



**UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO**

---

**División de Ciencias e Ingeniería**

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO EN  
EL ESTADO DE QUINTANA ROO**

**TESIS RECEPCIONAL**

Para obtener el Grado de

*Ingeniero en Sistemas de Energía*

**PRESENTA**

**CÉSAR SÁNCHEZ OSORIO**

**DIRECTOR DE TESIS**

**DR. JOSÉ HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ**

Chetumal, Quintana Roo, Marzo 2011



**UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO**  
**División de Ciencias e Ingeniería**

**Tesis elaborada bajo la supervisión del Comité de Asesoría y aprobada como requisito parcial, para obtener el grado de:**

**INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA**

**COMITÉ**

**Director:** Dr. José Hernández Rodríguez \_\_\_\_\_

**Asesor:** Dr. Fernando E. Flores Murrieta \_\_\_\_\_

**Asesor:** M.C. Jaime Cuevas Domínguez \_\_\_\_\_

**Chetumal, Quintana Roo, Marzo del 2011**

## Dedicatorias

Doy gracias a dios y a mis padres por darme la vida.

A mi Madre Teresa Osorio Elizalde por su comprensión, atención y por estar conmigo en los momentos más difíciles de mi vida.

A mi Padre Armando Sánchez González por ser el mejor amigo y el mejor padre que como hijo desearía tener.

A mis Hermanos Iris y Uriel Sánchez Osorio por acompañarme en el trayecto de mi vida.

A Guadalupe Cangas Cardoso por darle sentido y acompañarme en esta nueva familia.

Y a mi hijo que viene en camino por enseñarme lo que es aferrarse a vivir.

Para todos ellos dedico esta tesis porque esta echa pensando en ellos.

## Agradecimientos

A la Universidad de Quintana Roo.

A la División de Ciencias e Ingeniería.

Al Dr. José Hernández Rodríguez por el apoyo incondicional, por dirigirme en este trabajo y por creer en mí.

Al Dr. Fernando Enrique Flores Murrieta y al M. C. Jaime Dionisio Cuevas Domínguez, por su tiempo y dedicación en la revisión de este trabajo.

A todos aquellos que participaron directa o indirectamente en este trabajo.

Este trabajo fue financiado en la convocatoria 2010 “Apoyo a la titulación” de la División de Ciencias e Ingeniería. Asimismo, este trabajo ha sido apoyado por el proyecto FORDECYT 116157, (Creación del Laboratorio de Energías Renovables del Sureste). (LENERSE).

# Evaluación del Potencial Eólico En el Estado de Quintana Roo

INDICE DE TABLAS	4
INDICE DE FIGURAS	5
NOMENCLATURA	8

Introducción	9
--------------	---

## CAPITULO I: ANTECEDENTES DEL USO DE LA ENERGÍA EÓLICA

1.1	Origen del Viento	11
1.2	Variabilidad Espacial	17
1.3	Variabilidad Temporal	19
1.3.1	Interanual	19
1.3.2	Anual	19
1.3.3	Diario	19
1.3.4	Instantáneo	19
1.3.5	Variaciones Temporales del Viento	21
1.4	Evaluación del Recurso Eólico	22
1.4.1	Factores Temporales	22
1.4.1.1	Turbulencia	22
1.4.1.2	Intensidad de Turbulencia	23
1.4.2	Factores Espaciales	24
1.4.2.1	Efectos del terreno en el viento (Orografía)	24
1.4.2.2	Extrapolación Vertical	27
1.4.3	Estimación de Recurso	29
1.4.4	Densidad de Potencia Disponible en el Viento	32
1.5	Recurso Eólico en México	33

## CAPITULO II: CARACTERIZACIÓN DEL RECURSO EÓLICO

2.1	Recolección de Datos	38
2.2	Parámetros	38
2.2.1	Velocidad del Viento	39
2.2.2	Dirección del Viento	39
2.2.3	Temperatura y Presión	39
2.2.4	Parámetros Optativos	40
2.3	Equipo	40
2.3.1	Sensores	41
2.3.1.1	Anemómetros	42

2.3.1.2	Veletas	43
2.3.1.3	Termómetros y Barómetros	44
2.3.2	Registradores de Datos	45
2.3.3	Sistemas de Comunicación	47
2.3.4	Otros Accesorios	48
2.3.4.1	Fuentes de Alimentación	48
2.3.4.2	Gabinetes	48
2.3.4.3	Cableado	49
2.3.5	Torres y Soportes	49
2.3.5.1	Torres Tubulares	49
2.3.5.2	Torres de Celosía	50
2.3.5.3	Protecciones en las Torres	51
2.3.5.4	Soportes para Sensores	52
2.4	Tratamiento de Datos	52
2.4.1	Validación de Datos	52

### **CAPITULO III: RECOLECCIÓN DE DATOS EN EL ESTADO DE QUINTANA ROO**

3.1	Objetivo de la Recolección	55
3.2	Delimitación del Área	55
3.3	Selección del Equipo	56
3.3.1	Sensores	56
3.3.2	Registrador de Datos	57
3.3.3	Comunicación	58
3.3.4	Torre	59
3.4	Estaciones de Medición	59
3.4.1	CENER	59
3.4.2	Servicio Meteorológico Nacional (SMN)	60
3.4.3	Universidad de Quintana Roo – Campus Chetumal	62
3.4.4	Universidad de Quintana Roo – Campus Cozumel	64
3.5	Instalación de las estaciones de medición	65
3.5.1	Orientación de los sensores	65
3.5.2	Calibración	65
3.6	Monitoreo en Estaciones	65

### **Capítulo IV: EVALUACIÓN DEL POTENCIAL EÓLICO DEL ESTADO DE QUINTANA ROO**

4.1	Procesamiento de Datos	70
4.2	Fundamentos del Recurso Eólico	70

4.3	Análisis y Resultados	71
4.3.1	Estación Anemométrica de la Universidad de Quintana Roo – Campus Chetumal.	71
4.3.1.1	Patrón de Velocidades	71
4.3.1.2	Rosa de los Vientos	74
4.3.1.3	Análisis de Frecuencia	75
4.3.1.4	Función de Distribución de Weibull	77
4.3.1.5	Energía Disponible	79
4.3.2	Estación Climatológica de Isla Mujeres	80
4.3.2.1	Patrón de Velocidades	80
4.3.2.2	Rosa de los Vientos	83
4.3.2.3	Análisis de Frecuencia	84
4.3.2.4	Función de Distribución de Weibull	85
4.3.2.5	Energía Disponible	87
4.4	Resumen de Estaciones	88
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES		89
BIBLIOGRAFIA		90
ANEXO A. ESTIMACIÓN DEL RECURSO EÓLICO. ESTACION CANCÚN SMN.		94

## INDICE DE TABLAS

<i>Numero</i>		<i>Página</i>
Tabla 1.1	Escalas de tiempo para sistemas de generación eólicos	20
Tabla 1.2	Coefficiente de Fricción para Diferentes tipos de Terreno	28
Tabla 1.3	Tabla de Rugosidades para Diferentes tipos de Terrenos	30
Tabla 2.1	Especificaciones Técnicas para los Sensores Básicos	42
Tabla 2.2	Dispositivos de Almacenamiento	47
Tabla 3.1	Listado de Estaciones Meteorológicas Automáticas - EMAs - instaladas en el estado de Quintana Roo con Transmisión Vía Satélite	62
Tabla 3.2	Datos de Instrumentos de Medición y Datos Crudos	66
Tabla 3.3	Ejemplo de Monitorio de Estaciones de la UQRoo campus Chetumal y Cozumel con Datos Procesados	66
Tabla 3.4	Datos de la Estación Cancún.SMN	67
Tabla 3.5	Datos de la Estación Cancún. CENER	67
Tabla 4.1	Historial de Datos de Estaciones	69
Tabla 4.2	Estaciones Utilizadas	70
Tabla 4.3	Resultados de Función de Distribución de Weibull	77
Tabla 4.4	Nuevos Resultados de la Función de Distribución de Weibull	78
Tabla 4.5	Cantidad de Energía Disponible en Chetumal	79
Tabla 4.6	Resultados de Función de Distribución de Weibull. Estación Isla Mujeres Nuevos Resultados de Función de Distribución de Weibull. Estación Isla	86
Tabla 4.7	Mujeres	86
Tabla 4.8	Cantidad de Energía Disponible en Isla Mujeres	87
Tabla 4.9	Velocidades Promedio Mensuales para las Diferentes Estaciones.	88
Tabla A1	Resultados de Función de Distribución de Weibull. Estación Cancún	96
Tabla A2	Cantidad de Energía Disponible en Cancún	98

## INDICE DE FIGURAS

<i>Numero</i>	<i>Página</i>
Figura 1.1 Promedio anual del calentamiento en la superficie de los océanos del mundo	11
Figura 1.2 Dirección de circulación de las masas de aire (izquierda) Fuerza de Coriolis (Derecha).	12
Figura 1.3 Brisa Marina (Izquierda) Mediodía y tarde; Noche y amanecer (Derecha).	14
Figura 1.4 Flujo de aire entre dos zonas montañosas	14
Figura 1.5 Flujo de aire para un obstáculo montañoso	15
Figura 1.6 El valle diurno y la montaña serpenteada (Rohatgi y Nelson, 1994)	16
Figura 1.7 Escalas de tiempo y espacio del movimiento atmosférico (Spera, 1994)	16
Figura 1.8 Región a Macro-escala de la República Mexicana	17
Región a Meso-escala representativa de la Ciudad de Chetumal, Quintana	18
Figura 1.9 Roo	18
Figura 1.10 Región a Micro-escala representativa de la Ciudad de Chetumal Quinta Roo	18
Figura 1.11 Fluctuaciones de periodos instantáneos de la velocidad del viento	20
Figura 1.12 Espectro típico de las variaciones del viento en todas sus escalas	21
Figura 1.13 Variaciones de velocidad en espacio del tiempo	23
Figura 1.14 Efecto aceleración sobre colinas suaves (Sotavento)	24
Figura 1.15 Comportamiento del viento en terreno no plano (Barlovento)	24
Figura 1.16 Determinación del terreno plano	25
Figura 1.17 Esquema de comportamiento del viento con obstáculos	25
Figura 1.18 Efectos de obstáculos en el flujo del viento	26
Figura 1.19 Efectos del cambio de la rugosidad	26
Figura 1.20 Efectos de la orientación y forma de las colinas	27
Figura 1.21 Curvas de Weibull	31
Figura 1.22 Rosa de los vientos	32
Figura 1.23 Energía del Viento Dominante	33
Figura 1.24 Viento dominante durante el Año	34
Figura 1.25 Sitios con Potencial Eólico en la Republica Mexicana	35
Figura 1.26 Clasificación del Viento en la Península de Yucatán	36
Figura 2.1 Sensores a diferentes alturas en una estación de medición anemométrica	39
Figura 2.2 Partes de una Estación Anemométrica	41
Figura 2.3 Anemómetro de copas	43
Figura 2.4 Anemómetro de Hélice	43
Figura 2.5 Veleta	44
Figura 2.6 Sensor de temperatura	45
Figura 2.7 Sensor de Presión NRG	45
Figura 2.8 Registrador de Datos NRG	46
Figura 2.9 Modem celular iPack	47
Figura 2.10 Sistema fotovoltaico de alimentación	48

Figura 2.11	Gabinete	49
Figura 2.12	Cable de pares trenzado con protector externo	49
Figura 2.13	Pasos para la instalación de la torre Tubular	50
Figura 2.14	Torre de celosía (izquierda), detalle de montaje (derecha)	51
Figura 2.15	Sistema de Tierra de punto sencillo	52
	Ubicación Geográfica del Estado de Quintana Roo y Estaciones	55
Figura 3.1	Anemométricas	56
Figura 3.2	Anemómetro NRG #40C	57
Figura 3.3	Veleta NRG #200P	57
Figura 3.4	Sensor de Temperatura	57
Figura 3.5	Registrador de datos Symphonie NRG Logger	58
Figura 3.6	Sistema de comunicación GPRS con alimentación	58
Figura 3.7	Ubicación de estaciones anemométricas del CENER	59
Figura 3.8	Estructura tipo Andamio	60
Figura 3.9	Estructura de tipo Torre Triangular	61
Figura 3.10	Ubicación de estaciones del SMN en el estado de Quintana Roo	61
Figura 3.11	Ubicación de la Estación Anemométrica de la Universidad de Quintana Roo	62
Figura 3.12	Estación Anemométrica de la UQRoo	63
Figura 3.13	Composición de la Estación Anemométrica de la UQRoo – Campus Chetumal	63
Figura 3.14	Ubicación de la Estación Anemométrica de la UQRoo – Campus Cozumel	64
Figura 3.15	Estación Anemométrica de la UQRoo – Campus Cozumel	64
Figura 3.16	Configuración de Orientación de los Sensores	65
Figura 4.1	Comportamiento Diario de Velocidades del Viento. Estación UQRoo	72
Figura 4.2	Comportamiento Diario del Viento en Horas Promedio para el 1 de Julio del 2009	72
Figura 4.3	Comportamiento Diario del Viento en Horas Promedio para el 30 de Marzo del 2009	73
Figura 4.4	Comportamiento Mensual. Estación UQRoo, Abril del 2009	73
Figura 4.5	Velocidades Promedio. Estación UQRoo para el año 2009	74
Figura 4.6	Rosa de los Vientos. Estacion UQRoo (2009)	75
Figura 4.7	Rosa de los Vientos (Anual). Estación UQRoo (2009)	75
Figura 4.8	Intervalo de Frecuencia. Estación UQRoo para el año 2009	76
Figura 4.9	Frecuencia Relativa. Estación UQRoo para el año 2009	76
Figura 4.10	Energía Disponible en Chetumal	79
Figura 4.11	Patrón Diario de Velocidades para el mes de Abril (2010). Estación Isla Mujeres	80
Figura 4.12	Comportamiento Diario del Viento en Horas Promedio para el 1° de Abril del 2010	81
Figura 4.13	Comportamiento Diario del Viento para el 1° de Julio del 2009.	81
Figura 4.14	Comportamiento Típico del mes de Marzo	82

Figura 4.15	Comportamiento Mensual para el mes de Marzo	82
Figura 4.16	Comportamiento Anual para el año 2010	83
Figura 4.17	Rosa de los Vientos. Estación Isla Mujeres (2010)	83
Figura 4.18	Rosa de los Vientos Anual. Estación Isla Mujeres (2010)	84
Figura 4.19	Intervalo de Frecuencia Anual. Estación Isla Mujeres (2010)	84
Figura 4.20	Intervalo de Frecuencia Relativa Anual. Estación Isla Mujeres (2010)	85
Figura 4.21	Energía Disponible en Isla Mujeres (2010)	87
Figura A1	Patrón de Velocidades Diario. Estación Cancún (2009)	94
Figura A2	Comportamiento del Viento para el mes de Abril. Estación Cancún (2009)	95
Figura A3	Velocidades Promedio (Anual). Estación Cancún (2009)	95
Figura A4	Rosa de los Vientos para el mes de Enero. Estación Cancún (2009)	96
Figura A5	Histograma de Velocidades para el mes de Enero. Estación Cancún (2009)	96
Figura A6	Frecuencia Relativa para el mes de Enero. Estación Cancún (2009)	97
Figura A7	Curvas de Energía para el mes de Enero. Estación Cancún (2009).	98

## NOMENCLATURA

$\rho$	Densidad del aire, (kg/m <sup>3</sup> )
$V$	Velocidad (m/s)
$A$	Área transversal (m <sup>2</sup> )
$f$	Tiempo
$\rho_{sm}$	Densidad del Aire mensual, (kg/m <sup>3</sup> )
$T_m$	Temperatura promedio mensual, (°C)
$z$	Altura sobre el nivel del mar, (m)
$N$	Número de intervalos de 10 minutos en un período T
$V_{ei}$	Datos de la velocidad estacionaria en el período T (m/s)
$V_e(z_r)$	Velocidad estacionaria medida a la altura z (altura de referencia)
$V_e(z)$	Velocidad estacionaria estimada a la altura z
$z_0$	Rugosidad del Terreno
$f(V)$	Función de densidad de probabilidad de Weibull, (Adim)
$k$	Factor de forma Weibull (Adim)
$v$	Velocidad del viento
$\sigma$	Desviación estándar (m/s)
$V_m$	Velocidad promedio (m/s)
$c$	Factor de escala de Weibull, (m/s)

## INTRODUCCIÓN

Hoy ante la vida dinámica de la sociedad, se ha presentado un desarrollo inigualable durante el avance de la historia. El hombre se encuentra diseminado por todas partes del planeta, provocando cambios y transformaciones en el entorno, inventando tecnologías que cambian drásticamente su forma de vida, logrando construir un presente y un futuro más comprometedor con el medio ambiente. Todos estos avances han sido posibles gracias a una fuente principal de energía, los “combustibles fósiles”, este recurso captado durante millones de años ha sido el motor del ser humano.

En el presente se puede apreciar el impacto nocivo en el medio ambiente como consecuencia del uso ilimitado de combustibles fósiles, por lo tanto, es necesario utilizar e investigar otras fuentes alternativas para la generación de energía, ya que estas permiten disminuir la contaminación ambiental y dar uso eficiente del recurso natural para satisfacer las necesidades energéticas de la sociedad. Por otra parte, este tipo de energías renovables se encuentran en un estado de desarrollo para su explotación comercial, dando como resultado a la energía eólica como una de las más rentables.

La energía eólica en los últimos años se ha venido desarrollando considerablemente, esta fuente de energía requiere de materiales, maquinaria, mano de obra y además personal capacitado, en sincronía con el desarrollo y crecimiento de la misma. Una de las principales actividades para desarrollar la energía eólica, es la identificación de sitios adecuados, cuyo potencial de aprovechamiento de la energía sea favorable, por tal motivo, es necesario desarrollar la investigación sobre este tema, el cual, es uno de los objetivos en este trabajo de tesis.

La presente tesis tiene como objetivo general evaluar el potencial del recurso eólico aprovechable en el estado de Quintana Roo, teniendo como objetivos específicos:

1. Recopilar información sobre el potencial eólico del estado disponible en diversos medios.
2. Realizar mediciones de velocidad y dirección del viento en diferentes sitios del estado.
3. Evaluar el potencial de energía en el estado.

Hipótesis: Considerando que la tecnología actual de los equipos para producir energía eléctrica a través del viento, comienzan a trabajar a partir de los 3.5 m/s, se plantea comprobar que existe el suficiente potencial eólico en el estado de Quintana Roo, susceptible de ser aprovechado para la generación de energía.

Para cumplir con los objetivos anteriores, este trabajo se dividió en cinco capítulos: la primera parte que describe los antecedentes del desarrollo de la energía eólica. La segunda parte muestra la infraestructura y tecnología con la que se cuenta para realizar este estudio. En la tercera parte se observan las mediciones realizadas en la costa del estado. En la cuarta parte se realiza la evaluación y análisis del potencial eólico; finalmente las conclusiones obtenidas del proyecto de investigación.

# **CAPITULO I: ANTECEDENTES DEL USO DE LA ENERGÍA EÓLICA**

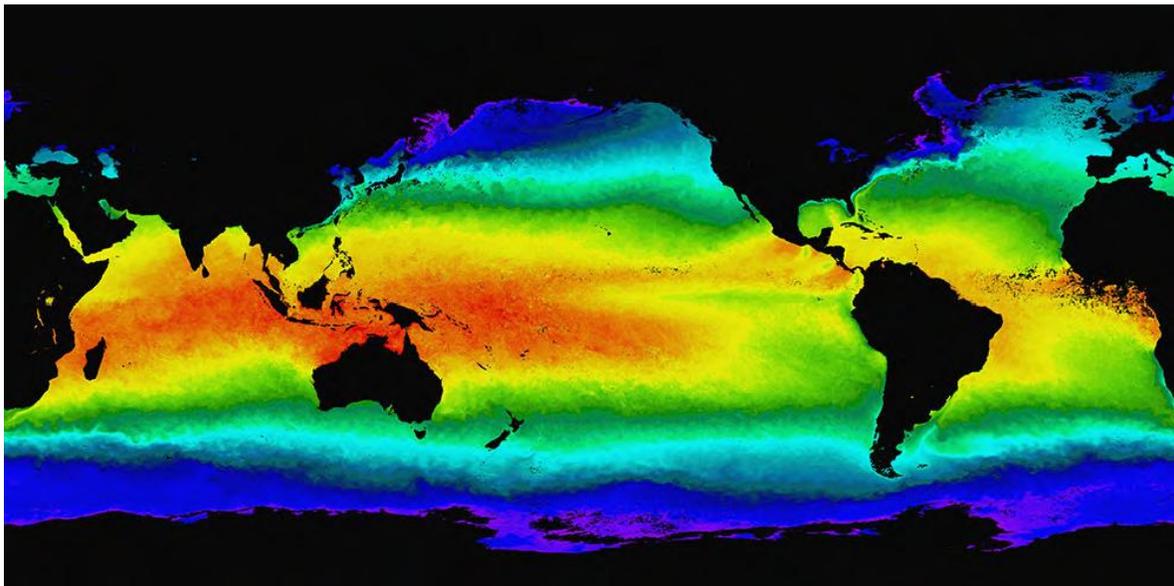
# CAPITULO I: ANTECEDENTES DEL USO DE LA ENERGÍA EÓLICA

## *1.1 Origen del Viento*

El viento existe en todas partes de la tierra, y en algunos lugares está presente con una densidad considerable de energía. El viento ha sido usado desde los más remotos tiempos, como por ejemplo en el transporte para mover barcos por medio de velas así como también en el área mecánica y en la maquinaria de molinos para mover sus aspas entre otras aplicaciones. El término eólico proviene del latín Aeolicus, perteneciente o relativo a Eolo, Dios de los vientos en la mitología griega [Hunt, 1984]. Por otra parte, la energía solar es un recurso inagotable. Parte de su energía genera al viento, por lo tanto, la energía eólica también es un recurso renovable e incluso inagotable.

La energía eólica es la energía cinética del viento, proveniente del movimiento de masas de aire, esto se debe principalmente a la desigualdad del calentamiento de la atmosfera, cerca del 2 % de irradiación solar captada en la tierra es convertida en energía eólica [Agenda Andaluza de la Energía, Consejería de innovación, Ciencia y Empresa, Guía Técnica, Energía Eólica].

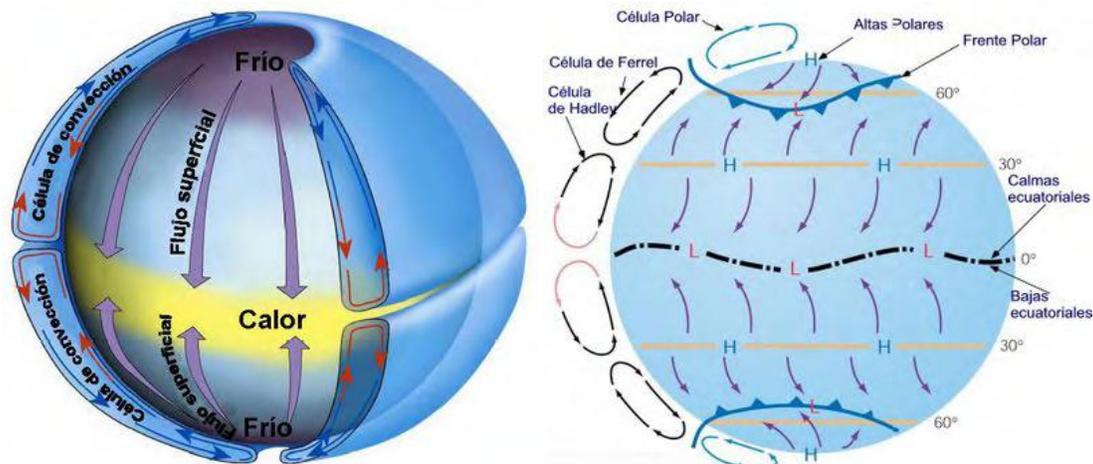
Como se puede observar en la figura 1.1 la radiación solar se distribuye de manera no uniforme en la tierra debido a su redondez, la cual, origina diferencias de insolación, teniendo como zonas donde hay mayor captación de radiación solar las zonas tropicales y ecuatoriales, y las de menor concentración las polares.



*Figura 1. 1 Promedio anual del calentamiento en la superficie de los océanos del mundo. Fuente: <http://www.nasa.gov>*

Debido a que en los polos los rayos solares inciden oblicuamente, calientan menos a la superficie de la tierra, todo lo contrario sucede sobre las zonas tropicales y el ecuador, esto es debido a que los rayos solares en esta zona inciden de manera perpendicular y por lo tanto, calienta más a la superficie terrestre, de la cual, el aire que está encima de las zonas más cálidas, al calentarse se vuelve menos denso y asciende. En cambio, en las zonas polares, al llegar menos radiación, el aire se enfría y por ello desciende. El aire que sube crea una zona de baja presión, que hace que el aire frío adyacente a alta presión se mueva a las zonas de baja presión. Este movimiento de aire es lo que se conoce como vientos geostroficos, que son los vientos globales a los cuales, están condicionados los vientos locales útiles para la generación eléctrica.

Como se puede observar en la figura 1.2 del lado izquierdo, se muestra que el aire que envuelve a la Tierra, se mueve desde las zonas de mayor presión atmosférica que es aire con mayor densidad a las de menor presión, es decir, la trayectoria del flujo del aire se dirige desde los polos hacia el ecuador por las capas bajas de la atmósfera y del ecuador a los polos por las capas altas siguiendo un ciclo de movimiento de aire en cada hemisferio, este aire en movimiento horizontal es el viento y entre más grande sea la diferencia de presiones entre dos puntos de la superficie terrestre, mayor será la velocidad del viento.



**Figura 1. 2 Dirección de circulación de las masas de aire (izquierda) Fuerza de Coriolis (Derecha).**  
**Fuente: [www.nasa.com](http://www.nasa.com)**

Cabe señalar que la circulación global del aire sobre el planeta debido a que intervienen varios factores que influyen en su trayectoria como la rotación sobre su eje, composición en océanos y continentes debido a su calor específico, movimiento de traslación con respecto al sol, insolación, estación del año, perturbaciones atmosféricas entre otras, es diferente a lo descrito.

Por otra parte, a las fuerzas causadas por la rotación de la tierra se les llaman fuerzas de Coriolis (Fig. 1.2 lado derecho), en la cual dichas fuerzas actúan sobre la masa de aire que sigue fluyendo, originando que estas se desvíen de su trayectoria original hacia la derecha e izquierda dirigiéndose hacia los hemisferios norte y sur respectivamente, gracias a estas

fuerzas, se originan los denominados vientos de poniente, provenientes del Oeste y alisios, provenientes del Este.

La fuerza denominada de Coriolis es una fuerza que su nombre se le atribuye al ingeniero y matemático francés Gustave Gaspard Coriolis (1792-1843).

La circulación de las masas de aire se debe a la acción resultante de las fuerzas de rozamiento de presión gravitacional y de rotación de la Tierra, que inducen dos tipos de circulación del aire en la atmósfera: la planetaria y la de pequeña escala.

Circulación planetaria: debida a la incidencia de los rayos solares sobre la Tierra y a la rotación de ésta, varía según la zona y la época del año.

Circulación a pequeña escala: viene determinada por la orografía del terreno, como las montañas y la presencia del mar.

De forma general, se puede considerar que las variables que definen el régimen de vientos en un punto determinado son:

- Situación geográfica
- Características climáticas
- Estructura topográfica
- Irregularidades del terreno o topografía de la zona
- Altura sobre el nivel del suelo siendo su estudio de gran importancia a la hora de acometer el diseño de un dispositivo que sea capaz de aprovechar la energía que contiene el viento.

A los vientos generales que varían sus características debido a la orografía del terreno y a las diferencias de presión que circundan en el planeta se les llama macro climáticos y estos a su vez dan origen a los micro climáticos o locales clasificados en:

Vientos inducidos térmicamente: brisas marinas y las corrientes valle-montaña.

