



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN  
EN MATERIALES AVANZADOS, S. C.  
DEPARTAMENTO DE POSGRADO**

# **EVALUACIÓN DEL RECURSO EÓLICO EN LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE CIUDAD JUÁREZ**

Tesis que presenta

*“Rafael Vidal Herrera”*

**Como requisito para obtener el Grado de  
Maestro en Ciencias en Energías Renovables**

**Director de tesis:  
Dr. Alfredo Campos Trujillo.**

Cd. Chihuahua, Chihuahua

Octubre del 2014

## **Agradecimientos**

*A mi asesor el Doctor Alfredo Campos Trujillo por su ayuda en el asesoramiento durante el desarrollo de este proyecto de tesis.*

*A todos mis colegas y compañeros de trabajo, que participaron activamente en el desarrollo de esta tesis.*

*A mis padres en los que siempre he encontrado apoyo y motivación para continuar este camino de la sabiduría.*

*A mis hijos Max Raphael, Melanie e Irving Andrés por quienes hago siempre el mejor esfuerzo para ser mejor.*

# Índice

## Contenido

Agradecimientos .....	2
Índice .....	3
Resumen .....	8
Abstract .....	9
Capítulo 1 .....	10
<b>1. Introducción .....</b>	<b>10</b>
1.1 Antecedentes.....	10
1.2 Antecedentes históricos .....	10
<b>1.2.1 Inicio de la industria .....</b>	<b>11</b>
<b>1.2.2 Procedencia de la energía eólica .....</b>	<b>12</b>
<b>1.2.3 Aprovechamiento y aplicaciones de la energía eólica .....</b>	<b>13</b>
1.3 Justificación .....	14
1.4 Objetivo General.....	15
1.5 Objetivos Particulares.....	15
Capítulo 2.....	16
<b>2. Marco teórico .....</b>	<b>16</b>
2.1 Recurso eólico .....	16
2.2 Variaciones del viento .....	16
2.3 Evaluación del recurso eólico.....	18
2.4 Turbulencia.....	18
2.5 Efectos del terreno en el viento .....	19
2.6 Energía Obtenible del Viento .....	23
2.7 Estimación de Recurso Eólico.....	27
2.8 Cuantificación del potencial eólico y límite de Betz.....	29
2.9 Potencia eólica disponible y potencia eólica aprovechable.....	30

2.10	Potencial eólico en México.....	32
2.11	Potencial eólico en Juárez.....	34
<b>Capítulo 3.....</b>		<b>37</b>
<b>3.</b>	<b>Caracterización del recurso eólico .....</b>	<b>37</b>
3.1	Medición del Viento .....	37
3.2	Velocidades del Viento.....	39
3.3	Dirección del Viento.....	39
3.4	Temperatura y Presión.....	39
3.5	Equipo.....	39
3.6	Sensores .....	40
3.7	Anemómetros.....	40
3.8	Termómetros y Barómetros .....	42
3.9	Registrador de Datos .....	42
3.10	Sistema de Comunicación .....	44
3.11	Fuentes de alimentación .....	44
3.12	Gabinetes .....	45
3.13	Torres.....	45
3.14	Soportes para sensores.....	46
3.15	Tratamiento de Datos.....	47
3.16	Validación de datos .....	47
<b>Capítulo 4.....</b>		<b>48</b>
<b>4.</b>	<b>Materiales y métodos .....</b>	<b>48</b>
4.1	Campaña de medición en la UTCJ .....	48
4.2	Área de Medición .....	48
4.3	Selección del equipo.....	50
4.4	Sensores .....	52

4.5	Registrador de datos .....	52
4.6	Comunicación.....	53
4.7	Torre .....	53
4.8	Instalación de la estación de medición .....	53
4.9	Orientación de los sensores .....	54
4.10	Calibración.....	54
4.11	Monitoreo .....	55
4.12	Registro de datos del viento.....	56
<b>Capítulo 5</b>	.....	<b>57</b>
<b>5. Resultados y Discusión</b>	.....	<b>57</b>
5.1	Evaluación del recurso eólico en la UTCJ.....	57
5.2	Tratamiento de datos .....	58
5.3	Rosa de los vientos .....	59
5.4	Distribución de Weibull.....	61
<b>Capítulo 6</b>	.....	<b>67</b>
<b>6. Conclusiones</b>	.....	<b>67</b>
<b>7. Recomendaciones</b>	.....	<b>69</b>
<b>8. Referencias</b>	.....	<b>70</b>
<b>9. Anexos</b>	.....	<b>71</b>

## Figuras

Figura 1.1	Primer aerogenerador para generación de electricidad.....	11
Figura 1.2	Origen del viento .....	13
Figura 2.1	Perfil del viento con la altura.....	16
Figura 2.2	Variaciones de velocidad en periodo de tiempo .....	18
Figura 2.3	Determinación del terreno plano.....	20
Figura 2.4	Esquema de comportamiento del viento con obstáculos .....	21

Figura 2.5 Efectos de obstáculos en el flujo del viento.....	21
Figura 2.6 Efectos de la orientación y forma de las colinas.....	22
Figura 2.7 Esquema mostrando las potencias a distintos tamaños de turbinas eólicas.....	24
Figura 2.8 Rendimiento respecto al límite de Betz .....	25
Figura 2.9 Rendimiento típico de un aerogenerador pequeño de (400w) .....	26
Figura 2.10 Distribución de Rayleigh en curvas de duración de Viento.....	28
Figura 2.11 Curvas de Weibull de función de densidad de probabilidad .....	28
Figura 2.12 Rosa de los vientos .....	29
Figura 2.13 Límite de Betz.....	30
Figura 2.14 Potencia de viento en México.....	33
Figura 2.15 Rosa de viento dominante en Cd. Juárez .....	35
Figura 2.16 Viento dominante en Cd. Juárez .....	36
Figura 3.1 Sensores a diferentes alturas en una estación .....	38
Figura 3.2 Anemómetro de copas .....	41
Figura 3.3 Veleta para dirección del viento .....	42
Figura 3.4 Registrador de Datos.....	43
Figura 3.5 Sistema fotovoltaico de alimentación .....	45
Figura 3.6 Torre de celosía.....	46
Figura 3.7 Orientación de soportes de acuerdo al tipo de torre.....	47
Figura 4.1 Ubicación de la estación meteorológica de la UTCJ .....	49
Figura 4.2 Ubicación de la estación meteorológica dentro de la UTCJ .....	49
Figura 4.3 Ubicación directa de la estación meteorológica dentro de la UTCJ .....	50
Figura 4.4 Registrador de datos HEAVY WEATHER PRO WS 2800 .....	51
Figura 4.5 Sensor de velocidad y dirección del viento (Anemómetro).....	52
Figura 4.6 Posición de la Torre en la UTCJ .....	54
Figura 4.7 Sincronización del monitor con la computadora .....	55
Figura 4.8 Flujo de datos.....	56
Figura 5.1 Comportamiento del viento en la UTCJ .....	58
Figura 5.2 Gráfica de velocidad del viento .....	59
Figura 5.3 Rosa de los vientos de la UTCJ .....	60
Figura 5.4 Rosa de los vientos energía.....	60

Figura 5.5 Distribución de Weibull de la UTCJ.....	63
Figura 5.6 Gráfica de Cantidad de densidades por aparición de direcciones.....	65
Figura 5.7 Gráfica de concentración de viento (velocidad VS dirección) .....	66

## Tablas

Tabla 1 Datos generales eólicos de la UTCJ.....	56
Tabla 2 Datos de velocidad promedio.....	57
Tabla 3 Datos para Distribución de Weibull.....	61
Tabla 4 Parámetros de velocidad y potencia.....	62
Tabla 5 Datos de velocidad promedio del viento.....	62
Tabla 6 Análisis de Weibull para estación de la UTCJ.....	63
Tabla 7 Cantidad de densidad de direcciones de la UTCJ .....	64

## Anexos

Anexo 9.1 Tabla de distribución de Weibull.....	71
Anexo 9.2 Cuadro de densidades .....	72
Anexo 9.3 Rosa de los vientos (0 a 0.5 m/s).....	76
Anexo 9.4 Rosa de los vientos (0.5 a 2 m/s).....	76
Anexo 9.5 Rosa de los vientos (2 a 4 m/s).....	77
Anexo 9.6 Rosa de los vientos (4 a 6 m/s).....	77
Anexo 9.7 Rosa de los vientos (6 a 8 m/s).....	78
Anexo 9.8 Rosa de los vientos (6 a 8 m/s).....	78
Anexo 9.9 Rosa de los vientos (mayor a 10 m/s).....	79

## Resumen

Hoy en día experimentamos un desarrollo inigualable en la historia, el hombre se ha expandido por todos los rincones de la tierra, transformó el medio, almacena información magnéticamente y puede transportarse rápidamente a cualquier lugar del planeta en cuestión de horas. Todo esto ha sido posible gracias a una fuente de energía, "combustibles fósiles", este recurso resultado de la captación de la energía solar durante millones de años ha sido el motor de nuestra sociedad.

Debido al encarecimiento y exceso de consumo de este energético llegó el tiempo de utilizar fuentes alternas de generación de energía. Las fuentes renovables de energía son una alternativa oportuna para sostener el desarrollo social y mitigar las consecuencias del uso de combustibles fósiles. Las energías renovables se encuentran en un nivel de desarrollo adecuado para su explotación comercial, una de ellas es la energía eólica que ha destacado por ser la más rentable.

La energía eólica ha crecido en los últimos años exponencialmente, este crecimiento demanda material, maquinaria, mano de obra y personal capacitado, al mismo ritmo del crecimiento, por lo que es necesario desarrollar en lo posible temas de energía eólica. De este hecho surge la idea central de este trabajo de tesis.

Esta tesis tiene el propósito de cuantificar la energía aprovechable contenida en el viento de la Universidad Tecnológica de Ciudad Juárez. Para lograr una fácil comprensión se dividió en cinco partes: Primero se introduce al conocimiento acerca de la energía eólica, su historia, procedencia y la manera de aprovechar esa energía dejando definido nuestro objetivo y justificando las razones por las cuales se hizo este estudio. En el segundo se describe las principales características del fenómeno en estudio, explicando las características generales del viento. En el tercero se muestra la infraestructura necesaria para realizar una medición adecuada al sitio con la finalidad de obtener los datos fuente con los que se realizará el estudio del recurso eólico. En el cuarto se detalla la campaña de medición eólica realizada en un lugar específico de la Universidad Tecnológica y finalmente en el capítulo 5 se realiza la evaluación del recurso eólico.

Este orden de exponer el tema pretende ser una guía para evaluación del recurso eólico para cualquier asentamiento, y así contribuir al desarrollo eólico en nuestro país.



## **Abstract**

Today we experience a unique development in the history; man has been expanded to every corner of the earth, transformed the way we live, magnetically saves information and can quickly be transported to any place on the planet within hours. All this has been possible thanks to a power source, "fossil fuels", and this resource reflects the uptake of solar energy that for millions of years has been the engine of our society.

Due to rising and consumption excess of this energy it's time to utilize alternative sources for power generation. Renewable energy sources are a timely alternative to sustain social development and mitigate the consequences of using fossil fuels. Renewable energies are at an appropriate level of development for commercial exploitation one of them is wind power that has stood out as the most profitable.

Wind power has grown exponentially in recent years, this growth demand materials, machinery, labor and trained personnel at the same pace of growth, so it is necessary to develop where possible wind energy issues. From this fact the central idea of this thesis arises.

This thesis aims to quantify the useful energy contained in the wind at the Technological University of Ciudad Juarez. For easy understanding was divided into five chapters: First it introduces the knowledge about wind energy, its history, origin and how to harness that energy leaving defined our goal and explain the reasons why this study was done. Second, describes the main features of the phenomenon under study, explaining the general characteristics of the wind. Third, shows the necessary infrastructure for measurement in order to obtain the source data needed to perform the study of the wind resource. Fourth, details the wind measurement campaign performed in a specific place on the Technological University and finally in chapter 5 an evaluation of the wind resource assessment is performed.

This order of exposing the subject pretends to be a guide for wind resource assessment for any settlement, and thus contribute to wind development in our country.

# Capítulo 1

## 1. Introducción

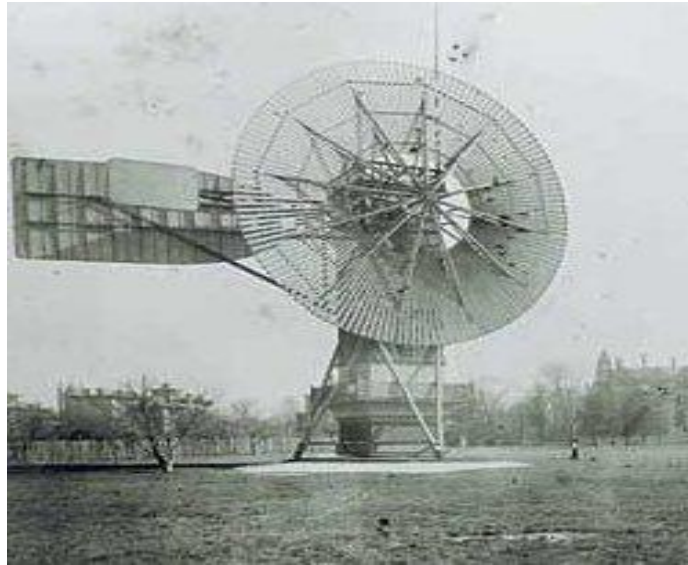
### 1.1 Antecedentes

Hoy en día, la energía eólica es primordialmente utilizada para generar electricidad, aunque también algunos molinos de viento se utilizan para sacar agua de pozos en zonas rurales. Aunque instalaciones de pequeña escala por ahora está hecho a un lado por proyectos comerciales en términos de inversiones, apoyos políticos y conciencia pública, la industria de las instalaciones de turbinas eólicas de pequeña escala continúa mostrando crecimiento y considerables esperanzas. Las turbinas de viento pequeñas no tienen sentido para todos o para todos los lugares, pero definitivamente juegan un papel en un futuro más limpio y en una economía energética más inteligente.

Cabe recordar que el viento es una fuente de energía renovable, porque el viento soplará mientras brille el sol. No hay controversias en la creencia de que algún día llegará a su punto máximo de obtención del recurso como lo hay ahora con los combustibles fósiles. El viento estará aquí por al menos 20 millones de años más, y se espera que se exploten sus beneficios.

### 1.2 Antecedentes históricos

Desde tiempos remotos el ser humano ha hecho uso de la energía del viento o energía eólica en aplicaciones como el transporte con velas, la molienda de granos, el bombeo de agua y generación eléctrica. Siendo hasta el año 1887 que se creó el primer aerogenerador eléctrico (Figura 1.1), se trataba de una turbina eólica de 12 KW, con un diámetro de rotor de 17 metros de altura y 144 aspas cuya energía generada se almacenaba en 12 baterías.



*Figura 1.1 Primer aerogenerador para generación de electricidad*

### **1.2.1 Inicio de la industria**

Un factor que permitió el desarrollo de los actuales aerogeneradores fue la teoría de la aerodinámica, desarrollada durante las primeras décadas del Siglo XX, permitiendo comprender la dinámica que actúa alrededor de las aspas de los aerogeneradores.

Los mismos científicos que desarrollaron algunas teorías para aplicaciones aeronáuticas, establecieron los criterios básicos que debían cumplir las nuevas generaciones de aerogeneradores. Pero no fue hasta relativamente hace pocos años que se desarrolló la tecnología para transformar esta energía en electricidad a gran escala.

Además de las dimensiones, los principales cambios de los aerogeneradores el día de hoy son reflejo del avance que se tiene en materiales para su fabricación y la evolución de las aspas, rotores, generadores y sistemas de control.

Este incremento de tamaño, sin duda se encuentra dictado por las economías de escala, pues se pretende explotar y aprovechar la mayor velocidad de viento a mayores alturas y maximizar la producción de energía eléctrica con la consecuente rentabilidad de los proyectos.

La energía eólica se ha posicionado como la tecnología líder dentro de aquellas consideradas renovables, sobrepasando los 300,000 MW instalados a escala mundial. El tamaño promedio de los aerogeneradores se encuentra alrededor de los 2 MW, con el de mayor tamaño alcanzando los 7 MW y en estudios para el desarrollo de uno de 10 MW. Asimismo, el diámetro de los rotores ha alcanzado valores de hasta 100 metros y la altura del eje del mismo supera los 80 metros.

Esta tecnología ha estado evolucionando hasta alcanzar costos muy competitivos, que le han permitido posicionarse en los mercados eléctricos internacionales, complementando y compitiendo en la oferta eléctrica mundial.

Sin embargo, para hacer uso de dicho recurso eólico y maximizar la producción de energía eléctrica se deben considerar las condiciones variables del viento, tanto de velocidad como de dirección, características del viento (turbulencia) y densidad del aire pues si no lo hacemos todos los esfuerzos para capturar la mayor cantidad posible de viento serían en vano.

El uso de los aerogeneradores de pequeña escala como el tipo Savonius o Darrius también se utilizan y se ofrecen por la industria eólica para ranchos, departamentos, áreas comerciales y residenciales por todo el mundo, contribuyendo a la generación limpia en sitios en donde es propicio instalarlos una vez hechos los estudios pertinentes.

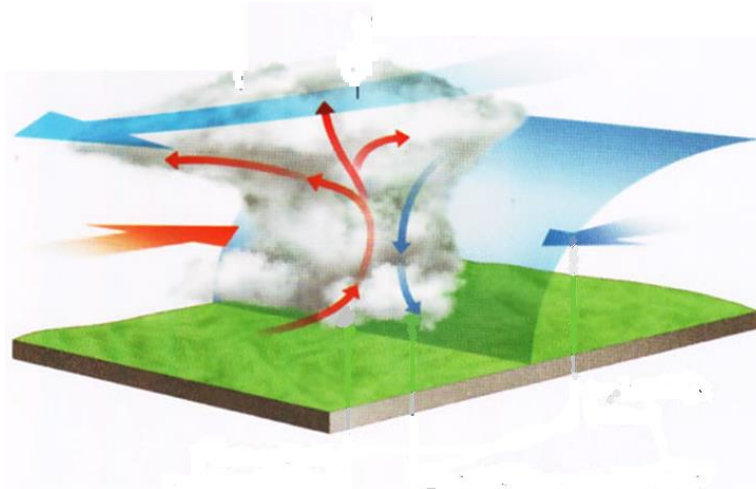
### **1.2.2 Procedencia de la energía eólica**

La función de un aerogenerador consiste en captar la energía cinética contenida en el viento y transformarla en otra forma de energía tal como mecánica o eléctrica.

