

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA EL USO DE ENERGÍA EÓLICA EN UNA  
ZONA RURAL DE SANTANDER**

**JAIRO ENRIQUE BARBOSA RIVERA**

**CARLOS ANDRÉS PEREA LARA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍASFÍSICO-MECÁNICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**BUCARAMANGA**

**2012**

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA EL USO DE ENERGÍA EÓLICA EN UNA  
ZONA RURAL DE SANTANDER**

**JAIRO ENRIQUE BARBOSA RIVERA**

**CARLOS ANDRÉS PEREA LARA**

**Trabajo de Grado para optar por el título de:  
Ingeniero Civil**

**Director:**

**OSCAR JAVIER BEGAMBRE CARRILLO**  
**ingeniero civil, M. Sc, PhD.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**  
**FACULTAD DE INGENIERÍASFÍSICO-MECÁNICAS**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**  
**BUCARAMANGA**

**2012**

En primer lugar agradezco al padre eterno que hace de mi vida un milagro cada día

A mis padres Mario Barbosa Camacho y Nubia Esperanza Rivera por su apoyo incondicional, su Ejemplo incomparable, porque han sido una columna firme durante toda mi vida.

A mi hermano Juan José Barbosa Rivera porque su alma de niño me inspira soñar mas allá de lo que imagine.

A mi familia y amigos por brindarme su compañía y su ánimo para seguir adelante.

***Jairo Enrique Barbosa Rivera***

A Dios por darme la fuerza y la sabiduría para afrontar los obstáculos y cumplir con éxito esta meta

A mis padres, hermanos, sobrinos y demás familiares por su apoyo incondicional al estar pendiente en mi proceso de aprendizaje y de formación personal y profesional

A mi flakita por ser amiga, compañera, por estar siempre a mi lado y por contar con su apoyo inigualable

A mis amigos por las alegrías brindadas en el desarrollo de mi carrera profesional.

***Carlos Andrés Perea Lara***

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan su agradecimiento a:

A Dios, por iluminar nuestro camino y ser el responsable de este logro.

Por habernos apoyado en el transcurso de nuestra formación y lograr el desarrollo del presente proyecto queremos agradecer:

Al profesor OSCAR JAVIER BEGAMBRE CARILLO, Director de nuestro proyecto, por brindarnos sus conocimientos, por confiar en nosotros, por dedicarnos parte de su tiempo y la idea de desarrollar este proyecto.

A nuestros familiares por brindarnos su apoyo en todo momento, por ser las personas que más queremos y las más importantes en nuestras vidas.

A todos nuestros amigos y compañeros de carrera por compartir con nosotras en todos estos años de estudio.

Gracias a la Universidad Industrial de Santander por hacer de nosotros unos profesionales.

## CONTENIDO

	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>19</b>
<b>1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA</b>	<b>21</b>
<b>2. OBJETIVOS</b>	<b>23</b>
2.1 OBJETIVO GENERAL:	23
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	23
<b>3. MARCO REFERENCIAL</b>	<b>24</b>
<b>3.1 EL RECURSO EÓLICO EN COLOMBIA</b>	<b>24</b>
<b>3.2 EL TERRITORIO COLOMBIANO Y SANTANDEREANO</b>	<b>25</b>
<b>4. LA ENERGÍA EÓLICA</b>	<b>27</b>
4.1. ENERGÍA EÓLICA COMO OPCIÓN PARA GENERA ELECTRICIDAD	27
4.1.1 Energía eólica mejor que el de carbón	28
4.2 AEROGENERADORES	29
4.2.2 Tipos de Aerogeneradores	30
<b>5. ZONAS SELECCIONADAS PARA REALIZAR EL ESTUDIO</b>	<b>36</b>
5.1 CAÑÓN DEL CHICAMOCHA	36
5.2 AEROPUERTO DE PALONEGRO	37
<b>6. ANÁLISIS DE VIENTO EN LAS ZONAS SELECCIONADAS</b>	<b>39</b>
6.1 AJUSTE VELOCIDAD DEL VIENTO	42
6.2 ESTACIÓN AEROPUERTO PALONEGRO	43
6.3 ESTACIÓN PARQUE NACIONAL DEL CHICAMOCHA	44
<b>7. DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIA DE VELOCIDAD DEL VIENTO EN LOS SITIOS SELECCIONADOS</b>	<b>46</b>
7.1 ESTUDIO CASO PARTICULAR ESTACION AEROPUERTO PALONEGRO	47
7.1.1 Distribución de Weibull	47
7.2 ESTUDIO CASO PARTICULAR ESTACION CAÑÓN DEL CHICAMOCHA	51
7.2.1 Distribucion de wiebull	51

<b>8. CALCULO DE OPERACIÓN Y PRODUCCIÓN DE LAS TURBINAS</b>	<b>54</b>
8.1 ESTIMACIÓN DE SUMINISTRO DE ENERGÍA CON EQUIPO ENERCON E-82 – AEROPUERTO PALONEGRO	57
8.2 ESTIMACIÓN DE SUMINISTRO DE ENERGÍA CON EQUIPO ENERCON E-82 – CAÑÓN DEL CHICAMOCHA	59
<b>9. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>63</b>
9.1 CONSUMO PROMEDIO DE KWH	63
9.2 POBLACIÓN BENEFICIADA CON LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA	64
<b>10. ANÁLISIS COSTO BENEFICIO</b>	<b>68</b>
10.1 DESDE EL PUNTO DE VISTA ECONÓMICO	68
10.2 DESDE EL PUNTO DE VISTA SOCIAL Y TECNOLÓGICO	71
10.3 DESDE EL PUNTO DE VISTA AMBIENTAL	72
10.3.1 Durante la construcción	72
10.3.2 Durante operación	74
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>77</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>79</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>82</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Velocidad viento promedio año aeropuerto palonegro año 2009	39
Tabla 2. Velocidad del viento promedio año 2010 cañón del chicamocha	41
Tabla 3. Coeficiente de Hellmann en función del tipo de terreno	42
Tabla 4. Velocidad promedio del viento a diferentes alturas sobre el nivel del piso	43
Tabla 5. Velocidad promedio del viento a diferentes alturas	45
Tabla 6. Valores estimados de los parámetros de la función de weibull	48
Tabla 7. Densidad de potencia del viento para diferentes alturas	50
Tabla 8. Valores estimados de los parámetros de la función de weibull	51
Tabla 9. Densidad de potencia de viento para diferentes alturas	52
Tabla 10. Características aerogenerador ENERCON E-82/2000kw	55
Tabla 11. Probabilidad de operación anual de los aerogeneradores	57
Tabla 12. Estimación de suministro de energía con equipo ENERCON E-82 para estación aeropuerto palonegro a 80 metros altura de torre	57
Tabla 13. Estimación de suministro de energía con equipo ENERCON E-82 para estación aeropuerto palonegro a 140 metros altura de torre	58
Tabla 14. Estimación de suministro de energía con equipo ENERCON E-82 para estación cañón del chicamocha a 80 metros altura de torre	59
Tabla 15. Estimación de suministro de energía con equipo ENERCON E-82 para estación cañón del chicamocha a 140 metros altura de torre	60
Tabla 16. Consumo promedio mensual de energía para los estratos 1, 2 y 3	63
Tabla 17. Viviendas a las cuales se les suministra energía con un aerogenerador para las diferentes estaciones de medición.	64
Tabla 18. Veredas y distribución de población municipio de los santos	65
Tabla 19. Veredas y distribución de población municipio de cepita	66
Tabla 20. Distribución poblacional municipio de lebrija	66
Tabla 21. Cantidad de aerogeneradores necesarios para suplir la demanda de energía eléctrica la zona rural de 3 diferentes municipios	67

Tabla 22. Emisiones de co2 en kg por jada kw generado	76
Tabla 23. Características aerogenerador ENERCON E-33/330kw	82
Tabla 24. Potencia en función de la velocidad ENERCON E-33/330kw	82
Tabla 25. Características aerogenerador ENERCON E-44/900kw	83
Tabla 26. Potencia en función de la velocidad ENERCON E-44/900kw	83
Tabla 27. Características aerogenerador ENERCON E-48/800kw	84
Tabla 28. Potencia en función de la velocidad ENERCON E-48/800kw	85
Tabla 29. Características aerogenerador ENERCON E-53/800kw	86
Tabla 30. Potencia en función de la velocidad ENERCON E-53/800kw	86
Tabla 31. Características aerogenerador ENERCON E-70/2300kw	87
Tabla 32. Potencia en función de la velocidad ENERCON E-70/2300kw	87
Tabla 33. Características aerogenerador ENERCON E-82/200kw	88
Tabla 34. Potencia en función de la velocidad ENERCON E-82/2000kw	89
Tabla 35. Comparativo de costos de las opciones de implementación de distintos sistemas para el suministro de energía en san andrés y old providence	96

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Velocidad promedio mensual aeropuerto palonegro año 2009	40
Figura 2. Velocidad promedio mensual cañón del chicamocha año 2010	41
Figura 3. Velocidad promedio del viento a diferentes alturas. Estación palonegro	44
Figura 4. Velocidad promedio del viento a diferentes alturas. Estación chicamocha	45
Figura 5. Distribución de frecuencia de la velocidad del viento a 10m del suelo	48
Figura 6. Densidad de potencia del viento para diferentes alturas	50
Figura 7. Distribución de la frecuencia de velocidad de viento a 10m del suelo	51
Figura 8. Densidad de potencia de viento para diferentes alturas. Chicamocha	53
Figura 9. Comportamiento distintos modelos de aerogeneradores enercon	54
Figura 10. Esquema general de un aerogenerador	56
Figura 11. Detalle góndola aerogenerador ENERCON - E82	56
Figura 12. Excavación para la cimentación	91
Figura 13. Nivelación de la cimentación para emplazamiento de la torre	91
Figura 14. Colocación de la parrilla inferior y de la virola	92
Figura 15. Colocación de acero de refuerzo entre la cimentación y la virola	92
Figura 16. Colocación de la parrilla superior	93
Figura 17. Encofrado de la cimentación	93
Figura 18. Virola con la instalación de tubo corrugado por donde pasaran los cables.	94
Figura 19. Cimentación terminada	94
Figura 20. Excavación para proteger los cables que conducirán la energía eléctrica al transformador	95

## LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ley exponencial de hellmann.	42
Ecuación 2. Función de densidad de probabilidad de weibull	46
Ecuación 3. Función de densidad acumulada	46
Ecuación 4. Factor de forma adimensional para método de probabilidad máxima	46
Ecuación 5. Factor de escala (m/s)	46
Ecuación 6. Factor de forma adimensional	47
Ecuación 7. Factor de escala (m/s)	47
Ecuación 8. Velocidad promedio (m/s)	47
Ecuación 9. Desviación estándar	47
Ecuación 10. Función de densidad de probabilidad	49
Ecuación 11. Promedio de la densidad de potencia	49

## LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Características de cada uno de los aerogeneradores Enercon mencionados en el estudio.	82
Anexo B. Cimentaciones	90
ANEXO C. Comparativo de costos de las opciones de implementación de distintos sistemas para el suministro de energía en san Andrés y old Providence.	96

## **TITULO: ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA EL USO DE ENERGÍA EÓLICA EN UNA ZONA RURAL DE SANTANDER**

**AUTORES:** BARBOSA RIVERA, Jairo Enrique  
PEREA LARA, Carlos Andrés

**PALABRAS CLAVE:** Energía eólica, aerogenerador, potencial eólico.

Colombia siendo un país rico en fuentes energéticas como el Carbón, gas, petróleo y con la presencia del recurso hídrico a gran escala, presenta problemas en el suministro de energía a lo largo y ancho del territorio nacional; situaciones difíciles en este sector se han vivido en el pasado, en algunos casos por ser zonas aisladas de difícil acceso y distantes del sistema interconectado, y en otras debido a variaciones climáticas.

Con base en lo anteriormente expuesto, en este trabajo se analiza el potencial del viento como principal fuente de generación eléctrica; a partir de una recopilación de datos de velocidad del viento suministrados por el IDEAM e INTERCABLE Ltda., se generaron diversas graficas de velocidad de viento promedio, probabilidad y potencia, permitiendo así hacer un análisis del potencial eólico para cada zona.

Siendo este un análisis preparatorio y comprobado el potencial eólico de las zonas estudiadas, se calculo un número aproximado de aerogeneradores para suplir la demanda eléctrica en cada uno de los sitios estudiados, no sin antes resaltar las grandes ventajas técnicas, sociales y ambientales inherentes al uso de las energías renovables.

El objetivo principal de este trabajo es hacer un preparatorio para el uso del viento como fuente de generación eléctrica desde un punto de vista técnico haciendo mención de algunos aspectos económicos relacionados con un parque eólico situado en una zona rural del departamento de Santander.

---

\* Proyecto de Grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil UIS.  
Director: Oscar Javier Begambre Carillo

**TITLE: FEASIBILITY STUDY FOR WIND ENERGY USE IN A RURAL AREA OF SANTANDER**

**AUTHOR:** BARBOSA RIVERA, Jairo Enrique

PEREA LARA, Carlos Andrés

**KEYWORDS:** Wind energy, turbine, wind power, renewables.

**DESCRIPTION**

Colombia remains a country rich in energy sources like coal, gas, oil, and with the presence of water resources on a large scale, presents problems in the supply of energy throughout the national territory; difficult situations in this sector have lived in the past, in some cases as isolated areas inaccessible and far from the grid, and in others due to climatic variations.

Based on the above, this paper analyzes the potential of wind as a major source of power generation, from a collection of wind speed data provided by the IDEAM and Intercable Ltda, several graphs were generated wind speed average probability and wind power, allowing an analysis of wind power for each zone.

Since this is a preliminary analysis and found the wind potential of the areas studied, we calculated an approximate number of wind turbines to supply electricity demand in each of the sites studied, but not before the great advantages highlight technical, social and environmental inherent in the use renewables.

The main objective of this work is to make a preparation for the use of wind as a source of electricity generation from a technical standpoint with mention of some economic aspects related to a wind farm located in a rural area of the department of Santander.

---

\* Grade Project.

\*\* Faculty of Engineering's Physic-mechanical. School of Civil Engineering UIS.

Director: Oscar Javier Begambre Carrillo

## INTRODUCCIÓN

El viento es un proceso muy complejo que, sin embargo, puede ser descrito en términos muy sencillos. El sol calienta la superficie de la Tierra en diferente medida, dependiendo de si la superficie está cubierta de nubes, si está directamente expuesta a la luz solar, o si se trata de la superficie del océano. El aire que está encima de las zonas más cálidas, se calienta, se vuelve menos denso y asciende. El aire que sube crea una zona de baja presión, que hace que el aire frío adyacente a alta presión se mueva a las zonas de baja presión. Este movimiento de aire es lo que llamamos viento [1].

La energía eólica, transformada en energía mecánica ha sido históricamente aprovechada, pero su uso para la generación de energía eléctrica es más reciente, existiendo aplicaciones de mayor escala desde mediados de la década del 70 en respuesta a la crisis del petróleo y a los impactos ambientales derivados del uso de combustibles fósiles.

A nivel Internacional el aprovechamiento de las energías renovables es bastante amplio y esta contemplado en una forma importante en la planeación energética de varios países, llegando a tenerse dentro de sus planes de expansión energéticos un aporte de más del 20% de sus necesidades de energía suministrado por energías renovables. En el caso de la energía eólica se tiene una capacidad instalada que supera los 6000MW en conexión a la red a nivel mundial y varios países planean cubrir hasta un 10% de su demanda energética en conexión a red, con esta fuente [2].