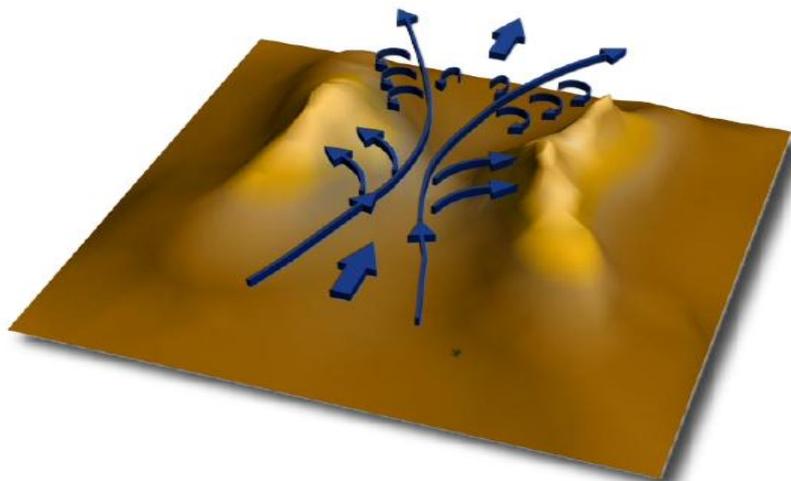
- Brisas marinas: se originan debido a los distintos calores específicos, y la diferente velocidad de calentamiento y enfriamiento del mar y la tierra. Durante el día, la tierra se calienta más rápidamente que el mar, haciendo que el viento sople del mar a la tierra (mediodía y tarde). Por la noche y el amanecer el viento sopla hacia el mar, ya que la tierra se enfría más rápidamente que el mar (Figura 1.3). Los vientos valle-montaña se producen por un proceso parecido. Unas laderas reciben más insolación que otras, en función de su pendiente y orientación.



**Figura 1.3 Brisa Marina (Izquierda) Mediodía y tarde; Noche y amanecer (Derecha). Fuente: Villanueva Miguel, Energía Eólica, CEAC, 2004.**

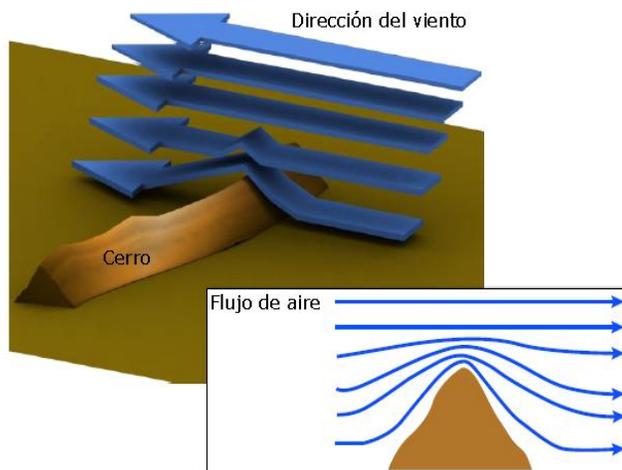
- Vientos inducidos por la orografía: dependen del obstáculo y su orientación, el aire que circula por la superficie terrestre se encuentra con obstáculos a través de su trayecto cambiando sus características, por tal motivo la orografía del lugar influye mucho.

Las montañas forman una especie de embudo como se muestra en la figura 1.4, los vientos en el extremo del embudo salen a gran velocidad por el efecto de Bernoulli (la velocidad de un fluido aumenta cuando la sección por la que pasa disminuye).



**Figura 1.4 Flujo de aire entre dos zonas montañosas. Fuente: Villanueva Miguel, Energía Eólica, CEAC, 2004.**

Encima de las montañas el viento aumenta de intensidad (Figura 1.5) inversamente, en un valle el viento disminuye.



*Figura 1.5 Flujo de aire para un obstáculo montañoso. Fuente: Villanueva Miguel, Energía Eólica, CEAC, 2004.*

Y finalmente, los vientos generales influenciados por los efectos climáticos locales.

Las características generales más importantes del recurso del viento que se deben considerar para un estudio, son los orígenes globales del recurso del viento, las características generales del viento, y las estimaciones del potencial del recurso del viento.

### **Otros Patrones de Circulación Atmosféricos**

La superficie de la tierra cambia considerablemente con respecto a los océanos y grandes extensiones de tierra, estas diferentes superficies pueden afectar al flujo de aire, debido a variaciones en campos de presión, la absorción de radiación solar, y la cantidad de humedad disponible.

Los océanos actúan como un concentrador grande para captación de energía. Por consiguiente, el movimiento de aire es a menudo afectado por la circulación del océano. Muchos de estos efectos conducen a un gradiente de presiones que afectan a los vientos globales y a muchos de los vientos regionales, originando por ejemplo, monzones. Además, si la temperatura aumenta o disminuye, puede causar vientos locales persistentes para ocurrir en una base estacional o diaria, como por ejemplo, brisas marinas y vientos de la montaña respectivamente.

De acuerdo con Rohatgi y Nelson, 1994, pueden ser divididas también las escalas de circulación atmosférica en secundarias y terciarias.

La circulación secundaria ocurre si los centros de alta o baja presión son causados por el aumento o disminución de temperatura de la atmósfera en los que se encuentran huracanes, circulación de monzones y ciclones extra tropicales.

Las circulaciones terciarias son circulaciones en pequeña escala, locales caracterizadas por vientos locales, estos incluyen brisas marinas, vientos de la montaña entre otros.

En la figura 1.6 muestra un ejemplo de circulación terciaria, valle y montaña serpenteada, en la cual, durante el día mientras el aire más caliente de la falda de la montaña asciende y reemplaza al aire fresco por encima de ella la dirección del aire es inversa por la noche, ya que el aire frío drena las cuestas estancándose sobre el fondo del valle.

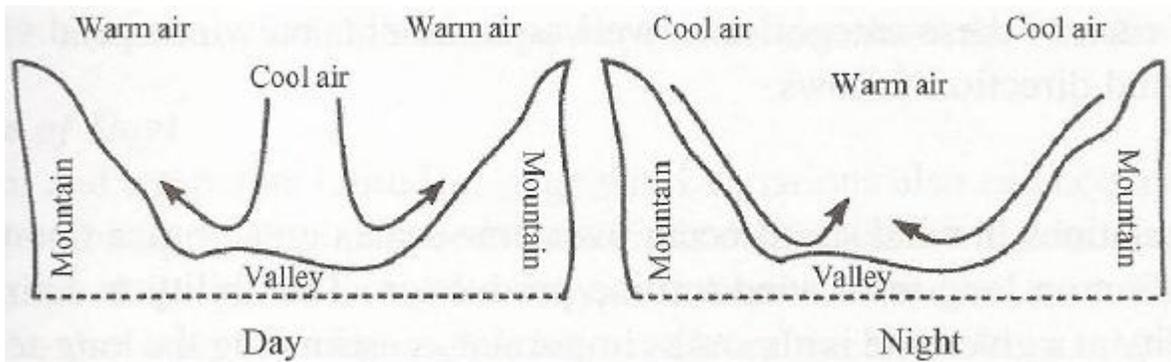


Figura 1.6 El valle diurno y la montaña serpenteada (Rohatgi y Nelson, 1994).

Una comprensión de estos patrones del comportamiento del viento, y otros efectos locales, son importantes para la evaluación de sitios potenciales de energía del viento.

Los movimientos atmosféricos se conforman de dos parámetros, tiempo y espacio. La figura 1.7 resume el tiempo y las variaciones espaciales del movimiento atmosférico, aplicada para ventilar energía. Las variaciones del espacio están generalmente bajo la dependencia de altura por encima de las condiciones globales y condiciones locales geográficas.

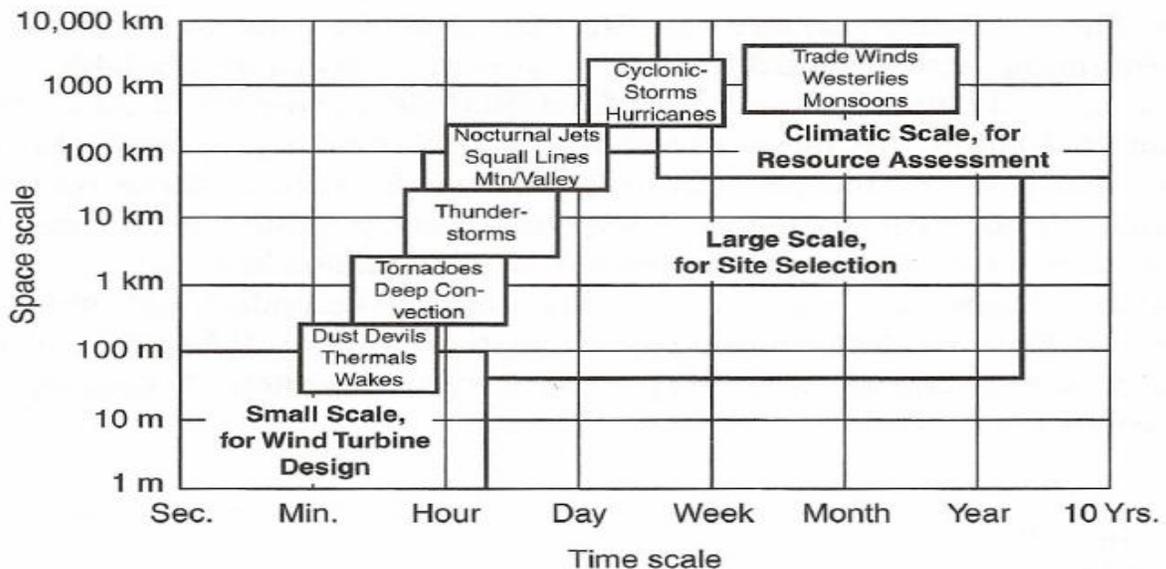


Figura 1.7 Escalas de tiempo y espacio del movimiento atmosférico (Spera, 1994). Reproducido por permiso de ASME.

## 1.2 Variabilidad Espacial

Explica las diferencias regionales de los climas sobre la superficie terrestre. Esta variabilidad está determinada por la influencia de los elementos y factores astronómicos y geográficos (la latitud, altitud, efecto marítimo o continental, corrientes marinas). Los primeros condicionan los rasgos climáticos dominantes en grandes áreas geográficas, los segundos los modifican.

De acuerdo con los meteorólogos existen escalas de movimiento atmosférico, sin embargo existen tres divisiones generales utilizadas por la comunidad científica para definir las escalas meteorológicas: macro-escala, meso-escala y micro-escala.

De acuerdo a Charney (1948), la macro-escala o climas zonales (Escala global o hemisférica), mostrada en la figura 1.8, llama aquellos fenómenos en los que las aceleraciones propias del sistema son de una magnitud despreciable frente a la aceleración de Coriolis. Se encuentra en rangos promedio de 1000 km de superficie, de manera que las trayectorias seguirían las líneas isobaras de presión constante. Este viento se suele conocer como geostrofico. En este tipo de escala se estudian las masas de aire en grandes ondas, corrientes en chorro y climatología global. Los factores que influyen en este tipo de macro clima son; latitud y circulación de la atmósfera.

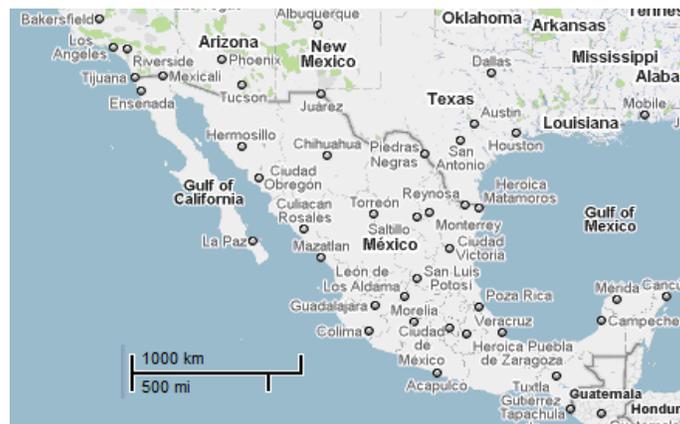


Figura 1.8 Región a Macro-escala de la República Mexicana. Fuente: <http://maps.google.es/>

La meso-escala o climas regionales (escala media) plasmada en la figura 1.9, es aquella en que las leyes de la hidrostática todavía son validas y a la vez a dejado de ser valido el quasi - geostrofismo. Las aceleraciones propias del sistema no son despreciables frente a la de coriolis, incluso pueden tener un orden de magnitud semejante, pero son muy inferiores a la magnitud de la gravedad, en esta escala el gradiente o diferencia de temperatura da origen a brisas en costas, valles o montañas. Un ejemplo seria el desigual calentamiento entre la tierra y el mar que captan o liberan energía en forma de radiación que da lugar a la formación de brisas marinas nocturnas y diurnas. Este tipo de escala estudia las masas de aire en la brisa de mar, brisa de montaña, efecto zonda y tormentas locales. Lo influyen factores de dos tipos: **dinámicos:** variación de los limites de los frentes. **Geográficos:** contraste tierra-mar, relieve, corrientes oceánicas.



**Figura 1.9** Región a Meso-escala representativa de la Ciudad de Chetumal, Quintana Roo. Fuente: <http://maps.google.es/>

La micro-escala o clima local (escala pequeña) representada en la figura 1.10, es aquella donde las aceleraciones del sistema son tan grandes que su magnitud es comparable a la aceleración de la gravedad. Los fenómenos de la micro-escala responderán, por tanto, a leyes no hidrostáticas, lejos del quasi-equilibrio de la macro-escala, este tipo de escala es el que representa a una escala local, en este nivel se encuentran factores que influyen en la aceleración del viento como por ejemplo los obstáculos y configuraciones orográficas, esta escala estudia las masas de aire de estanques y edificios. Dependen de los factores geográficos que se den en una zona determinada.



**Figura 1.10** Región a Micro-escala representativa de la Ciudad de Chetumal Quintana Roo. Fuente: <http://maps.google.es/>

Finalmente, puede variar del orden de sí misma en escalas mayores, debido al efecto de la orografía y de las estructuras climatológicas.

### 1.3 Variabilidad Temporal

Es una de las características principales del viento en un amplio rango de escalas, puede ser de orden inter-anual, anual, diaria e instantáneas (ráfagas y turbulencia). La variabilidad temporal se relaciona con los factores: movimientos de rotación y traslación de la Tierra, su posición con respecto al sol, desplazamiento estacional de los grandes sistemas de presión y flujos de aires, entre otros.

#### 1.3.1 Variabilidad Inter-anual

Esta variabilidad ocurre en periodos mayores de un año, logra tener importantes efectos a largo plazo en la generación eólica, la estimación de la variabilidad inter-anual es de gran importancia ya que se deduce el comportamiento del viento a largo plazo. Generalmente los meteorólogos dicen que son necesarios por lo menos cinco años de datos recabados para obtener un promedio anual de velocidad de viento confiable en un sitio específico. En la actualidad se ha establecido que un año de mediciones son suficientes para predecir a largo plazo un rango de resultados confiables para estimar la velocidad del viento.

#### 1.3.2 Anual

Se obtienen variaciones significativas en la velocidad promedio del viento entre estaciones o en meses. Existen periodos que marcan las estaciones donde el viento toma características que definen al ciclo anual.

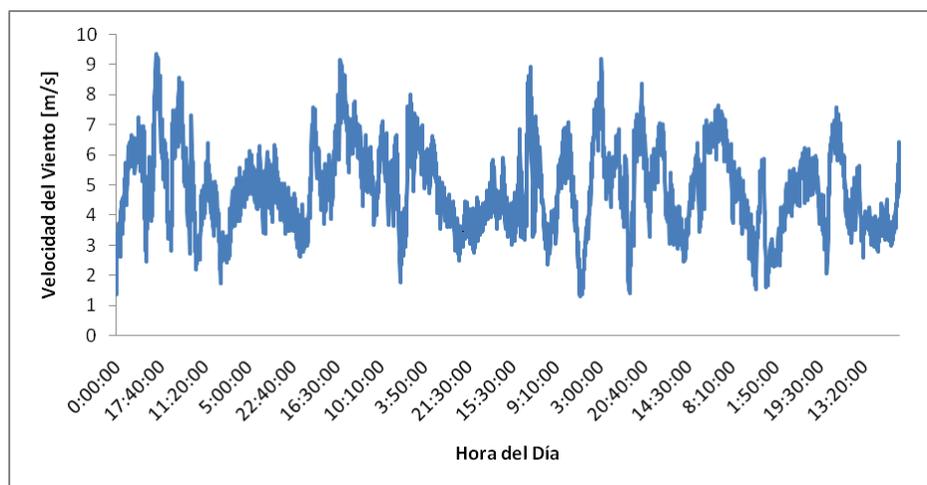
#### 1.3.3 Diario

Debido al ciclo de radiación diaria tiene su origen este tipo de variación del tiempo, surge con la diferencia de temperatura que experimenta la atmosfera en presencia y ausencia del sol. Una típica variación diaria es el incremento de la velocidad del viento antes de medio día contra el decremento de la velocidad durante la tarde hasta la puesta de sol. Las variaciones diarias en la radiación solar son responsables de las variaciones en la velocidad del viento en latitudes templadas sobre áreas relativamente planas. Estos cambios son mucho más notorios durante la primavera y el verano mientras que en invierno son menores. La velocidad del viento también es afectada por el lugar y la altitud sobre nivel del mar

#### 1.3.4 Instantáneo

Este tipo de variación surge en el momento (Fig. 1.11), las velocidades de viento en un sitio específico son de gran interés, gracias a la información que proporciona en el momento real da la pauta para el estudio de la turbulencia y las ráfagas que se experimentan en ese instante. Generalmente se realizan mediciones en intervalo cortos de 10 minutos sobre la velocidad de viento con muestreo de 1 Hz, la cual se asume como valores representativos de la turbulencia y para este trabajo es de gran ayuda, ya que es necesario cuantificar los cambios que experimenta dicha turbulencia dentro del flujo para aplicaciones de energía eólica. Esta parte es significativa ya que ayuda en el diseño de aerogeneradores tomando en

cuenta como factores: la carga máxima, predicción de fatiga de los materiales, diseño estructural, control, sistemas de operación y calidad de la energía.



**Figura 1.11** Fluctuaciones de periodos instantáneos de la velocidad del viento. Fuente: Estación Isla Mujeres, CENER. (Marzo del 2010).

La característica técnica más significativa de la electricidad generada por sistemas eólicos es su variabilidad en el tiempo y las escalas de tiempo para los analistas de sistemas eléctricos yacen en rangos de interés entre las decenas de minutos y años, en la tabla 1.1 se observan las escalas de tiempo de interés para sistemas de generación eólicos por parte de los distintos interesados en el diseño de generadores eólicos.

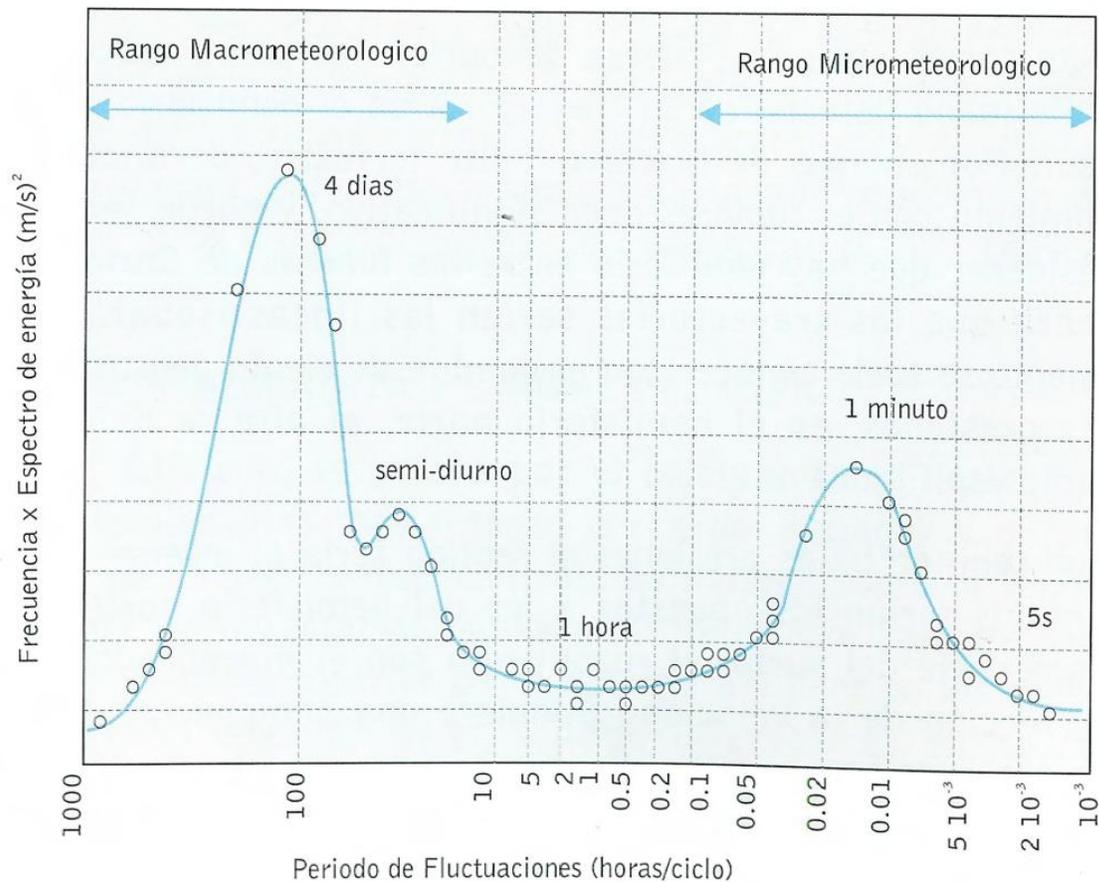
**Tabla 1.1** Escalas de tiempo para sistemas de generación eólicos [Atlas de Oaxaca].

Rango de Tiempo	Interesado	Razón de Interés
Decenas de Segundos	Proyectista de las Turbinas	Resistencia estructural contra cargas inducidas por el viento, vibraciones estructurales y fallas de componentes. Posibles fluctuaciones de tensión y frecuencia.
Decenas de Minutos o Horas	Operador del Sistema de Potencia	Capacidad de seguir o compensar la variación de potencia entregada por el sistema eólico. Pronóstico de vientos.
Día	Sistema de Potencia	Predictibilidad de un ciclo diario y la potencia asociada con algunos regímenes de viento. Correlación con la curva de demanda diaria.
Mes	Planificador	Predictibilidad de las variaciones estacionales y salidas de potencia de la mayoría de los regímenes de viento. Correlación y operación con la curva de demanda estacional.
Año	Operador del Sistema y Comunidad financiera	Predictibilidad de la salida de potencia anual de la mayoría de los regímenes de vientos. Capacidad de cubrir déficit en un año eólico promedio.
Plurianual	Comunidad Financiera	Variabilidad interanual y capacidad de cubrir déficit en un año eólico inferior de lo previsto.

### 1.3.5 Variaciones Temporales del Viento.

Las variaciones temporales en el viento medido en un sitio determinado muestran una variabilidad aleatoria en un periodo que va desde segundos hasta varios años, las escalas temporales mayores, muestran un comportamiento coherente al contrario de las espaciales, pues no se detectan variaciones importantes en el rango de 2 a 10 horas. Esto permite elegir este período para obtener estadísticas más confiables, en contraste, se detectan variaciones importantes en el día con la noche, entre las estaciones, así como entre años. Estas escalas temporales determinan la capacidad energética disponible y han de ser tenidas en cuenta.

De la gráfica de la figura 1.12, en el eje de las abscisas aparece el logaritmo de la frecuencia y en el eje de ordenadas muestra el producto de la frecuencia por el espectro de la velocidad del viento. El área bajo la curva es la energía cinética contenida en el viento, se observa que hay picos cercanos a un minuto, otro pasando por un día y finalmente cada 4 días. El periodo de 1 minuto define la escala micro-meteorológica que representa la turbulencia y cuatro días definen la macro-meteorológica que describen el paso de frentes o núcleos de altas o bajas presiones.



**Figura 1.12** Espectro típico de las variaciones del viento en todas sus escalas. Fuente: WIND RESOURCE ASSESSMENT HANDBOOK, NREL, 1997.

## 1.4 Evaluación del Recurso Eólico

### 1.4.1 Factores Temporales

El movimiento atmosférico está caracterizado por escalas temporales y espaciales que cubren un rango muy amplio debido a que lo caracteriza un elevado valor en el número de Reynolds que se encuentra en un rango  $40 \leq Re \leq 200$  y  $0.12 \leq St \leq 0.19$  [Vórtices Atmosféricos En Islas Chilenas] y que varía con respecto a la longitud, esto conlleva a que las velocidades del viento varíen a diferentes escalas originadas principalmente a la turbulencia y a él gradiente vertical de velocidad media debido a la capa límite.

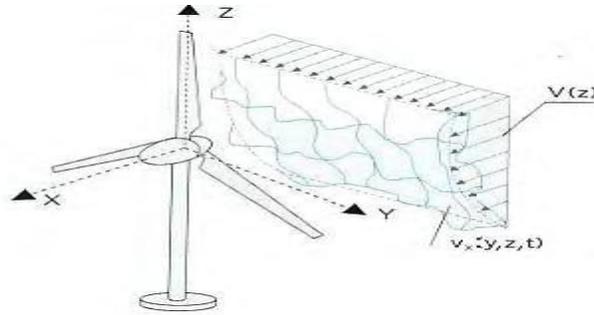
Un ejemplo donde interviene este tipo de variaciones espaciales es en un aerogenerador, donde por sus diferentes tamaños detectan cada una de estas variaciones locales durante su giro, dando origen a cargas en su estructura, generando fatiga y formando irregularidades en la generación de electricidad.

Por otra parte, con las variaciones temporales surge lo mismo, dado a que el viento medido a punto fijo muestra una variabilidad de corto periodo que podría ser desde segundos hasta minutos debido a la turbulencia llega a afectar a la marcha del aerogenerador.

Las escalas temporales determinan la capacidad energética disponible. Las escalas temporales mayores se deben al tiempo de residencia de fenómenos meteorológicos, típicamente varios días, al periodo anual y a variaciones más largas, muestran un comportamiento más coherente al contrario de las espaciales al no detectar variaciones importantes en un rango de 2 a 10 horas, esto permite elegir el periodo para obtener estadísticas más confiables.

#### 1.4.1.1 Turbulencia

La turbulencia es una variable física que caracteriza el comportamiento del proceso aleatorio de la fluctuación de la velocidad del viento alrededor de una media cuasi-estacionaria, es originada por la disipación de la energía contenida en el viento en energía térmica mediante la creación y destrucción progresiva de pequeños vórtices (remolinos o ráfagas). El viento turbulento puede tener un término medio relativamente constante sobre lapsos de tiempo de una hora o que se repita, pero sobre las veces más cortas (los minutos o menos) pueden ser muy variables. La variabilidad del viento superficialmente parece ser muy aleatorio pero realmente tiene características distintas, esta variación desordenada no sólo es temporal sino también espacial, de tal manera que la incidencia del campo de velocidad del viento incide sobre un aerogenerador como la imagen (Fig.1.13).



**Figura 1.13 Variaciones de velocidad en espacio del tiempo. WIND RESOURCE ASSESSMENT HANDBOOK, NREL, 1997.**

Sin embargo, siendo la turbulencia atmosférica un proceso completamente aleatorio, esta tiene ciertos rasgos distintivos que son determinados por propiedades estadísticas, las cuales se relacionan a continuación tal y como son definidas por Manwell [Wind Energy Explained].