El viento o la energía eólica es simplemente aire en movimiento causada por el calentamiento de la superficie de la tierra debido a la radiación del sol. La tierra absorbe y libera el calor a diferentes valores porque está hecha de diferentes tipos de materiales. Esto produce enfriamiento y calentamiento de las masas de aire que se cambian constantemente.

Por efectos de la radiación solar el aire se dilata y asciende formando bolsas de aire. En las zonas con menos radiación el aire asciende menos y se concentra en bolsas sometidas a altas presiones, mientras que el aire caliente queda sometido a bajas presiones en bolsas más altas.

Esta diferencia de presiones hace que el aire tienda a desplazarse desde las zonas de alta presión a las de baja, este movimiento es el que llamamos viento, ver figura 1.2.



*Figura 1.2 Origen del viento*

### **1.2.3 Aprovechamiento y aplicaciones de la energía eólica**

El aprovechamiento del viento para obtener energía requiere un proceso indirecto de conversión, a diferencia del directo que se produce en la energía fotovoltaica. Sus instalaciones de aprovechamiento de esta energía adoptan dos configuraciones muy diferentes: los denominados parques eólicos empleados para producir grandes cantidades de energía eléctrica con destino a las redes públicas de distribución y las medianas y pequeñas instalaciones de suministro energético.

A diferencia de los procedimientos de conversión fotovoltaica y térmica, los aerogeneradores empleados para la conversión de la energía cinética del viento en electricidad, están presentes en dos tipos de aplicaciones muy diferentes que son:

**Parques eólicos:** Corresponden a zonas rurales en las que se instala un elevado número de aerogeneradores de gran potencia con fines industriales, ya que la energía eléctrica producida tiene como destino las redes públicas de distribución de electricidad. Son parques cuya propiedad es de las compañías productoras de electricidad, o en otras similares, con fines de venta de su producto a las primeras. La finalidad principal de estos parques, que cuentan con apoyo de organismos oficiales, es de naturaleza medioambiental; para reducir el consumo del petróleo y con ello la emisión de agentes contaminantes, sobre todo CO<sub>2</sub>. Existen numerosos programas nacionales e internacionales para propiciar la constante instalación de parques eólicos, cuya potencia por aerogenerador crece continuamente como consecuencia del desarrollo tecnológico.

**Instalaciones de pequeña potencia o escala:** Corresponden estas instalaciones a las derivadas de las aplicaciones en las que se requiere generalmente una potencia comprendida entre 200W y 20 KW. Existe una amplia variedad de aerogeneradores o turbinas para dar respuesta a aplicaciones

tan diversas como la carga de baterías, las construcciones dedicadas al turismo rural,, granjas, pequeñas viviendas de utilización ocasional, sistemas de bombeo de agua, alimentación de repetidores de telefonía o televisión, etcétera. Este tipo de instalaciones requieren de un sistema de almacenamiento de energía eléctrica (baterías) para dar servicio cuando se requiera, por ejemplo cuando la velocidad del viento sea insuficiente para mover al aerogenerador.

### **1.3 Justificación**

En la UTCJ se requieren hacer estudios eólicos, en los que se lleve una guía de medición y evaluación del recurso eólico para el desarrollo práctico de los alumnos de la carrera de energías renovables, en la que en cualquier sitio en el que se quieran hacer estudios de viento, se tenga el conocimiento y la capacidad de análisis para realizar el estudio, por este motivo en especial es el porqué se hizo este estudio eólico con las características de instalación de una estación meteorológica en las instalaciones de la UTCJ.

También considerando la alternativa de hacer uso del recurso eólico y maximizar la producción de energía eléctrica con la instalación futura de aerogeneradores, se aplicarán los conocimientos necesarios tales como el considerar las condiciones variables del viento, tanto de velocidad como de dirección, así como también las características del sitio. Al hacer la medición y conocer las características del viento se busca el equipo necesario de medición para que se pueda capturar la mayor cantidad posible de viento en sistemas de pequeña escala por lo que el estudio del sitio en donde se pretenden instalar aerogeneradores permita que se elijan los aerogeneradores de la capacidad adecuada, en este caso de pequeña escala y que se pueda aprovechar el recurso eólico al máximo y al momento en que el viento pase por un aerogenerador. En este estudio se busca obtener el conocimiento del comportamiento del viento de un sitio particular de la UTCJ, siendo esta la parte fundamental de la evaluación del recurso eólico.

#### **1.4 Objetivo General**

Cuantificar la energía eólica aprovechable para optimizar la producción de generación eléctrica en la Universidad Tecnológica de Ciudad Juárez entre los edificios “I” y “H” mediante un estudio de medición y evaluación del recurso eólico.

#### **1.5 Objetivos Particulares**

1. Tener los conocimientos y características del comportamiento del viento necesarias para entender los efectos de la energía eólica.
2. Hacer una caracterización del viento mediante su medición y análisis.

## Capítulo 2

### 2. Marco teórico

#### 2.1 Recurso eólico

Hoy en día, la energía eólica es primordialmente utilizada para generar electricidad, aunque también algunos molinos de viento se utilizan para sacar agua de pozos en zonas rurales. Aunque instalaciones de pequeña escala por ahora está hecho a un lado por proyectos comerciales en términos de inversiones, apoyos políticos y conciencia pública, la industria de las instalaciones de turbinas eólicas de pequeña escala continúa mostrando crecimiento y considerables esperanzas. Las turbinas de viento pequeñas no tienen sentido para todos o para todos los lugares, pero definitivamente juegan un papel en un futuro más limpio y en una economía energética más inteligente.

Cabe recordar que el viento es una fuente de energía renovable, porque el viento soplará mientras brille el sol. No hay controversias en la creencia de que algún día llegará a su punto máximo de obtención del recurso como lo hay ahora con los combustibles fósiles. El viento estará aquí por al menos 20 millones de años más, y se espera que se exploten sus beneficios.

#### 2.2 Variaciones del viento

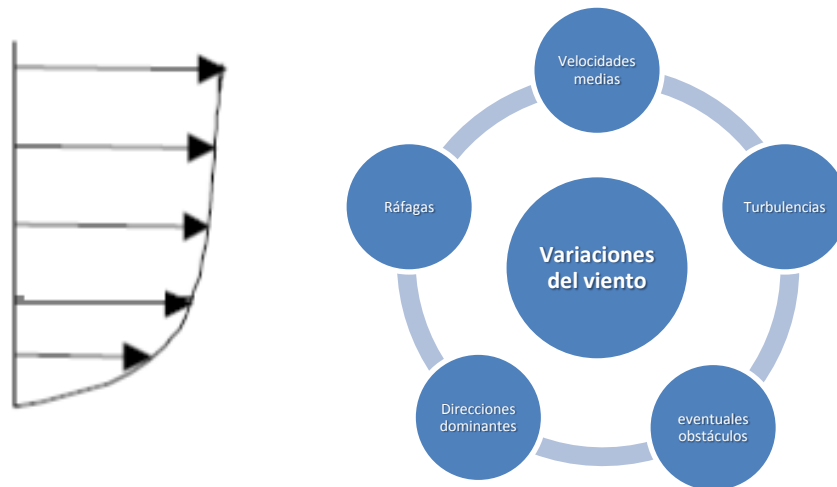


Figura 2.1 Perfil del viento con la altura



Es importante señalar que la velocidad del viento varía con la altura como se muestra en la figura 2.1 y depende fundamentalmente de la naturaleza del terreno sobre el cual se desplazan las masas de aire. La variación de velocidad puede representarse mediante la siguiente expresión:

$$\frac{V_2}{V_1} = \left[ \frac{h_1}{h_2} \right]^\alpha$$

Donde  $V_1 < V_2$  representan las velocidades del viento a las alturas  $h_1 < h_2$ , respectivamente. El exponente  $\alpha$  caracteriza al terreno, pudiendo variar entre 0.08 (sobre superficies lisas como hielo, lagunas, etcétera) y 0.40 (sobre terrenos muy accidentados).

El viento es un recurso esencialmente variable y dependiente de muchos factores. La correcta utilización de la energía eólica exige tomar en cuenta velocidades medias, ráfagas, turbulencias direcciones dominantes y eventuales obstáculos (Figura 2.1) para seleccionar tanto los lugares de emplazamiento como las características constructivas (altura de la torre, velocidades máximas que soportan, velocidad de puesta en marcha, etcétera) de las máquinas a instalar.

La variabilidad del viento debe ser controlada, por lo que se debe analizar su relación con el pronóstico del viento, su influencia en el área de captación de energía, diversidad geográfica de la potencia del viento, el costo estimado de la variación de la potencia del viento, la clasificación del viento y las oscilaciones de la potencia del viento, caracterización de la turbulencia, viento equivalente al grupo de turbinas.

La energía del viento disponible tiene variaciones conforme varía la velocidad del viento, por lo que el entender las características de las fuentes del viento son críticas en todos los aspectos para la explotación de la energía eólica.

Desde el punto de vista de la energía eólica, la falla más crítica de las características del viento es su variabilidad. El viento es altamente variable, tanto geográficamente como temporalmente. También esta variabilidad persiste sobre un muy amplio rango de escalas de espacio y tiempo.

La variabilidad sobre espacios grandes se refleja debido a que hay diferentes regiones climáticas y algunas son más ventosas que otras, dentro de cualquier región climática, hay muy buenas opciones de variación del viento para escalas más pequeñas, en las que se rige por la geografía física, la proporción de la tierra, el tamaño de la masa de la tierra, la presencia de montañas o planicies, el tipo de vegetación, la absorción de la reflexión solar de la radiación solar que afectan

las temperaturas de la superficie y en la humedad, pero localmente, la topografía tiene un mayor efecto en el viento, se refleja más viento en los picos de las colinas y montañas que en las partes planas o valles, aún más localmente, las velocidades del viento se ven significativamente reducidas por obstáculos tales como árboles o edificios.

### 2.3 Evaluación del recurso eólico

Las variaciones que ocasionan la velocidad del viento ya mencionadas se deben de tomar en cuenta para elegir los sitios elegidos para explotar la energía eólica y se deben de hacer estudios meteorológicos para tener predicciones de la energía eólica. También se deben de tomar en cuenta las fluctuaciones del viento de alta frecuencia conocidas como turbulencia, la cual es crucial para el diseño y operación de las turbinas de viento y que tengan mayor influencia en las cargas de la turbina de viento. Los vientos extremos también son muy importantes para que las turbinas de viento sobrevivan por lo que también hay que tomarlos en cuenta.

### 2.4 Turbulencia

La turbulencia se refiere a las fluctuaciones de la velocidad del viento en una relativa escala de tiempo rápida, por periodos típicos de menos de 10 minutos.

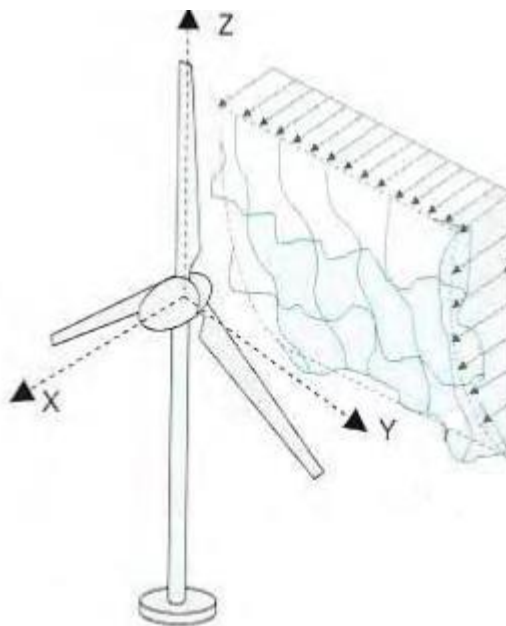


Figura 2.2 Variaciones de velocidad en periodo de tiempo

El parámetro básico de la turbulencia es la intensidad de turbulencia, está definido por la relación de la desviación estándar de la velocidad y la media. En este cálculo ambas velocidades son obtenidas durante un período de tiempo más largo que el de las fluctuaciones de la turbulencia, pero más pequeños que los periodos asociados con otros tipos de variaciones de velocidad del viento tales como los efectos diurnos (Figura 2.2). El tamaño de este periodo es normalmente menor a una hora, y por convención igual a 10 minutos, la frecuencia de muestreo es normalmente de un segundo (1 Hz). Así la intensidad de turbulencia, TI, es definida por:

$$TI = \sigma_v / V$$

Donde:  $\sigma_v$  = desviación estándar:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (v_i - V)^2}$$

Donde:  $n$  = número de registros;  $v_i$  = velocidad instantánea;  $V$  = velocidad del viento promedio en el periodo

La intensidad de turbulencia normalmente se mantiene en el rango de 0.1 a 0.4. En general valores altos de intensidad de turbulencia ocurren con bajas velocidades de viento, pero el límite inferior en un emplazamiento dado dependerá de las características específicas del terreno y las condiciones de superficie en el sitio.

## 2.5 Efectos del terreno en el viento

Para el estudio de los efectos del terreno sobre el viento, conviene clasificarlos delimitando sus características. La forma básica para clasificar un terreno es en terreno plano y terreno-no plano (algunos autores lo llaman terreno complejo). El terreno-plano es una superficie con pocas irregularidades como bosques o viviendas cercanas, mientras que el terreno-no plano tiene grandes elevaciones o depresiones como montes, crestas y cañadas.

El terreno complejo, tiene muchas características, una sub-clasificación general es: elevación o depresión aislada y terreno montañoso. Las condiciones de flujo en el terreno montañoso es complejo porque las depresiones y elevaciones ocurren de manera aleatoria, de esta manera el flujo en este tipo de terreno puede ser a pequeña y gran escala, elevaciones o depresiones aisladas para la

primera clasificación y terreno montañoso para la segunda. La clasificación se puede realizar siguiendo una sencilla regla. Comparando el terreno con una capa atmosférica definida a 1 km, es decir, si la altura de las montañas es una fracción de por lo menos 10% de la capa atmosférica definida, es un terreno considerado de pequeña escala.

Un parámetro importante para determinar la clasificación de un sitio es la dirección del viento, ya que podría haber una montaña cercana al emplazamiento propuesto, se podría decir que es un terreno no-plano, sin embargo si el viento sopla menos o igual a 5% del tiempo con bajas velocidades (alrededor de 2 m/s) en dirección de la irregularidad se puede considerar como terreno plano.

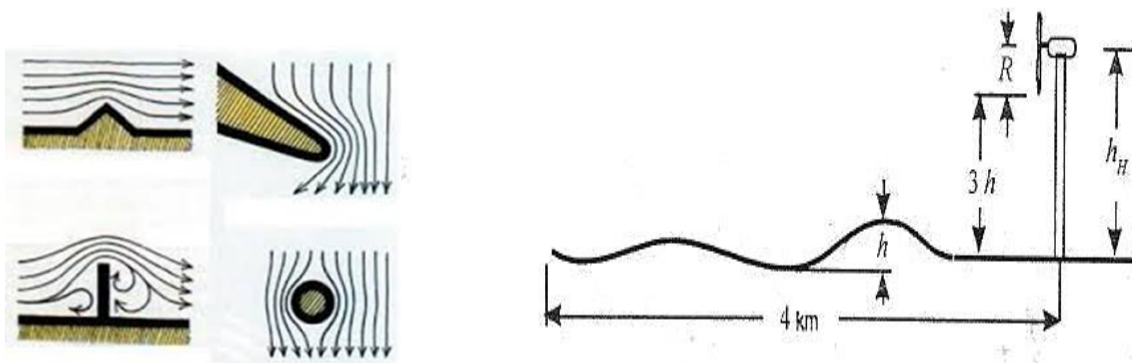


Figura 2.3 Determinación del terreno plano

El flujo del viento sobre terrenos planos con obstáculos, especialmente los hechos por el hombre, han sido bastante estudiados. Para un terreno plano y la instalación de un aerogenerador se considera 3 veces la altura ( $h$ ) a la parte inferior de la pala en un recorrido del viento de 4 Km (Figura 2.3). Los obstáculos hechos por el hombre están definidos por edificios, graneros, etcétera. Los obstáculos naturales incluyen la vegetación del emplazamiento.

Para entender el flujo del viento a través de obstáculos hechos por el hombre, se define al obstáculo como un rectángulo y al flujo en 2 dimensiones. Este flujo produce un momento y un barrido libre separado, desde el borde del obstáculo hasta el final de él, formando una frontera entre la región de flujo inerte re-circulante y una región de flujo exterior. Tal como lo muestra la figura 2.4.

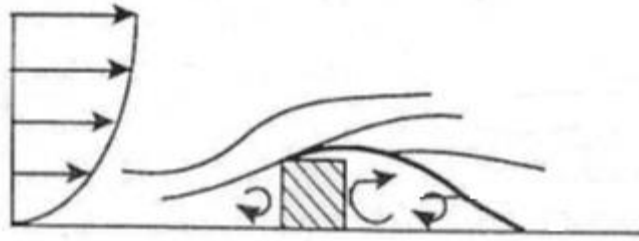


Figura 2.4 Esquema de comportamiento del viento con obstáculos

Como resultado de este análisis, la potencia y turbulencia se ven afectadas, cambiando sus indicadores conforme la distancia al obstáculo. Tal como se muestra la figura 2.5.

