



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

***ÁREA DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS
NATURALES NO RENOVABLES.***

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA.

“Diseño e implementación de un sistema de generación eléctrica con un aerogenerador para la vivienda rural sostenible de interés social del AEIRNNR.”

*TESIS DE GRADO PREVIO A
OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTROMECAÁNICO*

AUTORES:

TLGO. MARLON GUSTAVO MUÑOZ GUZMÁN.

TLGO. BLADIMIR ALEJANDRO VÁSQUEZ MINCHALA.

DIRECTOR:

ING. JORGE LUIS MALDONADO CORREA, Mg. Sc.

LOJA-ECUADOR

2013

CERTIFICACIÓN

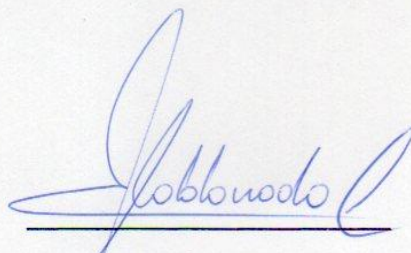
Ing. Jorge Luis Maldonado Correa. Mg. Sc.

DIRECTOR DE TESIS.

CERTIFICA:

Haber dirigido, asesorado, revisado y corregido el presente trabajo de tesis de grado, en su proceso de investigación cuyo tema versa en **“Diseño e implementación de un sistema de generación eléctrica con un aerogenerador para la vivienda rural sostenible de interés social del AEIRNNR”**, previa a la obtención del título de Ingeniero Electromecánico, realizado por los señores egresados: Bladimir Alejandro Vásquez Minchala y Marlon Gustavo Muñoz Guzmán, la misma que cumple con la reglamentación y políticas de investigación, por lo que autorizo su presentación y posterior sustentación y defensa.

Loja, 28 de enero de 2013



Ing. Jorge Luis Maldonado Correa, Mg. Sc.

DIRECTOR DE TESIS

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

YO, Marlon Gustavo Muñoz Guzmán y Bladimir Alejandro Vásquez Minchala, declaro ser autor del presente trabajo de tesis y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos o acciones legales, por el contenido de la misma.

Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi tesis en el Repositorio Institucional Biblioteca Virtual.

Marlon Gustavo Muñoz Guzmán

Bladimir Alejandro Vásquez Minchala

Cédula: 1102640487

Cédula: 1103246730

Fecha: Loja, 17 de mayo de 2013

PENSAMIENTO

“Cada trabajo es importante y lo que yo hago, no lo puedes hacer tú, de la misma manera que yo no puedo hacer lo que tú haces. Pero cada uno de nosotros hace lo que Dios le encomendó”

DEDICATORIA

Con afecto a mis queridos padres, quienes me enseñaron a ser una persona responsable y trabajadora a mi querido nieto que me inspiro a superarme, y muy especialmente a mi esposa, a mis hijas que supieron brindar el apoyo para la culminación de esta etapa de mis estudios

Marlon Gustavo Muñoz Guzmán

Con cariño a mis padres, quienes de una manera especial me animaron y me apoyaron para la realización de este trabajo y a S.O.S que en estos últimos meses me alentó a concluirlo.

Bladimir Alejandro Vásquez Minchala.

AGRADECIMIENTO

Principalmente a Dios que me ha dado salud y sabiduría para hacer las cosas de buena manera, a mis hermanos, especialmente al Director de la tesis y a los directivos del Área de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables.

Marlon Gustavo Muñoz Guzmán

Principalmente a Dios quien me ha regalado la vida, a mis padres, mis hermanos, especialmente al Director de la tesis y a los directivos del Área de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables.

Bladimir Alejandro Vásquez Minchala.

TABLA DE CONTENIDOS

a. TÍTULO.....	10
b. RESUMEN.....	11
c. INTRODUCCIÓN.....	14
d. REVISIÓN DE LITERATURA.....	15
d.1 CAPÍTULO I. <i>Energía Eólica</i>	15
d.1.1 Generalidades.....	15
d.1.2 <i>Energía Eólica en Latino América</i>	17
d.1.3 <i>Ventajas de la energía eólica</i>	18
d.1.4 <i>Inconvenientes de la energía eólica</i>	19
d.1.4.1 Aspectos Funcionales.....	19
d.1.4.2 Aspectos medioambientales.....	21
d.2 CAPÍTULO II. <i>Aspectos técnicos generales del aprovechamiento de la energía eólica</i>	22
d.2.1 <i>Características del viento</i>	22
d.2.2 <i>Aspectos Termodinámicos y de Calor del Viento</i>	25
d.2.3 <i>Vientos Globales: Variación Horizontal</i>	27
d.2.3.1 <i>Vientos de Escala Macro (100 - 10,000 Km)</i>	27
d.2.3.2 <i>Vientos de Escala Media (5 a 200 Km)</i>	27
d.2.3.3 <i>Vientos de Escala Micro (hasta 10 Km)</i>	28
d.2.4 <i>Dirección del Viento</i>	28
d.2.5 <i>Capa Límite</i>	29
d.2.6 <i>Turbulencia del Viento y Obstáculos</i>	33
d.3 CAPÍTULO III. <i>Aspectos generales sobre monitoreo del recurso eólico</i>	35
d.3.1 <i>Ubicación del sistema de medida</i>	35
d.3.2 <i>Sensores para medición de velocidad del viento</i>	36

d.3.2.1 Anemómetro.....	36
d.3.3 <i>Medida de la dirección (veleta)</i>	38
d.3.4 <i>Presentación de datos del viento</i>	39
d.3.4.1 Datos de viento en forma de tablas o series numéricas.....	40
d.3.4.2 Representaciones gráficas.....	41
d.3.5 <i>Aplicación de la estadística a cálculos eólicos</i>	43
d.3.5.1 Medidas de centralización.....	44
d.3.5.2 Medidas de dispersión.....	45
d.3.5.3 Tratamiento estadístico.....	46
d.4 CAPÍTULO IV. <i>Conceptos de diseño, dimensionamiento y selección de aerogeneradores</i>	50
d.5 CAPÍTULO V. <i>Tecnologías</i>	56
d.5.1 <i>Clasificación de las turbinas</i>	56
d.5.2 <i>Componentes del Sistema Tecnológico</i>	58
d.5.2.1 Clasificación.....	58
d.5.2.2 Aplicaciones Típicas.....	58
d.5.2.3 Sistemas de Generación Eléctrica a Gran Escala.....	58
d.5.2.4 Granjas Eólicas.....	59
d.5.2.5 Sistemas Híbridos (Diesel/Eólicos/Fotovoltaicos).....	59
d.5.2.6 Equipos Eólicos Individuales en Fincas y Zonas Rurales.....	59
d.5.2.7 Equipos de Suministro de Energía con Almacenamiento.....	60
d.5.2.8 Otras aplicaciones.....	60
d.5.3 <i>Sistema Eléctrico</i>	60
d.5.4 <i>Control</i>	63
d.6 CAPÍTULO VI. <i>Instalación, operación y mantenimiento</i>	65
d.6.1 <i>Obra Civil</i>	66
d.6.2 <i>Levantamiento</i>	66
d.6.3 <i>Mantenimiento</i>	67
d.6.4 <i>Componentes de instalación</i>	69
d.6.4.1 Batería.....	69
d.6.4.2 Controlador de carga.....	71
d.6.4.3 Inversor.....	73

e. MATERIALES Y MÉTODOS	76
e.1 Materiales	76
e.2 Métodos	80
f. RESULTADOS	83
f.1 Descripción del sitio de emplazamiento y requerimiento del sistema	83
f.2 Partes del sistema de aerogeneración	85
f.3 Dimensionamiento y selección de equipos	87
f.3.1 Dimensionamiento y selección del aerogenerador	87
f.3.1.1 Características del recurso eólico en el sector de emplazamiento	87
f.3.1.1.1 Datos de dirección del viento	88
f.3.1.1.2 Cálculo de potencial eólico (aplicación estadística)	95
f.3.1.1.3 Comprobación del valor de la potencia eólica máxima obtenida	101
f.3.1.2 Dimensiones del aerogenerador	112
f.3.1.3 Selección del aerogenerador	114
f.3.2 Dimensionamiento y Selección del controlador de carga, banco de baterías e inversor	116
f.3.2.1 Controlador de carga	117
f.3.2.2 Banco de baterías	118
f.3.2.3 Inversor	120
f.3.2.4 Otros	121
f.4 Detalle del montaje de equipos	123
g. DISCUSIÓN	126
h. CONCLUSIONES	127
i. RECOMENDACIONES	128

j. BIBLIOGRAFÍA.....	129
k. ANEXOS.....	131

a. TÍTULO.

*“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA
CON UN AEROGENERADOR PARA LA VIVIENDA RURAL SOSTENIBLE DE
INTERÉS SOCIAL DEL AEIRNNR”*

b. RESUMEN.

El presente proyecto de tesis comprende el “*Diseño e implementación de un sistema de generación eléctrica con un aerogenerador para la vivienda rural sostenible de interés social del AEIRNNR*”, el cual tiene la finalidad de aportar con un equipo moderno y eficiente para el aprovechamiento del recurso eólico y que de alguna manera sea un aporte para futuras investigaciones que constantemente emprende la carrera de Ingeniería Electromecánica.

Se ha logrado implementar un equipo versátil y de tecnología actual, compuesto por un aeromotor tripala, un generador multipolos de imanes permanentes, un controlador de carga y descarga, un banco de baterías y un inversor. Todos estos elementos forman un sistema autosuficiente de obtención, acumulación, transformación y suministro seguro de corriente alterna, capaz de solventar energía eléctrica equivalente a 0.9KVA-h/día, lo que representa el 50% del recurso total necesario de la vivienda, consiguiendo implementar además un banco de baterías con capacidad de soporte eléctrico equivalente a un día extra de consumo.

El dimensionamiento se fundamenta en un estudio meteorológico de corto tiempo, el mismo permitió concluir sobre la escasa factibilidad para aprovechamiento de este tipo de recurso, pero a su vez presentar una solución aceptable de implementación del equipo.

El estudio estadístico permitió obtener las características básicas del viento (velocidad y densidad de potencia) y desde el punto de vista académico poner en práctica la metodología de cálculo y dimensionamiento concebida en nuestro proceso de formación ingenieril.

En la fase de implementación se determinó conveniente utilizar un poste de hormigón armado como torre de montaje (11m), ya que este elemento brinda la altura necesaria para aprovechar de manera aceptable el potencial eólico, también, debido a su buena resistencia, bajo costo y alta disponibilidad en el mercado local surgió como una excelente alternativa.

Como parte final del proyecto, se realizó un monitoreo del funcionamiento del aerogenerador en las condiciones del sector, obteniendo resultados moderados, en donde se dedujo que no se aprovecha la capacidad real de los equipos, esto debido a las condiciones no muy favorables del recurso eólico.

La importancia de este proyecto investigativo está en que se implementó un equipo innovador, flexible y amigable con el operador, lo cual optimiza los procesos y recursos sin dejar de lado los aspectos técnicos requeridos y calidad en los resultados.

SUMMARY.

The present thesis project consists of "Design and implementation of a system of power generation with a wind turbine to sustainable rural housing of social interest A.E.I.R.N.N.R."; this project is intended to provide modern and efficient equipment by the use of the wind resource and is a contribution to future research that constantly undertakes the career of Electromechanical Engineering.

This project was implemented by a versatile team and current technology, consisting of a three-bladed wind mill, and a multi pole generator with permanent magnets, a driver for loading and unloading, a battery bank and inverter. All these elements form a self-sufficient system of production, accumulation, processing of a secure supply of alternating bulk flow of electrons capable of solving electricity needs, equivalent to 0.9KVA-h per day, which represents 50% of the total and necessary resource of housing, also, implementing a bank of batteries with a bearing capacity, for electric equivalent to an extra day of consumption. The dimensioning is based on a meteorological short time study, it allowed us to conclude on the limited feasibility for use of this type of resource, but at the same time represent an acceptable solution in implementation of the equipment.

The statistical study allowed for obtaining the basic characteristics of the wind (speed and power density) and from the academic point of view to put into practice the methodology of calculation and dimensioning conceived in our engineering process.

In the implementation phase it was convenient to use a reinforced concrete pole mount (11 m) Tower, since this element gives the height needed to take advantage of the wind potential, too, because of its good resistance, acceptably low cost and high availability in the local market emerged as an excellent alternative.

As the final part of the project was carried out, a monitoring of the operation of the wind turbine, with the conditions of the sector, had only moderate results. It was deducted that the actual capacity of the equipment was not realized, in part, due to not very favorable conditions; the full potential of the equipment could not be realized.

The importance of this research project is to implement an innovative, flexible and user friendly equipment for the operator. This streamlines and optimizes the processes and resources, without leaving out the required technical aspects and quality of the results.

c. INTRODUCCIÓN.

El viento es una fuente de energía de la cual el hombre tiene conocimiento desde épocas muy antiguas, aunque curiosamente se ha volcado al uso de energías menos sanas. El aprovechamiento del viento hoy puede sustituir en gran parte al combustible fósil, evitar el recalentamiento terrestre y parar la gran emisión de millones de toneladas de dióxido de carbono.

En nuestra ciudad y con el fin de aportar al desarrollo de las Energías Alternativas, se lleva a cabo desde hace varios años el proyecto Eólico Villonaco, el que en la actualidad se encuentra en su fase terminal, lográndose cumplir una realidad muy importante y grata para todos los habitantes de la provincia de Loja y el país.

Este antecedente de emprendimiento en la región Sur del país y principalmente en la provincia de Loja, exige establecer bases sólidas para crear sistemas de aprovechamiento eólico no sólo en el Villonaco, sino en cualquier parte de nuestra ciudad y provincia, ya que al contar con las nuevas tecnologías, se hace imprescindible conocer adecuadamente los sistemas eólicos que presentan características compactas y seguras en cuanto al aprovechamiento, generación, almacenaje y abastecimiento de energía eléctrica.

Lo anterior en conjunto con la necesidad de acoplar los sistemas a las diversas escalas de demanda y del propio recurso justifica el estudio realizado y los objetivos planteados.

Desde nuestro punto de vista, lo alcanzado en el presente trabajo, es una alternativa aceptable en cuanto a costos de implementación y mantenimiento, ya que los sistemas modernos de aerogeneración son de fácil implementación y operación, esto último, haciendo referencia a que no es difícil capacitar al personal para que quede en condiciones de operar los nuevos sistemas.

d. REVISIÓN DE LITERATURA.

d.1 CAPÍTULO I. *ENERGÍA EÓLICA.*

d.1.1 *Generalidades.*

Es la energía obtenida del viento, es decir, la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire, y que es transmutada en otras formas útiles para las actividades humanas.

En la actualidad, la energía eólica es utilizada principalmente para producir energía eléctrica mediante aerogeneradores. A finales de 2011, la capacidad mundial de los generadores eólicos fue de 238 GW. En Ecuador Continental el primer parque eólico de altura es el Parque Eólico Villonaco, ubicado en la provincia de Loja a 4 km de su capital, específicamente entre los cantones de Loja y Catamayo. Su construcción se realizó en los puntos más altos del cerro Villonaco a una altura aproximada de 2.720 metros sobre el nivel del mar.

Cuenta con un Centro de Interpretación, destinado a acoger a los visitantes que deseen conocer acerca del desarrollo de la energía eólica en Ecuador.

La velocidad del viento promedio anual es de 12m/s, en el parque existen 11 aerogeneradores con una altura de 100 metros.

La energía eólica es un recurso abundante, renovable, limpio y ayuda a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero al reemplazar termoeléctricas a base de combustibles fósiles, lo que la convierte en un tipo de energía verde. Su principal inconveniente es la intermitencia del viento.

La energía del viento está relacionada con el movimiento de las masas de aire que se desplazan de áreas de alta presión atmosférica hacia áreas adyacentes de baja presión, con velocidades proporcionales al gradiente de presión.

Los vientos son generados a causa del calentamiento no uniforme de la superficie terrestre por parte de la radiación solar, entre el 1 y 2% de la energía proveniente del sol

se convierte en viento. De día, las masas de aire sobre los océanos, los mares y los lagos se mantienen frías con relación a las áreas vecinas situadas sobre las masas continentales.

Los continentes absorben una menor cantidad de luz solar, por lo tanto el aire que se encuentra sobre la tierra se expande, y se hace por lo tanto más liviana y se eleva. El aire más frío y más pesado que proviene de los mares, océanos y grandes lagos se pone en movimiento para ocupar el lugar dejado por el aire caliente.

Para poder aprovechar la energía eólica es importante conocer las variaciones diurnas y nocturnas y estacionales de los vientos, la variación de la velocidad del viento con la altura sobre el suelo, la entidad de las ráfagas en espacios de tiempo breves, y valores máximos ocurridos en series históricas de datos con una duración mínima de 20 años. Es también importante conocer la velocidad máxima del viento. Para poder utilizar la energía del viento, es necesario que este alcance una velocidad mínima que depende del aerogenerador que se vaya a utilizar pero que suele empezar entre los 3 m/s (10 km/h) y los 4 m/s (14,4 km/h), velocidad llamada "*cut-in speed*", y que no supere los 25 m/s (90 km/h), velocidad llamada "*cut-out speed*".

La energía del viento es utilizada mediante el uso de máquinas eólicas (o aeromotores) capaces de transformar la energía eólica en energía mecánica de rotación utilizable, ya sea para accionar directamente las máquinas operatrices, como para la producción de energía eléctrica. En este último caso, el sistema de conversión, (que comprende un generador eléctrico con sus sistemas de control y de conexión a la red) es conocido como aerogenerador.



Figura 1. Parque eólico compuesto de varios aerogeneradores.

En la actualidad se utiliza, sobre todo, para mover aerogeneradores. En estos la energía eólica mueve una hélice y mediante un sistema mecánico se hace girar el rotor de un generador, normalmente un alternador, que produce energía eléctrica. Para que su instalación resulte rentable, suelen agruparse en concentraciones denominadas parques eólicos(figura 1).

Un molino es una máquina que transforma el viento en energía aprovechable, que proviene de la acción de la fuerza del viento sobre unas aspas oblicuas unidas a un eje común. El eje giratorio puede conectarse a varios tipos de maquinaria para moler grano, bombear agua o generar electricidad. Cuando el eje se conecta a una carga, como una bomba, recibe el nombre de molino de viento. Si se usa para producir electricidad se le denomina generador de turbina de viento. Los molinos tienen un origen remoto.

d.1.2Energía Eólica en Latino América.

El desarrollo de la energía eólica en Latinoamérica está en sus comienzos, llegando la capacidad conjunta instalada en estos países a los 769 MW (datos de septiembre de 2009). A fecha de 2009, el desglose de potencia instalada por países y su porcentaje sobre el total de cada país es el siguiente:

Tabla 1. Potencial eólico instalado hasta el año 2009 en Latino América.

Brasil	415 MW (0,4%) (Licitado Agosto 2011 1067 MW)
Honduras	102 MW (7,5%)
México	85 MW (0,17%)
Costa Rica	70 MW (2,8%)
Nicaragua	40 MW (5%)
Argentina	29 MW (0,1%)
Uruguay	38 MW (1,4%)(licitado en noviembre de 2010 y agosto de 2011, 300 MW, 150 MW en cada etapa)
República Dominicana	33 MW
Chile	20 MW (0,2%)
Colombia	20 MW (0,1%)
Cuba	7,2 MW (0,05%)
Ecuador	2,4 MW (0,05%)
Perú	0 MW (0%)
Venezuela	0 MW (0%)

Fuente: <http://erenovable.com/gran-crecimiento-de-energia-eolica-en-america-latina/>

d.1.3 Ventajas de la energía eólica.

- ✓ Es un tipo de energía renovable ya que tiene su origen en procesos atmosféricos debidos a la energía que llega a la Tierra procedente del Sol.
- ✓ Es una energía limpia ya que no produce emisiones atmosféricas ni residuos contaminantes.
- ✓ No requiere una combustión que produzca dióxido de carbono (CO₂), por lo que no contribuye al incremento del efecto invernadero ni al cambio climático.
- ✓ Puede instalarse en espacios no aptos para otros fines, por ejemplo en zonas desérticas, próximas a la costa, en laderas áridas y muy empinadas para ser cultivables.
- ✓ Puede convivir con otros usos del suelo, por ejemplo prados para uso ganadero o cultivos bajos como trigo, maíz, patatas, remolacha, etc.
- ✓ Crea un elevado número de puestos de trabajo en las plantas de ensamblaje y las zonas de instalación.

- ✓ Su instalación es rápida, entre 4 meses y 9 meses
- ✓ Su inclusión en un sistema ínter ligado permite, cuando las condiciones del viento son adecuadas, ahorrar combustible en las centrales térmicas y/o agua en los embalses de las centrales hidroeléctricas.
- ✓ Su utilización combinada con otros tipos de energía, habitualmente la solar, permite la auto alimentación de viviendas, terminando así con la necesidad de conectarse a redes de suministro, pudiendo lograrse autonomías superiores a las 82 horas, sin alimentación desde ninguno de los 2 sistemas.
- ✓ La situación actual permite cubrir la demanda de energía en España un 30% debido a la múltiple situación de los parques eólicos sobre el territorio, compensando la baja producción de unos por falta de viento con la alta producción en las zonas de viento. Las técnicas del sistema eléctrico permiten estabilizar la forma de onda producida en la generación eléctrica solventando los problemas que presentaban los aerogeneradores como productores de energía al principio de su instalación.
- ✓ Posibilidad de construir parques eólicos en el mar, donde el viento es más fuerte, más constante y el impacto social es menor, aunque aumentan los costes de instalación y mantenimiento. Los parques offshore son una realidad en los países del norte de Europa, donde la generación eólica empieza a ser un factor bastante importante.

d.1.4 Inconvenientes de la energía eólica.

d.1.4.1 Aspectos Funcionales.- Debido a la falta de seguridad en la existencia de viento, la energía eólica no puede ser utilizada como única fuente de energía eléctrica. Por lo tanto, es indispensable un respaldo en la generación de energía que puede ser alguno de los sistemas tradicionales, dejando de lado las térmicas que por la contaminación que producen al medioambiente se las está tratando de dejar de lado o minimizar su utilización en la generación eléctrica, o se puede utilizar incluso un sistema de generación fotovoltaico.

Además, la variabilidad en la producción de energía eólica tiene como consecuencia:

- ◆ Para evacuar la electricidad producida por cada parque eólico (que suelen estar situados además en parajes naturales apartados) es necesario construir unas líneas de alta tensión que sean capaces de conducir el máximo de electricidad que sea capaz de producir la instalación. Sin embargo, la media de tensión a conducir será mucho más baja. Esto significa poner cables 4 veces más gruesos, y a menudo torres más altas, para acomodar correctamente los picos de viento.

Además, otros problemas son:

- ◆ Técnicamente, uno de los mayores inconvenientes de los aerogeneradores es el llamado hueco de tensión. Ante uno de estos fenómenos, las protecciones de los aerogeneradores con motores de jaula de ardilla se desconectan de la red para evitar ser dañados y, por tanto, provocan nuevas perturbaciones en la red, en este caso, de falta de suministro. Este problema se soluciona bien mediante la modificación de la aparamenta eléctrica de los aerogeneradores, lo que resulta bastante costoso, bien mediante la utilización de motores síncronos aunque es bastante más fácil asegurarse de que la red a la que se va a conectar sea fuerte y estable.
- ◆ Uno de los grandes inconvenientes de este tipo de generación, es la dificultad intrínseca de prever la generación con antelación. Dado que los sistemas eléctricos son operados calculando la generación con un día de antelación en vista del consumo previsto, la aleatoriedad del viento plantea serios problemas. Los últimos avances en previsión del viento han mejorado muchísimo la situación, pero sigue siendo un problema. Igualmente, grupos de generación eólica no pueden utilizarse como nudo oscilante de un sistema.
- ◆ Además de la evidente necesidad de una velocidad mínima en el viento para poder mover las aspas, existe también una limitación superior: una máquina puede estar generando al máximo de su potencia, pero si el viento aumenta lo justo para sobrepasar las especificaciones del aerogenerador, es obligatorio desconectar ese circuito de la red o cambiar la inclinación de las aspas para que dejen de girar, puesto que con viento de altas velocidades la estructura puede resultar dañada por los esfuerzos que aparecen en el eje. La consecuencia

inmediata es un descenso evidente de la producción eléctrica, a pesar de haber viento en abundancia, y otro factor más de incertidumbre a la hora de contar con esta energía en la red eléctrica de consumo.

Aunque estos problemas parecen únicos a la energía eólica, son comunes a todas las energías de origen natural:

- ◆ Un panel solar sólo producirá potencia mientras haya suficiente luz solar.
- ◆ Una central hidráulica de represa sólo podrá producir mientras las condiciones hídricas y las precipitaciones permitan la liberación de agua.
- ◆ Una central mareomotriz sólo podrá producir mientras la actividad acuática lo permita.

d.1.4.2 Aspectos medioambientales.- Generalmente se combina con centrales térmicas, lo que lleva a que existan quienes critican que realmente no se ahorren demasiadas emisiones de dióxido de carbono. No obstante, hay que tener en cuenta que ninguna forma de producción de energía tiene el potencial de cubrir toda la demanda y por otro lado, la producción energética basada en renovables es menos contaminante, por lo que su aportación a la red eléctrica es netamente positiva.

- ◆ Los lugares seleccionados para la instalación de los aerogeneradores coinciden con las rutas de las aves migratorias, o zonas donde las aves aprovechan vientos de ladera, lo que hace que al momento que funcionan los aerogeneradores estas aves y algunos murciélagos mueran al cruzarse por las aspas. Afortunadamente los niveles de mortandad son muy bajos en comparación con otras causas como por ejemplo los atropellos de aves. Actualmente los estudios de impacto ambiental necesarios para el reconocimiento del plan del parque eólico tienen en consideración la situación ornitológica de la zona. Además, dado que los aerogeneradores actuales son de baja velocidad de rotación, el problema de choque con las aves se está reduciendo.
- ◆ El impacto paisajístico (figura 2) es una nota importante debido a la disposición de los elementos horizontales que lo componen y la aparición de un elemento vertical como es el aerogenerador. Producen el llamado *efecto discoteca*: este

efecto aparece cuando el sol está por detrás de los molinos y las sombras de las aspas se proyectan con regularidad sobre los jardines y las ventanas, parpadeando de tal modo que la gente denominó este fenómeno: “efecto discoteca”. Esto, unido al ruido, puede llevar a la gente hasta un alto nivel de estrés, con efectos de consideración para la salud. No obstante, la mejora del diseño de los aerogeneradores ha permitido ir reduciendo el ruido que producen.



Figura 2. Cambio en el paisajístico producido por el Parque eólico en Tehachapi Pass, California.

- ◆ La apertura de pistas y la presencia de operarios en los parques eólicos hace que la presencia humana sea constante en lugares hasta entonces poco transitados. Ello afecta también a la fauna. (WIKIPEDIA, 2010)

d.2 CAPÍTULO II. ASPECTOS TÉCNICOS GENERALES DEL APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA EÓLICA.

d.2.1 Características del viento.

El viento es aire en movimiento y es una forma indirecta de la energía solar. Este movimiento de las masas de aire se origina de un calentamiento desigual de la superficie terrestre, que junto a la rotación de la tierra, crean entonces los patrones globales de circulación. Existen tres componentes del viento que determinan su energía disponible, estos son:

- ✓ La velocidad del viento.
- ✓ La dirección del viento.

- ✓ En menor grado, la densidad del aire.

Respecto a la velocidad del viento, se puede mencionar que la potencia eólica disponible es proporcional al cubo de su velocidad. Un incremento de velocidad de viento en 1 m/s, por ejemplo de 5 a 6 m/s, representa un aumento sustancial en potencia: $5^3 = 125$ contra $6^3 = 216$ (73 % de incremento). Así mismo si la velocidad del viento se duplica, la potencia disponible se incrementa en ocho veces. Es por esto, que lugares con altos niveles de velocidad de viento son preferidos para la evaluación sistemática del recurso, así como para el emplazamiento de Sistemas de Conversión de Energía Eólica. (Miguel, y otros, 2004)

Mientras los patrones globales de circulación determinan el régimen de vientos predominante sobre un país o una amplia región; las características topográficas locales (esto es, formaciones geográficas, vegetación, montañas, valles, etc) pueden marcar una gran diferencia entre un recurso eólico adecuado o inadecuado para su utilización como alternativa energética. Por ejemplo, el viento se acelera al soplar hacia arriba de una colina o montaña; o a través de un valle. También en regiones costeras se experimentan corrientes de viento cuyo patrón varía a lo largo del día (variaciones diurnas).