En Colombia a pesar de sus importantes recursos Energéticos convencionales como el Carbón, gas, petróleo y los recursos hídricos a gran escala, se presenta problemas en el suministro de energía a todo el país, situaciones difíciles en este sector se han vivido en el pasado, en algunos casos por ser zonas aisladas de

difícil acceso y distantes del sistema interconectado, y en otras por variaciones climáticas. Es allí donde los recursos energéticos no convencionales de carácter renovable como: Energía Eólica, Energía Solar, Biomasa, Pequeñas Centrales Hidroeléctricas y Geotermia, que están disponibles también en el país para su aprovechamiento, son alternativas de solución y de diversificación de la oferta energética y por consiguiente para la confiabilidad del Sistema Energético Nacional [2].

El objetivo principal de este trabajo es hacer un análisis de viabilidad desde un punto de vista técnico y económico de un parque eólico situado en una zona rural del departamento de Santander.

## 1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En el mundo muchos países están haciendo uso de nuevas fuentes de energía que sean limpias, renovables y sustentables debido a que el uso de algunas fuentes de energía puede contribuir al fenómeno conocido como calentamiento global. En efecto, la utilización de carbón en las centrales eléctricas libera a la atmósfera dióxido de carbono y dióxido de azufre; el primero es el principal responsable del calentamiento y el último es un contaminante bastante peligroso para el medio ambiente [3]. Por otro lado, el carbón es una materia prima que no es renovable y su uso está limitado a sus reservas [4], la extracción de carbón es muy peligrosa ya que en las minas de este se producen gases como el metano (gas de efecto invernadero) que puede llegar a explotar, y también se pueden encontrar partículas de Sílice, que al llegar a ser inhaladas, pueden conducir a contraer silicosis [3].

Otra fuente de energía que plantea grandes riesgos al ambiente y a la salud humana es la energía nuclear (centrales nucleares en las cuales se emplea uranio -235) [5]. La utilización de este elemento químico genera residuos de difícil eliminación [5], estos residuos se deben almacenar en depósitos aislados y controlarlos por un tiempo durante largos periodos de tiempo [4]. El peligro de radiactividad exige la adopción de medidas de seguridad y control que pueden llegar a ser muy costosas [5] [6].

A manera de ejemplo, se pueden citar los accidentes nucleares en la planta nuclear de **Fukushima en Japón el 12 de Marzo de 2011 (demostrando la vulnerabilidad de la infraestructura nuclear), el caso de Chernóbil (Ucrania) en el año 1986 y el de Three Mile Island en Estados Unidos en el año de 1979.**

Finalmente, la generación de energía a partir de centrales hidroeléctricas puede ocasionar impactos ambientales irreversibles como la modificación de los caudales de ríos y la destrucción de hábitats [7]. Adicionalmente, los embalses producen perdidas de suelo productivo, de fauna terrestre, cambian características del agua como su temperatura y su grado de oxigenación [7], y bajo las represas se produce una disminución del caudal del rio y la alteración de la calidad del agua [5]. Asimismo, su construcción puede llegar a tardar mucho tiempo y ser muy costosa [7], sumado a esto la disponibilidad de la energía puede fluctuar de estación en estación o de año en año [4].

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL:**

- Realizar un estudio preparatorio para la generación de energía eléctrica empleando energía eólica en la zona rural de la chuchilla de Palonegro y el cañón del Chicamocha en Santander.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:**

1. Determinar las condiciones de viento en las zonas de estudio.
2. Determinar un número aproximado de aerogeneradores para la producción de energía en las zonas seleccionadas teniendo en cuenta los diferentes modelos existentes en el mercado.
3. Tomando como base ejemplos del caso Colombiano, establecer si el costo de producción del kW generado utilizando aerogeneradores es competitivo frente al costo del mismo producido por los métodos predominantes en la región.

### 3. MARCO REFERENCIAL

#### 3.1 EL RECURSO EÓLICO EN COLOMBIA

La evaluación del potencial eólico del país se encuentra en estado incipiente. Uno de los primeros trabajos en tal sentido fue adelantado por el Ingeniero Álvaro Enrique Pinilla Sepúlveda en 1997, mediante un mapa de vientos para una parte del territorio Colombiano. El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) realizan actividades de recolección y procesamiento de datos en tal sentido [9].

Un concepto ampliamente utilizado entre el poder los planificadores y los reguladores en Colombia es Capacidad firme; que se define como la energía que las empresas de generación puede producir durante los períodos de escasez. Esto se vio fuertemente cuestionado en Colombia, en los año de 1992 y 1993 cuando el país se vio obligado a vivir un racionamiento de energía eléctrica, debido a que la llegada del fenómeno del niño agoto en gran parte el recurso hídrico del país lo cual perjudico en gran medida la capacidad de generación de las hidroeléctrica, crisis que no esta exenta de repetirse.

En la actualidad la energía eólica contribuye a un 0,1% de las necesidades de electricidad de Colombia, con sólo un parque eólico (Jepirachí proyecto3) que cuenta con 19, 5 MW de potencia instalada generando 50 GWh al año. Sin embargo, esta capacidad es mínima, en comparación con el potencial de recursos en el país. El recurso energético eólico en la parte norte de Colombia (La Guajira) tiene el potencial para satisfacer más de la energía de demanda del país (la capacidad estimada está en alrededor de 21.000 MW [1]). De hecho, el régimen de vientos en Colombia es uno de los más altos en América del Sur. Las regiones marinas de la zona norte de Colombia tienen la Clase 7 del viento (más de 10 m/s) velocidad media anual. [10].

## 3.2 EL TERRITORIO COLOMBIANO Y SANTANDEREANO

Colombia cuenta con una posición geográfica estratégica, ya que es un punto de conexión entre los países del norte y del sur en el hemisferio. Además, posee amplias costas sobre los océanos Atlántico y Pacífico. El país está cruzado, de norte a sur, por el principal sistema montañoso del continente, los Andes.

Los Andes Colombianos se inician a partir del nudo de Los Pastos o de Huaca, al sur del departamento de Nariño y desde este punto se dividen en las cordilleras Occidental y Central. Más al norte, en el Macizo Colombiano de la Cordillera Central nace la tercera cordillera conocida como cordillera oriental.

El clima de Colombia esta determinado por los aspectos geográficos y atmosféricos que incluye: precipitaciones, intensidad radiación solar, temperatura, sistemas de vientos, altitud, continentalidad y humedad atmosférica. Estos factores desarrollan un amplio mosaico de climas y microclimas en Colombia que van desde los más calurosos a 30 °C en las costas y llanuras hasta lo más frío, temperaturas bajo 0 °C en los picos de las montañas de la Cordillera de los Andes y la Sierra Nevada de Santa Marta.

El sistema montañoso Andino presenta la mayor variedad de clima determinado por la altitud y sus pisos térmicos clasificados en clima cálido (alturas inferior a 1.000 msnm, temperatura superior a 24 °C, cubre el 80% de la extensión del país), templado (entre 1.000 y 2.000 msnm, temperatura entre 17 y 24 °C, corresponde al 10% del país) frío ( de 2.000 a 3.000 msnm, temperaturas entre 12 y 17 °C, cubre el 8%), páramo ( tierras a más de 3.000 msnm con temperaturas inferiores a 12 °C) y nieves perpetúas. En general, la zona habitada del país tiene un clima cálido y en menor proporción templado en las ciudades a más de 200 metros de altitud, Bogotá es una de las ciudades mas altas del mundo (2,600 msnm) y presenta un clima frio atípico de su latitud ecuatorial. [1]

Colombia cuenta con dos estaciones; una donde predomina la sequia con presencia de lluvias esporádicas la cual es llamado verano, y la segunda estación es donde predominan periodos de lluvias intensas la cual es llamada invierno, estas estaciones ocurren por los efectos de vientos y humedad en el ambiente, debido a los choques de los vientos cálidos y húmedos de las latitudes del norte y del sur lo cual forman una cadena de nubes que varían durante el otoño del hemisferio norte, y su posición mas al sur (latitud 1° N) [12].

Según el atlas de viento y energía eólica de Colombia, Santander como uno de los departamentos geográficamente más variables de Colombia cuenta con una velocidad de viento promedio anual en superficie no mayor a 2 (m/s), datos que son muy poco confiables dado a que se cuenta solo con 9 estaciones en todo el departamento, muy distantes entre si además de que las estaciones de medición están emplazadas en sitios donde la velocidad del viento es muy baja, y estos son los datos que son extrapolados para construir el atlas de vientos y energía eólica para Colombia.

## 4. LA ENERGÍA EÓLICA

### 4.1. ENERGÍA EÓLICA COMO OPCIÓN PARA GENERAR ELECTRICIDAD

Desde el punto de vista económico, es una de las fuentes de energía más baratas, puede competir en rentabilidad con otras fuentes energéticas tradicionales como las centrales térmicas de carbón (considerado tradicionalmente como el combustible más barato), las centrales de combustible las cuales son empleadas para la generación de energía eléctrica a partir de la energía liberada en forma de calor, normalmente mediante la combustión de combustibles fósiles como petróleo, gas natural o carbón e incluso con la energía nuclear, si se consideran los costes de reparar los daños medioambientales.

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

La energía eólica evita la contaminación que conlleva el transporte de los combustibles; gas, petróleo, gasoil, carbón. Reduce el intenso tráfico marítimo y terrestre cerca de las centrales. Suprime los riesgos de accidentes durante estos transportes: desastres con petroleros y traslados de residuos nucleares por ejemplo. No hace necesaria la instalación de líneas de abastecimiento: canalizaciones a las refinerías o las centrales de gas.

La utilización de la energía eólica para la generación de electricidad presenta nula incidencia sobre las características fisicoquímicas del suelo o su erosionabilidad,

ya que no se produce ningún contaminante que incida sobre este medio, ni tampoco vertidos o grandes movimientos de tierras.

Al contrario de lo que puede ocurrir con las energías convencionales, la energía eólica no produce ningún tipo de alteración sobre los acuíferos ni por consumo, ni por contaminación por residuos o vertidos. La generación de electricidad a partir del viento no produce gases tóxicos, ni contribuye al efecto invernadero, ni destruye la capa de ozono, tampoco crea lluvia ácida. No origina productos secundarios peligrosos ni residuos contaminantes. [13]

#### **4.1.1 Energía eólica mejor que el de carbón**

Cada KWh. de electricidad generada por energía eólica en lugar de carbón evita la emisión de [13]:

0,60 Kg. de CO<sub>2</sub>, dióxido de carbono.

1,33 g. de SO<sub>2</sub>, dióxido de azufre.

1,67 g. de N<sub>2</sub>O, óxido de nitrógeno.

La electricidad producida por un aerogenerador evita que se quemen diariamente miles de litros de petróleo y miles de kilogramos de lignito negro en las centrales térmicas. En promedio, un generador produce idéntica cantidad de energía que la obtenida por quemar diariamente 1.000 Kg. de petróleo. Al no quemarse esos Kg. de carbón, se evita la emisión de 4.109 Kg. de CO<sub>2</sub>, lográndose un efecto similar al producido por 200 árboles [13]. Se impide la emisión de 66 Kg. de dióxido de azufre -SO<sub>2</sub>- y de 10 Kg. de óxido de nitrógeno -N<sub>2</sub>O- principales causantes de la lluvia ácida.

La capacidad de generación no puede ser mayor a 20 megavatios, máximo permitido por la legislación colombiana para que centrales de energía alternativa entren al mercado regulado de la bolsa nacional energética, que atiende el sistema interconectado nacional.

Aun así los beneficios de la energía eólica son poco o nada cuestionables, en este punto se puede concluir lo siguiente [13]:

### **Un Parque de 10 MW**

**Evita:** 28.480 Ton. Al año de CO<sub>2</sub>.

**Sustituye:** 2.447 Tep. Toneladas equivalentes de petróleo.

**Aporta:** trabajo a 130 personas al año durante el diseño y la construcción.

**Proporciona:** industria y desarrollo de tecnología.

**Genera:** energía eléctrica para 11.000 familias. [13]

## **4.2 AEROGENERADORES**

Los aerogeneradores o turbinas de viento, son máquinas que se encargan de convertir la energía cinética del viento en energía eléctrica. El diseño de los aerogeneradores recrea la apariencia de los antiguos molinos de viento. Su principio de funcionamiento se basa en aprovechar la energía eólica y transformarla limpiamente en energía eléctrica. Para explicarlo de manera más sencilla, el flujo del viento hace girar las paletas de la turbina dentro del aerogenerador de manera que genera electricidad a través de la rotación de una gigantesca bobina [14].

Según el eje de rotación del aerogenerador, estos son de dos tipos, los de turbina en eje horizontal y los de turbina en eje vertical. Ambos modelos tienen ventajas y desventajas pero los aerogeneradores de eje horizontal son más comunes debido a que poseen mucho mayor nivel de eficiencia en su desempeño. Para generar grandes cantidades de energía los aerogeneradores se agrupan en grandes parques eólicos. El emplazamiento de varios aerogeneradores es necesario para producir energía que pueda abastecer altas demandas de consumo. Es de gran importancia para este trabajo, y por esto en los siguientes apartados se analizan y presentan en detalle los dos tipos de aerogeneradores mencionados.

## **4.2.2 Tipos de Aerogeneradores**

### ***4.2.2.1 Según el eje del rotor.***

**-Eje vertical:** Sus principales ventajas son que no necesita un sistema de orientación al ser omnidireccional y que el generador, multiplicador son instalados a ras de suelo, lo que facilita su mantenimiento y disminuyen sus costes de montaje. Sus desventajas frente a otro tipo de aerogeneradores son sus menores eficiencias, la necesidad de sistemas exteriores de arranque en algunos modelos, y que el desmontaje del rotor por tareas de mantenimiento hace necesaria que toda la maquinaria del aerogenerador sea desmontada. A continuación se presentan los aerogeneradores eje vertical más usados:

- **Aerogenerador con rotor Savonius:** Es el modelo más simple de rotor, consiste en cilindros huecos desplazados respecto su eje, de forma que ofrecen la parte cóncava al empuje del viento, ofreciendo su parte convexa una menor resistencia al giro. Se suele mejorar su diseño dejando un

espacio entre ambas caras para evitar la sobre presión en el interior de la parte cóncava. Pueden construirse superponiendo varios elementos sobre el eje de giro.

No son útiles para la generación de electricidad debido a su elevada resistencia al aire. Su bajo coste y fácil construcción les hace útiles para aplicaciones mecánicas.

- **Aerogenerador con rotor Darrieus:** Patentado por G.J.M. Darrieus en 1931, es el modelo de los aerogeneradores de eje vertical de más éxito comercial. Consiste en un eje vertical asentado sobre el rotor, con dos o más palas finas en curva unidas al eje por los dos extremos. El diseño de las palas es simétrico y similar a las alas de un avión, el modelo de curva utilizado para la unión de las palas entre los extremos del rotor es el de Trope Skien, aunque puede utilizarse también catenarias. Evita la necesidad de diseños complejos en las palas como los necesarios en los generadores de eje horizontal, permite mayores velocidades que las del rotor Savonius, aunque sin alcanzar las generadas por los modelos de eje horizontal, pero necesita de un sistema externo de arranque.
- **Aerogenerador con rotor Giromill:** Este tipo de generadores también fueron patentados por G.J.M. Darrieus. Consisten en palas verticales unidas al eje por unos brazos horizontales, que pueden salir por los extremos del aspa e incluso desde su parte central. Las palas verticales cambian su orientación a medida que se produce el giro del rotor para un mayor aprovechamiento de la fuerza del viento.
- **Aerogenerador con rotor Windside:** Es un sistema similar al rotor Savonius, en vez de la estructura cilíndrica para aprovechamiento del viento, es usado un perfil alabeado con torsión que asciende por el eje vertical. La principal diferencia frente a otros sistemas de eje vertical es el

aprovechamiento del concepto aerodinámico, que le acerca a las eficiencias de los aerogeneradores de eje horizontal.