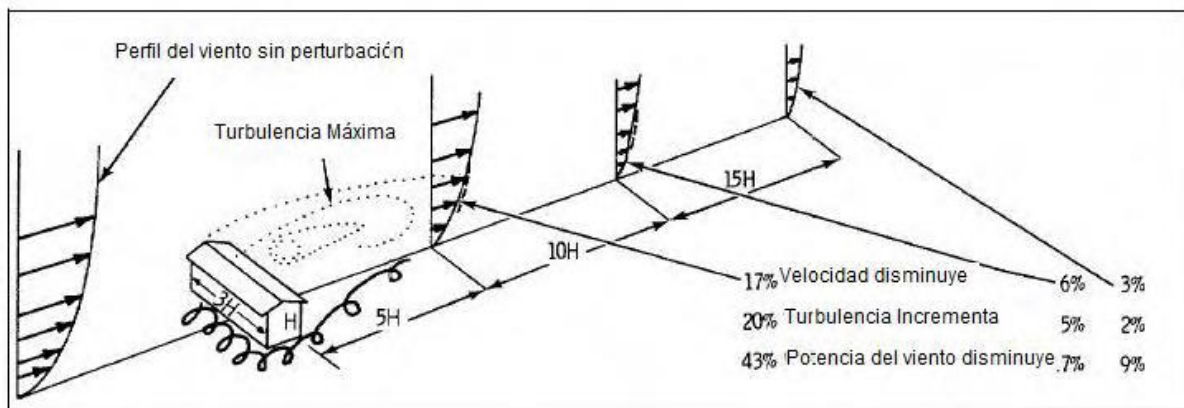


Figura 2.5 Efectos de obstáculos en el flujo del viento

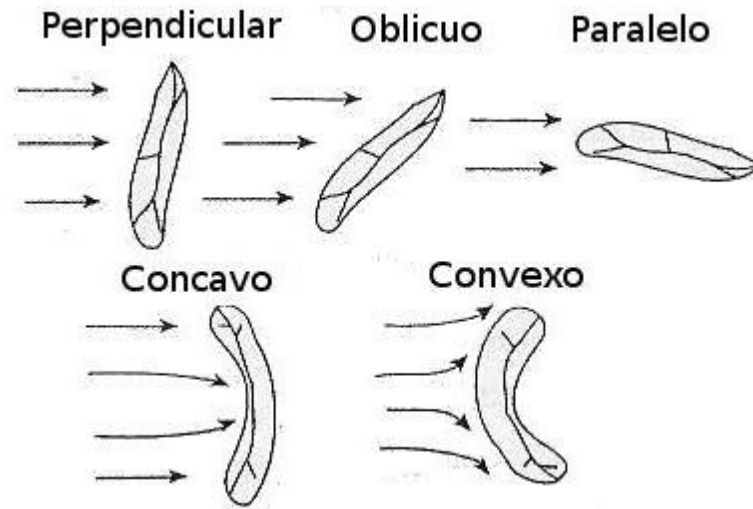
La superficie natural de la tierra no es uniforme y presenta cambios significativos de rugosidad de un sitio a otro, esto naturalmente altera el perfil del viento. Cuando la rugosidad del terreno cambia de suave a áspero, la parte baja del perfil del viento resulta muy afectada.

Como se dijo antes, dentro de esta clasificación existen otras sub-clasificaciones: pequeña y gran escala, que tiene la intención de caracterizar terrenos con formaciones aisladas (depresiones y elevaciones) y terrenos montañosos. Dentro de los terrenos no planos de pequeña escala hay características que necesitan estudiarse por separado, como lo son las elevaciones y las depresiones.

Para el caso de elevaciones aisladas se han llevado a cabo numerosas investigaciones con agua y túneles de viento para caracterizar el flujo en especial para colinas. Estas investigaciones indican que las colinas con forma alargada con 600 metros o menos en relación al terreno de los

alrededores, y con una relación de anchura y altura menor a 10 metros, aprovechan mejor la energía del viento en función de la dirección y la forma.

Cuando el viento dominante es perpendicular al eje de la colina es la mejor condición para aprovechar el viento, y cuando es paralelo es la condición menos deseable. La forma de la colina debería ser preferentemente cóncava barlovento a la dirección dominante del viento (Figura 2.6).



*Figura 2.6 Efectos de la orientación y forma de las colinas*

Las depresiones están caracterizadas por terrenos bajos respecto a sus alrededores. La aceleración del viento es mejor si la depresión puede canalizar el viento. Esta clasificación incluye regiones como valles, cañones, cuencas. Uno de los factores que intervienen en el flujo de este tipo de terrenos es el flujo diurno aunque existen muchos más, como la orientación de la depresión en relación al viento, estabilidad atmosférica, ancho, largo, forma, rugosidad y regularidad de la depresión.

Los valles y cañones superficiales (menores a 50 metros) son considerados depresiones de pequeña-escala mientras que formaciones como cuencas se consideran de gran escala. El gran número de parámetros que intervienen en las características del viento, hacen que sea muy difícil modelar el flujo dentro de las depresiones.

## 2.6 Energía Obtenible del Viento

La producción de energía aprovechando la energía cinética del viento es lo que denominamos como energía eólica. Con una maquina eólica aprovechamos la diferencia de velocidades del viento entre la entrada y salida mediante un aerogenerador.

Es importante señalar que la velocidad del viento varía con la altura y depende fundamentalmente de la naturaleza del terreno sobre el cual se desplazan las masas de aire. La variación de velocidad puede representarse mediante la siguiente expresión:

$$\frac{V_2}{V_1} = \left[ \frac{h_1}{h_2} \right]^\alpha$$

Donde  $V_1 < V_2$  representan las velocidades del viento a las alturas  $h_1 < h_2$ , respectivamente. El exponente alfa caracteriza al terreno, pudiendo variar entre 0.08 (sobre superficies lisas como hielo, lagunas, etcétera.) y 0.40 (sobre terrenos muy accidentados). La energía máxima teórica que puede ser extraída de una masa de aire en movimiento está dada por la expresión:

$$E_c = \frac{1}{2} m V^2$$

Dónde:  $E_c$  = energía cinética (joule/s)

$M$  = flujo de aire (kg/s)

$V$  = Velocidad del viento (m/s)

Si suponemos un área de captación “ $A$ ” (o área de barrido por las palas) perpendicular a la dirección del viento, el flujo de aire circulante que atraviesa será:

$$M = \delta A V^3$$

Donde:

Densidad ( $\delta$ ) = Kg/m<sup>3</sup>

$A$  = Área de captación (m<sup>2</sup>)

La energía teórica máxima por unidad de tiempo y de área ( $a=1$ ) que podremos extraer de una masa de aire en movimiento, será entonces:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho V^3$$

A esta energía se le denomina potencia meteorológica ( $P_m$ ) y se le expresa en  $W/m^2$ . Como la velocidad del viento, luego de travesar la superficie de captación, no es nula, la potencia dada por la expresión anterior no será totalmente aprovechable. Betz demostró que la máxima potencia aprovechable es igual a  $16/27$  (59.26%) de la energía total. Tomando en cuenta que ningún rotor es ideal, para caracterizarlo es necesario conocer su eficiencia o rendimiento. La potencia obtenible por unidad de área de rotor, medida en  $W/m^2$ , puede expresarse entonces como:

$$P_m = \frac{1}{2} \eta \rho V^3$$

El rendimiento ( $\eta$ ) depende del tipo de máquina y de las condiciones de operación. En cada lugar de la instalación la turbina eólica está sometida a vientos de diferente intensidad y las condiciones de funcionamiento para el próximo coeficiente de potencia indicado corresponden a la velocidad determinada del viento, que depende fundamentalmente del tipo de turbina eólica, tamaño y velocidad de giro. Podría conseguirse un funcionamiento siempre con máxima potencia (Figura 2.7) si la velocidad de giro variara proporcionalmente al viento incidente.

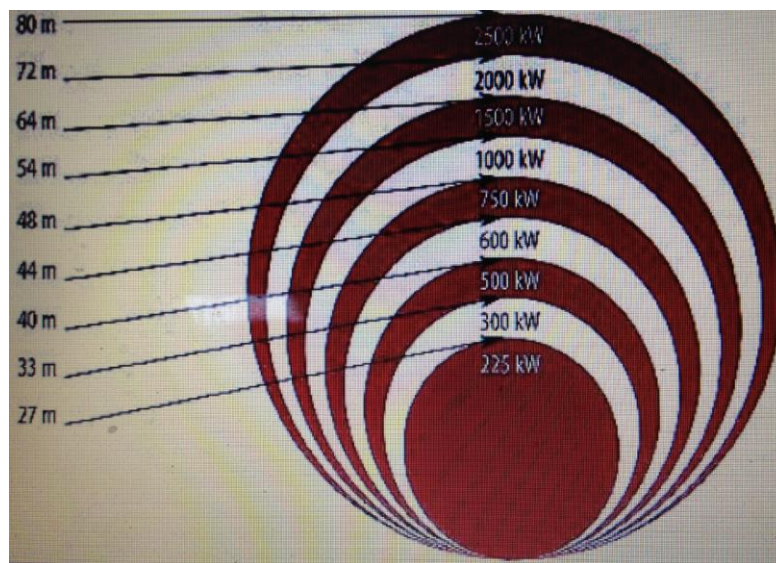


Figura 2.7 Esquema mostrando las potencias a distintos tamaños de turbinas eólicas



Las maquinas eólicas tienen limitaciones de funcionamiento incluso en el caso que haya viento. Su funcionamiento está limitado a unas velocidades intermedias de viento, por ejemplo, entre 2.5 y 25 m/s siendo que la potencia producida desde la mínima a la nominal aumenta linealmente.

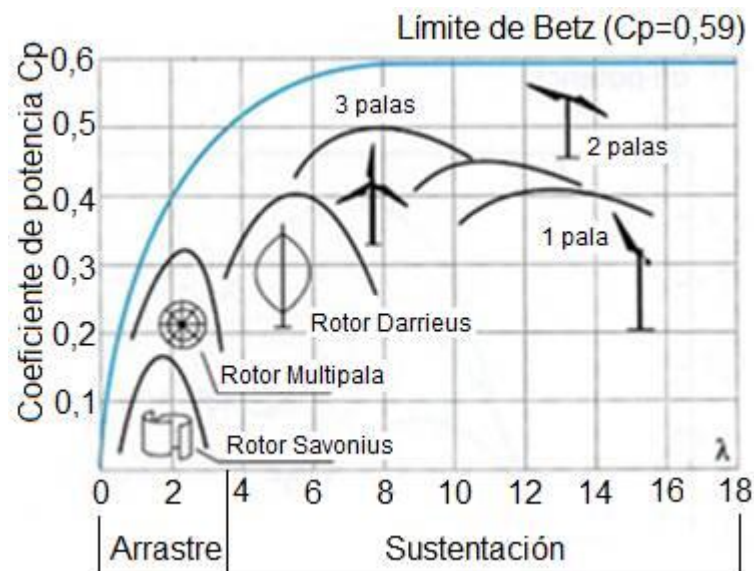


Figura 2.8 Rendimiento respecto al límite de Betz

En la figura 2.8 se representan los rendimientos típicos de diversos tipos de rotores eólicos, referidos a la relación entre la velocidad de la punta de las palas en los rotores de eje horizontal “O” del punto más alejado del eje de rotación en el caso de los rotores de eje vertical tipo darrieus o savonius) y la velocidad del viento.

Si el viento no supera la denominada puesta en marcha (valor mínimo necesario para vencer rozamientos y comenzar a producir trabajo útil) no es posible el arranque de un molino. Con velocidades mayores comenzará a girar entregando una potencia que responde a la conocida ley del cubo de la velocidad. Esto será así hasta que se alcance la potencia nominal, generalmente la máxima que puede entregar, punto en que comienzan a actuar mecanismos activos o pasivo de regulación para evitar que la maquina trabaje bajo condiciones para las cuales no fue diseñada. Continuará operando a velocidades mayores, aunque la potencia entregada no será muy diferente a la nominal, hasta que se alcance la velocidad de corte donde, por razones de seguridad, se detiene. En la figura 2.9 se presenta una curva típica de potencia.

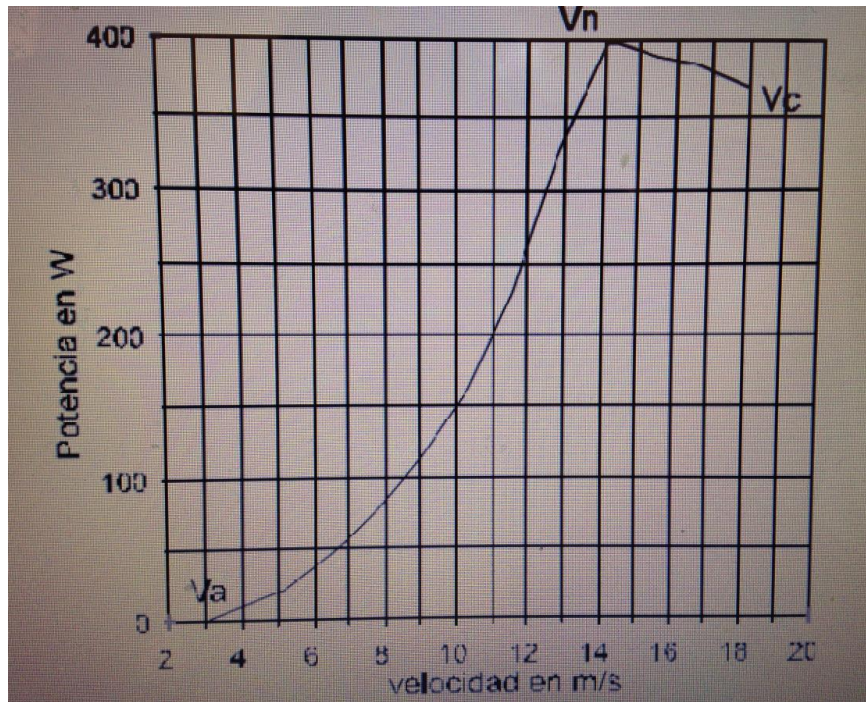


Figura 2.9 Rendimiento típico de un aerogenerador pequeño de (400w)

Conociendo las características de una turbina eólica y la velocidad del viento en un instante dado, es sencillo determinar la potencia útil.

El problema radica en que la velocidad del viento no es constante y, por lo tanto, es necesario conocer su evolución temporal para estimar la energía útil que una turbina eólica es capaz de entregar en un periodo determinado. Lamentablemente, las mediciones que se realizan con fines climatológicos, no tienen, por lo general, el grado de detalle que requieren ciertos proyectos eólicos. En el caso de instalaciones de pequeña potencia, o para analizar la pre factibilidad de instalaciones de potencias altas, existen métodos estadísticos que permiten, a partir de las características de un lugar y la velocidad media del viento, determinar la distribución de velocidades horarias a lo largo de, por ejemplo, todo un año y estimar la energía útil anual obtenible. Cuando se trate de mayor potencia será inevitable la realización de mediciones especiales, como frecuencia y velocidad máxima de ráfagas, que contribuyan a la selección de las máquinas y a un cálculo más preciso de rentabilidad del proyecto.

## 2.7 Estimación de Recurso Eólico

Para realizar una estimación de recurso de un sitio, son necesarios datos de viento generados por una estación meteorológica preferentemente de un periodo largo. Estos datos deben incluir por lo menos, dirección y velocidad del viento. Existen muchas formas de resumir los datos para llevar a cabo una evaluación de recurso de un sitio en particular, estas técnicas incluyen métodos estadísticos y directos.

Para pronosticar la variación de la velocidad media del viento para un largo tiempo se utiliza la función de distribución acumulada o curva de duración del viento. Donde  $K$  y  $\alpha$  impacta la velocidad del viento y su desviación, es decir la distribución de Weibull concentra las velocidades promedio.

Cuando esta probabilidad se multiplica por 8760 (horas anuales) se obtienen las horas equivalentes que durante un año esperamos que exceda esta velocidad. Una función que es muy usada para análisis de viento, es la distribución de Weibull que esta descrita por las siguientes fórmulas de parámetros de distribución Weibull:

$$\alpha = (\sigma/V_{prom})^{-1.086}$$

Donde  $\sigma$  es la desviación estándar para los datos de la velocidad del viento y  $V_{prom}$  es el valor promedio de la velocidad del viento. Para el cálculo de  $\beta$  se deberá de usar la siguiente ecuación.

$$\beta = V_{prom} \left[ 0.568 + \left( 0. \frac{433}{\alpha} \right) \right]^{-1.086/\alpha}$$

La figura 2.10 muestra distintas curvas de duración para distintos valores de  $k$  o  $\beta$ .

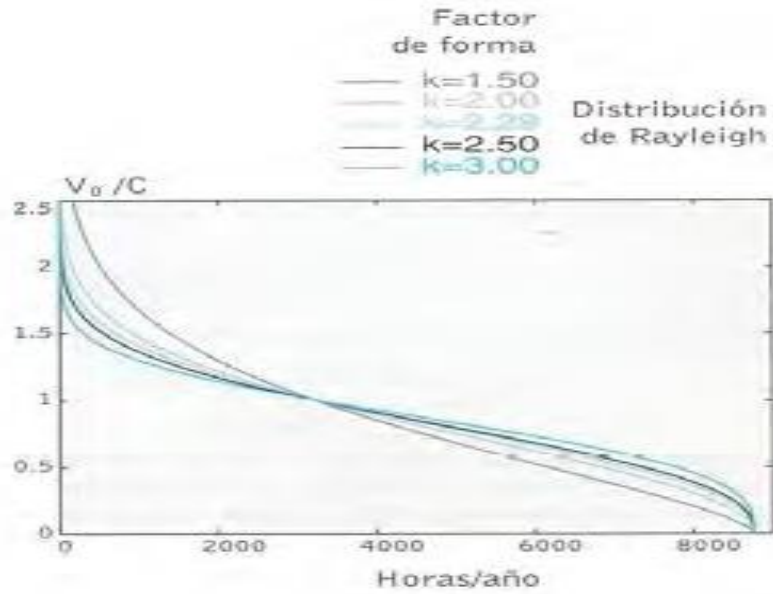


Figura 2.10 Distribución de Rayleigh en curvas de duración de Viento

Para un intervalo de velocidad la fracción del viento la parte del tiempo en que la velocidad estaría en el intervalo. Si esta diferencia fuese muy pequeña, dicha parte sería  $F(V) \delta V$ , la cual es la función de densidad de probabilidad. La figura 2.11 muestra distintos valores del factor de forma  $k$  para la distribución de Weibull.

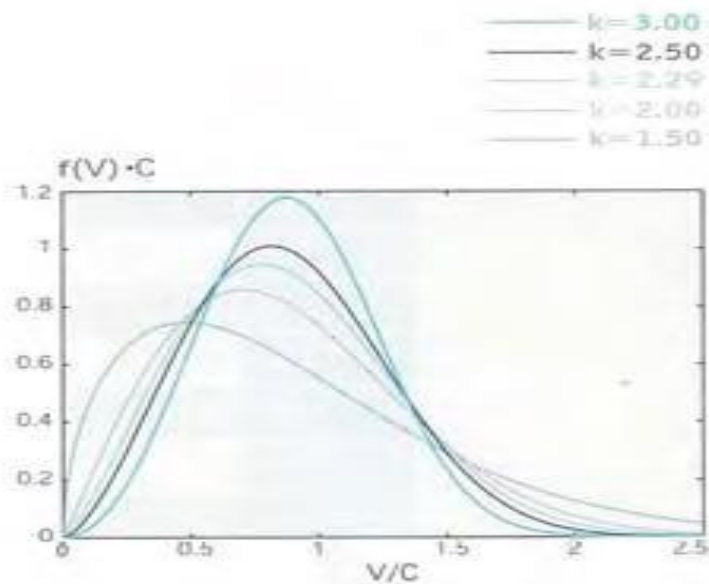


Figura 2.11 Curvas de Weibull de función de densidad de probabilidad

Los valores “ $\alpha$ ” o “ $k$ ” y “ $\beta$ ” o “ $C$ ” se deben obtener a partir de las medidas tomadas en el emplazamiento. Para lograrlo se las formulas anteriores y se aplican a la distribución de Weibull en el anexo #1 se muestra una tabla en la que se define según la velocidad la distribución de Weibull.

