque sería necesario pruebas en túnel de viento, la poca inercia de giro del eje del motor hace suponer que el viento a bajas velocidades tendría la fuerza necesaria para mover la turbina.



Figura 44. Motor AMETEK 30 VDC

Una tabla teórica que incluye: valores de corriente encontrados en Internet y corroborados para ciertas rpm en el laboratorio, valores de voltaje que puede proporcionar el motor al ser conectado a una batería de 12 V y teniendo en cuenta la correlación entre las rpm a las que giraría el motor de acuerdo al diseño aerodinámico del aspa se muestra a continuación:

m/s	rpm	Amp	Volt
3,5	495	4,90	12,75
4	563	5,96	13,10
5	704	7,02	13,45
6	844	8,08	13,80
7	985	9,14	14,15
8	1126	10,20	14,50
9	1267	11,26	14,85
10	1407	12,32	15,20
11	1548	13,38	15,55
12	1689	14,44	15,90
13	1829	15,50	16,25

Tabla 39. Velocidad del viento, rpm, corriente y voltaje del motor Ametek 30 VDC

Los datos de potencia que puede suministrar el sistema se hallan calculando la potencia extraíble del viento teniendo en cuenta el área de barrido del rotor ($1,02 \text{ m}^2$), la densidad del aire a condiciones estándar ($1,225 \text{ Kg/m}^3$) y una eficiencia

asumida de la turbina para cada velocidad, teniendo en cuenta que este valor no puede superar el límite de Betz así el motor este en capacidad de suministrar más potencia. Estos valores son tan solo una primera suposición y deben ser verificados en un túnel de viento.

Potencia extraíble del viento con un área de barrido de 1,02 m ² y una densidad de 1,225 Kg/m ³			Potencia Teórica disponible en el motor Eficiencia 90%			
Eficiencia	Vel. m/s	Posible Potencia (W)	Voltaje (Vol)	Voltaje a batería (Vol)	Corriente (Amp)	Potencia (W)
0,4	3,5	12	12,745	12,745	4,9	56
0,4	4	18	13,095	13,095	5,96	70
0,4	5	35	13,445	13,445	7,02	85
0,4	6	60	13,795	13,795	8,08	100
0,4	7	96	14,145	14,145	9,14	116
0,37	8	132	14,495	14,495	10,2	133
0,28	9	143	14,845	14,5	11,26	147
0,23	10	161	15,195	14,5	12,32	161
0,19	11	177	15,545	14,5	13,38	175
0,155	12	187	15,895	14,5	14,44	188
0,134	13	206	16,245	14,5	15,5	202
0,113	14	217	16,595	14,5	16,56	216

Tabla 40. Potencia del sistema con un motor Ametek 30 VDC

Con los valores de la Tabla 40. Potencia del sistema con un motor Ametek 30 VDC) se puede dar un gráfico aproximado de lo que pudiera ser una curva de potencia del sistema.

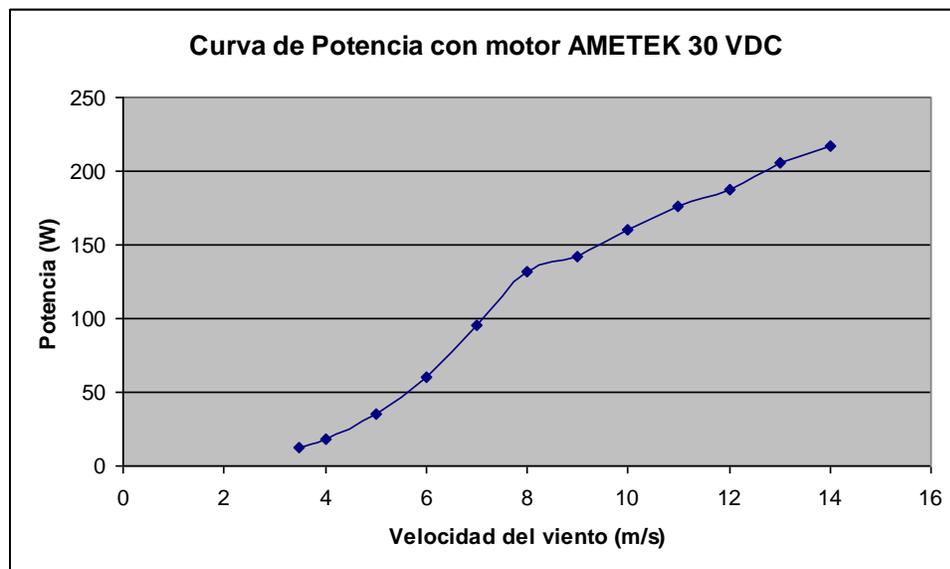


Figura 45. Curva de potencia del motor Ametek 30 VDC

Aunque con este motor no se alcanzan potencias nominales semejantes a la de la turbina Air X (400W), si se puede observar que a velocidades de viento entre 4 y 8 m/s la turbina si podría entregar valores de potencia cercanos a la de la turbina Air X y que la energía mensual producida para una velocidad promedio de 5,5 m/s podría cubrir el 75% de las necesidades establecidas en la Tabla 31. Potencia y consumo mensual requeridos para suplir las necesidades del usuario. Con velocidades de 6,5 m/s podría cubrir el 100%.

La energía mensual posible de producir con la turbina rediseñada se realizo utilizando el programa de cálculo de la asociación Danesa de energía eólica con un parámetro de Weibull de 2.

La distribución de Weibull es una función de distribución de probabilidades estadística que se utiliza para describir la variación de la velocidad del viento para un sitio en particular (parámetro entre 1 y 3 para cálculos eólicos).

Energía Mensual Calculada con un parámetro Weibull de 2 a una altura de 20m		
Programa de cálculo de la Asociación Danesa de Energía Eólica		
Clase de rugosidad 1,5 = longitud de rugosidad de 0,055 para una altura de rugosidad de 50 m		
V viento (m/s)	E (KWh/año)	E (KWh/mes)
4	143	12
5	242	20
5,5	286	24
6	340	28
7	429	36
8	501	42

Tabla 41. Posible energía mensual para la turbina desarrollada

Para alcanzar los requerimientos completos planteados a una velocidad de 5,5 m/s sería necesario aumentar el tamaño de las aspas y obtener un área de barrido de 1,5 m² para extraer más energía del viento ya que el motor podría trabajar más eficientemente.

Para validar la Tabla 41 (Posible energía mensual para la turbina desarrollada) se utilizó el mismo programa de cálculo de la Asociación Danesa de Energía Eólica y se calculo la energía mensual para una turbina Aix X, con un parámetro de Weibull de 2, una clase de rugosidad de 1,5 equivalentes a una longitud de rugosidad de 0,055.

AIR X		
Energía Mensual Calculada con un parámetro Weibull de 2 a una altura de 20 m		
Programa de cálculo de la Asociación Danesa de Energía Eólica		
Clase de rugosidad 1,5 = longitud de rugosidad de 0,055 para una altura de rugosidad de 50m		
V viento (m/s)	E (KWh/año)	E (KWh/mes)
4	143	12
5	295	25
5,5	394	33
6	501	42
7	734	61
8	939	78

Tabla 42. Energía mensual producida por una Air X utilizando el programa de cálculo de la asociación danesa de energía eólica

Puede observarse que el programa muestra una energía mensual comparable a la proporcionada por el fabricante hasta velocidades cercanas a 7 m/s el cual es el rango de interés.

6.15. Ensayos en el túnel de viento

Por medio de pruebas en túnel de viento se pueden realizar ensayos para construir la curva de potencia de los Aerogeneradores, mostrando la potencia producida para cada velocidad del viento.

El túnel permite el manejo de las corrientes de aire; es decir que pueden ser modificadas y sostenidas en diferentes periodos de tiempo, logrando una medición más precisa de velocidad del viento en cada instante, así como de las velocidades de inicio y corte.

Lo ideal es ensayar un aerogenerador en las condiciones reales de operación; por ello la necesidad de estar conectado a una batería. Para obtener la potencia se miden al tiempo tensión e intensidad de la corriente logrando así la potencia real de carga con todas las pérdidas internas del sistema.

6.15.1. Especificaciones del túnel de viento de la Universidad Bolivariana

A Faccini y CIA LTDA
Modelo: CB 200

N Serie: 4150

Motor Polifásico: 7,5 HP, 3 Fases, a 60 Ciclos – 1.760 rpm



Imagen 9. Pruebas en el túnel de viento

6.15.2. Resultados de las pruebas en túnel de viento

Al hacer las pruebas en el túnel de viento, se logró observar que los resultados no eran confiables, ya que, no se lograba obtener la velocidad del viento y las condiciones adecuadas para mover las aspas. El flujo del aire no era el mismo en toda la superficie de las aspas, y, al tomar el dato de la velocidad del viento que llegaba a las puntas, esta alcanzaba como máximo 2 m/s.