Aparte de las características topográficas, las obstrucciones en la superficie terrestre afectan la calidad del recurso eólico en una zona. El viento en la atmósfera fluye libre pero su intensidad se ve disminuida y fluye de manera turbulenta al circundar la superficie terrestre y al encontrar a su paso obstáculos, como árboles, construcciones, etc. El nivel de turbulencia adquirido por una corriente de aire tiende a disminuir considerablemente la potencia disponible en el viento, al tiempo que esta turbulencia es proporcional a los tamaños asociados con los obstáculos físicos (Efecto de Capa límite Atmosférica). Una topografía plana, sin obstrucciones, como una pradera o la superficie del océano causa un nivel de turbulencia menor. En contraste, terrenos rugosos con obstáculos (bosques, zonas aledañas a ciudades, etc.) hacen que el viento presente condiciones de extrema turbulencia y generalmente el recurso eólico es pobre. Para poder utilizar esta fuente de energía, en estas circunstancias, implicaría usar torres de Sistemas de Conversión de Energía Eólica más altas para poder extraer energía de una corriente de viento menos turbulenta.

Dado que la velocidad del viento es un factor de primordial importancia, es necesario mencionar que la velocidad del viento se incrementa al ascender a una mayor altura sobre la superficie. El cambio de velocidad con la altura varía de lugar en lugar. En un terreno plano, la velocidad de viento se incrementa en un 10 % al duplicar la altura. Por ejemplo, al tener una velocidad de viento de 5 m/s a la altura de medición meteorológica estándar de 10 metros, la velocidad será de 5,5 m/s a una altura de 20 metros desde la superficie, por lo tanto el nivel de potencia eólica disponible (a 20 metros) se aumenta en un 33 %.

Como se mencionó en párrafos anteriores, ya que la energía eólica es consecuencia de la radiación solar, se encuentra que el patrón de comportamiento de la distribución del viento, comúnmente, presente variaciones diurnas con una correspondencia marcada a los niveles de variación de radiación solar, en la misma escala de tiempo. En una escala de tiempo mayor, es decir variación mensual o estacional, los niveles de variación del régimen de viento están influenciados por los patrones globales de circulación, los cuales se repiten anualmente. Es por esto que en un lugar seleccionado al evaluar su recurso se encuentren patrones repetitivos de variación de la velocidad de viento en todas las escalas de tiempo. Este fenómeno permite evaluar el recurso eólico adecuadamente, con un mínimo de un año de mediciones de velocidad de viento. Con esta información se puede conocer con un alto nivel de confiabilidad, el recurso eólico, su correspondiente nivel de energía disponible y su variabilidad a lo largo del año.

Por otra parte, una fuente de información son los registros de viento realizados por estaciones meteorológicas, esta información debe ser estudiada con extremo cuidado. Muchas veces, el servicio meteorológico recauda informaciones eólicas en medio de las poblaciones con sistemas anticuados (descalibrados) y mal localizadas con respecto al viento. Es por esto, que existe la tendencia a pensar que el recurso eólico es muy bajo en muchas zonas, particularmente zonas rurales, debido a la no existencia de registros por una mala medición del recurso como una fuente energética. Así pues, al estudiar los registros meteorológicos, es típico encontrar en el mejor de los casos, en la mayoría de las estaciones, promedios anuales de velocidad de viento entre 2 y 3 m/s y los cuales quizás no corresponden a la condición real de viento en la región, ya que como se mencionó anteriormente, la colocación de la estación meteorológica y/o el tipo de

registradores no son los más adecuados para medir el recurso eólico. En consecuencia, no se puede planificar ningún tipo de proyecto eólico con base a esta información histórica, a menos que se verifique su precisión, la cual generalmente, es una dificultad adicional. Sin embargo en la actualidad existe información a gran escala y modelos computacionales que permiten evaluar el recurso eólico, ya que al localizar anemómetros para la medición del recurso, el cubrimiento de grandes áreas es impracticable; así, estos modelos permiten estimar el comportamiento del régimen de vientos en regiones amplias con resultados confiables. Estos modelos requieren de información topográfica, parámetros meteorológicos en relación con el microclima de la región de estudio, etc. para predecir adecuadamente el patrón de vientos y su intensidad.

d.2.2 Aspectos Termodinámicos y de Calor del Viento.

El movimiento de las masas de aire se origina por diferencias de temperatura causada por la radiación solar sobre la superficie terrestre, que junto a la rotación de la tierra, crean entonces los, llamados, patrones globales de circulación.

El flujo de energía solar total absorbido por la tierra es del orden de 1017 vatios, que es lo suficiente para 10.000 veces suministrar la tasa total mundial del consumo energético por año. Una pequeña porción del flujo total solar (aproximadamente 1% ó 1015 vatios) se convierte en movimiento atmosférico o viento.

En una escala global las regiones alrededor del ecuador reciben una ganancia neta de energía mientras que en las regiones polares hay una pérdida neta de energía por radiación. Esto implica un mecanismo por el cual la energía recibida en las regiones ecuatoriales sea transportada a los polos.

Las masas de aire caliente en la región ecuatorial ascienden (causando la formación de nubes y de relámpagos) en una banda delgada de alrededor 100 Km. de ancho, llamada la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT). Esta zona se ubica más o menos paralela al ecuador alrededor de la tierra (Ver Figura 3). En la parte superior de la atmósfera estas masas de aire se dividen en dos, una alejándose del ecuador hacia el norte y otra alejándose hacia el sur. Al alejarse del ecuador, el aire se enfría y se vuelve más pesado.

A aproximadamente 30° de latitud Norte y Sur, este aire empieza a descender, causando un clima seco y sin nubes. En estas latitudes es donde se encuentran los grandes desiertos alrededor del mundo.

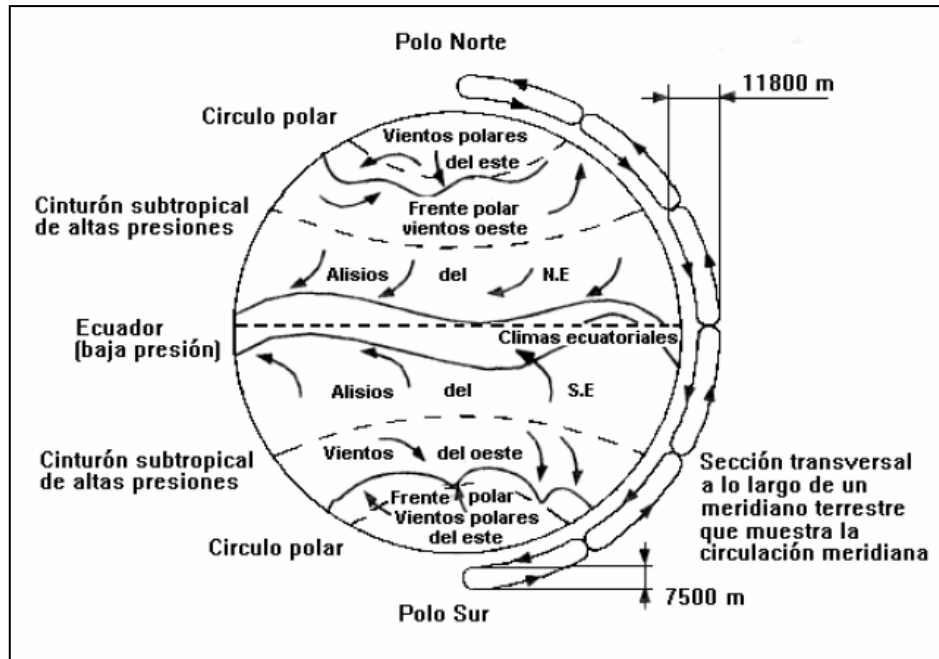


Figura3. Patrón global de Circulación Atmosférica.

A nivel de superficie terrestre, los vientos se devuelven hacia el ecuador como vientos alisios. Debido a la rotación de la tierra su dirección se desvían hacia el oeste en los dos hemisferios norte y sur. Es por esto que la dirección de los vientos alisios es NE y SE (la dirección se determina por la dirección de donde viene el viento y no hacia donde se dirige).

La zona de confluencia intertropical se desplaza hacia al norte del ecuador durante el verano del hemisferio norte y hacia el sur en el invierno. Es muy estable y por esto los vientos alisios son permanentes. Dentro de esta zona, se encuentran vientos de baja intensidad, interrumpidos por un alto nivel de tormentas eléctricas. Al tiempo, se pueden experimentar largos períodos de calma de viento.

En el exterior de la circulación entre los trópicos, vientos del oeste son predominantes. Esta circulación es más bien inestable y se caracteriza por una estructura ondulada y formación de depresiones atmosféricas moviéndose del oeste hacia el este.

Desviaciones del patrón general de circulación de aire en movimiento ocurren debido a la distribución no homogénea de masas de tierra sobre el globo. En promedio, mayor

concentración de masas de tierra se encuentra en el hemisferio norte que en el hemisferio sur. Dado que la masa de tierra se calienta más fácilmente por el sol, que los océanos, la posición promedio de la ZCIT es 5° Norte del ecuador.

d.2.3 Vientos Globales: Variación Horizontal.

d.2.3.1 Vientos de Escala Macro (100 - 10,000 Km).-El flujo de viento originado por la circulación global se conoce como vientos de escala macro. La escala horizontal de movimiento de estos vientos va desde algunos cientos a miles de kilómetros. El viento de escala macro (no perturbado por características de la superficie terrestre excepto por cadenas de montañas) se encuentra en altitudes superiores a los 1,000 metros.

d.2.3.2 Vientos de Escala Media (5 a 200 Km).- Las variaciones de la superficie terrestre con escala horizontal de 10 a 100 kilómetros tienen una influencia en el flujo de viento entre los 100 y 1,000 metros de altura sobre el terreno. Obviamente, la topografía es importante y los vientos tienden a fluir por encima y alrededor de montañas y colinas. Cualquier otro obstáculo (o rugosidad) sobre la superficie terrestre de gran tamaño decelera el flujo de aire. A manera de ejemplo se ilustran dos tipos de vientos de escala media o de naturaleza local como son la brisa marina y los vientos de montaña.

Cerca a las playas se pueden observar los patrones de brisa marina. Durante el día la tierra se calienta más que el agua (mar o lago), el aire sobre la tierra asciende y la brisa marina se desarrolla. Durante la noche, la tierra se enfría a temperaturas menores que la del agua, causando una brisa terrestre. Esta es usualmente más débil que la brisa marina. Otro ejemplo involucra los vientos de valle-montaña. Durante el día, las faldas de las montañas se calientan, el aire asciende y el viento tiende a fluir a través del valle hacia la montaña. Durante la noche, el fenómeno contrario ocurre: aire frío se mueve hacia abajo de la falda de la montaña, forzando el viento a soplar hacia el valle.

En las regiones tropicales vientos térmicos son muy comunes. Estos vientos, los cuales son causados por gradientes de temperatura a lo largo de la superficie terrestre, pueden ser fuertes durante el día, especialmente en regiones desérticas.

d.2.3.3 Vientos de Escala Micro (hasta 10 Km).- En una escala micro, los vientos de superficie (entre 60 y 100 metros de altura sobre el terreno), los cuales son los más interesantes para la aplicación directa de la conversión de la energía eólica, son influenciados por las condiciones locales de la superficie, como la rugosidad del terreno (vegetación, edificios) y obstáculos.

d.2.4 Dirección del Viento.

Un parámetro importante a tenerse en cuenta es la variabilidad del flujo de viento en lo que respecta a su dirección.

La dirección de la velocidad del viento está definida por la dirección de donde sopla el viento (ó más bien de donde proviene), no para donde se dirige. Así pues un viento del Oeste es un viento que se dirige hacia el este viniendo del oeste.

La variabilidad en la dirección del viento se resume en lo que se conoce como La Rosa de los Vientos. Una rosa de los vientos es un diagrama polar que puede ser construido mostrando el porcentaje del tiempo durante el cual el viento ha estado soplando en una dirección específica. El número que aparece en frente de los vectores radiales, comúnmente indican la velocidad promedio del viento en esa dirección específica. Como ejemplo la siguiente figura ilustra un ejemplo de la Rosa de Vientos para el Aeropuerto Camilo Daza de San José de Cúcuta para el mes de Julio (Note los valores promedio de viento para cada dirección).

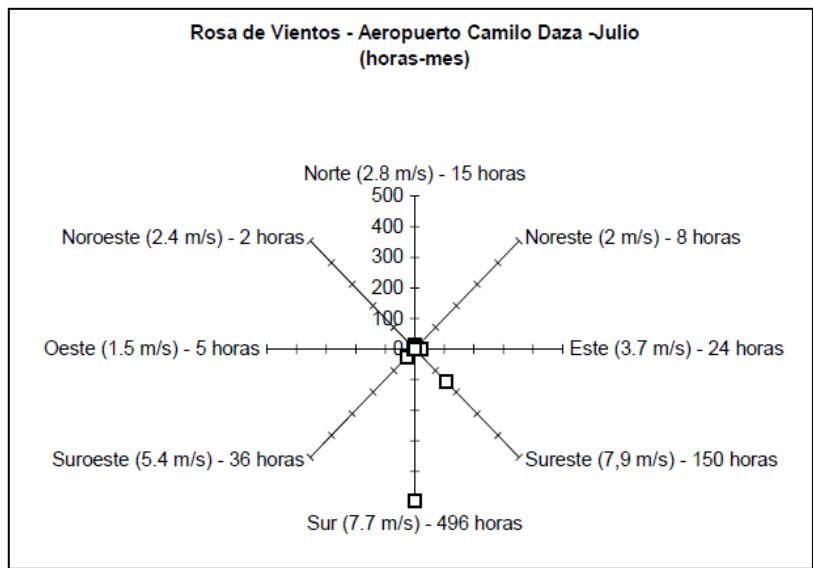


Figura 4. Ejemplo de representación de la velocidad del viento (rosa de los vientos).

La utilidad de la Rosa de los vientos radica en la identificación de las direcciones prevalecientes en las cuales sopla el viento con mayor duración y quizás intensidad.

En la actualidad esta información es muy útil para el emplazamiento y distribución de turbinas eólicas en una granja eólica, ya que la mayoría de ellas se localizan, en fila, para enfrentar la dirección prevaleciente del viento a lo largo del año.

d.2.5 Capa Límite.

El perfil del viento (la velocidad de viento como una función de la altura sobre el terreno) puede ser expresado en una relación matemática sencilla. La forma de este perfil dependerá principalmente de la rugosidad del terreno. La siguiente figura ilustra el comportamiento de perfil de velocidades del viento en función de las características topográficas del terreno.

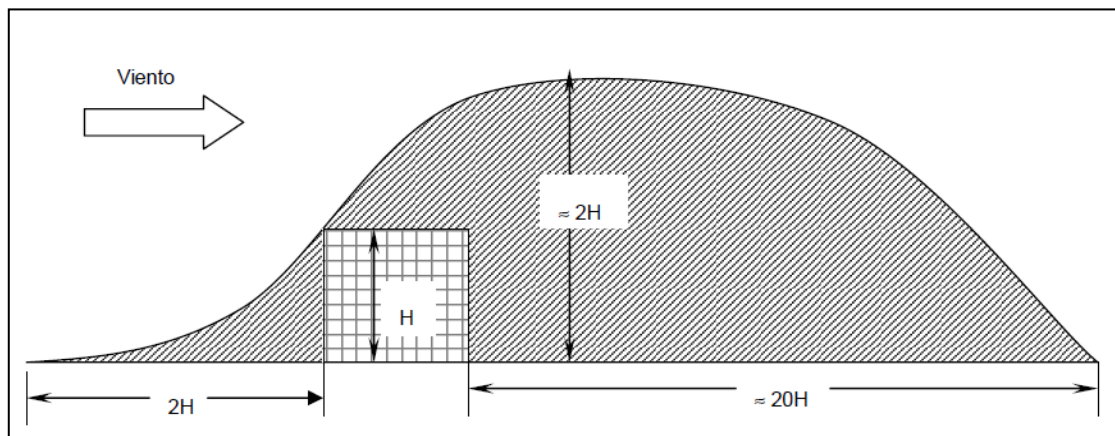


Figura 5. Zona de turbulencia sobre una construcción de altura H .

Para terreno plano y abierto, esto es, libre de obstáculos de gran tamaño y con vegetación de pequeño tamaño relativo, se han desarrollado algunos conceptos generales muy útiles.

A mayor rugosidad (relativo a la altura promedio de los obstáculos), mayor será la deceleración del viento cerca de la superficie. Algunos métodos de clasificación general se han desarrollado para cuantificar esta rugosidad de la superficie. La rugosidad al ser cuantificada en un lugar específico, puede variar en diferentes direcciones; y por lo tanto el perfil de velocidades de viento dependerá de la dirección del viento.

Otro concepto importante es la **velocidad de viento potencial**, que se define como la velocidad de viento que se observaría en un terreno completamente plano y abierto,

típicamente especificado para 10 metros de altura sobre el terreno. La velocidad de viento potencial es básicamente una magnitud de escala media.

Debido a su definición, esta no depende de características de rugosidad locales. A través del perfil para terreno abierto y plano, esta velocidad se relaciona con la velocidad de viento a 60 y 100 metros sobre la superficie del terreno. Esta es la cantidad que típicamente se indica en los mapas eólicos. Siendo esta una cantidad de escala media, es bastante constante a distancias razonable (algunos cuantos kilómetros de distancia horizontal).

Para hallar la velocidad de viento actual (no potencial) en un lugar específico, se deben aplicar correlaciones a la velocidad de viento potencial, la cual dependerá sobre las características de rugosidad del lugar. (URQUIA, 2003)

La superficie terrestre ejerce una fuerza de rozamiento que se opone al movimiento del aire y cuyo efecto es retardar el flujo, por ende disminuir la velocidad del viento. Este efecto retardatorio de la velocidad de viento decrece en la medida que se incrementa la altura sobre la superficie del terreno y de obstáculos en su recorrido. Así pues, a mayor altura sobre la superficie mayor velocidad de viento se podrá experimentar.

Un modelo sencillo para calcular el incremento en la velocidad con respecto a la altura, es la distribución de velocidades en función de la altura y esta sigue una ley exponencial, como sigue:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{h_1}{h_2}^\alpha$$

Ecuación 1

Siendo:

V_1 : La velocidad del viento a la altura h_1 .

V_2 : La velocidad del viento a la altura h_2 .

El coeficiente “ α ” es un parámetro que depende de la topografía del terreno y de las condiciones meteorológicas y se conoce como el coeficiente de rugosidad. Generalmente este parámetro se calcula con base a mediciones de viento. (URQUIA, 2003)

Este coeficiente también se conoce como el exponente de Hellmann que varía con la rugosidad del terreno, y cuyos valores vienen indicados a continuación:

Tabla 2. Valores del exponente de Hellmann en función de la rugosidad del terreno.

Lugares llanos con hielo a hierba	$\alpha = 0,08 \div 0,12$
Lugares llanos (mar, costa)	$\alpha = 0,14$
Terrenos poco accidentados	$\alpha = 0,13 \div 0,16$
Zonas rústicas	$\alpha = 0,2$
Terrenos accidentados o bosques	$\alpha = 0,2 \div 0,26$
Terrenos muy accidentados y ciudades	$\alpha = 0,25 \div 0,4$

Fuente: *Energía Eólica de Pedro Fernández Diez.*

En la siguiente figura se indican las variaciones de la velocidad del viento con la altura según la ley exponencial de Hellmann. (URQUIA, 2003)

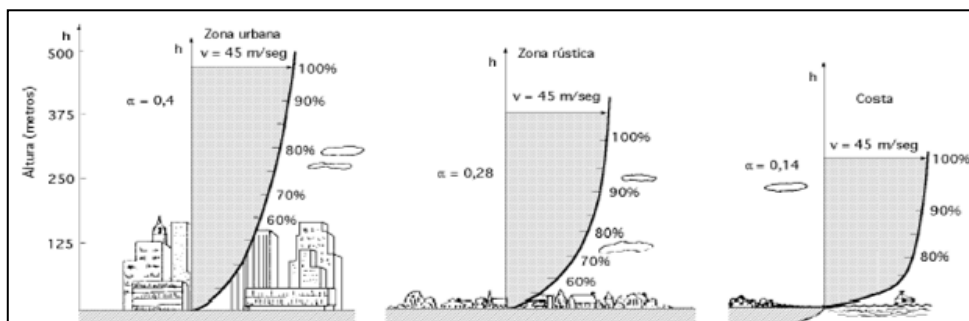


Figura 6. Variaciones de velocidad del viento de acuerdo al tipo de paisaje.

La Organización Meteorológica Mundial recomienda una altura estándar (h_2) de 10 metros para comparación y estimación de los perfiles de velocidad de viento.

Se puede esperar que por ejemplo en áreas urbanas, el perfil de viento (o el cortante de viento) sea grande, así que altas velocidades se obtienen a alturas considerables, mientras que en un terreno plano, el cortante de viento es menor obteniéndose altas velocidades de viento a menores alturas relativas. (FERNANDEZ DIEZ, 2000)

En caso de no existir información medida del perfil de velocidades, para una buena aproximación en terreno plano, libre de obstáculos se puede utilizar el parámetro α equivalente a 0.14 (1/7). Este valor produce valores conservadores del perfil de velocidad pero permite estimar de manera simple la velocidad de viento y así estimar la potencia eólica a diversas alturas.

Dado que la medición meteorológica se realiza a 10 metros de altura, la siguiente tabla, de rápida referencia, ilustra los valores de velocidad de viento promedio que se pueden esperar para mayores alturas sobre el terreno, basado en este modelo sencillo de perfil de velocidades.

Tabla 3. Valores esperados de velocidad de viento a diferentes alturas.

Velocidad de Viento Promedio medida en (m/s) a 10 metros	Velocidad de Viento Promedio Esperada en (m/s)		
	20 metros	40 metros	60 metros
3	3.3	3.7	3.9
4	4.4	4.9	5.2
5	5.5	6.1	6.5
6	6.6	7.3	7.8
7	7.7	8.5	9.0
8	8.8	9.8	10.3
9	9.9	11.0	11.6
10	11.0	12.2	13.0

Fuente: Guía para la utilización de la energía eólica para generación de energía eléctrica.

La utilidad del coeficiente de rugosidad de 0.14 se debe restringir cuando la altura del nivel de referencia (h_2) sea menor a diez veces la altura de la rugosidad o la altura del obstáculo.

Dado que la potencia eólica cambia con el cubo de la velocidad del viento, entonces es posible estimar la variación de la potencia eólica como:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{h_1}{h_2}^{3\alpha}$$

Ecuación 2

Siendo:

P_1 : Potencia eólica específica a la altura de h_1 .

P_2 : Potencia eólica específica a la altura h_2 .

Tabla 4. Valores esperados de Potencia Eólica Específica a diferentes alturas.

Velocidad de Viento en (m/s) 10 metros	Potencia eólica específica en W/m^2	Potencia eólica específica instantánea (W/m^2)		
		20 metros	40 metros	60 metros
3	16	22	29	35
4	39	53	71	85
5	75	101	136	162
6	130	175	236	280
7	206	277	374	444
8	308	415	558	664
9	438	590	794	944
10	600	808	1087	1294

Fuente: Guía para la utilización de la energía eólica para generación de energía eléctrica.

Para **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.

d.2.6 Turbulencia del Viento y Obstáculos.

El viento que incide alrededor de construcciones o superficies muy rugosas presentan grandes cambios, tanto en velocidad como en dirección, esto se conoce como la turbulencia del viento en su expresión más simple. Esta turbulencia disminuye la entrega de potencia de un equipo eólico y puede conducir a vibraciones indeseables cuando el equipo está localizado en cercanías de obstáculos de proporciones similares a la altura de la torre del equipo. La misma situación ocurre cuando el viento incide alrededor de bosques: la turbulencia se siente a una distancia de sotavento (detrás) de al menos entre 15 y 20 veces la altura de los árboles. La región a barlovento (adelante) del obstáculo se extiende por lo menos entre 2 y 5 veces la altura de la obstrucción.

Un método sencillo de detectar la turbulencia y la altura a la cual se extiende, puede ser con el uso de una tira de tela atada a un palo largo o una cometa. El movimiento violento de la tira de tela indica la cantidad de turbulencia. También cuando el viento incide sobre colinas y montañas, se sabe que se alcanzan altas velocidades en la cima debido al efecto de viento cortante, y la cima actúa como una especie de concentrador de viento de la corriente de aire, causando que el viento se acelere. (Ver Figura 7).

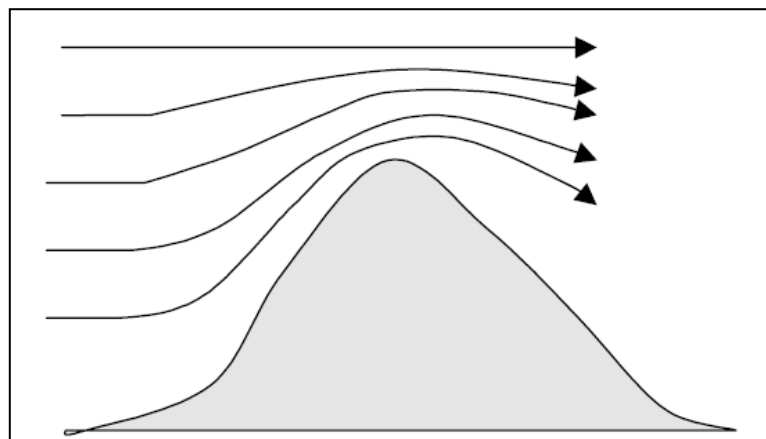


Figura 7. Aceleración del viento sobre una montaña.

Generalmente, es común que el efecto de aceleración del viento se acentúe cuando la inclinación de la montaña es suave y no muy pronunciada. El ángulo de pendiente ideal está cercano a los 15° (30 metros de elevación por cada 100 metros de distancia horizontal, sin embargo ángulos un poco menores son también deseables.

Ángulos de inclinación de la falda de la montaña mayores a los 25° deben evitarse. La orientación de la montaña es preferible que sea perpendicular a la dirección prevaleciente del viento. Cuando se presentan colinas aisladas en el terreno, los efectos de aceleración del viento son menos pronunciados, ya que el viento tiende a soplar alrededor de la colina.

Un indicador cuantitativo de la aceleración es difícil de darse, sin embargo se puede esperar incrementos en la velocidad de hasta en un 20%. (URQUIA, 2003)

d.3 CAPÍTULO III. ASPECTOS GENERALES SOBRE MONITOREO DEL RECURSO EÓLICO.

Los equipos de monitoreo del viento son de diversa índole, desde equipos sencillos contruidos de manera artesanal hasta los más compleja combinación de tecnología.

De forma básica, un equipo de monitoreo del recurso eólico está compuesto por un anemómetro y una veleta, los cuales están montados sobre un mástil a una altura considerable en la cual no se vea perturbada la medición.

d.3.1 Ubicación del sistema de medida.

Como se mencionó, la colocación del conjunto anemómetro y veleta se realiza en un mástil. En el caso de estaciones fijas se sitúa a una altura estándar de 10 m sobre el nivel del suelo a fin de evitar las perturbaciones del mismo sobre el viento. Para evitar los efectos de apantallamiento de la torre del mástil conviene usar un poste cilíndrico delgado, tensado por cables o vientos. En estaciones móviles o semipermanentes se aceptan alturas de 2 a 3 m.

La colocación de los sensores (anemómetro y veleta) debe ser en un lugar; despejado, libre de perturbaciones provocadas por obstáculos próximos, ya que éstos alteran notablemente la velocidad y dirección del viento.

En general un obstáculo de altura h perturba el flujo de aire a una distancia $2h$ a barlovento y de $10h$ a $20h$ a sotavento. En la dirección vertical la perturbación puede alcanzar hasta una altura $2h$ (figura 8).

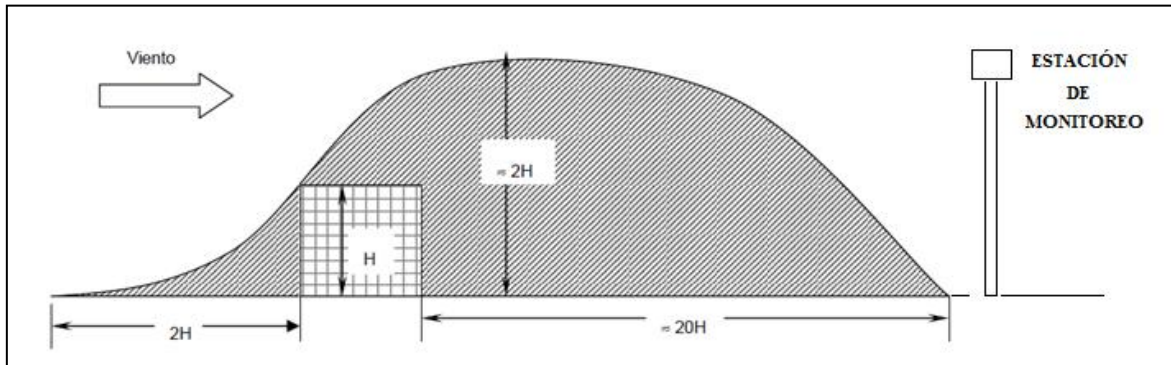


Figura 8. Zona perturbada por un obstáculo.

Por ello conviene situar los sensores lo más alejados de la zona de perturbación. Idealmente, interesaría colocarlos en un lugar despejado cuyo horizonte no presentase obstáculos de altura igual o superior al mástil en un radio de unos 300 m. La colocación de los sensores de medida en zonas urbanas y en la proximidad de edificaciones, bosques o irregularidades del terreno puede provocar distorsiones importantes en las medidas de velocidad y dirección.