Una vez determinado el valor de “ $k$ ” y “ $C$ ” se puede obtener otro parámetro interesante para la evaluación de recurso eólico: la dirección. Es común mostrar información simultánea, dirección e intensidad del viento en un solo gráfico. Este gráfico es llamado rosa de los vientos, este gráfico se representa en la figura 2.12 donde se han considerado 16 segmentos, que representan direcciones angulares según la procedencia del viento. La longitud radial dividida representa la duración en el tiempo y la proporción de energía contenida en el sector.

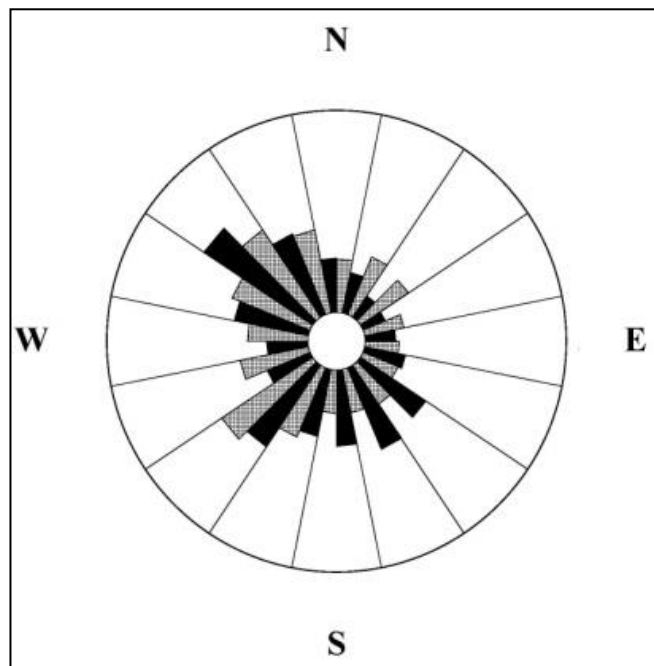


Figura 2.12 Rosa de los vientos

## 2.8 Cuantificación del potencial eólico y límite de Betz

Una masa de aire que se mueve con una velocidad tiene una energía cinética igual a:

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

La teoría de la cantidad de movimiento, en la que se basa el razonamiento del aprovechamiento de la energía eólica, se fundamenta en las hipótesis de Rankin y Froude, la cual supone el aire como un fluido ideal sin viscosidad, en todo el plano fluido, salvo en las proximidades muy inmediatas al plano del rotor. El movimiento en todo el campo fluido es subsónico y a muy bajos números de Mach, lo que nos permite en este caso considerar al aire como prácticamente incompresible y en consecuencia, su densidad constante en todo el campo. Asimismo no tiene en cuenta la variable temperatura.

El movimiento del fluido es estacionario, es decir, no depende del tiempo. En consecuencia, todas las variables dependen sólo del punto del espacio donde se calculen. No tiene en cuenta la velocidad de rotación el rotor ni tampoco la de su estela. Contempla al rotor como un ente especial, más concretamente como un disco “poroso” o disco “límite”, al cual se llegaría colocando en él un número infinito de palas a su vez infinitamente delgadas. Las magnitudes empleadas para representar las variables fluidas en una sección recta determinada del tubo de corriente considerado, son magnitudes equivalentes de su perfil de distribución a lo ancho de dicha sección.

## 2.9 Potencia eólica disponible y potencia eólica aprovechable

Las leyes de la física impiden que se pueda extraer toda la potencia disponible en el viento a su paso por el rotor de un aerogenerador. El viento a su paso se frena, saliendo del mismo con una velocidad menor que con la que ha entrado. En la práctica se aprovecha un 40% de la potencia eólica disponible. La máxima potencia eólica aprovechada la define el conocido como “Límite de Betz” como se ve en la figura 2.13.



Figura 2.13 Límite de Betz

La energía eólica es la energía cinética del viento. La potencia disponible del viento que pasa perpendicularmente a través de un área circular (la realizada por las palas del rotor,  $r$ ) es:

$$P_{viento} = \frac{1}{2} \rho v^3 \pi r^2$$

Esta expresión nos indica que la potencia eólica disponible es proporcional a la densidad del aire, al área expuesta perpendicularmente al flujo de viento y al cubo de la velocidad del mismo. La potencia eólica disponible es la máxima potencia que podríamos extraer al viento si pudiésemos convertir toda su energía cinética en energía útil. El límite de Betz, los rozamientos aerodinámicos y mecánicos, rendimientos del generador eléctrico, sólo nos permitirán en la práctica, en el mejor de los casos, un 40% de la potencia eólica disponible.

La potencia eólica extraída o captada del viento por el rotor de la máquina se conoce como “Potencia Eólica Aprovechada”. El rendimiento de conversión se describe por un “Coeficiente de Potencia ( $C_p$ )” definido como la relación entre la potencia aprovechada y la disponible ( $C_p = P_a / P_d$ ). Es la fracción de la energía cinética del viento convertida en energía cinética de rotación en el rotor del aerogenerador.

Por último recordando la definición del coeficiente de potencia de un aerogenerador, obtenemos para el caso límite de máxima potencia absorbida en el rotor o Límite de Betz:

$$C_{p, \max} = \frac{\left[ \left( \frac{8}{27} \right) \rho A v^3 \right]}{\frac{1}{2} \rho A v^3} = \frac{16}{27} = 0.5925$$

Siendo esta la máxima potencia, proveniente del viento, que puede captar el rotor de un aerogenerador ideal que es del 59.3%.

Consideraciones prácticas: La ecuación de Betz proporciona el límite superior de las posibilidades de un aerogenerador, pero en sí es poco fina, pues no tiene en cuenta una serie de factores como la resistencia aerodinámica de las palas, la pérdida de energía por la estela generada en la rotación, la compresibilidad del fluido y la interferencia de las palas.

En realidad habrá que tener en cuenta además el rendimiento de los diversos mecanismos y equipos que componen el aerogenerador, por lo que considerando el siguiente balance del mismo para los distintos componentes:

Rendimiento de Betz.....	59.3%
Rendimiento de la hélice.....	85%
Rendimiento del multiplicador.....	98%
Rendimiento del generador.....	95%
Rendimiento del transformador.....	98%

Se obtiene un rendimiento global de la instalación del orden del 46% en el mejor de los casos.

## **2.10 Potencial eólico en México**

El viento como tal es una manifestación energética de la naturaleza aleatoria, ya que su velocidad, dirección y presencia varía con las regiones geográficas, las horas del día, los meses del año y la altura de los generadores de viento. Esta es la principal razón por la cual no se recomienda usar esta fuente de energía en forma única para la alimentación de cargas remotas. Por lo tanto, será necesario aprovechar la energía eólica cuando se encuentre disponible, ya sea almacenándola en bancos de baterías o bien entregándola a la red de distribución de la empresa suministradora.

En México existen importantes manifestaciones eólicas en áreas geográficas puntuales entre las que destacan, por su importancia, los estados de Oaxaca, Hidalgo, Zacatecas, Guerrero y la península de Baja California.

El potencial eólico del país no ha sido evaluado de manera exhaustiva. Se han realizado, sin embargo, evaluaciones del recurso en regiones específicas. En particular el Laboratorio Nacional de Energías Renovables de los Estados Unidos ha coordinado la realización de mapas eólicos para Oaxaca (véase la Ilustración), Baja California Sur, las costas de Yucatán y de Quintana Roo y las franjas fronterizas de los estados de Baja California, Sonora y Chihuahua. Estos mapas (Figura 2.14) se han realizado conjuntando información de estaciones meteorológicas con técnicas de prospección remota.



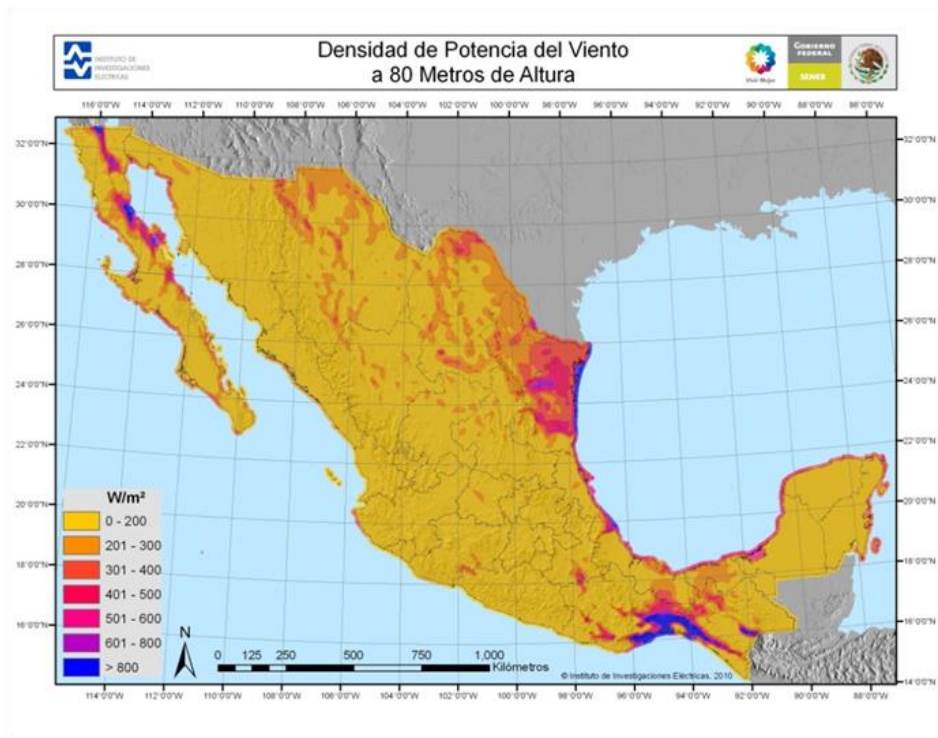


Figura 2.14 Potencia de viento en México

Como parte del proyecto “Plan de acción para eliminar barreras para el desarrollo de la generación eolieléctrica en México”, el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) ha instalado anemómetros en diversos puntos del país y ha encontrado potenciales significativos en varios de ellos. Asimismo, como parte de las actividades del PERGE, está previsto que la Comisión Federal de Electricidad realizará en el transcurso de los próximos años una evaluación, la cual, junto con la información disponible de otras fuentes, permitirá contar con un mapa eólico nacional.

Las posibilidades de desarrollo de la energía eólica en el corto y en el mediano plazo en México dependen no sólo del potencial físico del recurso, sino también de la capacidad industrial y de la capacidad del sistema eléctrico para absorber la electricidad generada sin poner en riesgo la seguridad y la estabilidad del sistema. La factibilidad económica de estos proyectos dependerá de los mecanismos regulatorios y del acceso a los instrumentos internacionales relacionados con la mitigación del cambio climático.

## **2.11 Potencial eólico en Juárez**

En Ciudad Juárez se tienen estudios solo de la estación meteorológica en las instalaciones de la UACJ, en donde la velocidad del viento promedio durante el periodo 2003-2009 fue de 6.8 km/hora (1.9 m/s), la velocidad promedio de los valores máximos fue de 35.5 km/hora (9.9 m/s). La obtención de estos datos fueron analizados enfocados en el estudio del potencial eólico enfocado a la generación de energía para Ciudad Juárez.

También en las afueras de la mancha urbana se hicieron estudios en la sierra presidio encontrando factibilidad económica para generación eoloelectrica en el sitio haciendo estimaciones de velocidad del viento a diferentes alturas y encontrando potencial comercial para dos aerogeneradores de 1.5 Mega watts de potencia alcanzable.

En otro punto de medición se hizo la siguiente descripción meteorológica es resultado del análisis de la información proporcionada por el Centro de Estudios de Medio Ambiente (CEMA) de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Dicha información fue recabada a través de la estación meteorológica localizada en el kilómetro 12.5 de la carretera Panamericana, cuyas coordenadas geográficas son: 31° 41' 25.08" latitud norte y 106° 25' 25.41" longitud oeste.

El periodo de tiempo que comprenden los registros obtenidos en esta estación meteorológica va de 1982 a 1997, sin embargo, el periodo comprendido entre 1990 y 1997 está en proceso de captura, por ello el siguiente análisis comprende únicamente de 1982 a 1989.

Rosa de vientos y patrones generales de circulación en superficie

La Figura 2.15 muestra la rosa de los vientos en superficie para el periodo de información considerada.

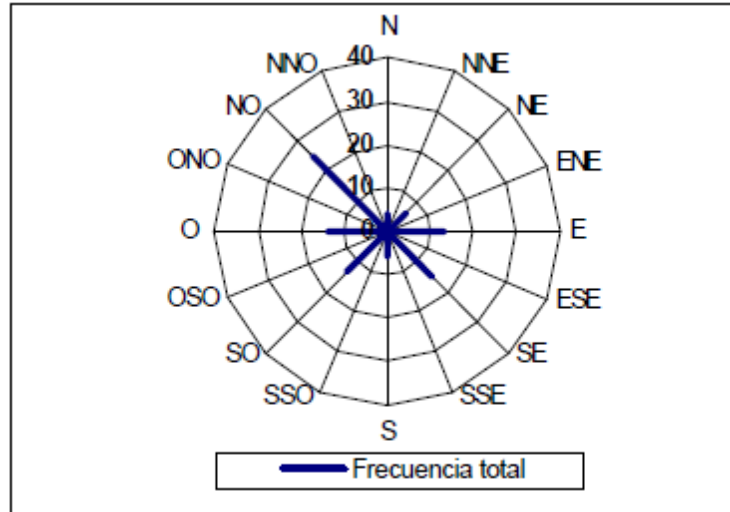


Figura 2.15 Rosa de viento dominante en Cd. Juárez

De su análisis se observa que:

El viento dominante con el 25% de la frecuencia total proviene del noroeste siguiendo en importancia los vientos del sureste, oeste, suroeste y este con el 15, 14 y 13%, respectivamente.

El flujo de viento manifiesta dos patrones principales de circulación; en orden de importancia de la rosa de vientos, el primer patrón con 52% de la frecuencia total, indica un flujo de vientos occidentales, incluyendo las direcciones

Aspectos generales: 27 noroeste, oeste y suroeste, el cual se manifiesta con claridad en los meses de noviembre a junio; el segundo patrón en importancia con el 34% de incidencia son los vientos orientales, incluyendo las direcciones noreste, este y sureste, que tienen un claro predominio de julio a septiembre. Respecto a los vientos provenientes del norte y del sur, éstos representan sólo el 4 y el 6%, respectivamente, de la frecuencia total, lo que significa una incidencia poco importante en la circulación local.

En todos los casos, ver la Figura 2.16, la intensidad de viento más frecuente es menor a los 5 m/s, aunque temporalmente alcanzan velocidades que van de los 5.1 a los 10 m/s. Tomando en cuenta todas las direcciones, cerca del 75% del tiempo el viento tiene una velocidad menor a los 5 m/s. Las intensidades de viento superiores a los 10 m/s son más frecuentes en la dirección noroeste.

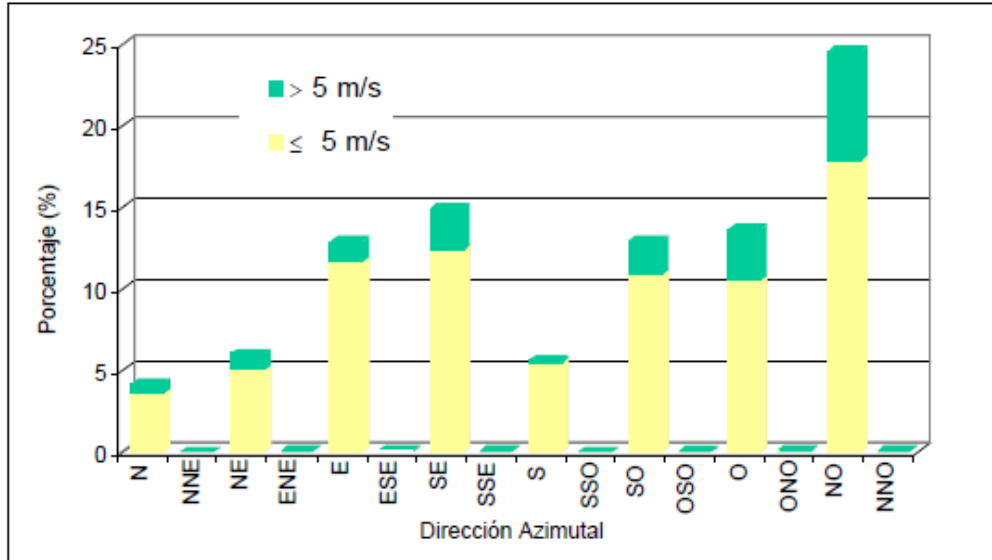


Figura 2.16 Viento dominante en Cd. Juárez

Un estudio realizado durante 1988 en la región (Okrasinski y Serna, 1995), indica que en el verano los vientos dominantes en esta región, dentro de los primeros 3,000 metros de altura, provienen del este, sureste y sur, y que la frecuencia de estos vientos decrece en el invierno, aunque siguen siendo comunes en los primeros 1,000 metros, especialmente en las localidades del sur.

## Capítulo 3

### 3. Caracterización del recurso eólico

Los objetivos de la evaluación eólica determinan la campaña de medición eólica más adecuada. Esta varía dependiendo de los parámetros a medir, el tipo de sensores, la cantidad y ubicación de las estaciones anemométricas, altura de medida, frecuencia de colecta y tipos de reportes.

Los parámetros básicos a medir son: la velocidad y dirección de viento, por esto, los sensores básicos son el anemómetro y la veleta. En cada estación anemométrica se acostumbra colocar por lo menos 2 anemómetros para validar los datos y para obtener el perfil del viento que determinan los valores de rugosidad del terreno.

La ubicación y cantidad de estaciones está limitado principalmente por el factor económico, ya que para el evaluador es mejor la mayor cantidad de estaciones en los puntos más representativos del área. La altura óptima para que los sensores tomen datos en el emplazamiento es igual a la altura de buje de la aeroturbina que se pretende instalar, sin embargo, en un primer acercamiento es permisible alturas menores, que nos den información básica que nos permita decidir por un estudio más profundo.

Finalmente, se debe determinar la frecuencia de colecta, ya que una inspección oportuna de los datos, alerta de las fallas que pudieran ocurrir con los equipos de medición, almacenamiento o suministro de energía, reduciendo así pérdidas de datos.