6.16. DESARROLLO TÉCNICO DE LA TURBINA FINAL

6.16.1. Modelación

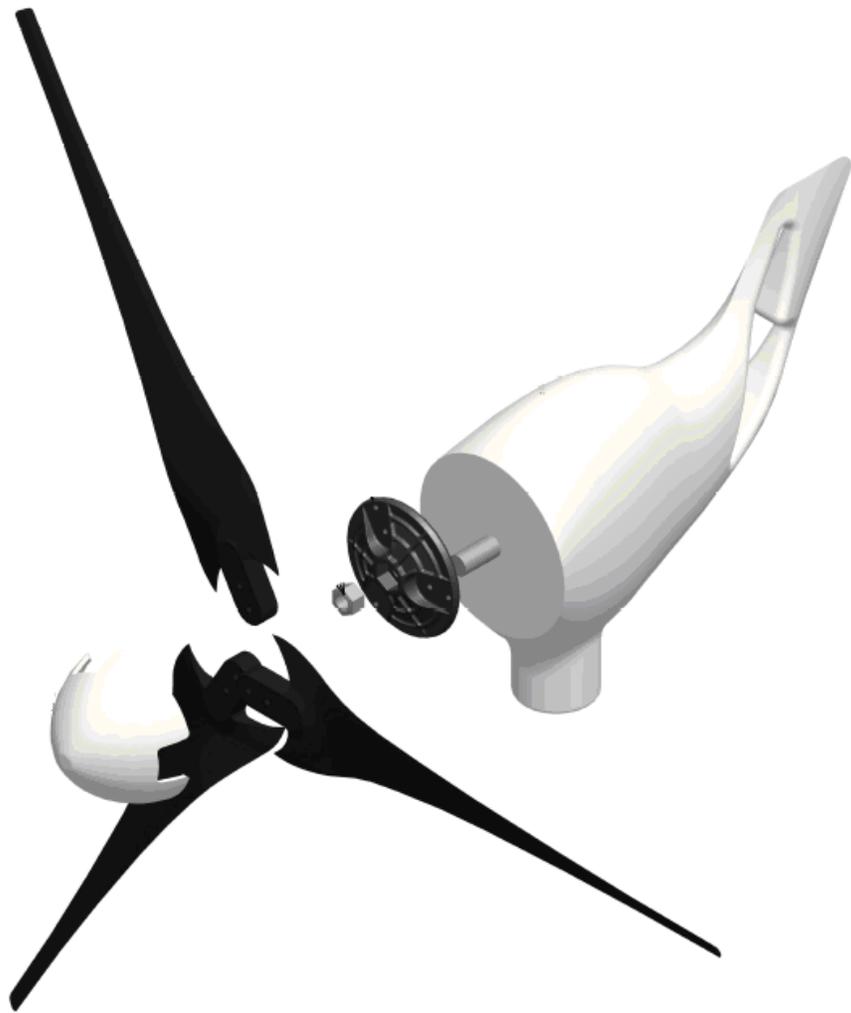
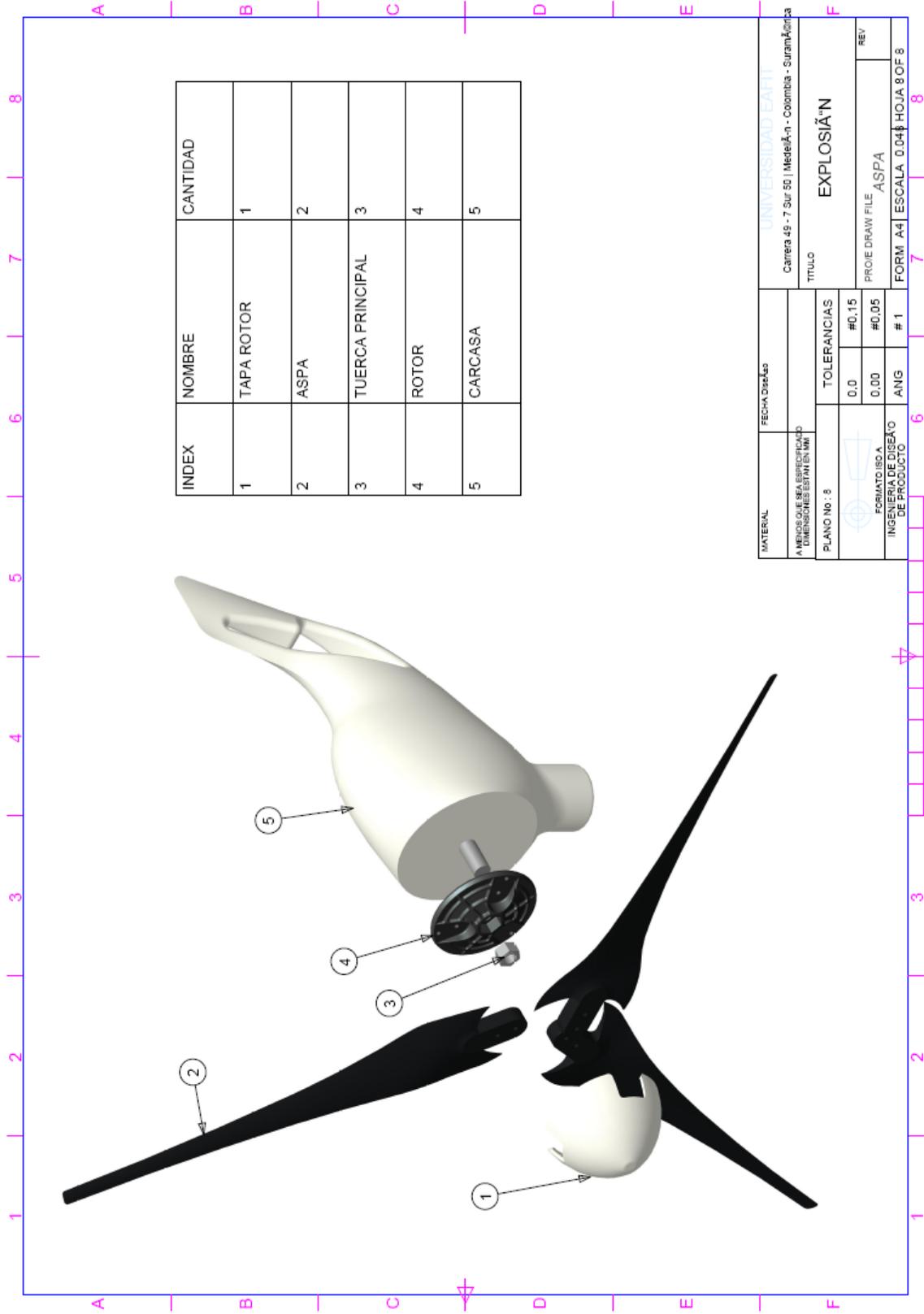