Debido a la variación de la velocidad del viento con la altura, en generadores eólicos de gran potencia en los que el buje del generador está a una altura del orden de 50 m, interesa colocar el anemómetro a la misma altura para tener medidas fiables.

d.3.2 Sensores para medición de velocidad del viento.

Son dispositivos que detectan o censan manifestaciones de la velocidad del viento, recibe una señal o estímulo y responde con una señal eléctrica; son equipos pasivos ya que requieren una fuente externa de excitación para la entrega de lecturas de medición.

Para obtener mediciones de alta precisión, necesarias para los sistemas meteorológicos, es fundamental que los sensores sean lo más precisos posible; considerando para su elección las necesidades requeridas incluyendo las condiciones regionales, climáticas y topográficas para su ubicación. (URQUIA, 2003)

La mayoría de los modelos del mercado se basan en el principio de funcionamiento de un anemómetro de paletas que giran a una velocidad proporcional al viento, en donde el límite de velocidad puede ajustarse a través de un potenciómetro u otro sistema.

d.3.2.1 Anemómetro.- Es un equipo meteorológico que se usa para la predicción del tiempo, específicamente para medir la velocidad del viento, en tales instrumentos se recurre, fundamentalmente, a la utilización de alguna de las tres propiedades del viento:

- Su energía cinética que determina la rotación de las cazoletas del aparato.
- Su presión dinámica.
- Su capacidad de producir enfriamiento.

Si el anemómetro está fijo colocado en tierra, entonces medirá la velocidad del viento reinante, pero si está colocado en un objeto en movimiento, puede servir para apreciar la velocidad de movimiento relativo del objeto con respecto al viento en calma.

Para medir la velocidad relativa del viento es necesario utilizar algún proceso físico, en donde su magnitud varíe según una regla fija con respecto a la variación de esa velocidad.

En la práctica entre otros se usan:

- ✓ La variación de velocidad de rotación de una hélice sometida al viento.
- ✓ La fuerza que se obtiene al enfrentar una superficie al viento.
- ✓ La diferencia de temperatura entre dos filamentos calentados por igual, uno sometido al viento y otro en calma.
- ✓ Aprovechando la presión aerodinámica producida en una superficie enfrentada al viento.
- ✓ Otros métodos ultrasónicos o de láser.

Existen diversos tipos:

- ♦ *Anemómetro de rotación:* está dotado de cazoletas o hélices unidas a un eje central, cuyo giro es proporcional a la velocidad del viento; son los más utilizados por su simplicidad y suficiente exactitud para la mayor parte de las necesidades de

medición así como por la relativa facilidad de permitir la medición a distancia. Hay muchos diseños de hélices pero la más común es la hélice de cazoleta, debido a que no es necesario mecanismo alguno para orientar la hélice al viento y su construcción puede ser robusta para soportar grandes velocidades del viento.

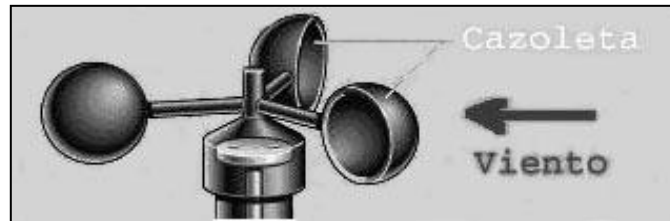


Figura 9. Esquema hélice de cazoletas.

- ♦ *Anemómetro de empuje:* están formados por una esfera hueca y ligera o una pala, cuya posición respecto a un punto de suspensión varía con la fuerza del viento, lo cual se mide en un cuadrante.
- ♦ *Anemómetro de presión hidrodinámica:* Cuando el viento impacta sobre una superficie, en ella se produce una presión adicional que depende de esa velocidad, si esta presión se capta adecuadamente, y se conduce a un instrumento medidor, tendremos un anemómetro de presión.

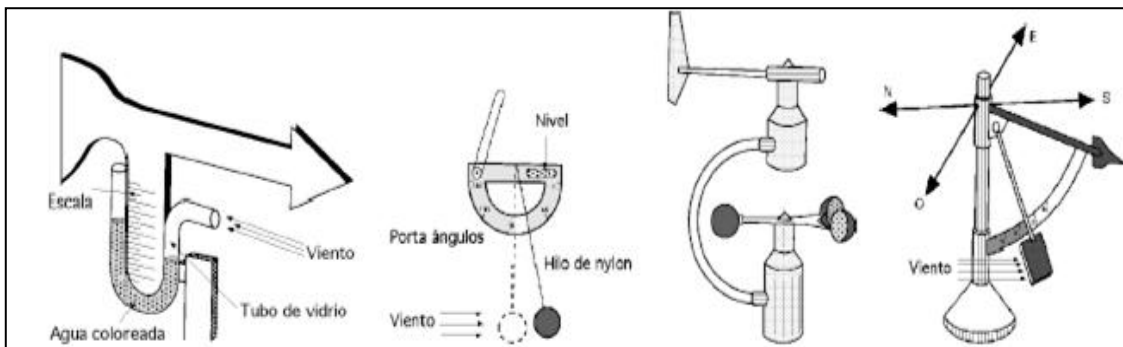


Figura 10. Tipos de Anemómetros.

d.3.3 Medida de la dirección (veleta).

La dirección acostumbra a medirse a través de una veleta (figura 11), que se coloca próxima al anemómetro, instalándose todo el conjunto en la misma torre. Igual que ocurre con la velocidad, la dirección sufre continuas fluctuaciones.

El sistema determina una dirección media, promediando los valores instantáneos durante un periodo igual al usado en el cálculo de la velocidad (generalmente 10 minutos).

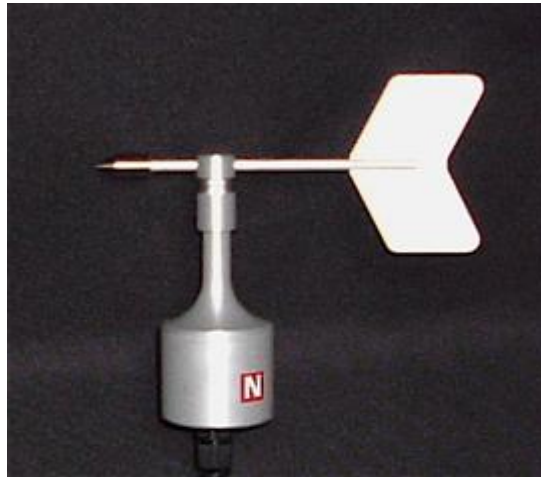


Figura 11. Veleta para la medida de la dirección del viento.

d.3.4 Presentación de datos del viento.

Dadas las características tan dispersas y aleatorias de la energía eólica, la única manera de estudiar si un emplazamiento es adecuado o no, es utilizando la estadística. Para ello se recurre a la representación de la velocidad del viento como una variable aleatoria con una cierta función de distribución.

En el proceso de caracterización del viento intervienen los aspectos que se describen a continuación:

- ◆ Procedimiento de tomas de datos: variables a medir (velocidad), procedimiento de medición, frecuencia de muestreo (frecuencia de toma de medidas), período de promedio, etc.
- ◆ Técnicas de medición: aparatos de medida (anemómetro), colocación del instrumento de medida, etc.
- ◆ Métodos de tratamiento de datos: Técnicas estadísticas, forma de presentación (valores medios horarios, diarios, anuales, histogramas, entre otros).

En general, la evaluación de los recursos eólicos en un lugar, presenta los siguientes problemas:

- ◆ La necesidad de disponer de medidas de velocidad del viento durante un período de tiempo suficientemente representativo, por ejemplo varios años.

- ◆ La variabilidad y aleatoriedad del viento según la estación día y hora.
- ◆ Los efectos locales tales como orografía, rugosidad del terreno u otros obstáculos.
- ◆ La necesaria extrapolación para diferentes alturas en referencia respecto al nivel del suelo de las medidas tomadas a una altura determinada (generalmente mayor 9m).

Dependiendo del método de medición y el posterior tratamiento de las medidas, en la práctica se pueden encontrar varias formas de presentación de los datos de viento. A continuación, se indican las más usuales, ordenándolas de mayor a menor detalle y siempre tomando como referencia un periodo de un año (8760h).

Conviene indicar que los resultados obtenidos en una campaña de medición de un año son poco representativos del comportamiento del viento, dada la variabilidad del mismo. Para tener un cierto nivel de representatividad de la información eólica, interesa manejar series históricas lo más largas posibles. Sería deseable disponer de series históricas de 25 ó 30 años, aunque periodos comprendidos entre 5 y 10 años ya comienzan a ser representativos. Los servicios nacionales de meteorología son los puntos donde puede obtenerse información sobre datos de viento. (FERNANDEZ DIEZ, 2000)

d.3.4.1 Datos de viento en forma de tablas o series numéricas.

- ◆ Valores promedio durante 10 minutos de la velocidad y dirección instantáneas constituyen series de gran detalle y para un año representan $6 \times 8760 = 52560$ valores para cada magnitud (velocidad y dirección).
- ◆ Valores medios horarios de la velocidad y dirección, se elabora promediando para cada hora los seis valores horarios indicados en el apartado anterior. Para un año se disponen 8760 valores de velocidad y otros tantos de dirección.
- ◆ Valores medios trihorarios de la velocidad y dirección: se forman a partir de la media trihoraria de los valores anteriores y se calculan para las 0, 3, 6,...21 horas de cada día. Para un año se tienen 2920 valores de velocidad y otros tanto de dirección. (VILLARRUBIA, 2004)
- ◆ Valores medios diarios (365), decenales (36), mensuales (12) y anual (1) de la velocidad y la dirección obtenidos por promedio de los de los apartados anteriores.

Se pueden encontrar resúmenes meteorológicos de la velocidad media mensual y la dirección dominante, tal como muestra el ejemplo de la tabla 5.

Tabla 5. Zona perturbada por un obstáculo.

<i>Mes</i>	<i>En</i>	<i>Fe</i>	<i>Mz</i>	<i>Ab</i>	<i>My</i>	<i>Jn</i>	<i>Jul</i>	<i>Ag</i>	<i>Se</i>	<i>Oc</i>	<i>No</i>	<i>Di</i>	<i>Año</i>
Velocidad (m/s)	3.5	2.6	3.3	4.1	4.1	3.5	3.5	3.5	3.1	3.5	3.8	3.9	3.5
Dirección dominante	NE	SW	N	NE	SW	SW	N	SW	E	N	SW	N	SW

Fuente: Estación meteorológica Camilo Daza, Colombia.

- ◆ En algunos observatorios se dispone de una tabla en la que se indica, junto con la velocidad media anual, las frecuencias relativas de la velocidad media anual por intervalos de velocidad. Un ejemplo se muestra en la tabla 6.

Tabla 6. Frecuencias por dirección y grupo de velocidad.

<i>Dirección</i>	<i>v(m/s)</i>	<i>%(0.3-1.5)</i>	<i>%(1.6-3.3)</i>	<i>%(3.4-5.4)</i>	<i>%(5.5-10.7)</i>	<i>%(>10.7)</i>	<i>% Total</i>
N	4.6	0.2	0.6	0.7	0.7	0.0	2.2
NNE	5.1	0.4	1.1	2.1	2.1	0.1	5.8
NE	5.5	0.5	1.7	2.6	4.0	0.5	9.4
ENE	4.5	0.9	2.5	2.2	2.4	0.2	8.2
ESE	2.5	0.7	2.1	0.7	0.0	0.0	3.6
ESE	2.5	0.4	1.2	0.4	0.0	0.0	2.0
SE	2.6	0.4	104	0.4	0.1	0.0	2.2
SSE	3.1	0.2	1.1	0.8	0.1	0.0	2.1
S	3.7	0.4	0.8	1.5	0.4	0.0	3.1
SSW	5.9	0.5	1.5	3.1	6.6	0.4	12.1
SW	5.2	0.7	2.2	4.2	4.5	0.4	12.0
WSW	5.4	0.4	1.6	3.2	4.6	0.1	9.9
W	5.7	0.3	0.9	1.9	3.7	0.0	6.8
WNW	6.3	0.2	0.8	1.5	3.4	0.4	6.3
NW	7.6	0.2	0.7	1.6	4.4	1.7	8.6
NNW	5.5	0.2	0.7	1.0	1.2	0.3	3.4
Total	5.2	6.6	20.9	27.9	38.2	4.1	97.7
Calma	-	-	-	-	-	-	2.3

Fuente: Estación meteorológica Camilo Daza, Colombia.

- ♦ En todos los casos, se indica siempre el umbral de calmas, que constituye el límite inferior de la velocidad que es capaz de captar el anemómetro.
- ♦ Dada la variabilidad del viento, los valores medios horarios, trihorarios, diarios o anuales deben corresponder a medias de medidas de varios años, a fin de que tengan un adecuado grado de aproximación a las condiciones de comportamiento que pueden esperarse. Una serie de valores correspondientes sólo a un año es poco representativa y es muy incierto elaborar a partir de ellos conclusiones con relación al posible aprovechamiento energético del potencial eólico del lugar.

d.3.4.2 Representaciones gráficas.- La representación gráfica más usada es la denominada *rosa de los vientos*. Consiste en un diagrama polar en el cual se definen para diferentes direcciones o rumbos distintos valores relacionados con la velocidad del viento. El número de rumbos, cuyos valores principales se hacen corresponder con los puntos cardinales, acostumbra a ser 8, 12 o 16. El porcentaje de calmas se indica en el centro del diagrama.

La rosa de los vientos permite determinar las direcciones dominantes de los vientos. En general, no coincide la dirección dominante con la intensidad del viento, ya que en muchos casos los vientos más intensos no son los que soplan más horas al año procedentes de una determinada dirección. Este es un aspecto importante a tener en cuenta para una adecuada orientación de los generadores eólicos.

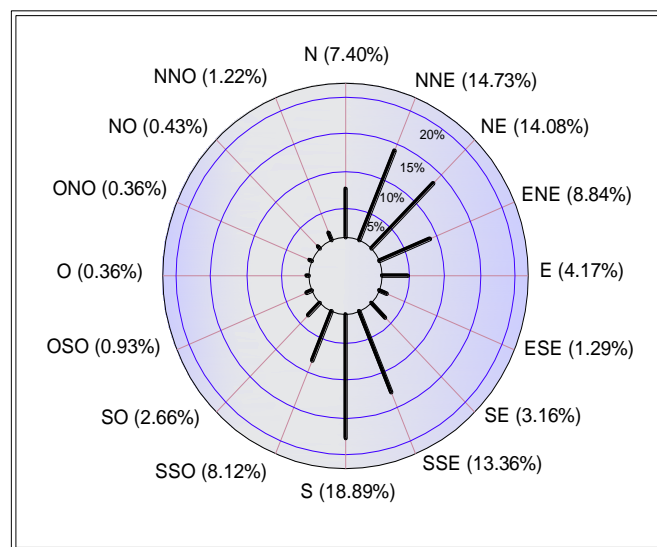


Figura 12. Ejemplo de Rosa de los vientos de 16 direcciones.

De esta forma se pueden establecer varios tipos de rosas de los vientos:

- Porcentaje del tiempo total que el viento sopla procedente de una determinada dirección (figura 12). Así, en esta figura se puede ver que la dirección dominante es la NNE de la cual sopla el viento el 14.73% de las horas anuales.
- Velocidad media del viento para cada dirección. Junto a cada segmento que representa a escala la velocidad, también se indica el porcentaje de tiempo anual (frecuencia relativa porcentual) que sopla el viento procedente de una determinada dirección. Por ejemplo, en la figura 13, se observa que los vientos más intensos ($v = 2.6$ m/s) proceden del NE y se presentan un 14.08% de las horas anuales (1233h/año), mientras que los más frecuentes son los de dirección S (18.89%) correspondiendo 1654 h/año, con intensidad 2.52 m/s.

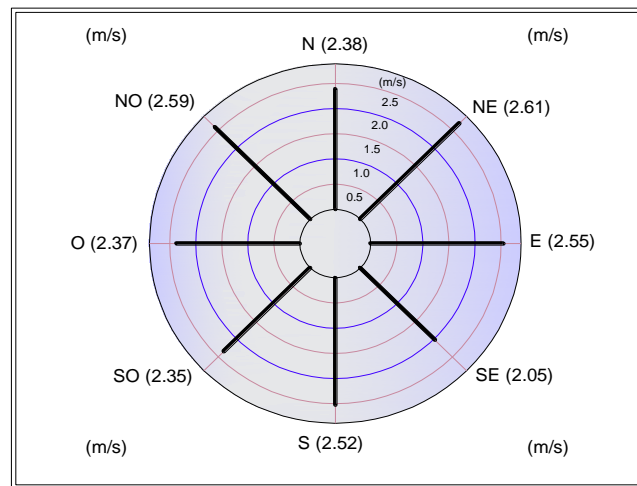


Figura 13. Representación de velocidades medias.

- Representación para cada dirección de la velocidad promedio, se muestra otra forma de representar las rosas de los vientos para los valores correspondientes de velocidad. En este caso se han escogido 8 rumbos.

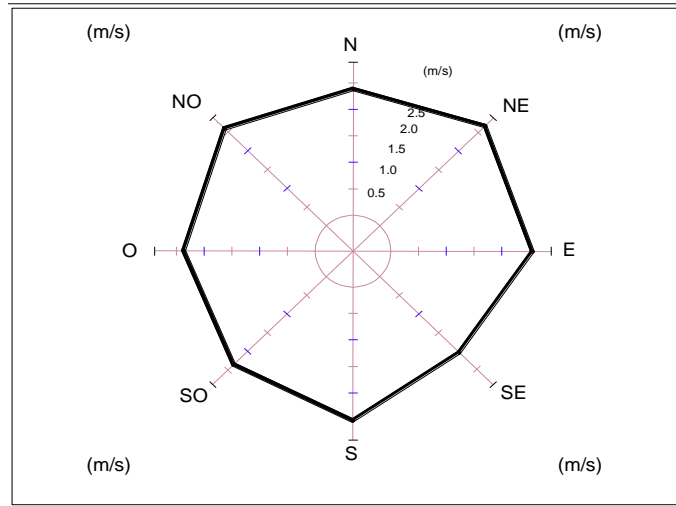


Figura 14. Rosa de los vientos: velocidad media de las direcciones del viento para 8 rumbos.

d.3.5 Aplicación de la estadística a cálculos eólicos.

Dada la necesaria utilización de herramientas estadísticas, en este apartado se indican aquellos conceptos estadísticos más utilizados en el análisis del viento.

Aunque la variable utilizada en las siguientes definiciones es la velocidad todos estos conceptos son extensibles a cualquier otro tipo de magnitud, variable, dato o medida física.

d.3.5.1 Medidas de centralización.-Para un conjunto de N valores de la velocidad (v_1, \dots, v_k) que se presentan (n_1, \dots, n_k) veces respectivamente cada uno de ellos, se definen los siguientes conceptos.

- ♦ Frecuencia relativa f_i de la magnitud v_i :

$$f_i = \frac{n_i}{N}$$

Ecuación 3.

- ♦ Teniendo presente que se cumple:

$$N = \sum_{i=1}^K n_i \rightarrow \sum_{i=1}^K f_i = 1$$

Ecuación 4.

- ♦ Media aritmética o simplemente media (v) definida por la expresión:

$$v = \frac{\sum_{i=1}^k n_i v_i}{N} = \sum_{i=1}^k f_i v_i$$

Ecuación 5.

- ♦ *Mediana (v)*: en un conjunto de datos ordenados en magnitud es el valor medio de los dos valores que dividen al conjunto de datos en dos partes iguales.

Los valores que dividen al conjunto de datos en cuatro partes iguales se conocen como *cuartiles* ($v_{0.25}$, $v_{0.50}$, $v_{0.75}$). Análogamente los nueve valores ($v_{0.10}, \dots, v_{0.90}$) que dividen al conjunto en diez partes iguales son los *deciles*, mientras que los que lo hacen en cien partes iguales son los *percentiles* ($v_{0.01}, \dots, v_{0.99}$). La mediana (v) es el segundo cuartil, el quinto decil y el quincuagésimo percentil ($v_{0.50}$). Los percentiles ($v_{0.95}$) y ($v_{0.99}$) muy usados, son respectivamente aquellos valores que dejan el 95% y el 99% del conjunto total por debajo de ellos.

- ♦ *Moda (v_m)*: valor que se presenta con la máxima frecuencia.

d.3.5.2 Medidas de dispersión.- Para indicar la forma como un conjunto de datos se distribuye alrededor de un valor medio se usan las medidas de dispersión. Las más usadas son:

- ♦ *Rango*: en un conjunto de valores es la diferencia entre el mayor y el menor.
- ♦ *Rango entre percentiles 10-90*: es la diferencia entre los percentiles $v_{0.90}$ y $v_{0.10}$ e indica los límites del intervalo que comprende el 80% del conjunto de valores. También se puede utilizar el rango 5-95 o el 1-99.
- ♦ *Desviación estándar o típica (σ)*: para un conjunto de N datos de velocidad (v_1, \dots, v_k) con frecuencias relativas (f_1, \dots, f_k), viene dada por:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^k f_i v_i^2 - v^2}$$

Ecuación 6.

Para datos agrupados, es más cómodo el uso de la expresión:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^k f_i v_i^2 - \left(\frac{\sum_{i=1}^k f_i v_i}{N} \right)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^k f_i v_i^2 - v^2}$$

Ecuación 7.

Si el conjunto de datos se trata de una muestra de la población, debe utilizarse, para el cálculo de la desviación estándar, la expresión:

$$s = \frac{N}{N-1} \quad \acute{o} = \frac{N}{N-1} \sum_{i=1}^k f_i v_i - v^2$$

Ecuación 8.

Ya que el valor resultante constituye un estimador mejor de la desviación estándar de la población a la que pertenece la muestra. Sin embargo, para valores grandes de N ($N > 30$) no existe diferencia significativa entre ambas definiciones. El cuadrado de la desviación estándar (\acute{o}^2) recibe el nombre de varianza.

d.3.5.3 Tratamiento estadístico.-Cuando se dispone de un conjunto de N valores de la velocidad (v_1, \dots, v_k) que se presentan (n_1, \dots, n_k) veces respectivamente cada uno de ellos, el tratamiento estadístico de los mismos se realiza siguiendo los siguientes pasos:

1. Agrupación y distribución de los datos en clases o categorías, determinando la *frecuencia de clase*, es decir, el número de ellos que pertenecen a cada clase. Cada clase viene definida por sus límites superior e inferior, constituyendo el denominado *intervalo de clase* y su punto medio es la *marca de clase*.
2. El número de clases depende del número de datos, del rango de todo el conjunto y de la precisión exigida. A título orientativo, el número de clases (N_c) y el número de datos (N) se indica en la siguiente tabla.

Tabla 7. Número de clase en función del número de datos.

Número de datos (N)	<50	50-100	100-250	> 250	Orientativamente
Número de clases (N_c)	5-7	6-10	7-12	10-20	$N_c \approx 1+3.3 \log_{10}(N)$

Fuente: Libro Energía Eólica de Miguel Villarrubia.

3. Elaboración de una tabla que incluya las clases o categorías y frecuencias. A partir de estos datos se calculan las frecuencias relativas, las frecuencias acumuladas y los cálculos auxiliares para obtener la velocidad media, la mediana, la moda y la desviación típica de todo el conjunto de valores.
4. Es muy útil, dibujar el *histograma de frecuencias relativas*, ya que permite esbozar la ley o función de distribución continua de probabilidad, a partir de la forma que adopta el *polígono de frecuencias* (líneas que unen los centros de los lados superiores de los rectángulos del histograma). Asimismo, conviene dibujar la *curva de frecuencias acumuladas* («menor o igual que») o bien su complementaria P («mayor que»), la cual se obtiene por diferencia con la unidad ($P=1 - F$).
5. Para muchas aplicaciones, la curva de frecuencia acumulada P que representa las frecuencias acumuladas («mayor que») en ordenadas frente a las velocidades en abscisas se prefiere dibujar invirtiendo los ejes, colocando en ordenadas la velocidad y en abscisas el número de horas acumuladas. Este tipo de curva se denomina *curva de duración de la velocidad* e indica el tiempo en el que la velocidad se mantiene superior a un cierto valor.

En las siguientes figuras se muestra este tipo de representaciones gráficas:

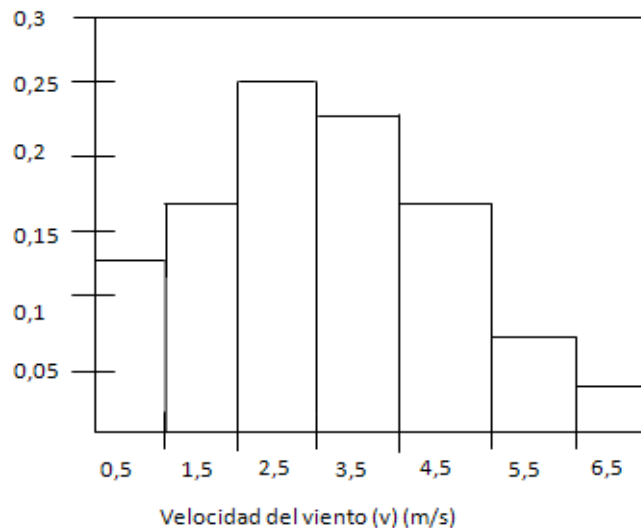


Figura 15. Histograma de frecuencias relativas.

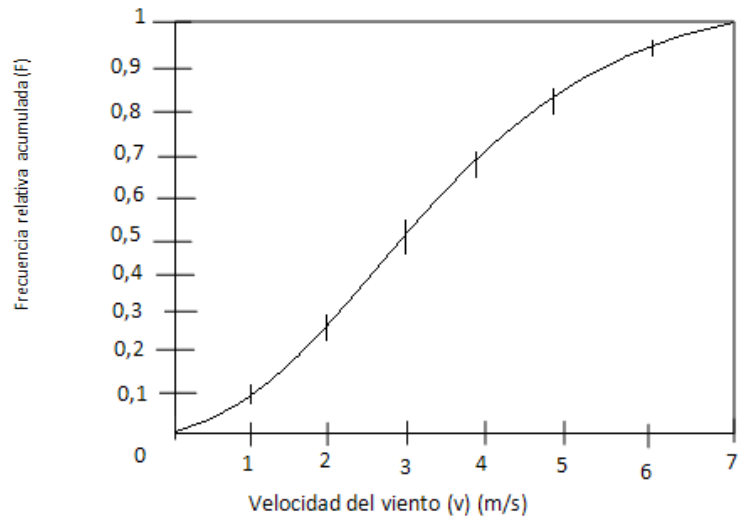


Figura 16. Frecuencias relativas acumuladas «menor o igual»

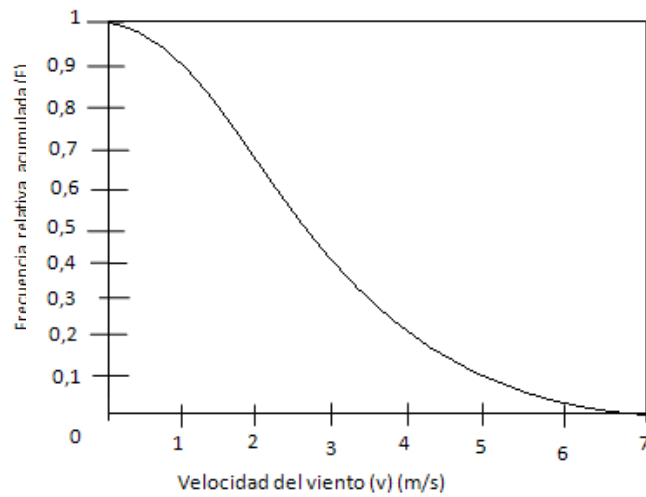


Figura 17. Frecuencias relativas acumuladas, «mayor que»

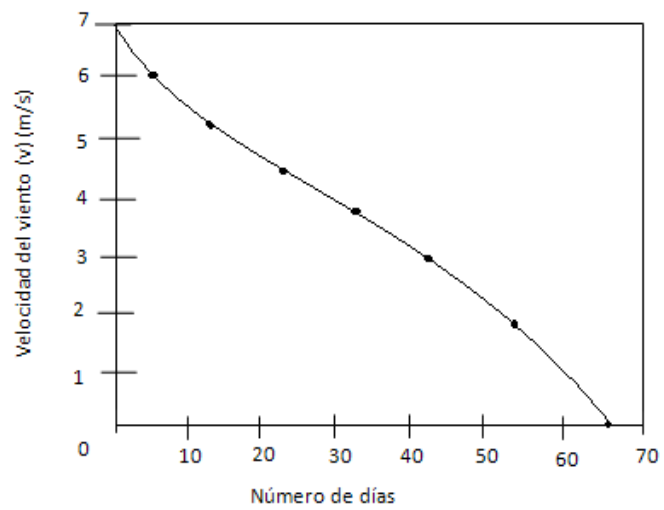


Figura 18. Curva de velocidades de viento frente a frecuencias acumuladas.