#### 3.1 Medición del Viento

La finalidad de la campaña de medición es la colecta de datos que nos brinden la información suficiente para conocer las características del viento de un sitio dado. Los parámetros básicos, como ya se dijo, son la velocidad y dirección del viento, aunque la temperatura y presión del aire son de gran utilidad para la determinación del potencial eólico. Cada uno de los parámetros anteriores es medido a una altura apropiada dependiendo de su naturaleza.

La velocidad del viento es medida como estándar meteorológico internacional a una altura de 10 metros, pero para los análisis eólicos no es suficiente, ya que las aeroturbinas modernas poseen una altura de buje de 60 a 100 metros. Basta una altura de 30 a 40 metros para las estaciones anemométricas de evaluación, distribuyendo de 3 a 4 anemómetros a diferentes alturas de la torre.

La colocación de las veletas, normalmente se hace a la misma altura que los sensores de velocidad para tener un par de valores, referidos a una misma altura, sin embargo, para la dirección es menos estricta la colocación de veletas a múltiples alturas, ya que la variación de la dirección a distintas alturas normalmente no excede los  $15^\circ$ .

La temperatura y la presión son parámetros asociados a escalas espaciales mayores a la de un emplazamiento, lo que indica que dentro del espacio estudiado, los cambios no afectan sustancialmente la evaluación, por lo que medirlas a pocos metros sobre el suelo es suficiente.

Existen algunos casos donde la temperatura es medida en la base de la estación anemométrica y en lo más alto, con la finalidad de estudiar el gradiente de temperatura, el cual provee información sobre turbulencia y estabilidad atmosférica. La altura de los sensores se muestra en la figura 3.1.



*Figura 3.1 Sensores a diferentes alturas en una estación*

Medir y almacenar estos parámetros implica una serie de funciones internas del registrador de datos que necesitan ser definidas. El muestreo de los datos puede ser de unidades por segundo mientras que los registros de valor medio, desviación estándar, máximos y mínimos son cada diez minutos de acuerdo con los estándares internacionales. Los registros de valor medio está definido como el promedio de todos los valores muestreados. La desviación estándar es obtenida mediante la relación, entre los valores instantáneos y el promedio, es indicador de la turbulencia y de la estabilidad atmosférica.

Los valores máximos y mínimos están definidos como el máximo y mínimo valor presentado en un intervalo temporal.

### **3.2 Velocidades del Viento**

Este parámetro es obtenido mediante el anemómetro. Los datos de velocidad de viento son el mayor indicador de la energía eólica presente en un lugar. Los múltiples datos a distintas alturas determinan las características del perfil del viento, lo que permite hacer extrapolaciones a alturas de buje de diferentes aeroturbinas.

### **3.3 Dirección del Viento**

Para definir la dirección dominante del viento se instalan veletas a distintas alturas, la información de la dirección se utiliza principalmente para la optimización del diseño de parque de una central eólica.

### **3.4 Temperatura y Presión**

La temperatura y presión son un importante indicador de la energía disponible en el viento, ya que son parámetros necesarios para el cálculo de la densidad del aire, una variable fundamental en la estimación de energía de salida de una aeroturbina.

### **3.5 Equipo**

El equipo utilizado en las estaciones anemométricas debe cumplir con el objetivo de generar datos continuos en el tiempo y de buena calidad. Esto se logra utilizando instrumentos robustos y que a la vez mantengan su calibración el mayor tiempo posible. La estación también está compuesta por un registrador de datos, encargado de generar y almacenar todos los registros provenientes de las señales de los sensores, este equipo se suele conectar a un módulo de comunicación como GSM, satelital, radio o Ethernet. La comunicación con la estación permite un mayor control de ella ya que se pueden hacer colectas de datos remotos o incluso acceso a datos en tiempo real. La lejanía del suministro eléctrico de las estaciones obliga a incorporar un sistema de generación de autoconsumo. Este sistema generalmente se implementa con un sistema de generación fotovoltaico.

El soporte mecánico de todo este sistema es un mástil o torre que permite alcanzar las alturas necesarias para la instalación de los sensores, todo este conjunto forma la estación anemométrica.

### **3.6 Sensores**

Las estaciones anemométricas pueden adquirirse como un solo paquete por diversos proveedores, o por separado. Cuando se compran por separado es importante verificar la compatibilidad de todos los equipos.

Un sensor es un dispositivo capaz de transformar magnitudes físicas llamadas variables de instrumentación, en magnitudes eléctricas. Las variables de instrumentación dependen del tipo de sensor, en nuestro caso son: velocidad y dirección del viento, temperatura, presión y humedad.

Las principales características de los sensores son: rango, velocidad de inicio, constante de distancia, rango de temperatura de operación, rango de humedad de operación, error del sensor y resolución del registro.

### **3.7 Anemómetros**

Los sensores para cuantificar la velocidad del viento son llamados anemómetros, los hay de diversas formas, entre los que destacan el anemómetro de copas y de hélice. El uso redundante de anemómetros a diferentes alturas minimiza el riesgo de pérdida de datos debido a una falla en el sensor primario.

El anemómetro de copas (Figura 3.2) consiste en 3 o 4 copas, gira en torno a un eje vertical, siempre queda una copa frente al viento, su forma aerodinámica convierte la fuerza de presión del viento en un torque. La rotación de las copas son casi- lineales proporcionales a la velocidad del viento en un rango específico. Un transductor convierte el movimiento de rotación en señales eléctricas que viajan a través de un cable hasta el registrador de datos. El registrador de datos ajusta esta señal con valores de slope y offset (valores de compensación electrónica) para calcular la velocidad de viento.





*Figura 3.2 Anemómetro de copas*

El anemómetro más popular en la industria eólica ha sido el de 3 copas (Figura 3.2) porque ha demostrado tener una duración de 2 años en la mayoría de los ambientes y estabilidad en su calibración.

Las veletas son utilizadas para medir la dirección del viento. La más común utiliza una aleta con eje de rotación vertical. La veleta busca constantemente la posición de equilibrio, alineándose con la dirección del viento. La mayoría de las veletas tienen un potenciómetro como transductor, que convierte la posición en señal eléctrica, la señal eléctrica es transmitida por un cable hasta el registrador de datos. Las señales están referenciadas a una posición (muy comúnmente con el norte verdadero).

El registrador de datos envía una señal de tensión conocida; a través del potenciómetro; la tensión de caída es registrada, la relación entre estas dos señales determina la posición de la veleta. Esta señal es interpretada por el registrador de datos ajustándola con un offset (en caso de una desalineación con la referencia). El potenciómetro lineal no cubre todo el rango de  $360^\circ$ , esta área abierta se le conoce como “punto muerto” de la veleta, cuando la veleta toma una posición en este rango, la salida es aleatoria, aunque algunos fabricantes compensan este hecho con el software del registrador de datos. Así el “punto muerto” de la veleta no debe estar alineado dentro o cerca de la dirección dominante del viento.

Cuando elegimos una veleta tendríamos que fijarnos en el rango del punto muerto, no debe exceder los  $8^\circ$ , la resolución de la veleta también es importante, ya que muchas veletas dividen el giro de  $360^\circ$  en 16 segmentos de  $22.5^\circ$ , esta resolución no es la adecuada para la evaluación eólica.

Un modelo popular, es la veleta se muestra en la figura 22 y tiene un diseño simple y requiere de poco mantenimiento, utiliza un potenciómetro pasivo y está constituido por componentes de termoplásticos y acero inoxidable.



*Figura 3.3 Veleta para dirección del viento*

### **3.8 Termómetros y Barómetros**

El típico sensor de temperatura ambiente está constituido de tres partes: el transductor, interface y una carcasa como radiador. El transductor tiene materiales elementales como níquel o platino con una relación entre temperatura y resistencia, termistores y semiconductores son elementos utilizados en estos sensores. El valor de resistencia es medido por el registrador de datos, utiliza una ecuación para el cálculo de la temperatura del aire actual. Los transductores están dentro de una carcasa que los protege de la radiación directa del sol, que comúnmente es de platos metálicos apilados.

### **3.9 Registrador de Datos**

Comúnmente llamados Data loggers (Figura 3.4), los hay de muchos tipos en el mercado, poseen desde un simple grabador de carácter hasta tarjetas de interfaz con computadoras personales. Muchos fabricantes ofrecen sistemas completos, registradores de datos con sistemas de almacenamiento periféricos y dispositivos de transferencia de datos.

Se pueden clasificarse por el método empleado para transferir datos, en: manual y remota. La transferencia de datos remotamente permite reducir la frecuencia de visitas a campo. Este equipo debe de ser montado dentro de un gabinete anti-corrosivo, contra agua, suficientemente robusto para resistir el ambiente y el vandalismo.

Es importante conocer las principales características del registrador, como son: la forma de almacenar los datos, la memoria interna de almacenamiento, su operación en distintos ambientes, la forma de descargar datos y fuente de alimentación.



*Figura 3.4 Registrador de Datos*

Los dispositivos de almacenamiento de datos son utilizados por los registradores para almacenar los datos procesados; el registrador realiza una serie de operaciones, dichas operaciones y sus resultados son almacenados temporalmente en una memoria interna.

Todos los registradores de datos tienen un sistema operativo que incluye una memoria temporal para realizar sus operaciones. Algoritmos internos utilizan esta memoria para calcular y almacenar los parámetros requeridos. Los datos son almacenados en varios formatos de memoria. Algunos registradores tienen un programa fijo que no puede ser alterado, otros son interactivos y pueden ser programados para una tarea específica.

Estos programas almacenan los datos en memorias temporales, la desventaja es que necesitan alimentación continua para no perder los datos. Por esto algunos sistemas incorporan baterías de soporte o memorias fijas estos sistemas son los recomendables ya que no pierden series de datos históricos por baterías agotadas.

### **3.10 Sistema de Comunicación**

La comunicación con la estación facilita en gran medida su administración, la idea central de incluir un sistema de comunicación en las estaciones, es la de acceder a los datos constantemente en forma remota (reducir costos de traslado), verificando la integridad de los sensores.

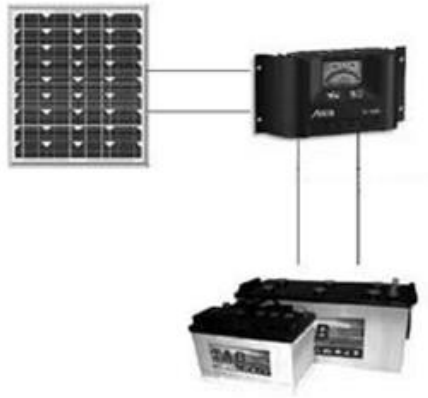
Existen diversos sistemas de comunicación, dependiendo de las necesidades específicas de cada proyecto y se puede mantener comunicación utilizando principalmente enlaces de radiofrecuencia, GSM celular, satelital y Ethernet.

Hay dos tipos básicos de colecta remota de datos, uno necesita un usuario desde la computadora central para establecer comunicación con la estación y el otro tipo, la estación se comunica con la computadora central Ambos necesitan operadores de comunicaciones para establecer los enlaces.

### **3.11 Fuentes de alimentación**

Todos los equipos de la estación anemométrica necesitan una fuente de alimentación, esta fuente debe ser dimensionada de acuerdo a la carga total del sistema. Una fuente de respaldo podría ser incluida para minimizar la pérdida de datos por falta de energía. Estos sistemas de alimentación podrían incluir un control de encendido y apagado de sistemas periféricos tales como el modem. La mayoría de los equipos ofrecen baterías de larga duración con las de ion-litio o plomo-ácido, dependiendo de los sistemas de carga.

Si está disponible la red eléctrica es posible utilizarla para cargar una batería a través de un rectificador, y así esta batería suministrará la energía al sistema de medición. La mayoría de las estaciones están en zonas aisladas del suministro eléctrico, por lo que es necesario instalar un sistema de auto-abastecimiento, es muy usual utilizar paneles fotovoltaicos como fuente de energía (Figura 3.5). Este sistema está compuesto de un panel fotovoltaico, que es conectado a un control que regula la carga y descarga de la batería, garantizando las condiciones de operación de la batería.



*Figura 3.5 Sistema fotovoltaico de alimentación*

### **3.12 Gabinetes**

Es necesario proteger el equipo del ambiente y del vandalismo. El registrador de datos, el modem, el sensor de presión, la batería, entre otros materiales pueden ir dentro del gabinete. El gabinete debe mantener aislado al equipo de la temperatura y la humedad para su correcto funcionamiento, la rigidez mecánica de este, es recomendable para evitar los robos de material.

### **3.13 Torres**

Hay varios tipos de torres por ejemplo las torres tubulares tiene sus mástiles segmentados (figura 3.6) con forma tubular soportadas con tensores y su instalación necesita un brazo auxiliar y un malacate, las torres de celosía su estructura es segmentada, normalmente con forma triangular que puede ser auto soportada o soportada con tensores, la ventaja del uso de esta torre es el ahorro en el mantenimiento de los instrumentos.

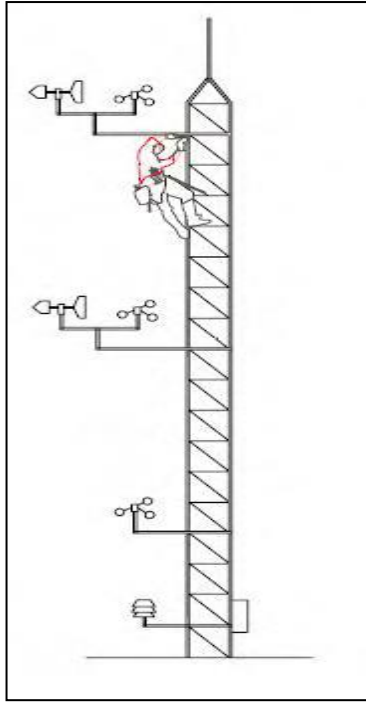
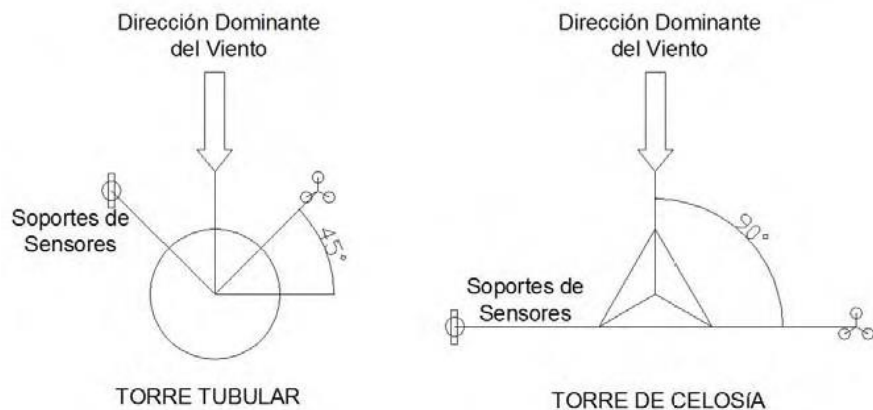


Figura 3.6 Torre de celosía

### 3.14 Soportes para sensores

La estructura donde son montados los instrumentos de medición tienen como principal finalidad el separar al sensor de los efectos del viento provocados por la torre, estos efectos son distintos dependiendo de la forma y dirección dominante del viento.

De acuerdo con lo anterior, la orientación de los soportes está determinada por la forma de la torre y por la dirección dominante del viento. Para torres tubulares, la orientación de los soportes es con un ángulo de  $45^\circ$  respecto a la dirección dominante del viento, mientras que en las torres triangulares el ángulo es  $90^\circ$  respecto a la dirección dominante del viento (figura 3.7).



*Figura 3.7 Orientación de soportes de acuerdo al tipo de torre*

### 3.15 Tratamiento de Datos

El tratamiento de los datos se realiza utilizando un software de procesamiento de datos generalmente provisto por los vendedores de registradores de datos, estos datos se pueden validar automáticamente aunque al final siempre requerirán una inspección visual.

### 3.16 Validación de datos

La validación generalmente se lleva a cabo en dos partes: filtrado de datos y verificación. El filtrado de datos se puede realizar usando un programa que muestre los datos presuntamente erróneos debido a que merecen ser escudriñados ya que no necesariamente son erróneos. Este procedimiento genera un reporte mostrando los rangos de datos sospechosos y las rutinas utilizadas para discriminar los datos erróneos en este caso se utilizó Excel.

## **Capítulo 4**

### **4. Materiales y métodos**

#### **4.1 Campaña de medición en la UTCJ**

La finalidad de esta campaña de medición es evaluar el recurso eólico de la Universidad Tecnológica de Ciudad Juárez para estimar la producción de generación eléctrica dimensionada de acuerdo con el viento que recorre día a día nuestras instalaciones. Para comenzar a tratar los datos primero se definió el periodo de los datos a evaluar, para la estación DAVIS en la cual se tomó el rango 01-Ago-2013 00:00 al 31-Jul-2014 24:00. Para garantizar la calidad de los datos colectados en la campaña de medición, se utilizó el método visual de filtrado de datos con errores que tenían valores negativos e ilógicos.

De este análisis visual, no se detectaron datos erróneos para la velocidad del viento ni para la dirección. Por lo cual con estos datos se comenzó el análisis de recurso eólico disponible en la Universidad Tecnológica de Ciudad Juárez.

#### **4.2 Área de Medición**

El Área de medición está ubicada en el poniente del campus de la Universidad Tecnológica de Ciudad Juárez, se encuentra entre los edificios con denominación H, J, I, en la segunda área de descanso (figura 4.1, 4.2 y 4.3). Sus coordenadas exactas son: 31.599245, -106.407505.