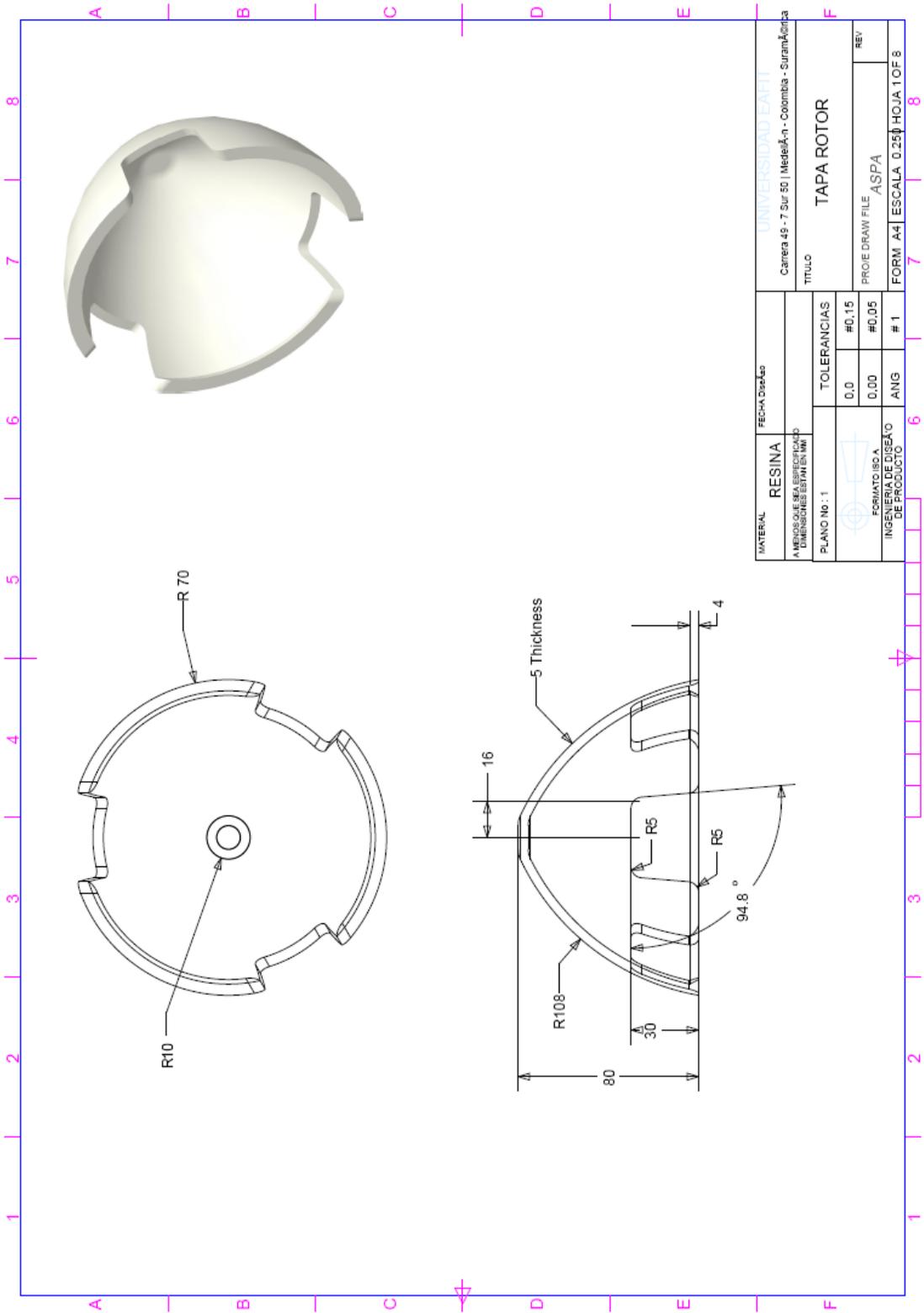
Figura 46. Modelación 3D

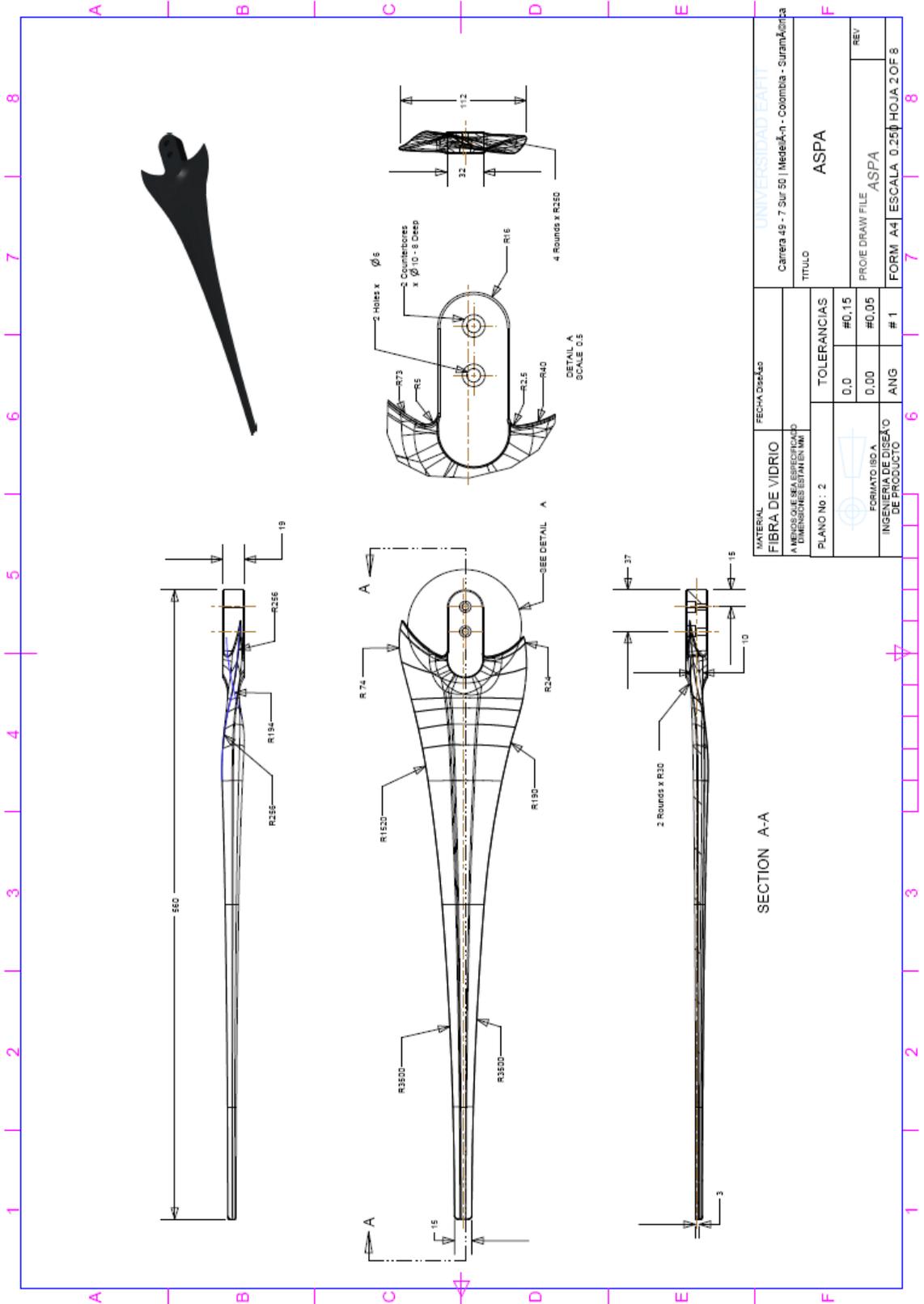


INDEX	NOMBRE	CANTIDAD
1	TAPA ROTOR	1
2	ASPA	2
3	TUERCA PRINCIPAL	3
4	ROTOR	4
5	CARCASA	5

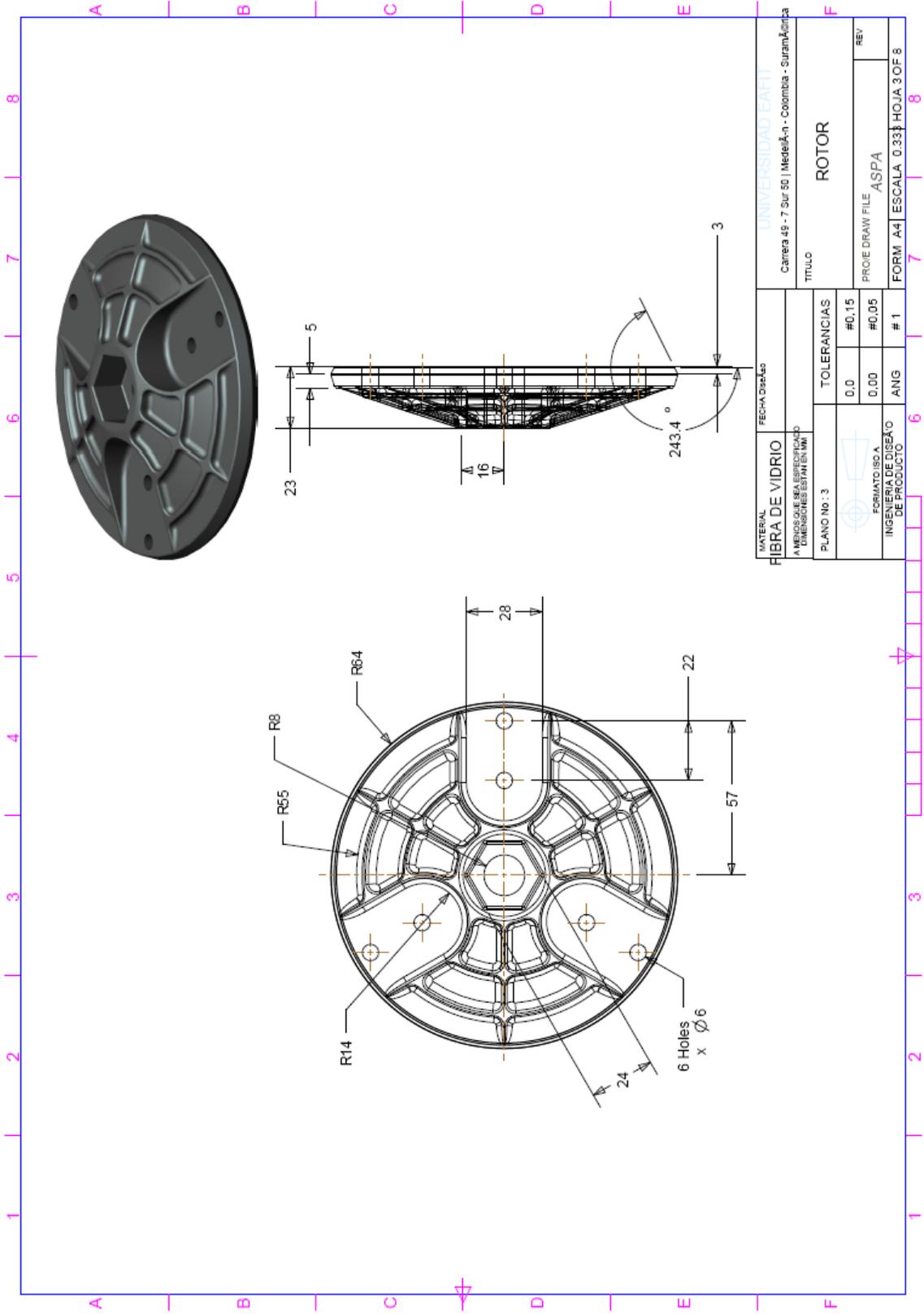
MATERIAL	FECHA DISEÑO	UNIVERSIDAD EAFIT
A MENUDO SE USA DESPECIFICADO DIMENSIONES ESTAN EN MM		Camera 49 - 7 Sur 50 Medellin - Colombia - SuramKonica
PLANO No. 8	TOLERANCIAS	TITULO
	0.0 #0.15	EXPLOSIÓN
	0.00 #0.05	PROJE DRAW FILE
INGENIERIA DE DISEÑO DE PRODUCTO	ANG # 1	ASPA
		FORM A4 ESCALA 0.04 HOJA 8 OF 8