A continuación, en la siguiente tabla se muestra el tratamiento estadístico de los datos de la velocidad horaria para un periodo de un año (ejemplo).

Tabla 8. Ejemplo de tratamiento estadístico de datos de velocidad del viento.

<i>Datos</i>			<i>Cálculos</i>			
<i>Intervalo de la clase</i>	<i>Control de la clase</i>	<i>Frecuencia de la clase</i>	<i>Frecuencia relativa</i>	<i>Frecuencia relativa Acumulada</i>	<i>Productos</i>	
(m/s)	v_i (m/s)	n_i (horas)	$f_i = n_i/N$	F_i	$f_i v_i$	$f_i v_i^2$
	1	937	0.107	0.107	0.107	0.107
	2	1472	0.168	0,275	0.336	0.6.72
	3	1638	0.187	0.46.2	0.561	1.683
	4	1507	0.172	0.634	0.688	2.752
	5	1218	0.139	0.773	0.695	3.475
	6	858	0.098	0.871	0.588	3.528
	7	543	0.062	0.933	0.434	3.038
	8	324	0.037	0.970	0.296	2.368
	9	175	0.020	0.990	0.180	1.620
	10	88	0.0110	1	0.100	1.000
Total	N=8760		1		3.985	20.243
<i>Resultados</i>						
Horas totales	Velocidad media		Mediana		Desviación	
N=8760h	$v = 3,985 \text{ m/s}$		$v = 3,721 \text{ m/s}$		$\sigma = 2,089 \text{ m/s}$	
	$\approx 4 \text{ m/s}$		$\approx 3,7 \text{ m/s}$		$\approx 2,1 \text{ m/s}$	

Fuente: Libro Energía Eólica de Miguel Villarrubia.

En la siguiente figura se presenta gráficamente las frecuencias relativas del caso.

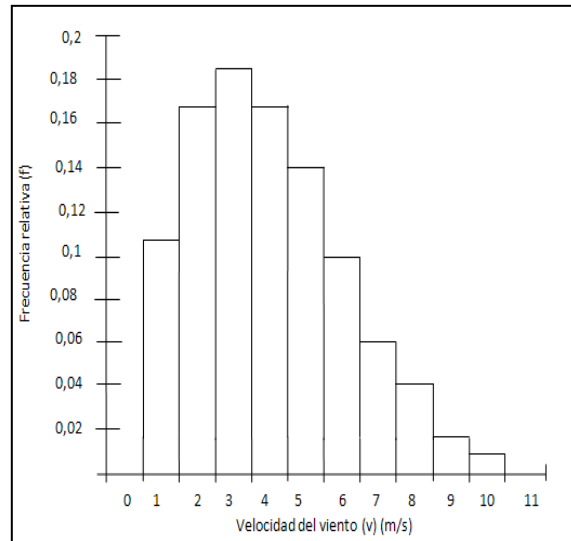


Figura 19. Histograma de frecuencias relativas para velocidades horarias del viento (ejemplo).

d.4 CAPÍTULO IV. CONCEPTOS DE DISEÑO, DIMENSIONAMIENTO Y SELECCIÓN DE AEROGENERADORES.

Los aerogeneradores, tienen diversas aplicaciones específicas, ya sea eléctricas o de bombeo de agua, mediante el aprovechamiento y transformación de energía eólica en energía mecánica.

Los aerogeneradores pueden trabajar de manera aislada o agrupados en parques eólicos o plantas de generación eólica, distanciados unos de otros, en función del impacto ambiental y de las turbulencias generadas por el movimiento de las palas. (FERNANDEZ DIEZ, 2000)

La potencia en el viento soplando con una velocidad (v) a través de un área (A) perpendicular a (v), es:

$$P_{viento} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A$$

Ecuación 9.

Donde:

P_{viento} : Potencia del viento en vatios.

ρ : Densidad del aire.

v : Velocidad no perturbada del viento en m/s.

A : Área perpendicular al paso del viento en m^2 .

Aproximaciones teóricas a la extracción de energía del viento comenzaron a realizarse con la Teoría de Momentum Axial, propuesta por primera vez por Rankine en 1865.

Esta teoría propone que la potencia es extraída por medio de un disco actuador en el cual se produce una caída súbita de presión en el fluido en contacto con el disco sin ningún cambio en la velocidad axial del fluido. Al localizar un disco actuador simple con un número infinito de palas en una corriente de flujo, el flujo de aire no perturbado en frente al disco experimenta una reducción en la velocidad debido a la presencia del disco. Al ocurrir una caída de presión a través del disco, la velocidad del aire se disminuye y consecuentemente el tubo de corriente se expande (Ver figura 20).

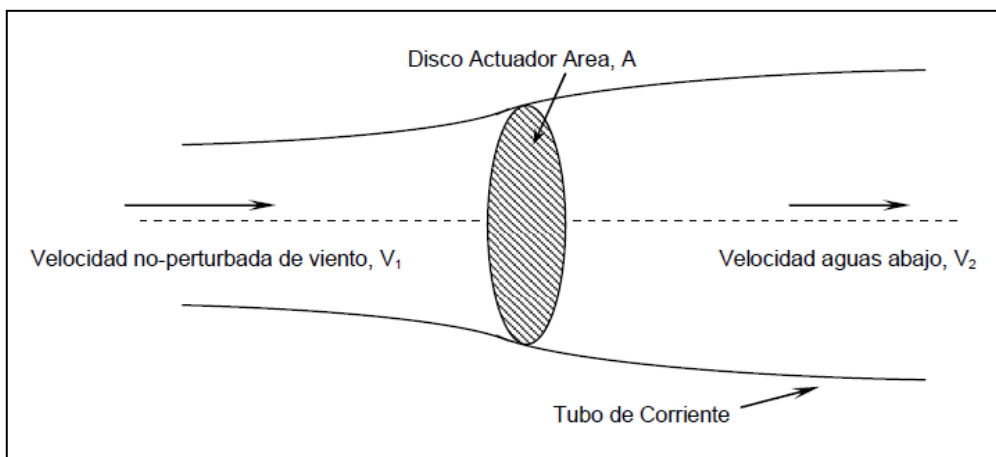


Figura 20. Representación del tubo de corriente del viento y disco actuador.

En esta teoría, se asume que el flujo de corriente en el tubo de corriente es unidireccional, enteramente axial, incompresible y sin viscosidad.

Combinando los principios de conservación de energía y momentum, se puede determinar la máxima potencia extraída por el disco actuador.

Es fácil demostrar que:

- ✓ La velocidad del aire a través del disco actuador es el promedio aritmético de la velocidad no perturbada V_1 y la velocidad aguas abajo, V_2 .

$$V_{isco} = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

Ecuación 10.

- ✓ La potencia extraída por el disco se puede expresar como:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \dot{n} \cdot (V_1^2 + V_2^2) \cdot A \cdot \frac{V_1 + V_2}{2}$$

Ecuación 11.

✓ La máxima potencia extraída ocurre cuando:

$$\frac{dP}{dV_1} = 0$$

$$V_{disco} = \frac{2}{3} \cdot V_1$$

En otras palabras, la condición de máxima extracción de energía eólica se cumple cuando el disco actuador experimenta 2/3 de la velocidad no perturbada del viento y la velocidad aguas abajo es 1/3 de V_1 .

Así pues, la máxima potencia extraída por el disco actuador es:

$$P = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \cdot \dot{n} \cdot V_1^3 \cdot A$$

Ecuación 12.

El factor 16/27 es ampliamente conocido como el “Coeficiente de Betz”, quien por primera vez lo deduce en 1926. Con esta última ecuación se define el Coeficiente de Rendimiento de Rotores Eólicos (C_p), el cual es la relación entre la potencia extraída por el disco actuador y la potencia disponible en el viento en un tubo de corriente con la misma área (A) del disco.

Entonces:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \cdot \dot{n} \cdot V_1^3 \cdot A}$$

Ecuación 13.

Y el límite de Betz es:

$$C_p = \frac{16}{27} = 59.3\%$$

Este límite se debe interpretar como que el disco actuador no puede extraer el total de la energía del viento, ya que debe dejar fluir el viento, representada en una cierta cantidad de energía cinética que no se puede aprovechar. Igualmente con las simplificaciones realizadas en esta sencilla teoría es previsible que el límite de Betz, sea el límite teórico

de extracción de energía eólica de rotores reales, por lo tanto sus coeficientes de rendimientos serán menores al límite de Betz.

Otro parámetro importante es el factor de interferencia axial (a), el cual mide la reducción de la velocidad no-perturbada del viento cuando pasa por el disco actuador y se define por:

$$a = \frac{V_1 - V_{disco}}{V_1}$$

Ecuación 14.

En consecuencia:

$$V_{disco} = V_1 \cdot (1 - a)$$

$$V_2 = V_1 \cdot (1 - 2a)$$

Ecuación 15.

Vale la pena mencionar que el coeficiente de rendimiento (C_p) puede expresarse en términos de (a) como:

$$C_p = 4 \cdot a \cdot (1 - a)^2$$

Ecuación 16.

Nótese que cuando ($a=1/3$) el coeficiente alcanza su valor máximo, el cual corresponde al límite de Betz.

Hasta este momento, la teoría de Momentum Axial no provee suficiente información sobre la clase de aparato que puede ser usado para una eficiente extracción y conversión de la energía eólica. Se entiende que la conversión de energía eólica se realiza por medio de un aparato giratorio. Este aparato no puede físicamente tener una velocidad de rotación infinita y esto implica, entonces, generación de momento par en un eje. La generación de un momento par en un eje implica un cambio en el momentum angular del aire. Estos cambios ocurren en la medida que el aire pasa por el “rotor”, así que alguna energía cinética rotacional residual queda en la estela.

En consecuencia, el rotor restringe la rotación de la estela a expensas de su rendimiento. Como resultado entre mayor el momento par generado en el eje del rotor mayor será el momentum angular en el aire detrás del rotor. Es por esto que rotores de baja velocidad

o de alto momento-par tendrán un rendimiento inferior a rotores eólicos de más alta velocidad.

Se puede entonces relacionar la potencia extraída por un rotor eólico con su velocidad angular por medio de:

$$P = \Omega \cdot T$$

Donde:

Ω : Velocidad angular de rotación del rotor.

T : Momento-par en el eje del rotor ó momento-par aerodinámico.

Y aplicando la definición del Coeficiente de Rendimiento (C_P), uno puede expresar C_P como:

$$C_P = \tilde{e} \cdot C_T$$

Ecuación 17.

Con:

$$\tilde{e} = \frac{\Omega \cdot R}{V}$$

Y:

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \cdot \tilde{n} \cdot V^2 \cdot A \cdot R}$$

Ecuación 18.

El coeficiente adimensional (λ) se conoce con el nombre de velocidad específica y relaciona la velocidad lineal de la punta del rotor (ΩR) y la velocidad no perturbada del viento (V). El Coeficiente (C_T) se conoce como el Coeficiente de Momento-par, mal llamado en español como Coeficiente de Torque. Como se verá más adelante la velocidad específica (λ) facilitará entender las características de los equipos eólicos, en general.

En el año de 1963, Glauert analiza la Teoría General de Momentum, en la cual se considera la rotación de la estela y encuentra límites claros de extracción de potencia para rotores eólicos ideales operando a diferentes velocidades específicas.

La Figura 21 ilustra los resultados del Análisis de Glauert, junto con el rendimiento de rotores eólicos reales. La curva de la teoría de Glauert muestra el rendimiento del rotor eólico ideal asumiendo que no existen pérdidas por fricción en la medida que el flujo de aire atraviesa el rotor, y que el rotor tiene un número infinito de palas. Sin embargo esta

curva teórica puede ser interpretada como el límite de rendimiento máximo para diferentes rotores eólicos, cada uno operando con su velocidad específica óptima.

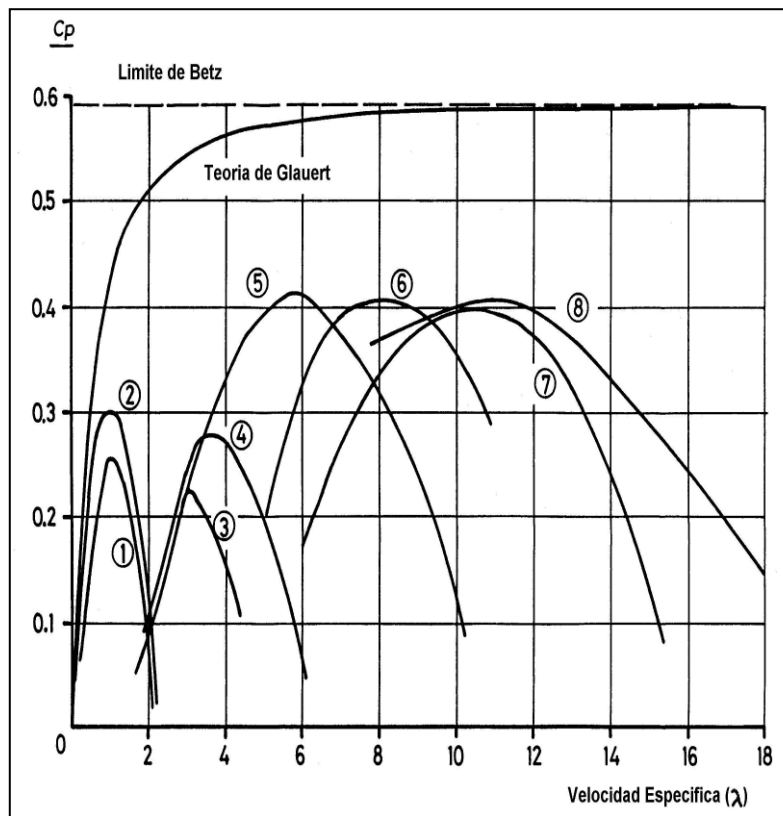


Figura 21. Comparativo de Coeficiente de Rendimiento Teórico y Real de rotores eólicos

Tabla 9. Comparativo de Coeficiente de Rendimiento Teórico y Real de rotores eólicos

#	Rotor Eólico	Tipo	Diámetro en metros	Número de Palas	Coeficiente de Rendimiento Máximo (C_p máx.)	Velocidad específica (λ_{opt})
1	Kijito – Kenia	Horizontal	6	24	0.255	1
2	Multipala Americano	Horizontal	3	18	0.300	1
3	Musgrove – UK	Vertical	6	2	0.220	3
4	Pionier-I	Vertical	15	2	0.280	3.6
5	Sandia-Darrieus	Vertical	17	2	0.410	5.8
6	ECN-Petten	Horizontal	25	2	0.405	8
7	Cavendish	Horizontal	5	2	0.395	10.5
8	NASA Mod-OA	Horizontal	38	2	0.405	11

Fuente: Guía para la utilización de la energía eólica para generación de energía eléctrica UPME.

La curva de la figura claramente indica que rotores eólicos de baja velocidad específica (λ – bajo) tienen un rendimiento de extracción de potencia inferior a los rotores de alta velocidad específica (λ - alto) en los cuales su rendimiento se aproxima asintóticamente al límite de Betz.

La teoría de Momentum axial y la Teoría general de Momentum no ofrecen información específica sobre el diseño de los rotores que convertirán la potencia eólica en potencia mecánica útil en el eje. Sin embargo se puede anticipar que rotores eólicos reales no tendrán un rendimiento como en el caso ideal y su Coeficiente de Rendimiento (C_p) será menor debido a diversos factores como el número finito de palas, arrastre aerodinámico, cuerdas finitas y ángulos de calaje variables.

La combinación de estas dos teorías con la información aerodinámica de perfiles aerodinámicos facilita el estudio, el diseño y predicción del rendimiento de rotores eólicos reales. (URQUIA, 2003)

d.5 CAPÍTULO V. TECNOLOGÍAS

d.5.1 Clasificación de las turbinas.

Los equipos eólicos se dividen en dos grandes ramas; los sistemas de conversión de energía eólica de eje horizontal (SCEE-H) con dos subdivisiones como son los de baja velocidad (muchas aspas) o los de alta velocidad (pocas aspas) (ver figura22).



Figura 22. Sistema de Conversión de Energía Eólica de Eje Horizontal.

Los sistemas de conversión de Eje Vertical (SCEE-V), con subdivisión similar a los de eje horizontal (ver figura 23).



Figura 23. Sistema de Conversión de Energía Eólica de Eje Vertical.

Los equipos eólicos de eje horizontal basan su principio de extracción de energía del viento en el fenómeno aerodinámico de sustentación que se presenta en alabes y formas aerodinámicas, tal como sucede con los perfiles de las alas de los aviones.

Por el contrario, algunos equipos eólicos de eje vertical basan su principio de operación en la fuerza de arrastre sobre superficies como es el molino de viento Savonius o el mismo principio de operación de los anemómetros de cazoletas. A excepción de estos dos equipos los demás equipos de eje vertical, como los diseños Darrieus, también utilizan el principio de sustentación aerodinámica para la extracción de energía.

La selección de utilización de equipos eólicos horizontales o verticales, es independiente de la eficiencia de conversión ya que presentan valores similares, sin embargo vale la pena contrastar algunas ventajas y desventajas de estos sistemas.

En el equipo de eje vertical (Darrieus, figura 23), el sistema puede captar el viento en cualquier dirección (omnidireccional), mientras que los equipos de eje horizontal requieren de un sistema de control para enfrentar el rotor con la dirección de viento.

En los de eje vertical se pueden localizar los subsistemas como caja de cambios, generador eléctrico, frenos, controles, etc. en la base de la torre facilitándose su mantenimiento. En los sistemas de eje horizontal estos subsistemas deberán estar colocados a lo alto de la torre o en la góndola del equipo.

Los SCEE-V de pocas aspas (baja solidez) usualmente vienen provistos de un pequeño motor para iniciar el arranque y la entrega de energía, mientras los SCEEH se diseñan para que arranquen a velocidades adecuadas del viento.

Los SCEE-V más sólidos como el equipo Savonius requiere de un soporte estructural fuerte, dadas las fuerzas que se generan en la conversión de energía, limitándose así la altura a la cual se puede instalar este equipo a unos cuantos metros desde el nivel del piso. Entre tanto, los SCCE-H pueden tener torres más altas para emplazar el rotor a alturas mayores sobre la superficie donde la intensidad del viento es mayor (A mayor altura sobre la superficie, el viento sopla con mayor intensidad, mayor densidad de energía eólica).

d.5.2 Componentes Del Sistema Tecnológico.

d.5.2.1 Clasificación.- Dada la amplia difusión de los aerogeneradores, se ha establecido la siguiente clasificación entre ellos:

- ✓ Se conocen como aerogeneradores grandes, aquellos equipos cuya potencia eléctrica nominal por unidad se encuentra entre 500 kW y algunos megavatios.
- ✓ Se conocen como equipos medianos aquellos cuya potencia nominal se encuentran entre 100 kW y 500 kW.
- ✓ Las turbinas pequeñas son aquellas cuya potencia se halla entre las decenas de Kilovatios y los 100 kW.
- ✓ Las turbinas eólicas micro, aquellas con potencia nominal inferior a 10 kW.

d.5.2.2 Aplicaciones Típicas.- Los tamaños de los equipos eólicos varían desde 1 metro de diámetro, unos cuantos kilogramos de peso y varios vatios de potencia nominal hasta equipos con diámetros hasta de 120 metros, varias toneladas de peso y algunos megavatios eléctricos efectivos. Teniendo esto en mente, el rango de aplicaciones es amplio y es esencial considerar en detalle no solo el equipo eólico sino los demás sistemas alternos asociados con la conversión global de energía. En la actualidad se ofrecen equipos comerciales para diversas aplicaciones como se describe seguidamente:

d.5.2.3 Sistemas de Generación Eléctrica a Gran Escala.- (Entrega de energía del orden de megavatios) A través de arreglos de turbinas eólicas de gran tamaño (1-3

megavatios por unidad), se suministra energía eléctrica a los sistemas de distribución de redes locales. Estas estaciones se pueden localizar en tierra o en el mar (debido a la contaminación visual en tierra y mayor intensidad del viento en el mar). Dada la fluctuación de entrega de energía eólica a las redes de distribución, se estima que el límite máximo de contribución de energía eólica a una red local es del 20%, mientras que valores mayores desestabilizarían la red misma.

d.5.2.4 Granjas Eólicas.- Con potencias nominales por turbina entre 20 kW y 1,500 kW, la granja consiste de varias unidades emplazadas en filas, enfrentando la dirección prevaleciente del viento, así pues la entrega total de energía eléctrica es grande.

Tales granjas están siendo masivamente utilizadas en diversos países, y contabilizan un total mundial aproximado de más de 50,000 turbinas eólicas en granjas eólicas, con una capacidad instalada global que supera los 10,000 MW. Esta estrategia está siendo utilizada por electrificadoras locales o para generación privada, donde su operación es paralela a la red local de distribución de energía eléctrica.

d.5.2.5 Sistemas Híbridos (Diesel/Eólicos/Fotovoltaicos).- Se ofrecen en el mercado internacional soluciones de suministro de energía eléctrica de naturaleza híbrida en rangos de potencia acomodados a las necesidades de los usuarios.

Preferencialmente, se están utilizando ampliamente en localidades remotas, donde el suministro de la red eléctrica es inexistente, en islas, etc. Este esquema de generación es muy atractivo porque complementa el uso de equipos diesel con otras fuentes de energía locales como son el sol y el viento. En este tipo de instalación no se pretende que ni el sistema eólico ni el fotovoltaico sean sustitutos del equipo diesel, sino complementando su uso convirtiéndose en ahorradores del combustible, que si se tiene en cuenta que su instalación en zonas aisladas, el suministro de combustible puede ser un problema. El tipo de uso de estas instalaciones es tan variado como el mismo uso actual de los equipos diesel. Se considera este tipo de uso de la energía eólica, quizás con mayor potencialidad en los países del Tercer Mundo.

d.5.2.6 Equipos Eólicos Individuales en Fincas y Zonas Rurales.- O también conocidos como **sistemas autónomos**. Este tipo de uso consiste en sistemas

individuales con rangos de potencia entre 10 KW hasta los 100 KW. Tales equipos son diseñados para operar en paralelo con la red eléctrica o para operar independiente de esta. Su aplicación puede incluir usos como provisión de agua caliente, secado, refrigeración, irrigación y/o entrega de energía eléctrica a cargas convencionales.

d.5.2.7 Equipos de Suministro de Energía con Almacenamiento.- Estos sistemas típicamente tiene una potencia nominal baja, hasta de unos cuantos kilovatios. Estos equipos son diseñados para un suministro modesto de energía (radiotransmisores, cercas eléctricas, estaciones repetidoras, etc). Estos sistemas vienen provistos con bancos de baterías, y han sido ampliamente utilizados desde los años 20 a nivel mundial. Los últimos desarrollos de estos equipos comprenden baterías selladas, controladores electrónicos y en algunos casos inversores. En los últimos años, la China se ha convertido en el mayor productor mundial de estos equipos vendiendo en los últimos siete años unas 200,000 unidades, representando unos 200 MW eléctricos.

d.5.2.8 Otras aplicaciones.- Dada la versatilidad en tamaños y potencias nominales de oferta de equipos eólicos estos han tenido usos tan variados como desalinización de agua en regiones costeras, como también para transporte marítimo donde con la implementación de aspas aerodinámicas los barcos utilizan la energía del viento para la propulsión de los mismos permitiendo ahorros substanciales en el consumo de combustible en viajes transatlánticos, tal y como se realiza en deporte del Windsurfing. Ya existen buques transatlánticos comerciales con esta tecnología.

d.5.3 Sistema Eléctrico.

Debido a la variabilidad de la fuente eólica, las estrategias de generación eléctrica son diversas. En una sección anterior se indica que la aplicación de aerogeneradores van desde la generación eléctrica de algunas decenas de vatios con equipos eólicos pequeños, en la cual la tendencia general es el uso de alternadores de imanes permanentes con conexión directa al eje del rotor de frecuencia variable; hasta aerogeneradores del orden de megavatios de potencia para la alimentación directa a la red eléctrica, pasando por sistemas autónomos de generación. La Figura 24 ilustra la disposición típica de los elementos en la góndola de un aerogenerador.

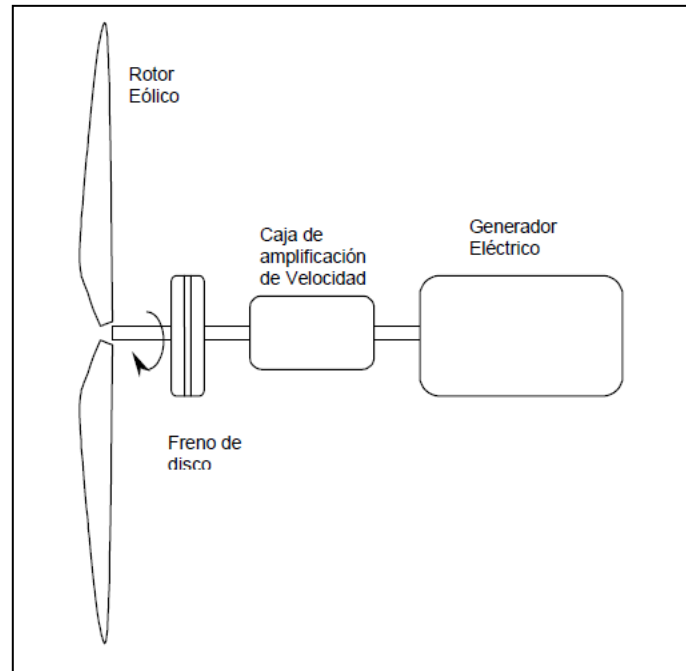


Figura 24. Disposición de Elementos en la Góndola de un Aerogenerador.

Las formas más comunes de generación eléctrica en los aerogeneradores comerciales, son:

- ✓ Velocidad de generación eólica fija con conexión directa a la red eléctrica, cuenta con un generador eléctrico de inducción de jaula de ardilla asíncrono.
- ✓ Velocidad de generación eólica variable con generador de inducción doblemente alimentado.
- ✓ Velocidad de generación eólica variable con generador síncrono con conexión directa al eje del rotor.

Cada una de las opciones de aerogeneración eléctrica estará ligada al tipo de carga eléctrica y el sistema de control de la turbina utilizado por el fabricante, que bien puede ser por control de paso, control por pérdida activa, paso variable en la punta de la pala, etc.

En pequeños aerogeneradores, hasta 10 kW de generación eléctrica, se suele utilizar alternadores de imanes permanentes con conexión directa entre el eje del rotor y el alternador (sin caja mecánica de amplificación de velocidad). Esta configuración permite la generación eléctrica trifásica que dependiendo del tipo de carga, la potencia es rectificadora a potencia regulada de corriente directa (DC) para carga de baterías ó convertida en corriente alterna (AC), a través de un inversor, para cargas

convencionales. Esta estrategia de generación es típica en sistemas de generación autónomos o para sistemas híbridos cuando el recurso eólico se combina con el recurso solar, a través de paneles fotovoltaicos complementarios y sistemas diesel, en una sola unidad de suministro de energía eléctrica.

Estos aerogeneradores generalmente están provistos de sistemas de control y controladores electrónicos de potencia que controlan el suministro de potencia para una aplicación requerida.

Los sistemas de control se utilizan para limitar la potencia eléctrica en vientos de alta intensidad, para mantener rotor eólico enfrentado al viento y para protección del equipo en vientos de velocidad extrema.

Generalmente la limitación de potencia eléctrica se logra con sistemas pasivos de control, con el diseño de las palas del rotor las cuales, en algunos casos, son flexibles torsionalmente y las puntas de las palas se deforman actuando como frenos aerodinámicos para limitar la velocidad de rotación.

El sistema que mantiene el rotor enfrentado al viento, consiste de un sistema de orientación con cola. Esta solución es utilizada en sistemas eólicos de tamaños pequeños, hasta 8 metros de diámetro, en sistemas eólicos más grandes los sistemas de control de orientación son electrónicos, ya que sistemas de orientación con cola se vuelven voluminosos y pesados.

En sistemas eólicos de generación de mayor capacidad (10 kW – 700 kW) y para generación autónoma se utilizan equipos operando con velocidad variable del rotor, lo cual implican fluctuaciones en la frecuencia eléctrica, la cual es corregida por un convertidor AC-DC-AC, así se desacopla las frecuencias mecánica y eléctrica y hace posible la operación de velocidad variable del sistema eólico.

En equipos eólicos conectados en directo (sin caja de amplificación de velocidades) a generadores sincrónicos, el generador y la red eléctrica, a la cual alimenta, se desacoplan completamente por medio de avanzados convertidores electrónicos de potencia, también permitiendo posible la operación a velocidad variable.

Para sistemas de aerogeneración eólica de velocidad constante, el rotor eólico y el generador de inducción de jaula de ardilla, están conectados por una caja de amplificación de velocidad.

En esta estrategia de generación, el bobinado del estator está conectado a la red eléctrica. El deslizamiento del generador varía con la potencia eléctrica generada, de manera que la velocidad, en últimas, no es constante, sin embargo como la variación de velocidad es pequeña (apenas 1 ó 2%), por lo tanto es común referirse a este como un equipo de velocidad constante.