#### 1.4.1.2 Intensidad de Turbulencia

La intensidad de turbulencia es la medida más básica de turbulencia. Está definido por la proporción de la desviación estándar de la velocidad del viento y la velocidad media del viento. En este cálculo ambas velocidades se calculan sobre un lapso de tiempo más largo que las de las turbulencias, pero más pequeño que los períodos asociados con otros tipos de variaciones de velocidad del viento (como efectos diurnos). El tamaño de este lapso de tiempo es normalmente menor que una hora, y por convención igual a diez minutos. La tasa de frecuencia de muestreo está dada al menos una vez por segundo (1 Hz). Por tal motivo la intensidad de turbulencia, TI, está definida por:

$$TI = \frac{\sigma_T}{V_T} \tag{1}$$

Donde:  $\sigma_u$  = desviación estándar:

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (V_{e_i} - V_T)^2} \tag{2}$$

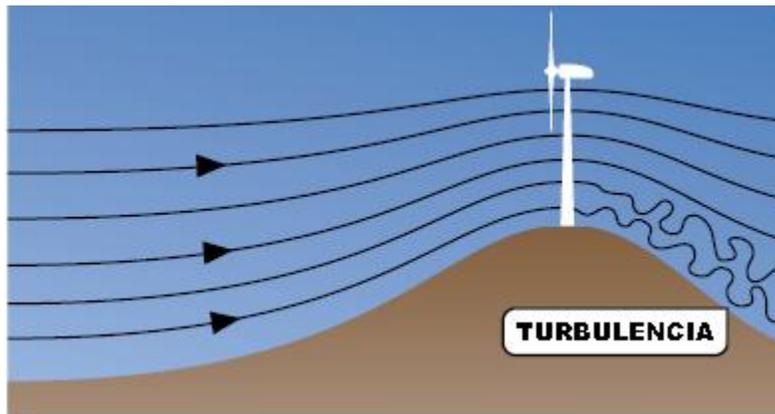
Donde:  $N$  = número de registros;  $V_{e_i}$  = velocidad instantánea;  $V_T$  = velocidad del viento promedio en el periodo

La intensidad de turbulencia generalmente se encuentra en un rango de 0.1 a 0.4. Las intensidades de turbulencia más altas ocurren a velocidades bajas de viento, pero el valor límite inferior en un punto dado dependerá de las características específicas del sitio y las condiciones de superficie del lugar.

## 1.4.2 Factores Espaciales

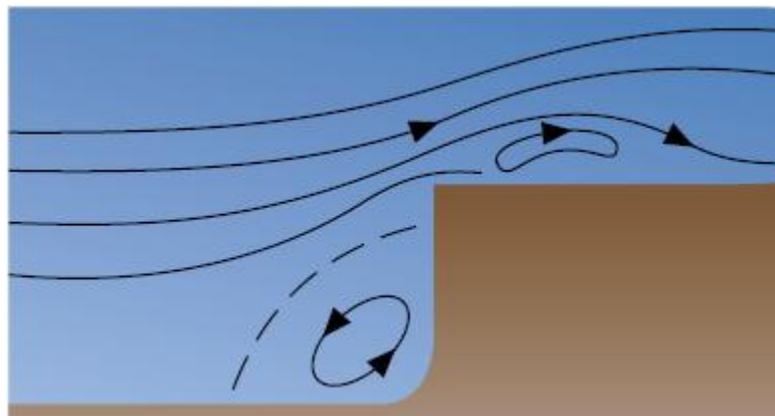
### 1.4.2.1 Efectos del terreno en el viento (Orografía)

Es conveniente clasificar los efectos del terreno que ejercen sobre el viento para su estudio, delimitando sus características, la forma más básica para hacerlo es en terreno plano y no plano (terreno complejo). El terreno plano se caracteriza por ser una superficie con menores uniformidades como por ejemplo bosques o viviendas cercanas, esto influye positivamente en la aceleración local del viento. Un ejemplo y lo apropiado podría ser una colina de pendiente suave, la cual acelera el viento a lo largo de la pendiente dándose la máxima velocidad en la cima de la loma (Fig.1.14).



*Figura 1.14 Efecto aceleración sobre colinas suaves (Sotavento). Fuente Guía Técnica: Energía Eólica*

Por otro lado, los terrenos no planos se constituyen por grandes elevaciones o depresiones como montes, crestas y cañadas por lo que se crean Turbulencias en la parte superior e inferior de acantilados y cimas angulosas como se muestra en la figura 1.15, que viene siendo lo no apropiado.

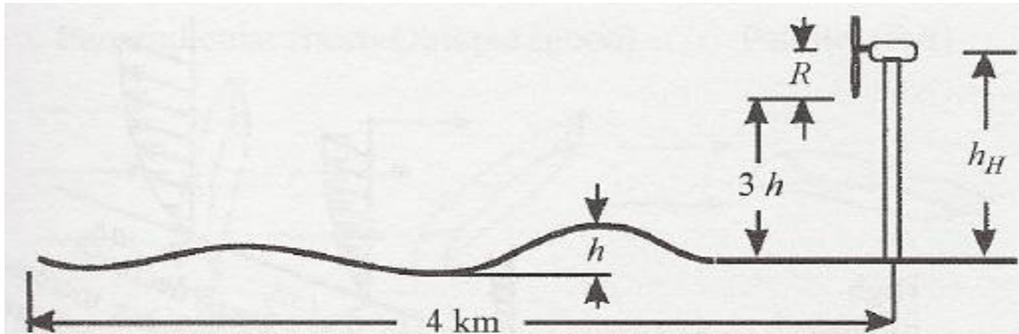


*Figura 1.15 Comportamiento del viento en terreno no plano (Barlovento). Fuente Guía Técnica: Energía Eólica.*

Un terreno complejo cuenta con varias características, una sub-clasificación sería por un lado en elevación o depresión aislada y por otro en terreno montañoso, la cual, en esta

última sus condiciones de flujo son complejas debido a que las depresiones y elevaciones ocurren de manera aleatoria, por lo que el flujo en este tipo de terreno puede ser a pequeña escala en elevaciones o depresiones aisladas y a gran escala en terreno montañoso.

La dirección del viento es un parámetro muy importante para determinar un sitio, ya que determina si es un terreno plano o no plano. Al encontrarse con una montaña se podría decir que es un terreno no plano, pero si el viento fluye menos o igual a 5 % del tiempo y al oscilar sus velocidades al 2 m/s en dirección de la irregularidad se puede considerar como terreno plano (Fig. 1.16).

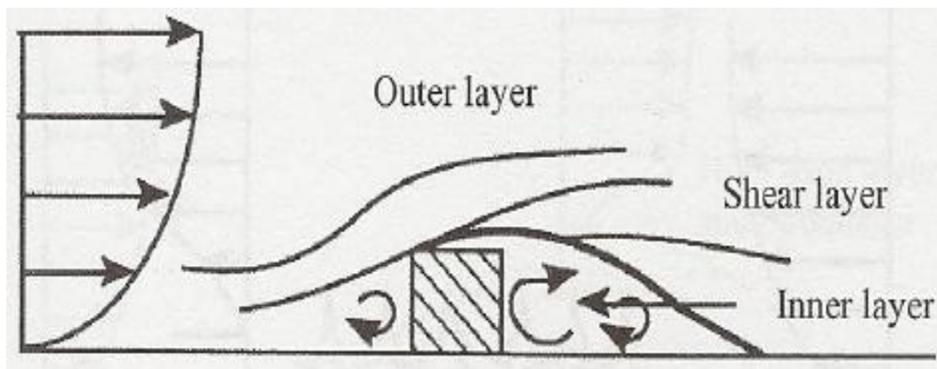


**Figura 1.16** Determinación del terreno plano. Fuente: Libro *Wind Energy Explained* (Wegley et al., 1980)

### Terreno Plano

Existen obstáculos que obstruyen la trayectoria del viento en terrenos planos generando turbulencias, lo son de dos tipos, los que dejan pasar partes del viento (porosos) como son arbustos, árboles, verjas, vallas, torres de celosía e incluso aerogeneradores y los que no (no porosos) donde se encuentran las edificaciones y densas arboladas.

Para entender el comportamiento del flujo del aire a través de obstáculos no porosos, se puede definir tal obstáculo como un rectángulo y al flujo de de viento en vectores (2 dimensiones), en donde el vector de flujo produce un momento y un barrido libre separado desde el borde del obstáculo hasta el final del mismo, formando una frontera entre la región de flujo inerte re-circulante y una región de flujo exterior (Fig. 1.17).



**Figura 1. 17** Esquema de comportamiento del viento con obstáculos. Fuente Libro *Wind Energy Explained* (Rohatgi and NeIson, 1994).

Como resultado, la potencia y turbulencia son afectadas, cambiando sus indicadores conforme la distancia al obstáculo. Tal como se muestra en la figura 1.18.

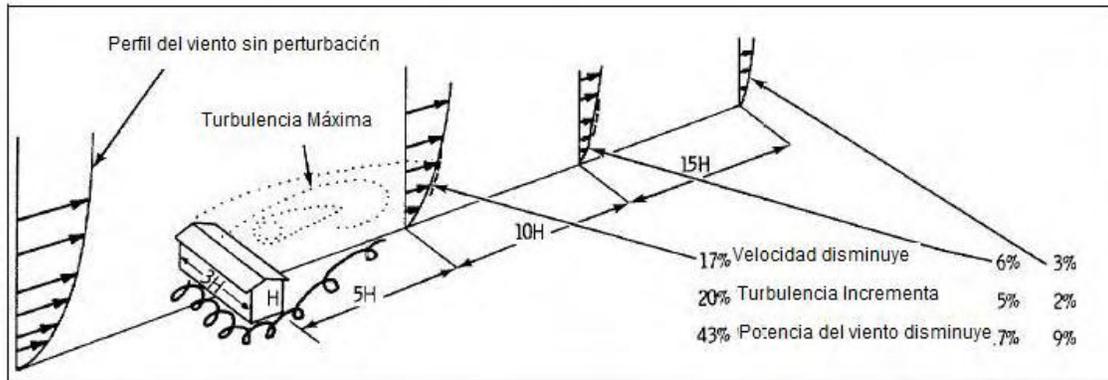


Figura 1. 18 Efectos de obstáculos en el flujo del viento. Fuente: Libro *Wind Energy Explained* (Wegley et al., 1980).

Debido a que la tierra no es uniforme y presenta rugosidades diferentes de un sitio a otro altera el perfil del viento. Cada vez que la rugosidad de un sitio cambia de suave a espeso la parte baja de dicho perfil resulta afectada, la rugosidad del terreno como se muestra en la figura 1.19 determina como aumenta la velocidad del viento con la altura respecto al suelo.

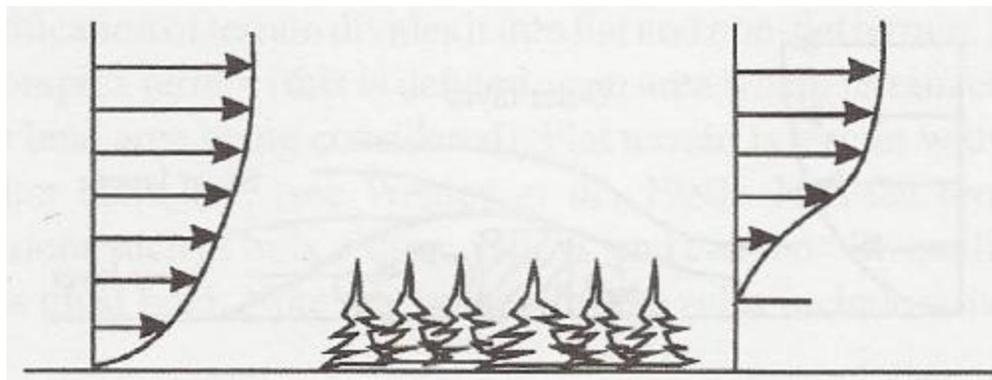


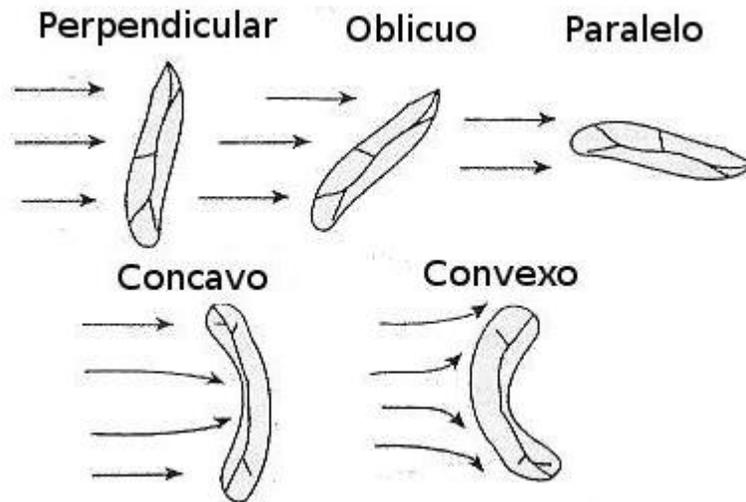
Figura 1.19 Efectos del cambio de la rugosidad. Fuente: Libro *Wind Energy Explained* (Wegley et al., 1980).

### Terrenos Complejos

Los flujos en pequeña escala están adicionalmente divididos en elevaciones y depresiones, las cuales son características que se deben estudiar por separado.

Diversas investigaciones se han aplicado para el caso de elevaciones aisladas con agua y túneles de viento para caracterizar el flujo en especial para colinas. Como resultado se indica que las colinas con forma alargada con 600 metros o menos en relación al sitio y con una relación de anchura y altura menor a 10, aprovechan de manera más eficiente la energía del viento en función de la dirección y 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 (Fig. 1.20).



*Figura 1.20 Efectos de la orientación y forma de las colinas. Fuente: Libro Wind Energy Explained (Wegley et al., 1980).*

Las depresiones están caracterizadas por terrenos bajos respecto a sus alrededores. Las depresiones pueden “canalizar” al viento, proporcionando también zonas de mayor intensidad. Esta clasificación la conforman regiones como valles, pasos, cañadas y cuencas. El flujo diurno es uno de los factores que intervienen en el flujo de este tipo de terrenos, sin embargo existen 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.

#### 1.4.2.2 Extrapolación Vertical

##### *Variación de la Velocidad del Viento con respecto a la Altura*

Debido a que se realizan mediciones a menor altura que la apropiada para la evaluación del recurso eólico, surge la necesidad de utilizar técnicas para estimar velocidades a mayores alturas, es decir, se tiene que extrapolar los datos para que de esta manera se obtenga la velocidad a una altura apropiada.

Una forma posible para estimar la variación de velocidad del viento con respecto a una altura  $z$  es con la siguiente ecuación:

$$v(z) = \frac{v_f}{K} \left[ \ln \frac{z}{z_0} - \xi \left( \frac{z}{L} \right) \right] \quad (3)$$

Donde: la función  $\xi (z/L)$  es determinada por la radiación solar neta en el sitio. Esta ecuación es aplicada para tiempos cortos (por ejemplo un minuto) de velocidades promedio y no para promedios mensuales o anuales.

Esta ecuación es de gran utilidad para sitios críticos y periodos cortos, sin embargo para aplicaciones en ingeniería no, por tal motivo, investigadores han realizado búsquedas para encontrar expresiones más simples y de mayor utilidad para satisfacer esta necesidad una de ellas es la ley exponencial de Hellmann la cual expresa lo siguiente:

$$\frac{V}{V_0} = \left[ \frac{H}{H_0} \right]^\alpha \quad (4)$$

Donde: V = velocidad a la altura H,  $V_0$  = la velocidad a la altura  $H_0$ ;  $\alpha$  = Coeficiente de fricción o exponente de Hellmann.

Los valores de  $\alpha$  generalmente toman valores desde 0.166 hasta 0.142 para terrenos abiertos, pero llegan a variar desde 0.10 hasta 0.40. También es necesario considerar que este parámetro puede variar para un mismo sitio desde un valor de 1/7 durante el día hasta 1/2 durante la noche. A esta última ecuación también se le conoce como la *ley de potencia* y cuando el valor de  $\alpha$  es igual a 1/7, se le conoce como la *ley de potencia de un séptimo*.

La ecuación (4) puede ser usada para ajustar datos razonablemente en un rango de 10 hasta 100-150, el coeficiente de fricción es determinado empíricamente y varía con la altura, hora del día, época del año, naturaleza del terreno, velocidades de viento y temperatura, existen tablas como se muestra en la tabla 1.2 muestra los coeficientes de fricción de acuerdo al tipo de terreno:

**Tabla 1.2 Coeficiente de Fricción para Diferentes tipos de Terreno. Fuente: Villanueva Miguel, Energía Eólica, CEAC, 2004**

Tipo de terreno	Coeficiente de fricción $\alpha$
Lagos, océano, superficies suaves y duras	0.10
Césped	0.15
Terrenos de cultivo, setos o vallas, y arbustos	0.20
Campo boscoso con muchos árboles	0.25
Pueblo pequeño con algunos árboles y arbustos	0.30
Área de la ciudad con edificios altos	0.40

### 1.4.3 Estimación de Recurso

Para realizar una estimación del recurso eólico que existe en un sitio determinado, se requiere contar con mediciones hechas por estaciones anemométricas en un periodo largo de tiempo, los dos parámetros importantes que se deben medir es la velocidad y dirección del viento, teniendo en cuenta los factores importantes y mencionados que influyen que sean confiables dichos datos, cabe mencionar que existe formas de resumir los datos para realizar una evaluación incluyendo métodos estadísticos y directos.

Para estimar la energía disponible en el viento se utiliza la relación:

$$E = \frac{1}{2} \rho A v^3 t \quad (5)$$

De la ecuación (5) se observa que la velocidad es el parámetro más importante en el incremento de la energía asociada con el viento.

Por otra parte, la densidad del aire también afecta a la cantidad de energía asociada con el viento, aunque en menor proporción. Para tomar en cuenta su efecto, se puede usar:

$$\rho_{sm} = 1.225 e^{\left( \left( -\frac{z}{8435} \right) - \left( \frac{T_m - 15}{288} \right) \right)} \quad (6)$$

Las estimaciones del potencial de energía eólica, normalmente se hacen por meses, para lo cual entonces se utilizan valores promedio de la velocidad del viento determinada por:

$$\bar{V}_T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_{e_i} \quad (7)$$

Se puede estimar la variación de la velocidad del viento con la altura con la Ley de perfil logarítmico del viento usando:

$$V_e(z) = V_e(z_r) \left( \frac{\ln \frac{z}{z_0}}{\ln \frac{z_r}{z_0}} \right) \quad (8)$$

Donde:  $Z_0$  = coeficiente de longitud de rugosidad.

Esta ecuación depende básicamente del tipo de terreno, espaciamiento y altura de rugosidades (agua, pasto, etc.) y toma diferentes valores como lo muestra la tabla 1.3:

**Tabla 1.3 Tabla de Rugosidades para Diferentes tipos de Terrenos. Fuente: Villanueva Miguel, Energía Eólica, CEAC, 2004**

Tipo de Terreno	Z <sub>0</sub> (mm)
Muy suave; hielo o lodo	0.01
Mar abierto en calma	0.20
Mar picado	0.50
Superficie de nieve	3.00
Césped	8.00
Pasto quebrado	10.00
Campo preparado para cultivo	30.00
Cultivo	50.00
Pocos árboles	100.00
Varios árboles, hileras de árboles, pocas construcciones	250.00
Bosques, tierras cubiertas con árboles	500.00
Suburbios	1500.00
Centros de ciudades con edificios altos	3000.00

Por ello, en general, la velocidad del viento aumenta con la altura. Además, el perfil de velocidad de viento se pronuncia más con el aumento de la rugosidad del suelo y la velocidad disminuye.

A partir de los registros de mediciones de velocidad del viento a diferente altura de al menos un año es la manera más confiable de obtener coeficientes de fricción y rugosidad, se parte obteniendo primero el exponente  $\alpha$  para dos diferentes alturas y velocidades usando la ecuación (3) y tendremos la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{\ln(v) - \ln(v_0)}{\ln(H) - \ln(H_0)} \quad (9)$$

Al igualar las ecuaciones (4) y (8) se obtiene el coeficiente de rugosidad  $z_0$ , de la siguiente forma:

$$z_0 = \exp \frac{H_0^\alpha \ln H - H^\alpha \ln H_0}{H_0^\alpha - H^\alpha} \quad (10)$$

Al determinar estos coeficientes cumplen para dos diferentes mediciones y con esto definir el perfil de viento y factores para diferentes lapsos de tiempo (día, época, año) y para direcciones de viento diferente.

Para estimar la variación de velocidad media del viento en un periodo largo de tiempo es utilizada la función de distribución acumulada o curva de duración del viento, esta función aporta información sobre la probabilidad de que la velocidad  $V$  exceda un valor límite  $V_0$  durante un periodo dado.

Sin embargo existe una ecuación muy usada para este tipo de análisis de viento llamada Distribución de Weibull:

$$f(V) = (k/c)(V/c)^{k-1} \exp(-V/c)^k \quad (11)$$

Esta ecuación se trata de una distribución que consta de dos parámetros  $c$  y  $k$ :

Donde el factor de forma ( $k$ ) es importante ya que determina que tan dispersos o agrupados están nuestros datos, la cual, entre menor sea su valor mayor veracidad tendrán nuestros datos, se determina por:

$$k = \left( \frac{\sigma}{V_m} \right)^{-1.086} \quad (12)$$

Y el factor de escala se puede determinar usando:

$$c = \frac{V_m}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (13)$$

Que indican las características promediadas del viento en el emplazamiento; un valor muy utilizado es  $k=2$  (Distribución de Weibull) (Fig. 1.21).

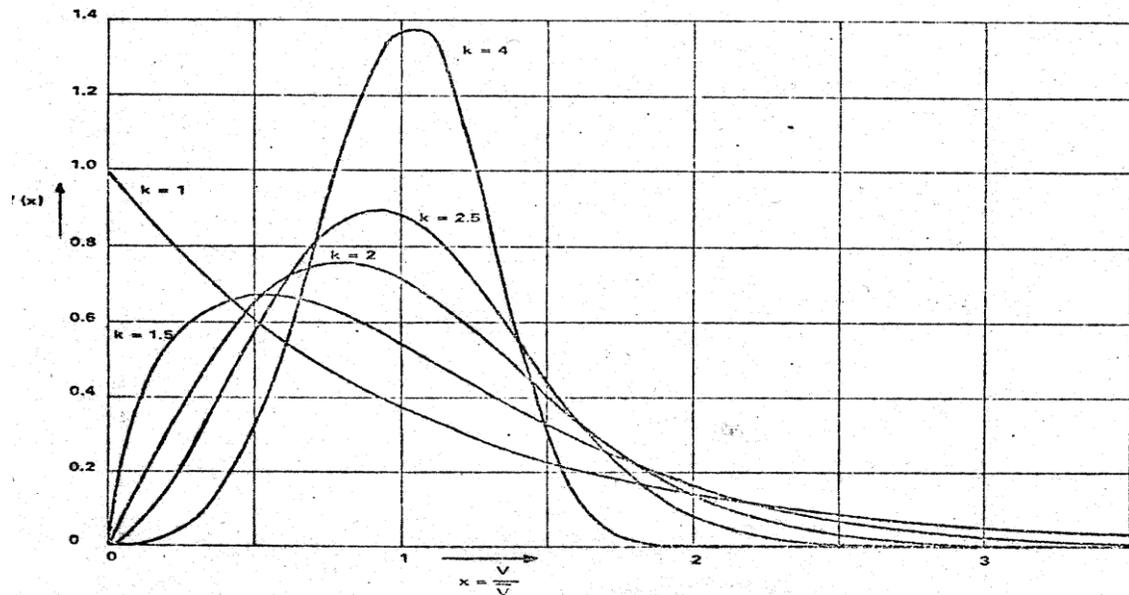
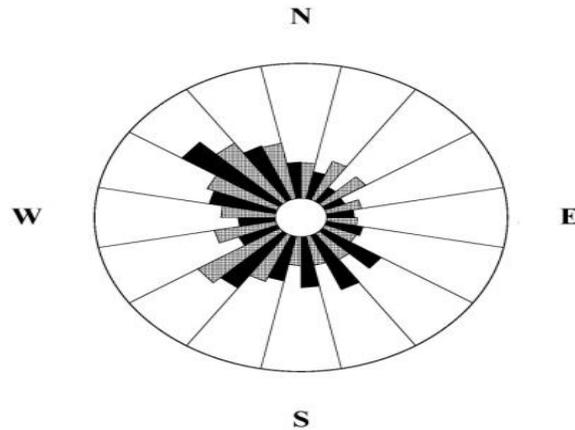


Figura 1.21 Curvas de Weibull. Fuente: Notas de Curso Eólica Tec. de Cancún. J. Hernandez. 2010.

Otro parámetro interesante que se debe mostrar en la evaluación del recurso eólico es la dirección de los vientos representados gráficamente en una rosa de los vientos, la cual se consideran en 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 (Fig. 1.22).



*Figura 1. 22 Rosa de los viento. Fuente. Libro Wind Energy Explained*

La Rosa de los Vientos es esencial para determinar el emplazamiento de la instalación.

#### 1.4.4 Densidad de Potencia Disponible en el Viento

La densidad de potencia disponible en el viento (WPD) proporciona una indicación más correcta del potencial de energía eólica de un sitio, es proporcional a la suma del cubo de la velocidad promedio a corto plazo del viento y la densidad del aire, su ecuación es:

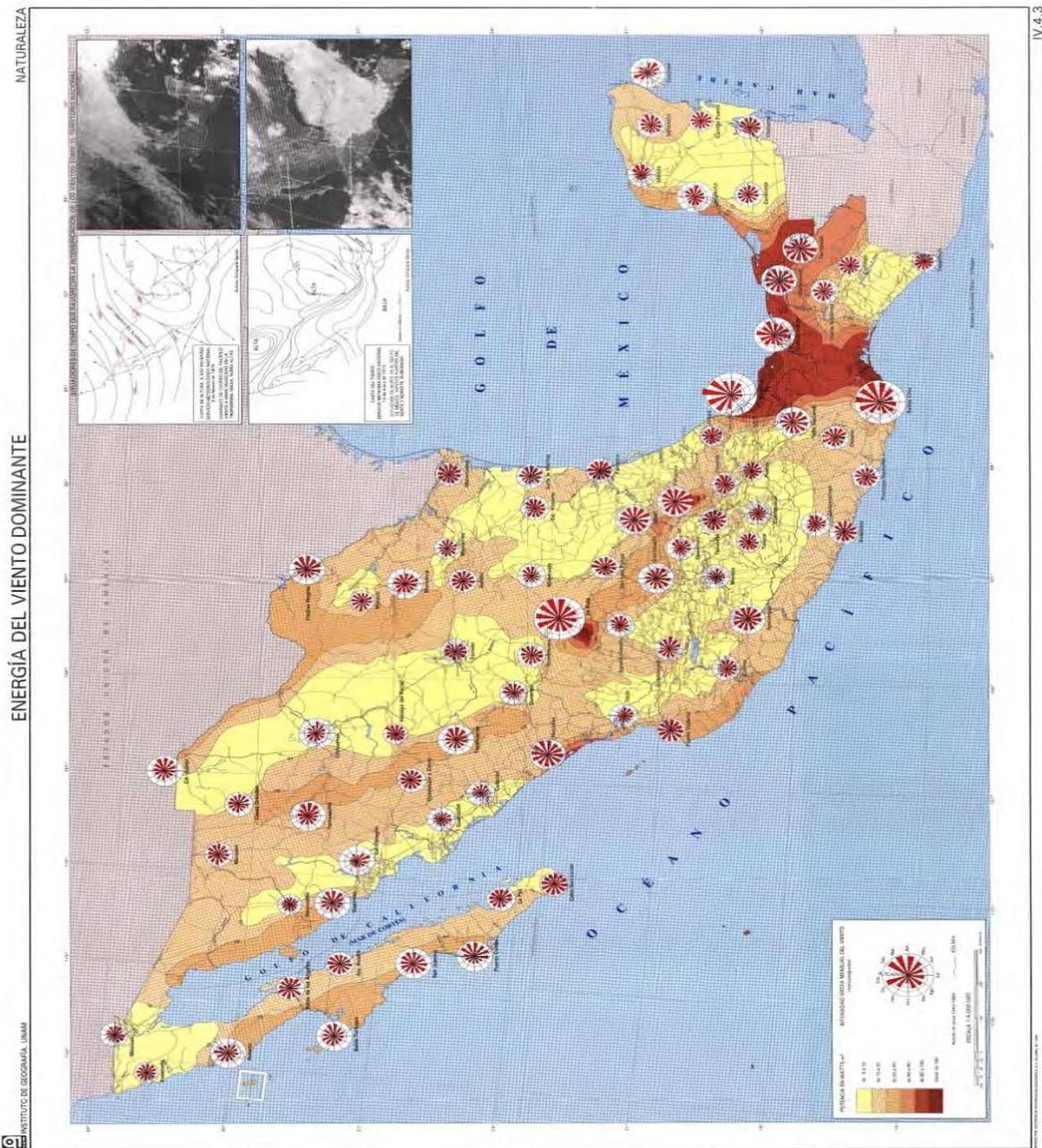
$$WPD = \frac{1}{2n} \sum \rho(V)^3 [W / m^2] \quad (14)$$

Donde:  $n$  = número de registros;  $\rho$  = la densidad el aire;  $V$  = velocidad del viento

Debido al termino cubico, podemos observar que el parametro mas importante es la velocidad, por tal motivo, dos sitios con la misma velocidad promedio del viento pero con diferentes distribuciones pueden tener valores muy diferentes de densidad de potencia.