6.16.2. Planos

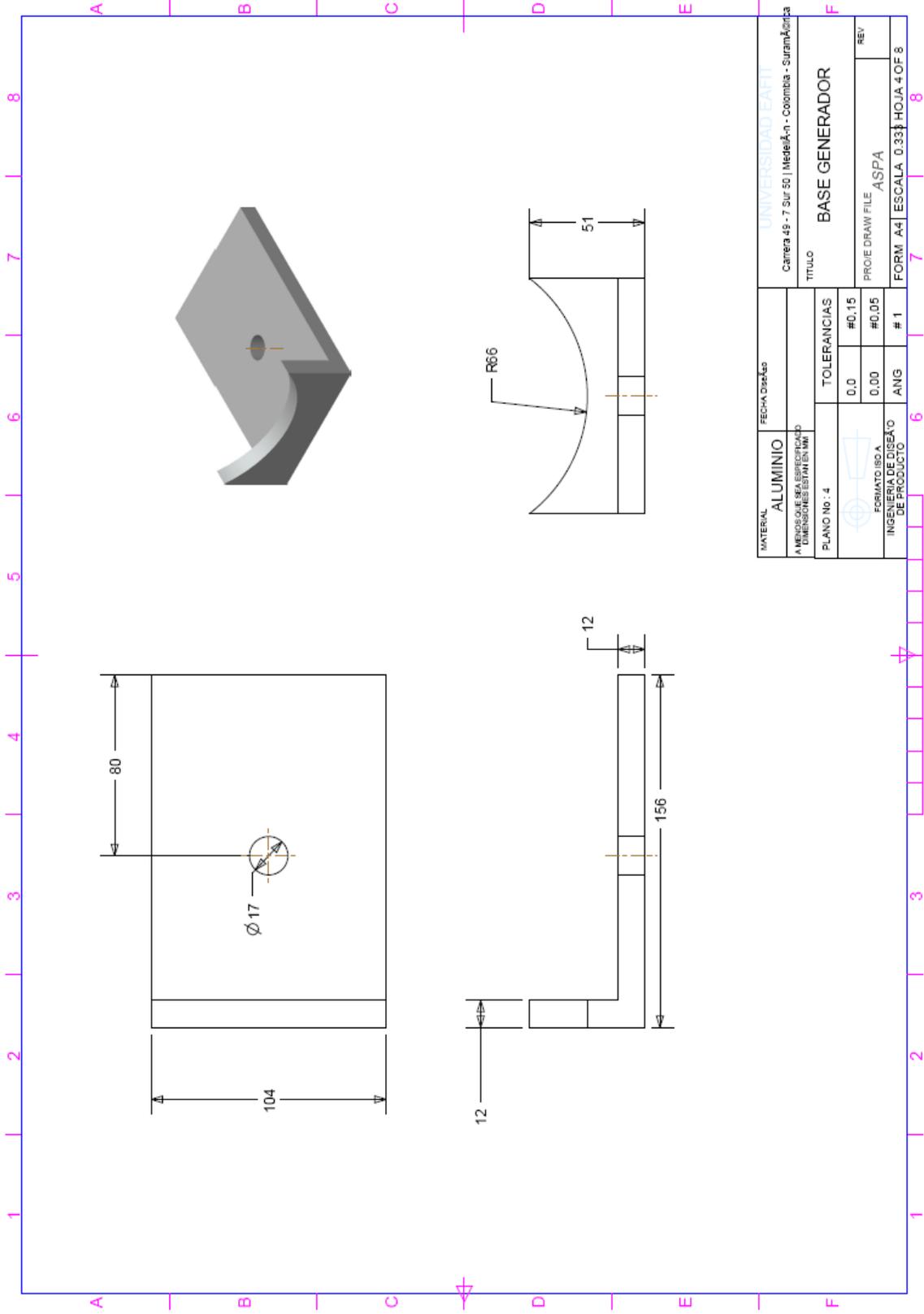




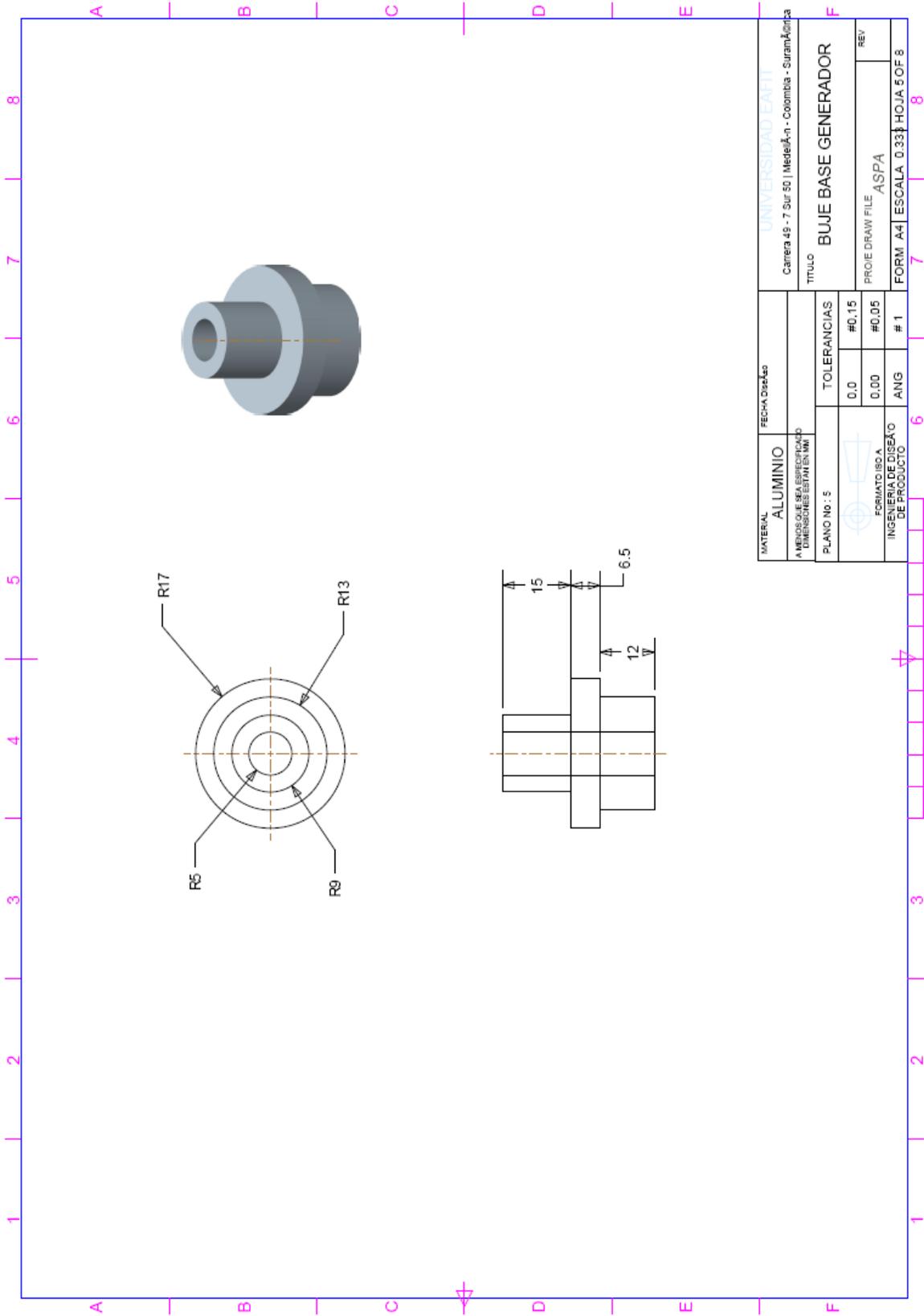
UNIVERSIDAD EAFIT		FECHA DISEÑO	
FIBRA DE VIDRIO		Camera 49 - 7 Sur 50 Medellin - Colombia - SuramKorpa	
A MENSAJE DE VERIFICACION DE DIMENSIONES ESTAN EN MM		TITULO	
PLANO No. 2		ASPA	
INGENIERIA DE DISEÑO DE PRODUCTO		PROJ DRAW FILE	
FORM A4		ESCALA 0.25	
HOJA 2 OF 8		REV	
ANG # 1		# 1	
TOLERANCIAS		#0,15	
0,0		#0,05	



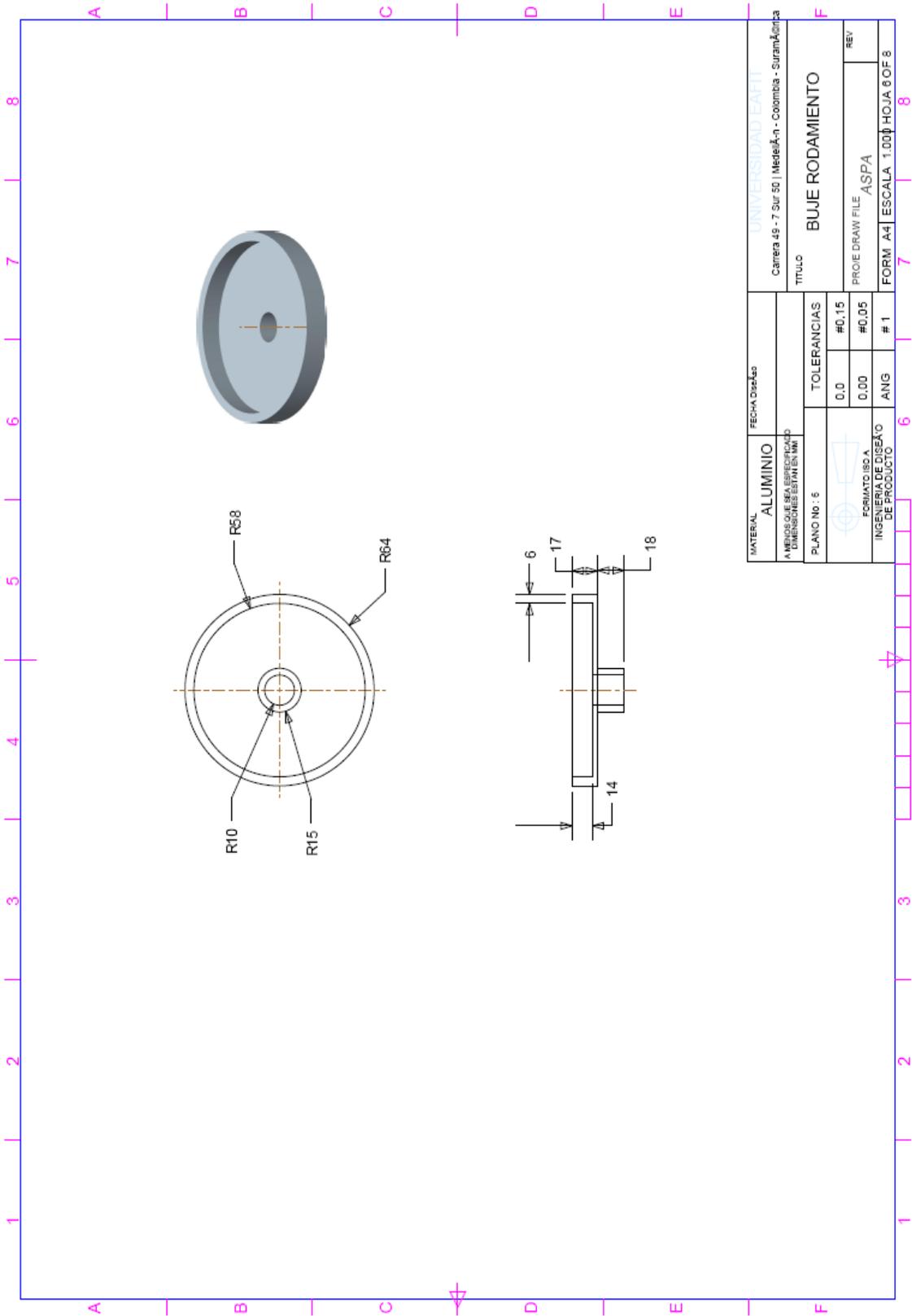
MATERIAL		FECHA DISEÑO	
FIBRA DE VIDRIO		UNIVERSIDAD EAFIT	
A MENOS QUE SE ESPECIFIQUE DIMENSIONES ESTAN EN MM		Carrera 45 - 7 Sur 50 Medellín - Colombia - Suramérica	
PLANO No. 3	TOLERANCIAS	TITULO	
 FORMATO ISO A SISTEMA DE COTAS DE PRODUCTO	0.0	ROTOR	
	#0.15	PROJE DRAW FILE ASPA	
INGENIERO DE DISEÑO	0.05	REV	
# 1	ANG	FORM A4 ESCALA 0.33 HOJA 3 OF 8	