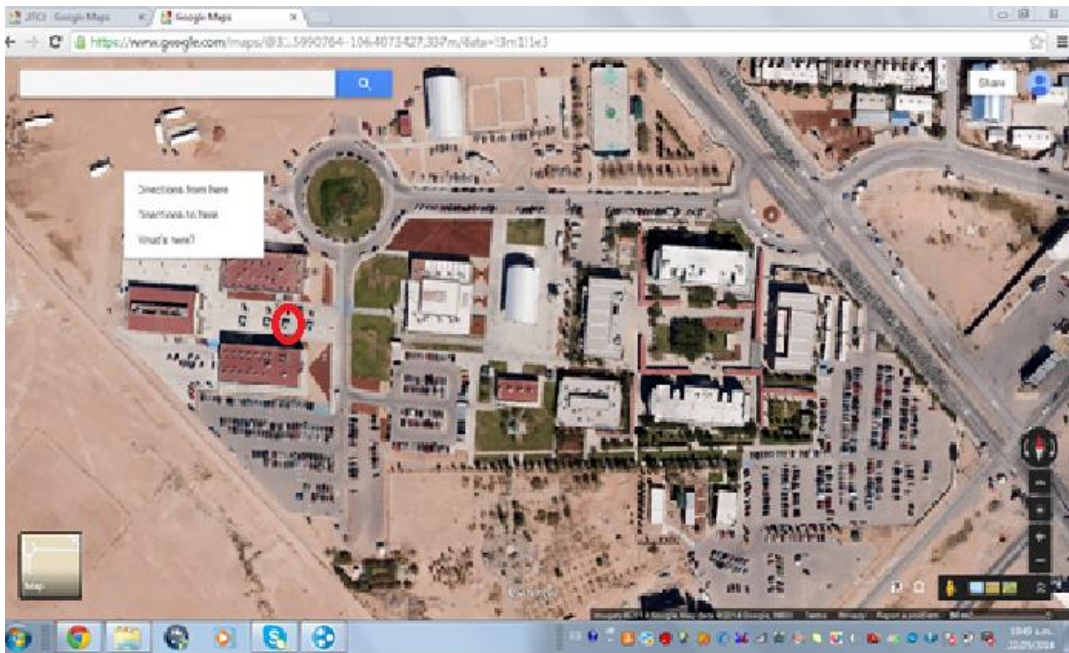


Figura 4.1 Ubicación de la estación meteorológica de la UTCJ



Figura 4.2 Ubicación de la estación meteorológica dentro de la UTCJ



*Figura 4.3 Ubicación directa de la estación meteorológica dentro de la UTCJ*

### **4.3 Selección del equipo**

El equipo que se selecciono fue el modelo HEAVY WEATHER PRO WS 2800 (Figura 4.4), el cual permite el uso de una PC para monitorear y grabar datos climatológicos recibidos de la estación inalámbrica climatológica, por medio de un USB que es parte del equipo.

Se pueden también revisar los datos históricos, y analizar tendencias respecto al tiempo usando software de gráficas.



Figura 4.4 Registrador de datos HEAVY WEATHER PRO WS 2800

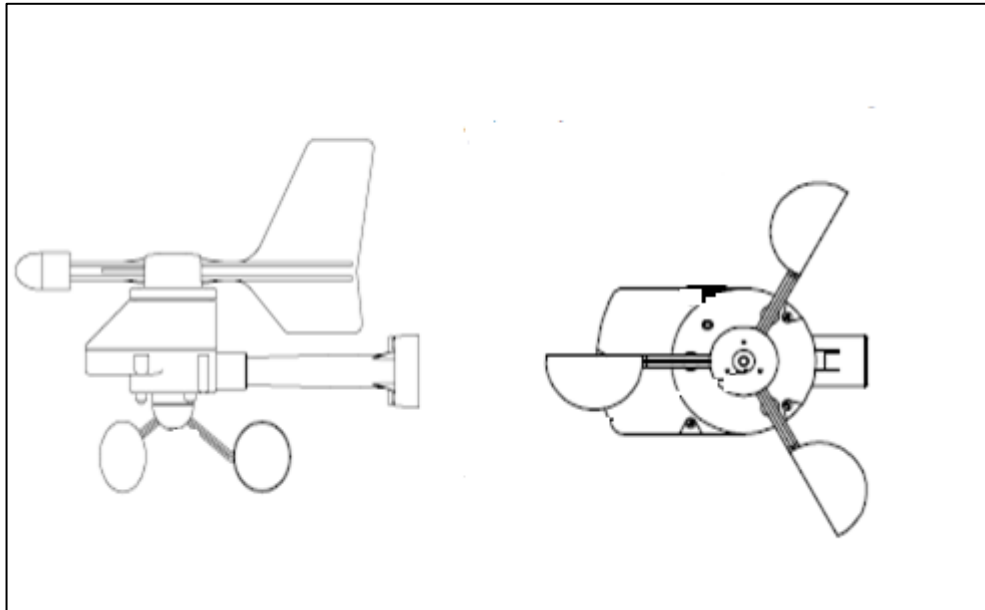
El cual cuenta con:

- Interfaz de PC incluido
- Sensor térmico, dirección y velocidad del viento
- El sensor de Viento trabaja con energía solar
- Recaba datos de lluvia
- Pronóstico y tendencia
- Temperatura dentro y fuera
- Humedad dentro y fuera
- Alarmas meteorológicas

Dimensiones:

- Receptor: 4.59 "x 0.94" x 7.01 "
- Termo-higro: 3.13 "" x 7.45 "x 3.54
- Sensor de lluvia: 5.18". diámetro x 7.19"
- Sensor de viento: 9.84 "x 5.74" x 11.11 "

## 4.4 Sensores



*Figura 4.5 Sensor de velocidad y dirección del viento (Anemómetro)*

Este anemómetro es el dispositivo usado para medir la velocidad del viento (Figura 4.5). La veleta es el aparato que determina la dirección del viento y tiene las siguientes características:

- Sensor de viento con energía solar inalámbrica
- 100% con energía solar con una función de célula de energía alcalina recargable
- Paneles solares de alta eficiencia permiten mantener un funcionamiento en la estación
- Gama de transmisión: más de 200 pies (campo abierto, sin barreras)
- Gama de transmisión: más de 200 pies (campo abierto, sin barreras)

## 4.5 Registrador de datos

Software de la historia del tiempo PC:

- Recoge datos meteorológicos como lo es la velocidad y dirección del viento, crea gráficos, sincroniza la fecha / hora, actualiza la configuración del usuario y establece alarmas de mal tiempo
- Funciona con Windows XP, Vista, Windows 7

## 4.6 Comunicación

Utiliza un transceptor USB inalámbrico:

- Transmisor-receptor USB que se conecta a su PC para transferir y compartir los datos meteorológicos recogidos en la pantalla de su tiempo con la PC

Para nuestro estudio la pantalla LCD muestra:

- Visualización de la hora en formato 12/24 horas
- Automático de la hora y la fecha (hora del PC) actualización de transceptor USB si está conectado
- Visualización del calendario (día, mes, año)
- Velocidad del viento mostrada en mph, km/h, m/s, nudos, y la escala de Beaufort: 0 a 111,8 mph
- Velocidad del viento y dirección con la brújula pantalla LCD (16 pasos / 22,5 grados)
- MAX registros de ráfaga de viento con la hora y fecha de la grabación

## 4.7 Torre

En este proyecto se utiliza una torre pequeña de perfil metálico de 3X3 pulgadas, en el que se sujetan todos los sensores a una altura de 4 metros aproximadamente, esta altura es debido a que con esta estación se hacen práctica con los alumnos de la universidad.

## 4.8 Instalación de la estación de medición

Se hizo una base metálica soldada y pintada para evitar corrosión y oxidación en la cual se adaptaron todos los sensores del sistema meteorológico incluyendo el anemómetro y veleta de manera que la captación del viento fuera la percepción óptima en este caso en la parte superior de la torre (Figura 4.6) de acuerdo a el lugar en donde se quiere hacer el estudio eólico, cabe mencionar que la posición del anemómetro esta calibrada dirigiendo la base del anemómetro hacia el norte de acuerdo a su manual ese es el punto exacto de calibración.



*Figura 4.6 Posición de la Torre en la UTCJ*

#### **4.9 Orientación de los sensores**

Una vez ya instalados los sensores en la base metálica se procedió a subir la base metálica e instalarla en la parte superior de la isla de descanso para estudiantes por lo que se calibró y se definió la dirección norte con una brújula para fijar la posición correcta en la que debe de estar la veleta para su correcta medición.

#### **4.10 Calibración**

Los equipos LA CROSSE TECHNOLOGY utilizados se adquirieron calibrados en la fábrica, este procedimiento confirma las especificaciones de los anemómetros, especificados por el vendedor. Esta prueba consiste en proporcionar un par de fuerzas al eje del anemómetro equivalente a una velocidad conocida, y compararla con las medidas reales de anemómetro. Esta prueba fue supervisada por profesores de la carrera de energías renovables de la UTCJ, quien además proporcionó el material necesario.

#### 4.11 Monitoreo

Para poder visualizar la información de datos que el Monitor recopila del Software Heavy Weather Pro WS 2800 se tiene que hacer una sincronización con la computadora (figura 4.7). Al estar sincronizado los datos que estaban en el monitor se descargan en el software instalado en la computadora y a su vez está recibiendo la información del sensor de velocidad y dirección del viento en el monitor y en el software de la computadora sacando promedios de datos captados cada segundo por los sensores de velocidad y dirección del viento.



Figura 4.7 Sincronización del monitor con la computadora

Para la obtención de estos datos, se sincronizaron los sensores y la consola con un dispositivo USB instalado en la computadora, como se muestra en la figura 4.8, el cual va almacenando los datos y se pueden visualizar por medio de un software de soporte del monitor llamado Heavy Weather Pro WS 2800.

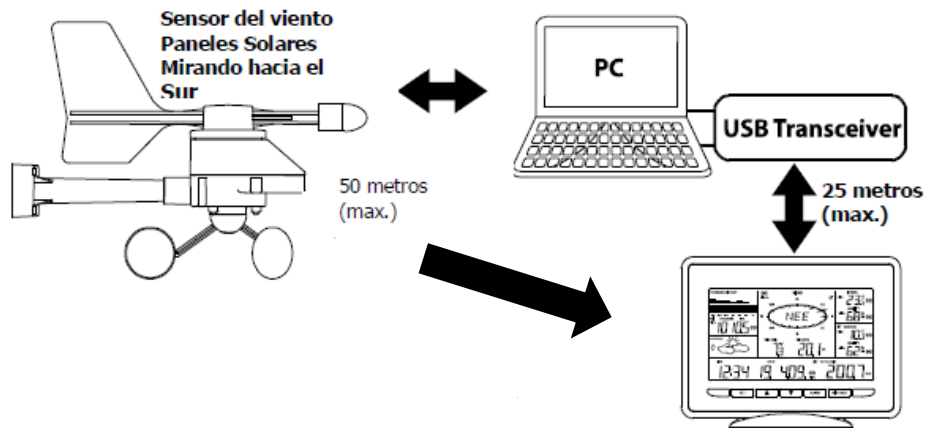


Figura 4.8 Flujo de datos

#### 4.12 Registro de datos del viento

Una vez que la estación anemométrica se ha instalado es necesario llevar a cabo el programa de mantenimiento y colecta de datos, este programa contempla la revisión periódica de datos con la finalidad de garantizar datos fiables. Para este caso de la estación de monitoreo Heavy Weather Pro WS 2800, la colecta de datos se realizó de la siguiente manera:

Datos generales de monitoreo eólico en la UTCJ		
Mes de monitoreo	Días monitoreados	Rango promedio de tiempo (Horas)
Agosto 2013	31	2
Septiembre 2013	30	2
Octubre 2013	31	2
Noviembre 2013	30	2
Diciembre 2013	31	2
Enero 2014	31	2
Febrero 2014	28	2
Marzo 2014	31	2
Abril 2014	30	2
Mayo 2014	31	2
Junio 2014	30	2
Julio 2014	31	2
Días totales monitoreados	365	

Tabla 1 Datos generales eólicos de la UTCJ



## Capítulo 5

### 5. Resultados y Discusión

#### 5.1 Evaluación del recurso eólico en la UTCJ

De los datos monitoreados se obtuvieron los siguientes valores de velocidad por mes (tabla 2 y figura 5.1) teniendo una velocidad promedio anual de 2.26 m/s. observando que los meses en los que la velocidad fue más fuerte fueron octubre y noviembre y diciembre del 2013 siguiendo septiembre del 2013 y enero del 2014.

Mes	Velocidad del viento promedio (m/s)
Agosto 2013	1.95
Septiembre 2013	2.40
Octubre 2013	3.40
Noviembre 2013	3.40
Diciembre 2013	3.40
Enero 2014	2.79
Febrero 2014	0.62
Marzo 2014	1.90
Abril 2014	1.51
Mayo 2014	1.36
Junio 2014	2.54
Julio 2014	2.34
<b>Promedio Total Monitoreado</b>	<b>2.26</b>

*Tabla 2 Datos de velocidad promedio*

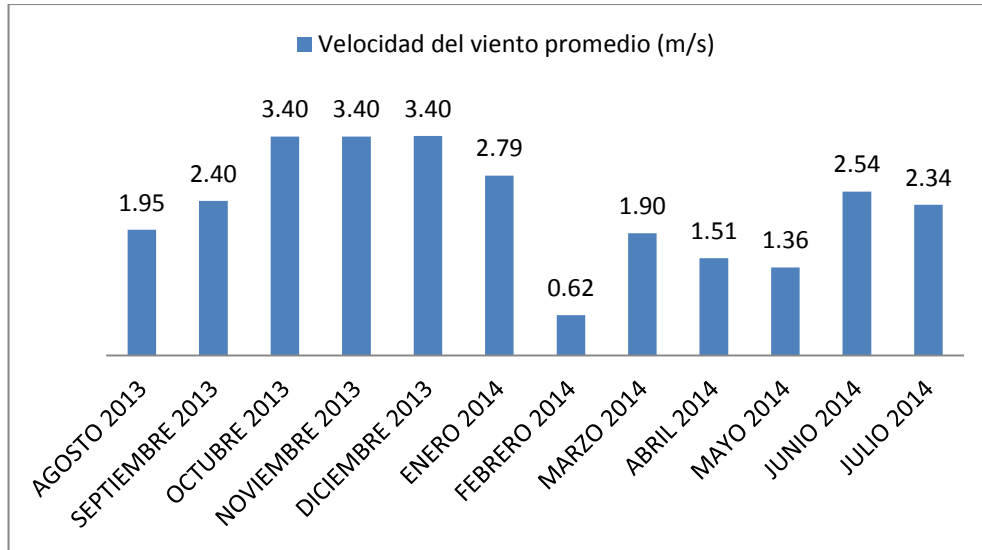


Figura 5.1 Comportamiento del viento en la UTCJ

## 5.2 Tratamiento de datos

Para tratar los datos primero se definieron los periodos de los datos a evaluar, para la estación Heavy Weather Pro WS 2800 en la cual se tomaron las fechas del 01 de agosto del 2013 a las 00:00 horas al 31 de julio del 2014 a las 24:00 horas. Para garantizar la calidad de los datos colectados en la campaña de medición, se utilizó el método visual de filtrado de datos.

Se realizó un archivo de base de datos para graficar la velocidad del viento, observar su comportamiento y así detectar los posibles fallas. Las figuras 5.1 y 5.2 muestran la forma en que se visualizaron los datos.

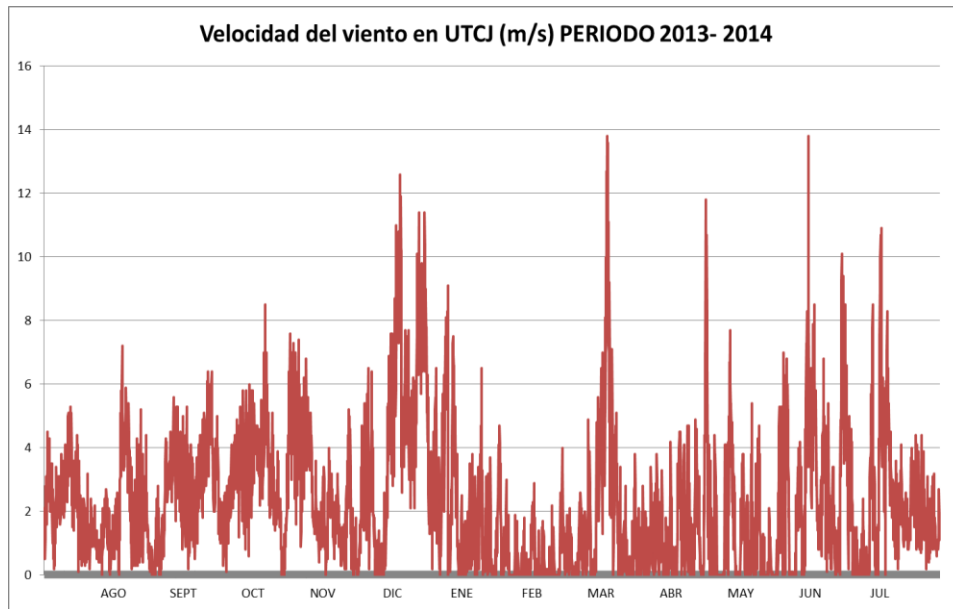


Figura 5.2 Gráfica de velocidad del viento

De este análisis visual se observa captación de datos de velocidad en cero por largos periodos de tiempo y algunas ráfagas inusuales de alta velocidad del viento durante los meses de marzo, abril y junio y julio del 2014 viéndose también con vientos promedio a mas alta velocidad el mes de diciembre alcanzando ráfagas promedio de arriba de 12 m/s por lo que las consideraciones del análisis de energía del viento principalmente se basan e en los comportamientos de velocidad constante y estable viendo en la figura 5.2 densidades más fuertes durante todo el año entre los 0.1 y los 4 m/s aproximadamente, siendo los datos estadísticos en graficados en la rosa de los vientos y en la distribución de Weibull en donde se definan las mejores concentraciones de energía y potencial eólico de este sitio. Cabe mencionar que para los fines estadísticos del estudio de las velocidades promedio se consideran también las ráfagas de viento y la ausencia de velocidad.

### 5.3 Rosa de los vientos

De acuerdo con la rosa de los vientos de la figura 5.3 se observan direcciones de viento predominantes a 247.5 grados s “WSW” y siguiéndole 270 grados “W” y como tercer potencial de dirección predominante es a 225 grados “WSW” confirmando el potencial energético en las mismas direcciones antes mencionadas en la gráfica de la figura 5.4.