Los generadores de jaula de ardilla toman potencia reactiva de la red, lo cual es indeseable, cuando están conectados a redes eléctricas débiles. Generalmente el consumo de potencia reactiva de estos generadores casi siempre son compensados con bancos de capacitares. La ventaja de un equipo de generación de velocidad constante es que es relativamente más sencillo en su diseño y su precio tiende a ser más bajo. Estas máquinas eólicas tienen que ser más robustas, mecánicamente, que otros diseños, esto debido a mayores cargas estructurales inherentes a velocidad del rotor constante, y las fluctuaciones del viento se traducen en mayores cargas en el tren de transmisión de momento-par. Dependiendo de la fortaleza de la red eléctrica, las fluctuaciones resultantes en potencia pueden producir variaciones de voltaje indeseables.

d.5.4 Control.

El propósito de controlar un aerogenerador es mantener el rotor eólico dentro de un margen preestablecido de condiciones de operación y, especialmente en condiciones de alta intensidad de viento, sirven para limitar su velocidad de rotación, el momento-par transmitido, la potencia suministrada al sistema de carga y las cargas de empuje ejercidas sobre el rotor. Diversos tipos de controles se han desarrollado, entre los cuales están sistemas de protección para velocidades de desboque, los sistemas sencillos de control y para protección en tormentas y los sistemas de control rápido.

Los sistemas de protección para velocidades rotacionales excesivas consisten en el movimiento, por acción de la fuerza centrífuga, de algún mecanismo interno de regulación como puesta en posición de pérdida aerodinámica o posición de bandera de alguna porción o la totalidad de las palas del rotor. También pueden consistir de frenos activados por fuerzas centrífugas, esta solución es típica en pequeños equipos eólicos.

Los sistemas de control simples no solamente protegen los rotores de aumentos excesivos de velocidad, sino que además cumplen la tarea de limitar la potencia transmitida y posiblemente las altas fuerzas de empuje sobre el rotor, las cuales se

transmiten directamente a la torre. Generalmente estos sistemas sencillos son controladores proporcionales que basan su accionamiento sin fuente de potencia externa y utilizan esencialmente la fuerza centrífuga o la presión sobre el rotor para actuar de manera continua.

El control típico sencillo es aquel que utiliza una cola detrás del rotor y una placa paralela al mismo, que facilitan sacar el rotor de la dirección del viento, y así regular la velocidad y las fuerzas transmitidas. Este control es típico de las aerobombas.

Los sistemas rápidos de control, también limitan la velocidad de rotación y la potencia suministrada por el equipo. Estos sistemas regulan el paso de las palas para mantener una frecuencia eléctrica requerida (i.e. 60 Hz). Estos requieren servomecanismos y sistemas electro-hidráulicos y controladores electrónicos de respuesta rápida para responder a condiciones de borrasca extremas.

Generalmente estos controles electrónicos se utilizan en equipos eólicos para potencias mayores de 100 kW, en donde el precio de la costosa electrónica y sistemas hidráulicos dejan de convertirse en un problema, como no sucede con equipos eólicos de menor capacidad.

Adicionalmente a los controles pasivos y activos que actúan sobre el rotor eólico, los aerogeneradores además cuentan con controles adicionales que permiten regular la carga eléctrica del aerogenerador. Este tipo de control es particularmente importante en sistemas de suministro eléctrico autónomos aislado de la red eléctrica o conectado a redes eléctricas débiles.

Como se mencionó en una sección anterior los sistemas de aerogeneración autónomos generalmente utilizan generadores sincrónicos y en proporción a su velocidad, la turbina es cargada o aliviada de carga con el manejo adecuado de resistencias o consumidores conectados al equipo. En pequeños sistemas eólicos estos controladores manejan potencias en exceso, por ejemplo, manteniendo los niveles de cargas de bancos de baterías, o enviando la energía a una pequeña red de consumidores o simplemente disipándola.

d.6 CAPÍTULO VI. *INSTALACIÓN, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO.*

Un elemento esencial para la adecuada utilización de equipos eólicos consiste en el emplazamiento del equipo. Como se menciona en secciones anteriores de este documento, es crucial la información empírica recogida por los pobladores de una región en particular, para conocer las zonas donde la intensidad del viento es adecuada para una instalación de este tipo. Se lograrán mejores resultados si el emplazamiento del sistema eólico corresponde a un análisis riguroso de información meteorológica del lugar en estudio, para así dimensionar correctamente el equipo comercial que mejor se acomode a una necesidad energética dada. Vale la pena insistir en la necesidad de seleccionar el lugar de instalación del equipo eólico, en aquel sitio donde se encuentre libre de obstáculos, como edificaciones o árboles de gran altura, ya que de esto depende obtener mejores resultados y una operación óptima del sistema. Adicionalmente, en pequeñas instalaciones eólicas, es además recomendable instalar los equipos cercanos al lugar de consumo, para evitar y disminuir pérdidas de transmisión de energía.

Una vez seleccionado el equipo, de acuerdo a las necesidades y al régimen de vientos del lugar, se procede a realizar un estudio entre los diferentes tipos de instalación.

En sistemas de aerogeneración se debe estudiar:

- ✓ El tipo de generador: AC. ó DC.
- ✓ Con almacenamiento en baterías o conexión a la red
- ✓ Tipo de carga eléctrica.

Las variaciones en la instalación de aerogeneradores tienen que ver con el tipo de torre seleccionada. Generalmente se escogen torres del tipo pivotante cuando el peso del equipo generador es menor a unos 30 a 40 Kg. ya que con pesos mayores la torre tendera a curvarse cuando se está izando y puede producir una deformación permanente. Para pesos mayores se utilizan torres atirantadas o auto-portantes, ya que resulta más fácil elevar toda la caja con un polipasto.

Con el fin de establecer la cantidad de material, el tipo de equipo a utilizar, el personal requerido, etc., es conveniente dentro de este estudio hacer una evaluación sobre:

- ✓ La distancia al banco de baterías.

- ✓ La disposición de la instalación y su operación futura para evitar instalaciones complejas y con muchos accesorios o por sitios de difícil acceso.
- ✓ El tipo de suelo y facilidad para ejecutar la obra civil de cimentación.
- ✓ Facilidad de vías de acceso.
- ✓ Presupuesto y tiempo disponible para la obra total.

d.6.1 *Obra Civil.*

Antes que la instalación definitiva pueda ejecutarse, la obra civil debe ser realizada completamente. Esta obra consiste de las cimentaciones en concreto para el anclaje de la torre y, posiblemente, una caseta de ubicación del banco de baterías. Las especificaciones para esta obra generalmente vienen descritas en los manuales de instalaciones pero se debe tener cuidado porque algunas diferencias pueden existir de acuerdo al tipo de terreno. Especial atención se debe prestar a la alineación. La cimentación debe ser hecha de tal forma que la torre quede perfectamente vertical.

Se debe tener en cuenta además que:

- ✓ La torre soportará todo el empuje del viento sobre el molino y el viento por ráfagas, dependiendo del lugar puede llegar, a 20 o 25 m/s., por lo que de la buena calidad y ubicación de la cimentación depende la vida del aerogenerador y su eficiencia en la extracción de energía.
- ✓ De la buena ubicación de los anclajes depende que la torre quede vertical y opere eficientemente. La profundidad de este anclaje está determinada por el tipo de cargas que recibirá la torre. En los manuales generalmente están especificadas este tipo de dimensiones, pero una recomendación inicial es que cualquier anclaje requiere de por lo menos 0.5 m. de profundidad.

d.6.2 *Levantamiento.*

La instalación de la torre es un trabajo especializado. El procedimiento puede diferir de un aerogenerador a otro dependiendo de las condiciones del terreno, la facilidad de acceso o maniobra de los equipos, etc.

Dos tipos principales de procedimientos de instalación se pueden encontrar:

- ✓ Ensamblaje del molino mientras la torre está sobre el piso y después es elevada a posición vertical.
- ✓ Ensamblaje de la torre en su posición final, trabajando desde el nivel del piso hacia arriba y luego elevando el cabezote, el rotor, y las demás partes con la ayuda de un polipasto.

El primer tipo de levantamiento requiere de 3 o 4 personas cuando el equipo ensamblado no es demasiado pesado, de tal forma que con la ayuda de cuerdas, logren levantar el equipo. Si es muy pesado, es necesario hacer el izamiento con la ayuda de un tractor u otro vehículo, utilizando preferiblemente cuerdas de acero y un pivote en la base para lograr que la cuerda pase lo más alto posible en los instantes iniciales del levantamiento.

Una vez instalado se debe prestar especial atención a proteger el aerogenerador contra la corrosión. En un medio ambiente corrosivo (sal o arena) todas las partes metálicas deberán ser tratadas con una o dos capas de pintura anticorrosiva y una capa de pintura de recubrimiento. Después de la instalación todos los daños en la pintura deberán ser reparados. Aún en torres de acero galvanizado se puede necesitar pintarlas si están en un ambiente corrosivo. Es una excelente práctica, proteger con grasa todos los tornillos y tuercas una vez instalados; esto facilitará el posterior desmontaje ya que evita la oxidación.

Durante la instalación, se debe tener mucha atención con la seguridad. Como protección contra la eventual caída de objetos como tornillos, tuercas o llaves todas las personas que trabajen en la obra deberán usar cascos de seguridad. Las personas que trabajen sobre la torre *siempre* deberán usar cinturones de seguridad, y cuando se estén izando partes pesadas, o cuando se esté izando la torre, nadie deberá estar directamente bajo ellas.

d.6.3 Mantenimiento.

Cualquier máquina requiere de un mantenimiento adecuado para operar de una manera eficiente y tener la vida útil para la cual fue diseñado.

Un equipo básico de herramientas para hacer el mantenimiento de un aerogenerador es el siguiente: plomada e hilo, juego de 6 o más llaves fijas, marco para segueta y hojas de segueta, grasera, nivel, alicate, destornilladores, flexómetro, equipo de medición de voltaje y corriente, medidor de carga de baterías.

Una tarea que puede resultar fundamental para el mantenimiento de un aerogenerador es la protección contra personas o animales. Algunos equipos utilizan cables anclados como tirantes para la torre. De la adecuada tensión en ellos depende la estabilidad del molino, por lo que puede resultar conveniente tener un área cercada alrededor del mismo.

Un mantenimiento simple que puede realizar fácilmente cualquier persona incluye:

- ✓ Engrasar o aceitar las partes móviles.
- ✓ Limpiar la estructura, especialmente si está en un ambiente fuertemente corrosivo.

Un mantenimiento más especializado requiere de personal mecánico calificado. Las tareas que generalmente debe realizar son:

- ✓ Cambiar el aceite de la caja de cambios, si se tiene, típicamente cada año.
- ✓ Inspeccionar los tornillos y su ajuste, también cada año, aunque es preferible hacerlo en un lapso más corto cuando está recién instalado.
- ✓ Reparación de pasadores de seguridad que tienen algunos equipos para evitar que sobrecargas lleguen a afectar la transmisión.
- ✓ Puede ser necesario limpiar y pintar la torre cada uno o dos años de acuerdo al medio ambiente.
- ✓ Después de 5 a 10 años es necesario hacer un diagnóstico completo del estado del aerogenerador, en especial de las partes en desgaste como rodamientos, engranajes, etc.
- ✓ Si el aeromotor está ubicado en una zona con tormentas se debe considerar como mantenimiento del rotor el desorientarlo antes de que estas ocurran para evitar daños.
- ✓ En aerogeneración, se debe tener especial cuidado con las baterías. Debe evitarse las descargas profundas y las sobrecargas ya que de esta manera se

acorta la vida útil de la batería. Debe cuidarse que el electrolito este por lo menos un centímetro por encima de las placas de la batería. Si es necesario se completará este nivel con agua destilada exclusivamente. El nivel del electrolito se debe revisar cada 15 días por lo menos. Se debe conservar las baterías en un sitio limpio y sobre todo seco.

- ✓ De particular cuidado en la instalación de aerogeneradores es la adecuada instalación de polo a tierra, para evitar daños a consecuencias de descargas eléctricas y prevenir la destrucción de los elementos eléctricos y electrónicos asociados al sistema. Similarmente, se deberá realizar una rigurosa inspección a las líneas de transmisión, particularmente la instalación y el deterioro paulatino de los cables eléctricos, los cuales deberán ser reemplazados en caso de que este se presente. (URQUIA, 2003)

d.6.4. Componentes de instalación. La mayoría de instalaciones de orden eólico poseen además de los componentes básicos mencionados, un conjunto de elementos o dispositivos eléctricos y electrónicos que permiten acumular, acondicionar, regular y convertir la energía obtenida del generador eólico en energía aprovechable. El detalle de estos componentes se menciona a continuación.

d.6.4.1 Baterías. Se denomina batería, batería eléctrica, acumulador eléctrico o simplemente acumulador, al dispositivo que almacena energía eléctrica, usando procedimientos electroquímicos y que posteriormente la devuelve casi en su totalidad; este ciclo puede repetirse por un determinado número de veces. Se trata de un generador eléctrico secundario; es decir, un generador que no puede funcionar sin que se le haya suministrado electricidad previamente, mediante lo que se denomina proceso de carga (ver figura 25).



Figura 25. Batería o acumulador

El principio de funcionamiento de un acumulador está basado esencialmente en un proceso reversible llamado reducción-oxidación (también conocida como redox), un proceso en el cual uno de los componentes se oxida (pierde electrones) y el otro se reduce (gana electrones); es decir, un proceso cuyos componentes no resulten consumidos ni se pierdan, sino que meramente cambian su estado de oxidación y, que a su vez pueden retornar a su estado original en las circunstancias adecuadas. Estas circunstancias son, en el caso de los acumuladores, el cierre del circuito externo, durante el proceso de descarga, y la aplicación de una corriente, igualmente externa, durante la carga.

Resulta que procesos de este tipo son bastante comunes, por extraño que parezca, en las relaciones entre los elementos químicos y la electricidad durante el proceso denominado electrólisis, y en los generadores voltaicos o pilas. Los investigadores del siglo XIX dedicaron numerosos esfuerzos a observar y a esclarecer este fenómeno, que recibió el nombre de polarización.

Un acumulador es, así, un dispositivo en el que la polarización se lleva a sus límites alcanzables, y consta, en general, de dos electrodos, del mismo o de distinto material, sumergidos en un electrolito.

Los tipos de baterías más comunes son:

✓ Baterías estacionarias de ciclo profundo:

- *Baterías ACIDO abiertas o de mínimo mantenimiento.* Tienen la ventaja de poder ser rellenas con agua destilada, pero presentan la desventaja de requerir mantenimiento periódico.
- *Baterías ACIDO selladas (cerradas) o libres de mantenimiento.* Tienen la ventaja de no necesitar mantenimiento, pero su desventaja es que presentan una vida útil más corta que las baterías con mantenimiento, porque por su válvula escapa cierta cantidad de vapor de agua y hidrógeno ($2H_2 + O_2$ gas) y una vez "evaporado" el electrolito, la batería (o la celda) está seca o dañada.
- *Batería GEL selladas (cerradas) o libre mantenimiento.* Tienen la ventaja de no necesitar mantenimiento, son protegidas contra salida de ácido, tampoco

necesitan diferentes funciones de recarga. La desventaja es que no soportan una corriente mayor de la especificada.

- *Baterías AGM selladas (cerradas) o AGM (Fibra de vidrio absorbido) libre mantenimiento.* Tienen las ventajas de los dos tipos de baterías anteriores, que no necesitan mantenimiento, son protegidas contra salida de ácido, VRLA (valveregulated lead acid) batería de plomo ácido con regulación de válvula, tampoco necesitan diferentes funciones de recarga. Además catalizan hasta el 95 % del hidrógeno y oxígeno gasificado ($2H_2 + O_2$ gas) otra vez en agua (H_2O) y logran así una vida útil más larga. Su desventaja es que sus costos de adquisición son elevados.

d.6.4.2 Controladores de Carga. Los controladores de carga tienen como función principal la protección de los acumuladores contra sobrecarga (ver figura 26), otras funciones incorporadas pueden ser: la flotación (mantener los acumuladores cargados en una tensión media alta) control de consumidores (desconexión de consumidores cuando las baterías estén vacías).



Figura 26. Controlador de carga.

Existen diferentes tecnologías, funcionamientos y tamaños de los reguladores. En caso de usar acumuladores especiales (Gel, NiCd, etc.), hay que garantizar que el regulador es apto para dicho tipo de baterías.

En la actualidad los controladores de carga, que tienen ventajas en las curvas de control, con el fin de optimizar el aprovechamiento de la energía eólica en cada sistema. Los sistemas de control integral tienen también otras funciones como conexión automática

de carga auxiliar (inversores o consumidores), cuando el sistema entra a un nivel de carga alto. Con estas funciones se puede aprovechar energía sobrante, cuando las baterías estén llenas, los reguladores normales desconectan los paneles y no se aprovecha la energía sobrante.

Existen algunos reguladores que abren el circuito con un relé cuando este pasa de una tensión máxima de 15 voltios. Otros introducen en el circuito una carga que ‘consume’ el exceso de energía aportada mediante por ejemplo un diodo ‘zener’ que se hace conductor a partir de una tensión dada, y los más avanzados conocidos como PWM (Pulse Width Modulation) o de “modulación de anchura de impulso”, que permiten optimizar la carga de la batería.

Los reguladores PWM permiten entregar un nivel de carga variable haciendo electrónicamente un encendido-apagado muy rápido del circuito (figura 27). El dispositivo continuamente comprueba la tensión de la batería, y si esta es muy buena los impulsos estarán muy distanciados (por ejemplo cada 3 segundos) y además serán de muy corta duración (por ejemplo de una décima de segundo). Si por el contrario la batería necesita carga, los impulsos serán muy prolongados y continuos. El controlador comprueba la tensión de la batería entre pulso y pulso.



Figura 27. Controlador de carga con tecnología PWM.

Existe otro sistema de controlador de carga muy interesante, que es conocido como LVD (por ser el acrónimo de Low Voltaje Disconnect) ‘Desconexión por bajo Voltaje, que permite proteger de forma muy eficaz la vida de las baterías. Debemos saber que una batería de ácido, sea o no de gel y sea o no de ciclo profundo, sufre MUCHO cuando se descarga completamente o a niveles muy bajos de tensión. Por ello este sistema simplemente interrumpe el aporte de la batería al circuito eléctrico si esta baja de un nivel de carga determinado. (CODESO, 2011)

d.6.4.3 Inversor. Los inversores o también llamados convertidores tienen las mismas funciones que las UPS (Uninterrupted Power Supply) (figura 28), pero en diferencia las UPS utilizan un banco de acumuladores externo. Esto tiene dos ventajas: el banco de batería puede ser ajustado a los requerimientos específicos y el tiempo de respaldo o autonomía es mayor.

En las aplicaciones de energías alternativas, por general, se usa los inversores, porque se requiere un mayor banco de baterías.



Figura 28. Inversor DC/AC

Un inversor o inversor/cargador es un dispositivo que convierte la corriente continua (CC) a corriente alterna (CA) para alimentar una variedad de equipos, entre ellos: herramientas eléctricas, computadoras, electrodomésticos, bombas, equipos de audio/video y más. Los inversores e inversores/cargadores utilizan una batería de vehículo o bote, o baterías separadas suministradas por el usuario para alimentar a los

equipos conectados. Además, el inversor/cargador proporciona CA alterna confiable durante los problemas de energía de la red pública, tales como apagones, caídas de tensión y sobretensiones. Cuando tiene energía suministrada por un servicio público, los inversores/cargadores automáticamente pasan energía a su equipo mientras, al mismo tiempo, recargan las baterías conectadas. Cuando la energía de la red pública no está disponible, como durante un apagón en aplicaciones estacionarias o mientras conduce en aplicaciones móviles, los inversores automáticamente conmutan de la energía del servicio público a energía de respaldo de la batería.

Las características importantes del inversor y del inversor/cargador son:

- ✓ Conversión de corriente continua (CC) a corriente alterna (CA).
- ✓ Fuente móvil de CA: portátil y de montaje permanente.
- ✓ Los modelos de potencia superior, pueden alimentar simultáneamente varios equipos.
- ✓ Salida culminante de tensión de potencia máxima para manejar el arranque de equipos de alto consumo.
- ✓ Su eficiencia está calificada superior al 90% para garantizar que más energía de batería se usa para hacer funcionar los equipos conectados.
- ✓ La función de apagado automático por batería baja, garantiza que la energía de la batería siempre está disponible para el arranque de los equipos.
- ✓ Salida estable controlada por microprocesador para ayudar al equipo a desempeñarse al máximo.
- ✓ Salida de frecuencia controlada en la mayoría de los modelos que permite enchufar las más amplia variedad de equipos.
- ✓ La mayoría de los modelos cuenta con hasta 200% de salida continua por hasta 10 segundos para satisfacer la necesidad de energía extra durante el arranque de equipos y herramientas de gran potencia.
- ✓ La mayoría de los modelos cuenta con hasta 150% de salida continua por hasta 1 hora para brindar soporte confiable durante más tiempo a equipos y herramientas.
- ✓ Algunos modelos poseen compatibilidad con control remoto a través de un módulo.

- ✓ Los inversores y los inversores/cargadores se suelen usar en aplicaciones móviles que no disponen de CA de la red pública.

Para comprender sus aplicaciones, necesita analizar los diferentes tipos de inversores e inversores/cargadores

Inversores Compactos / Livianos. Los inversores compactos/livianos son más pequeños y cuentan con salida de potencia continua para aplicaciones en negocios móviles, viajes, campamentos, salidas en bote y camiones. Son ideales para alimentar laptops, cargadores de teléfonos celulares, sistemas de juego, reproductores de DVD y otros dispositivos de baja potencia.

Inversores de Alta Potencia .Los inversores de alta potencia están diseñados para aplicaciones industriales, vehículos de flotas, obras, camiones y campamentos/salidas en bote. Brindan salidas máximas de tensión en potencia máxima para manejar el arranque de alto consumo de equipos como taladros, sierras, bombas, motores de sincronización y otros.

Los inversores/cargadores son fuentes de alimentación confiables para aplicaciones ininterrumpibles de respaldo para emergencias. Cuando se cuenta con energía suministrada por la red pública, los inversores/cargadores automáticamente pasan energía a su equipo mientras, al mismo tiempo, recargan las baterías conectadas. Cuando la energía de la red pública no está disponible, como durante un apagón en aplicaciones estacionarias o mientras conduce en aplicaciones móviles, los inversores/cargadores automáticamente conmutan de la energía del servicio público a energía de respaldo de la batería.

Cuando elija un inversor o inversor/cargador, debe tener en cuenta lo siguiente:

- ✓ La potencia total de los dispositivos conectados no debe superar el valor nominal de potencia continuo del modelo.
- ✓ La cantidad de artículos de equipos conectados, para determinar cuántos tomacorrientes se necesitan.
- ✓ La aplicación, para ayudarle a elegir el tipo adecuado de inversor o inversor/cargador.

- ✓ El tipo de inversor de acuerdo a la aplicación.

Las funciones primordiales de un inversor son:

- ✓ Proteger equipos electrónicos delicados (computadoras, televisores, equipo médico, etc.) tiene entonces mejores funciones de protección que por ejemplo un "Nivelmatic" o un "cortapico". Algunos equipos tienen incorporados funciones de elevación de tensión.
- ✓ Generar desde el banco de baterías la energía con 110 V (voltios) de corriente alterna mientras la luz pública no está en condiciones válidas (alta o baja tensión, alta o baja frecuencia, "brownout", apagón, etc.). (PROVIENTO, 2011)

Los inversores no necesitan mantenimiento.

e. MATERIALES Y MÉTODOS.

e.1 *Materiales.*

Los materiales necesarios para el correcto desarrollo de cada una las etapas del proceso investigativo, están detallados a continuación.

✓ Materiales de oficina.

- Computadora.
- Calculadora.
- Impresora.
- Hojas de papel bond.
- Bolígrafos.

✓ Material tecnológico.

- Software:
 - Microsoft Word.
 - Microsoft Excel.
 - Eólico Solar (software Libre desarrollado vía proyecto de tesis CIS-AEIRNNR-UNL).

Esta herramienta informática fue desarrollada por una estudiante de Ingeniería en Sistemas (Genoveva Suing Albito, tema versado “Diseño y construcción de una estación de monitoreo eólica-solar con Software de interpretación de resultados”), el cual utiliza los datos de monitoreo con una frecuencia de 5 minutos para realizar una estimación de los valores promedios de velocidad y potencia eólica por unidad de área, además permite establecer la potencia a varias alturas de referencia, mayores o menores a la altura de monitoreo.

Además, permite extraer la información en forma de tablas organizadas y gráficas cronológicas, las cuales se pueden reportar a la vez por día, semana, mes o año, de acuerdo a los requerimientos del usuario.

Se pudo hacer uso de esta herramienta gracias a que el programa permitió insertar en su base de datos la información de monitoreo de la estación meteorológica (HOBO) instalada en el AEIRNNR-UNL, de esta manera se pudo estimar el potencial eólico y contrastarlo con el método estadístico.

- BHW-PRO-CD (Software de análisis y descarga de información de las estaciones meteorológicas HOBO).

Este software se lo utilizó para la fase de descarga de información del monitoreo, pertenece o es parte de la estación HOBO, adquirida por el AEIRNNR-UNL para el desarrollo de histogramas de información meteorológica con fines investigativos y didácticos.

El software permite programar cómodamente todas las funciones de la estación meteorológica (tiempo de inicio y fin, intervalos de registro), la evaluación y el análisis de los datos registrados en la estación meteorológica.

Tras la descarga de los datos de la estación meteorológica o haber abierto un archivo ya existente, se debe seleccionar los parámetros a ver de entre todos los almacenados por la estación meteorológica. Graficándolos en un plano cartesiano, en donde además se muestra la escala de datos de un parámetro seleccionado. Los datos recogidos por la estación meteorológica son mostrados en la gráfica con la lectura de datos en el eje vertical y en el eje horizontal el tiempo, y la leyenda se muestra debajo del gráfico. Conforme se mueve el cursor a través del gráfico, los valores y el tiempo se mostrarán en la parte inferior de la

pantalla. La siguiente gráfica muestra un histograma presentado por el software en cuestión.

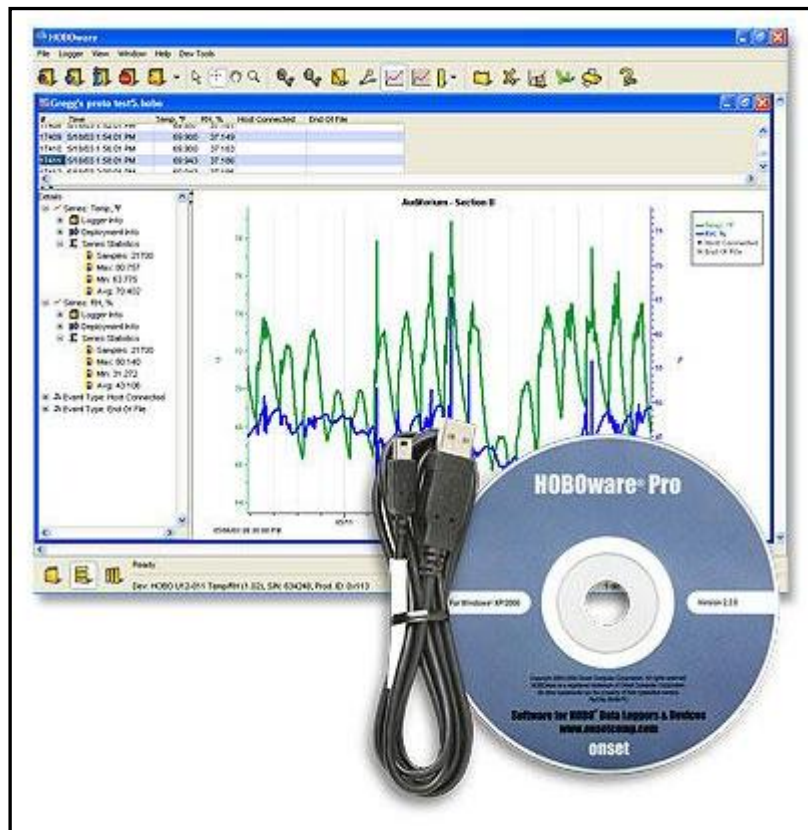


Figura 29. Histograma presentado por el software HOBOWare 8 Pro.

- Power Point.
- AutoCad.
- Equipos de medición:
 - Central de monitoreo HOBOWare. Estación Meteorológica vía USB de 12-bits de resolución, 10 canales para sensores inteligentes, 500.000 lecturas de memoria no-volátil con intervalos, alarmas con salida rela y configurable por el usuario, caja intemperie NEMA 6 con accesorios para montaje en mástil, batería recargable de 4,5 Amperios de 3-5 años de vida útil, dependiendo de las condiciones de uso. Cuenta 5 sensores incluidos: dirección del viento, velocidad del viento, temperatura, humedad relativa del aire y pluviosidad.