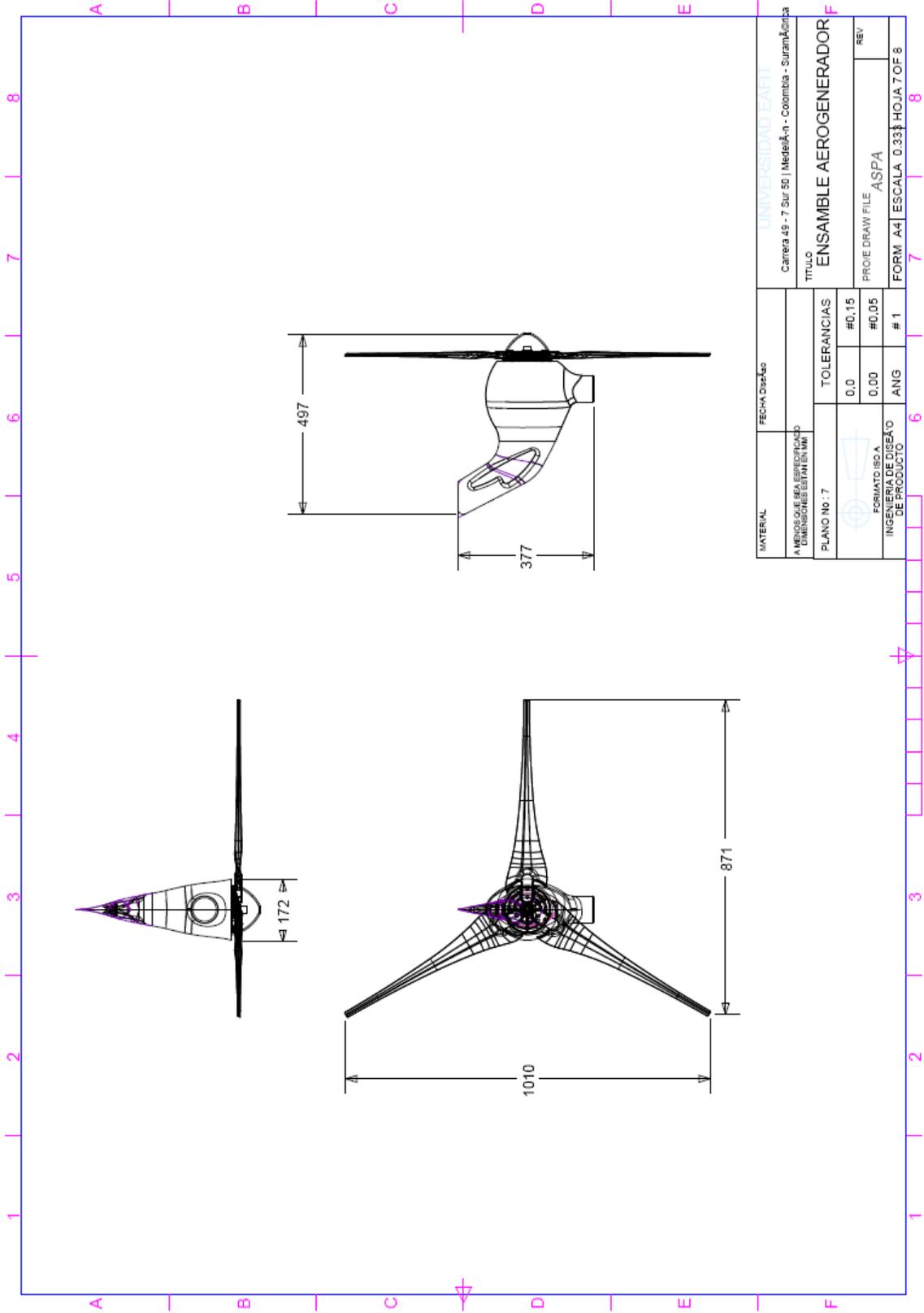
MATERIAL	FECHA DISEÑO	UNIVERSIDAD EAFIT	
ALUMINIO		Carrera 49 - 7 Sur 50 Medellín - Colombia - SuramA@eafit.edu.co	
A MENOS QUE SE ESPECIFIQUE LAS DIMENSIONES ESTÁN EN MM			
PLANO No. 4	TOLERANCIAS	TÍTULO	
	D.0	#0,15	BASE GENERADOR
	D.00	#0,05	
INGENIERIA DE DISEÑO DE PRODUCTO	ANG	# 1	PROJE DRAW FILE: ASPA
			FORM A4 ESCALA 0:33 HOJA 4 OF 8



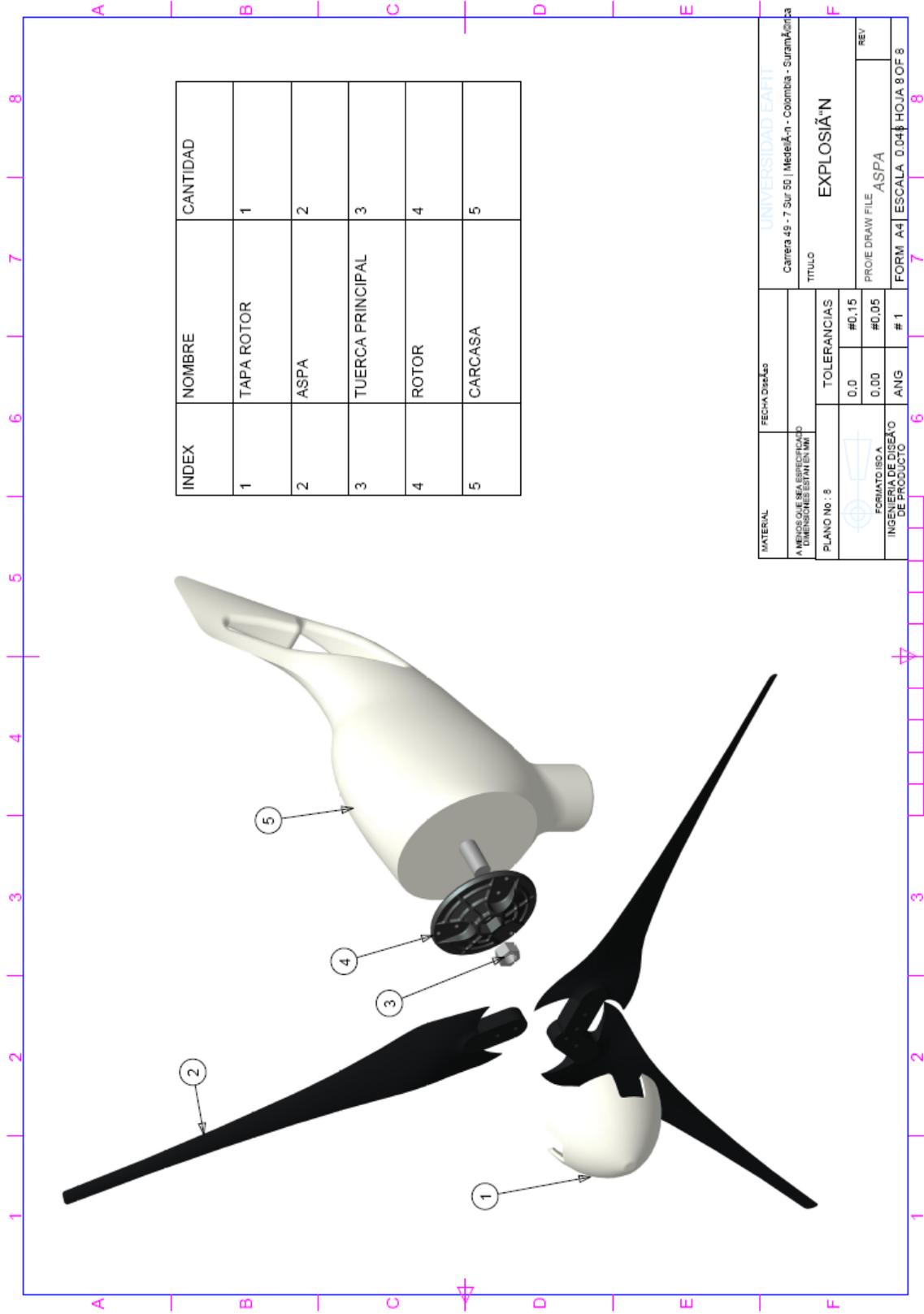
MATERIAL	ALUMINIO	FECHA DISEÑO	UNIVERSIDAD EAFIT	
A MENOS QUE SEA ESPECIFICADO DIMENSIONES EN MM		Carrera 49 - 7 Sur 50 Medellín - Colombia - Suramérica		
PLANO NO :	5	TOLERANCIAS	TÍTULO	
FORMATO ISO A		0,0	#0,15	BUJE BASE GENERADOR
INGENIERIA DE DISEÑO DE PRODUCTO		0,00	#0,05	PROJE DRAW FILE
		ANG	# 1	ASPA
		FORM A4		ESCALA 0.33
		HOJA 6 OF 8		8



MATERIAL	ALUMINIO	FECHA DISEÑO	UNIVERSIDAD EAFIT	
A MEDIDAS DE REFERENCIA DIMENSIONES ESTÁNDAR		Camera 49 - 7 Sur 50 Medellín - Colombia - Suramérica		
PLANO NO. : 6	TOLERANCIAS		TÍTULO	
 FORMATO BSA INGENIERIA DE DISEÑO DE PRODUCTOS	0,0	#0,15	BUJE RODAMIENTO	
	0,00	#0,05		
ANG	# 1	ESCALA	1.00	HOJA 6 OF 8
				REV



UNIVERSIDAD EAFIT	
Carrera 45 - 7 Sur 50 Medellín - Colombia - Suramérica	
TÍTULO	
ENSAMBLE AEROGENERADOR	
PROJE DRAW FILE	
ASPA	
FORM A4	
ESCALA 0.33	
HOJA 7 OF 8	
REV	
# 1	
ANG	
# 1	
TOLERANCIAS	
0,0	#0,15
0,00	#0,05
INGENIERIA DE DISEÑO DE PRODUCTO	
FORMATO ISO A	
FECHA DISEÑO	
MATERIAL	
FECHA DISEÑO	
A MENOS QUE SEA ESPECIFICADO DIMENSIONES EN MM	
PLANO NO : 7	