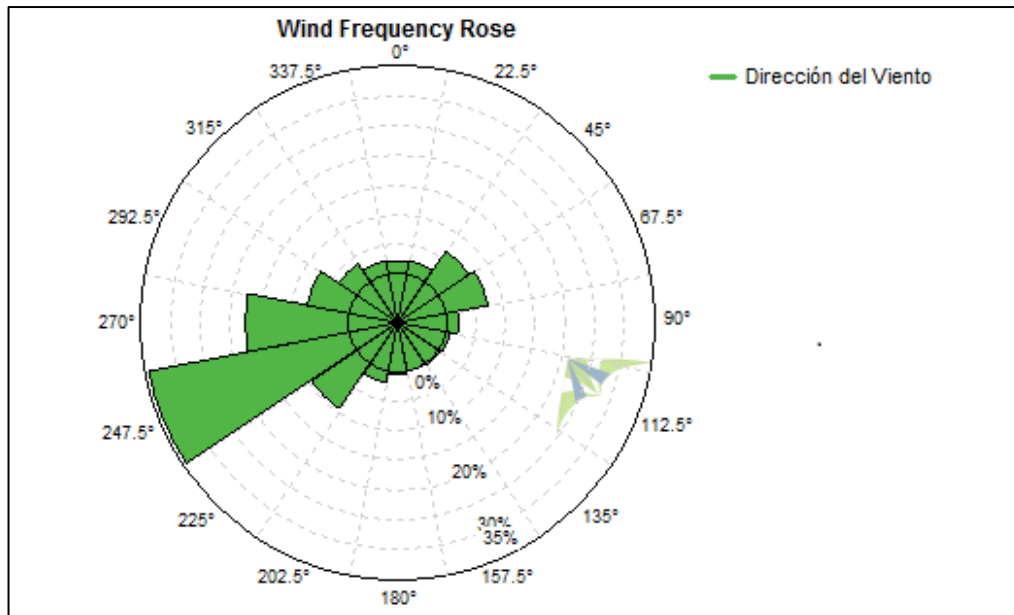


Figura 5.3 Rosa de los vientos de la UTCJ

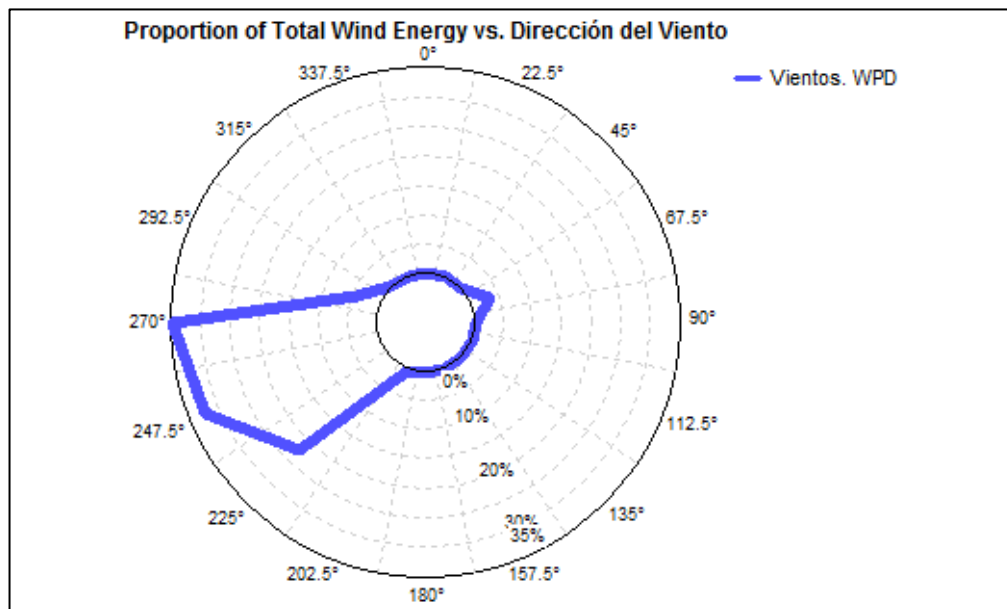


Figura 5.4 Rosa de los vientos energía

Para análisis posteriores se adjuntan en los anexos 9.3, 9.4, 9.5, 9.6, 9.7, 9.8 y 9.9 en donde se muestra el comportamiento de la velocidad con respecto a las direcciones de viento predominantes y que confirman que el potencial energético se encuentra con los vientos que vienen del oeste.

## 5.4 Distribución de Weibull

El análisis de Weibull para el sensor del anemómetro ofrece información sobre el comportamiento del viento en el punto de la localización anemométrica. A continuación se utilizaron las siguientes formulas y se muestran los valores.

$$\alpha = (\sigma/V_{\text{prom}})^{-1.086}$$

$$\beta = V_{\text{prom}} \left[ 0.568 + \left( 0. \frac{433}{\alpha} \right) \right]^{-1.086/\alpha}$$

Una vez sustituidos los datos en las formulas arriba mostradas obtenemos la siguiente tabla:

<b>Datos para Distribución de Weibull</b>	
Velocidad promedio (Vprom)	2.26
DESVIACION ESTANDAR O $\sigma$	2.12
"K" o " $\alpha$ "	1.1
"c" o " $\beta$ "	2.32

*Tabla 3 Datos para Distribución de Weibull*

Para la obtención de la densidad de potencia disponible en el viento (WPD) se consideró un densidad del aire promedio en Ciudad Juárez de 1.0969 Kg/M<sup>3</sup> este valor depende de la altitud en la que se encuentra la ciudad y se interpolan los valores para considerar su valor exacto (ver anexo de valores de la densidad del aire ambiente para alturas varias); enseguida se sustituyen los valores en la fórmula establecida y se consideran 4758 registros de datos obtenidos durante el periodo de medición obteniendo:

<b>Parámetro</b>	<b>Ajuste de valor promedio a Weibull</b>
Velocidad promedio (m/s)	2.26
Promedio de la densidad de Potencia anual (W/m <sup>2</sup> )	0.00133
Densidad de Potencia (W/m <sup>2</sup> ) (sin “n” datos en W/m <sup>2</sup> )	6.31

*Tabla 4 Parámetros de velocidad y potencia*

<b>Datos para gráfica de Weibull</b>	
<b>V en (m/s)</b>	<b>Probabilidad del viento (%)</b>
0	0
1	25.8
2	34.7
3	24
4	10.1
5	2.7
6	0.5
7	0
8	0
9	0
10	0
11	0
12	0

*Tabla 5 Datos de velocidad promedio del viento*

De acuerdo con la distribución de Weibull de la figura 5.5 y los datos de la tabla 1 se pueden observar muy claramente que las probabilidades de obtener energía del viento ocurrirán mayormente a 2 m/s con un 34.7% de probabilidad siguiendo a 1 y 3 m/s con 25.8 y 24% respectivamente siguiéndole finalmente a 4 m/s un 10.1 % de probabilidad de viento centrándose pues nuestro análisis dentro del rango entre 1 y 4 m/s, al calcular la desviación estándar promedio “ $\sigma$ ” de 2.1 (tabla 6) una “K” de 2.1 y una “C” de 2.3 de acuerdo a la tabla 6 pudimos graficar la distribución de Weibull de la figura 5.5 en la que se confirman los rangos de probabilidad de viento que inician en 1 m/s y terminan en 4 m/s.

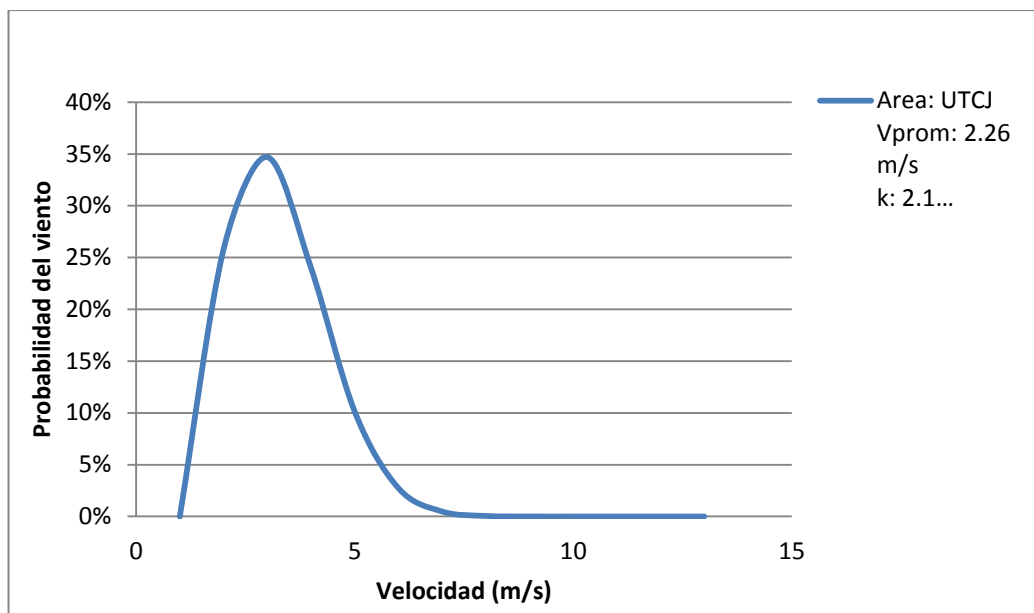


Figura 5.5 Distribución de Weibull de la UTCJ

Dirección (°)	90	67.5	45	22.5	0	337.5	315	292.5	270	247.5	225	202.5	180	157.5	135	112.5	Promedio
Vprom (m/s)	1.5	1.3	1.1	0.8	0.8	0.9	1.2	1.7	2.6	2.8	3.3	2.8	2.4	1.1	0.5	1.3	2.3
Desv. Estandar	1.5	1.3	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.6	2.2	2.2	2.4	2.3	2.0	1.5	0.7	1.4	2.1
"K" o $\alpha$	1.0	1.0	1.0	0.7	0.6	0.8	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.2	1.2	0.7	0.7	0.9	1.1
"C" o $\beta$	1.5	1.2	1.1	0.7	0.5	0.8	1.2	1.8	2.7	3.1	3.6	3.0	2.6	0.9	0.4	1.2	2.32
E (W/m <sup>2</sup> )	1.9	1.1	0.7	0.3	0.3	0.5	0.9	2.9	9.4	12.5	19.5	11.8	7.5	0.8	0.1	1.1	6.31
# Datos captados	100.0	349.0	302.0	21	99	114	183	348	352	1642	439	100	25	19	18	49	4760
F (%)	2.1	7.3	6.3	0.4	2.1	2.4	3.8	7.3	7.4	34.5	9.2	2.1	0.5	0.4	0.4	1.0	100.0

Tabla 6 Análisis de Weibull para estación de la UTCJ

El parámetro "K" o " $\alpha$ " es el factor de forma de la función de Weibull. "Vprom" es la velocidad promedio, de acuerdo a la tabla 6 "E" es la densidad de potencia y "F" es la frecuencia de cada sector de dirección en "%". Se observa una dirección predominante a 225° noroeste, la segunda en dirección dominante de acuerdo a los datos es 270° (oeste). La distribución de Weibull indica un factor de forma de 1.1 menor a la distribución Rayleigh lo que significa vientos bajos. La densidad de potencia ronda los 6.31 W/m<sup>2</sup>.

En la tabla 7 se muestran valores numéricos y el valor similar textual correspondiente a la dirección del viento mostrándose también la cantidad de repetición de direcciones del viento, siendo

“WSW” oeste sur oeste la dirección predominante con 1642 registros repetidos y siguiéndole “W” con 852 registros. Cabe mencionar también “SW” y “WNW” que son los registros siguientes pues en estas direcciones es en donde se enfoca nuestro potencial de energía, los demás datos son importantes y también se pueden ver mejor en la gráfica de cantidad de densidades por aparición de direcciones de la figura 5.6.

<b>Cantidad de densidades de aparición de direcciones</b>		
Dirección numérica	Dirección	Cantidad de direcciones
135	SE	18
157.5	SSE	19
22.5	NNE	21
180	S	25
112.5	ESE	49
0	N	99
202.5	SWS	100
90	E	100
337.5	NNW	114
315	NW	183
45	NE	302
292.5	WNW	348
67.5	ENE	349
225	SW	439
270	W	852
247.5	WSW	1642

*Tabla 7 Cantidad de densidad de direcciones de la UTCJ*



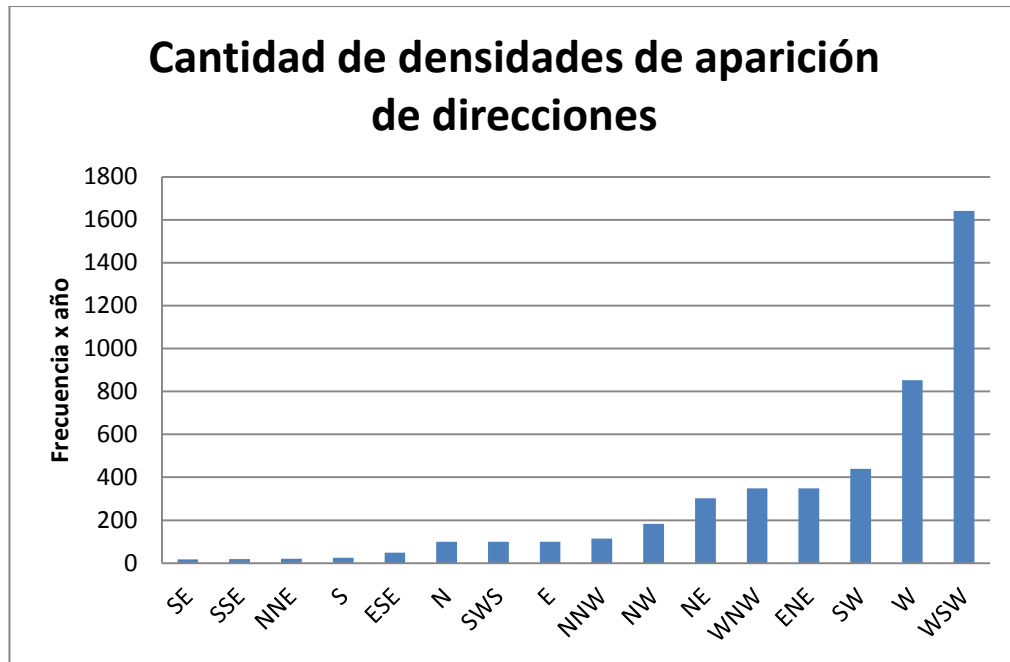


Figura 5.6 Gráfica de Cantidad de densidades por aparición de direcciones

Comparando los vientos predominantes de probabilidad de velocidad que son “NW” y ”W” con respecto de las direcciones de viento que son “WSW” y “W” podremos observando que se confirma un predominante efecto del viento hacia el oeste “W” y que el potencial energético se obtiene desde esta dirección.

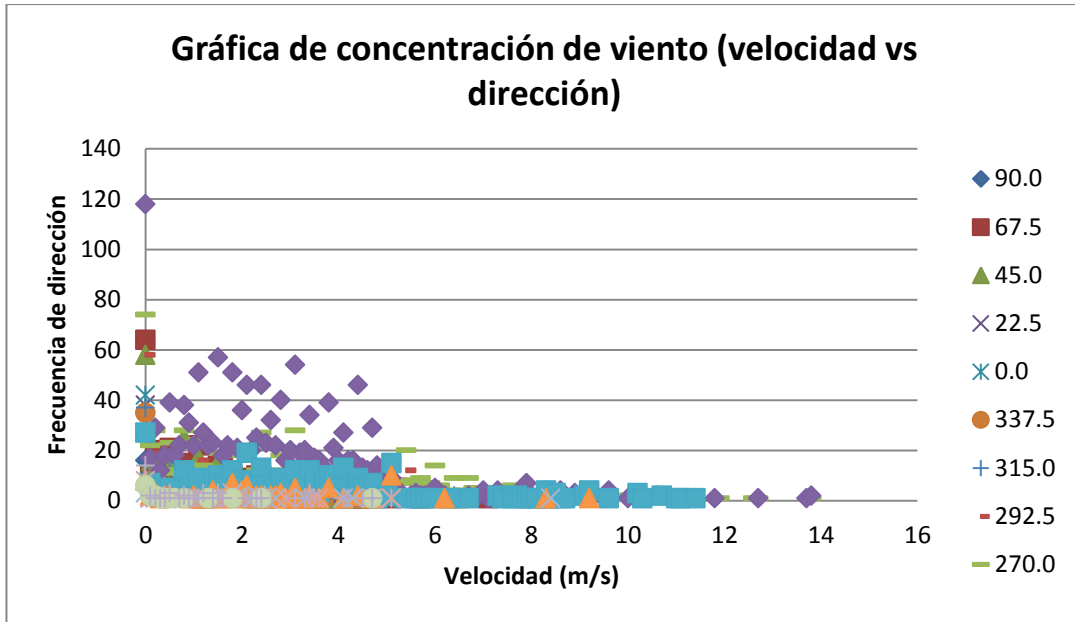


Figura 5.7 Gráfica de concentración de viento (velocidad VS dirección)

La velocidad y dirección como se observa en la gráfica de concentración de viento en la figura 5.7 la densidad predominante se encuentra entre 0 y 4 m/s y entre 0 y 25% de repeticiones en las direcciones, esto nos dice que el potencial energético está dentro de estos rangos de velocidades y en las direcciones de 225° y 247.5°.

## Capítulo 6

### 6. Conclusiones

Al hacer el estudio de medición y evaluación del recurso eólico en la Universidad Tecnológica de Ciudad Juárez entre los edificios “I” y “H” se estimó claramente el potencial eólico con todos los detalles necesarios para conocer el viento en esta zona y así asegurar la optimización de la producción de generación eléctrica cuando se decidan instalar aerogeneradores eólicos.

La importancia de la caracterización del recurso eólico, medición y análisis logró definir los efectos de la energía eólica en la UTCJ utilizando gráficas y datos estadísticos en los que podemos afirmar lo siguiente:

Los resultados de este estudio describen un viento de baja velocidad con promedio de 2.26 m/s y rangos de generación óptima entre 1 y 3 m/s, vientos que en la actualidad no es posible aprovechar con eficiencias por arriba del 31% utilizando rotores multipala ya sea para bombeo de agua o generación eléctrica, si se utilizaran los aerogeneradores de tipo horizontal de tres palas comerciales de pequeña escala se deben observar las velocidades de arranque de los aerogeneradores que sean de máximo a 1 m/s y que la curva de producción de energía eléctrica alcance su mejor producción eléctrica dentro de los 3 m/s. finalmente para estos vientos promedio el aerogenerador tipo savonius que alcanza una eficiencia máxima del 16 % dentro del rango de velocidades entre 1 y 3 m/s es el aerogenerador ideal que cumple con las características de este sitio, no olvidando las fuertes ráfagas de viento de hasta 14 m/s por lo que se debe de tener un sistema de frenado y protección del equipo para estas velocidades.

Los vientos en la UTCJ tienen un potencial energético de 6 W/m<sup>2</sup> con dirección predominante al oeste sur oeste (WSW) y al sur oeste (SW) que comparándolo con los vientos registrados en ciudad Juárez en el año 2009 que tuvieron una velocidad promedio de 1.9 m/s se puede observar que en toda la mancha urbana el patrón de velocidad promedio no varía de manera que pudiera decirse que los vientos de baja escala solo ocurren en el centro de la ciudad. Durante las mediciones del periodo de los 80's según el CIMA se mostraron vientos por más de diez años de velocidades promedio menores a 5 m/s por lo que el patrón y la zona nos hace ver que tendremos vientos de baja escala.

A través de estos resultados, se hizo la estimación de la producción de electricidad para este lugar considerando que se instalarán aerogeneradores con fines didácticos y para una producción de

electricidad a baja escala en la que se refleje la efectividad del estudio y la selección de los aerogeneradores adecuados por lo que se sugiere para los datos analizados adquirir aerogeneradores pequeños de 100 a 600 watts de potencia por cada isla situada entre los edificios “H” e “I” de la UTCJ.