## 1.5 Recurso Eólico en México

El conocimiento del recurso energético eólico en México (Fig. 1.23) está a nivel exploratorio y de reconocimiento, sin embargo, las mediciones puntuales o de pequeñas redes anemométricas, realizadas principalmente por el IIE y algunas otras entidades o empresas, han servido para confirmar a nivel de prefactibilidad, la existencia de vientos técnicamente aprovechables y económicamente viables en las siguientes regiones:



**Figura 1.23 Energía del Viento Dominante. Fuente: Instituto de Geografía UNAM: <http://www.igeograf.unam.mx/iggweb/pdf/publicaciones/atlas/atlas/enervientdom.jpg>**

Se estima que el potencial eolieléctrico técnicamente aprovechable de México alcanza los 5,000 MW, lo que equivale a 14% de la capacidad total de generación eléctrica instalada actualmente. Este potencial tiene ahora mayores posibilidades de desarrollarse, por la disminución de sus costos que han llegado a ser casi competitivos con las energías convencionales y por las modificaciones a la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica y su Reglamento. En este sentido en la figura 1.24 se resaltan los potenciales identificados en la región del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, en la parte correspondiente a la costa del Pacífico. Se han identificado también sitios en los estados de Baja California, Baja California Sur, Coahuila, Hidalgo, Quintana Roo y Zacatecas. [Parámetro Consultores S.C. México, D. F., julio de 2004].

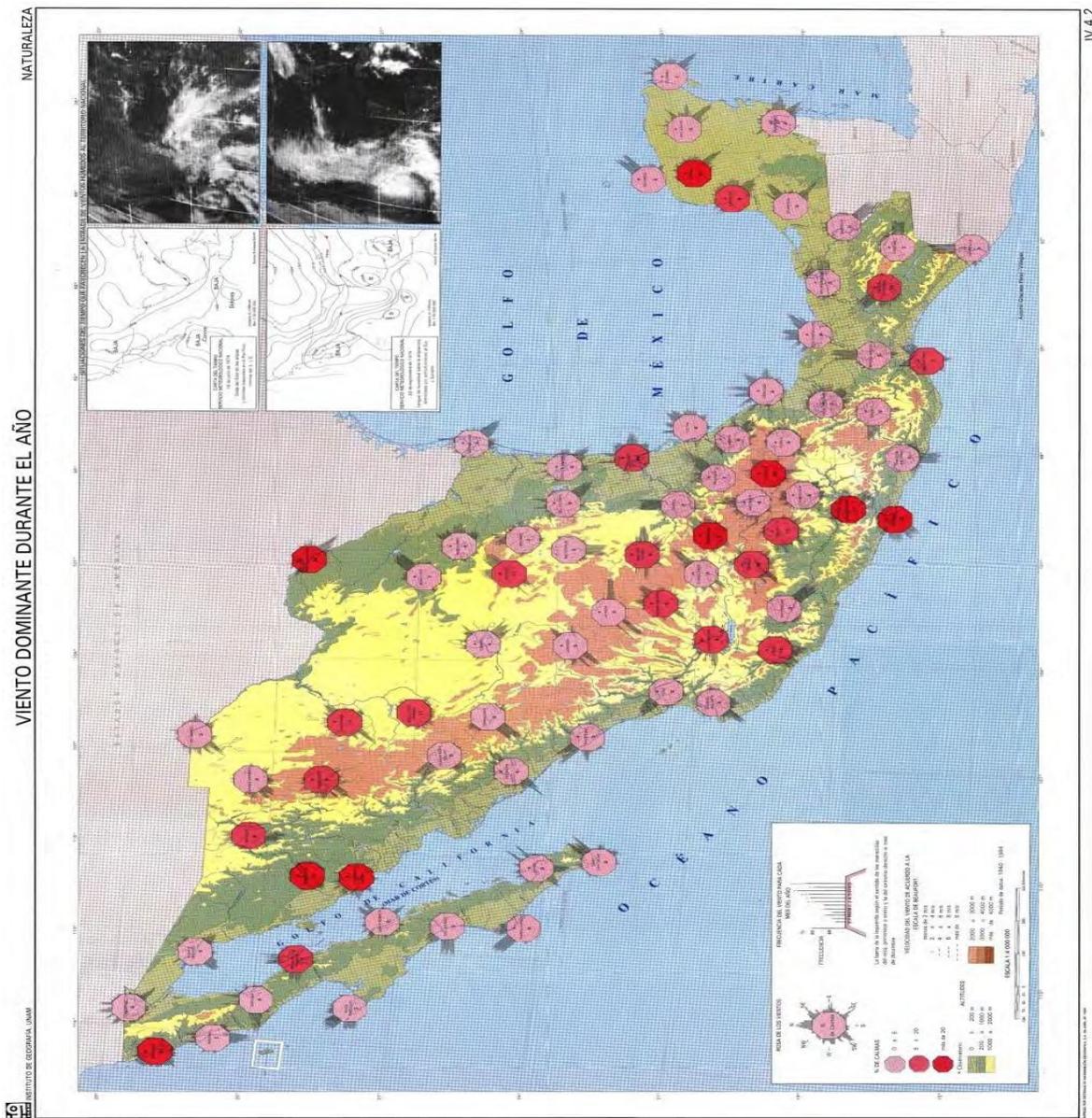
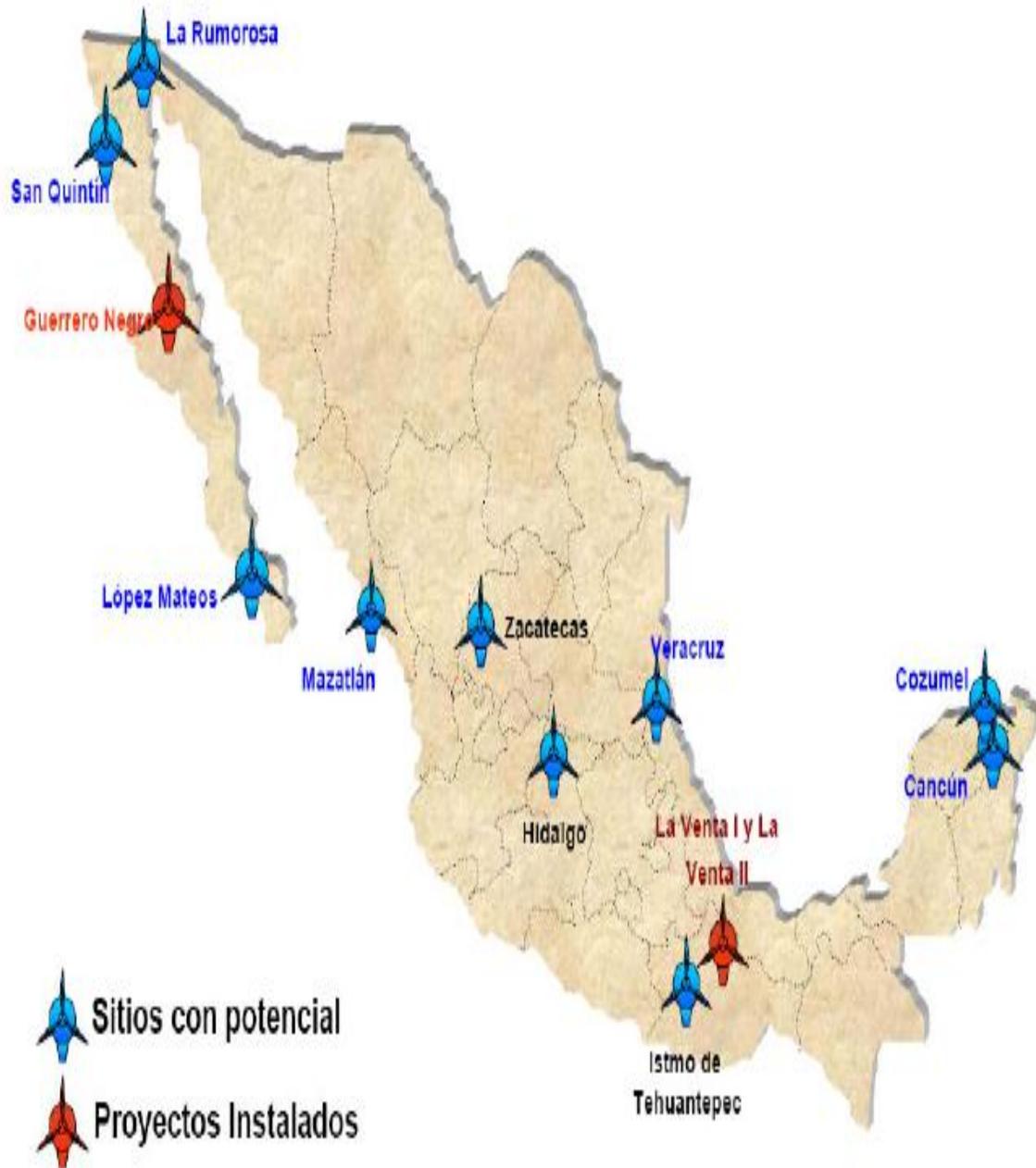


Figura 1.24 Viento dominante durante el Año. Fuente: Instituto de Geografía UNAM: <http://www.igeograf.unam.mx/igweb/pdf/publicaciones/atlas/atlas/vientdomanual.jpg>

De acuerdo con la figura 1.25, el recurso eólico para la producción de energía eléctrica en México representa cerca del 2 % en la producción total, con la estimación del potencial eólico hecho por la CFE y el IIE el recurso tiene un potencial de generación de 3000 y 5000 MW (Borja-Díaz, 1999; Hiriart, 2000; Ramírez et al., 2000) que representa el 14 % de la capacidad total de generación.



*Figura 1.25 Sitios con Potencial Eólico en la República Mexicana. Fuente CFE.*

## Península de Yucatán.

La franca exposición de la península a los vientos alisios de primavera y verano, incrementados en su costa oriental por la brisa marina, y a los nortes en el invierno, hacen de Cabo Catoche, la costa de Quintana Roo y el oriente de Cozumel, zonas con potencial eólico interesante (Fig. 1.26), para contribuir significativamente a los requerimientos de la península en apoyo de su generación termoeléctrica.

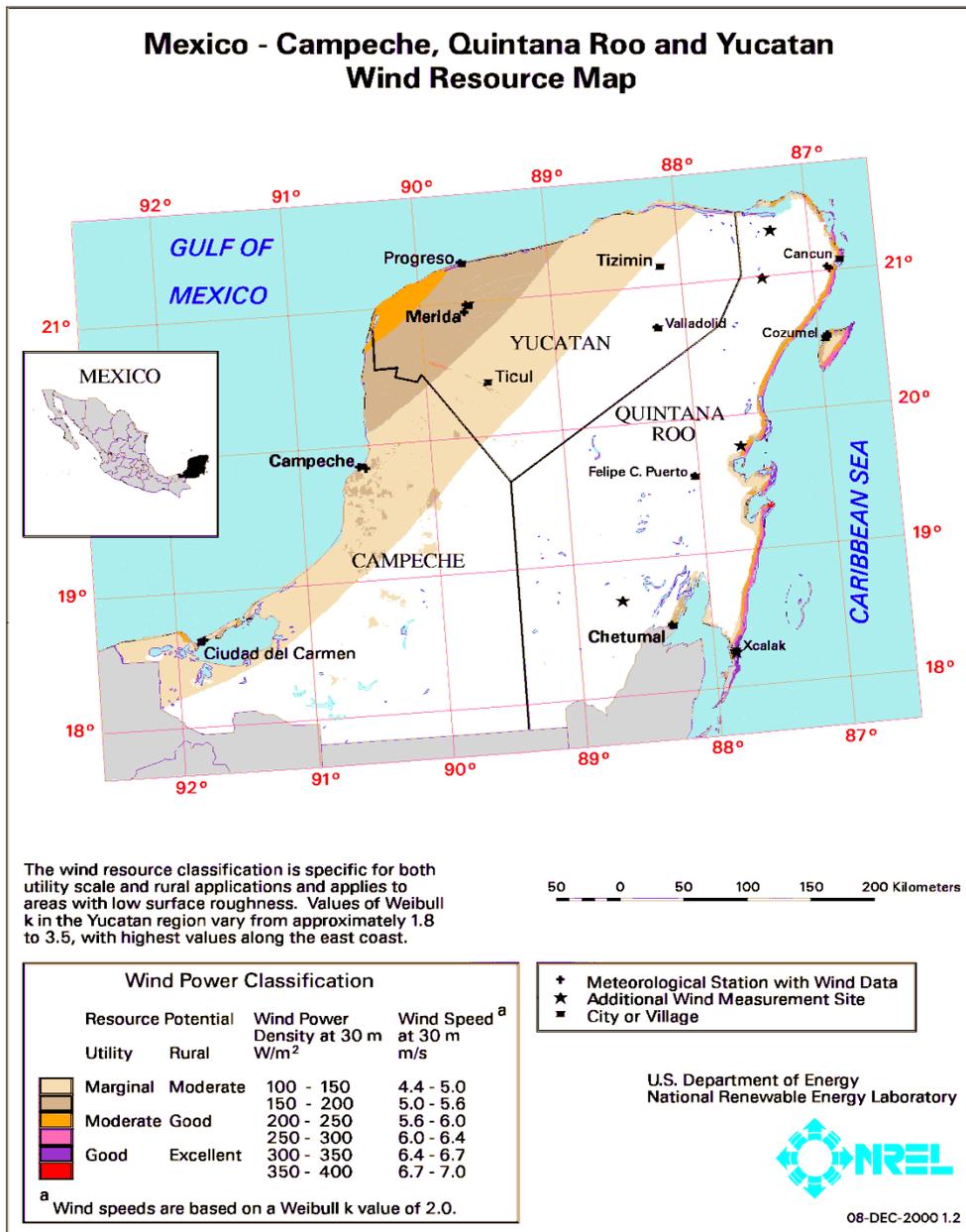


Figura 1.26 Clasificación del Viento en la Península de Yucatán. Fuente: NREL

***CAPITULO II: CARACTERIZACIÓN DEL RECURSO  
EÓLICO***

## **CAPITULO II: CARACTERIZACIÓN DEL RECURSO EÓLICO**

### ***2.1 Recolección de Datos***

Una medición adecuada es un factor determinante en la recolección de datos para la evaluación del recurso eólico, depende generalmente de los parámetros que se desean medir, la ubicación de micro sitios y cantidad de estaciones anemométricas, tipo de sensores, altura de medida, frecuencia de colecta de datos y tipos de reportes.

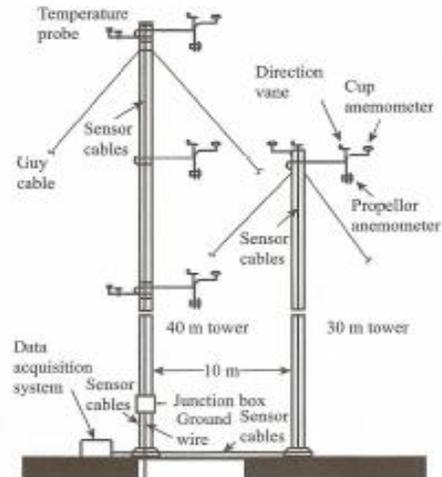
Los parámetros básicos que se deben medir son: la velocidad y dirección del viento, la cual, en el equipo de medición al anemómetro y la veleta son los sensores más fundamentales, generalmente en una estación anemométrica se deben instalar dos anemómetros para poder validar los datos y para obtener el perfil del viento.

Para una evaluación del recurso eólico es conveniente instalar la mayor cantidad de estaciones en puntos estratégicos dentro del área donde se dispone realizar la evaluación, sin embargo, este gran factor lo determina el capital con el que se cuenta. La altura ideal a la que se deben de instalar los sensores debe ser igual a la altura del rotor del aerogenerador (cubo, nariz, aspas) que en proyectos futuros se desearía instalar, sin embargo, para un estudio como primer acercamiento se permiten altura menores que permitan estimar de manera confiable las mediciones tomadas.

### **2.2 Parámetros**

La velocidad y dirección del viento son los parámetros más importantes en la evaluación del recurso eólico, sin embargo la temperatura y la presión del aire son necesarias para la determinación de la densidad del aire.

Para la evaluación del recurso eólico es necesario realizar mediciones a alturas considerables, por ejemplo de 30 a 40 metros dependiendo de la altura máxima del obstáculo con dos o más anemómetros por factores que influyen en su medición, además de que los aerogeneradores modernos su rotor se encuentra de 60 a 100 metros [Wind Energy Explained]. La altura de los sensores se muestra en la figura 2.1.



**Figura 2.1** Sensores a diferentes alturas en una estación de medición anemométrica. Fuente: *Wind Energy Explained*.

El muestreo de los datos puede ser en unidades de segundos mientras que los registros de valores promedio, desviación estándar, máximos y mínimos son cada diez minutos de acuerdo con los estándares internacionales de medición.

Los registros de valores promedio están definidos 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.

### 2.2.1 Velocidad del Viento

Los datos de velocidad del viento son la mayor parte una señalización importante del recurso de energía del viento en un sitio, para poder simular su comportamiento es necesario realizar extrapolaciones a diferentes alturas y obtener distintos datos para finalmente determinar las características del perfil del viento.

### 2.2.2 Dirección del Viento

Para definir la dirección del viento predominante, las veletas deben ser instaladas a niveles significativos de monitoreo aunque no es tan estricta su colocación a varias alturas ya que la variación de la dirección normalmente no excede los 15°. Para el caso de las turbinas eólicas la información de frecuencia de la dirección del viento es importante para identificar el área adecuada, forma y orientación para optimizar el trazado de turbinas en un parque eólico.

### 2.2.3 Temperatura y Presión

La temperatura del aire es un descriptor importante, generalmente es medida a 2 o 3 metros sobre el nivel del suelo o cerca del centro de la altura de la torre o soporte de la estación. En

la mayoría de posiciones a las que se instala el sensor de medición la temperatura promedio del aire varía hasta 1 °C del promedio a cualquier altura. La temperatura y presión son importantes indicadores de energía disponible en el viento, se usan también para calcular la densidad de aire, estas variables se requirieren para estimar la densidad de energía del viento y la potencia de salida de un aerogenerador respectivamente.

#### 2.2.4 Parámetros Optativos

##### *Radiación Solar*

Puede ser un indicador de estabilidad atmosférica y es usado en el flujo numérico del modelado del viento.

##### *Velocidad de Viento Vertical*

Este parámetro provee más detalles acerca de la turbulencia de un sitio y puede ser un buen pronosticador de viento.

##### *Cambio de Temperatura con respecto a la Altura*

Esta medida, también ha sido llamada delta de temperatura ( $\Delta T$ ), aporta información acerca de la turbulencia e históricamente se ha usado para indicar estabilidad atmosférica. La instalación de sensores de temperatura debería quedar por los niveles inferiores y superiores de medida sin interferir con las medidas del viento.

##### *Presión Barométrica*

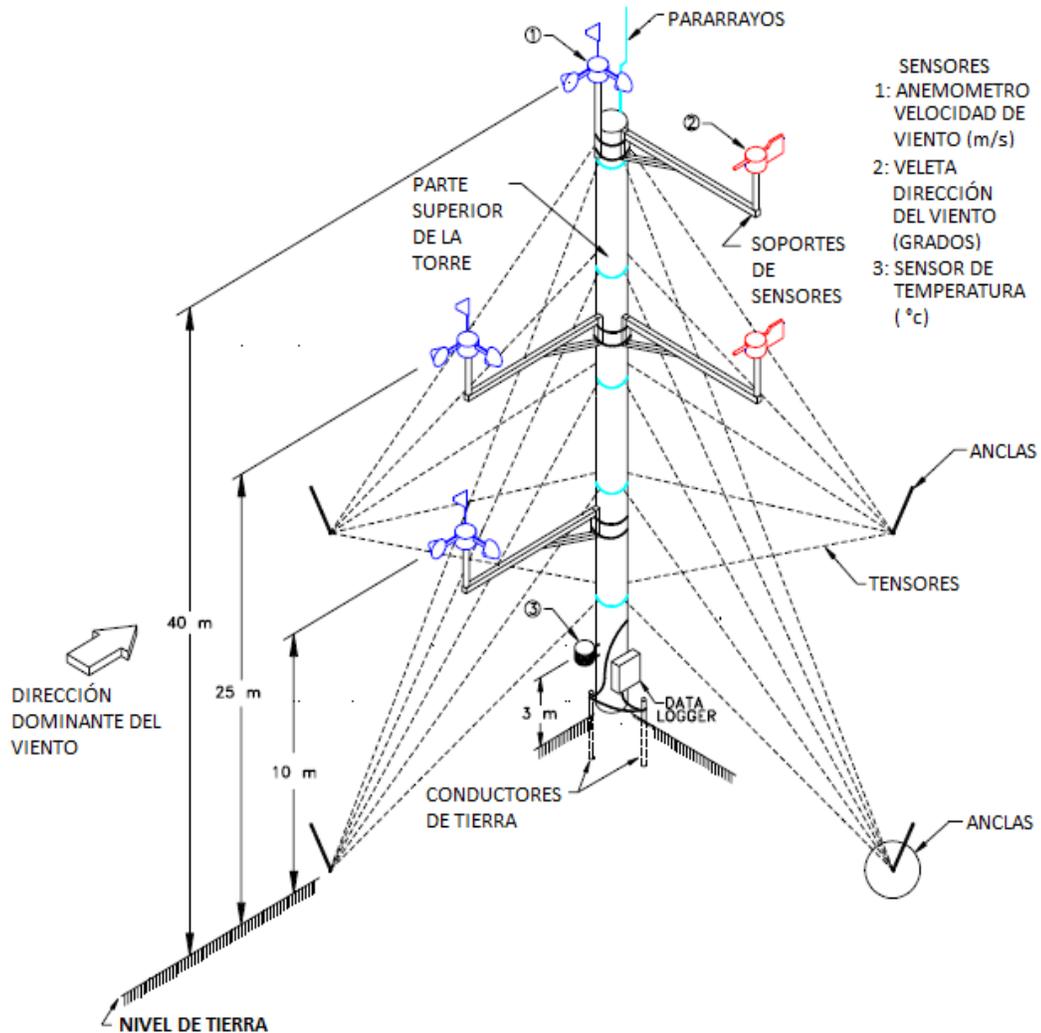
La presión barométrica es usada con la temperatura del aire para determinar su densidad. Es difícil de medir exactamente en ambientes ventosos por las presiones dinámicas inducidas cuando el viento fluye cerca del instrumento. Un ambiente interior o de la oficina es un trasfondo preferido para un sensor de presión. Por consiguiente, la mayoría de programas de valoración del recurso no miden presión barométrica y en lugar de eso usan datos de una estación regional Weather Service Nacional esto es luego ajustada para la elevación.

### **2.3 Equipo**

Esta parte describe los componentes de instrumentación que componen a una estación de monitoreo del recurso del viento. Se muestra a detalle los componentes de una estación (sensores, torre, y registrador de datos) así como también las partes periféricas como suministros de fuerza, cableado, conexiones a tierra, almacenamiento de datos, software, y sistemas de comunicación. Toda la instalación debe estar apegada a normas de industria aceptadas para el monitoreo meteorológico (AWEA Standard 8.1 – 1986).

Todos los componentes del equipo utilizado en una estación anemométrica deben estar calibrados y ser utilizados para su propósito, esto para cumplir con el objetivo de generar

datos continuos en el tiempo y de calidad, creando menor margen de error y haciendo más confiable la información. Los instrumentos se muestran en la figura 2.2.



**Figura 2.2 Partes de una Estación Anemométrica. Fuente: National Renewable Energy Laboratory "WIND RESOURCE ASSESSMENT HANDBOOK" 1997.**

### 2.3.1 Sensores

Como breve información se dice que un sensor es un dispositivo capaz de transformar magnitudes físicas llamadas variables de instrumentación en magnitudes eléctricas, las cuales dependen del tipo de sensor que tienen como principales características: rango, velocidad de inicio, constante de distancia, rango de temperatura de operación, rango de humedad de operación, error del sensor y resolución de registro.

El rango de medida indica la mínima y máxima medida que es capaz de detectar el sensor, la velocidad de inicio indica el valor mínimo en que el anemómetro inicia su giro, la constante de distancia describe la velocidad en que el anemómetro puede detectar los cambios en la velocidad del viento, los rangos de temperatura y humedad indican las condiciones ambientales de operación, el error del sensor indica proporción de los posibles errores en los registros. Finalmente la resolución indica la mínima variación que detecta el sensor, en la tabla 2.2 se resumen los parámetros para los diferentes sensores.

**Tabla 2.1 Especificaciones Técnicas para los Sensores Básicos. Fuente: National Renewable Energy Laboratory “Wind Resource Assessment Handbook” 1997.**

Especificación	Anemómetro (Velocidad de viento)	Veleta (Dirección del viento )	Temperatura
Rango de medida	0 a 50 m/s	0° a 360° ( $\leq 8^\circ$ punto muerto)	- 40° a 60°C
Velocidad de inicio	$\leq 1.0$ m/s	$\leq 1.0$ m/s	N/A
Constante de distancia	$\leq 4.0$ m	N/A	N/A
Rango de temperatura de operación	- 40° a 60°C	- 40° a 60°C	- 40° a 60°C
Rango de humedad de operación	0% a 100%	0% a 100%	0% a 100%
Error del sensor	$\leq 3\%$	$\leq 5^\circ$	$\leq 1^\circ\text{C}$
Resolución de registro	$\leq 0.1$ m/s	$\leq 1^\circ$	$\leq 0.1^\circ\text{C}$

### 2.3.1.1 Anemómetros

Este sensor es el que se encarga de cuantificar la velocidad del viento, existen diversos tipos de anemómetros entre los que más destacan se encuentran los de copas o semiesferas y el de tipo hélice.

El anemómetro de copas (Fig. 2.3) consta de tres o cuatro copas conectadas a un eje vertical para su rotación, en la cual por lo menos una copa siempre queda a merced del viento. La forma aerodinámica de cada una de las copas que lo constituye convierte la fuerza de presión del viento en fuerza de torsión giratoria (torque). La rotación de la copa es casi linealmente proporcional para la velocidad del viento sobre un rango especificado. Un transductor en el anemómetro convierte este movimiento giratorio en una señal eléctrica que es enviada a través de un conductor hasta un registrador de datos (data logger) para ajustar esta señal con valores de compensación electrónica (slope y offset) y realizar el cálculo de la velocidad de viento.



*Figura 2. 3 Anemómetro de copas. Fuente: Wind Resource Assessment Handbook.*

El anemómetro de hélice (Fig.2.4) consta de una hélice montada en un eje horizontal orientada en contra del viento a través del uso de una veleta integrada. Este anemómetro también convierte la rotación de la hélice en señales eléctricas.



*Figura 2. 4 Anemómetro de Hélice. Fuente: Wind Resource Assessment Handbook*

El anemómetro más popular en la industria eólica ha sido el NRG Maximum #40 de 3 copas, debido a su fortaleza, constitución en sus materiales y partes que lo conforman, ha demostrado tener una duración de 2 años en la mayoría de los ambientes, estabilidad en su calibración y poco mantenimiento.