INDEX	NOMBRE	CANTIDAD
1	TAPA ROTOR	1
2	ASPA	2
3	TUERCA PRINCIPAL	3
4	ROTOR	4
5	CARCASA	5

MATERIAL	FECHA DISEÑO	UNIVERSIDAD EAFIT
A MENUDO SE USA DESPECIFICADO DIMENSIONES ESTAN EN MM		Camera 49 - 7 Sur 50 Medellin - Colombia - SuramKonica
PLANO No. 8	TOLERANCIAS	TITULO
	0.0 #0.15	EXPLOSIÓN
	0.00 #0.05	PROJE DRAW FILE
INGENIERIA DE DISEÑO DE PRODUCTO	ANG # 1	ASPA
		FORM A4 ESCALA 0.04 HOJA 8 OF 8

6.16.3. Tareas y tiempos estimados para el ensamble

Tareas para ensamble del Generador	Recursos necesarios		Duración (Horas)
	Personas	Equipos o instrumentos	
Montaje Aspas al generador			
Unir aspas al generador usando 6 Tornillos exagonales de 1/4" para unir aspas al rotor	1	Llave de expansión de 1/4	0,25
Montaje del sistema del generador			
Unir eje de rotor al generador	1	Prisionero M4 de 1/4 de longitud	0,12
Instalar regulador de voltaje	1	Reg. 12V, caimanes, tester, juego de llaves	3
Dirigir los cables por el soporte	1	Manualmente	0,25
Abrazar el soporte del generador	1	Abrazaderas con cremallera	0,5
Poner carcasa	1	Presión, martillo, prensa.	1
Montaje final			
Unir eje al rotor con tuerca de 5/8 18 hilos	1	Llave de boca fija de 15/16	0,12
Unir soporte a la torre	1	Tornillo y destornillador de 1/4	0,3

Total 5,54 hrs.

Tabla 43. Tareas y tiempos estimados para el ensamble

7. VIABILIDAD ECONÓMICA.

7.1. ESTIMADO DE COSTOS DE FABRICACIÓN DE LA TURBINA FINAL

A continuación se muestra el coste económico del proyecto. En el presupuesto presentado se refleja el costo de cada parte adquirida comercialmente, así como los costes de los elementos que van fuera del sistema teniendo en cuenta materiales y mano de obra.

Costo de la turbina	Pesos 2009	%
Aspas	130.000	17,7
Rotor	40.000	5,4
Ejes	40.000	5,4
Carcasa	80.000	10,9
Tornillos y tuercas	8.000	1,1
Rodamiento	17.000	2,3
Generador	280.000	38,1
Regulador, circuito eléctrico	140.000	19,0
TOTAL	735.000	

Tabla 44. Costo de las piezas de la turbina

Estos precios incluyen, materiales, moldes, plantillas y mano de obra, el coste de energía consumida en los procesos así como las horas dedicadas por los operarios que lleven a cabo su construcción.

La mayor inversión realizada es el generador, un 38% del valor total de la turbina, si se pretende realizar un proyecto que incluya una cantidad considerable de aerogeneradores, se puede estudiar la posibilidad de modificar un alternador comercial, con las características del contexto Colombiano, o desarrollar un generador con materiales y tecnología existente. El regulador representa un 19% del costo y también puede ser un ahorro considerable si se hace un desarrollo propio.

Costos Fijos y Variables		
Costos Fijos	Pesos 2009	%
Fundaciones Torre	200.000	13,9
Costo Aerogenerador (1)	735.000	51,2
Inversor 175V (1)		
Cableado	100.000	7,0
Baterías gel (2) 40 Amp/hr	400.000	27,9
Total Inversión	1.435.000	
Costos Variables		
O&M anual (2% inversión)	28.700	

Tabla 45. Costos fijos y variables

Podemos extraer de esta parte que el costo de la turbina representa la mitad del costo del sistema, el costo de las baterías cercano al 30% sería porcentualmente disminuido si se realiza una instalación con varias turbinas.

En teoría estos modelos no requieren de mantenimiento, se está asumiendo un 2% de la inversión para tener en cuenta cualquier reparación menor como cambio de fusibles o chequeo de alguna de las partes.

Características económicas del Proyecto:

Tiempo de vida del proyecto	10 años
Tasa de Retorno	10%
Factor anualización 10 años y 10 %	6,1446
Precio de la Energía Zona no interconectada \$/kWh	500 - 1300

Tabla 46. Características económicas del proyecto

- **Factor de anualización (Fa):** La constante de retorno de inversión a n años.

$$Fa = \frac{(1+tr)^{Tp-1}}{(tr*(1+tr)^{Tp})}$$

- **Precio de energía en las Zonas NIC:** \$500,00 a \$1.300,00

7.2. ANÁLISIS ECONÓMICO

Se toma como hipótesis para la producción de energía anual, los datos obtenidos en la Tabla 41. Posible energía mensual para la turbina desarrollada).

Análisis Económico							
Inversión Anualizada	233.540						
O&M anual \$	28.700						
Anualizacion Costos \$	262.240						
Velocidad promedio (m/s)	4	5	5,5	6	7	8	
Producción de energía Anual KW-h/año	143	242	286	340	429	501	
Costo \$/KW-h	1833,84	1083,63	916,92	771,29	611,28	523,43	

Tabla 47. Análisis económico

A partir de este análisis, con las condiciones planteadas y los desarrollos realizados, es posible llegar a un precio competitivo entre 520 y 1100 \$/kW-h con condiciones óptimas de velocidades de viento promedio mayores a 5 m/s, recordando que la energía en las zonas no interconectadas puede variar entre 500 y 1.300 \$/kWh.

Este precio podría aun disminuirse mejorando el diseño del sistema con unas aspas de mayor tamaño. Lo que aumentaría la energía producida y disminuiría el precio del kWh.

8. CONCLUSIONES.

- A partir de la información recolectada acerca de las turbinas eólicas, se establecieron las especificaciones de diseño de producto (PDS) y se identificó que todos los pequeños aerogeneradores eólicos cuentan con una misma constitución básica y ésta puede resumirse en:
 1. Un sistema de aspas (generalmente 3) con simetría radial cuyo tamaño se encuentra directamente relacionado con el área de barrido y por tanto con la energía extraíble del viento.
 2. Un generador encargado de transformar la energía mecánica en energía eléctrica.
 3. Un regulador encargado de controlar el voltaje y la corriente de entrada a las baterías.
 4. Un mecanismo de giro y una cola encargados de direccionar a la turbina en función del viento.
 5. Una carcasa.
- De la evaluación de los 5 elementos básicos de una turbina eólica, hecho dentro del proceso de ingeniería inversa, se generó una metodología que permitió lograr un análisis adecuado de los subsistemas, y a partir de ésta se pudo establecer que las aspas, el mecanismo de giro, la cola y la carcasa cuentan con diferentes opciones de materiales y procesos de manufactura dentro del ámbito local que permiten que su funcionamiento sea acorde con los requerimientos. Por otro lado, los reguladores son comerciales pero de alto costo y adicionalmente, los generadores no lo son dentro del mercado colombiano lo cual los convierte en el punto de mayor estudio para una apropiación tecnológica.
- Se hizo un análisis del contexto colombiano y se definieron posibles mercados para la venta y distribución de un sistema eólico pequeño. A partir del Atlas eólico se observa que Colombia es un país con potencial eólico en algunas zonas específicas donde puede aprovecharse el viento para solucionar problemas relacionados con el suministro de energía eléctrica en localidades rurales. De estas zonas pueden destacarse: el departamento de San Andrés y los municipios de Uribe (Meta), Regidor (Bolívar) y Manaure y Uribia (Guajira), ya que hacen parte de las zonas no interconectadas del país.

- A partir de las recomendaciones proporcionadas por Hybrytec y luego de una evaluación general del sector energético colombiano se logró identificar las necesidades básicas de un usuario en una zona rural y el cubrimiento de estas necesidades por medio de un pequeño aerogenerador de 400W al cual se le aplicó el procedimiento de ingeniería inversa.
- A partir de los resultados obtenidos a nivel técnico se determinó que la apropiación tecnológica del sistema es viable dentro del mercado colombiano establecido.
- Se realizó una evaluación financiera del proyecto que mostró la viabilidad de producir energía con pequeños aerogeneradores locales (entre 525 y 1.085 \$/kWh) comparada con el costo de producción de la energía en zonas no interconectadas (entre 500 y 1.300 \$/kWh) para velocidades de viento superiores a 5 m/s.
- Se construyó un modelo funcional a escala 1:1 que cumple con los requerimientos técnicos y sirve como base para el desarrollo de turbinas eólicas comerciales, sin embargo, el generador utilizado para el modelo no es un elemento comercial (ya que esta clase de motores se encuentran descontinuados actualmente), pero da un primer indicativo del funcionamiento y del precio del sistema completo.
- Para la producción en serie de una turbina eólica se hace indispensable la modificación de un alternador que pueda obtenerse en el mercado o el desarrollo de un generador para este tipo de aplicaciones.