**-Eje horizontal:** En la actualidad la gran mayoría de los aerogeneradores que se construyen conectados a red son tripalas de eje horizontal. Los aerogeneradores horizontales tienen una mayor eficiencia energética y alcanzan mayores velocidades de rotación por lo que necesitan caja de engranajes con menor relación de multiplicación de giro, además debido a la construcción elevada sobre torre aprovechan en mayor medida el aumento de la velocidad del viento con la altura.

Los modelos de eje horizontal puede subdividirse a su vez por el número de palas empleado, por la orientación respecto a la dirección dominante del viento y por el tipo de torre utilizada como se menciona a continuación:

- **Tripala:** Es el más empleado en la actualidad, consta de 3 palas colocadas formando  $120^\circ$  entre si. Un mayor numero de palas aumenta el peso y coste del aerogenerador, por lo que no se emplean diseños de mayor numero de palas para fines generadores de energía de forma comercial, aunque si para fines mecánicos como bombeo de agua etc.
- **Bipala:** Ahorra el peso y coste de una de las palas respecto a los aerogeneradores tripala, pero necesitan mayores velocidades de giro para producir la misma energía que aquellos. Para evitar el efecto desestabilizador necesitan de un diseño mucho mas complejo, con un rotor basculante y amortiguadores que eviten el choque de las palas contra la torre.

- **Monopala:** Tienen, en mayor medida, los mismo inconvenientes que los bipala, necesitan un contrapeso en el lado opuesto de la pala, por lo que el ahorro en peso no es tan significativo.
- **Orientadas a barlovento:** Cuando el rotor se encuentra enfocado de frente a la dirección del viento dominante, consigue un mayor aprovechamiento de la fuerza del viento que en la opción contraria o sotavento, pero necesita un mecanismo de orientación hacia el viento. Es el caso inmensamente preferido para el diseño actual de aerogeneradores.
- **Orientadas a sotavento:** Cuando el rotor se encuentra enfocado en sentido contrario a la dirección del viento dominante, la estructura de la torre y la góndola disminuye el aprovechamiento del viento por el rotor, en este caso el viento es el que orienta con su propia fuerza a la góndola, por lo que no son necesarios elementos de reorientación automatizada en la teoría, aunque si suelen utilizarse como elemento de seguridad. Las palas y la góndola son construidos con una mayor flexibilidad que en el caso de orientadas a barlovento.

#### 4.2.2.1.1. Estructuras Empleadas para emplazamiento de aerogeneradores.

- **Torres de celosía:** Son las construidas mediante perfiles de acero unidos mediante tornillería. Son muy baratas y fáciles de construir pero necesitan de verificaciones periódicas de la correcta sujeción de los segmentos de acero entre si. Necesitan un emplazamiento extra para la instalación de los equipos de suelo como sistemas de control o equipos eléctricos, el acceso a la góndola se realiza por escalerillas exteriores de baja protección frente a fuertes vientos y condiciones climáticas adversas. No se utilizan en zonas geográficas septentrionales o para aerogeneradores de gran potencia.

- **Torres tubulares:** Consisten en grandes tubos de acero de forma tubular o cónica que ofrecen en su interior espacio para los equipos de suelo y para el acceso a resguardo hacia la góndola. Necesitan de una instalación más laboriosa y cara, pero ofrecen una mayor resistencia y menos mantenimiento necesario que las torres de celosía. Son las más empleadas en equipos de generación de energía.

#### 4.2.2.2 Según potencia suministrada.

- Equipos de baja potencia: Históricamente son los asociados a utilización mecánica como bombeo del agua, proporcionan potencias alrededor del rango de 50 KW, aunque pueden utilizarse varios equipos adyacentes para aumentar la potencia total suministrada. Hoy en día, siguen utilizándose como fuente de energía para sistemas mecánicos o como suministro de energía en equipos aislados.

También se utilizan en grupo y junto con sistemas de respaldo como motores de gasolina para suministro de energía de zonas rurales o edificios, ya sea conectándose a red o con baterías para almacenar la energía producida y garantizar la continuidad de la cobertura energética.

- Equipos de media potencia: Son los que se encuentran en el rango de producción de energía de 150 KW. Se emplean de forma similar a los equipos de baja potencia pero para mayores requerimientos energéticos. No suelen estar conectados a baterías de almacenamiento, por lo que se utilizan conectados a red o junto con sistemas de respaldo.

- Equipos de alta potencia: Son los utilizados para producción de energía de forma comercial, aparecen conectados a red y en grupos conformando centrales eléctricas, Tanto en tierra como en entorno marino (offshore). Su producción llega hasta el orden del Gigavatio. El diseño elegido mayoritariamente para estos equipos son los aerogeneradores de eje horizontal tripalas, orientados a barlovento y con torre tubular [15].

## **5. ZONAS SELECCIONADAS PARA REALIZAR EL ESTUDIO**

### **5.1 CAÑÓN DEL CHICAMOCHA**

El cañón del Chicamocha es una de las zonas más inhóspitas de las montañas santandereanas, este lugar es un ingenio de la naturaleza la cual esta formada por una gran falla geológica y una cadena montañosa en donde pasan y se unen varias afluentes, entre ellos el río del mismo nombre, que recorre el fondo de la falla, para confluir con los ríos Fonce y el Suarez para luego formar el caudaloso río Sogamoso. La temperatura del cañón oscila entre los 11 y 32 grados centígrados, entre el día y la noche. Sus condiciones son de sequedad extrema y tiene una cobertura vegetal reducida [16].

El cañón del Chicamocha es abarcado por varias jurisdicciones que incluye el centro poblado de Pescadero como las veredas de pescadero, pavas de la jurisdicción del municipio de Piedecuesta y las veredas de San Rafael, Salazar, la Mojarra de la jurisdicción de Los Santos en la provincia de Soto y las veredas de San Pedro y San Antonio de la jurisdicción de Aratoca en la provincia de Guanenta [16, 17, 18]. En la segunda mitad del siglo XX se constituyó un periodo de crecimiento poblacional en la zona donde hoy es pescadero, gracias a tres hechos fundamentales o determinantes el primero fue la construcción de la troncal oriental Bogotá-Bucaramanga-Costa atlántica, el segundo la consolidación urbano-industrial de Bucaramanga y la tercera fue la construcción de la autopista Piedecuesta-Bucaramanga. Con la construcción de la troncal del oriente abrió el territorio a nuevos pobladores oferentes de servicios y productos, provenientes del corredor andino, con el tiempo se activó el desplazamiento de los pobladores rurales de la región hacia los centros urbanos. Estas condiciones influyeron en la concentración de la población cerca de la vía, lo que ocasionó un crecimiento de habitantes en Pescadero lugar que se convirtió en territorio atractivo para vecinos de la zona, gracias a esto Pescadero se constituyó como un centro poblado y ha

crecido hasta el día de hoy que ya tiene un puesto de salud, un colegio, y una estación de policía.

En el cañón del Chicamocha podemos encontrar un parque nacional que lleva su nombre el cual está ubicado en la vereda de San Pedro de la jurisdicción de Aratoca, el cual está localizado cerca a la troncal oriental a 12 km vía Aratoca-Bucaramanga o 54 km vía Bucaramanga-Aratoca [16].

En el cañón se presentan vientos fuertes con velocidades que superan los 7 (m/s) lo cual la hace una zona prometedora para el desarrollo de futuros proyectos energéticos usando la energía eólica. Los datos de velocidad de viento obtuvieron gracias al estudio realizado por la empresa Intercable para verificar que la velocidad del viento no fuera perjudicial para la operación del teleférico en el año 2010. En la fase de revisión bibliográfica se constató que las velocidades de viento en (m/s) que registra el mapa de vientos de Colombia, para Santander, son muy bajas, debido a la escala del mencionado estudio (poca precisión regional).

## **5.2 AEROPUERTO DE PALONEGRO**

La cuchilla de Palonegro es una elevación larga y estrecha con los lados empinados y una cresta más o menos continua, está ubicada en las veredas de Palonegro y Palonegro alto de la jurisdicción del municipio de Lebrija en la provincia de Soto en Santander, en esta cuchilla se encuentra el aeropuerto internacional de Palonegro donde se halla una estación del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) que lleva el mismo nombre, la cual está localizada al oriente de Colombia a una latitud de 7° 07 N, longitud de 73° 13 W y con una elevación de 1189 m.s.n.m. la estación aeropuerto Palonegro es la única estación que en Santander presenta velocidades de viento cercanas a los 3 (m/s), por esto de esta estación se recolectaron los datos del año

2009. Más adelante en este trabajo se presenta el análisis de los datos correspondientes a esta estación y su potencial eólico.

## 6. ANÁLISIS DE VIENTO EN LAS ZONAS SELECCIONADAS

Los datos de velocidad promedio del viento fueron medidos y registrados en la Estación aeropuerto Palonegro del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM a 10 m sobre el nivel del piso en el año de 2009. La estación Aeropuerto Palonegro está localizada en el noreste de Colombia a una latitud de 7° 07 N, longitud 73° 11 W y una elevación de 1189 m sobre el nivel del mar así como en la estación situada en el cañón del Chicamocha perteneciente a Intercable a 10 metros sobre el nivel del piso en el año 2010 a una latitud de 7° 46 N, longitud 73° W y una elevación de 1450 m sobre el nivel del mar.

En la tabla 1 se muestran los valores promedios mensuales de velocidad registrados por el IDEAM, donde se observa que los valores máximos ocurren en mayo y entre los meses de agosto y octubre, el valor máximo registrado es de 3,27 m/s en el mes de mayo y el valor mínimo promedio corresponde al mes de noviembre con un valor de 2 m/s.

Tabla 1 velocidad viento promedio año aeropuerto Palonegro año 2009

Mes	Velocidad promedio
Enero	2.56
Marzo	2.10
Febrero	2.11
Abril	2.67
Mayo	3.27
Junio	2.66
Julio	2.37
Agosto	2.80
Septiembre	3.44
Octubre	2.80
Noviembre	2.00
Diciembre	2.61

La figura 1 evidencia como las velocidades del viento durante todo el año no son fluctúan demasiado lo cual eventualmente traduciría en una producción estable de energía eléctrica.

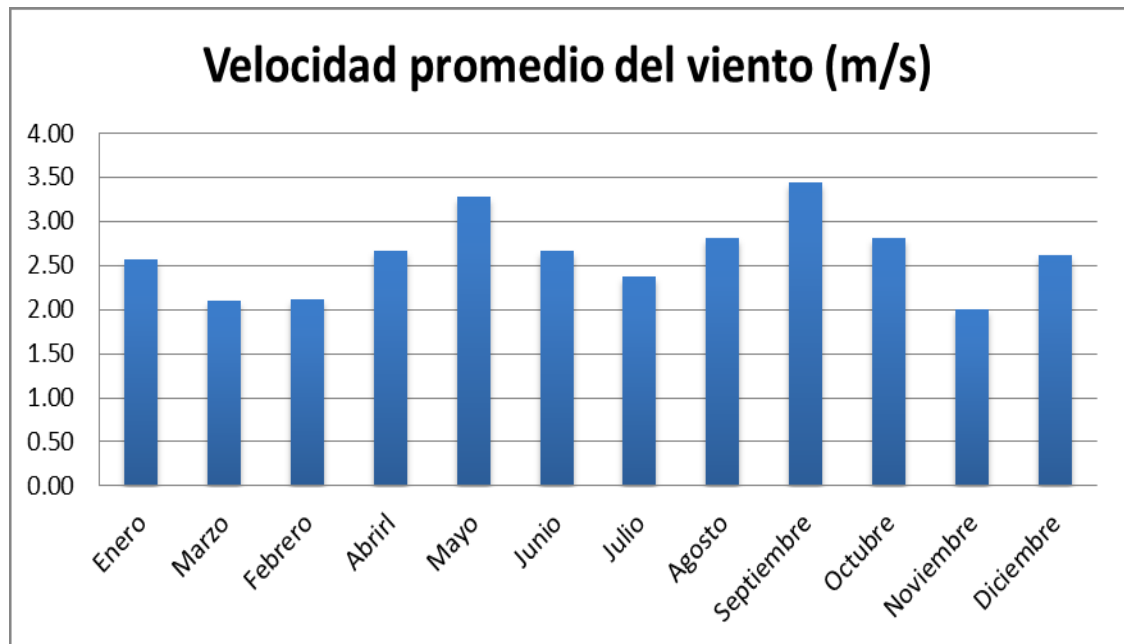


Figura 1. Velocidad promedio mensual aeropuerto Palonegro año 2009

En la tabla 2 se muestran los valores promedios mensuales de velocidad registrados por Intercable. En esta tabla se observa que los valores máximos ocurren en los meses de febrero y marzo, el valor máximo promedio registrado es de 13,4 m/s (febrero y marzo) y el valor mínimo promedio corresponde a los meses de julio y agosto con un valor de 6,88 m/s.

Tabla 2. Velocidad del viento promedio año 2010 cañón del Chicamocha

Año 2010	Velocidad promedio
Enero	8.24
Febrero	12.97
Marzo	13.42
Abril	9.89
Mayo	7.86
Junio	7.88
Julio	6.88
Agosto	7.10
Septiembre	8.01
Octubre	8.49
Noviembre	8.13
Diciembre	9.10

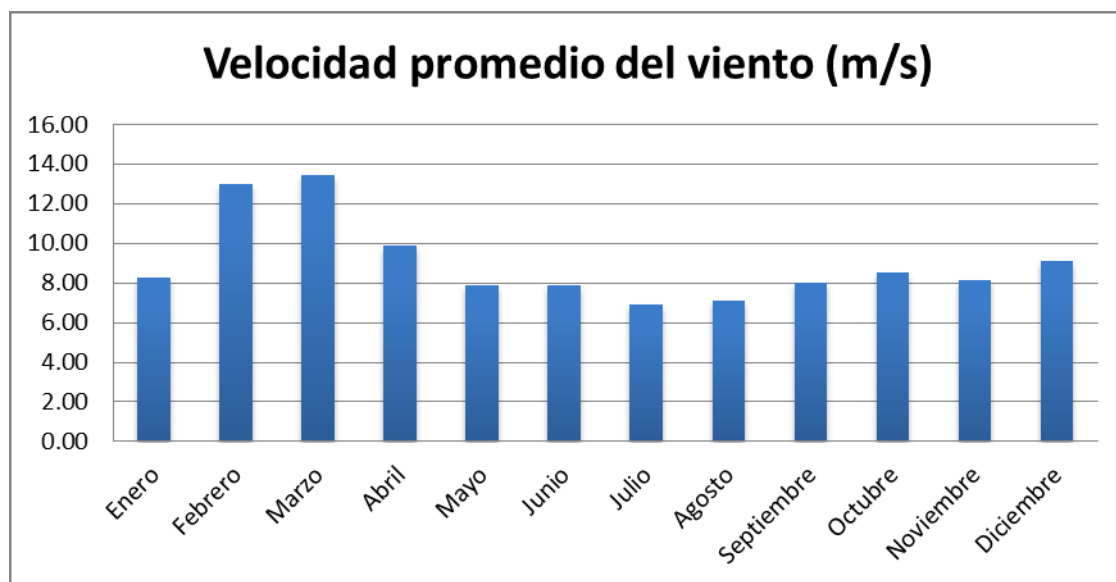


Figura 2. Velocidad promedio mensual cañón del Chicamocha año 2010

## 6.1 AJUSTE VELOCIDAD DEL VIENTO

Cuando se valora el potencial energético es necesario saber como varía la velocidad del viento con la altura y en particular cual es la velocidad correspondiente a la altura en la cual se ubicará el cubo del aerogenerador. En la mayoría de los casos los datos disponibles para estudio son medidos a una altura estándar de 10 m sobre el nivel del suelo, esto se hace necesario, una forma de determinar la velocidad del viento a una altura determinada. Para este fin se emplea la ley exponencial de Hellmann dada por la Ecuación 1.

$$v(h) = v_0 * \left(\frac{h}{h_0}\right)^\alpha$$

Ecuación 1. Ley exponencial de Hellmann.