El uso de anemómetros redundantes en una altura dada es recomendado para minimizar el riesgo de pérdida de datos de velocidad del viento debido a la falla de un sensor primario.

#### 2.3.1.2 Veletas

Son utilizadas para medir la dirección del viento en grados, 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 magnético).

El registrador de datos envía un voltaje de tensión conocida a través del potenciómetro, donde la tensión de caída es registrada, la relación entre estas dos voltajes 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 se elige una veleta, se deben de tomar varios criterios como: observar el rango de punto muerto, la cual, 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 de veletas es la NRG 200P mostrada en la figura 2.5 por su diseño simple y poco mantenimiento. Lo conforma un potenciómetro pasivo construido de componentes termoplásticos y de acero inoxidable.



*Figura 2. 5 Veleta. Fuente: Wind Resource Assessment Handbook, 1997.*

### 2.3.1.3 Termómetros y Barómetros

El típico sensor de temperatura ambiente (Fig. 2.6) está constituido de tres partes: el transductor, un dispositivo de interface y una carcasa como radiador. El material por el que está hecho el transductor es generalmente por Ni o Pt con una relación entre su resistencia y temperatura, los elementos utilizados en estos sensores son los termistores que es la resistencia de los detectores termales (RTDs), en la cual el valor de resistencia es medido por el registrador de datos (o un dispositivo de la interfaz) que usa una ecuación para el cálculo de la temperatura del aire actual y semiconductores. El transductor para su protección se encuentra dentro de una carcasa contra la radiación solar directa, que comúnmente es de platos metálicos apilados.



*Figura 2.6 Sensor de temperatura. Fuente: [www.nrgsystems.com](http://www.nrgsystems.com)*

Un barómetro como el que se muestra en la figura 2.7, mide la presión atmosférica. Existen de muchos tipos actualmente, los más comunes, utilizan un transductor piezoeléctrico que entrega una salida estándar de tensión, al registrador de datos, algunos modelos necesitan una fuente externa para su correcta operación.



*Figura 2.7 Sensor de Presión NRG. Fuente: [www.nrgsystems.com](http://www.nrgsystems.com)*

### 2.3.2 Registradores de datos

Comúnmente llamados Data loggers, al igual que los demás dispositivos también se puede encontrar una gran variedad, pueden estar constituidos desde un simple grabador de carácter, hasta tarjetas de interfaz con computadoras personales. Existen fabricantes que ofrecen sistemas completos de registro secuencial de datos que incluyen almacenamiento periféricos y dispositivos de transferencia de datos.

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

Es necesario e importante conocer las principales características con las que opera el registrador, como son: forma de almacenar los datos, memoria interna de almacenamiento,

operación en distintos ambientes, forma de descargar los datos y fuente de alimentación ya que al tomar en cuenta estos aspectos se logra optar por un equipo adecuado para la necesidad del sistema, uno de estos equipos podría ser como el que se muestra en la figura 2.8, que es uno de los más utilizados para este propósito.



*Figura 2. 8 Registrador de Datos NRG. Fuente: [www.nrgsystems.com](http://www.nrgsystems.com).*

Cada registrador electrónico de datos tiene algún tipo de software operativo que incluye una memoria interna para almacenar los datos temporalmente y después ser utilizados por algoritmos para calcular y registrar los parámetros deseados.

Todos los data loggers cuentan con un sistema operativo específico que no puede ser alterado o manipulado, sin embargo existen otros que son interactivos y pueden ser programados para una tarea específica. El programa y los datos se guardan en una memoria externa que necesita una fuente de alimentación continua para retener los datos, es una desventaja, pero por otra parte, este proceso es más seguro porque los datos no pueden perderse debido al voltaje bajo de la batería. Existen dos formatos comunes para almacenar datos:

**Ring memory:** En este formato, el archivo de datos es continuo. Sin embargo, una vez que la memoria disponible está completamente llena, el registro más nuevo de datos es sobrescrito sobre lo más viejo. Por tal motivo el conjunto de datos debe ser extraído antes de que la capacidad de memoria del dispositivo de almacenamiento sea llenada.

**Fill and stop:** En esta configuración, una vez que la memoria este llena, ninguno de los datos adicionales se guardaran. Esto eficazmente detiene el proceso del registro secuencial de datos hasta que se remplace por otra memoria.

Los dispositivos de almacenamiento masivo es donde físicamente se almacenan los datos, los más utilizados se muestran en la tabla 2.2.

**Tabla 2.2 Dispositivos de Almacenamiento. Fuente: Wind Resource Assessment Handbook**

Dispositivos de Almacenamiento	Descripción	Memoria/Configuración de almacenaje	Método de descarga de datos
Módulo de estado sólido	Un circuito integrado que es una interfaz directa con el registrador	Ring o Fill and Stop Temporal	Lectura y Escritura en sitio o reemplazable. Requiere software para lectura
Tarjeta de datos	Programmable read write device that plugs into a special data logger socket.	Fill and Stop Temporal /No temporal	Lectura y Escritura en sitio o reemplazable. Requiere software para lectura.
EEPROM Chip de datos	Un circuito integrado incorporado permite re-escribir	Fill and Stop Temporal	EEPROM dispositivo de lectura y software requeridos.
Magnético	Familiar del disco de 3 1/2	Fill and Stop	Requiere software para lectura.
Media	Como ejemplo un cassette	Temporal/No temporal	Medio Magnéticos
Computadoras Personales Portátiles	Laptop	Discos duros	Cableo especial, dispositivo de lectura, y software requeridos

### 2.3.3 Sistemas de comunicación

Los datos son típicamente recuperados y transferidos hacia una computadora ya sea manualmente o remotamente. El tipo de comunicación es muy determinante para el manejo de la información, ya que facilita en gran medida su administración, optando por la que más convenga en las necesidades del proyecto, por ejemplo, si la estación estuviese lejos de la computadora central, la opción sería una comunicación remota por reducir costos en el traslado, para ello existen diversos tipos de sistemas de comunicación principalmente de radiofrecuencia, GSM celular, Satelital y Ethernet, en la cual, se necesita de un operador para ir a bajar los datos o que la estación se comunique con la computadora central, uno de estos sistemas de comunicación es como el que se representa en la figura 2.9 por ser más utilizado por su forma de transmisión de datos.



**Figura 2.9 Modem celular iPack. Fuente: <http://www.nrgsystems.com/>**

## 2.3.4 Otros Accesorios

### 2.3.4.1 Fuentes de alimentación

Todo el equipo de una estación anemométrica necesita de una fuente de alimentación para su funcionamiento, o bien, como respaldo auxiliar o de emergencia de la misma, que debe ser dimensionado de acuerdo a su carga total, demanda y a sus necesidades que requiera el sistema. Estos sistemas pueden ser de mucha ayuda y hacer más eficientes al sistema en seguridad de pérdidas de datos por falta de energía o cualquier otro fallo eléctrico, además, como instalación debe contar con termomagnéticos o algún otro control de seguridad dirigido hacia los modem, sistemas periféricos y cualquier otro accesorio. Hoy en día, también se cuentan con baterías muy eficientes para la mayoría de los equipos tales como las de ion-litio o plomo acido de poco mantenimiento y son seleccionadas de acuerdo a los sistemas de carga. Por otra parte, también es necesario hacen una observación si el equipo funciona con corriente alterna o directa.

Debido a que la mayoría de las estaciones anemométricas se encuentran en zonas aisladas del suministro eléctrico, es viable instalar un sistema de auto- abastecimiento, en la cual, un sistema solar fotovoltaico (Fig. 2.10) sería una buena opción como fuente de alimentación. Cuenta con un modulo fotovoltaico, un controlador, un inversor y una batería con sus seguridades respectivas y apegadas a la norma NOM-001-SEDE-2005, garantizando las condiciones optimas para el funcionamiento de la batería y por consiguiente del equipo.



*Figura 2. 10 Sistema fotovoltaico de alimentación. Fuente: <http://www.nrgsystems.com/>*

### 2.3.4.2 Gabinetes

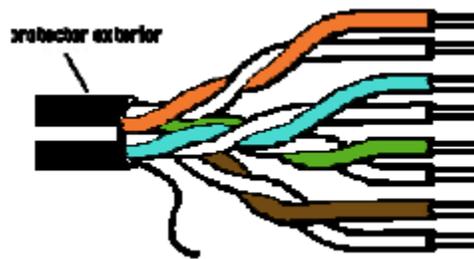
En todo momento es necesario proteger tanto al equipo como al data logger u otro equipo electrónico ante los efectos climatológicos y vandalismo, para ello existen carcasas externas de protección llamadas gabinetes (Fig. 2.11) que mantienen aislado al quipo de temperatura y humedad para su buen funcionamiento.



*Fig. 2.11 Gabinete. Fuente: <http://www.nrgsystems.com/>*

#### 2.3.4.3 Cableado

El cable debe ser seleccionado como se muestra en la figura 2.12 de acuerdo a las necesidades de señal o voltaje que envíe el sensor o requiera, por su uso es necesario que vaya trenzado en pares para disminuir ruidos eléctricos o alguna otra distorsión además de que en su exterior tenga un buen aislante por los efectos de los rayos UV y se recomienda ser flexible por los efectos de temperatura y humedad.



*Figura 2.12 Cable de pares trenzado con protector externo. Fuente. Apuntes de C.H El Cajón.*

#### 2.3.5 Torres y Soportes

Desde el tiempo en que el hombre ha buscado medir la velocidad del viento a alturas considerables, surge la necesidad de utilizar herramientas como son las torres y soportes que miden alrededor de 20 m hasta o incluso superar los 150 m. Existen otros tipos de torres como la que se utilizan para comunicaciones, sin embargo, las torres deben ser instaladas específicamente para sistemas de medición del viento. Hay dos tipos básicos de torres: la tubular y de Celosía.

##### 2.3.5.1 Torres Tubulares.

Para sitios nuevos, los tipos tubulares son recomendados por su fácil instalación. Son mástiles segmentados con forma tubular soportadas con tensores. Su instalación necesita un brazo auxiliar y un malacate. La torre puede ser ensamblada y los sensores pueden ser montados y reparados a ras de tierra, sin embargo, no es muy fácil su mantenimiento, ya que se tiene que bajar toda la torre por completo aumentando las posibilidades de daño al equipo.

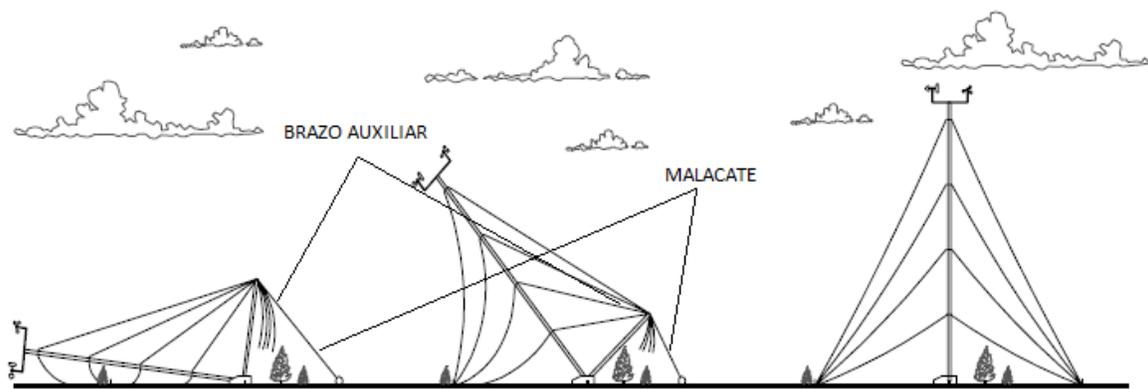
La forma de instalar este tipo de torres es como se muestra en la figura 2.13 y con el procedimiento que se menciona a continuación:

Primero.- Armar la estructura sobre el piso, colocando las piezas que lo conforman: sistema de protección contra descargas atmosféricas, soportes, sensores con el cableado.

Segundo.- Colocar el brazo auxiliar en la base de la torre y un malacate en el eje de la torre. Es importante anclar los tensores laterales así como los del lado opuesto al brazo auxiliar para asegurar que el movimiento de la torre sea en un solo sentido, el sentido del brazo auxiliar y el malacate.

Tercero.- Accionar el malacate, que levanta el brazo auxiliar, una vez que este alcanza los 90°, los tensores anclados en el extremo del brazo auxiliar comienzan a levantar la estructura.

Cuarto.- Una vez que la torre ha llegado a los 90°, el movimiento es limitado por los tensores opuestos al brazo. Los tensores sujetos al brazo auxiliar se pasan uno a uno a sus respectivas anclas.



**Figura 2.13 Pasos para la instalación de la torre Tubular. Fuente: WIND RESOURCE ASSESSMENT HANDBOOK. NREL 1997.**

### 2.3.5.2 Torres de Celosía

Las torres de tipo celosía requieren de una instalación civil y más compleja, son estructuras segmentadas, normalmente con forma triangular que puede ser autosoportada o soportada con tensores. La ventaja de este tipo de torre es el mantenimiento relativamente más fácil, ya que en esta, se puede escalar y reducir el tiempo de mantenimiento.

El modo de instalación para este tipo de torre es como se muestra en la figura 2.14 y con el procedimiento que se menciona a continuación:

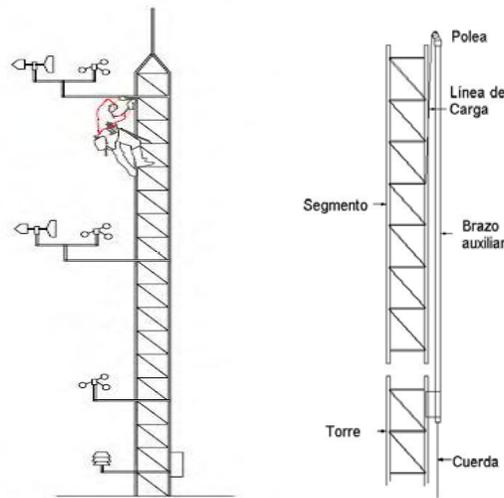
Primero.- Se escala la torre.

Segundo.- Con la ayuda de un brazo auxiliar colocado en el último segmento, se eleva el siguiente tramo para su sujeción.

Tercero.- Cuando se alcanza una altura determinada, se colocan tensores para soportar el nuevo tramo armado. Las anclas y la base deben estar previamente colocadas y orientadas.

Cuarto.- Cuando la estructura está erguida, se instalan los sistemas de protección contra

descargas atmosféricas, los soportes, los sensores, el gabinete con el registrador de datos y demás material.



**Figura 2.14 Torre de celosía (izquierda), detalle de montaje (derecha). Fuente: WIND RESOURCE ASSESSMENT HANDBOOK. NREL 1997.**

También hay que tomar en cuenta las siguientes observaciones para elegir adecuadamente la torre [NREL, 1997]:

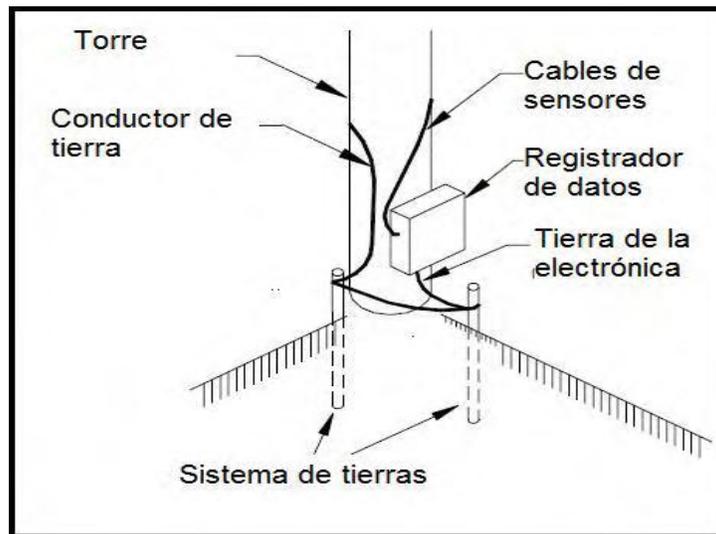
- Que resista la carga del viento.
- Ser estructuralmente estable para minimizar vibración inducida del viento.
- Asegurarse que el tipo de tensor sea el correcto del ancla, lo cual debe corresponder a las condiciones del terreno del sitio.
- Que este acondicionado con medidas de protección contra relámpagos incluyendo pararrayos, cablegrafía, y aterrizado a tierra física.
- Asegurar al equipo contra personas ajenas y no autorizadas a la torre.
- Tener componentes nivelados, claramente marcados para evitar peligros de colisión.
- Ser a prueba de corrosión de efectos ambientales, incluyendo los encontrados en ambientes marinos.
- Mantener protegido el sitio en contra de ganado u otros animales rasantes.

### 2.3.5.3 Protecciones en las Torres

Debido a que las torres son el soporte principal de los instrumentos de medición y que están alturas considerables, se deben tener protegidas ante descargas atmosféricas por ser estructuras metálicas. Las descargas pueden ingresar a los sistemas y dañar a los equipos si la torre no está a tierra, como bien sabemos la corriente fluye a través de caminos que oponen menos resistencia a su paso, siendo las más sensibles prácticamente todas.

Los dispositivos de protección para este tipo de efectos que se podrían utilizar son los pararrayos, así como la colocación de tierras en cada uno de los equipos, tal y como se muestra en la figura 2.15 y que la instalación eléctrica sea la adecuada, al igual que el

dimensionamiento de calibres de los conductores, además que toda la instalación este apegada a la norma oficial mexicana (NOM) que aplican en este tipo de instalación.



**Figura 2.15 Sistema de Tierra de punto sencillo. Fuente: WIND RESOURCE ASSESSMENT HANDBOOK. NREL 1997.**

#### 2.3.5.4 Soportes para Sensores

Son estructuras donde se montan los instrumentos de medición. Su función principal es la de separar al sensor de la torre, aislándolo de los efectos del viento que se ejercen sobre las torres. La orientación de los soportes está determinada por la forma de la torre y por la dirección dominante del viento. En las torres tubulares es con un ángulo de  $45^\circ$  y en las torres triangulares el ángulo es de  $90^\circ$  respecto a la dirección dominante del viento.

#### 2.4 Tratamiento de Datos

Es el procedimiento de eliminación y validación de los datos. En esta parte los datos recolectados de las estaciones anemométricas son evaluados para saber si son de calidad. Este procedimiento a seguir es vital en una evaluación del recurso eólico, ya que reduce el margen de error, por lo que al capturar y analizar los datos el filtro por el que pasen debe ser riguroso, ya que podría haber alguna variación en los sensores que afecte la veracidad de la información.

##### 2.4.1 Validación de Datos

La validación de los datos puede realizarse manual o automáticamente basado en un software de procesamiento de datos, proporcionado por los vendedores de registradores de datos. Sin embargo, existen también formas de poderlo hacer con programas básicos como Microsoft Excel, Quatro Pro, entre otros.

Esencialmente existen dos formas para la validación de datos: filtrado de datos y la verificación de datos.

El filtrado de datos parte de una serie de rutinas de validación o algoritmos para ocultar todos los datos para los valores sospechosos (dudosos y erróneos). Un valor sospechoso merece dudar mas sobre el, pero no es necesariamente erróneo. Por ejemplo, una velocidad del viento extraordinariamente alta y de cada hora causada por una tormenta localmente severa, puede aparecer en un día ventoso común diferente. Este procedimiento genera un reporte mostrando los rangos de datos sospechosos y las rutinas utilizadas para discriminar los datos erróneos.

La validación de los datos debe ser realizada por una persona calificada en el área de meteorología, el objetivo primordial de la validación de datos es detectar errores de todas las causas posibles como por ejemplo: daños o falta de sensores, desconexiones, cables rotos, errores en el registrador de datos, descargas estáticas, entre otras. La serie de datos validada contiene los datos adecuados para realizar los cálculos de energía. Siempre es recomendable conservar los datos originales para cotejar alguna información.

***CAPITULO III: RECOLECCIÓN DE DATOS EN EL  
ESTADO DE QUINTANA ROO***

## ***CAPITULO III: RECOLECCIÓN DE DATOS EN EL ESTADO DE QUINTANA ROO***

### **3.1 Objetivo de la Recolección**

El objetivo de la recolección de datos del recurso eólico del estado de Quintana Roo es obtener información de primera fuente sobre el recurso eólico existente en la zona costera del estado y ser evaluada para saber si existe o no suficiente recurso eólico para ser aprovechado.

La estimación de velocidad de viento en un sitio es determinante en la evaluación del recurso eólico. La campaña de medición eólica realizada en el estado de Quintana Roo fue apoyada por el proyecto del Laboratorio de Energías Renovables del Sureste (LENERSE) y la División de Ciencias e Ingenierías (DCI) de la Universidad de Quintana Roo (UQROO), a continuación se describen los trabajos realizados en esta campaña.

### **3.2 Delimitación del Área**

El estado de Quintana Roo (Fig. 3.1), se localiza en el sureste de México, sus coordenadas son: [al norte 21°37', al sur 17°53' de latitud norte; al este 86°42', al oeste 89°20' de longitud oeste, tiene una extensión territorial de 42 361Km<sup>2</sup>, por ello ocupa el lugar 19 en México, representa el 2.2% de la superficie del país y el cuarto lugar en litorales con el 7.46% del total nacional. Quintana Roo colinda al norte con Yucatán y con el Golfo de México; al este con el Mar Caribe; al sur con la Bahía de Chetumal y Belice; al oeste con Campeche y Yucatán [INEGI]. Dentro de este espacio se localizan las estaciones anemométricas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Comisión de Energía (CENER) y dos estaciones más por parte de la UQROO en el campus Chetumal y Cozumel.

Las estaciones anemométricas se encuentran ubicadas en las ciudades y poblaciones cerca de la zona costera y otras en la zona centro del estado como se muestra en la figura 3.1 estas estaciones son parte del SMN, CENER y de la UQROO.



*Figura 3.1 Ubicación Geográfica del Estado de Quintana Roo y Estaciones Anemométricas.*

### 3.3 Selección del Equipo

Debido a las necesidades requeridas para la evaluación del recurso eólico, en este trabajo la mayoría de equipos utilizados son de la marca NRG para la estación de la Universidad de Quintana Roo y de la marca DAVIS para la estación de Isla Mujeres de la CENER, esto se debe a que estas marcas cuentan con instrumentos de medición certificados, la cual, los vuelve más confiables para este tipo de mediciones.

#### 3.3.1 Sensores

Los tipos de anemómetros son de la marca NRG #40C (Fig.3.2), son utilizados en su mayoría para este tipo de medición en todo el mundo, cuenta con un certificado de calibración hecho por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de los Estados Unidos Americanos. De acuerdo con lo que dice su fabricante, las velocidades máximas registradas por este instrumento son de 96 [m/s]. Debido al momento de inercia bajo y a sus rodamientos le permiten una rápida respuesta a las ráfagas. La señal de salida es lineal lo que permite usarse en varios registradores de datos.

La componen cuatro polos magnéticos inducen una señal sinusoidal de tensión eléctrica dentro de una bobina que produce una señal de salida cuya frecuencia es proporcional a la velocidad del viento.



*Figura 3.2 Anemómetro NRG #40C. Fuente: NRG, System.*

El tipo de veleta con el que cuenta el equipo es NRG #200P (Fig. 3.3). Los componentes del acero inoxidable y el termoplástico la hacen resistente a la corrosión y contribuyen a altos esfuerzos por el peso, tiene un potenciómetro de precisión de plástico conductivo que varía respecto a la posición del cuerpo principal. Una señal analógica de tensión eléctrica es directamente proporcional a la dirección del viento cuando una señal de excitación de corriente directa es aplicada al potenciómetro.



*Figura 3.3 Veleta NRG #200P. Fuente: NRG, System.*

El sensor de temperatura NRG Systems # 110S (Fig. 3.4), cuenta con un protector en contra de la radiación formado de 6 platos UV, utiliza un circuito integrado que entrega una señal de tensión eléctrica lineal y proporcional a la temperatura en las terminales de salida.



*Figura 3.4 Sensor de Temperatura. Fuente: NRG, System.*

### 3.3.2 Registrador de Datos

El registrador de datos Symphonie NRG Logger (Fig. 3.5), cuenta con características técnicas necesarias para la recolección de datos de los sensores a intervalos adecuados, cuenta con doce canales de adquisición de datos, seis canales soportan señales de salida de los sensores en frecuencia y otros seis con salida analógica. Cada canal registra 4 campos, media, desviación estándar, máxima y mínima, estos a su vez tienen asociado un campo más, de fecha y hora. Todos los campos anteriores forman un registro cada diez minutos.

Las medidas en tiempo real son visualizadas en la pantalla integrada en el registrador para facilitar las visitas al sitio. El suministro de energía de este registrador se realiza mediante pilas alcalinas.



*Figura 3.5 Registrador de datos Symphonie NRG Logger. Fuente: NRG, System.*

### 3.3.3 Comunicación

Para el caso de comunicación existen conexiones de comunicación remota como por ejemplo el módulo NRG Symphonie iPack (Fig. 3.6), este módulo GSM realiza su conexión mediante una red celular para acceder a internet, los datos son enviados a través de un archivo adjunto a una cuenta de correo electrónico, además, cuenta con una batería recargable que es cargada mediante una fotocelda.



*Figura 3.6 Sistema de comunicación GPRS con alimentación. Fuente: NRG, System.*

Por otra parte se pueden extraer los datos de manera manual mediante una tarjeta de memoria que viene incluida con el data logger y procesarlos en una computadora central y su software correspondiente.

### 3.3.4 Torre

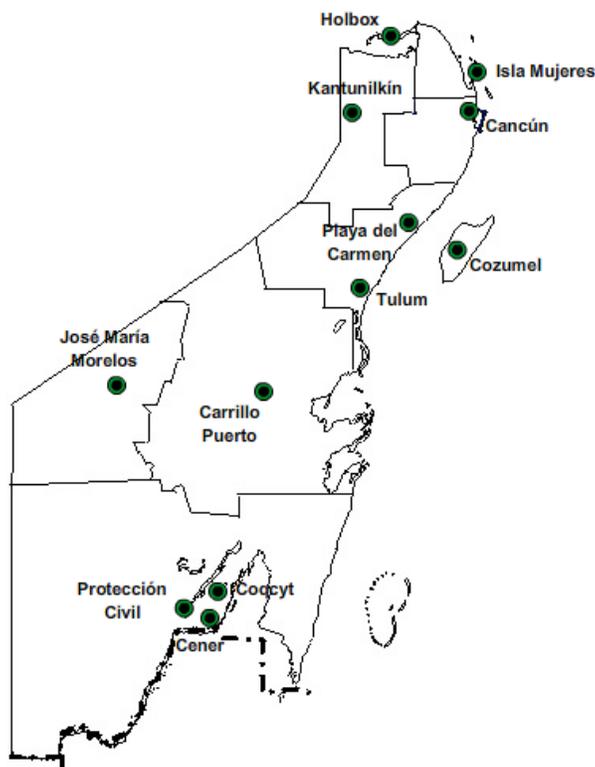
Existen dos tipos de torres: tubulares y tipo celosía, cada una con características definidas y tipos de instalación. Las que hoy en día son más utilizadas son las de la marca NRG Tall Tower, las cuales, son torres meteorológicas altamente versátiles diseñadas específicamente para la medición del recurso eólico, apegada a las normas EIA-222-F.

## 3.4 Estaciones de Medición

### 3.4.1 CENER

Este tipo de estaciones se encuentran ubicadas en su mayoría en cabeceras municipales del estado, las cuales son mostradas en la Figura 3.7. Muchas de estas estaciones fueron omitidas por motivos de ubicación del micro sitio y además, los datos arrojados en estas estaciones son poco confiables debido a los obstáculos que representan las edificaciones.

Las estaciones cuentan con dos anemómetros, una veleta y un sensor de temperatura. Un anemómetro y la veleta están a la altura máxima de la torre a 30 m de altura, otro anemómetro está 10 m más abajo, el sensor de temperatura se encuentra a 3 m. Estos sensores están conectados mediante cables a un registrador de datos.