## **7. Recomendaciones**

Continuar con la estimación del potencial del recurso eólico en la UTCJ buscando diferentes espacios a alturas que sobrepasen los edificios (aproximadamente 15 metros de altura) o en terrenos planos libres de obstáculos para futuros estudios eólicos en la ciudad.

Continuar con el monitoreo permanente eólico buscando mejorar los sistemas de captación de viento, mejoramiento en la captura de datos e interpretación y análisis de estos datos por medio de graficas que se actualicen instantáneamente, que se puedan monitorear en la WEB.

Utilizar mejores equipos de medición, y monitoreo para obtener datos cada vez más rápidos y precisos.

Analizar el recurso eólico diurno y nocturno para comparar su comportamiento y así revisar la viabilidad de optimizar la energía con sistemas híbridos solares-eólicos.

## 8. Referencias

- Akmatov, U. (2003). Analysis of dynamic behaviour of electric power system with large amount of wind power. Lyngby, Denmark: Technical University of Denmark.
- Contreras, F. (1998). Programa de gestión de calidad del aire de Ciudad Juárez. Juárez, Chihuahua, México: Municipio de Juárez.
- DOE. (2007). Sistemas eólicos pequeños para generación de electricidad. USA: DOE.
- Lacrosse. (2009). Heavy Weather Pro (Software User's Guide). USA.
- Moragues, J., & Rapallini, A. (2003). *Energía eólica*. Argentina: Instituto Argentino de la energía "General Masconi".
- Morales C, A. (2009). *Energía eólica y diseño de control de voltaje y frecuencia para un convertidor de potencia con topología CA/CD, CD/CA, CD/CD*. México, DF, México: Instituto Politécnico Nacional.
- Muciño, M. (2009). Evaluación del recurso eólico en Ciudad Universitaria. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Tomas, B. (2010). *Guía del instalador de energías renovables* (cuarta ed.). Lexington, KY, USA: Creaciones.

## 9. Anexos

Anexo 9.1 Tabla de distribución de Weibull

- Ajuste de las curvas de distribución de Weibull.

				10m	20m		
				5,28	6,00		
				k			
				A			
				2.478	1.910		
				7.650	5.946		
				1.10880	1,10880		
				1,10880	1,10880		
				6.786	5.275		
				5.996	5.996		
				8.568	8.262		
				7.637	7.637		
				54.615	36.092		
				43.588	43.588		
				6.598	4.908		
				5.771	5.771		
				275	163		
				201	201		
				788.222			
Velocidad del viento (m/s)	N.º Horas	% Horas	Horas año	Velocidad equivalente	Distr. Weibull total (%)	0,64%	Distr. Weibull
0	17	0,19	16,90	8,45	0,64	2,89%	56,5
1	247	2,82	247,06	370,59	3,54	5,83%	253,4
2	432	4,94	432,35	1080,88	9,37	8,81%	510,6
3	556	6,35	555,88	1945,59	18,18	11,26%	771,7
4	1.028	11,74	1028,08	4626,35	29,44	12,74%	986,6
5	1.079	12,31	1078,77	5933,23	42,18	13,01%	1.116,0
6	1.132	12,92	1132,13	7358,84	55,18	12,10%	1.139,3
7	1.060	12,10	1060,09	7950,70	67,28	10,31%	1.060,1
8	950	10,84	949,82	8073,43	77,60	8,06%	903,3
9	640	7,31	640,32	6083,09	85,66	5,79%	706,5
10	495	5,65	495,36	5201,31	91,45	3,82%	507,3
11	346	3,95	345,95	3978,46	95,27	2,31%	334,4
12	237	2,71	237,45	2968,17	97,58	1,28%	202,2
13	138	1,57	137,85	1860,94	98,86	0,65%	111,9
14	97	1,11	96,94	1405,60	99,50	0,30%	56,7
15	92	1,05	91,60	1419,83	99,80	0,13%	26,2
16	69	0,79	69,37	1144,58	99,93	0,05%	11,0
17	42	0,48	41,80	731,48	99,98	0,02%	4,2
18	35	0,40	34,68	641,66	99,99	0,01%	1,5
19	36	0,41	35,57	693,69	100,00	0,00%	0,5
20	24	0,27	24,01	492,25	100,00	0,00%	0,1
21	6	0,07	6,23	133,85	100,00	0,00%	0,0
22	2	0,02	1,78	40,02	100,00	0,00%	0,0
23	0	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00%	0,0
24	0	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00%	0,0
25	0	0,00	0,00	0,00	100,00	0,0%	

Anexo 9.2 Cuadro de densidades

Cuadro de densidades de aparición, acumulado por direcciones y por velocidades en (%)																	
Velocidades (m/s)	E	ENE	NE	NNE	N	NNW	NW	WNW	W	WSW	SW	SWS	S	SSE	SE	SEE	Total
	90.0	67.5	45.0	22.5	0.0	337.5	315.0	292.5	270.0	247.5	225.0	202.5	180.0	157.5	135.0	112.5	
0	16	64	58	38	42	35	37	58	74	118	27	8	3	8	6	14	606
0.1	2	10	15	8	7	7	14	10	22	17	7	2	1	1	2	2	127
0.2	7	20	15	9	4	9	8	19	28	29	5	3	1	2	2	1	162
0.3	1	8	12	7	3	6	3	5	12	12	3	1			1	1	75
0.4	3	13	3	5	2	1	3	4	11	18		2			1	1	67
0.5	6	21	16	4	5	5	17	11	23	39	5	2			1	3	158
0.6	1	11	9	2		2	2	5	12	18	3				1		66
0.7	3	5	8	6	3		3	6	7	22	4					1	68
0.8	4	15	25	5		2	10	13	28	38	12				1	2	155
0.9		6	4	2	3	3	3	8	11	31	5	1				1	78
1	4	8	6	3	3	1		7	13	22	2	2				1	72
1.1	1	22	17	3	4	7	9	16	24	51	9	1	1			1	166
1.2	1	1	6		4	1	1	7	14	27	4	1		1		3	71
1.3	4	7	8	1	3	1	5	7	10	22	4				1		73
1.4	1	9	8	2	3	2	2	8	13	23	8	4		1		1	85
1.5	6	14	15			4	6	5	19	57	10	1		1		3	141
1.6	1	13	6	1	1	3	3	4	13	18	6	1	1			1	72
1.7		7	6	1	1	4	4	11	7	22	7	3	1				74
1.8	3	10	12	2	1	2	8	6	22	51	12	7	3		1		140
1.9	1	3	5					7	18	21	5	1	1				62
2	3	6	4	1			2	4	21	36	8	4					89
2.1		9	7	4	1	2	6	8	21	46	19	6	1	1		1	132
2.2	2	2	1	2	1	1	2	7	10	20	8	1	1			1	59
2.3	4	10	1			3	3	3	12	25	2	2	2			1	68
2.4		10	3	2	3	1	4	8	27	46	13	2	1		1	1	122
2.5	3	1	2		2		2	5	10	23	6	1	1				56
2.6			2	1		1	2	5	11	32	4	2					60
2.7	1	3	2				1	2	12	22	5	2	1				51
2.8	2	5	1	1	1	2	3	6	18	40	9	3					91
2.9	2	2	2	1			3	1	8	16	4	1		1			41
3	1	3	3	2		1		3	18	20	6	1					58
3.1	2	1	3	2		2	2	14	28	54	12	5				1	126
3.2	1	2			1	1	1	1	13	19	4	1					44
3.3		4				1	1	5	9	20	8	1	1			1	51
3.4		4	1			1	3	13	12	34	12	2				3	85

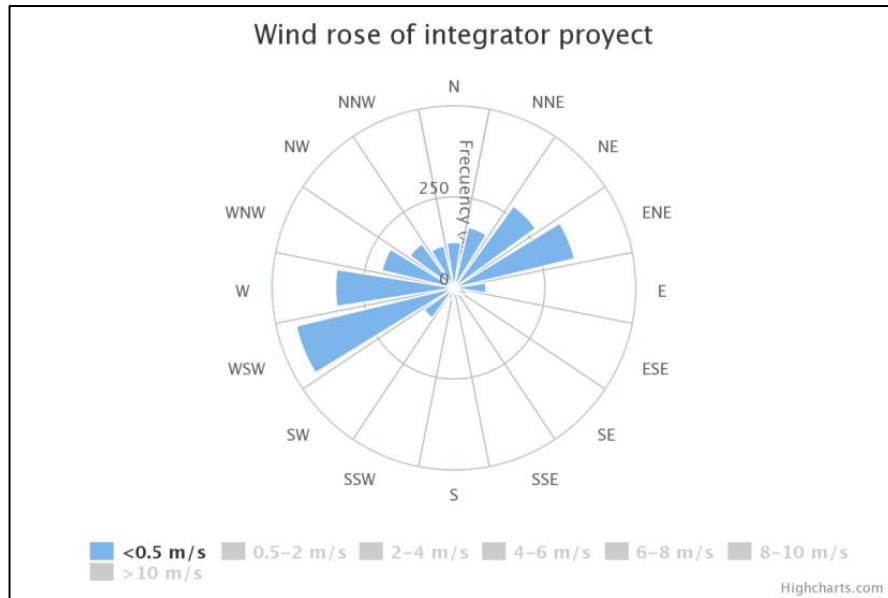


Velocidades (m/s)	E	ENE	NE	NNE	N	NNW	NW	WNW	W	WSW	SW	SWS	S	SSE	SE	SEE	Total
3.5	1	1	1	1		1	1	2	5	17	9			1			40
3.6		2	1			1		1	11	16	3	1		1			37
3.7		1	1			1	1		6	13	7						30
3.8	1	2	1	2				4	10	39	10	5					74
3.9								2	8	21	10						41
4		1					1	2	11	16	5						36
4.1		6	1	1	1		2	2	17	27	13	1	1			1	73
4.2		1						1	12	16	3					1	34
4.3	1		2				1	9		16	3		1				33
4.4		1	1		1	1		1	12	46	9	2					74
4.5		1						5	6	13	6					1	32
4.6		1						2	10	12	6						31
4.7	1	2	1				1	3	4	29	7	1		1	1	1	52
4.8					1			4	3	14	1						23
4.9	1							3	5	11	3						23
5	1				1				3	13	2						20
5.1		1	2		1		1		1	9	15	10	1	1			42
5.2	2		2				2	8	7	2							23
5.3							1	8	8	3							20
5.4	1				1		1	12	20	1	1						37
5.5	1							2	2	2							7
5.6						1		3	7	3	1						15
5.7		1					1	5	9	2	1						19
5.8							1	3	7	2	1						14
5.9							1	3	7	1	1						13
6							1	3	14	5							23
6.1	1							2	6								9
6.2							1	2	3	2		1					9
6.3			1				1	3	4	1	1						11
6.4							2	2	9	1							14
6.5			1				1	2	3	1							8
6.6								3	4	1							8
6.7									9	2	1						12
6.8							1	1	5	1							8
6.9								1	3	2							6
7								2	5	4							11
7.1		1							2	1							4
7.2									2	1							3

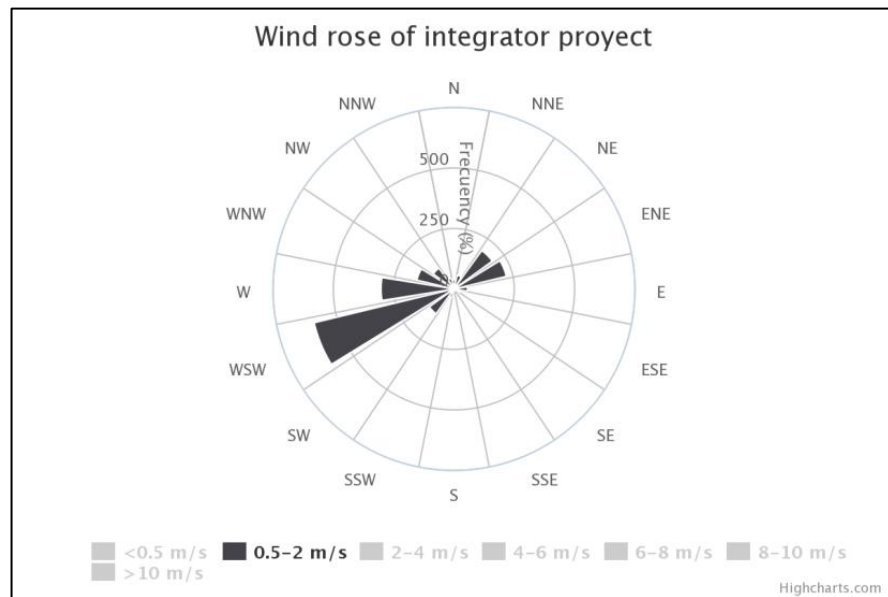
Velocidades (m/s)	E	ENE	NE	NNE	N	NNW	NW	WNW	W	WSW	SW	SWS	S	SSE	SE	SEE	Total
7.3									1	4	2						7
7.4								2	2	2	1						7
7.5								1	3	1							5
7.6								1	6	1	1						9
7.7								1	1	3	2						7
7.8									3	2	1						6
7.9									2	7	1						10
8									1	2	1						4
8.1								1			1						2
8.2																	0
8.3		1							2	4	4	1					12
8.4										1	1		1				3
8.5										2	3						5
8.6									1	4	1						6
8.7									1	2	1						4
8.8									1	1							2
8.9										3							3
9									4	2							6
9.1										2	2						4
9.2											4	1					5
9.3										2							2
9.4									2								2
9.5										1							1
9.6									1	4	1						6
9.7									2								2
9.8									1								1
9.9									2								2
10										1							1
10.1									1								1
10.2											3						3
10.3										1	1						2
10.4									1								1
10.5									1								1
10.6										2							2
10.7											2						2
10.8									1								1
10.9										1							1
11											1						1

Velocidades (m/s)	E	ENE	NE	NNE	N	NNW	NW	WNW	W	WSW	SW	SWS	S	SSE	SE	SEE	Total
11.1											1						1
11.2																	0
11.3																	0
11.4										1	1						2
11.5																	0
11.6																	0
11.7																	0
11.8										1							1
11.9									1								1
12																	0
12.1																	0
12.2																	0
12.3																	0
12.4																	0
12.5																	0
12.6									1								1
12.7									1	1							2
12.8																	0
12.9																	0
13																	0
13.1																	0
13.2																	0
13.3																	0
13.4																	0
13.5																	0
13.6																	0
13.7										1							1
13.8									1	2							3

Anexo 9.3 Rosa de los vientos (0 a 0.5 m/s)

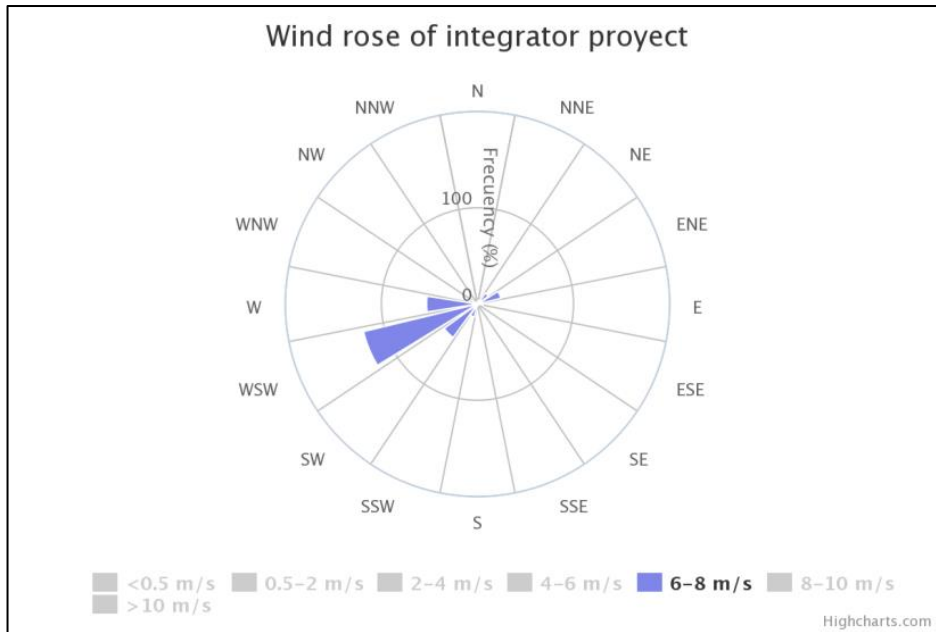


Anexo 9.4 Rosa de los vientos (0.5 a 2 m/s)

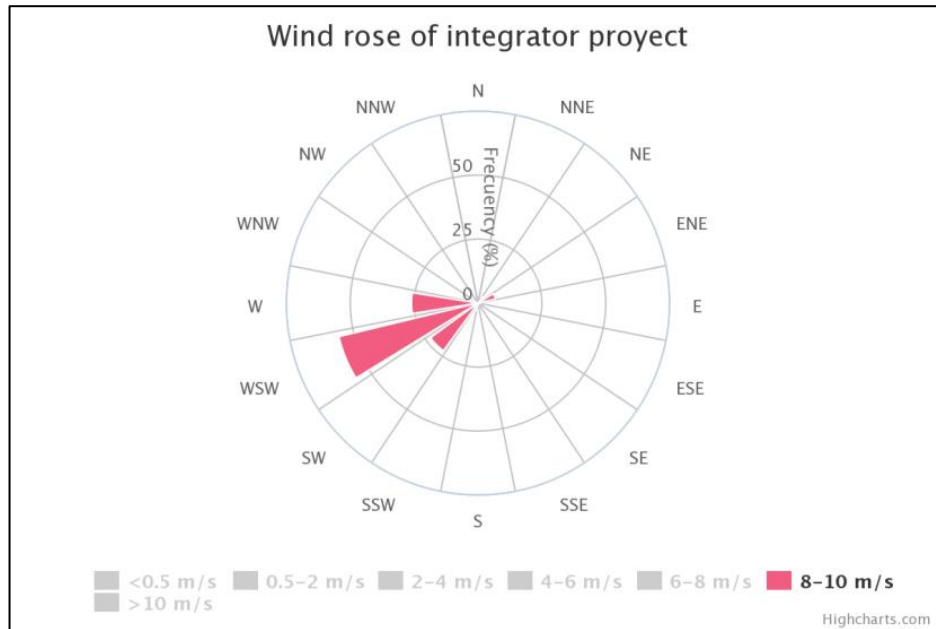




Anexo 9.7 Rosa de los vientos (6 a 8 m/s)



Anexo 9.8 Rosa de los vientos (6 a 8 m/s)



Anexo 9.9 Rosa de los vientos (mayor a 10 m/s)