Donde  $v(h)$  es la velocidad el viento a la altura a estudiar (m/s),  $v_0$  es la velocidad a la altura estudiada,  $h$  es la altura a estudiar (m),  $h_0$  es la altura de referencia o altura de medición de los datos,  $\alpha$  es el coeficiente de Hellmann el cual está definido en función del tipo de terreno que se encuentra definido en la tabla 3 [19].

Tabla 3. Coeficiente de Hellmann en función del tipo de terreno

Tipo de Terreno	A
Lugares llanos con hielo o hierba	0,08-0,12
Lugares llanos (mar, costa)	0,14
Terrenos poco accidentados	0,14 -0,16
Zonas rústicas	0,2
Terrenos accidentados o bosques	0,2-0,26
Terrenos muy accidentados y ciudades	0,25-0,4

A mayor rugosidad (relativo a la altura promedio de los obstáculos), mayor será la desaceleración del viento cerca de la superficie. Para el terreno Complejo (montañas, colinas, valles, pasos entre montañas) la situación es bastante diferente. El flujo de viento sobre y alrededor de montañas es complejo y hasta ahora, conceptos analíticos sencillos (como el perfil de velocidades y velocidad de viento potencial para terreno plano) no existen para modelar tales flujos. En este trabajo se hace una aproximación considerando las montañas como obstáculos elevados por tanto el valor usado para los cálculos será el de terrenos accidentados o rústicos es de 0,2.

## 6.2 ESTACIÓN AEROPUERTO PALONEGRO

La velocidad del viento es proporcional al aumento de la altura y a las condiciones de superficie del terreno, eso implica que se debe calcular la velocidad del viento a la altura del cubo de la turbina, usando la Ecuación (1). Las velocidades promedio son de 3.70, 3.96, 4.07, 4.25, y 4.55 m/s para alturas de 50, 70, 80, 100 y 140 m (alturas escogidas de acuerdo a las altura de cubo especificadas en el manual de los aerogeneradores ENERCON); respectivamente. En la tabla 4 y la figura 3 se muestra la velocidad del viento a diferentes alturas.

Tabla 4. Velocidad promedio del viento a diferentes alturas sobre el nivel del piso

Mes	velocidad promedio (m/s)				
	50 m	70 m	80 m	100 m	140 m
Enero	3.53	3.78	3.88	4.06	4.34
Marzo	3.43	3.66	3.76	3.93	4.21
Febrero	3.45	3.69	3.79	3.97	4.24
abril	3.68	3.93	4.04	4.22	4.52
Mayo	4.52	4.83	4.96	5.19	5.55
Junio	3.66	3.92	4.02	4.21	4.50

Julio	3.27	3.49	3.59	3.75	4.01
Agosto	3.86	4.13	4.24	4.44	4.75
Septiembre	4.05	4.33	4.45	4.65	4.97
Octubre	3.87	4.14	4.25	4.44	4.75
Noviembre	3.49	3.74	3.84	4.01	4.29
Diciembre	3.60	3.85	3.96	4.14	4.43

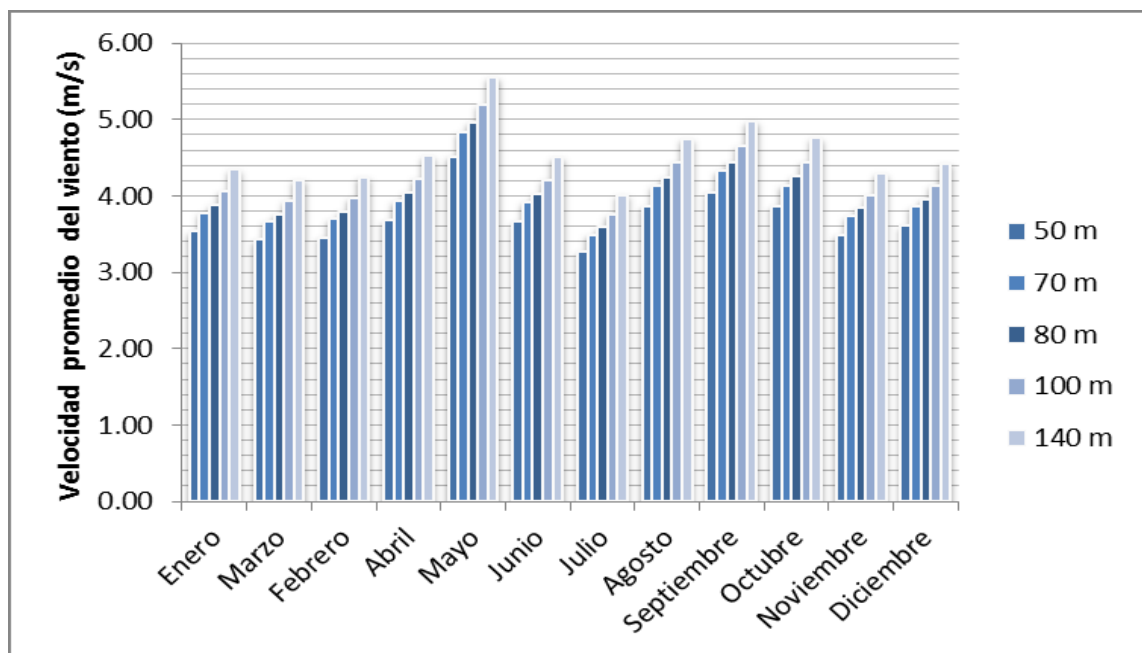


Figura 3. Velocidad promedio del viento a diferentes alturas. Estación Palonegro

### 6.3 ESTACIÓN PARQUE NACIONAL DEL CHICAMOCHA

Las velocidades promedio son de 12.41, 13.28 y 13.96 m/s para alturas de 50, 70, 90 m; respectivamente. En la tabla 5 y la figura 4 se muestra la velocidad del viento a diferentes alturas.

Tabla 5. Velocidad promedio del viento a diferentes alturas

Año 2010	V promedio m/s (50 m)	V promedio m/s (70 m)	V promedio m/s (80 m)	V promedio m/s (100 m)	V promedio m/s (140 m)
Enero	11.37	12.16	12.49	13.06	13.97
Febrero	17.89	19.14	19.66	20.56	21.99
Marzo	18.52	19.81	20.35	21.27	22.76
Abril	13.64	14.59	14.99	15.67	16.76
Mayo	10.85	11.60	11.92	12.46	13.33
Junio	10.87	11.63	11.94	12.49	13.35
Julio	9.49	10.15	10.42	10.90	11.66
Agosto	9.79	10.48	10.76	11.25	12.03
Septiembre	11.05	11.82	12.14	12.69	13.58
Octubre	11.72	12.54	12.88	13.46	14.40
Noviembre	11.22	12.00	12.33	12.89	13.79
Diciembre	12.55	13.43	13.79	14.42	15.42

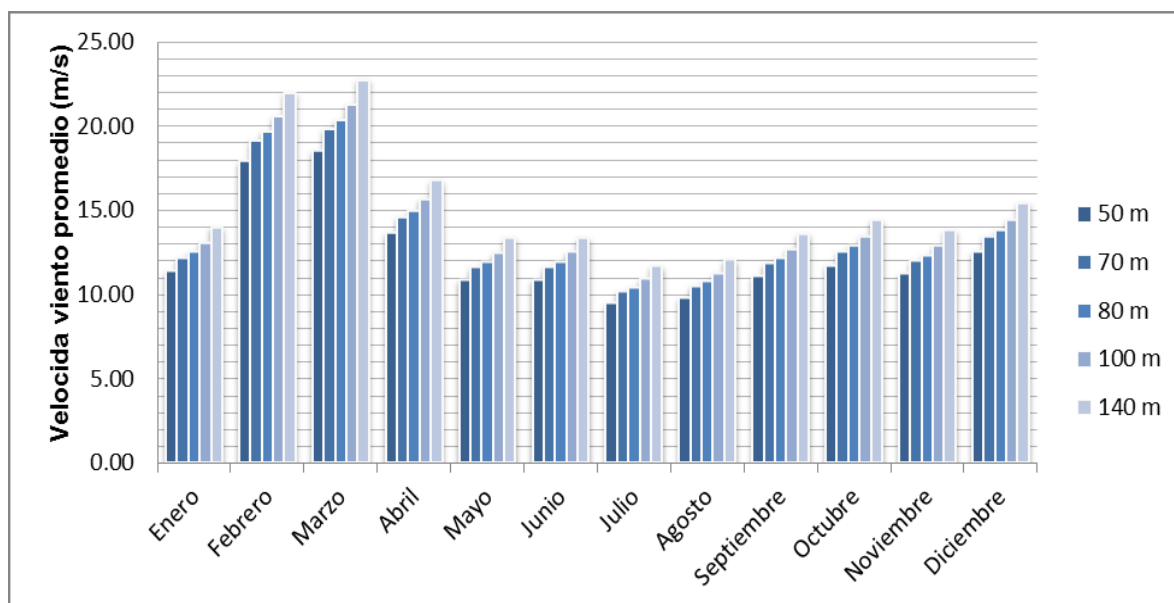


Figura 4. Velocidad promedio del viento a diferentes alturas. Estación Chicamocha

## 7. DISTRIBUCIÓN DE FRECUENCIA DE VELOCIDAD DEL VIENTO EN LOS SITIOS SELECCIONADOS

Existen numerosas funciones de densidad, las cuales pueden ser usadas para describir los datos de velocidad del viento. La distribución de Weibull es una de ellas, cuya función está caracterizada por dos parámetros. La función densidad de probabilidad de la distribución de Weibull está dada por:

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) * \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp \left[ - \left(\frac{v}{c}\right)^k \right]$$

Ecuación 2. Función de densidad de probabilidad de Weibull

$$F(v) = 1 - \exp \left[ - \left(\frac{v}{c}\right)^k \right]$$

Ecuación 3. Función de densidad acumulada

Donde  $c$  es el parámetro de escala con unidades de (m/s) y  $k$  el parámetro de forma adimensional el cual describe la dispersión de los datos. Existen diferentes métodos para determinar dichos parámetros, los cuales pueden ser calculados por las siguientes aproximaciones. [20]

Método 1: Aplicando el principio de probabilidad máxima, este resultado se consigue mediante las ecuaciones no lineales para los parámetros  $k$  y  $c$ .

$$k = \left[ \frac{\sum v_i^k (\ln v_i)}{\sum v_i^k} - \frac{\sum \ln v_i}{n} \right]^{-1}$$

Ecuación 4. Factor de forma adimensional para método de probabilidad máxima

$$c = \left( \frac{\sum \ln v_i^k}{n} \right)^{\frac{1}{k}}$$

Ecuación 5. Factor de escala (m/s)

Donde  $v_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) son las velocidades del viento promedio registradas,  $\ln$  logaritmo natural,  $n$  numero de datos

Método 2: También pueden ser calculados mediante las siguientes aproximaciones

$$k = \left(\frac{\sigma}{\bar{v}}\right)^{-1.086} \quad (1 \leq k \leq 10)$$

Ecuación 6. Factor de forma adimensional

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1 + 1/k\right)}$$

Ecuación 7. Factor de escala (m/s)

Donde

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n v_i \right)$$

Ecuación 8. Velocidad promedio (m/s)

$$\sigma = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v}_i)^2 \right]^{0.5}$$

Ecuación 9. Desviación estándar

## 7.1 ESTUDIO CASO PARTICULAR ESTACION AEROPUERTO PALONEGRO

### 7.1.1 Distribución de Weibull

En la tabla 6 se muestran los parámetros calculados por el método 2, no se trabajaron con los valores del método 1, método de probabilidad máxima, porque este conduce a mayores errores en algunos caso.

Tabla 6. Valores estimados de los parámetros de la función de Weibull

Factor	Método 1
k	3.87
c	2.69

En la figura 5 se muestra la distribución de Weibull, la cual es resultado de la serie de datos registrados. Como se puede observar, el punto superior de la curva se muestra la velocidad del viento más frecuente, la cual es de (2,6 m/s) y cuya es de del 97%. Se observa que es poco probable conseguir velocidades mayores a 3.5 m/s.

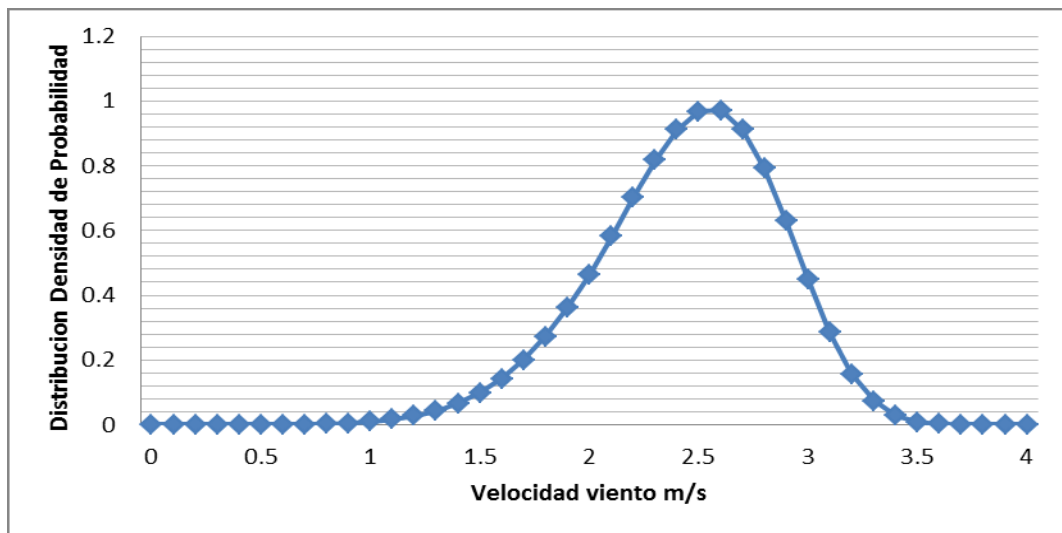


Figura 5. Distribución de frecuencia de la velocidad del viento a 10m del suelo

### 7.1.2 Calculo de potencia del viento

Aparte del viento, la potencia eólica disponible también dependerá de la densidad del viento, la cual depende de varios factores. Para calcularla, existen varios métodos que tienen en cuenta la humedad del aire, temperatura, altura, presión

atmosférica entre otros. Hacer un calculo muy preciso de la densidad del aire para el calculo aproximado de la potencia eólica no tendría sentido, ya que el error que se produce al realizar el calculo aproximado es mucho mas grande que las decimas que puede variar la densidad. Por esto, el valor de la densidad del aire que se tomara a la hora de realizarlas los cálculos será de:  $\rho_{aire} = 1.2 \text{ Kg/m}^3$

La potencia eólica por unidad de área es importante en el análisis de las proyecciones del potencial eólico de una granja eólica. La densidad de potencia de determinado lugar puede determinarse con base en cualquier función de densidad de probabilidad, que puede ser expresada como

$$Pm = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} v^3 f(v) dv$$

Ecuación 10. Función de densidad de probabilidad

Donde  $\rho$  es la densidad del aire estándar en  $\text{kg/m}^3$ , y  $v$  es la velocidad del viento en  $\text{m/s}$ . En el presente trabajo, la potencia es calculada usando la distribución de Weibull. Cuando la distribución de Weibull es seleccionada como la función distribución  $f(v)$  el promedio de la densidad de potencia es calculada como se muestra en la Ecuación.

$$Pm = \frac{1}{2} \rho \bar{v}^3 \frac{\Gamma(1 + 3/k)}{[\Gamma(1 + 1/k)]^3}$$

Ecuación 11. Promedio de la densidad de Potencia

La potencia esta expresada en vatios por metro cuadrado ( $\text{w/m}^2$ )

Como se mencionó anteriormente la velocidad del viento cambia con la altura, por tal motivo la densidad de potencia fue determinada para alturas de 50, 70, 80, 100

y 140m. En la figura 6 se muestran los resultados obtenidos para dichas alturas y para cada uno de los meses del año, con base en la ecuación (12).