*Figura 3.7 Ubicación de estaciones anemométricas del CENER. Fuente CENER.*

### 3.4.2 Servicio Meteorológico Nacional (SMN)

El Servicio Meteorológico Nacional cuenta actualmente con una lista de 133 Estaciones Meteorológicas Automáticas - EMAs y 30 Estaciones Sinópticas Meteorológicas Automáticas - ESIMEs, administradas por la Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional – CGSMN, instaladas en la República Mexicana con Transmisión Vía Satélite.

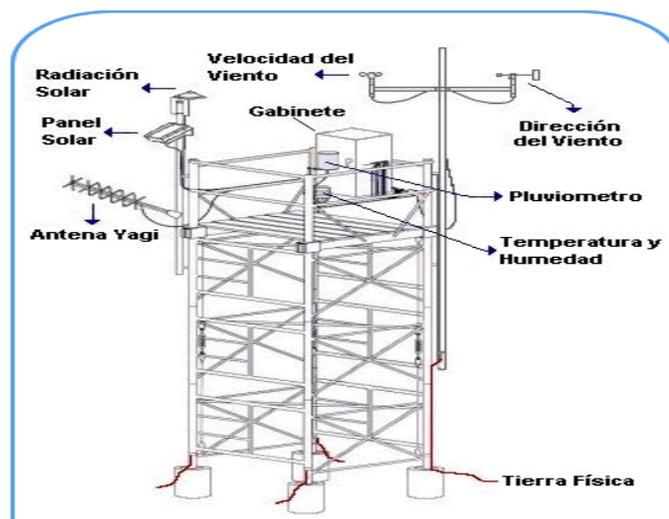
Una Estación Meteorológica Automática, es un conjunto de dispositivos eléctricos y mecánicos que realizan mediciones de las variables meteorológicas de forma automática (sobre todo en forma numérica), conformada por un grupo de sensores que registran y transmiten información meteorológica de forma automática de los sitios donde están estratégicamente colocadas. Su función principal es la recopilación y monitoreo de algunas Variables Meteorológicas para generar archivos del promedio de cada 10 minutos de todas las variables, esta información es enviada vía satélite en intervalos de 1 ó 3 horas por estación. (*Referencia OMM 182.*)

El área representativa de las estaciones es de 5 km de radio aproximadamente, en terreno plano, excepto en terreno montañoso. (*Referencia OMM número 100 y 168.*)

Sensores que integran la Estación:

- Velocidad del viento
- Dirección del viento
- Presión atmosférica
- Temperatura y Humedad relativa
- Radiación solar
- Precipitación

Existen dos tipos de estructura donde van montadas las estaciones y son mostradas en las figuras 3.8 y 3.9



*Figura 3.8 Estructura tipo Andamio. Fuente SMN.*

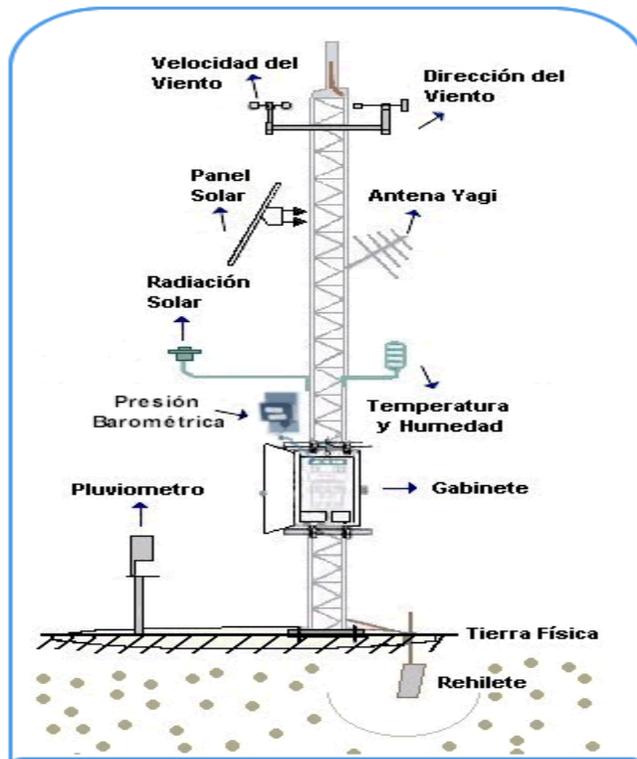


Figura 3.9 Estructura de tipo Torre Triangular. Fuente: SMN.

En la figura 3.10 se muestra con puntos rojos y área café claro la ubicación de las estaciones dentro del estado de Quintana Roo y en la tabla 3.1 se muestra el listado de las estaciones que cuenta el SMN en el estado de Quintana Roo, cabe mencionar que las que se encuentran funcionando en el estado son las estaciones meteorológicas automatizadas.

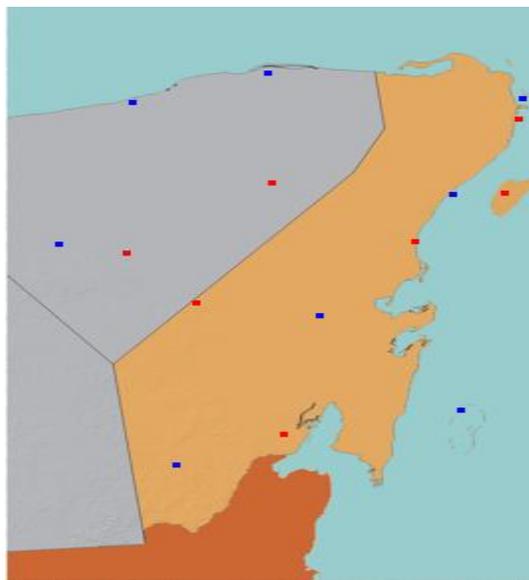


Figura 3.10. Ubicación de estaciones del SMN en el estado de Quintana Roo. Fuente: SMN.

**Tabla 3.1** Listado de Estaciones Meteorológicas Automáticas - EMAs - instaladas en el estado de Quintana Roo con Transmisión Vía Satélite. Fuente: <http://smn.cna.gob.mx/emas/>

ESTADO	NOMBRE	Latitud	Longitud	Altitud	Inicio de Datos
QUINTANA ROO	CANCÚN	21°04'30"	86°46'33"	4	27/04/2000
QUINTANA ROO	CHETUMAL	18°30'02"	88°19'40"	14	25/04/2000
QUINTANA ROO	SIAN KA'AN	20°07'40"	87°27'56"	8	03/05/2000
QUINTANA ROO	COZUMEL	20°28'37"	86°54'25"	5	12/12/2002
QUINTANA ROO	NICOLAS BRAVO	18°27'19"	88°55'26"	104	02/05/2008
QUINTANA ROO	JOSE MARIA MORELOS	19°45'08"	88°42'13"	56	02/04/2008

### 3.4.3 Universidad de Quintana Roo – Campus Chetumal

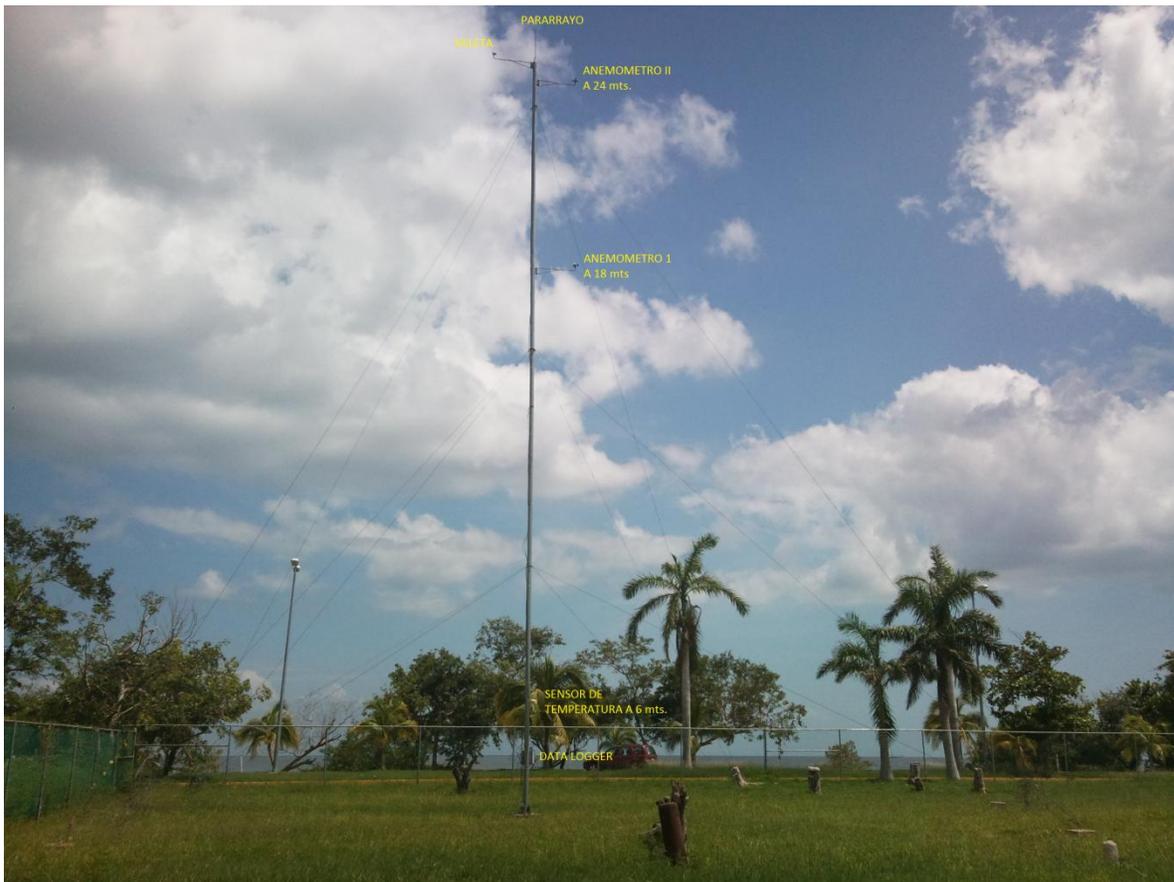
La Universidad de Quintana Roo campus Chetumal (Fig. 3.11), cuenta con una estación anemométrica tipo torre tubular, con dos anemómetros a alturas considerables, un sensor de temperatura y un data logger como se muestran en las figuras 3.12 y 3.13, todos de la marca mencionada anteriormente NRG System. La estación está muy cercana a la costa lo que hace que esté libre de obstáculos e interferencias y por lo tanto hace tener datos más verídicos y confiables.



**Figura 3.11** Ubicación de la Estación Anemométrica de la Universidad de Quintana Roo. Fuente: Google Earth.



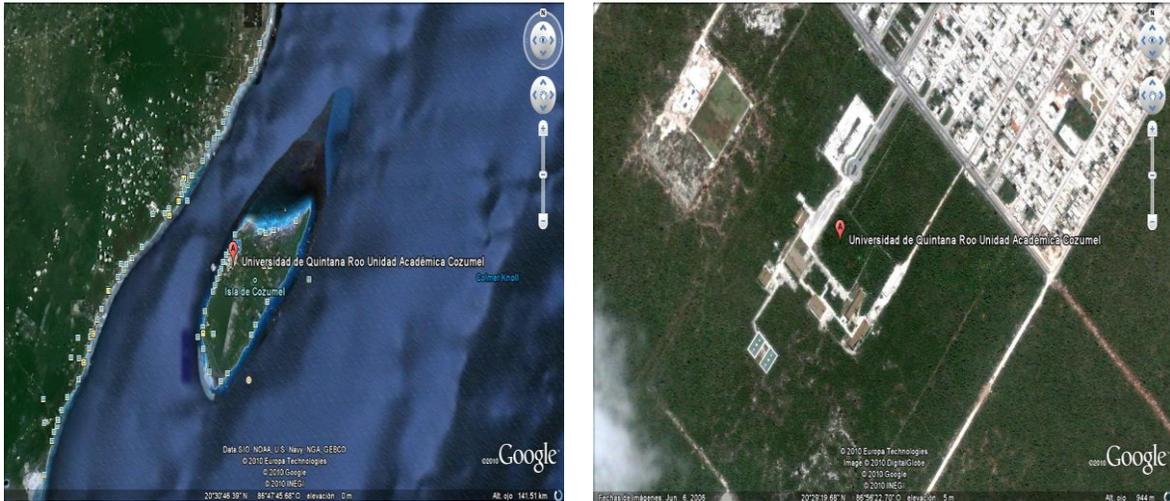
*Figura 3.12 Estación Anemométrica de la UQRoo.*



*Figura 3.13. Composición de la Estación Anemométrica de la UQRoo – Campus Chetumal.*

### 3.4.4 Universidad de Quintana Roo – Campus Cozumel

En la figura 3.14 se muestra la ubicación de la Universidad de Quintana Roo campus Cozumel que también cuenta con una estación anemométrica tipo torre tubular como se muestra en la figura 3.15, con los mismas especificación que las del campus Chetumal.



**Figura 3.14 Ubicación de la Estación Anemométrica de la UQRoo – Campus Cozumel. Fuente: Google Earth.**

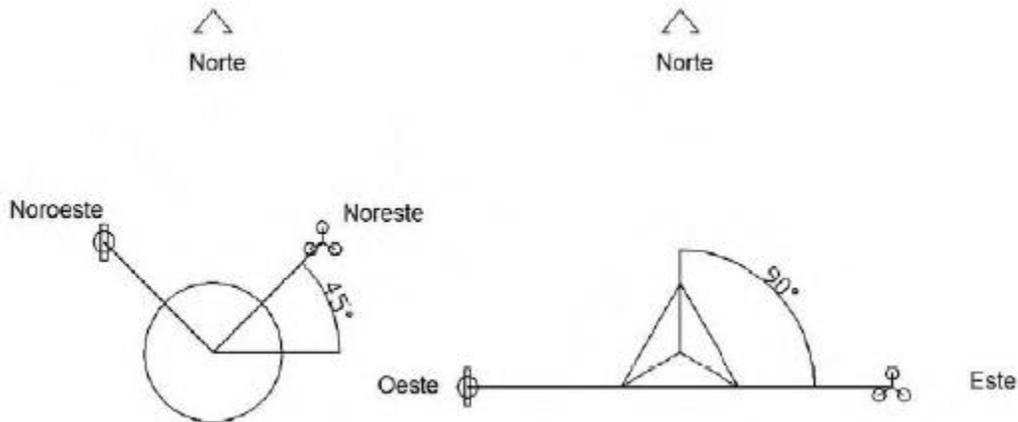


**Figura 3.15 Estación Anemométrica de la UQRoo – Campus Cozumel.**

### 3.5 Instalaciones de las estaciones de medición

#### 3.5.1 Orientación de los sensores.

Para determinar la orientación a la que deben ir dirigidos los sensores fue necesario conocer la dirección dominante del viento. Conociendo esta dirección, la orientación de los brazos queda determinada por el tipo de torre. En las estaciones de torre tubular los sensores se orientan a  $45^\circ$  respecto al norte magnético y para torres de Celosía triangular los brazos tienen que instalarse a  $90^\circ$  del norte, en la figura 3.16 se muestran estas configuraciones.



*Figura 3.16 Configuración de Orientación de los Sensores.*

#### 3.5.2 Calibración

Los equipos utilizados de la marca NRG y la mayoría de las demás se adquirieron calibrados por el fabricante. La prueba de calibración consiste en proporcionar un par de fuerzas al eje del anemómetro equivalente a una velocidad conocida, y compararla con las medidas reales de anemómetro. Es muy importante que los instrumentos de medición sean calibrados por lo menos una vez al año para garantizar la veracidad de su lectura dada y reducir el margen de error. Una de las normas a la que se apega la calibración de anemómetros es la norma Británica BS-1042

### 3.6 Monitoreo en Estaciones

La colecta de datos contempla la revisión periódica de datos con la finalidad de garantizar datos confiables. Para el caso de las estaciones de la Universidad de Quintana Roo campus Chetumal y Cozumel, la colecta de datos se realizó manualmente durante un periodo de un año, aunque se tiene un historial que abarca desde el año 2008 hasta la fecha con frecuencia diaria e intervalos cada 10 min. En la tabla 3.2 se muestra los datos crudos de los diferentes canales que registran las velocidades máximas y mínimas, velocidad promedio, dirección del viento y temperatura. En la tabla 3.3 se muestran los datos procesados manualmente en una hoja de cálculo de Excel después de bajarse del data logger.

**Tabla 3.2 Datos de Instrumentos de Medición y Datos Crudos.**

Averages	21/05/2010 13:00:00	21/05/2010 13:10:00	21/05/2010 13:20:00	21/05/2010 13:30:00	21/05/2010 13:40:00	21/05/2010 13:50:00	21/05/2010 14:00:00	21/05/2010 14:10:00	21/05/2010 14:20:00	21/05/2010 14:30:00
NRG #40 Anem. m/s	3.3	3.9	4.2	4.1	4.4	4.7	5.0	4.7	4.3	3.7
NRG #40 Anem. m/s	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
NRG #40 Anem. m/s	2.8	3.4	3.6	3.7	4.4	4.5	4.9	4.7	4.3	3.6
No SCM Installed										
No SCM Installed										
No SCM Installed										
#200P Wind Vane	56	52	56	61	73	69	77	83	83	90
#200P Wind Vane	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NRG #110S Temp C	33.7	34.5	34.7	34.2	33.6	33.7	33.7	35.0	35.5	35.6

**Tabla 3.3 Ejemplo de Monitoreo de Estaciones de la UQRoo campus Chetumal y Cozumel con Datos Procesados.**

Date & Time Stamp	CH1Avg	CH1SD	CH1Max	CH1Min	CH2Avg	CH2SD	CH2Max	CH2Min	CH3Avg	CH3SD	CH3Max	CH3Min	CH9Avg	CH9SD	CH9Max	CH9Min
07/06/2005 00:00	2.2	0.9	5.7	0.4	0.4	0	0.4	0.4	0.4	0	0.4	0.4	30.5	0	30.5	30.5
07/06/2005 00:10	1.6	0.8	4.2	0.4	0.4	0	0.4	0.4	0.4	0	0.4	0.4	30.5	0	30.5	30.5
07/06/2005 00:20	2.1	0.9	4.6	0.4	0.4	0	0.4	0.4	0.4	0	0.4	0.4	30.5	0	30.5	30.5
07/06/2005 00:30	2.3	1	6.1	0.4	0.4	0	0.4	0.4	0.4	0	0.4	0.4	30.5	0	30.5	30.5
07/06/2005 00:40	3.7	0.9	6.8	1.5	0.4	0	0.4	0.4	0.4	0	0.4	0.4	30.5	0	30.5	30.5
07/06/2005 00:50	3	1	5.7	1.1	0.4	0	0.4	0.4	0.4	0	0.4	0.4	30.5	0	30.5	30.5
07/06/2005 01:00	2.3	0.8	4.6	0.7	0.4	0	0.4	0.4	0.4	0	0.4	0.4	30.5	0	30.5	30.5
07/06/2005 01:10	2.1	0.7	4.6	0.4	0.4	0	0.4	0.4	0.4	0	0.4	0.4	30.5	0	30.5	30.5
07/06/2005 01:20	2.4	1	6.1	0.4	0.4	0	0.4	0.4	0.4	0	0.4	0.4	30.5	0	30.5	30.2
07/06/2005 01:30	3.6	0.8	6.1	1.1	0.4	0	0.4	0.4	0.4	0	0.4	0.4	30.5	0	30.5	30.2
07/06/2005 01:40	3.2	0.8	6.8	1.5	0.4	0	0.4	0.4	0.4	0	0.4	0.4	30.5	0	30.5	30.2
07/06/2005 01:50	3.2	1	7.2	1.1	0.4	0	0.4	0.4	0.4	0	0.4	0.4	30.5	0	30.5	30.2
07/06/2005 02:00	2.2	1	5.7	0.4	0.4	0	0.4	0.4	0.4	0	0.4	0.4	30.5	0	30.5	30.2
07/06/2005 02:10	1.9	0.8	4.9	0.4	0.4	0	0.4	0.4	0.4	0	0.4	0.4	30.5	0	30.5	30.2
07/06/2005 02:20	1.2	0.7	3.8	0.4	0.4	0	0.4	0.4	0.4	0	0.4	0.4	30.5	0	30.5	30.2
07/06/2005 02:30	1.3	0.9	4.2	0.4	0.4	0	0.4	0.4	0.4	0	0.4	0.4	30.5	0	30.5	30.2
07/06/2005 02:40	1.5	0.9	4.2	0.4	0.4	0	0.4	0.4	0.4	0	0.4	0.4	30.5	0	30.5	30.2
07/06/2005 02:50	1.4	0.9	4.2	0.4	0.4	0	0.4	0.4	0.4	0	0.4	0.4	30.5	0	30.5	30.5
07/06/2005 03:00	1	0.7	3.8	0.4	0.4	0	0.4	0.4	0.4	0	0.4	0.4	30.5	0	30.5	30.5
07/06/2005 03:10	0.8	0.5	2.6	0.4	0.4	0	0.4	0.4	0.4	0	0.4	0.4	30.5	0	30.5	30.5
07/06/2005 03:20	1.1	0.6	3.4	0.4	0.4	0	0.4	0.4	0.4	0	0.4	0.4	30.5	0	30.5	30.2
07/06/2005 03:30	1.6	0.6	3.4	0.4	0.4	0	0.4	0.4	0.4	0	0.4	0.4	30.5	0	30.5	30.2
07/06/2005 03:40	1.9	0.7	4.2	0.4	0.4	0	0.4	0.4	0.4	0	0.4	0.4	30.5	0	30.5	30.2

Las estaciones del Servicio Meteorológico Nacional (Tabla 3.4) y el CENER Chetumal (Tabla 3.5), proporcionaron sus datos históricos medidos desde su creación e instalación de sus estaciones hasta el presente, dando la oportunidad de abarcar más área del estado de Quintana Roo. En este tipo de estación se miden mas parámetros como velocidad de viento máxima y mínima, velocidad promedio, dirección del viento, temperatura, radiación solar, humedad relativa, voltaje de batería y panel fotovoltaico.

**Tabla 3.4 Datos de la Estación Cancún.SMN**

Date	Time	Dir deg	WSMDir deg	WSK kph	WSMK kph	AvgTemp C	AvgRh %	AvgBP mbar	Rain mm	AvgSR W/m <sup>2</sup>	Batt V	SPanel V
2008 may 01	15:00	97	86	20.7	32.1	30.2	69	1013.9	0	763	13.7	14
2008 may 01	15:10	93	100	21.2	27.5	30.2	69	1013.9	0	776		
2008 may 01	15:20	96	100	21.4	28.7	30.4	68	1013.9	0	734		
2008 may 01	15:30	105	100	21.3	31.6	30.6	67	1013.9	0	853		
2008 may 01	15:40	94	94	20.8	31	30.7	67	1013.8	0	888		
2008 may 01	15:50	95	91	21.1	32.1	30.7	67	1013.7	0	922		
2008 may 01	16:00	100	88	20.3	31.6	30.9	66	1013.6	0	907	13.7	14.1
2008 may 01	16:10	100	120	20.1	30.4	31	67	1013.6	0	952		
2008 may 01	16:20	105	97	21.5	29.2	31.1	66	1013.5	0	953		
2008 may 01	16:30	102	99	22.2	32.1	30.9	67	1013.4	0	979		
2008 may 01	16:40	103	91	20.1	26.9	31	67	1013.3	0	917		
2008 may 01	16:50	106	85	20.3	33.9	31.1	67	1013.3	0	1005		
2008 may 01	17:00	107	114	20.5	29.2	31.5	66	1013.1	0	903	13.7	14
2008 may 01	17:10	112	99	20.4	33.3	31.2	67	1013	0	931		
2008 may 01	17:20	108	100	20.4	28.7	31.1	67	1012.9	0	972		
2008 may 01	17:30	113	113	20.5	31	31.3	66	1012.7	0	883		
2008 may 01	17:40	113	117	21.9	31.6	30.8	67	1012.6	0	971		
2008 may 01	17:50	109	114	22.8	30.4	30.8	68	1012.5	0	989		
2008 may 01	18:00	111	113	19.3	31.6	31	68	1012.3	0	1043	13.8	14.1

**Tabla 3.5 Datos de la Estación Cancún. CENER**

BASE DE DATOS DE LA ESTACIÓN METEOROLOGICA DE CANCUN															
FECHA_HORA	RECORD	Vel_Viento 1)	Direccion_V iento(2)	Vel_Viento 3)	Vel_Viento _Max	Temperatura Max	Temperatur a_Min	Temperatur a_Promedio	Hum_Relati va_Prom	Vel_viento_ Prom.	Rad_Solar_ Prom	Eto_Total	P_Rocio_Pr om	Wind_Chill Prom	Heat_Index _Avg
TS	RN	Km/h	°	Km/h	Km/h	°C	°C	°C	%	m/s	W/m2	mm	°C	°C	°C
		WVc	WVc	WVc	Max	Max	Min	Avg	Avg	Avg	Avg	ETo	Avg	Avg	Avg
26/02/2010 18:00	0	5.614951	84.56158	42.77479	11.17351	23.26108	22.96051	23.06973	39.75853	1.559833	2.166148	0.00483649	9.263735	23.06973	23.06973
26/02/2010 18:10	1	4.692944	96.14284	50.90417	10.62275	23.18024	22.95923	23.03381	45.30894	1.303699	0.2238504	0.00883705	10.58297	23.03381	23.03381
26/02/2010 18:20	2	6.349802	102.441	41.85484	15.85493	23.24805	22.97025	23.05125	46.18821	1.763975	0.0651201	0.01074427	10.8876	23.05125	23.05125
26/02/2010 18:30	3	4.367081	105.743	41.61206	13.92729	23.34213	22.89575	23.02003	46.71127	1.213175	0.05087509	0.00815531	11.02872	23.02003	23.02003
26/02/2010 18:40	4	5.390567	99.1591	39.86745	10.62275	23.20956	22.93396	23.04705	46.62335	1.497499	0.07936513	0.00952276	11.02486	23.04705	23.04705
26/02/2010 18:50	5	4.367081	102.9472	44.87059	12.82577	23.33691	22.90414	23.04826	46.69555	1.213175	0.1210827	0.00816794	11.04916	23.04826	23.04826
26/02/2010 19:00	6	4.197264	97.58886	42.36393	10.89813	23.38666	22.91129	23.02447	46.34924	1.166	0.1088727	0.00797479	10.91552	23.02447	23.02447
26/02/2010 19:10	7	2.783658	105.9389	43.42681	7.318214	23.10013	22.83105	22.95847	47.17635	0.7733001	0.05189259	0.00568088	11.12165	22.95847	22.95847
26/02/2010 19:20	8	3.641919	95.57559	33.03526	10.89813	22.99878	22.78195	22.88879	47.79978	1.011725	0.07122514	0.006893714	11.25609	22.88879	22.88879
26/02/2010 19:30	9	4.546077	104.0283	42.51921	13.10115	23.14633	22.85498	22.9545	47.62045	1.2629	0.1180302	0.00824633	11.25947	22.9545	22.9545
26/02/2010 19:40	10	3.967783	104.8814	50.7265	10.34737	23.0098	22.84268	22.9238	47.42602	1.10225	0.05291008	0.00746684	11.16976	22.9238	22.9238
26/02/2010 19:50	11	2.921347	83.6237	43.72238	9.245861	23.09949	22.83234	22.9391	47.82114	0.81155	0.06410263	0.00583347	11.309	22.9391	22.9391
26/02/2010 20:00	12	3.784198	96.84314	39.20389	9.521238	23.06631	22.83813	22.95754	47.82207	1.05125	0.03357755	0.00715333	11.32618	22.95754	22.95754
26/02/2010 20:10	13	3.352772	85.67439	36.55535	7.868971	23.35065	22.87567	23.00047	47.68517	0.9314002	0.1129427	0.00653984	11.32211	23.00047	23.00047
26/02/2010 20:20	14	4.197265	100.0248	42.45497	9.796616	23.21411	22.90414	23.02605	47.91428	1.166	0.07326011	0.00774187	11.4178	23.02605	23.02605
26/02/2010 20:30	15	3.862222	109.5404	43.70017	11.99964	23.25327	23.04163	23.10472	48.51957	1.072925	0.1098902	0.00720257	11.67941	23.10472	23.10472
26/02/2010 20:40	16	3.430797	85.61285	42.10859	9.796616	23.23108	22.98059	23.0976	48.89154	0.9530748	0.08547013	0.00652181	11.78877	23.0976	23.0976
26/02/2010 20:50	17	3.793377	105.1039	45.99648	9.521238	23.22064	22.97025	23.08723	49.61021	1.0538	0.09055763	0.00695007	12.00035	23.08723	23.08723
26/02/2010 21:00	18	3.591433	91.80231	34.24221	11.17351	23.19653	23.02866	23.10926	50.16273	0.9977	0.1180302	0.00659543	12.18906	23.10926	23.10926

En este capítulo se presento la forma en que se recolectaron los datos en las diferentes estaciones, para dar paso a la evaluación del recurso eólico.