Esta estación meteorológica es un equipo multifuncional que permite, además de detectar valores como dirección del viento, velocidad del viento, temperatura, humedad relativa e índice de pluviosidad, también el registro o memorización de tales valores. Puede seleccionar el intervalo de medición de la estación meteorológica. Si lo desea, puede traspasar los datos memorizados desde la estación meteorológica a un ordenador.

También puede usar la estación meteorológica de forma online, transmitiendo los valores directamente al ordenador. Puede adaptar otros sensores a la estación meteorológica. La siguiente figura muestra de manera general la estación meteorológica.

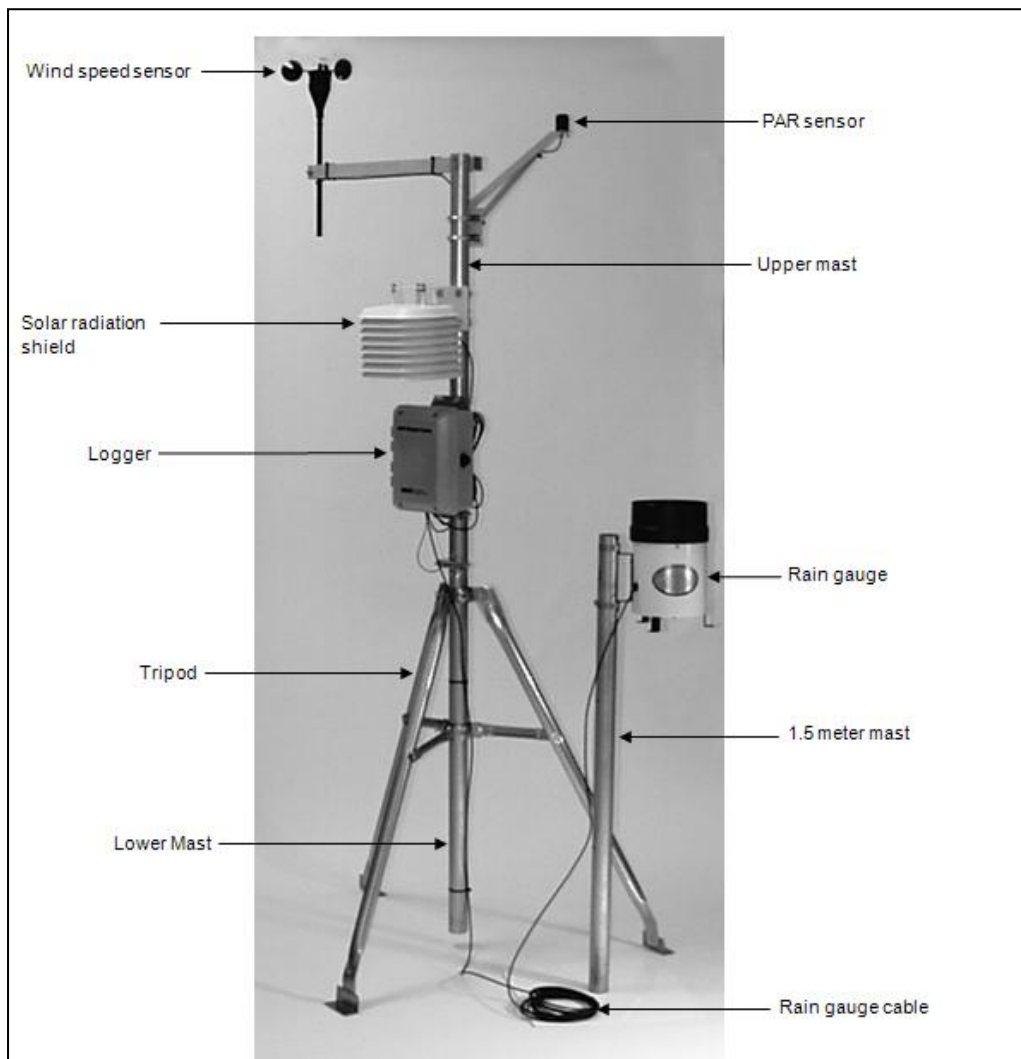


Figura 30. Estación meteorológica usada para adquisición de datos.

- Anemómetro Kestrel K3000. Este equipo fue utilizado en la fase de análisis de rendimiento del sistema de aerogeneración, el medidor Kestrel K 3000 realiza las funciones de: anemómetro, termómetro e higrómetro.

Fabricado con cojinetes de rubí y controlado mediante un microprocesador electrónico, permite realizar mediciones de alta precisión incluso en las condiciones más adversas.

Su pequeño tamaño, compacto diseño y alto grado de protección le confiere una gran versatilidad, haciendo que resulten ideales para múltiples aplicaciones. La figura 31 muestra el equipo mencionado.



Figura 31. Anemómetro utilizado en la fase de rendimiento del equipo instalado.

- Contador de revoluciones análogo.
- Multímetro digital.
- Pinza Amperimétrica. (PROVIENTO, 2011)

e.2 Métodos

- **Método analítico:** Con ayuda de este método se pudo investigar diseños y sistemas relacionados con el presente proyecto de tesis, permitiendo describir y distinguir sus partes constitutivas y sus respectivas funciones, para de esta forma tener un

conocimiento claro y conciso de cómo está compuesto un sistema de generación de energía eléctrica mediante energía eólica.

- **Método sintético:** Una vez analizado los diversos componentes del sistema de aerogeneración se hace uso de la síntesis de información para lograr una fuente de consulta compacta para la parte de diseño del sistema.
- **Método experimental:** A través de este método se pudo obtener información referente al funcionamiento in situ del equipo y su posterior evaluación, funcionamiento y rendimiento.
- **Método inductivo:** Mediante este método fue posible establecer conclusiones del funcionamiento de la totalidad del sistema y de cada uno de los componentes, basados en datos o información real obtenida de la fase experimental.
- **Método deductivo:** Se utilizó para el dimensionamiento, diseño y selección de los diferentes componentes ya que se partió desde nociones generales del posible funcionamiento, hasta llegar a cada una de las partes que conformarán al sistema.

El proceso metodológico del proyecto se desarrolló partiendo desde la interrogante de ¿cuáles son las unidades de análisis más importantes?, las mismas que las resumo a continuación.

- ✓ Necesidad energética de la vivienda rural sostenible de interés social.
- ✓ Potencial eólico existente en el sector.
- ✓ Sistemas de aprovechamiento eólico (Aeromotor).
- ✓ Sistemas de generación de energía eléctrica acoplables a aerogeneradores.
- ✓ Sistemas de captación, almacenamiento y transducción de la energía eléctrica con fines de aprovechamiento
- ✓ Fuentes bibliográficas y de consulta sobre estudios similares o pertinentes al tema.

Luego se determinó cuáles son los problemas posibles de la investigación, los cuales se resumen en la siguiente lista.

- ✓ La inexistencia de un estudio de factibilidad sobre el aprovechamiento del recurso eólico en el sector de investigación.
- ✓ La falta del diseño de un sistema de aerogeneración que brinde la información pertinente a nuestro tema de estudio.

- ✓ La escasa información técnica sobre los equipos de generación y aprovechamiento de la energía eólica.
- ✓ Los medios para poder analizar y concluir sobre la eficacia y rendimiento del equipo.
- ✓ Optimizar el proceso de aerogeneración y obtener la mayor energía generada.

Conocidas las unidades de análisis y los posibles problemas, se trabajó sistemáticamente con la siguiente metodología:

- ✓ Revisión general del estado del arte sobre sistemas de aerogeneración en la Universidad Nacional de Loja.
- ✓ Organización de la información adquirida.
- ✓ Medición y cuantificación del potencial eólico en el sector de estudio.
- ✓ Análisis de las características del recurso.
- ✓ Deducción de cuál es el sistema adecuado de aerogeneración.
- ✓ Esquematación y caracterización de todos los componentes del sistema basado en el recurso a explotar.
- ✓ Dimensionamiento de los componentes.
- ✓ Búsqueda de componentes y adquisición de los mismos.
- ✓ Adecuación del lugar de emplazamiento.
- ✓ Planificación de ensamblaje del equipo.
- ✓ Pruebas funcionales del aerogenerador.
- ✓ Análisis general de posibles fallas existentes en el sistema instalado.
- ✓ Planificación de conexión y acoplamiento con los sistemas de obtención de energía eléctrica pertenecientes a la casa de interés social.
- ✓ Análisis operacional y de rendimiento del equipo.
- ✓ Caracterización general del nuevo sistema.
- ✓ Socialización de los resultados obtenidos.

El proceso metodológico detallado anteriormente está basado en los métodos científicos de orden teórico práctico, como la observación sistemática; mediante medición, entrevista, deducción, análisis y síntesis entre otros, esto debido a los múltiples campos que implica el presente estudio.

Toda la información sobre el tema de estudio fue procesada de la siguiente forma:

- ✓ *Observaciones realizadas:* luego de redactadas y organizadas fueron llevadas a documento digital, siendo analizadas y categorizadas para su uso en las diferentes etapas de diseño.
- ✓ *Información de consultas, entrevistas:* Estas fueron recopiladas, organizadas, analizadas y resumidas, para su posterior digitalización y uso en las diferentes etapas de la investigación.
- ✓ *Mediciones y/o monitoreos:* Una vez obtenidos, éstos fueron descargados en un archivo digital del tipo hoja de cálculo (tablas de datos cronológicos) para luego ser procesados en las diferentes herramientas informáticas con las que contaba el equipo de investigación.

f. RESULTADOS.

f.1 Descripción del sitio de emplazamiento y requerimiento del sistema.

El sitio de emplazamiento del sistema de aerogeneración está ubicado junto a la vivienda rural sostenible de interés social del AEIRNNR, en un sector exclusivo para los sistemas de generación de energía eléctrica limpia (compuesto por un sistema fotovoltaico y el propio aerogenerador), estos sistemas combinados soportarán las necesidades de recurso eléctrico.

El sitio de emplazamiento fue seleccionado por las autoridades del AEIRNNR y desde nuestro punto de vista presenta las siguientes ventajas y desventajas:

Ventajas:

- ✓ Presenta facilidad de acceso a los equipos.
- ✓ Presenta facilidad para realizar monitoreos operacionales.
- ✓ Es un buen sitio para el proceso de enseñanza aprendizaje referente a explotación de recursos renovables, por estar dentro del AEIRNNR.

- ✓ Por la cercanía entre equipos de generación y de almacenamiento de energía, se evita pérdidas por caídas de tensión, muy frecuentes en sistemas de corriente continua.

Desventajas:

- ✓ Por estar dentro de una zona edificada, presenta pérdidas en la velocidad del viento.
- ✓ Existe interferencia en la obtención de datos reales aprovechables.
- ✓ Presenta una gradiente de velocidad del viento no favorable, por lo que la altura de monitoreo y de montaje del equipo debe aumentar, para lograr un rendimiento racional.
- ✓ No es un lugar que posea buenos vientos.
- ✓ Los antecedentes sobre explotación del recurso eólico en el sector, reflejan mala disponibilidad del recurso.
- ✓ No existe un histograma de las características del viento del sector.

Entre otros, estas son las características del sector seleccionado, de ello se trata de optimizar la instalación con el fin de aprovechar al máximo los recursos existentes.

Una vez definido el lugar de emplazamiento es necesario conocer también las características de la carga a la cual alimentará el sistema.

La casa sostenible de interés social posee cuatro habitaciones, tres de ellas destinadas a oficinas o sitios de trabajo docente-estudiantil y la cuarta destinada a bodegaje de equipos y herramientas.

En nuestro caso se dimensiona el equipo de aerogeneración para solventar los requerimientos de alumbrado de cada una de las habitaciones, además de la energía para alimentar una computadora en cada oficina y un retroproyector en la oficina principal.

Según la metodología utilizada o recomendada por CODESO (empresa dedicada a la implementación y capacitación sobre aprovechamiento de los recursos renovables) en su sitio www.codeso.com se necesitaría solventar la siguiente cantidad de energía eléctrica.

Tabla 10. Metodología de cálculo de energía a suministrar por el equipo aerogenerador.

DETERMINACIÓN DE ENERGÍA NECESARIA					
Cantidad	Equipo	Potencia	Potencia Subtotal	Horas de uso / día	Energía
<i>u</i>		<i>Vatios</i>	<i>Vatios</i>	<i>h</i>	<i>Vatios-hora</i>
A	B	C	$D=(A \times C)$	E	$F=(D \times E)$
4	Foco fluorescente	20	80	4	320
3	Computadora	200	600	2	1200
1	Retroproyector	100	100	1	100
1	Otros	100	100	1	100
Total (Wh-día):					1720

Fuente: *Modelo* www.codeso.info/Ejemplo02.html, Datos: Los autores.

En la tabla anterior se establece el uso de focos del tipo ahorrador con una potencia base de 20W y de un computador normal sin más accesorios que una impresora, las horas de uso por día son establecidas bajo el criterio de solventar la energía necesaria para medio día de trabajo de oficina, la necesidad restante de energía puede ser suministrada por el equipo fotovoltaico o por otra de las fuentes de energía renovable con las que contará la casa sostenible.

f.2 Partes del sistema de aerogeneración.

Como se puede observar en el acápite anterior, el tipo de cargas existentes en la casa sostenible son exclusivamente de orden domiciliario (110V- AC) por lo que es necesaria la implementación de un sistema que suministre corriente alterna.

De acuerdo a lo mencionado se hace imperioso el uso de un grupo de baterías que almacenen la energía y aseguren su suministro por un tiempo adecuado.

En nuestro caso, se considera una reserva de dos días para evitar desabastecimientos generados por irregularidades del propio recurso eólico y en cuanto se refiere a equipos, el uso de un *controlador de carga y descarga* del banco de baterías junto a un *Transformador - Inversor - Regulador* de corriente continua (12V) a corriente alterna (120V), todo esto con el fin de que el suministro eléctrico sea constante, de buena calidad y que por otra parte no ponga en riesgo ninguno de los componentes de generación y reserva de energía. Lo mencionado se puede lograr ya que en la actualidad este tipo de equipos poseen tecnología sofisticada, de orden electrónico, siendo capaz de regular, controlar y adecuar la entrada y salida de energía.

De lo mencionado, las partes que conforman el equipo de aerogeneración y suministro de energía son:

- ✓ Un aerogenerador.
- ✓ Banco de baterías.
- ✓ Controlador de carga y descarga de las baterías (DC).
- ✓ Inversor de energía eléctrica. (Transformador, inversor, regulador de descarga en AC).
- ✓ Cables y terminales de interconexión.

La siguiente figura muestra de manera general los componentes:

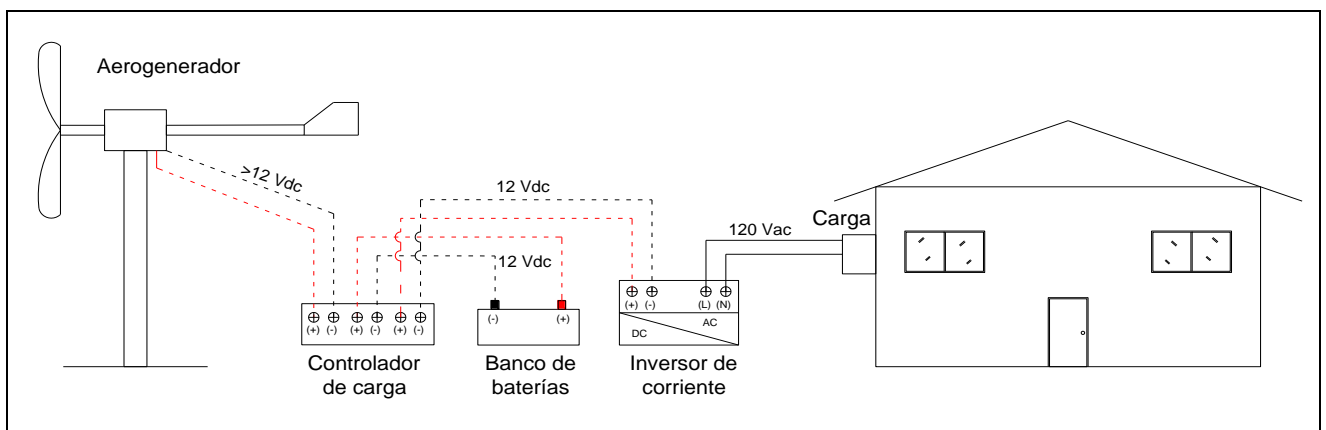


Figura 32. Esquema de componentes del sistema planteado. Fuente: Autores.

f.3 Dimensionamiento y selección de equipos.

Conocida la energía por día requerida y los componentes que conformarán el sistema, se procede a dimensionar cada uno de los elementos basados en las condiciones operacionales y los parámetros eléctricos de los mismos.

f.3.1 Dimensionamiento y selección del aerogenerador. De lo visto anteriormente es necesario solventar la energía equivalente a 1.72 (Kw-h)/día, es de acuerdo a esta carga que se dimensionará el equipo de aerogeneración. Para ello es necesario determinar inicialmente el potencial del recurso en el sector y posterior seleccionar el aerogenerador que se adapte a dichas condiciones respecto a la potencia requerida.

En definitiva se hará referencia al monitoreo del recurso eólico del lugar de emplazamiento (Velocidad del aire y dirección del viento) para determinar la configuración de aerogenerador y su ubicación (altura de emplazamiento).

f.3.1.1 Características del recurso eólico en el sector de emplazamiento. Para conocer a breves rasgos las características del recurso eólico del sector, el grupo de trabajo se propone realizar un monitoreo del viento durante dos meses considerados de vientos comunes, ya que por lo contrario y según lo publicado en (WIKIPEDIA, 2010) los meses de vientos en nuestra localidad son Junio, Julio y Agosto.

Este monitoreo se lo realiza con el propósito de dimensionar al aerogenerador para las condiciones de viento habituales del sector, puesto que si se dimensiona para las condiciones de vientos fuertes, el sistema podría no ser útil la mayoría de los meses.

Por razones de tiempo y de recursos, el monitoreo hace referencia a los meses de Febrero y Marzo del 2010, en este lapso se recolectó datos con una estación meteorológica (marca HOBO) instalada en las cercanías del sitio de emplazamiento a una altura de 9m, lo cual es lo recomendado en la bibliografía consultada. Además se de los datos instantáneos de velocidad del viento se registró su dirección.

Una vez obtenidos los datos de monitoreo (velocidad y dirección del viento), se procede a obtener los resultados referentes al máximo potencial eólico del sector en estudio, en conjunto con la caracterización de la dirección del viento.

Para la hallar las características de la dirección del viento se utilizará la metodología gráfica denominada “*rosa de los vientos*”, la misma que se subdivide en dos formas de representación; la primera hace referencia a los porcentajes de tiempo que el viento de una determinada dirección (rosa de frecuencias porcentuales); por otro lado la segunda forma de representación se refiere a las velocidades medias en función de sus frecuencias porcentuales.

En la estimación del máximo potencial del sector se utilizó dos métodos; el primero es basado en la estadística de datos sobre la velocidad del viento, para encontrar su valor medio y su posterior relación con la ecuación del potencial eólico; el segundo método determina el potencial eólico del sector mediante el promedio de las potencias eólicas instantáneas. Comprobando de esta manera, que los resultados obtenidos mediante los dos métodos descritos no difieran bruscamente.

A continuación se presentan mediante tablas tabuladas las características del recurso eólico del sector durante los meses de febrero y marzo del 2010. Datos que son la base para el dimensionamiento del aerogenerador.

f.3.1.1.1 Datos de dirección del viento. Durante los meses de monitoreo se obtuvieron valores promedios durante cinco minutos que constituyen 16704 datos de dirección del viento, los mismos generan valores medios horarios de dirección (1392 datos) que fueron utilizados para la representación gráfica de la rosa de los vientos.

Las siguientes tablas presentan los valores promediados para cada hora, tabulados respecto a su dirección, en ocho y dieciséis ejes respectivamente.

Tabla 11. Frecuencias horarias por dirección del viento durante el mes de febrero y marzo del 2010. (8 ejes).

DIRECCIÓN	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO
Frecuencia N° de Horas	199	368	135	126	452	83	13	16
Total de Horas	1392							

Fuente: Los Autores.

Tabla 12. Frecuencias horarias por dirección del viento durante el mes de febrero y marzo del 2010. (16 ejes).

DIRECCIÓN	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSO	SO	OSO	O	ONO	NO	NNO
Frecuencia N° de Horas	103	205	196	123	58	18	44	186	263	113	37	13	5	5	6	17
Total de Horas	1392															

Fuente: Los autores

Es necesario determinar los porcentajes de número de horas para cada dirección durante los meses de monitoreo, para graficar la rosa de los vientos correspondiente al tiempo total que el viento procede de una determinada dirección. En las tablas siguientes se presenta los porcentajes mencionados.

Tabla 13. Porcentajes horarios por dirección del viento durante los meses de febrero y marzo del 2010. (8 ejes).

DIRECCIÓN	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO
Porcentaje de Horas	14.30	26.44	9.70	9.05	32.47	5.96	0.93	1.15
Total	100%							

Fuente: Los autores.

Tabla 14. Porcentajes horarios por dirección del viento durante los meses de febrero y marzo del 2010. (16 ejes).

DIRECCIÓN	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSO	SO	OSO	O	ONO	NO	NNO
Porcentaje de Horas	7.40	14.73	14.08	8.84	4.17	1.29	3.16	13.36	18.89	8.12	2.66	0.93	0.36	0.36	0.43	1.22
Total	100%															

Fuente: Los autores.

Con estos resultados se obtienen las primeras rosas de los vientos, antes mencionadas.

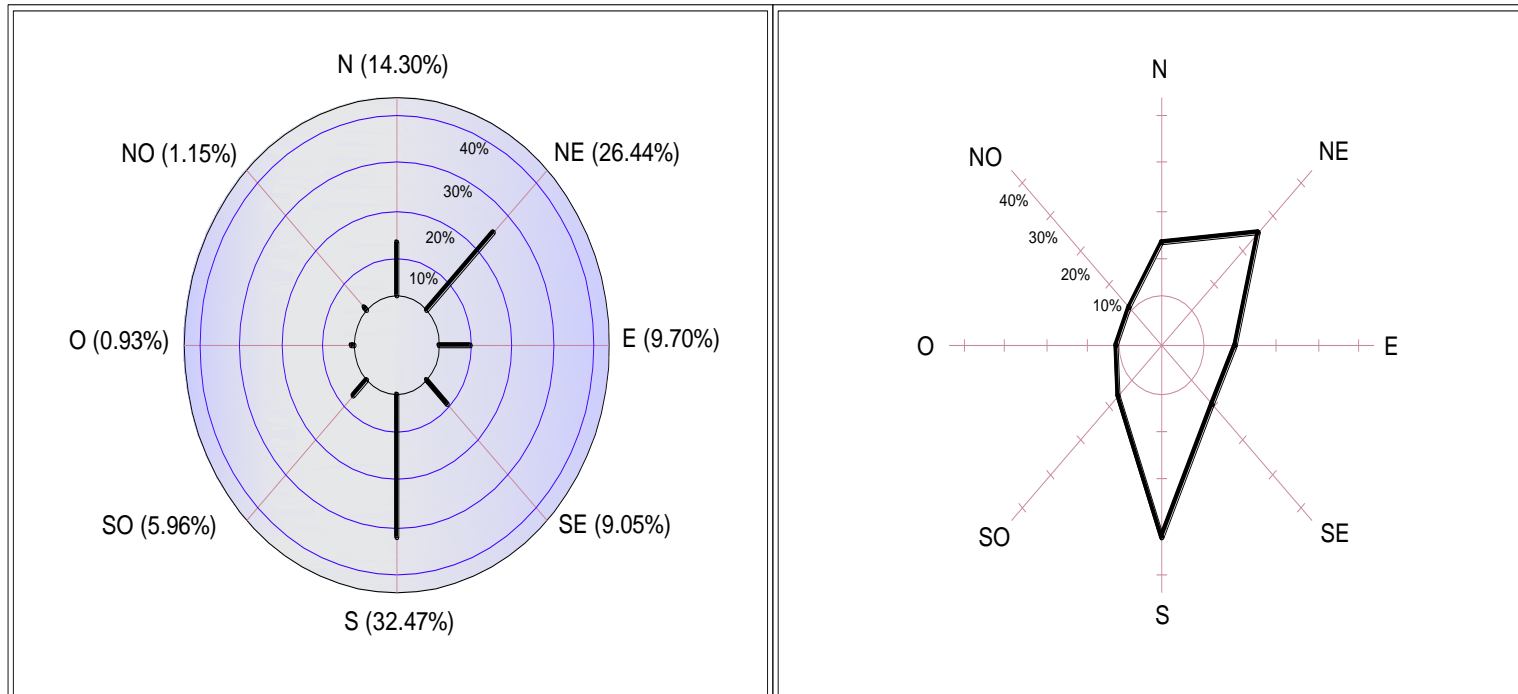


Figura 33. Rosa de frecuencias porcentuales horarias, por dirección del viento durante los meses de febrero y marzo del 2010. (8 ejes).

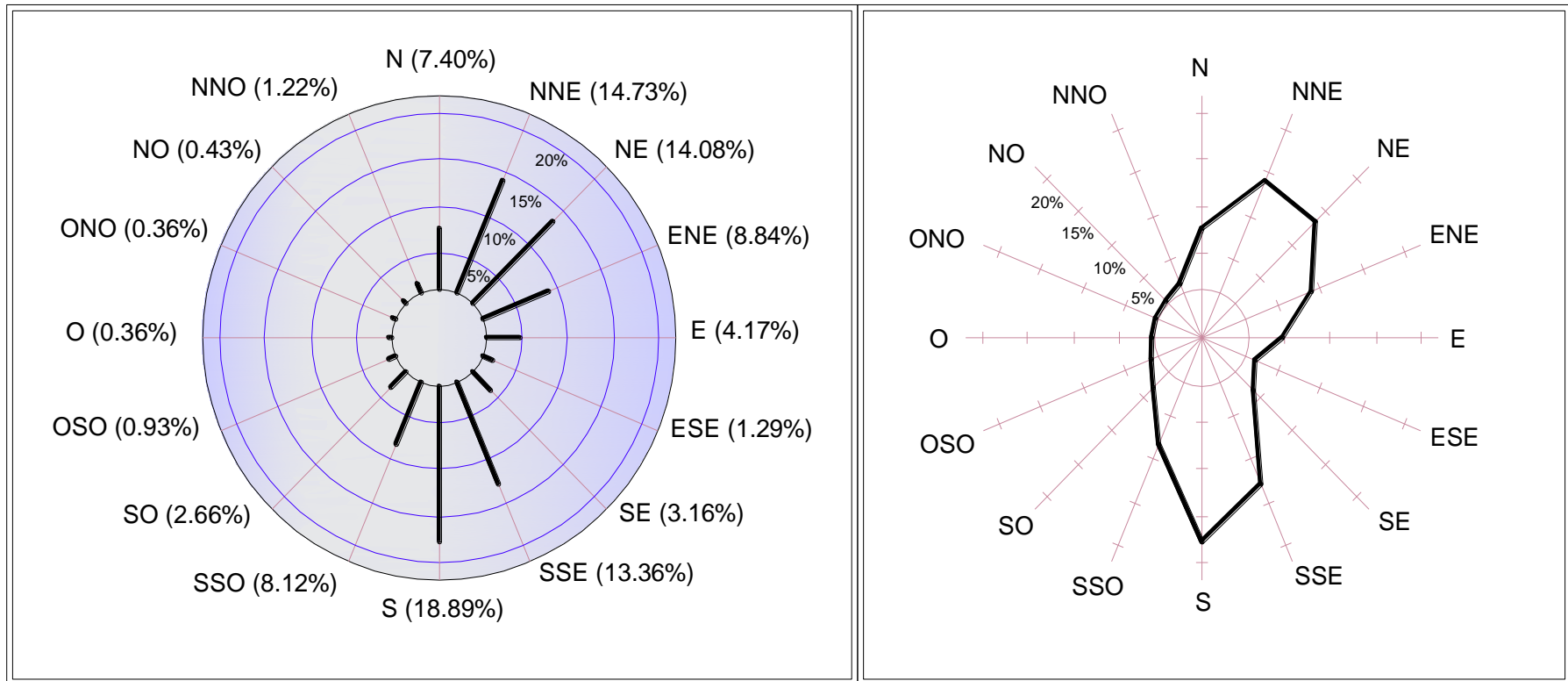


Figura 34. Rosa de frecuencias porcentuales horarias por dirección del viento durante los meses de febrero y marzo del 2010. (16 ejes).

Luego de obtener los porcentajes de frecuencia en cada dirección, se procede a realizar la representación de la velocidad media para cada dirección. Al igual que el caso anterior se detalla mediante tablas las velocidades promedio por cada dirección y posteriormente se representa la rosa de los vientos para ocho y dieciséis rumbos.

Tabla15. Velocidades promedio horarias por dirección del viento durante los meses de febrero y marzo del 2010. (8 ejes).

DIRECCIÓN	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO
Velocidad Media (m/s)	2,38	2,61	2,55	2,05	2,52	2,35	2,37	2,59

Fuente: los Autores.

Tabla16. Velocidades promedio horarias por dirección del viento durante los meses de febrero y marzo del 2010. (16 ejes).