Tabla 7. Densidad de potencia del viento para diferentes alturas

mes	velocidad promedio (m/s)				
	50 m	70 m	80 m	100 m	140 m
Enero	3.53	3.78	3.88	4.06	4.34
Marzo	3.43	3.66	3.76	3.93	4.21
Febrero	3.45	3.69	3.79	3.97	4.24
Abril	3.68	3.93	4.04	4.22	4.52
Mayo	4.52	4.83	4.96	5.19	5.55
Junio	3.66	3.92	4.02	4.21	4.50
Julio	3.27	3.49	3.59	3.75	4.01
Agosto	3.86	4.13	4.24	4.44	4.75
Septiembre	4.05	4.33	4.45	4.65	4.97
Octubre	3.87	4.14	4.25	4.44	4.75
Noviembre	3.49	3.74	3.84	4.01	4.29
Diciembre	3.60	3.85	3.96	4.14	4.43

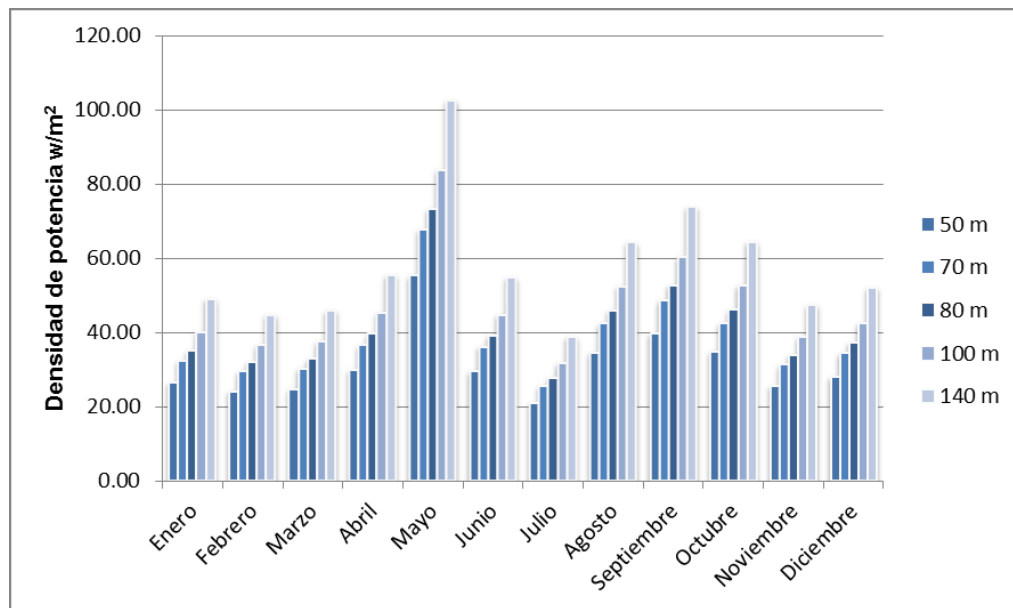


Figura 6. Densidad de potencia del viento para diferentes alturas

## 7.2 ESTUDIO CASO PARTICULAR ESTACION CAÑÓN DEL CHICAMOCHA

### 7.2.1 Distribucion de weibull

En la tabla 8 se muestran los parámetros calculados por el método 2, no se trabajaron con los valores del método 1 porque como ya se menciona, el método de probabilidad máxima, conduce a mayores errores en algunos casos.

Tabla 8. Valores estimados de los parámetros de la función de Weibull

factor	método 1
k	4.8105918
c	8.9981008

En la figura 7 se muestra la distribución de weibull, la cual es resultado de la serie de datos registrados. Como se puede observar, el punto superior de la curva muestra la velocidad del viento más frecuente, la cual es de (8,6 m/s) con una probabilidad del 20%. Se observa que es poco probable conseguir velocidades mayores a 13 m/s.

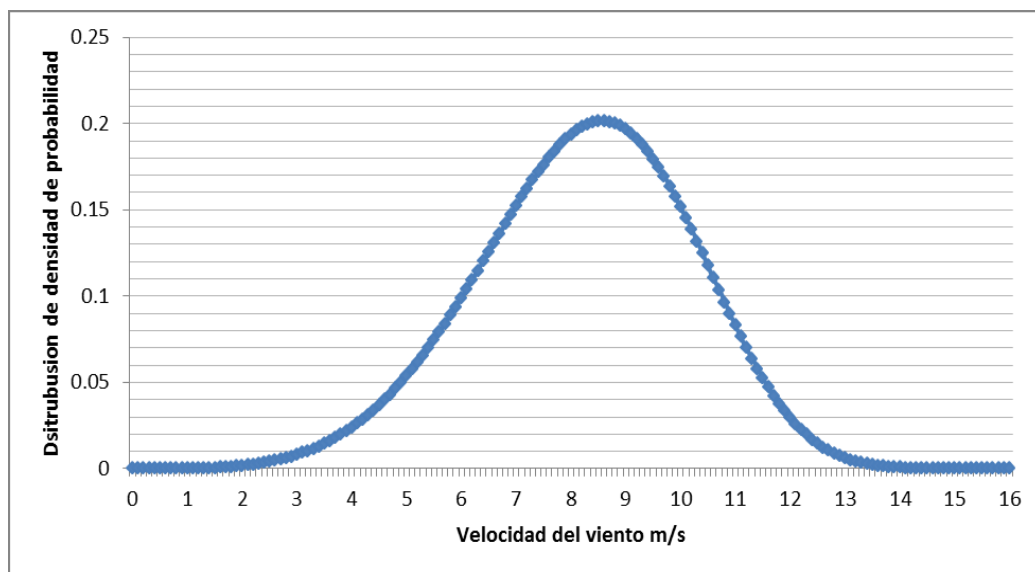


Figura 7. Distribución de la frecuencia de velocidad de viento a 10m del suelo

El valor de la densidad del aire que se tomara a la hora de realizarlas los cálculos, igual que en el caso anterior será de:

$$\rho_{aire} = 1.2 \text{ Kg/m}^3 \quad (10)$$

Y la densidad de potencia será:

$$Pm = \frac{1}{2} \rho \bar{v}^3 \frac{\Gamma(1+3/k)}{[\Gamma(1+1/k)]^3} \quad (12)$$

La potencia esta expresada den vatios por metro cuadrado (w/m<sup>2</sup>)

Como se mencionó anteriormente la velocidad del viento cambia con la altura, por tal motivo la densidad de potencia fue determinada para alturas de 80 y 140m. En la figura 8 se muestran los resultados obtenidos para dichas alturas y para cada uno de los meses del año, con base en la ecuación (12).

Tabla 9. Densidad de potencia de viento para diferentes alturas

mes	Altura del cubo del aerogenerador				
	50 m	70 m	80 m	100 m	140 m
Enero	882.31	1079.69	1169.75	1337.33	1636.50
Febrero	3438.03	4207.13	4558.08	5211.08	6376.82
Marzo	3811.44	4664.08	5053.14	5777.07	7069.43
Abril	1524.24	1865.22	2020.81	2310.31	2827.14
Mayo	766.26	937.67	1015.89	1161.43	1421.25
Junio	770.39	942.73	1021.37	1167.70	1428.92
Julio	512.67	627.36	679.69	777.07	950.90
Agosto	563.58	689.66	747.18	854.23	1045.32
Septiembre	809.78	990.93	1073.59	1227.40	1501.98
Octubre	965.91	1181.99	1280.59	1464.05	1791.57
Noviembre	848.10	1037.82	1124.39	1285.48	1573.04
Diciembre	1186.93	1452.46	1573.61	1799.06	2201.51

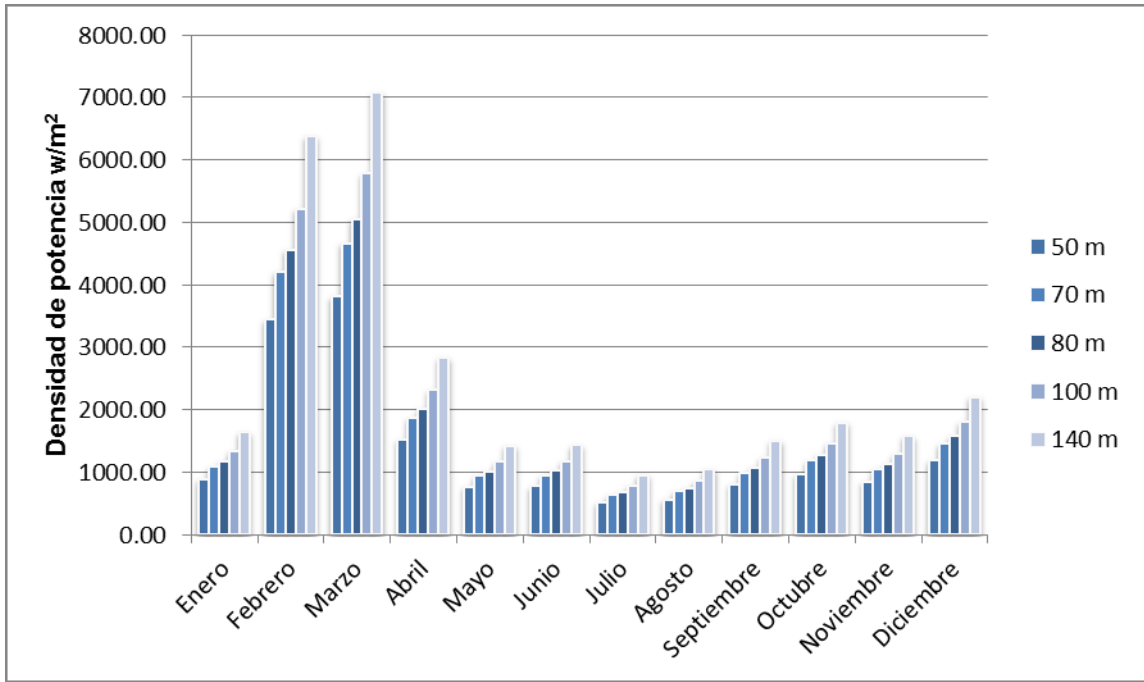


Figura 8. Densidad de potencia de viento para diferentes alturas.  
Chicamocha

## 8. CALCULO DE OPERACIÓN Y PRODUCCIÓN DE LAS TURBINAS

Los aerogeneradores son diseñados con una velocidad de arranque, velocidad en la cual el aerogenerador empieza a generar energía y una velocidad de abatimiento, velocidad del viento en la cual el aerogenerador deja de generar energía por consideraciones de seguridad. El aerogenerador tiene un sistema activo de orientación, que hace girar la góndola de forma que el rotor permanezca orientado hacia el viento incidente, lo cual optimiza en gran medida la producción de energía.

A través de los sensores de viento localizados en el exterior de la góndola (duplicados por seguridad), el control es informado de si la góndola está orientada o no con el viento incidente.

Generalmente, el rango velocidad de arranque está entre 3.0 y 4.5 m/s y velocidades de abatimiento de 25 a 34 m/s. en la figura 9 se registra la potencia producida en kWh por los distintos modelos de aerogenerador ENERCON en función de la velocidad del viento.

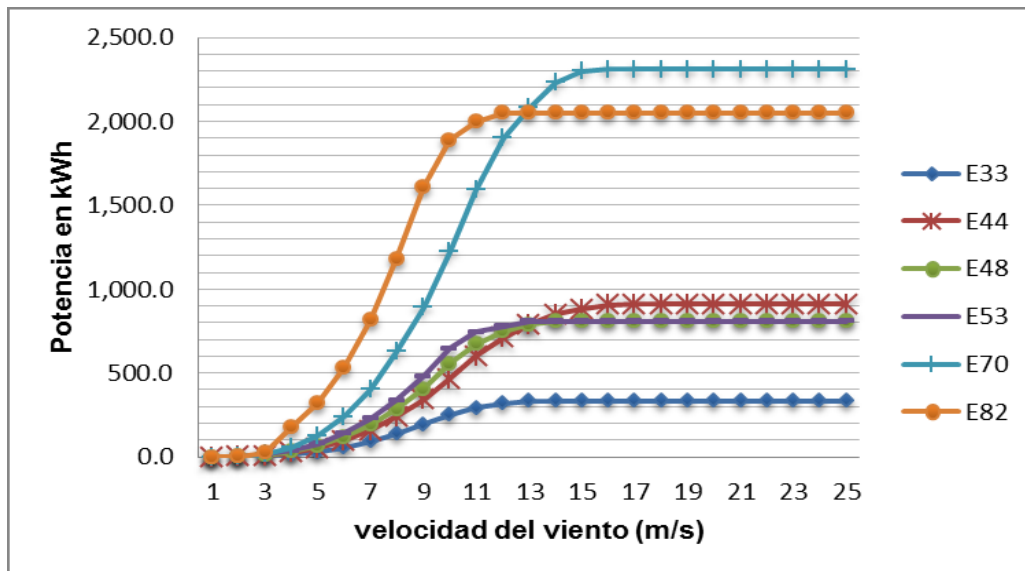


Figura 9. Comportamiento distintos modelos de aerogeneradores ENERCON

Analizando la grafica anterior con respecto a las velocidades de viento que se estudian en este trabajo, se concluye que el aerogenerador que ofrece mayor rendimiento en cuanto a la producción de energía es el ENERCON E-82/2000Kw; en la tabla 10 se muestran algunas de sus características.

Las características de los aerogeneradores mencionados en la grafica se detallan en el anexo A.

Tabla 10. Características aerogenerador ENERCON E-82/2000kW

<b>Potencia nominal</b>	<b>2000 kW</b>
Diámetro rotor (m)	82
Altura cubo (m)	78 - 138
Numero de aspas	3
Velocidad (rpm)	6 - 19.5
Velocidad de arranque (m/s)	3
Velocidad de corte (m/s)	28 - 34

Velocidad de arranque: Velocidad de viento donde el generador comienza a entregar energía.

Velocidad Nominal: Velocidad del viento donde el equipo alcanza su potencia eléctrica nominal (o de placa).

Velocidad de abatimiento: velocidad de viento donde el equipo se obliga a parar de entregar energía por razones de seguridad y protección de mismo.

Las características tipo de la cimentación para la torre que soportara el aerogenerador se encuentra en el anexo A

Si 3.0 m/s y 34 m/s son las velocidades de arranque y abatimiento, se tiene una probabilidad de operación del aerogenerador mostrada en la tabla 11.