## **Capítulo IV: Evaluación del Potencial Eólico del Estado de Quintana Roo**

## Capítulo IV: Evaluación del Potencial Eólico del Estado de Quintana Roo

En esta capítulo se presenta la forma de evaluar el potencial eólico del estado de Quintana Roo. Cabe señalar que normalmente, la información procedente de las estaciones meteorológicas no se consideran como confiables al 100%, debido a que normalmente se encuentran ubicadas a alturas en donde los obstáculos del terreno pueden influenciar las lecturas, pero en algunos casos pueden proporcionar información de referencia, útil para ciertos estudios, y en el presente trabajo, se han considerado algunas estaciones de este tipo, para tener mayor cantidad de información y con esto un análisis más completo.

De las estaciones instaladas en el estado de Quintana Roo y que se enlistan en la tabla 4.1, se han generado una base de datos con su historial de parámetros medidos a partir de la fecha indicada en la tabla.

*Tabla 4.1 Historial de Datos de Estaciones*

SITIO	LOCALIZACIÓN	ALTURA (MSNM)	INICIO DE DATOS
Holbox (CENER)	N 21° 31' 23.6" W 87° 22' 43.4"	8	27/02/2010
Isla Mujeres (CENER)	N 21° 15' 23.3" W 86° 44' 46.3"	19	26/02/2010
Cancún (CENER)	N 21° 09' 41.8" W 86° 49' 28.5"	23	26/02/2010
Playa del Carmen (CENER)	N 20° 37' 41.6" W 87° 04' 31.0"	22	24/02/2010
Cozumel (CENER)	N 20° 30' 10.9" W 86° 56' 24.5"	17	25/02/2010
Tulum (CENER)	N 20° 12' 40.8" W 87° 27' 46.9"	18	24/02/2010
UQROO - Chetumal	N 18° 31' 22.48" W 88° 16' 13.22"	30	20/02/2006
Cancún (SMN)	N 21° 04' 30" W 86° 46' 33"	4	27/04/2000
Chetumal (SMN)	N 18° 30' 02" W 88° 19' 40"	14	25/04/2000
Sian Ka'an (SMN)	N 20° 07' 40" W 87° 27' 56"	8	03/05/2000
Cozumel (SMN)	N 20° 28' 37" W 86° 54' 25"	5	12/12/2002
Nicolás Bravo (SMN)	N 18° 27' 19" W 88° 55' 26"	104	02/05/2008
José María Morelos (SMN)	N 19° 45' 08" W 88° 42' 13"	56	02/04/2008

## 4.1 Procesamiento de Datos

Para iniciar con el procesamiento de los datos procedentes de las estaciones, se tomaron los datos en función del periodo de tiempo del que se tiene registro. Se considero que algunas de las estaciones no cuentan con las condiciones adecuadas para que sus mediciones sean confiables, por ello se han descartado de este análisis.

Finalmente, se han seleccionado únicamente las mostradas en la tabla 4.2, por considerarse las más confiables.

*Tabla 4.2 Estaciones Utilizadas.*

SITIO	LOCALIZACIÓN	ALTURA (MSNM)	PERIODO DE MEDICION
Isla Mujeres (CENER)	N 21° 15' 23.3" W 86° 44' 46.3"	19	01/03/2010 - 06/07/2010
Cancún (SMN)	N 21° 04' 30" W 86° 46' 33"	4	01/01/2009 - 31/08/2009
Universidad de Quintana Roo	N 18° 31' 22.48" W 88° 16' 13.22"	24	01/01/2009 - 31/12/2009

En el análisis de datos que se presenta a continuación, se ha ejemplificado, con la consideración de una estación anemométrica, una estación de la CENER y otra del SMN, también con intención de comparar la calidad de información proporcionada por cada una.

La estación anemométrica seleccionada, consta de sensores de velocidad, dirección y temperatura, y que se ha instalado a 24 m de altura en la ciudad de Chetumal.

Las estaciones meteorológicas por otra parte, cuentan con sensores que permiten registrar valores promedio cada 10 minutos de diversos parámetros climatológicos, y están instaladas a alturas comprendidas entre los 8 y 35 m, y se ubican en Cancún e Isla Mujeres.

## 4.2. Fundamentos del Recurso Eólico

Una vez identificadas las estaciones que se van a tomar en cuenta para este trabajo, el siguiente paso es realizar el análisis correspondiente para estimar el potencial de energía eólica disponible para ser aprovechado en el estado.

Todas las ecuaciones utilizadas para evaluar el recurso eólico fueron tomadas del capítulo 1. Así, para estimar la energía disponible se utilizo la ecuación (5) tomando en cuenta que la velocidad del viento es el parámetro más importante en el incremento de la energía asociada con el viento.

De igual forma, se calculo la densidad del aire conforme a la ecuación (6), ya que afecta a la cantidad de energía asociada al viento aunque en menor proporción.

Las estimaciones del potencial de energía eólica, se realizaron por meses, por lo que se utilizo la ecuación (7) en la cual se utilizan valores promedio de la velocidad del viento.

Para calcular la desviación estándar de las mediciones se utilizo la ecuación (2) y se estimo la variación de la velocidad del viento con la altura con la ecuación (8).

Finalmente, el viento por ser un recurso variable, se analiza en base a la función estadística de la distribución de Weibull, para lo cual se empleo la ecuación (11), con la que se obtiene la distribución de frecuencias, misma que permite predecir su comportamiento, y en donde el factor de forma (k) y el factor de escala se determinaron por las ecuaciones (12) y (13) respectivamente.

### **4.3 Análisis y Resultados**

Con el objeto de mostrar y ejemplificar el procesamiento de datos que se realiza para estimar el potencial de energía eólica disponible, se presenta el análisis realizado para la estación de la UQRoo – Chetumal, la de Isla Mujeres y adicionalmente en el anexo 1 se presenta el caso de Cancún.

El primer paso consiste en obtener las graficas correspondientes a los patrones de velocidad, diario, semanal, mensual y anual.

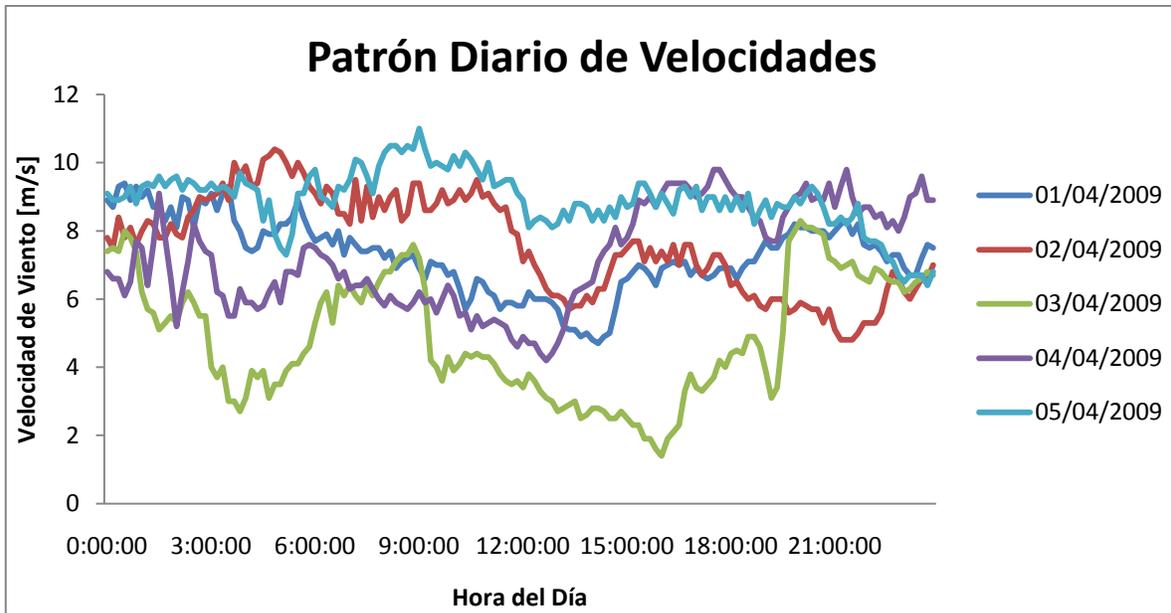
El patrón diario permite conocer el comportamiento del viento a lo largo del día y con esto identificar la información de los microclimas en el comportamiento del viento en diferentes horarios

#### **4.3.1 Estación Anemométrica de la Universidad de Quintana Roo – Campus Chetumal**

##### **4.3.1.1 Patrón de Velocidades**

En la figura 4.1, se ejemplifican los patrones diarios para cinco días, que corresponden al mes de abril del año 2009, en Chetumal, Quintan Roo.

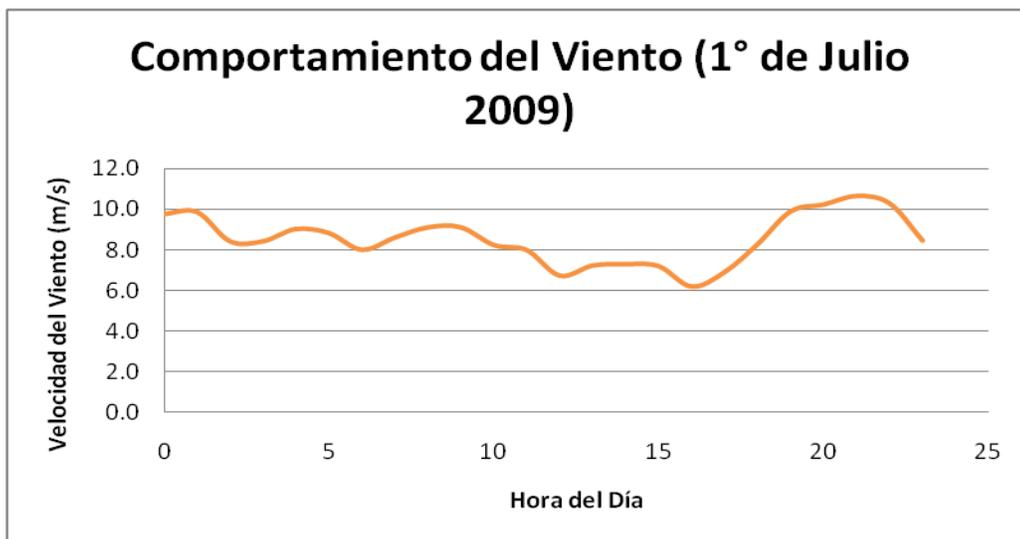
A grandes rasgos se puede observar que el comportamiento del viento presenta caídas en la velocidad del viento en los horarios de las 00:00 a 1:00 a.m. así como entre las 2:00 y 4:00 p.m.



**Figura 4.1. Comportamiento Diario de Velocidades del Viento. Estación UQRoo.**

La grafica anterior, se puede complementar con otras graficas de promedios horarios, para visualizar mejor el comportamiento horario del viento, esto es ilustrado en la figuras 4.2 y 4.3.

En las gráficas mencionadas anteriormente, se puede observar el patrón de comportamiento diario del viento. En la grafica de la figura 4.1 para el día primero del mes de julio del año 2009, se puede observar en este patrón un comportamiento atípico del viento, ya que generalmente en la mayoría del tiempo se esperan velocidades más bajas entre 6 y 7 m/s y para este día se mantienen velocidades altas de 8 a 10 m/s en el transcurso del día, con una caída en la velocidad de 6 m/s en un horario de 11-17 hrs.



**Figura 4.2 Comportamiento Diario del Viento en Horas Promedio para el 1 de Julio del 2009.**

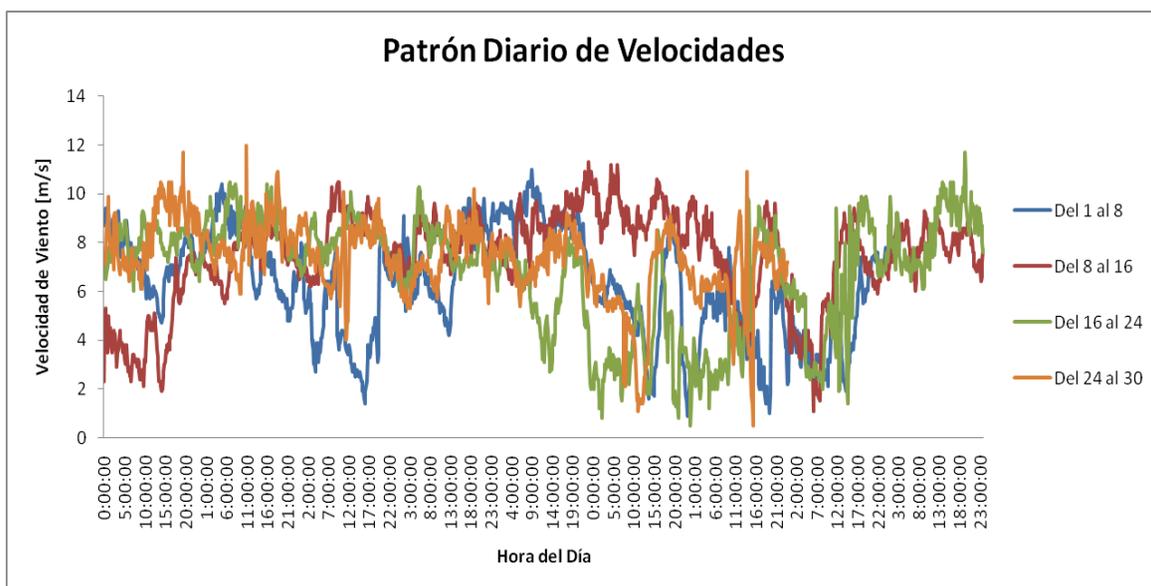
En la figura 4.3 se presenta un comportamiento típico para el día del mes de marzo alcanzando velocidades de hasta 9 m/s de 0-1 hrs y una caída en su velocidad de 6-8 m/s de 16 a 20 hrs



*Figura 4.3 Comportamiento Diario del Viento en Horas Promedio para el 30 de Marzo del 2009.*

El patrón mensual del viento, permite observar las oscilaciones en la velocidad del viento, debido a fenómenos estacionales.

En la figura 4.4 se ilustra el comportamiento mensual del viento para la estación de Chetumal. Así como se presenta dicha grafica, es difícil interpretar el comportamiento del viento, sin embargo sirve para ilustrar la alta variabilidad que este recurso presenta a lo largo del periodo de tiempo seleccionado.



*Figura 4.4 Comportamiento Mensual. Estación UQRoo, Abril del 2009.*

Ahora bien, para tener una mejor idea del comportamiento del viento, se prefiere trabajar con los patrones anuales de velocidad del viento, tal y como se observa en la figura 4.5. En donde se puede observar que los meses con mayor intensidad del viento son abril, mayo, junio y julio con velocidades de 6-7 m/s y los meses con menor intensidad noviembre y diciembre. Aunque cabe hacer mención que estos son valores promedio, se observa que los valores del viento para esta estación en el año 2009 hay mucha variabilidad de las velocidades en los meses de los meses de noviembre – febrero.

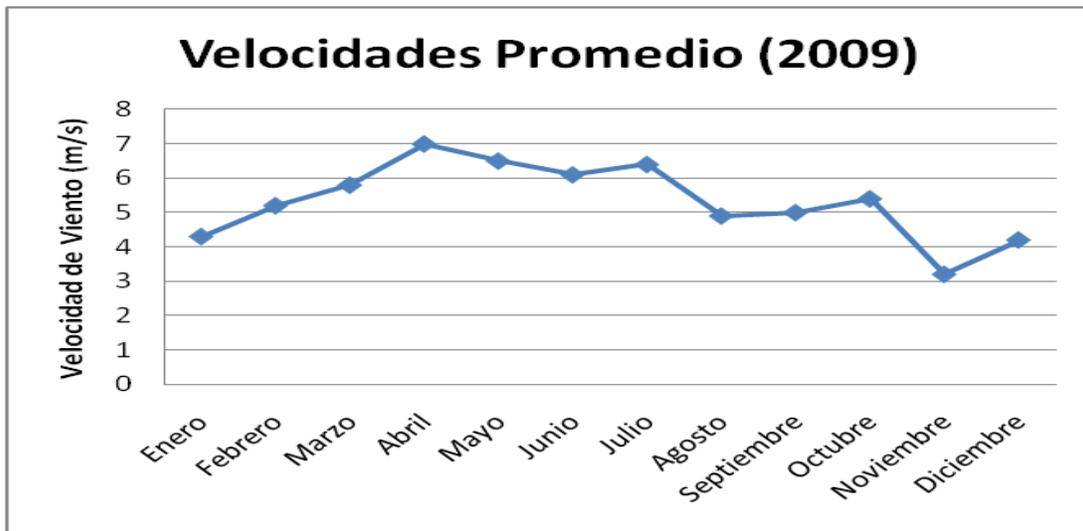


Figura 4.5 Velocidades Promedio. Estación UQRoo para el año 2009.

#### 4.3.1.2 Rosa de los Vientos

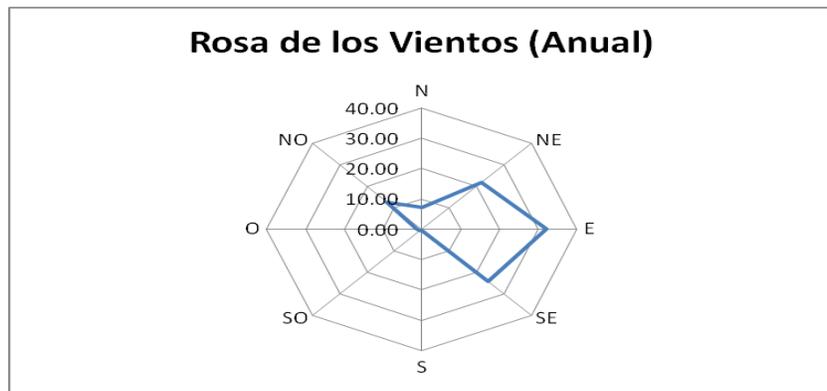
El siguiente paso es construir la grafica denominada rosa de los vientos, en donde se pueden identificar a los vientos dominantes que prevalecen en el sitio y ubicar la dirección de donde provienen, esto sirve para que en futuras instalaciones de equipos con energía eólica, se tome como referencia la dirección correcta a la que deben ser orientados.

En la figura 4.6 se presenta el caso de la rosa de los vientos para los meses de enero y febrero en la estación de Chetumal, en estas graficas se presenta que los vientos dominantes para este periodo de tiempo surgen del Noreste, esto se debe a que estos meses se encuentran en el periodo de los fenómenos estacionales llamados Nortes.



**Figura 4.6 Rosa de los Vientos. Estación UQRoo (2009)**

Por otra parte, para tener una perspectiva más amplia de la procedencia de los vientos dominantes durante todo el año se presenta la rosa de los vientos anual ilustrada en la figura 4.7, en donde se observa que los vientos dominantes durante todo el año se encuentran en la dirección Este, seguidos del NE y SE. Los vientos dependiendo de la estación del año cambian de intensidad y dirección. Así existen temporadas de vientos muy fuertes que son debidos a fenómenos tales como los nortes que se presentan durante los meses de diciembre a febrero, y los que se asocian a las perturbaciones tropicales como la temporada de huracanes que comprende los meses de julio a noviembre.

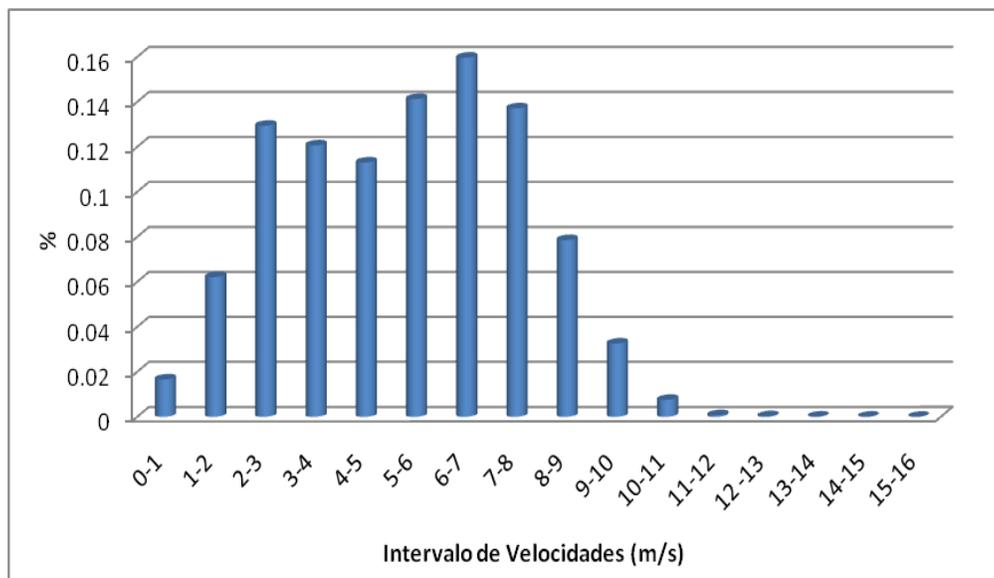


**Figura 4.7 Rosa de los Vientos (Anual). Estación UQRoo (2009).**

#### 4.3.1.3 Análisis de Frecuencia

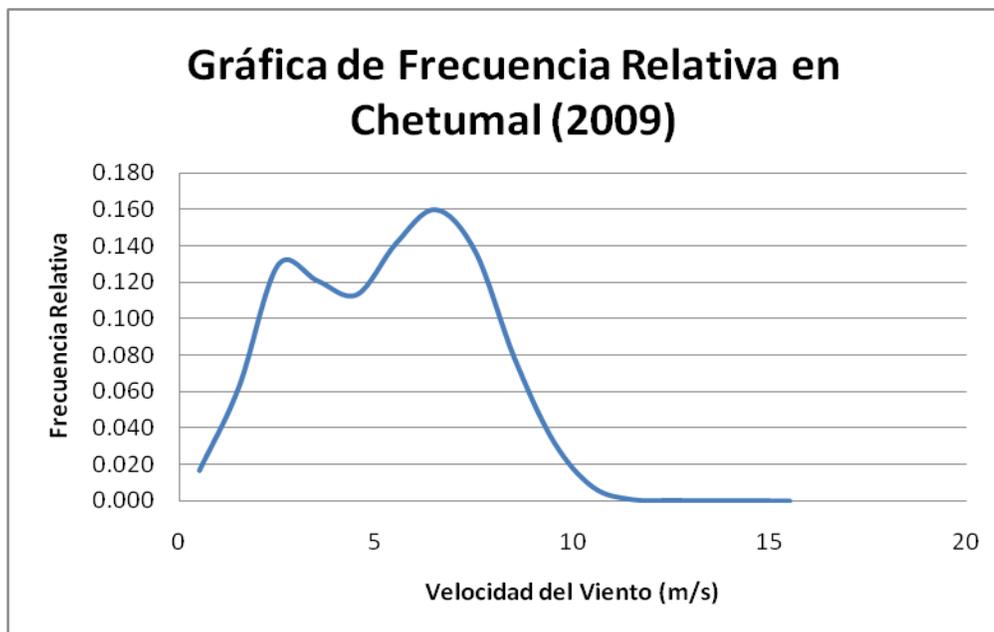
Después de haber construido las graficas del comportamiento e identificar la dirección de los vientos dominantes, el siguiente paso del análisis del potencial de energía eólica disponible, consiste en construir la grafica de distribución de frecuencias de velocidades. La cual permite identificar los rangos en los que se concentra con mayor frecuencia de tiempo la velocidad del viento.

En la figura 4.8, se ilustra el caso de la estación Chetumal en donde, se puede observar que la mayor parte del tiempo la velocidad del viento a 24 m de altura esta en un rango entre los 2 a 8 m/s.



**Figura 4.8 Intervalo de Frecuencia. Estación UQRoo para el año 2009.**

Por otra parte, en la figura 4.9, se ilustra la grafica del comportamiento de la frecuencia relativa para el caso de la estación de Chetumal, se puede observar que el comportamiento es similar al de la figura 4.7 en donde, la mayor parte de la frecuencia relativa se encuentran velocidades del viento en un rango entre los 2 a 8 m/s.



**Figura 4.9 Frecuencia Relativa. Estación UQRoo para el año 2009.**

#### 4.3.1.4 Función de Distribución de Weibull.

Una vez concluida la construcción de la grafica de distribución de frecuencias, se procede al análisis de la distribución de frecuencias en función de la distribución de Weibull.

Primero se calcula el factor de forma (k) y el factor de escala (c) utilizando las ecuaciones (12) y (13) respectivamente y dadas previamente en el capítulo 1.

Segundo, con estos valores calculados que pueden ser para periodos de tiempo mensual o anual, se calcula la función de distribución de Weibull.

En la tabla 4.3 se ilustra el caso de la estación Chetumal para el periodo 01/01/2009 - 31/12/2009. En dicha tabla se observa la función de distribución de Weibull real y la función de distribución de Weibull teórica, en la cual, no se obtienen los resultados esperados por no ajustarse la función teórica a la real. Para lograr un mejor ajuste, se recalcula la distribución de Weibull usando un intervalo más pequeño a fin de considerar mayor cantidad de datos, y en la tabla 4.4, se muestran los nuevos valores obtenidos y como puede observarse se tiene un mejor ajuste ya que la suma de distribución de Weibull es cercana a uno.

**Tabla 4.3 Resultados de Función de Distribución de Weibull.**

INTERVALO	Punto Medio	Frecuencia en horas	Frecuencia Relativa (Real)	Weibull (Teórica)	Frecuencia Weibull
0-1	0.5	146	0.017	0.064	558
1-2	1.5	544	0.062	0.086	752
2-3	2.5	1134	0.129	0.086	757
3-4	3.5	1057	0.121	0.080	697
4-5	4.5	990	0.113	0.070	616
5-6	5.5	1238	0.141	0.061	530
6-7	6.5	1399	0.160	0.051	449
7-8	7.5	1201	0.137	0.043	375
8-9	8.5	688	0.079	0.036	311
9-10	9.5	285	0.033	0.029	256
10-11	10.5	66	0.008	0.024	210
11-12	11.5	7	0.001	0.020	171
12 -13	12.5	3	0.000	0.016	139
13-14	13.5	1	0.000	0.013	112
14-15	14.5	1	0.000	0.010	91
15-16	15.5	0	0.000	0.008	73
	Total =	8759	1.000	0.70	6098

**Tabla 4.4 Nuevos Resultados de la Función de Distribución de Weibull.**

Punto Medio	Weibull	Frecuencia Weibull
0.35	0.05	397
1.05	0.07	634
1.75	0.08	713
2.45	0.08	721
3.15	0.08	694
3.85	0.07	647
4.55	0.07	592
5.25	0.06	533
5.95	0.05	476
6.65	0.05	420
7.35	0.04	369
8.05	0.04	323
8.75	0.03	280
9.45	0.03	243
10.15	0.02	210
10.85	0.02	181
11.55	0.02	155
12.25	0.02	133
12.95	0.01	114
13.65	0.01	97
14.35	0.01	83
15.05	0.01	70
15.75	0.01	60
16.45	0.01	51
	0.94	8195

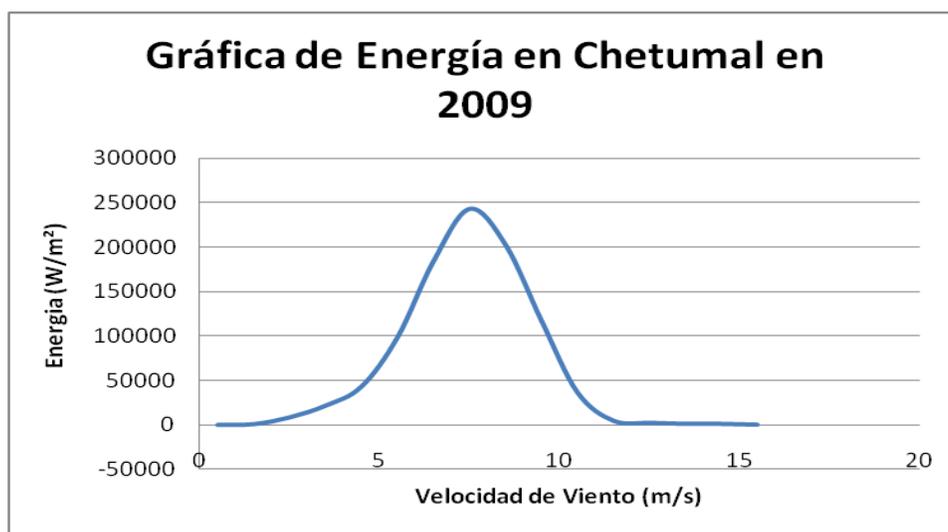
### 4.3.1.5 Energía Disponible

Finalmente, se calcula la cantidad de energía disponible, en donde para la estación de Chetumal se ha construido la tabla 4.5. De acuerdo con esta tabla, se estima que la energía disponible para ser aprovechada en todo el año es alrededor de 937.521 KW/m<sup>2</sup>.