DIRECCIÓN	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSO	SO	OSO	O	ONO	NO	NNO
Velocidad Media (m/s)	2,25	2,51	2,54	2,31	2,09	2,17	2,42	2,06	2,41	2,14	2,57	2,74	2,40	1,70	2,69	2,42

Fuente: los Autores.

Con estos resultados se obtienen las segundas rosas de los vientos, antes mencionadas.

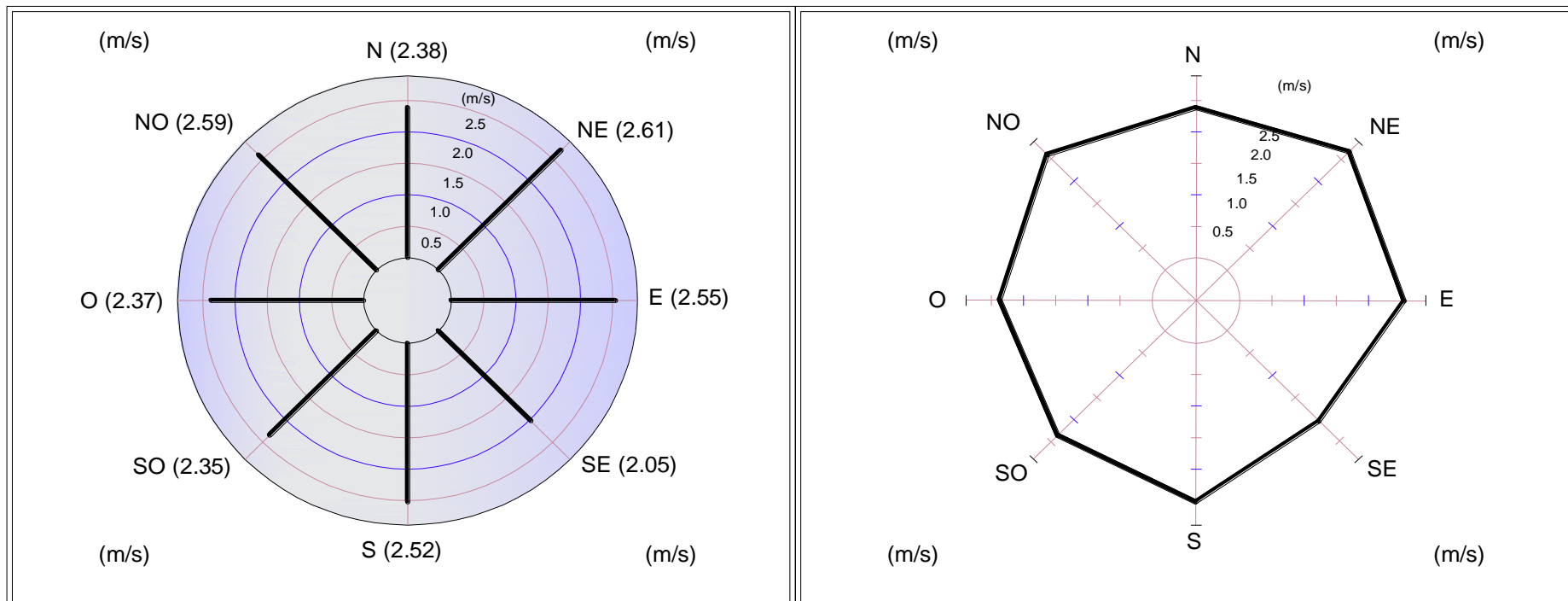


Figura 35. Rosa de velocidad media del viento (m/s) para cada dirección durante los meses de febrero y marzo del 2010. (8 ejes).

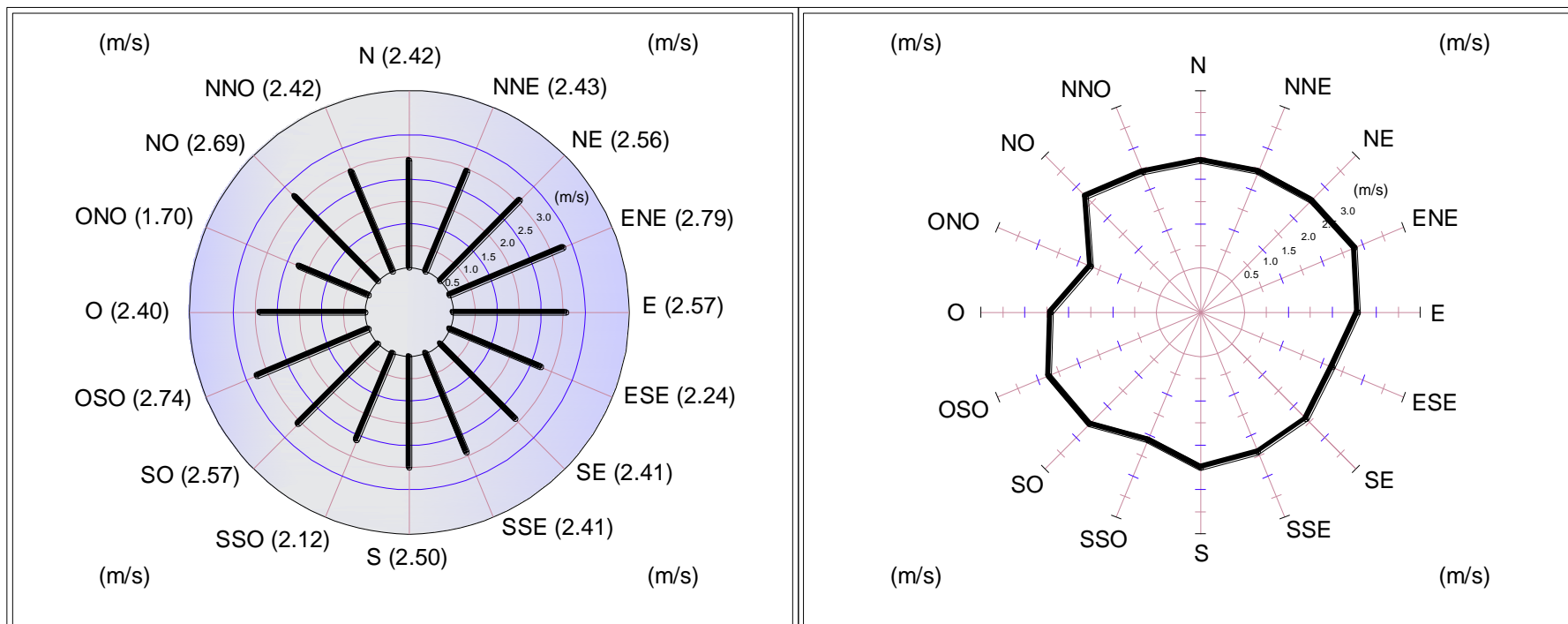


Figura 36. Rosa de velocidad media del viento (m/s) para cada dirección durante los meses de febrero y marzo del 2010. (16 ejes).

En las figuras y tablas anteriores se puede observar que la dirección dominante es la Sur, de la cual sopla el viento el mayor porcentaje de las horas de monitoreo, así tenemos:

- ✓ 32.47% en el caso de la rosa de ocho rumbos.
- ✓ 18.89% en el caso de la rosa de dieciséis rumbos.

En el caso de la velocidad media del viento para cada dirección, se observa que los vientos más intensos son:

- ✓ 2,61 m/s que proceden del nor-este y presenta un 26.44% de las horas totales monitoreadas (368 horas), en el caso de la rosa de ocho rumbos.
- ✓ 2,79 m/s que proceden del este-nor-este y presenta un 8,84% de las horas totales monitoreadas (123 horas), en el caso de la rosa de dieciséis rumbos.

También se puede observar que los vientos más frecuentes son:

- ✓ Procedentes del sur con 32,47% correspondiendo a 452 horas, con una intensidad de 2.52 m/s, en el caso de la rosa de ocho rumbos.
- ✓ Procedentes del sur con 18.89% correspondiendo a 263 horas, con una intensidad de 2.50 m/s, en el caso de la rosa de dieciséis rumbos.

Todos los resultados obtenidos nos servirán para determinar y seleccionar el tipo de aeromotor necesario, respecto a su tipo o modo de orientación respecto al flujo de viento, además en caso de utilizar un aeromotor fijo, los resultados nos ofrecen la certeza necesaria para saber en qué dirección es más conveniente direccionarlo.

f.3.1.1.2 Cálculo de potencial eólico (aplicación estadística). El siguiente cálculo se lo realiza a partir de los datos de velocidad del viento monitoreados y promediados por hora y por día, en intervalos iniciales de cinco minutos. Como se mencionó anteriormente éste proceso determina el potencial eólico mediante la obtención de la velocidad media representativa del período de monitoreo. También permite dibujar el histograma de frecuencias relativas que es una función continua de probabilidad y la

curva de frecuencia acumulada o curva de duración de la velocidad que indica el tiempo en el que la velocidad del viento se mantiene superior a un cierto valor.

Una vez dispuestos los datos se los procede a agrupar y distribuir en clases o categorías, lo cual permite determinar las frecuencias de clase, y así también el número de datos que pertenecen a cada una de ellas. Cada clase está definida en un rango de 1m/s, constituyéndose además los puntos medios de cada clase.

Las clases establecidas son:

Tabla 17. Clases o categorías para el cálculo del potencial eólico (método estadístico).

INTERVALO DE CLASE	CENTRO DE CLASE
<i>(m/s)</i>	<i>(m/s)</i>
$0 \leq V \leq 1$	0,5
$1 < V \leq 2$	1,5
$2 < V \leq 3$	2,5
$3 < V \leq 4$	3,5
$4 < V \leq 5$	4,5
$5 < V \leq 6$	5,5
$6 < V \leq 7$	6,5

Fuente: Los autores.

Con las clases antes mencionadas se tabula estadísticamente las frecuencias relativas, las frecuencias acumuladas de los datos de promedio por hora correspondiente al mes de monitoreo y además se realizan cálculos auxiliares para obtener la velocidad media y la desviación estándar. La tabla siguiente muestra los resultados obtenidos.

Tabla 18. Tratamiento estadístico de los datos de velocidad monitoreados.

INTERVALO DE CLASE (m/s)	CENTRO DE CLASE v_i (m/s)	FRECUENCIA DE CLASE n_i (horas)	FRECUENCIA RELATIVA $f_i = n/N$	FRECUENCIA ACUMULADA F	PRODUCTOS	
					$f_i \times v_i$	$f_i \times v_i^2$
0 <= V <=1	0,5	259	0,186	0,186	0,0930	0,046
1 < V <=2	1,5	305	0,219	0,405	0,3285	0,492
2 < V <=3	2,5	314	0,225	0,630	0,5625	1,406
3 < V <=4	3,5	308	0,221	0,851	0,7735	2,707
4 < V <=5	4,5	170	0,123	0,974	0,5535	2,490
5 < V <=6	5,5	33	0,024	0,998	0,1320	0,726
6 < V <=7	6,5	3	0,002	1,000	0,0130	0,084
		N=1392 horas			2,456	7,954
RESULTADOS						
	HORAS TOTALES	VELOCIDAD MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA			
	1392	2,46 m/s	7,954 m/s			

Fuente: Los Autores.

Del análisis estadístico, los resultados obtenidos son:

- ✓ La velocidad media tiene un valor de **2,46 m/s**.
- ✓ La desviación típica es de **7,95 m/s**.

Los histogramas de resultados en base al análisis antes mencionado son:



Figura 37. Histograma de frecuencias relativas para velocidades horarias de viento para los meses de febrero y marzo del 2010.

Del histograma anterior se deduce lo siguiente:

- ✓ El 18.6% de las horas (259), la velocidad del viento se encuentra entre 0-1 m/s.
- ✓ El 21.9% de las horas (305), la velocidad del viento se encuentra entre 1-2 m/s.
- ✓ El 22.5% de las horas (314), la velocidad del viento se encuentra entre 2-3 m/s.
- ✓ El 22.1% de las horas (308), la velocidad del viento se encuentra entre 3-4 m/s.
- ✓ El 12.3% de las horas (170), la velocidad del viento se encuentra entre 4-5 m/s.
- ✓ El 2.4% de las horas (33), la velocidad del viento se encuentra entre 5-6 m/s.
- ✓ El 0.2% de las horas (3), la velocidad del viento se encuentra entre 6-7 m/s.

De los rangos de velocidad con más frecuencia se obtiene la velocidad promedio del viento.



Figura 38. Histograma de frecuencias acumuladas para velocidades horarias de viento para los meses de febrero y marzo del 2010.

Del histograma anterior se puede observar el porcentaje de horas del período considerado para los que la velocidad media del viento es menor o igual a un cierto valor de velocidad. En forma resumida se obtiene:

- ✓ Se presentan un 18.6% de las horas (259), en los que la velocidad media por hora será menor o igual a 1 m/s.
- ✓ Se presentan un 40.5% de las horas (564), en los que la velocidad media por hora será menor o igual a 2 m/s.
- ✓ Se presentan un 63% de las horas (877), en los que la velocidad media por hora será menor o igual a 3 m/s.
- ✓ Se presentan un 85,1% de las horas (1185), en los que la velocidad media por hora será menor o igual a 4 m/s.
- ✓ Se presentan un 97.4% de las horas (1356), en los que la velocidad media por hora será menor o igual a 5 m/s.
- ✓ Se presentan un 99,8% de las horas (1389), en los que la velocidad media por hora será menor o igual a 6 m/s.
- ✓ Se presentan un 100% de las horas (1392), en los que la velocidad media por hora será menor o igual a 7 m/s.

Para determinar las características del viento y en particular para estudios de aprovechamiento de la energía eólica es conveniente trabajar con velocidades horarias a lo largo del periodo de estudio.

Una vez definida la velocidad media de forma estadística, se procede a calcular estadísticamente el potencial eólico del sector. Para este proceso se necesitan los siguientes datos adicionales:

- ✓ **La temperatura ambiente promedio del sector.**-En este caso como resultado del monitoreo se obtuvo un valor de temperatura promedio **de 18.66 °C (291.66K)**.
- ✓ **La presión atmosférica del sector.**- El sistema de monitoreo entregó un valor de 0.779 bar que es equivalente a 11.3 psi o **77885.4 Pa**, que está de acuerdo a los datos generales de presión atmosférica de la ciudad de Loja.
- ✓ **Valor de la constante de los gases R', para el aire.**- Este valor como su nombre lo menciona es una constante general, por lo que se le debe relacionar con el peso molecular de fluido en estudio, en este caso el aire, cuyo peso molecular es **28.9645 Kg-mol**. El valor de R' para el aire es 287 J/ (Kg. K).
- ✓ **Densidad del aire.**-Conocidos los valores antes mencionados se calcula el valor medio de la densidad del aire en el sector, así tenemos:

$$\begin{aligned}\tilde{n}_{aire} &= \frac{P_{sector}}{R' \times T_{ambiente}} \\ \tilde{n}_{aire} &= \frac{77885.44 \frac{N}{m^2}}{287 \frac{J}{Kg \times K} \times 291.66K} \\ \tilde{n}_{aire} &= 0.93 \frac{Kg}{m^3}\end{aligned}$$

Con este último dato estimamos el máximo potencial eólico por unidad de área del sector en estudio. En la tabla siguiente se realiza el proceso de cálculo pertinente, basado en la tabla estadística de intervalos de clases antes analizada:

Tabla 18. Tratamiento estadístico para determinación de la densidad de potencial eólico durante los meses de febrero y marzo del 2010.

INTERVALO DE CLASE	CENTRO DE CLASE	FRECUENCIA RELATIVA	ρ aire	DENSIDAD DE POTENCIA DISPONIBLE POR UNIDAD DE ÁREA	
				Pd/A	$(Pd/A)f_i$
	v_i	$f_i = n/N$		$(\frac{1}{2} \rho \times v_i^3)$	
(m/s)	(m/s)		(Kg/m ³)	(W/m ²)	(W/m ²)
0 <= V <= 1	0,5	0,186	0.93	0,058	0,011
1 < V <= 2	1,5	0,219		1,569	0,344
2 < V <= 3	2,5	0,225		7,266	1,635
3 < V <= 4	3,5	0,221		19,937	4,406
4 < V <= 5	4,5	0,123		42,373	5,212
5 < V <= 6	5,5	0,024		77,364	1,857
6 < V <= 7	6,5	0,002		127,701	0,255
				SUMATORIA:	13,72 W/m²

Fuente: Los Autores.

Como se puede observar, en la tabla anterior se determina la densidad de potencia disponible por unidad de área, que da como resultado 13.72 Vatios por cada metro cuadrado de sección transversal al flujo de aire, este valor es el máximo de potencia eólica disponible, siendo la base para el dimensionamiento de los equipos de aprovechamiento energético.

Del análisis anterior, también se puede afirmar que el potencial eólico disponible es pobre, ya que según la bibliografía consultada (Libro de Energía Eólica de Miguel Villarrubia), se sabe que con potenciales inferiores a 200w/m² a la altura del buje de la turbina, la viabilidad económica del aerogenerador es mínima y que de acuerdo a la práctica, por lo general solo se contemplan posibles emplazamientos en sitios en donde la velocidad media anual supere los 6m/s. Esto también se ratifica, debido a que la velocidad de arranque de muchas turbinas está por encima del valor de velocidad media del viento en el sector.

f.3.1.1.3 Comprobación del valor de la potencia eólica máxima obtenida.-Para dar mayor seguridad sobre valor de la potencia por unidad de área, existe un método que estima el potencial máximo a través del promedio de cada una de las potencias instantáneas (para cada valor de medición) obtenidas a partir de cada valor de velocidad

recolectado cada 5 minutos, cada hora, cada día y cada mes respectivamente, en referencia a la densidad y presión barométrica promedio del sector.

La ecuación de potencial es la misma, lo que difiere, es que el resultado final obtenido, es la caracterización del potencial eólico del lugar correspondiente para cada velocidad promediado para un determinado periodo de tiempo, resultando la potencia media eólica por unidad de superficie. Este método fue aplicado y compilado en una herramienta informática desarrollada vía proyecto de tesis, en la carrera de Ingeniería en sistemas.

Para poder tabular la información obtenida, es necesario ordenar los datos entregados por la estación meteorológica en un archivo EXCEL para su posterior importación al software.

Este software se denomina EÓLICO-SOLAR y presenta una interfaz de trabajo muy sencilla, obteniendo a su vez información fácil de interpretar.

A continuación se muestran los resultados (tablas y gráficas de potencia media) de los dos meses monitoreados basados en sub promedios cada 5 minutos, cada hora y el resultado final obtenido del mes completo (promedio del mes). Los resultados finales varían con un margen insignificante.

Tabla 19. Mediciones de Velocidad del Viento del mes de Febrero del 2010.

País: ECUADOR

Provincia: LOJA

Cantón: LOJA

Barrio: UNIVERSITARIA

Sector: AREA DE ENERGIA

Promedio de velocidad

Velocidad Media (m/s): 2.66

Temperatura Amb. Promedio °C: 18.7

Velocidad Mínima (m/s): 1.21

Densidad del Aire (kg/m³): 0.93

Velocidad Máxima (m/s): 3.83

Nº	Fecha	V (m/s)	V (km/h)	V (nudos)
1	01/02/2010	2.97	10.69	5.77
2	02/02/2010	2.11	7.6	4.1
3	03/02/2010	2.71	9.76	5.26
4	04/02/2010	3.26	11.74	6.33
5	05/02/2010	2.96	10.66	5.75
6	06/02/2010	2.47	8.89	4.8
7	07/02/2010	3.07	11.05	5.96
8	08/02/2010	2.78	10.01	5.4
9	09/02/2010	2.96	10.66	5.75
10	10/02/2010	3.04	10.94	5.91
11	11/02/2010	2.1	7.56	4.08
12	12/02/2010	2.66	9.58	5.17
13	13/02/2010	2.89	10.4	5.61
14	14/02/2010	1.93	6.95	3.75
15	15/02/2010	1.21	4.36	2.35
16	16/02/2010	1.99	7.16	3.87
17	17/02/2010	2.5	9.0	4.86
18	18/02/2010	3.39	12.2	6.59
19	19/02/2010	3.58	12.89	6.95
20	20/02/2010	2.15	7.74	4.18
21	21/02/2010	3.28	11.81	6.37
22	22/02/2010	3.32	11.95	6.45
23	23/02/2010	1.45	5.22	2.82
24	24/02/2010	1.75	6.3	3.4
25	25/02/2010	2.78	10.01	5.4
26	26/02/2010	2.46	8.86	4.78
27	27/02/2010	3.83	13.79	7.44
28	28/02/2010	2.75	9.9	5.34

Fuente: Los Autores.

Datos generales del sector de Monitoreo

País: ECUADOR

Provincia: LOJA

Cantón: LOJA

Barrio: UNIVERSITARIA

Sector: AREA DE ENERGIA

Datos de Monitoreo:

Mes : Febrero

GRÁFICA DE MONITOREO

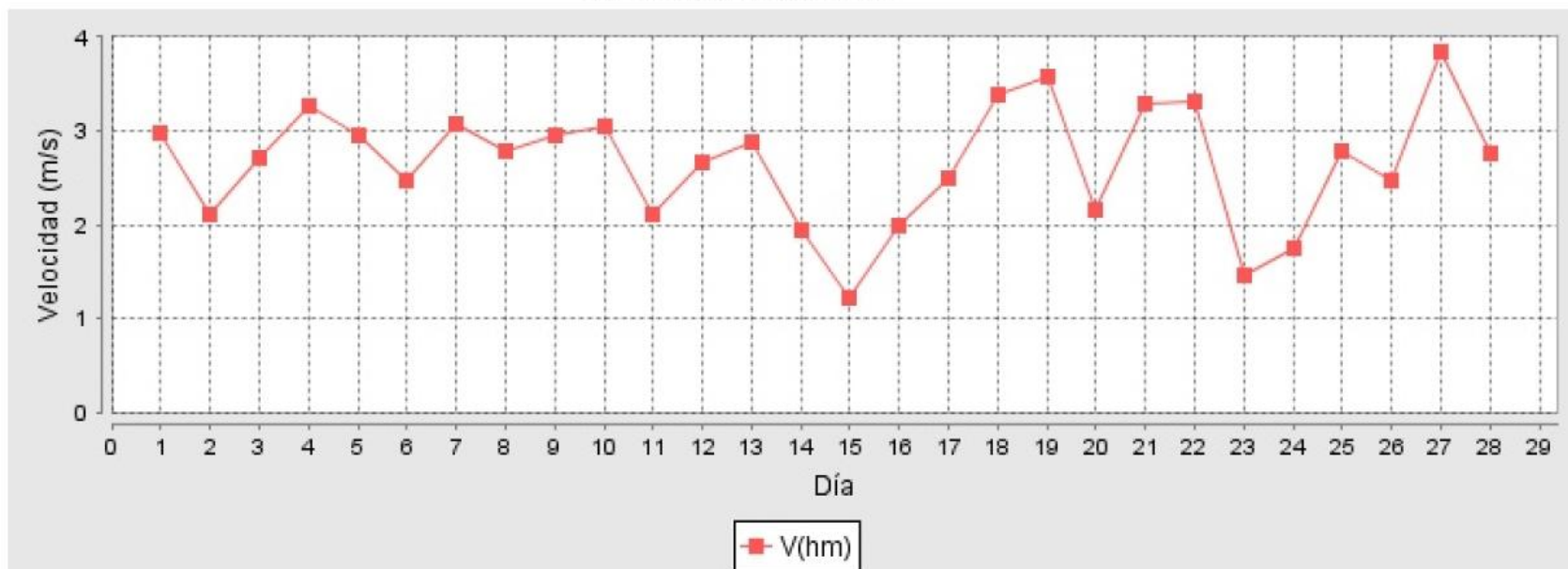


Figura 39. Histograma de Mediciones de Velocidad del Viento del mes de Marzo del 2010.

Tabla 20. Mediciones de Velocidad del Viento del mes de Marzo del 2010.

País: ECUADOR *Provincia:* LOJA
Cantón: LOJA *Barrio:* UNIVERSITARIA
Sector: AREA DE ENERGIA

Promedio de velocidad

Velocidad Media (m/s): 2.32
Velocidad Mínima (m/s): 1.04
Velocidad Máxima (m/s): 3.19

Temperatura Amb. Promedio °C: 18.66
Densidad del Aire (kg/m3): 0.93

Nº	Fecha	V (m/s)	V (km/h)	V (nudos)
1	01/03/2010	2.75	9.9	5.34
2	02/03/2010	1.95	7.02	3.79
3	03/03/2010	2.51	9.04	4.88
4	04/03/2010	3.02	10.87	5.87
5	05/03/2010	2.64	9.5	5.13
6	06/03/2010	2.21	7.96	4.29
7	07/03/2010	2.74	9.86	5.32
8	08/03/2010	2.48	8.93	4.82
9	09/03/2010	2.65	9.54	5.15
10	10/03/2010	2.62	9.43	5.09
11	11/03/2010	1.81	6.52	3.52
12	12/03/2010	2.3	8.28	4.47
13	13/03/2010	2.53	9.11	4.91
14	14/03/2010	1.71	6.16	3.32
15	15/03/2010	1.04	3.74	2.02
16	16/03/2010	1.71	6.16	3.32
17	17/03/2010	2.15	7.74	4.18
18	18/03/2010	2.92	10.51	5.67
19	19/03/2010	3.08	11.09	5.98
20	20/03/2010	1.74	6.26	3.38
21	21/03/2010	2.64	9.5	5.13
22	22/03/2010	2.68	9.65	5.21
23	23/03/2010	1.17	4.21	2.27
24	24/03/2010	1.41	5.08	2.74
25	25/03/2010	2.3	8.28	4.47
26	26/03/2010	2.05	7.38	3.98
27	27/03/2010	3.19	11.48	6.2
28	28/03/2010	2.3	8.28	4.47
29	29/03/2010	2.12	7.63	4.12
30	30/03/2010	2.53	9.11	4.91
31	31/03/2010	2.83	10.19	5.5

Fuente: Los Autores.

Datos generales del sector de Monitoreo

País: ECUADOR **Provincia:** LOJA **Cantón:** LOJA **Barrio:** UNIVERSITARIA **Sector:** AREA DE ENERGIA

Datos de Monitoreo:

Mes : Marzo

GRÁFICA DE MONITOREO

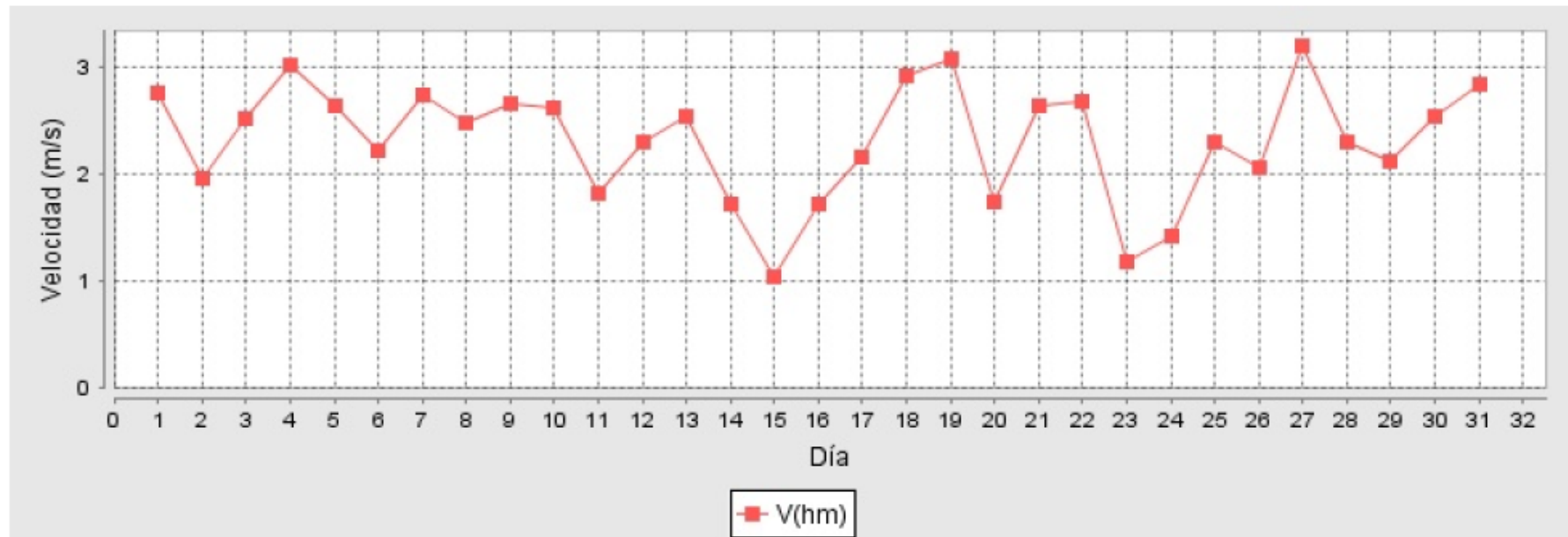


Figura 40. Histograma de Mediciones de Velocidad del Viento del mes de Marzo del 2010.

A continuación se determina la velocidad media de los dos meses monitoreados como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 21. Cálculo de la velocidad media de los meses monitoreados.