Las figuras 10 y 11 muestran los componentes básicos de un aerogenerador en tierra

**ESquema general de un Aerogenerador**

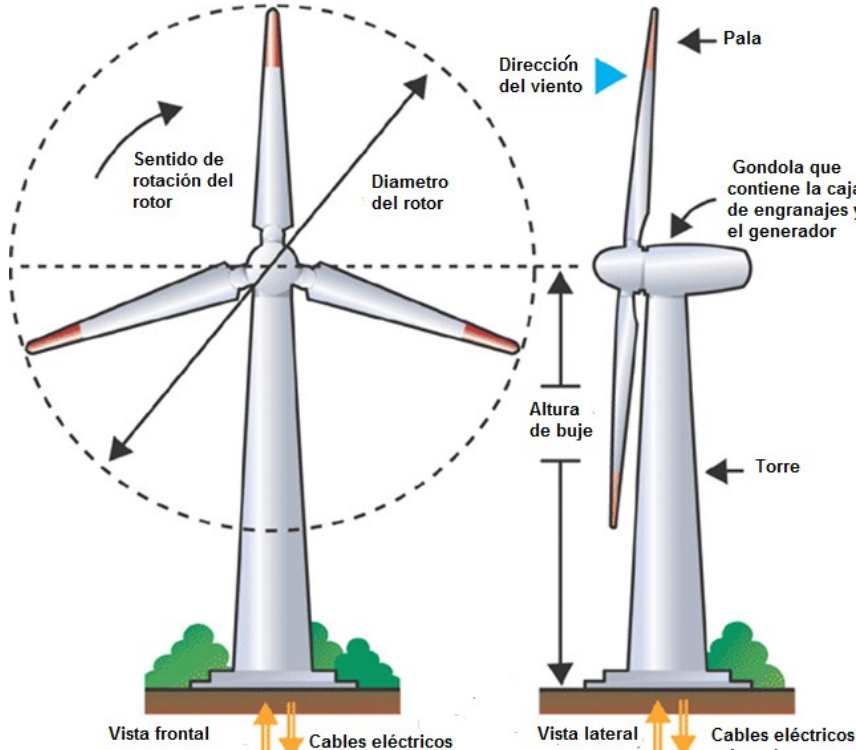


Figura 10. Esquema general de un aerogenerador

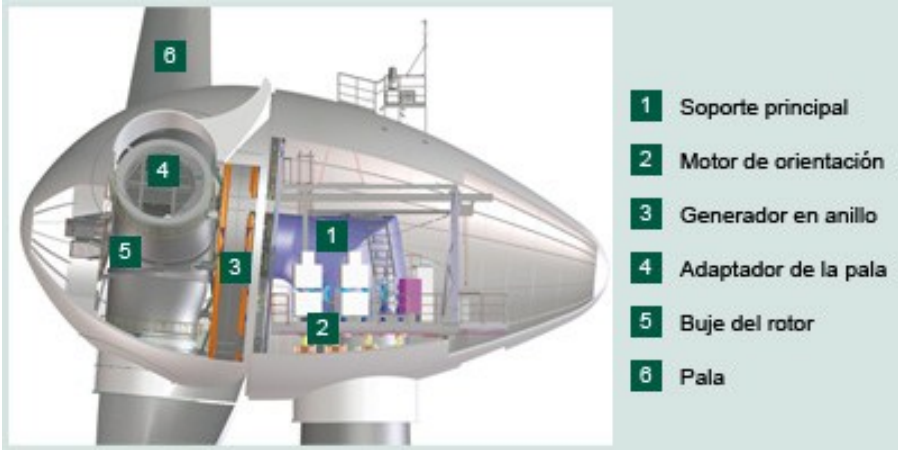


Figura 11. Detalle góndola aerogenerador ENERCON - E82

Tabla 11. Probabilidad de operación anual de los aerogeneradores

Estación de referencia	altura cubo (m)	operación horas	Probabilidad de operación anual (%)
Aeropuerto Palonegro	80	4438	50.7
	140	4812	55.1
Cañón del Chicamocha	80	593	76.3
	140	601	77.7

El estimativo de energía producida por el aerogenerador E-82 para el período de análisis en horas, se realiza multiplicando el nivel de potencia del generador y el número de horas de viento en cada intervalo.

### 8.1 ESTIMACIÓN DE SUMINISTRO DE ENERGÍA CON EQUIPO ENERCON E-82 – AEROPUERTO PALONEGRO

Tabla 12. Estimación de suministro de energía con equipo ENERCON E-82 para estación aeropuerto Palonegro a 80 metros altura de torre

Intervalo (m/s)	365 días (8747 h)	Porcentaje(%) en tiempo	Energía producida kWh
0-0.5	621	7.10	0
0.5-1	460	5.26	0
1-1.5	905	10.35	0
1.5-2	751	8.59	0
2-2.5	677	7.74	2031
2.5-3	895	10.23	2685
3-3.5	492	5.62	12300
3.5-4	549	6.28	12300
4-4.5	330	3.77	57420
4.5-5	450	5.14	78300
5-5.5	289	3.30	92769
5.5-6	315	3.60	101115

6-6.5	384	4.39	204288
6.5-7	278	3.18	147896
7-7.5	309	3.53	251835
7.5-8	569	6.51	463735
8-8.5	316	3.61	372880
8.5-9	0	0.00	0
9-9.5	87	0.99	140244
9.5-10	40	0.46	64480
10-10.5	21	0.24	39690
10.5-11	6	0.07	11340
11-11.5	2	0.02	4000
11.5-12	1	0.01	2000
12-12.5	0	0.00	0
12.5-13	0	0.00	0
13-13.5	0	0.00	0
13.5-14	0	0.00	0

Energía total producida en 8747 horas: 2.061.308 kWh.

Tabla 13. Estimación de suministro de energía con equipo ENERCON E-82 para estación aeropuerto Palonegro a 140 metros altura de torre

<b>Intervalo (m/s)</b>	<b>365 días (8731 h)</b>	<b>Porcentaje(%) en tiempo</b>	<b>Energía producida kWh</b>
0-0.5	621	7.11	0
0.5-1	460	5.27	0
1-1.5	595	6.81	0
1.5-2	928	10.63	0
2-2.5	960	11.00	2880
2.5-3	355	4.07	1065
3-3.5	598	6.85	14950
3.5-4	492	5.64	14950
4-4.5	549	6.29	95526
4.5-5	328	3.76	57072
5-5.5	266	3.05	85386
5.5-6	282	3.23	90522

6-6.5	285	3.26	151620
6.5-7	246	2.82	130872
7-7.5	491	5.62	400165
7.5-8	302	3.46	246130
8-8.5	322	3.69	379960
8.5-9	0	0.00	0
9-9.5	287	3.29	462644
9.5-10	189	2.16	304668
10-10.5	95	1.09	179550
10.5-11	49	0.56	92610
11-11.5	22	0.25	44000
11.5-12	5	0.06	10000
12-12.5	1	0.01	2050
12.5-13	2	0.02	4100
13-13.5	1	0.01	2050
13.5-14	0	0.00	0

Energía total producida en 8731 horas: 2.772.770kWh.

## 8.2 ESTIMACIÓN DE SUMINISTRO DE ENERGÍA CON EQUIPO ENERCON E-82 – CAÑÓN DEL CHICAMOCHA

Tabla 14. Estimación de suministro de energía con equipo ENERCON E-82 para estación cañón del Chicamocha a 80 metros altura de torre

Intervalo (m/s)	309 días (775 h)	Porcentaje(%) en tiempo	Energía producida kWh
0-1	128	20.65	0
1-2	27	4.35	0
2-3	27	4.35	0
3-4	28	4.52	700
4-5	25	4.03	4350
5-6	24	3.87	7704
6-7	21	3.39	11172
7-8	24	3.87	19560

8-9	47	7.58	55460
9-10	37	5.97	59644
10-11	17	2.74	32130
11-12	24	3.87	48000
12-13	36	5.81	73800
13-14	17	2.74	34850
14-15	32	5.16	65600
15-16	23	3.71	47150
16-17	31	5.00	63550
17-18	29	4.68	59450
18-19	29	4.68	59450
19-20	21	3.39	43050
20-21	36	5.81	73800
21-22	35	5.65	71750
22-23	23	3.71	47150
24-25	16	2.58	32800
25-26	5	0.81	10250
26-27	9	1.45	18450
27-28	4	0.65	8200
28-29	0	0.00	0
30-31	0	0.00	0
31-32	0	0.00	0
32-33	0	0.00	0
33-34	0	0.00	0

Energía total producida en 775 horas: 948.020kWh.

Tabla 15. Estimación de suministro de energía con equipo ENERCON E-82 para estación cañón del Chicamocha a 140 metros altura de torre

Intervalo (m/s)	309 días (777 h)	Porcentaje(%) en tiempo	Energía producida kWh
0-1	128	20.65	0
1-2	24	3.87	0
2-3	24	3.87	0
3-4	32	5.16	800
4-5	24	3.87	4176
5-6	24	3.87	7704

6-7	17	2.74	9044
7-8	20	3.23	16300
8-9	47	7.58	55460
9-10	37	5.97	59644
10-11	23	3.71	43470
11-12	13	2.10	26000
12-13	16	2.58	32800
13-14	23	3.71	47150
14-15	32	5.16	65600
15-16	18	2.90	36900
16-17	26	4.19	53300
17-18	27	4.35	55350
18-19	26	4.19	53300
19-20	25	4.03	51250
20-21	25	4.03	51250
21-22	16	2.58	32800
22-23	32	5.16	65600
24-25	34	5.48	69700
25-26	23	3.71	47150
26-27	14	2.26	28700
27-28	16	2.58	32800
28-29	5	0.81	10250
30-31	2	0.32	4100
31-32	2	0.32	4100
32-33	0	0.00	0
33-34	2	0.32	4100

Energía total producida en 777 horas: 968.798 kWh.

Tomando como base los datos obtenidos de las tablas 11, 12, 13 y 14 la energía total producida es entonces la suma de la distribución de energía, lo cual resulta ser 2.061.308kWh y 2.772.770kWh para el período de 365 días en la estación aeropuerto Palonegro, y 948.020 kWh y 968.798kWh para el período de 309 días (777 y 775 horas) en la estación cañón del Chicamocha para alturas de cubo de 80 y 140 metros respectivamente. Este nivel de energía corresponde a una

capacidad de generación diaria promedio de 5647 Kwh/día y 7596 Kwh/día para la estación aeropuerto Palonegro y 3.068 Kwh/día y 3.135 Kwh/día para la estación cañón del Chicamocha para alturas de cubo de 80 y 140 metros respectivamente.

## 9. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 9.1 CONSUMO PROMEDIO DE KWH

Con el fin de estimar el número aproximado de hogares servidos por el aerogenerador se realizó el siguiente análisis. La tabla 15, tomada de un estudio realizado en el 2006 por la universidad nacional [21] muestra los resultados del cálculo promediando los tres primeros estratos por cada uso y en cada ciudad.

Tabla 16. Consumo promedio mensual de energía para los estratos 1, 2 y 3

Equipo	Consumo kWh/mes/hogar en cada ciudad			
	Bogotá	Medellín	Barranquilla	Pasto
Iluminación	36.2	25	24.8	34.3
Televisor	8.2	7.8	11.7	6.9
Nevera	44.1	55	60	29
Plancha	10.7	9.4	9	7.7
Licuada	1.2	1	1.9	1.7
Lavadora	12.7	12.7	3.8	5.2
Ducha eléctrica	63.1			62.8
Ventilador				
<b>Total</b>	<b>176.2</b>	<b>110.9</b>	<b>111.2</b>	<b>147.6</b>

Tomando como base el consumo para la ciudad de Bogotá, siendo el más alto registrado 176.2 kWh/mes/hogar, este permite un consumo mínimo para 448 viviendas tomando como referencia la estación cañón del Chicamocha altura de cubo 80 m. la tabla 16 muestra el número de viviendas a las cuales se les puede suministrar energía para las dos estaciones y las diferentes alturas de cubo.

Tabla 17. Viviendas a las cuales se les suministra energía con un aerogenerador para las diferentes estaciones de medición.

Altura de cubo (m)	Viviendas conectadas a la red	
	Estación Cañón del Chicamocha	Estación Aeropuerto Palonegro
80	448	974
140	458	1311

Es importante mencionar que en la estación de monitoreo cañón del Chicamocha solo se registraron 2 mediciones diarias mientras que en la estación aeropuerto Palonegro se registran 24 mediciones diarias por tanto el numero de horas y velocidades registradas es 91.6 % mayor en la primera estación que en la segunda. Aun así la anergia calculada para la estación cañón del Chicamocha es 39.6% con respecto a la energía producida en la estación aeropuerto Palonegro teniendo en cuenta que solo se está calculando la operación de las turbinas para dos horas diarias en el primer caso.

## 9.2 POBLACIÓN BENEFICIADA CON LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA

El proyecto busca establecer la población del área rural que se vería beneficiada con la producción de energía eléctrica a partir de aerogeneradores, analizando los datos mostrados en la tabla 16 se puede dar por sentado que en las dos zonas de estudio (cañón del Chicamocha y aeropuerto Palonegro) puede ser viable técnicamente un proyecto de este tipo, no solo por sus beneficios económicos, también sus beneficios ambientales dado que se trata de zonas rurales. En la zona de influencia al cañón se encuentra el municipio de los santos y cepita, y en la zona de influencia de la estación aeropuerto Palonegro se encuentran los municipios de Lebrija y Bucaramanga. A continuación las tablas 17,18 y 19 se presentan las veredas que están afiliadas a dichos municipios

•Zona de influencia estación cañón del Chicamocha

Tabla 18. Veredas y distribución de población municipio de Los Santos

NOMBRE VEREDA	TOTAL DE POBLACIÓN	
	Hab.	%
CARRIZAL	340	4.1
EL VERDE	456	5.5
TABACAL	830	10
MAJADAL ALTO	50	0.6
MAJADAL BAJO	239	2.8
LA FUENTE	205	2.4
ROSA BLANCA	228	2.7
DELICIAS	249	3
SAN RAFAEL	152	1.8
SALAZAR	27	0.3
MOJARRA	170	2
LA PEÑA	168	2
EL POZO	357	4.3
GARBANZAL	97	1.1
LOS TERES	139	1.6
DIAMANTE	60	0.7
LAGUNA ALTA	90	1
LAGUNA BAJA	356	4.2
LA LOMA	162	1.9
PASO CHICO	220	2.6
GUAMITO	170	2
REGADERO ALTO	56	0.6
REGADERO BAJO	428	5.1
ESPINAL ALTO	403	4.8
ESPINAL BAJO	189	2.2
POTREROS	164	1.9
LLANADAS	56	0.6
PURNIA	975	11.7
CASCO URBANO	1247	15

Fuente: plan de ordenamiento territorial municipio de los santos

Tabla 19. Veredas y distribución de población municipio de Cepita

NOMBRE VEREDA	TOTAL DE POBLACIÓN	
	Hab.	%
CENTRO	461	24.01
COSCUA	47	2.45
EL AMARGOSO	105	5.47
EL CONDE	42	2.19
EL LAUREL	148	7.71
EMBUDO	77	4.01
LA AGUADA	192	10.00
LA CHORERA	79	4.11
LLANADAS	49	2.55
MIRAFLORES	41	2.14
PESCADITO	249	12.97
RODALITO	96	5.00
SAN FRANCISCO	210	10.94
SAN MIGUEL	124	6.46

Fuente: sitio oficial Gobernación de Santander (www.cepita-santander.gov.co)

- **Zona de influencia estación aeropuerto Palonegro**

Tabla 20. Distribución poblacional municipio de Lebrija

NOMBRE VEREDA	TOTAL DE POBLACIÓN		
	HOMBRES	MUJERES	%
CABECERA	6952	7141	45.48
RURAL	9238	7653	54.52
TOTAL	16190	14794	100

Fuente: Plan de desarrollo 2008-2011

Tomando un promedio de 3 personas por vivienda, en la tabla 20 se tiene un cálculo estimado de la cantidad de aerogeneradores ENERCON E-82 para abastecer la demanda de energía de cada una de las zonas mencionadas anteriormente

Tabla 21. Cantidad de aerogeneradores necesarios para suplir la demanda de energía eléctrica la zona rural de 3 diferentes municipios

Estación de referencia	Municipio	Altura cubo (m)	numero habitantes	numero de viviendas
cañón del Chicamocha	CEPITA	80	1920	640
		140	1920	640
	LOS SANTOS	80	7036	2345
		140	7036	2345
aeropuerto Palonegro	LEBRIJA	80	9238	3079
		140	9238	3079
Estación de referencia	kWh/mes demanda	Numero de aerogeneradores necesarios		
cañón del Chicamocha	112768.0	1		
	112768.0	1		
	413247.7	2		
	413247.7	2		
aeropuerto Palonegro	542578.5	3		
	542578.5	2		

## **10. ANÁLISIS COSTO BENEFICIO**

Las consecuencias provocadas por la energía eólica tienen efectos localizados y reversibles, que se pueden superar mediante soluciones técnicas y no representan un peligro serio para el medio ambiente, a diferencia de las fuentes tradicionales de energía, cuyos impactos suelen ser generales, permanentes y costosos en su eliminación.