9. RECOMENDACIONES.

- Es necesario desarrollar en Colombia infraestructuras con alternativas energéticas para dar solución a muchas familias que viven en las zonas no interconectadas (aproximadamente el 66% de la extensión territorial) y mejorar su nivel de vida.
- Se ha logrado obtener una curva de potencia teórica con hipótesis de velocidad del generador en función de la velocidad del viento y la aerodinámica de las aspas. Para construir la curva experimental que valide estas hipótesis sería necesario contar con un túnel de viento lo suficientemente potente para simular vientos entre 3 y 15 m/s.
- Los resultados en el túnel de viento utilizado no son relevantes, ya que éste no cumple con los requerimientos de distribución y velocidad del viento. La velocidad del viento en la punta de las aspas nunca superó los 3 m/s. Adicionalmente, es necesario hacer ensayos en un túnel de viento con un diámetro de salida mayor que permita hacer mediciones a prototipos más grandes.
- Para realizar una evaluación completa del buen funcionamiento es necesario hacer pruebas en condiciones extremas y con vientos fuertes o inestables, en altitudes diferentes y diversas temperaturas.
- Para futuros proyectos es importante realizar estudios completos de la fuerza producida por el viento al actuar sobre las aspas y el rotor, y evaluar el torque necesario para vencer la inercia del eje del generador.
- Los estudios económicos muestran que los precios de la energía del kWh producido con un pequeño aerogenerador es comparable con los precios de la energía producida en las zonas no interconectadas del país. Teniendo en cuenta la disminución del precio por factores de escala se haría muy interesante el estudio de pequeños aerogeneradores con una potencia nominal del orden de 1kW.
- Para la aplicación desarrollada, se deduce que el generador seleccionado podría aprovecharse mejor en rangos bajos de velocidades con unas aspas un poco más grandes (diámetro del rotor de 1,5 m²).

- Resulta importante aclarar que, en general, los atlas de viento solo indican cuales son las áreas más adecuadas para la implementación de turbinas eólicas, en ningún momento son el criterio único o absoluto para la instalación de las mismas, ya que no cuentan con el nivel de detalle que permita conocer información concreta sobre el comportamiento del viento en un punto específico.
- La metodología desarrollada en este trabajo es aplicable para rediseñar una turbina eólica para un conjunto de sitios con características de velocidades de viento semejantes y no para determinar si es viable la utilización de una turbina en un sitio específico, para esto es necesario realizar un estudio detallado de las condiciones de viento (velocidad, dirección, intensidad de turbulencia, vientos extremos).

10. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] ULRICH, Kart T. y EPPINGER, Steven D. Diseño y desarrollo de productos. Tercera Edición. EU: McGraw Hill, 2004. 366 p.
- [2] CROSS, Nigel, Métodos de Diseño, México D.F.: Editorial Limusa, S:A de C.V., Gupo Noriega Editores, 2003. 190 p.
- [3] PAHL, Gerard; BEITZ Wolfgang. "Engineering Design" Editorial Springer - Verlag y The Design Council. Berlín, Alemania, 1977.
- [4] PATEL, Mukund R. Wind and solar power systems: Design, analysis, and operation. Boca Ratón, Fl: Taylor & Francis, 2006. 448 p.
- [5] BURTON, Tony; SHARPE, David; JENKINS, Nick; BOSSANYI; Ervin. Handbook of wind energy. Chichester: J. Wiley, 2001. 617 p.
- [6] CARLESS, Jennifer. Energía renovable: Guía de alternativas ecológicas. México: Edamex, 1995. 245 p.
- [7] HERRERA, Juan Camilo; Wind power potential assesment from small wind turbines; Tesis de Maestría en Energía, Escuela Politécnica Federal; Lausana, Suiza, 2001. 75 p.
- MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Dirección de Licencias, Permisos y Trámites. Medellín 2007. Más consumo de Energía menos gestión social. www.minambiente.gov.co
- MINISTERIO DE EDUCACIÓN, Colombia, Enero 2007. www.mineducacion.gov.co
- EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN, Generación de Energía Eólica, <http://www.eppm.com>
- INSTITUTO DE ENERGÍA, Universidad Nacional de Colombia. Energía eólica en Colombia: Una aproximación desde las opciones reales: <http://fis.unab.edu.co>
- ENERGÍA EÓLICA ZONAS COLOMBIANAS: <http://redenergiaalternativa.org>
- DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, DANE: http://www.dane.gov.co/daneweb_V09/

- HYBRYTEC: Empresa para el desarrollo de energías alternativas en Colombia:
<http://hybrytec.110mb.com/eolica.html>
- COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS, CREG:
http://www.creg.gov.co/html/i_portals/index.php
- GARCÍA, Maria Isabel. COLOMBIA: Energía eólica augura desarrollo:
<http://www.tierramerica.net>
- INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ENERGÍAS RENVABLES, ITER:
<http://www.iter.es/>
- WIND BLUE POWER, fabricantes de alternadores modificados:
<http://www.windbluepower.com/>

Anexo 1. Consumo promedio de aparatos electrodomésticos⁴¹



Aparato	Potencia (Promedio) Watts	Tiempo de uso al día (Períodos Típicos)	Tiempo de uso al mes Horas	Consumo mensual kilowatts-hora (Watts/1000) x Hora
ELECTRODOMÉSTICOS				
Abrelatas	60	15 min/semana	1	0,06
Aspiradora horizontal	800	2 hr 2vec/semana	16	12,8
Aspiradora vertical	1000	2 hr 2vec/semana	16	16
Batidora	200	1 hr 2vec/semana	8	1,6
Bomba de agua	400	20 min/día	10	4
Cafetera	750	1 hr/día	30	22,5
DVD o Videocassetera	25	3 hr 4vec/semana	48	1,2
Exprimidores de cítricos	30	10 min/día	5	0,15
Extractores de frutas y legumbres	300	10 min/día	5	1,5
Estación de juegos	250	4 hr/día	120	30
Estéreo musical	75	4 hr/día	120	9
Equipo de cómputo	300	4 hr/día	120	36
Focos ahorradores (8 de 15W c/u)	120	5 hr/día	150	18
Focos incandescentes (8 de 60W c/u)	480	5 hr/día	150	72
Horno de microondas	1200	15 min/día	10	12
Horno eléctrico	1000	15 min/día	10	10
Lavadora automática	400	4hr 2vec/sem	32	12,8
Licuada mediana potencia	400	10 min/día	5	2
Máquina de coser	125	2hr 2vec/sem	16	2
Plancha	1200	3hr 2vec/sem	24	28,8
Radio grabadora	40	4 hr/día	120	4,8
Secadora de cabello	1800	10 min/día	5	9
Secadora de ropa eléctrica	5600	4 hr/día	16	89,6
Tocadiscos de acetatos	75	1 hr/día	30	2,25
Tostadora	1000	10 min.diarios	5	5
TV color (13-17 pulg)	50	6 hr/día	180	9
TV color (19-21 pulg)	70	6 hr/día	180	12,6
TV Color (24-29pulg)	120	6 hr/día	180	21,6
TV Color(32-43pulg)	250	6 hr/día	180	45
TV Color (19-22 pulg. Plasma)	46	6 hr/día	180	8,28
TV Color (43-50 pulg. Plasma)	360	6 hr/día	180	64,8
Refrigerador (11-12 pies cúbicos)	250	8 hr/día	240	60
Refrigerador(14-16 pies cúbicos)	290	8 hr/día	240	69,6
Refrigerador (18-22 pies cúbicos)	375	8 hr/día	240	90
Refrigerador(25-27 pies cúbicos)	650	8 hr/día	240	156
Congelador	400	8 hr/día	240	96
Ventilador de mesa	65	8 hr/día	240	15,6
Ventilador de techo sin lámparas	65	8 hr/día	240	15,6
Ventilador de pedestal o torre	70	8 hr/día	240	16,8
Ventilador de piso	125	8 hr/día	240	30
AIRE ACONDICIONADO				
Aire lavado (cooler)mediano	400	12 hr/día	360	144

⁴¹ Comisión Federal de Electricidad mexicana; Consumo promedio de aparatos electrodomésticos; <http://www.cfe.gov.mx/es/LaEmpresa/queescfe/Preguntasfrecuentes/paese/paese7/>

Aire lavado (cooler)grande	600	12 hr/día	360	216
Aparato de ventana 1 ton. Nuevo	1200	8 hr/día	240	288
Aparato de ventana 1 ton. Antiguo	1850	10 hr/día	300	555
Aparato de ventana 1.5 ton. Nuevo	1800	8 hr/día	240	432
Aparato de ventana 1.5 ton. Antiguo	2250	10 hr/día	300	675
Aparato de ventana 2 ton. Nuevo	2800	8 hr/día	240	672
Aparato de ventana 2 ton. Antiguo	3200	10 hr/día	300	960
Aparato divido (minisplit) 1 ton.	1400	8 hr/día	240	336
Aparato divido (minisplit) 1.5 ton.	2000	8 hr/día	240	480
Aparato divido (minisplit) 2 ton.	2800	8 hr/día	240	672
Calentador de aire	1500	4 hr/día	120	180
Refrigeración central 3 ton. Nuevo	2750	8 hr/día	240	660
Refrigeración central 3 ton. Antiguo	4450	10 hr/día	300	1335
Refrigeración central 4 ton. Nuevo	3650	8 hr/día	240	876
Refrigeración central 4 ton. Antiguo	6500	10 hr/día	300	1950
Refrigeración central 5 ton. Nuevo	4600	8 hr/día	240	1104
Refrigeración central 5 ton. Antiguo	7900	10 hr/día	300	2370

Anexo 2. Especificaciones técnicas de la turbina AIR X 400W



Technical Specifications

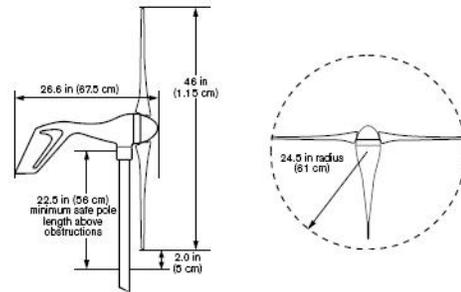
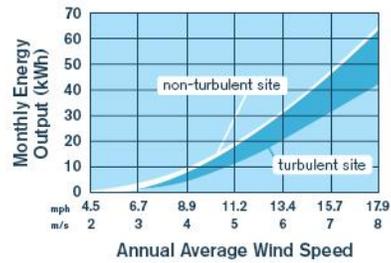
Rotor Diameter	46 in (1.15 m)
Weight	13 lb (5.85 kg)
Shipping Dimensions	27 x 15 x 9 in (686 x 38 x 228 mm) 17 lb (7.7 kg)
Mount	1.5 in schedule 40 pipe 1.9 in (48.26 mm) OD
Start-Up Wind Speed	8 mph (3.58 m/s)
Voltage	12, 24, and 48 VDC
Rated Power	400 watts at 28 mph (12.5 m/s)
Turbine Controller	Microprocessor-based smart internal regulator with peak power tracking
Body	Cast aluminum (Marine is powder coated for corrosion protection)
Blades	3-Carbon fiber composite
Overspeed Protection	Electronic torque control
Kilowatt Hours per Month	38 kWh/mo at 12 mph (5.4 m/s)
Survival Wind Speed	110 mph (49.2 m/s)
Warranty	3 year limited warranty