MES (2010)	VELOCIDAD MEDIA (m/s)	VELOCIDAD PROMEDIO DEL TIEMPO DE MONITOREO (m/s)
FEBRERO	2.66	2.49
MARZO	2.32	

Fuente: Los Autores.

Como se puede notar la variación de valores de velocidad media es muy pequeña.

Tabla 22. Comparación de la velocidad media calculada en los dos métodos aplicados.

MÉTODO	VELOCIDAD MEDIA (m/s)	PORCENTAJE DE DIFERENCIA (%)
ESTADÍSTICO	2.46	1.2
PROMEDIO INSTANTÁNEO	2.49	

Fuente: Los Autores.

La misma comparación se realiza con la potencia obtenida.

Tabla 23. Promedio de Potencial Eólico del mes de Febrero del 2010.

MONITOREO EÓLICO
Resultado de Potencial Máximo por Mes

País: ECUADOR *Provincia:* LOJA
Cantón: LOJA *Barrio:* UNIVERSITARIA
Sector: AREA DE ENERGIA

Promedio de Potencial

Potencial Medio (watts/m2): 16.68
Potencial Mínima (watts/m2): 3.17
Potencial Máxima (watts/m2): 33.66

Temperatura Promedio °C: 18.7
Densidad del Aire (kg/m3): 0.93

Nº	Fecha	watts/m2	(10E-3)Hp/m2
1	01/02/2010	13.44	18.02
2	02/02/2010	9.92	13.3
3	03/02/2010	11.93	16.0
4	04/02/2010	21.74	29.15
5	05/02/2010	19.16	25.69
6	06/02/2010	14.4	19.31
7	07/02/2010	19.08	25.59
8	08/02/2010	15.75	21.12
9	09/02/2010	15.39	20.64
10	10/02/2010	21.45	28.76
11	11/02/2010	12.98	17.41
12	12/02/2010	12.89	17.29
13	13/02/2010	17.88	23.98
14	14/02/2010	11.63	15.6
15	15/02/2010	3.17	4.25
16	16/02/2010	8.96	12.02
17	17/02/2010	14.05	18.84
18	18/02/2010	22.71	30.45
19	19/02/2010	33.1	44.39
20	20/02/2010	10.0	13.41
21	21/02/2010	30.61	41.05
22	22/02/2010	25.04	33.58
23	23/02/2010	5.06	6.79
24	24/02/2010	10.04	13.46
25	25/02/2010	21.33	28.6
26	26/02/2010	13.11	17.58
27	27/02/2010	33.66	45.14
28	28/02/2010	18.58	24.92

Fuente: Los Autores.

Datos generales del sector de Monitoreo

Pais: ECUADOR

Provinci..LOJA

Cantón: LOJA

Barrio: UNIVERSITARIA

Sector: AREA DE ENERGIA

Datos de Monitoreo:

Mes : Febrero

GRÁFICA DE MONITOREO

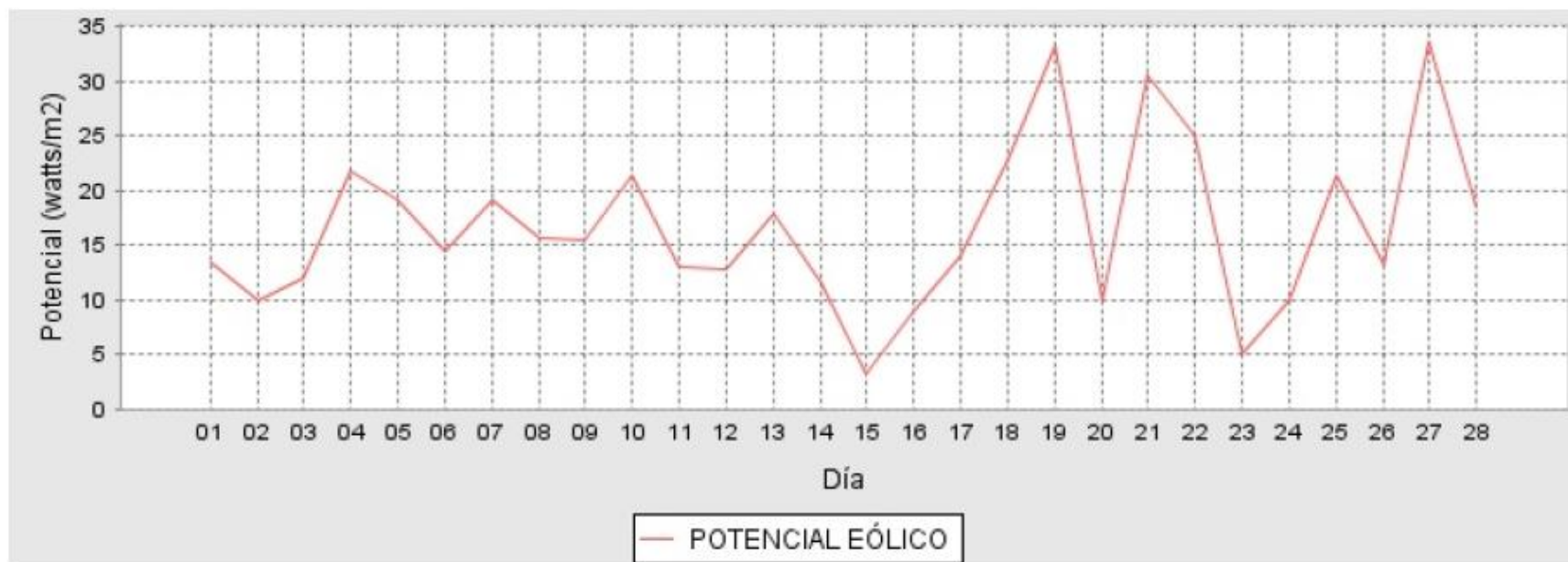


Figura 41. Histograma de Potencial Eólico del mes de Febrero del 2010.

Tabla 24. Promedio de Potencial Eólico del mes de Marzo del 2010.

MONITOREO EÓLICO
Resultado de Potencial Máximo por Mes

País: ECUADOR *Provincia:* LOJA
Cantón: LOJA *Barrio:* UNIVERSITARIA
Sector: AREA DE ENERGIA

Promedio de Potencial

Potencial Medio (watts/m2): 11.04 *Temperatura Promedio °C:* 18.66
Potencial Mínima (watts/m2): 2.03 *Densidad del Aire (kg/m3):* 0.93
Potencial Máxima (watts/m2): 21.2

Nº	Fecha	watts/m2	(10E-3)Hp/m2
1	01/03/2010	10.7	14.35
2	02/03/2010	7.87	10.55
3	03/03/2010	9.48	12.71
4	04/03/2010	17.27	23.16
5	05/03/2010	13.66	18.32
6	06/03/2010	10.26	13.76
7	07/03/2010	13.62	18.26
8	08/03/2010	11.21	15.03
9	09/03/2010	10.96	14.7
10	10/03/2010	13.74	18.43
11	11/03/2010	8.32	11.16
12	12/03/2010	8.28	11.1
13	13/03/2010	12.52	16.79
14	14/03/2010	9.12	12.23
15	15/03/2010	2.03	2.72
16	16/03/2010	5.74	7.7
17	17/03/2010	8.98	12.04
18	18/03/2010	14.53	19.49
19	19/03/2010	21.2	28.43
20	20/03/2010	5.25	7.04
21	21/03/2010	16.06	21.54
22	22/03/2010	13.16	17.65
23	23/03/2010	2.66	3.57
24	24/03/2010	5.28	7.08
25	25/03/2010	12.07	16.19
26	26/03/2010	7.58	10.16
27	27/03/2010	19.47	26.11
28	28/03/2010	11.03	14.79
29	29/03/2010	8.62	11.56
30	30/03/2010	16.73	22.44
31	31/03/2010	14.82	19.87

Fuente: Los Autores.

Datos generales del sector de Monitoreo

Pais: ECUADOR

Provinci.. LOJA

Cantón: LOJA

Barrio: UNIVERSITARIA

Sector: AREA DE ENERGIA

Datos de Monitoreo:

Mes: Marzo

GRÁFICA DE MONITOREO



Figura 42. Histograma de Potencial Eólico del mes de Marzo del 2010.

A continuación se determina el potencial eólico medio de los dos meses monitoreados como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 25. Cálculo del potencial medio de los meses monitoreados.

MES (2010)	POTENCIAL EÓLICO MEDIO (W/m²)	POTENCIAL PROMEDIO DEL TIEMPO DE MONITOREO (W/m²)
FEBRERO	16.68	13.86
MARZO	11.04	

Fuente: Los Autores.

Como se puede notar la variación de valores de potencia por unidad de área es pequeña.

Tabla 26. Comparación de los valores de potencial medio obtenidos mediante los dos métodos aplicados.

MÉTODO	POTENCIAL MEDIO POR UNIDAD DE ÁREA (W/m²)	PORCENTAJE DE DIFERENCIA (%)
ESTADÍSTICO	13.72	1.02
PROMEDIO INSTANTÁNEO	13.86	

Fuente: Los Autores.

f.3.1.2 Dimensiones del aerogenerador. Como se conoce, la energía eléctrica requerida es de 1.72 kw-h/día. De acuerdo a ello y al potencial eólico en el sector se dimensiona el aerogenerador.

La potencia por unidad de área en el sector es igual al promedio de los valores analizados anteriormente:

$$P_{eólica} = \frac{13.72 \frac{w}{m^2} + 13.86 \frac{w}{m^2}}{2}$$

$$P_{eólica} = 13.79 \frac{w}{m^2}$$

La energía ideal obtenida por el aerogenerador durante un día es:

$$E_{eólica} = P_{eólica} \times 24h$$

$$E_{eólica} = \frac{13.79 \frac{w}{m^2} \times 24h}{día}$$

$$E_{eólica} = 330.96 \frac{w \times h}{m^2 \times día}$$

El área de barrido requerida por el aerogenerador para solventar la potencia de requerimiento es:

$$A_{aerogenerador} = \frac{E_{requerida}}{E_{eólica}}$$

$$A_{aerogenerador} = \frac{860 \frac{w \times h}{día}}{330.96 \frac{w \times h}{m^2 \times día}}$$

$$A_{aerogenerador} = 2.59 m^2$$

Considerando que el aerogenerador tiene su rendimiento por debajo del Límite de Betz, se usa un C_p igual a 0.4 (extraído de la tabla 9) y además un rendimiento del sistema de generación de energía eléctrica igual a 0.95, de la ecuación 13 se obtiene la sección de barrido del aerogenerador, siendo esta igual a:

$$A_{aerogenerador} = \frac{2.59 m^2}{0.4 \times 0.95} = 6.81 m^2$$

Qué corresponde a un diámetro del aerogenerador igual a:

$$D = \frac{4 \times A}{\delta}$$

$$D = \frac{4 \times 6.81m^2}{\delta} = 2.94m$$

Este es el diámetro necesario del aerogenerador para las condiciones de recurso y demanda total del sector.

Como se mencionó en un principio, el recurso energético requerido por la casa sostenible será abastecido por un sistema eólico combinado con un sistema fotovoltaico, por tal razón hemos creído conveniente suministrar el 50% de la demanda energética vía aerogenerador y el resto será abastecido por el sistema fotovoltaico (Tema de estudio de otro grupo de trabajo).

f.3.1.3 Selección del aerogenerador. Conocido el diámetro necesario del aerogenerador se realiza la selección del equipo. En el mercado local (Provincia de Loja) no existe distribuidor alguno de este tipo de elementos, siendo necesario recurrir a la ciudad de Quito.

El distribuidor localizado (Proviendo), nos ofrece como única alternativa un aerogenerador cuyo diámetro de barrido es 2.7m, por ser el aerogenerador que más se acerca a las dimensiones calculadas.

Este equipo tiene las siguientes características:


AEROGENERADOR ZONHAN ZH750W	
Foto	
Potencia nominal	750 W
Potencia maxima	900 W
Diametro de la hélice	2,7 m
Velocidad de Arranque	4 m/s*
Velocidad Potencia nominal	9 m/s*
Rotación @ potencia nominal:	450 rpm

Figura 43. Características del aerogenerador seleccionado.

Además de lo especificado anteriormente el aerogenerador tripala posee palas de fibra de vidrio, cuerpo de aluminio y un peso aproximado de 46Kg.

Por otra parte el sistema de generación es de alta calidad, usando imanes permanentes cromatizados, trifásico a 12V, multipolos.

La figura 44, muestra la curva característica del equipo en mención.

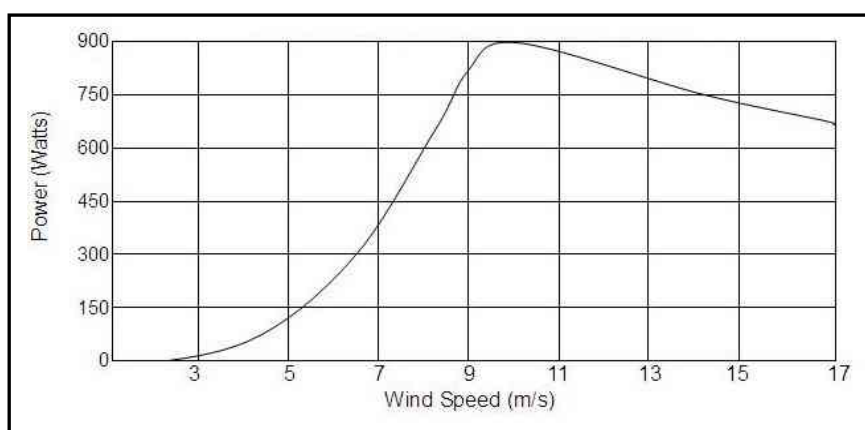


Figura 44. Curva características del aerogenerador seleccionado.

Para mayor información sobre las características técnicas de este equipo, revisar el anexo 1.

f.3.2 Dimensionamiento y Selección del controlador de carga, banco de baterías e inversor.

Para los componentes restantes de la instalación, hemos creído conveniente utilizar un sistema que asegure el suministro total de energía requerida, esto es 1720 W-h debido a que se puede suscitar la situación en que todos los equipos estén conectados a la vez.

Con esto se logra asegurar la inexistencia de sobre corrientes las cuales pueden perjudicar la instalación.

La instalación propuesta es monofásica a 110V CA, cuya intensidad de corriente eléctrica es:

$$I = \frac{P}{E}$$
$$I = \frac{1720 \text{ w}}{110V} = 15.63A$$

Los elementos de instalación y las protecciones del sistema deben asegurar este flujo de corriente, por lo que el sistema se dimensiona para una potencia aproximada de 1800vatios.

f.3.2.1 Controlador de carga. De acuerdo a lo ofertado por el proveedor de los equipos antes mencionado (Proviento), existe un equipo electrónico compuesto (controlador de carga y descarga) recomendado para el aerogenerador antes seleccionado.

Se trata de un controlador marca **EXMORK** que permite la carga y descarga de baterías de manera segura, evitando sobre corrientes y descargas profundas.

Lo más conveniente de este controlador de carga y descarga es que permite su uso en sistemas híbridos eólico-solar sin ningún aditamento.

Por lo mencionado se selecciona dicho elemento, siendo sus características las siguientes:



Figura 45. Vista interior y exterior del equipo controlador de carga y descarga seleccionado.

- ✓ Voltaje de operación: 12V.
- ✓ Tipo de recarga: PWM (*Pulse Wide Modulation*) que mejora la eficiencia de la recarga, con disipación de energía aparte.
- ✓ Protección de sobre velocidad: electrónica.
- ✓ Es un equipo de fácil manipulación ya que posee dos indicadores análogos o digitales para el voltaje y amperaje del sistema.
- ✓ Cuenta con seis focos LED que indican adicionalmente el estado de operación:
 - Generación eólica
 - Generación solar
 - Sobre voltaje
 - Voltaje baja
 - Fusible
 - Polaridad inversa

Cada controlador de carga viene conjuntamente con su disipador de energía. Este disipador es parte del sistema de seguridad de freno: El aerogenerador frena normalmente utilizando la energía eléctrica.

Como “freno de mano” cada controlador dispone de un interruptor que se titula “Manual Brake”. A través de este interruptor se cortocircuitan los polos del

aerogenerador. De tal forma el generador altamente eficiente está casi atracado por la energía de inducción que imposibilita que puede girar.

Para mayor información sobre las características técnicas de este equipo, revisar el anexo 1.

f.3.2.2 Banco de baterías. De acuerdo a la energía estimada se necesita un grupo de baterías, éstas se dimensionan para solventar los 1720 Wh/día, con una reserva de 1 día, esto debido a irregularidades que presenta el recurso eólico.

Para el cálculo se hace referencia a la metodología planteada por CODESO (empresa dedicada a la implementación y capacitación sobre aprovechamiento de los recursos renovables) en su sitio www.codeso.com.

Para instalaciones pequeñas se recomienda trabajar, en el lado de corriente continua, con una tensión de 12V. Siendo este el voltaje de operación, la capacidad de operación de las baterías es:

$$Cap = \frac{E_{requerida}}{Voltaje}$$

$$Cap = \frac{1720 \frac{wh}{día}}{12v} = 143Ah$$

Este valor se multiplica por un coeficiente de seguridad de 2, el cual garantiza el suministro de energía por dos días continuos. Siendo así se obtiene:

$$Cap_{2 \text{ días}} = 2 \cdot Cap$$

$$Cap_{2 \text{ días}} = 2 \cdot 143Ah = 286Ah$$

De acuerdo a la capacidad requerida y considerando el uso de acumuladores de 115Ah (ofertadas en Proviento) se hace necesario el siguiente número de baterías:

$$N_{baterías} = \frac{Cap_{2 \text{ días}}}{115Ah}$$

$$N_{baterias} = \frac{286Ah}{115Ah} = 2.48$$

Por tal razón el número de baterías de la instalación será 3.

Las características de las baterías seleccionadas son:



Figura 46. Detalle de batería propuesta.

- ✓ Marca: Milenium.
- ✓ Rejillas de Plomo-Calcio de alta calidad.
- ✓ Placas positivas con 23% de mayor grosor que las placas de arranque.
- ✓ Pasta de alta densidad diseñada para soportar grandes esfuerzos.
- ✓ Placas ensobradas con separadores de polietileno de alta porosidad.
- ✓ 430ccc de capacidad de reserva de electrolito por celda.
- ✓ Caja y cubierta de polipropileno de lata resistencia a golpes y temperaturas.
- ✓ Cubierta de válvula regulada con supresor de llama para mayor seguridad.
- ✓ Terminales de perno de acero inoxidable de 3/8".

Las baterías se conectan en paralelo para lograr la corriente y tensión requeridas.

Para mayor información sobre las características técnicas de este equipo, revisar el anexo 2.

f.3.2.3 Inversor. El inversor debe suministrar una potencia de 2 Kw (mencionado anteriormente), de acuerdo a esto se selecciona un inversor marca EXMORK con las siguientes características:

- ✓ Potencia de salida: 2KVA.
- ✓ Factor de potencia: 0,9
- ✓ Potencia de salida (continua a 30°C): 1800W.
- ✓ Eficiencia óptima: 85%
- ✓ Frecuencia de salida: 60Hz \pm 0,5%.
- ✓ Voltaje de salida del inversor: 120VAC \pm 0,5%.
- ✓ Entrada de tensión directa 24DCV ó 48 VDC.
- ✓ Entrada de tensión externa 120VAC \pm 10%.

Especificaciones generales.

- ✓ Tiempo de transferencia (Red > Inversor) <5s
- ✓ Tiempo de transferencia (Inversor > Red) <30ms
- ✓ Corriente inactiva <600mA
- ✓ Voltaje de salida del inversor 110/120V \pm 5%.
- ✓ Frecuencia de salida del inversor 60Hz \pm 5%.
- ✓ Salida de onda del inversor Onda sinusoidal pura.
- ✓ Carga de tensión de entrada 110/120 V.

Este equipo administrará la energía, asegurando el suministro eléctrico en condiciones aceptables.

Para mayor información sobre las características técnicas de este equipo, revisar el anexo 3.

f.3.2.4Otros.El aerogenerador irá montado sobre una estructura tipo poste de hormigón armado de 11m de altura. El restante de equipos estará ubicado en una caja metálica que asegure el buen estado de los mismos.

Los conductores de energía eléctrica son de la siguiente sección:

- ✓ Conductores en corriente continua:4 flexible (Capacidad de corriente por conductor 140A, según tabla consultada en el sitio web <http://www.electrocable.com/productos/cobre/THHN.html>). La figura 32 muestra el detalle de los conductores instalados.



Figura 47. Detalle de conductores de corriente continua instalados.

- ✓ Conductores en corriente alterna: 12AWG flexible (Capacidad de corriente por conductor 40A). según tabla consultada en el sitio web <http://www.electrocable.com/productos/cobre/THHN.html>).La figura 47 muestra el detalle de los conductores instalados.

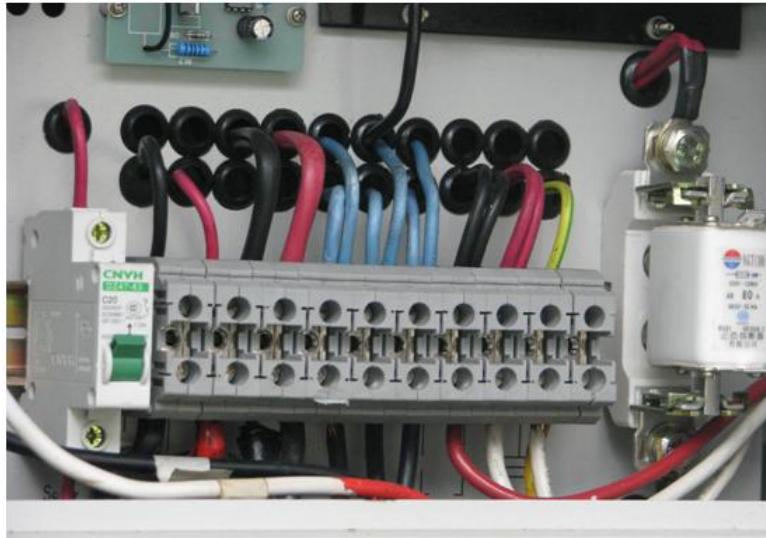


Figura 47. Detalle de conductores instalados (color azul)

f.4 Detalle del montaje de equipos.

A continuación se detallan los equipos instalados:



Figura 48. Detalle del aerogenerador y estructura de soporte.



Figura 49. Detalle del aerogenerador implementado.



Figura 50. Detalle de la central de monitoreo utilizada en la fase de diseño.



Figura 51. Detalle del aerogenerador, estructura de soporte y casa sostenible.



Figura 52. Detalle de la casa sostenible de interés social.



Figura 53. Detalle de equipos de control de carga y descarga de energía, banco de baterías e inversor.

g. DISCUSIÓN.

El sistema de aerogeneración planteado y posteriormente implementado, posee las características esenciales de un equipo de aprovechamiento eólico moderno, ya que tiene elementos versátiles que ofrecen garantías constructivas y funcionales, complementándose entre sí como un prototipo didáctico, experimental y aprovechable.

Existe cierta expectativa sobre su funcionamiento, pero se espera lograr sin ningún contratiempo la capacidad de producción requerida y establecida en la fase de diseño, referente a lo mencionado se tiene 2 puntos a favor; el primero es que el proceso de monitoreo (base del dimensionamiento) se realizó a una altura de 9m referente al suelo, pero la instalación se la llevó a cabo a 12m lo que favorece a la generación de energía (por la gradiente de velocidad del viento), ya que en estas condiciones la velocidad del viento es mayor, como segundo aspecto, se seleccionó un aerogenerador cuyo diámetro es 2.7m, siendo mayor a lo proyectado teóricamente (2.09m); estos dos aspectos aseguran y hacen aún más confiable la propuesta.

Existe conformidad con el diseño planteado, ya que todo el sistema no presenta mayor complejidad en el momento de montaje, además, según nuestro criterio, brinda facilidad operacional y seguridad de suministro, altamente requerido en este caso.

Por último, se puede asegurar que los componentes presentan una eficiencia funcional elevada (entre 0.8 y 0.95) aspecto imperioso en el aprovechamiento de energías renovables, aunque esto se refleja directamente en el costo de los equipos, vale la pena su adquisición con propósitos de desarrollo local y fomento de la investigación.

h. CONCLUSIONES.

Del proceso investigativo desarrollado, se puede concluir lo siguiente:

- ✓ El sistema de generación eólico diseñado y posteriormente implementado, presenta condiciones operacionales adecuadas, con rendimientos globales cercanos al 30% del recurso existente, qué comparado con sistemas convencionales es aceptable, por lo que se establece como un sistema autosuficiente de generación eléctrica para la vivienda sostenible.
- ✓ Luego de realizar un estudio meteorológico in situ, se concluye que el recurso eólico en el sector posee las siguientes características:
 - ❖ Presenta dirección bajamente dominante, ya que el porcentaje de diferencia entre las direcciones no es mayor al 5%, lo que justifica el uso de aerogeneradores con sistemas de auto orientación.
 - ❖ Presenta baja densidad de potencia 13.86 W/m^2 y una velocidad del viento promedio de 2.49 m/s , durante los 60 días de monitoreo, lo cual apunta al uso de nano generación eólica.

De lo obtenido en corto tiempo de monitoreo, se pudo concluir que el sitio escogido para el emplazamiento, no es adecuado para el aprovechamiento eólico, debido a que por tener una baja densidad de potencia, se requiere la implementación de estructuras de considerable altura (muy elevadas) para poder aprovechar este recurso, lo qué no resulta viable en muchos casos, pero por tratarse de un equipo con fines académicos se justifica su emplazamiento y análisis.

- ✓ Los componentes del aerogenerador son fiables y presentan buenas condiciones operacionales, aunque el recurso eólico en ciertas ocasiones es adverso, se justifica su uso ya que se logra aprovechar la potencia existente, almacenarla, adecuarla y abastecerla para las necesidades establecidas.

i. RECOMENDACIONES.

El grupo de trabajo ha creído conveniente realizar las siguientes recomendaciones:

- ✓ Realizar estudios de aprovechamiento eólico en sectores de mejores condiciones eólicas.
- ✓ Realizar un monitoreo de la eficiencia del sistema eólico-solar como un todo, para caracterizar su funcionamiento, parámetros operacionales y eficiencia.
- ✓ Mantener a los equipos en buenas condiciones, realizando revisiones periódicas de los mismos.
- ✓ Seguir impulsando el uso de nuevas tecnologías, con el fin de conseguir conocimientos profundos y sólidos que aseguren aún más en desenvolvimiento del Ingeniero Electromecánico en este campo tan prometedor de la ciencia.

j. BIBLIOGRAFÍA.

LIBROS:

- ✓ **ESCUADERO, José. 2008.** *Manual de Energía Eólica.* Segunda edición. Pag. 472
- ✓ **VILLARRUBIA, Miguel. 2007.** *Energía Eólica.* Barcelona, España: Ceac, pag. 328.
- ✓ **VILLARRUBIA, Miguel. 2011.** *Ingeniería de la energía eólica.* Barcelona, España: Marcombo S.A, pag. 284.

TEXTOS DIGITALES:

- ✓ **AUTORES, Varios. 2003.** *Guía para la utilización de la energía Eólica para generación de energía Eléctrica.* Bogotá, Colombia: Unión Temporal Incontec Aene. <http://www.manualespdf.es/manual-energia-eolica/>
- ✓ **FERNANDEZ, Pedro. 2000.** *Energía Eólica.* Cantabria, España: Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética de Universidad de Cantabria. <http://www.termica.webhop.info/>

PÁGINAS WEB:

- ✓ <http://actualidadenergia.wordpress.com/tag/energia-eolica/> **Energía eólica, actualidad.** [Citado el 15 de febrero del 2013]
- ✓ <http://www.codeso.com/Calculo01.html>. **Cálculos para Electrificación Solar.** [En línea] [Citado el 13 de Marzo del 2011].
- ✓ <http://www.eoliccat.net/energia-eolica/la-tecnologia/como-funciona-un-aerogenerador.html?L=1>. **Cómo funciona un Aerogenerador.** [En línea] [Citado el 27 Junio del 2011].
- ✓ <http://es.wikipedia.org/wiki/Aerogenerador>. **Aerogenerador.** [En línea] [Citado el 20 Abril del 2010].

- ✓ http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_e%C3%B3lica. **Energía eólica.** [En línea] [Citado el 20 Abril del 2010].
- ✓ <http://www.proviento.com.ec/>. **Aerogeneradores.** [En línea] [Citado el 13 de Marzo del 2011].
- ✓ <http://html.rincondelvago.com/aerogeneradores.html>. **Aerogeneradores.** [En línea] [Citado el 27 Junio del 2011].

k. ANEXOS.

**ANEXO #1. Hoja técnica del Aerogenerador y controlador de carga y descarga
seleccionado.**

ANEXO #2. Hoja técnica de las baterías seleccionadas.

ANEXO #3. Hoja técnica del Inversor seleccionado.

ANEXO #4. Hoja técnica de la central de monitoreo utilizada.

ANEXO #5. Anteproyecto.