El análisis costo beneficio se divide en tres grandes grupos, económico, social y tecnológico, y ambiental. Estos grupos se analizan en la siguiente sección.

### **10.1 DESDE EL PUNTO DE VISTA ECONÓMICO**

El costo de la unidad de energía (kWh) producida en instalaciones eólicas se deduce de un cálculo bastante complejo. Para su evaluación se deben tener en cuenta diversos factores entre los cuales se destacan:

1. El costo inicial o inversión inicial. El costo del aerogenerador representa aproximadamente el 60 a 70% de la inversión total. En Europa, el costo medio de una central eólica es de 1,000 Euros por kW de potencia instalada, lo que puede variar desde 1,250 €/kW para máquinas con unos 150 kW de potencia, hasta 880 €/kW para máquinas de 600 kW;
2. Debe considerarse la vida útil de la instalación (aproximadamente 20 años) y la amortización de este costo que en el caso de las energías renovables donde el mercado es nuevo e inestable por razones políticas y económicas en forma local o global. Pero en los últimos años El periodo de amortización de la tecnología para la explotación de las fuentes de energías renovables ha bajado bastante debido a las ayudas económicas de los estados por eso hay mayor interés en invertir en este sector.

Según las estadísticas de las granjas eólicas alrededor del mundo se calcula que su tiempo de amortización está entre 7 a 10 años dependiendo del tipo de tecnología.

3. Los costos financieros para el proyectista.

4. Los costos de operación y mantenimiento (pueden variar entre 1% y 3% de la inversión).

En Colombia el único proyecto de este tipo que se ha construido y del cual se tienen datos es el del parque eólico Jepirachí. Por este motivo se ha tomado este parque como base y se hace aquí el análisis comparativo de costo beneficio para un proyecto de esta índole en Santander-Colombia.

Los aspectos principales a ser analizados serán el costo de instalación así como el de administración operación y mantenimiento vs costo kilovatio hora (kWh) generado, anexándole a esto los beneficios ambientales, comparando estos resultados con el costo de otros proyectos de generación de energía eléctrica, como en el caso de las hidroeléctricas.

Colombia tiene un potencial estimado de energía eólica de 21GW solamente en el departamento de la Guajira (lo suficiente para satisfacer casi dos veces la demanda nacional de energía). Sin embargo, el país solamente ha instalado 19.5MW en energía eólica, explotando 0.4% de su potencial teórico.

En el parque Jepirachí tuvo una inversión total de 27.8 millones de dólares con un costo aproximado de 1.400 US\$/kW instalado, en valor presente del año 2006 con costos anuales de administración operación y mantenimiento (AOM) del 2% de la inversión, costos de producción US\$ 0,026 / kW-h para el año 2010 ( $V=7,5$  m/s) y una capacidad instalada de 19,5 MW.

Comparado con un proyecto hidroeléctrico desarrollado por la empresa de energía ISAGEN sobre el río Sogamoso, para el cual se calcula un costo de 1.007,89

millones de dólares (diciembre de 2005) con un costo de 1.259,86 US\$/kW y costo de producción de 35.2 US \$MWh.

Es evidente que desde la etapa de construcción el costo de un parque eólico es inferior al de un proyecto hidroeléctrico

En la islas de san Andrés y Old Providence en el 2005 se realizó un análisis preparatorio para el suministro de energías sostenibles en las mismas; en este informe se estudian los costos de producción de kWh convencionales frente al producido por molinos de viento, resultando los últimos notablemente mas bajos, con un valor en pesos colombianos de \$161 kWh frente al generado por planta de carbón, motor diesel, turbina de gas, y motor diesel con turbina de gas, siendo estos \$268.14 kWh, \$300 kWh, \$168 kWh, \$172 kWh respectivamente.[22]

En el anexo C se presenta una tabla tomada del informe se comparan costos de capital y de instalación así como de operación y mantenimiento de las diferentes opciones de generación.

Varios estudios y especialmente el realizado por al fundación Cajamar en España estima los costes totales de construcción de un parque eólico onshore, las turbinas representan en torno a un 70%, es decir, absorben la mayor parte de la inversión. Los costes de construcción junto con los de conexión a la red de infraestructuras eléctricas representan la segunda partida más importantes, de media un 20% [23]

Dado que el costo del equipo de aerogeneración es significativamente alto en un proyecto eólico, no es necesario hacer un estudio de costos para las zonas estudiadas en este trabajo que al no requerir obras civiles de gran envergadura como en proyectos hidroeléctricos o termoeléctricos, los costos de construcción y operación no varía de manera importante de una región a otra, por esto es suficiente con analizar el caso europeo; donde la energía eólica ha demostrado ser altamente competitiva [23] y mas concretamente los dos ejemplos locales; el ya construido, parque eólico Jepirachí en la guajira y el estudio GTZ en san

Andrés y Old Providence donde se demuestra la alta competitividad de la energía eólica como opción de generación eléctrica en Colombia. [22]

## 10.2 DESDE EL PUNTO DE VISTA SOCIAL Y TECNOLÓGICO

- **Parque eólico:** Es un proyecto que abre inmensas posibilidades de desarrollo industrial a nivel nacional de equipos o partes y que involucra además a la comunidad científica y académica, porque propiciará la vinculación de grupos de investigación y el desarrollo de nuevos programas académicos, además de que estimulará otras investigaciones asociadas y planteará recomendaciones sobre transferencia y adaptaciones tecnológicas.[27]

Los aerogeneradores se pueden ubicar dependiendo de las características del viento en zonas donde no afecten la población, debido a su nula necesidad del recurso hídrico para su funcionamiento, pueden disponerse emplazamientos en zonas áridas o no usadas para la agricultura ni la ganadería, lo cual reduce significativamente el impacto en la población local además de que no se requiere de canteras de explotación ni de zonas de inundación, como en el caso de las hidroeléctricas, [24]

- **Hidroeléctrica:** el principal impacto se genera en las pequeñas comunidades resguardos indígenas, los cuales pierden en algunas ocasiones gran parte de su territorio, el cual muchas veces más que ser valioso económicamente tiene un gran valor cultural y espirituales, como ejemplo se tiene el caso de particular de Hidrosogamoso se necesitó reubicar 900 habitantes y proyecto Urrá en el año 2000 el cual ocupó 417 hectáreas del resguardo indígena del Parque Nacional Paramillo, ubicado

entre los departamentos de Antioquia y Córdoba; lo cual obligo a reubicar comunidad y adicionalmente se le hizo la entrega 12 mil hectáreas.[25]

- **Termoeléctricas:** no existe un fuerte impacto social como en el caso de las hidroeléctricas que requieren de grandes zonas de inundación, pero la contaminación generada, deteriora gravemente la calidad del aire, lo cual se acentúa más cuando el principal combustible utilizado es carbón, estos factores han sido motivo de protestas como el caso Chile de como grandes movimientos ciudadanos de protesta en contra de la instalación de este tipo de plantas cerca de sus ciudades o de reservas naturales.[26]

### **10.3 DESDE EL PUNTO DE VISTA AMBIENTAL**

#### **10.3.1 Durante la construcción**

Impactos ambientales mínimos sobre la cobertura vegetal, el suelo y el aire debido a:

- pocas intervenciones del proyecto sobre el medio y a las características particulares de la zona.
- Se elimina la necesidad de realizar excavaciones para extracción del material y de represamiento de aguas.
- Muy baja producción de gases de efecto invernadero por el tipo de trabajos y equipos utilizados para su instalación.

- La generación de electricidad a partir del viento no produce gases tóxicos, ni contribuye al efecto invernadero, ni a la lluvia ácida. No origina productos secundarios peligrosos como radiación ionizante ni residuos radiactivos. Cada kWh de electricidad generada por energía eólica, en lugar de carbón, evita la emisión de aproximadamente un kilogramo de dióxido de carbono a la atmósfera, si se hubiera generado en una central térmica de gas o carbón. En un año de funcionamiento, un aerogenerador ha producido más energía de la que se utilizó en su construcción.[27]
- **Hidroeléctricas:** Al represar un río y crear una laguna, se cambia profundamente la hidrología y limnología del sistema fluvial. Se producen cambios dramáticos en el flujo, la calidad, cantidad y uso del agua, los organismos bióticos y la sedimentación de la cuenca del río. Los proyectos hidroeléctricos, en particular, tienden a crear cambios importantes en los modelos de flujo del río, aguas abajo, porque se controla el almacenamiento y la descarga del agua según los ciclos de demanda energética, y no los ciclos hidrológicos, a los cuales el medio ambiente ribereño está adaptado [25].
- **Termoeléctricas:** los impactos de la construcción son causados, principalmente, por las actividades de la preparación del sitio: desbroce, excavación, movimiento de tierras, drenaje, dragado o embalse de los ríos y otras extensiones de agua, establecimiento de las áreas de colocación, de préstamo y de relleno, generando devastación y contaminación de las zonas aledañas. [26]

### 10.3.2 Durante operación

- **Parque eólico:** Alteración del paisaje y ruido de las aspas de los aerogeneradores de poca importancia ambiental debido a ausencia de comunidades en el área de influencia directa.

Impactos sobre las aves. Aún sin precisar pero se presume puntual y temporal (ausencia de rutas de aves y altura de vuelo).

Reducción de emisiones de GEI (Gases de efecto invernadero).

- **Hidroeléctricas:** la pesca ribereña, usualmente, se deteriora, debido a los cambios en el caudal del río, la degradación de la calidad del agua, la pérdida de los sitios de desove y las barreras que impiden la migración de los peces. Sin embargo, se crean recursos de pesca en el reservorio, que, a veces, resultan más productivos que los que hubieron, anteriormente, en el río.

En los ríos que tienen esteros que son, biológicamente productivos, los peces y moluscos sufren debido a los cambios en el flujo y la calidad del agua. Las variaciones en el caudal de agua dulce, y, por tanto, en la salinidad del estero, cambia la distribución de las especies y los modelos de reproducción de los peces. Las variaciones en la cantidad de alimentos y el deterioro en la calidad del agua del río, pueden tener efectos profundos para la productividad del estero. Estos cambios pueden tener resultados importantes para las especies marinas que se alimentan o pasan parte de su ciclo vitalicio en el estero, o que son influenciadas por los cambios en la calidad de las áreas costaneras.

El mayor impacto para la fauna se originará en la pérdida de hábitat, que ocurre al llenar el reservorio y producirse los cambios en el uso de la tierra de la cuenca. Pueden ser afectados los modelos de migración de la fauna, debido al reservorio y el desarrollo que se relaciona con este. La caza ilegal y la erradicación de las especies consideradas como plagas agrícolas, tienen un efecto más selectivo. La fauna y las aves acuáticas, los reptiles y los anfibios pueden prosperar gracias al reservorio.

Las partículas en suspensión que trae el río se asientan en el reservorio, limitando su capacidad de almacenamiento y su vida, privando el río de los sedimentos, aguas abajo. Muchas áreas agrícolas de las planicies de inundación han dependido siempre de los limos ricos en alimentos para sostener su productividad. Como el sedimento ya no se deposita, aguas abajo, en la planicie de inundación, esta pérdida de alimentos deberá ser compensada mediante el uso de fertilizantes, para mantener la productividad agrícola. La liberación de las aguas libres de sedimento, relativamente, puede lavar el lecho del río, aguas abajo (que puede ser beneficio, en algunos casos, y perjudicial, en otros) [25].

- **Termoeléctricas:** En el caso de las termoeléctricas convencionales el problema de la contaminación es máximo en el caso de las centrales que utilizan como combustible carbón. Además, la combustión del carbón tiene como consecuencia la emisión de partículas y ácidos de azufre que contaminan en gran medida la atmósfera. En las de fueloil los niveles de emisión de estos contaminantes son menores, aunque ha de tenerse en cuenta la emisión de óxidos de azufre y hollines ácidos. En todo caso, en mayor o menor medida todas ellas emiten a la atmósfera dióxido de carbono, CO<sub>2</sub>. Según el combustible, y suponiendo un rendimiento del 40% sobre la energía primaria consumida, la cantidad de CO<sub>2</sub> aproximada emitida por una central térmica emite por cada kW generado se muestra en la tabla 22 [26].

Tabla 22. Emisiones de CO<sub>2</sub> en kg por jada kW generado

<b>Combustible</b>	<b>Emisión de CO<sub>2</sub> kg/kW</b>
Gas natural	0,44
Fuelóleo	0,71
Biomasa (leña, madera)	0,82
Carbón	1,45

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El factor más importante que determina si es viable o no emplear la energía eólica es el potencial de viento de la región, en este trabajo se determinó que tanto la cuchilla de Palonegro como el cañón del Chicamocha presentan las condiciones necesarias para el aprovechamiento de la energía eólica en la producción de electricidad.

La legislación colombiana no permite que la producción de electricidad usando la energía eólica sea mayor a 20 MW para que centrales de energía alternativa entren al mercado regulado de la bolsa nacional energética, que atiende el sistema interconectado nacional. Lo que es un impedimento para demostrar que tan competitivo es un parque eólico frente a los grandes proyectos hidroeléctricos, los cuales dominan cerca del 80% del mercado energético del país. Aun así con un costo de producción cercano a los US\$ 26 / MW-h (parque eólico Jepirachí) frente 35.2 US \$MWh costo de producción calculado para Hidrosogamoso, la energía eólica demuestra ser mucho más rentable desde el punto de vista económico.

La tecnología de generación impulsada por el poder del viento ha mejorado en las últimas décadas, en este trabajo se demuestra que con un solo aerogenerador Enercon E-82 para una velocidad de viento de 2.67 (m/s) a altura de 10 metros se puede abastecer como mínimo a 406 hogares. Esto demuestra la competitividad de la energía eólica frente a cualquier otro tipo de generación de energía eléctrica.

La Energía Eólica es una de las energías renovables que proceden del sol más barata. El hecho de generar electricidad sin que exista un proceso de combustión, suprime los impactos ambientales originados por los combustibles por su extracción, transformación y combustión, beneficia la atmósfera, la vegetación y la vida animal; solo con la puesta en funcionamiento de un parque eólico de 10 MW

se dejan de emitir a la atmosfera 28.480 Toneladas al año de CO<sub>2</sub>, se evitan grandes embalses, no requiere de grandes estructuras construidas en el sitio de emplazamiento del parque, lo cual lo hace ideal; mas cuando hoy en día el gobierno le apunta al desarrollo sostenible a través de instituciones como el instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas (IPSE).

Se recomienda realizar una minuciosa recolección de datos de velocidades de viento, durante todo el año las 24 del día, valor recomendado para el manual INEA, debido a las posibles variaciones que presenta el recurso eólico.

Hace falta ampliar el registro de vientos en el país, tal es el caso del cañón del Chicamocha donde no existe un registro oficial y detallado de las velocidades del viento, y debido a que se evidencia la presencia velocidades de viento interesantes de más de 7 (m/s), se recomienda que se haga una investigación completa del recurso eólico en este sitio y así poder determinar de forma real y efectiva, el potencial energético de este lugar.