Air X

POWER



MONTHLY ENERGY



Southwest Windpower

1801 W. Route 66
Flagstaff, AZ 86001 USA

928.779.9463

www.windenergy.com

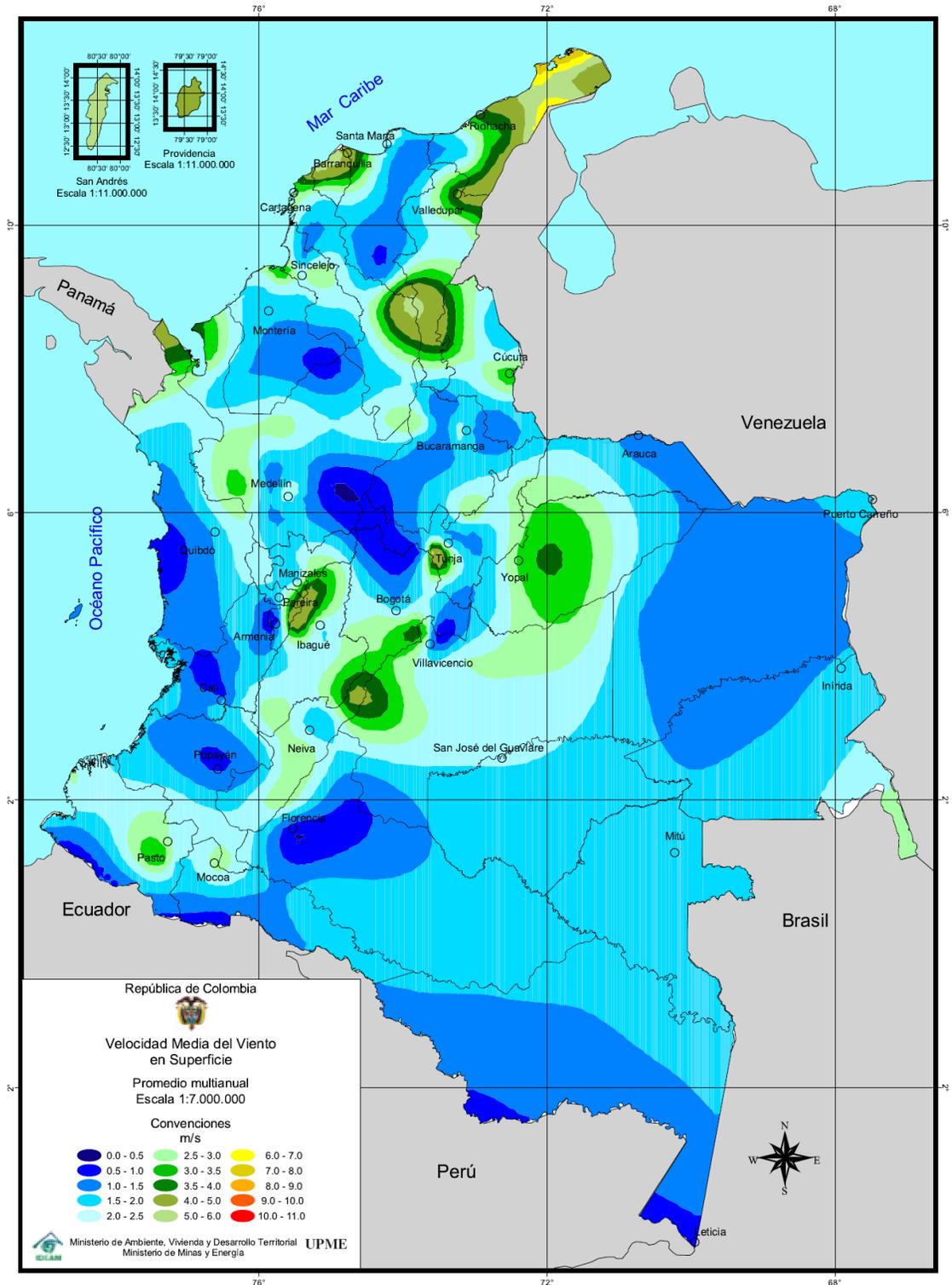


Makers of Skystream 3.7® / AIR / Whisper

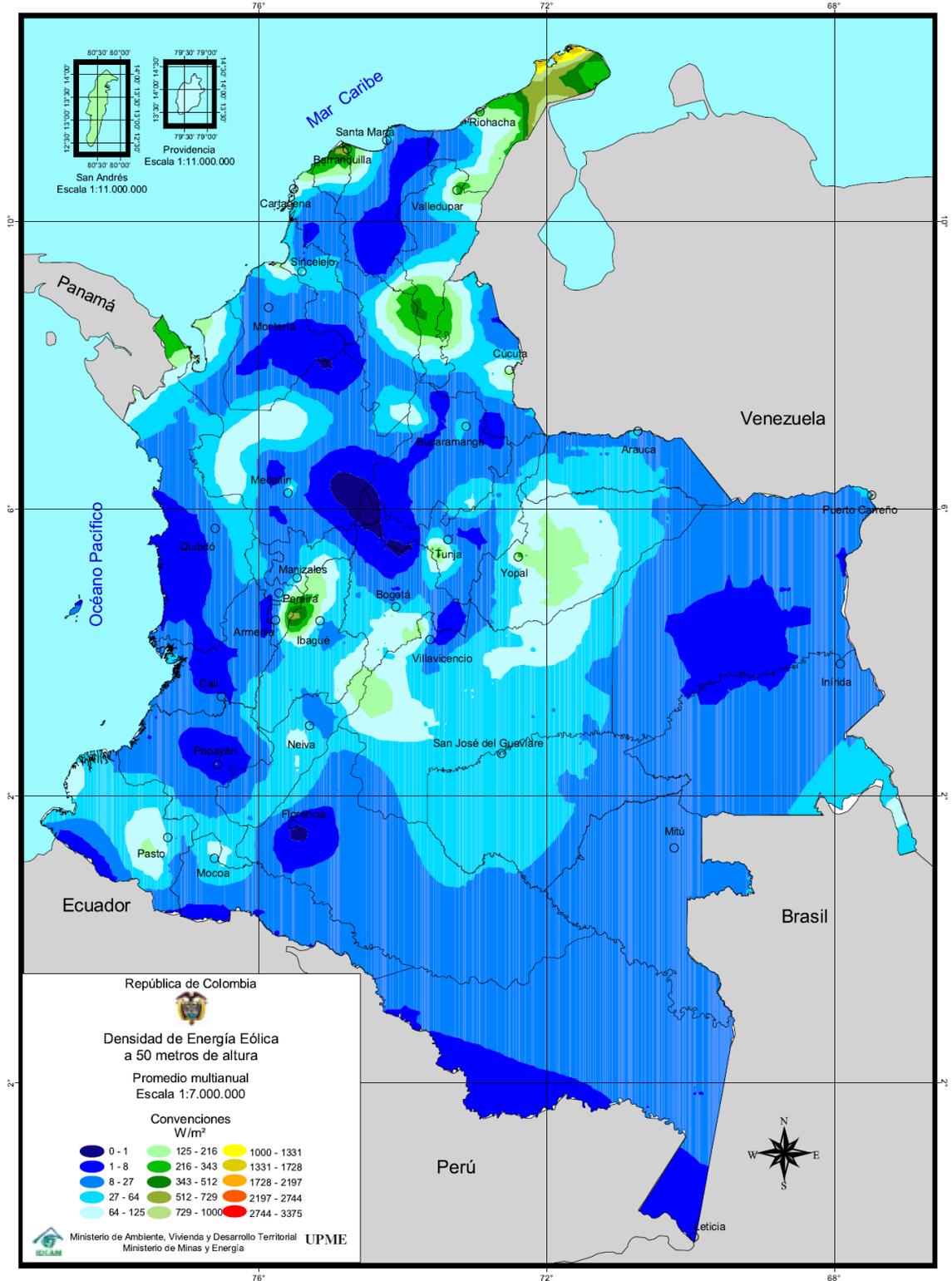
♻️ Printed on recycled paper using vegetable inks.

Anexo 3. Mapas de viento de la velocidad a 10 m y de la densidad a 50 m

Velocidad del viento a 10 metros de altura



Densidad del viento a 50 metros de altura



Anexo 4. Deducción de la fórmula para hallar la velocidad de rotación del eje del generador en función de la velocidad del viento y la velocidad específica de la turbina

$$\omega = (60 * V_v) / \pi \varnothing_{\text{rotor}} * \lambda$$

ω : Velocidad angular del eje del Aerogenerador (rpm)

V_v : (Velocidad del Viento (m/s)

$\varnothing_{\text{rotor}}$: Diámetro del Rotor (m)

λ : Constante de Velocidad específica. Depende de la aerodinámica del aspa, ángulo de ataque y ancho de las palas. Se utiliza la siguiente fórmula para hallar las rpm a las diferentes velocidades del viento:

V : Velocidad en la punta del aspa (m/s)

r : Radio del rotor (m)

Nº Ecuación	Fórmula
1	$V = \omega * r$
2	$\omega = V / r$
3	$r = \varnothing / 2$
4	$V = \lambda * V_v$
5	1 Rev = 2π rad
6	(rad/seg) * (60seg/1 rad) = 60rad/min
	Sustituyendo las ecuaciones 3 y 4 en 2 se obtiene
7	$\omega = 2\lambda * V_v / \varnothing$
	De 5 en 6
	$\omega = (60\text{rad/min}) * (1\text{rev}/2\pi\text{min}) = 60\text{rev}/2\pi\text{min}$
8	unidades de $\omega = 60\text{rev}/2\pi\text{min}$
	Por lo tanto de 8 en 7
	$\omega = 60 * 2\lambda * V_v / 2\pi\varnothing$
9	$\omega = (60 * V_v / \pi\varnothing \text{ rotor}) * \lambda$