En el caso de que se quiera implementar un parque eólico en cualquiera de las zonas de estudio, debe hacerse un estudio de las rutas migratorias de las aves pues en el continente europeo, varias especies de aves se vieron afectadas al coincidir sus rutas migratorias con los emplazamientos eólicos provocando la muerte a varios individuos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] WALTER HULSHORST ECON INTERNACIONAL. Manual Práctico de evaluación de una instalación de energía eólica a pequeña escala. Madrid
- [2] MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA INSTITUTO DE CIENCIAS NUCLEARES Y ENERGÍAS ALTERNATIVAS INEA. Manual de aplicación de la energía eólica. Colombia - 2006
- [3]. <<http://zafranet.com/energia/hidrocarburos-y-energia-fosil/carbon/>> [en línea] [consulta 30 de Mayo de 2011]
- [4]. <<http://slideshare.net/gloriap/centrales-elctricas-1056690>>.[en línea] [consulta 30 de Mayo de 2011, 1 de Junio de 2011]
- [5].<[http://reesa.org.ar/\\_uploads/flashpaper/03%20FUENTES%20DE%20ENERG+%C3%ACA.swf](http://reesa.org.ar/_uploads/flashpaper/03%20FUENTES%20DE%20ENERG+%C3%ACA.swf)> [en línea] [consulta 1 de Junio de 2011]
- [6].<http://tecnun.es/asignaturas/Ecologia/Hipertexto/07Energ/130EnNuclear.htm> [en línea] [consulta 1 de Junio de 2011].
- [7].<http://tecnun.es/asignaturas/Ecologia/Hipertexto/07Energ/140EnHidroe.htm> [en línea] [consulta 1 de Junio de 2011].
- [8]. Pinilla S., Álvaro. Manual de aplicación de la energía eólica, INEA, 1997.
- [9].<<http://evwind.com/2009/10/04/la-energia-eolica-en-colombia-40-Megavattios-eolicos-instalados-y-un-potencial-desaprovechado-y-poco-estudiado/>> [consulta 1 junio de 2011]
- [10].BOTERO B Sergio, ISAZA C Felipe, VALENCIA Adriana. Evaluation of methodologies for remunerating wind power's reliability in Colombia 2010.Revista Elsevier. Febrero de 2010
- [11].<[http://es.wikipedia.org/wiki/Clima\\_de\\_Colombia](http://es.wikipedia.org/wiki/Clima_de_Colombia)> [en línea] [consulta 3 de Junio de 2011].

- [12].<<http://colombia.travel/es/turista-internacional/informacion-practica/viajar-a-colombia-informacion-y-consejos/antes-de-venir/geografia-colombiana>> [en línea] [consulta 1 junio de 2011]
- [13].<[http://revistafuturos.info/futuros14/energia\\_eolica.htm](http://revistafuturos.info/futuros14/energia_eolica.htm)> [en línea] [consulta 3 de Junio de 2011].
- [14].<<http://aerogeneradores.com/>> [en línea] [consulta 3 de Junio de 2011].
- [15].<[http://opex-energy.com/eólica/tipos\\_aerogeneradores.html](http://opex-energy.com/eólica/tipos_aerogeneradores.html)>
- [16]. < <http://alcaldiadepiedecuesta.gov.co>> [en línea] [consulta 3 de Junio de 2011].
- [17]. <<http://www.lossantos-santander.gov.co>> [en línea] [consulta 6 de Junio de 2011].
- [18]. <<http://www.aratoca-santander.gov.co>> [en línea] [consulta 1 de Junio de 2011].
- [19]. Jordi Segalés Torras. Diseño, calculo y verificación de una aerogenerador marino con fondeo TLP 2011.
- [20]. SHATA AHMED Ahmed. Wind energy as a potential generation source at RasBenas, Egypt. Revista Elsevier. Marzo de 2010
- [21].UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, facultad de ciencias, departamento de física, Determinación del consumo final de energía en los sectores residencia, urbano y comercial y determinación de consumos para equipos domésticos de energía eléctrica y gas. 11 de junio de 2006. Resumen ejecutivo
- [22]. UNIVERSIDAD DE FRIBURGO EN BREISGAU Instituto de Política Forestal y Ambiental Departamento de Política de Usos del Suelo Nacional e Internacional, Análisis preparatorio para el suministro de energía sostenible en las islas Colombianas San Andrés y Old Providence. 2005
- [23].FUNDACIÓN CAJAMAR. Energía eólica,Evolución y perspectivas. Informe. España julio 2010

- [24]. GAMBOA BALBÍN C. y CUETO LA ROSA V., MATRIZ ENERGÉTICA EN EL PERÚ Y ENERGÍA RENOVABLES. Lima, Friedrich Ebert Stiftung derechos ambientales y recursos ambientales, 2011. 76p.
- [25].EMPRESAS PUBLICAS DE MEDELLÍN-estudio de impacto ambiental del proyecto hidroeléctrico porce iii. volumen 10 de 12. 2002
- [26].GRUPO ISOLUXCORSAN Y OTROS – u.t.e. estudio de impacto ambiental central termoeléctrica a carbón rio turbio, santa cruz 2006
- [27].ISAGEN -estudio de impacto ambiental proyecto parque eólico en el cabo de la vela. 2008

## ANEXO A

### CARACTERÍSTICAS DE CADA UNO DE LOS AEROGENERADORES ENERCON MENCIONADOS EN EL ESTUDIO.

- Aerogenerador ENERCON E-33

Tabla 23. Características aerogenerador ENERCON E-33/330kW

ENERCON E-33	
Potencia nominal	330 kW
diámetro rotor (m)	33.4
altura cubo (m)	37 - 50
numero de aspas	3
Velocidad (rpm)	18 - 45
velocidad de arranque (m/s)	3
velocidad de corte (m/s)	28 - 34

Tabla 24. Potencia en función de la velocidad ENERCON E-33/330kW

ENERCON E33	
velocidad viento (m/s)	POTENCIA kWh
1	0.0
2	0.0
3	5.0
4	13.7
5	30.0
6	55.0
7	92.0
8	138.0
9	196.0
10	250.0
11	292.8
12	335.0
13	335.0
14	335.0
15	335.0

ENERCON E33	
velocidad viento (m/s)	POTENCIA kWh
16	335.0
17	335.0
18	335.0
19	335.0
20	335.0
21	335.0
22	335.0
23	335.0
24	335.0
25	335.0

- Aerogenerador ENERCON E-44

Tabla 25. Características aerogenerador ENERCON E-44/900kW

ENERCON E-44	
Potencia nominal	900 kW
diámetro rotor (m)	44
altura cubo (m)	44 - 55
numero de aspas	3
Velocidad (rpm)	12 - 34
velocidad de arranque (m/s)	3
velocidad de corte (m/s)	28 - 34

Tabla 26. Potencia en función de la velocidad ENERCON E-44/900kW

ENERCON E44	
velocidad viento (m/s)	POTENCIA kWh
1	0.0
2	1.4
3	8.0

ENERCON E44	
velocidad viento (m/s)	POTENCIA kWh
4	24.5
5	30.0
6	96.0
7	156.0
8	238.0
9	340.0
10	466.0
11	600.0
12	710.0
13	790.0
14	850.0
15	880.0
16	905.0
17	910.0
18	910.0
19	910.0
20	910.0
21	910.0
22	910.0
23	910.0
24	910.0
25	910.0

- Aerogenerador ENERCON E-48

Tabla 27. Características aerogenerador ENERCON E-48/800kW

ENERCON -E-48	
Potencia nominal	800 kW
diámetro rotor (m)	48
altura cubo (m)	50 - 76
numero de aspas	3
Velocidad (rpm)	16 -30
velocidad de arranque (m/s)	3
velocidad de corte (m/s)	28 - 34

Tabla 28. Potencia en función de la velocidad ENERCON E-48/800kW

ENERCON E48	
velocidad viento (m/s)	POTENCIA kWh
1	0.0
2	2.0
3	12.0
4	32.0
5	66.0
6	120.0
7	191.0
8	284.0
9	405.0
10	555.0
11	671.0
12	750.0
13	790.0
14	810.0
15	810.0
16	810.0
17	810.0
18	810.0
19	810.0
20	810.0
21	810.0
22	810.0
23	810.0
24	810.0
25	810.0

- Aerogenerador ENERCON E-53

Tabla 29. Características aerogenerador ENERCON E-53/800kW

ENERCON -E-53	
Potencia nominal	800 kW
diámetro rotor (m)	52.9
altura cubo (m)	60 - 73
numero de aspas	3
Velocidad (rpm)	12 - 29
velocidad de arranque (m/s)	3
velocidad de corte (m/s)	28 - 34

Tabla 30. Potencia en función de la velocidad ENERCON E-53/800kW

ENERCON E53	
velocidad viento (m/s)	POTENCIA kWh
1	0.0
2	2.0
3	14.0
4	38.0
5	77.0
6	141.0
7	228.0
8	336.0
9	480.0
10	645.0
11	744.0
12	780.0
13	810.0
14	810.0
15	810.0
16	810.0
17	810.0

ENERCON E53	
velocidad viento (m/s)	POTENCIA kWh
18	810.0
19	810.0
20	810.0
21	810.0
22	810.0
23	810.0
24	810.0
25	810.0

- Aerogenerador ENERCON E-70

Tabla 31. Características aerogenerador ENERCON E-70/2300kW

ENERCON -E-70	
Potencia nominal	2300 kW
diámetro rotor (m)	71
altura cubo (m)	57 - 113
numero de aspas	3
Velocidad (rpm)	6 - 21.5
velocidad de arranque (m/s)	3
velocidad de corte (m/s)	28 - 34

Tabla 32. Potencia en función de la velocidad ENERCON E-70/2300kW

ENERCON E70	
velocidad viento (m/s)	POTENCIA kWh
1	0.0
2	2.0
3	18.0
4	56.0

ENERCON E70	
velocidad viento (m/s)	POTENCIA kWh
5	127.0
6	240.0
7	400.0
8	626.0
9	892.0
10	1,223.0
11	1,590.0
12	1,900.0
13	2,080.0
14	2,230.0
15	2,300.0
16	2,310.0
17	2,310.0
18	2,310.0
19	2,310.0
20	2,310.0
21	2,310.0
22	2,310.0
23	2,310.0
24	2,310.0
25	2,310.0

- Aerogenerador ENERCON E-88

Tabla 33. Características aerogenerador ENERCON E-82/200kW

ENERCON E-82	
Potencia nominal	2000 kW
diámetro rotor (m)	82
altura cubo (m)	78 - 138
numero de aspas	3
Velocidad (rpm)	6 - 19.5
velocidad de arranque (m/s)	3
velocidad de corte (m/s)	28 - 34

Tabla 34. Potencia en función de la velocidad ENERCON E-82/2000kW

ENERCON E82	
velocidad viento (m/s)	POTENCIA kWh
1	0.0
2	3.0
3	25.0
4	174.0
5	321.0
6	532.0
7	815.0
8	1,180.0
9	1,612.0
10	1,890.0
11	2,000.0
12	2,050.0
13	2,050.0
14	2,050.0
15	2,050.0
16	2,050.0
17	2,050.0
18	2,050.0
19	2,050.0
20	2,050.0
21	2,050.0
22	2,050.0
23	2,050.0
24	2,050.0
25	2,050.0

## ANEXO B

### CIMENTACIONES

La cimentación de un aerogenerador se dimensiona principalmente en función de las magnitudes de las cargas que la estructura deba soportar y de las características geotécnicas del terreno. La cimentación que más se utiliza para los aerogeneradores son las zapatas aisladas cuando la resistencia del suelo es competente bajo las cargas que transmite la estructura, estas pueden llegar a tener una dimensión de 15 a 20 m de lado y de 1 a 2 m de alto, estas también se debe diseñar para un efecto de vuelco que es producido por la fuerza del viento, además se debe considerar en el diseño que dichas cargas no superen los esfuerzos máximos del terreno.

En el diseño de la cimentación se debe tener un especial cuidado en el detalle de la unión entre la virola de la base de la torre y la armadura de acero de refuerzo de la cimentación la cual debe tener una buena transmisión de las cargas. Cuando la resistencia a esfuerzos es menor a la requerida por la estructura se hace con cimentación profunda como la utilización de pilotes ya que con estos se busca que la carga llegue a una capa de suelo más resistente.

Ejemplo del proceso constructivo de una cimentación de zapata aislada de 20x20x2 metros:

- Se hace el replanteo.
- Limpieza y descapote.
- Excavación del agujero de 20x20x2,1 y excavación de drenaje por donde pasaran los cables de puesta a tierra.
- Nivelación.
- Vertimiento de una capa de mortero de limpieza de espesor de 10 cm.
- Colocación de la parrilla inferior encima de soportes para asegurar el recubrimiento.
- Colocación de la virola y colocación de acero de refuerzo de la zapata.
- Encofrado de la zapata y vertimiento del concreto.



Figura 12. Excavación para la cimentación



Figura 13. Nivelación de la cimentación para emplazamiento de la torre



Figura 14. Colocación de la parrilla inferior y de la virola



Figura 15. Colocación de acero de refuerzo entre la cimentación y la virola



Figura 16. Colocación de la parrilla superior



Figura 17. Encofrado de la cimentación



Figura 18. Virola con la instalación de tubo corrugado por donde pasaran los cables.



Figura 19. Cimentación terminada



Figura 20. Excavación para proteger los cables que conducirán la energía eléctrica al transformador

## ANEXO C

Tabla 35. Comparativo de costos de las opciones de implementación de distintos sistemas para el suministro de energía en San Andrés y Old Providence

	Unidad	Línea Base	Planta de Carbón	Motor diesel/Diesel
<b>Capacidad total instalada</b>	kW	2.10.000 3*10.000 (providencia)	2*20.000	2*10.000
<b>Costos de capital e instalación</b>	U\$/kW	1.3	4.680	1.600
<b>costos de operación y mantenimiento</b>	U\$/kWh	0.08	0.00124	0.015
<b>Eficiencia (HeatRate)</b>	Btu/kWh		10000	10500
<b>Costos de la fuente primaria de energía</b>	U\$/MBtu	8.3	1.5	8.3
<b>Vida útil</b>	años		40	20
<b>Factor de operación (horas operación/año/8760)</b>			0.7	0.85
<b>amortización</b>	Años	15	15	15
<b>Intereses</b>	%	0.1	0.1	0.1
<b>CFR. (factor de recuperación de capital)</b>		0.131	0.131	0.131
<b>Costos de capital e instalaciones/ kWh</b>	U\$/kWh	0.082	0.1	0.028
<b>Costos de la fuente primaria de energía / kWh</b>	U\$/kWh	0.087	0.015	0.087
<b>Costos totales /kWh</b>	U\$/kWh	0.169	0.117	0.13
<b>Costos en pesos</b>	Col\$	<b>\$338.70</b>	<b>\$268.14</b>	<b>300</b>
<b>Tasa de cambio 2005</b>	Col\$/U\$		<b>\$2'300.00</b>	

	<b>Turbina de Gas/Gas natural</b>	<b>Motor Diesel/ Gas natural</b>	<b>Energía Eólica</b>
<b>Capacidad total instalada</b>	2*10.000	2*10.000	10.000(SAI) 3.000(providencia)
<b>Costos de capital e instalación</b>	2.080	1.600	1.400
<b>costos de operación y mantenimiento</b>	0.005	0.015	0.01
<b>Eficiencia (HeatRate)</b>	10500	10500	
<b>Costos de la fuente primaria de energía</b>	3	3	0
<b>Vida útil</b>	20	20	25
<b>Factor de operación (horas operación/año/8760)</b>	0.85	0.85	0.35
<b>amortización</b>	15	15	15
<b>Intereses</b>	0.1	0.1	0.1
<b>CFR. (factor de recuperación de capital)</b>	0.131	0.131	0.131
<b>Costos de capital e instalaciones/ kWh</b>	0.037	0.028	0.06
<b>Costos de la fuente primaria de energía / kWh</b>	0.032	0.032	0
<b>Costos totales /kWh</b>	0.073	0.075	0.07
<b>Costos en pesos</b>	<b>\$168</b>	<b>\$172</b>	<b>\$161</b>
<b>Tasa de cambio 2005</b>	<b>\$2'300.00</b>		

Fuente: Análisis preparatorio para el suministro de energía sostenible en las islas

Colombianas San Andrés y Old Providence. Universidad de Friburgo en Breisgau