**Tabla 4.5 Cantidad de Energía Disponible en Chetumal**

INTERVALO	Potencia [W]	Energía [W/m <sup>2</sup> ]
0-1	0.1	8.75911458
1-2	1.6	882.738563
2-3	7.5	8510.10547
3-4	20.6	21775.7194
4-5	43.8	43362.3021
5-6	79.9	98929.6945
6-7	132.0	184564.294
7-8	202.7	243489.621
8-9	295.1	203118.261
9-10	412.0	117548.399
10-11	556.2	36711.7616
11-12	730.8	4750.07284
12-13	938.5	2346.19141
13-14	1182.2	1182.21019
14-15	1464.9	1220.72026
15-16	1789.3	298.220323
	Total =	937521.749

En la figura 4.10, se observa que la mayor captación de energía se encuentran en velocidades de 5-10 m/s durante todo el año.



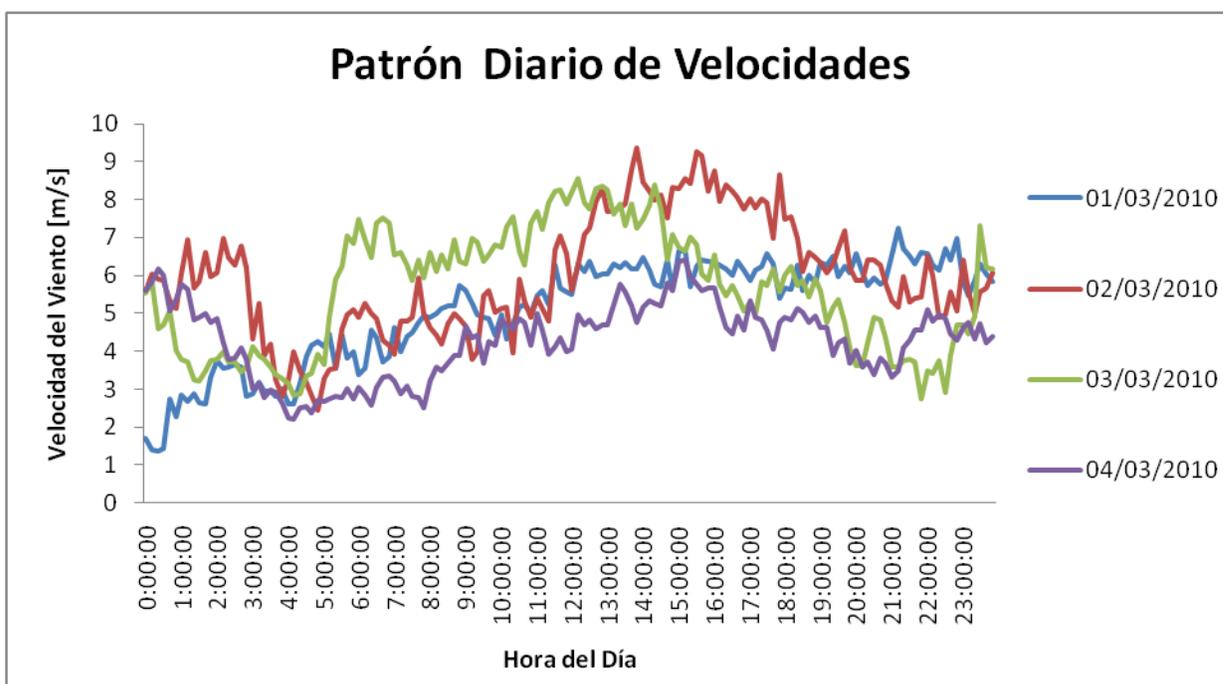
**Figura 4.10 Energía Disponible en Chetumal.**

### 4.3.2 Estación Climatológica de Isla Mujeres

Para el caso de la estación de Isla Mujeres, se han realizado los mismos cálculos y estimaciones del recurso.

#### 4.3.2.1 Patrón de Velocidades

En la figura 4.11 se ilustra el comportamiento de la velocidad del viento de tres días del mes de marzo. Las velocidades que más predominan durante este mes oscilan entre 4 y 9 m/s. El horario donde se presenta la menor intensidad de viento es de 2 a 4 a.m y las horas de mayor intensidad son de 11 a.m. 7 p.m.



*Figura 4.11 Patrón Diario de Velocidades para el mes de Abril (2010). Estación Isla Mujeres*

La grafica anterior, se puede complementar con las graficas 4.11 y 4.12, para visualizar mejor el comportamiento horario del viento.

En estas gráficas se puede observar el comportamiento diario del viento en diferentes meses, se puede observar de manera clara que el comportamiento del viento cambia drásticamente. En la figura 4.12 se presenta un comportamiento típico del viento con algunos picos, donde en la mayoría del tiempo se mantienen velocidades alrededor de 4 a 6 m/s con una caída en la velocidad de 3.5 m/s en un horario de 5 a.m. a 2 p.m. e incrementando su velocidad después de las 3 p.m. Cabe mencionar que este mes todavía se encuentra en el periodo de los nortes.

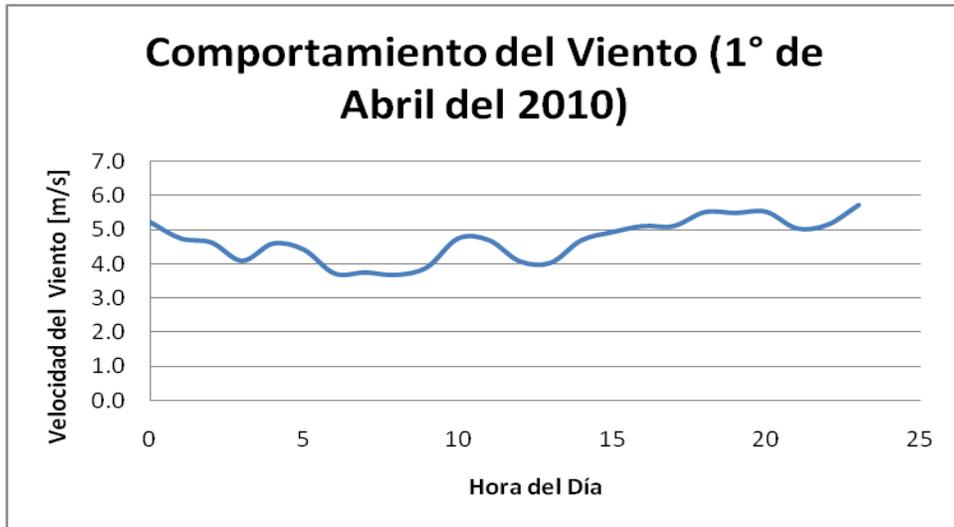


Figura 4.12 Comportamiento Diario del Viento en Horas Promedio para el 1° de Abril del 2010.

Todo lo contrario se presenta en la figura 4.13, el comportamiento para este día alcanza velocidades de 8 m/s a las 5 hrs y una caída en su velocidad de hasta 4 m/s de 16 a 20 hrs.

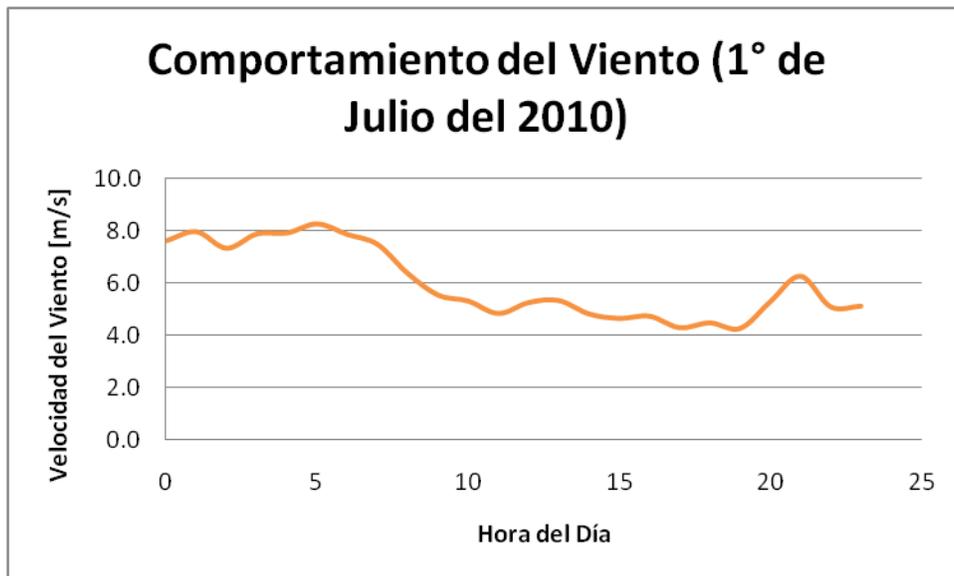
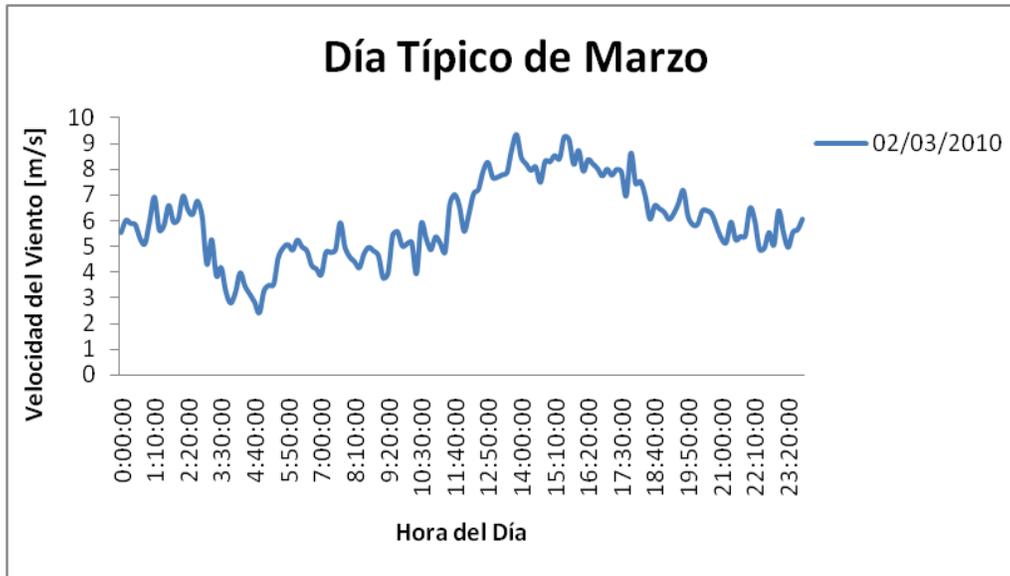


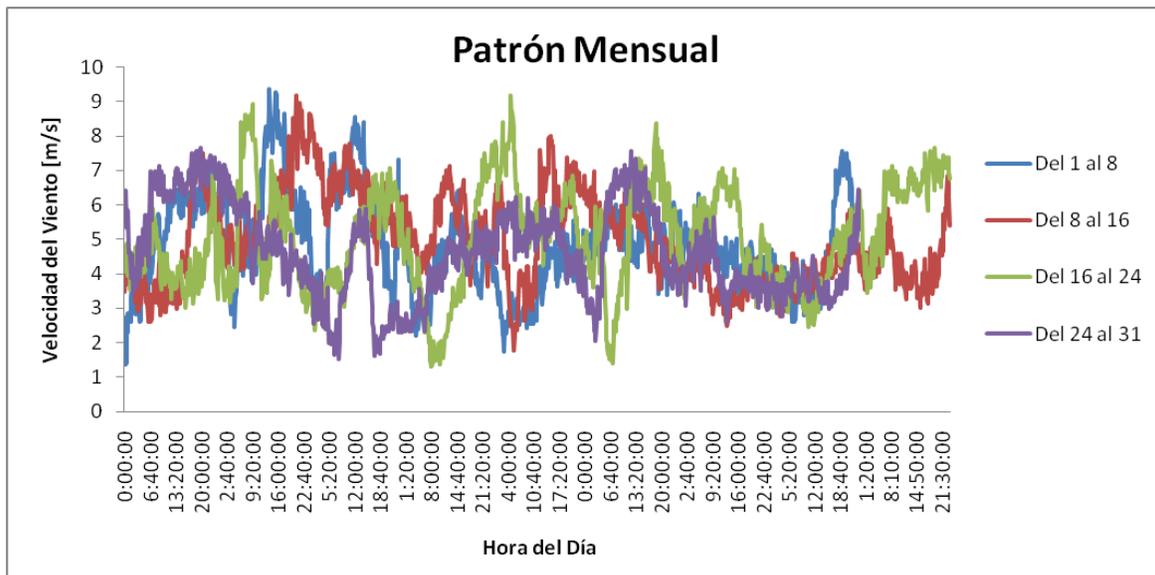
Figura 4.13 Comportamiento Diario del Viento para el 1° de Julio del 2009.

En la figura 4.14 se presenta un día típico correspondiente al mes de marzo, como se puede observar, entre las 00:00 y las 2:00 horas se mantiene una velocidad de entre 5 y 7 m/s y comienza a descender hacia las 2:20, alcanzando un rango de entre 3 y 6 m/s lo cual se mantiene hasta las 11:40 hrs, posteriormente entre las 12:00 y 19:00 hrs aumenta la velocidad de 6 hasta 9 m/s, para finalizar el día con una velocidad tendiendo a un valor entre 5 y 7 m/s, la cual se mantiene hasta las 0:00 hrs.



*Figura 4.14 Comportamiento típico del mes de marzo.*

En la figura 4.15 se muestra el patrón mensual de velocidades para la estación de Isla Mujeres, el comportamiento del recurso a lo largo de este periodo de tiempo permite observar las oscilaciones en la velocidad del viento, debido a fenómenos estacionales. Es difícil interpretar el comportamiento del viento. Sin embargo, sirve para ilustrar la alta variabilidad que este recurso presenta a lo largo del periodo de tiempo seleccionado.



*Figura 4.15 Comportamiento Mensual para el mes de Marzo.*

En la figura 4.16 se presenta el comportamiento anual del viento con velocidades promedio, se puede observar que los meses con mayor intensidad del viento son enero y febrero con velocidades de hasta 5 m/s y los meses con menor intensidad marzo y abril.

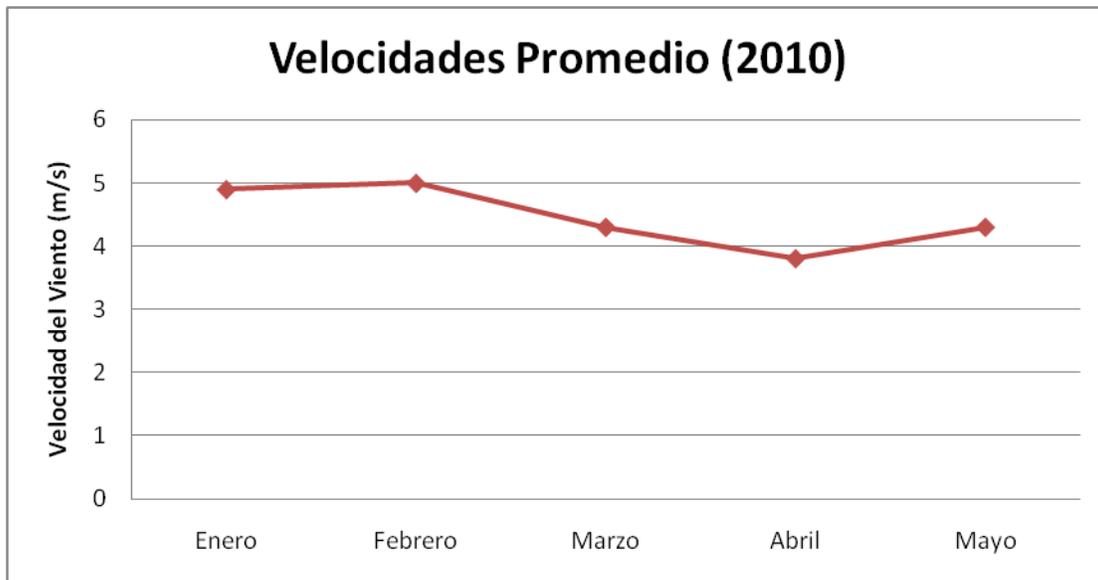


Figura 4.16 Comportamiento Anual para el año 2010.

#### 4.3.2.2 Rosa de los Vientos

En la figura 4.17 se presenta el caso de la rosa de los vientos para los meses de abril y julio en la estación de Isla Mujeres, en estas graficas se presenta que los vientos dominantes para este periodo de tiempo surgen del Sureste, esto se debe a que en la mayoría del tiempo están presentes los vientos alisios.

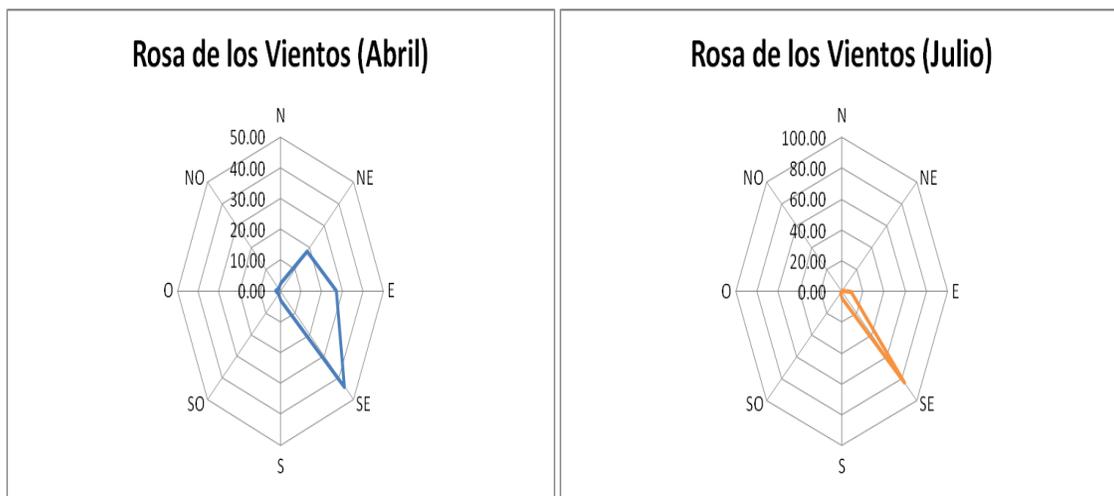
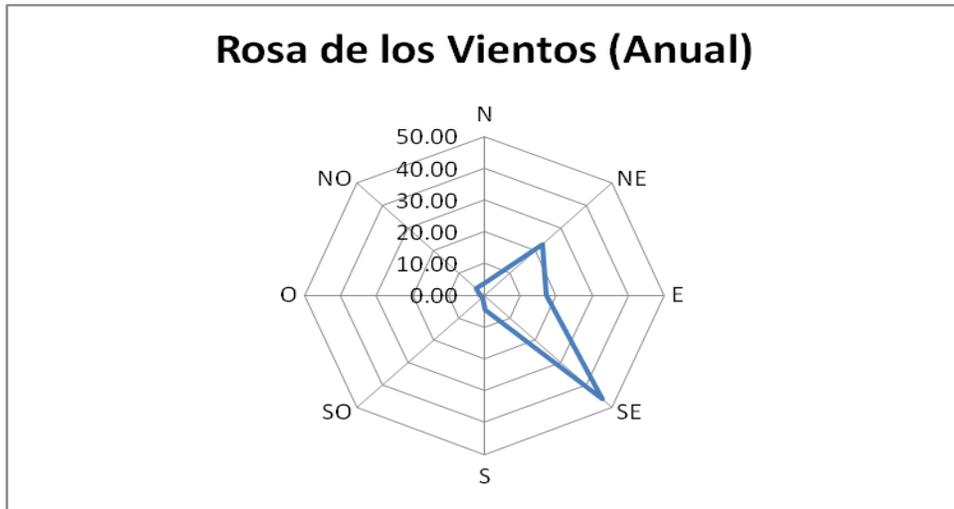


Figura 4.17 Rosa de los Vientos. Estación Isla Mujeres (2010).

Por otra parte, para tener una idea más amplia de la procedencia de los vientos dominantes a lo largo de año, se presenta la rosa de los vientos anual ilustrada en la figura 4.18, donde se observa que los vientos dominantes son procedentes de la dirección SE, aunque cabe hacer mención que de esta estación, todavía no se tienen datos de un año completo, por lo que se ha construido la grafica para el periodo de tiempo del cual se tienen datos.

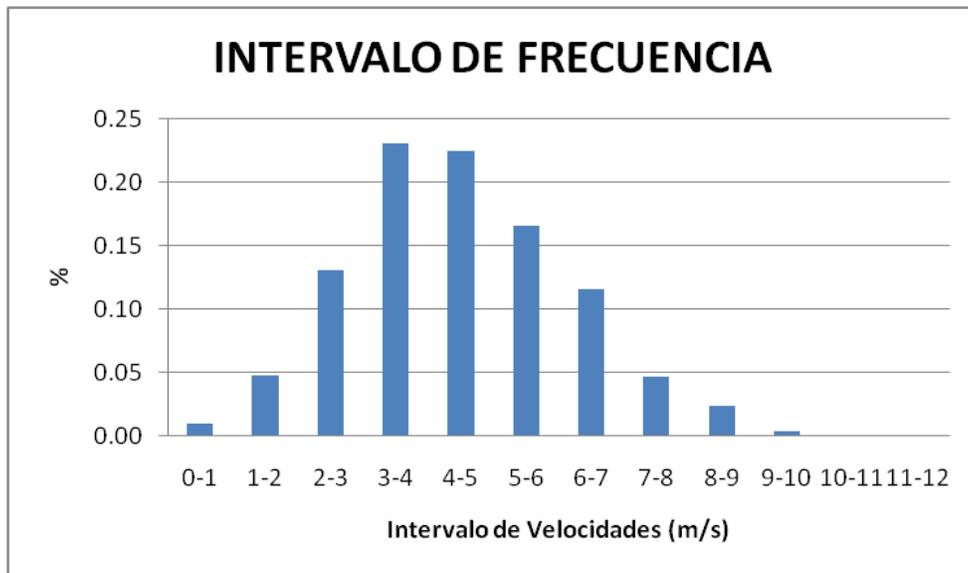


*Figura 4.18 Rosa de los Vientos Anual. Estación Isla Mujeres (2010).*

#### 4.3.2.3 Análisis de Frecuencia

Después de haber construido las graficas del comportamiento e identificar la dirección de los vientos dominantes para la estación de Isla Mujeres, el siguiente paso del análisis del potencial de energía eólica disponible, consiste en construir la grafica de distribución de frecuencias de velocidades.

En la figura 4.19, se puede observar que la mayor parte del tiempo la velocidad del viento a 19 m de altura esta en un rango entre los 2 y 8 m/s.



*Figura 4.19 Intervalo de Frecuencia Anual. Estación Isla Mujeres (2010).*

Por otra parte, en la figura 4.18, se ilustra la grafica del comportamiento de la frecuencia relativa para el caso de la estación de Isla Mujeres, se puede observar que el comportamiento es similar al de la figura 4.20 en donde, la mayor parte de la frecuencia relativa se encuentran velocidades del viento en un rango entre los 2 a 8 m/s.

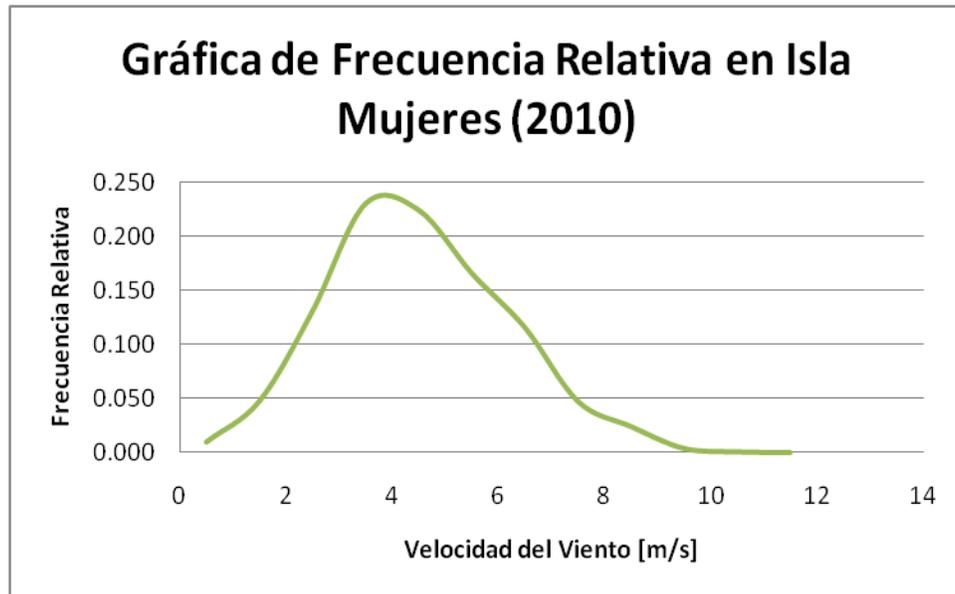


Figura 4.20 Intervalo de Frecuencia Relativa Anual. Estación Isla Mujeres (2010).

#### 4.3.2.4 Función de Distribución de Weibull

Una vez concluida la construcción de la grafica de distribución de frecuencias, se procede al análisis de la distribución en función de la distribución de Weibull, para la estación de Isla Mujeres.

Posteriormente, con los valores calculados de  $k$  y  $c$ , que pueden ser para periodos de tiempo mensual o anual, se calcula la función de distribución de Weibull.

En la tabla 4.6, para el caso de la estación de Isla Mujeres, el periodo comprendido es del 01/03/2010 al 06/07/2010. En la tabla se observan los valores de la función de distribución de Weibull real y la función de distribución de Weibull teórica. Como se puede apreciar, no se obtienen los resultados esperados por no ajustarse la función teórica a la real, sin embargo, al recalcular la función de distribución de Weibull con intervalos más pequeños y ajustando el valor de  $k$ , los resultados se aproximan a 1 como se muestra en la tabla 4.7.

**Tabla 4.6 Resultados de Función de Distribución de Weibull. Estación Isla Mujeres.**

INTERVALO	Punto Medio	Frecuencia en horas	Frecuencia Relativa	Weibull	Frecuencia Weibull
0-1	0.5	30	0.010	0.084	257
1-2	1.5	137	0.045	0.107	327
2-3	2.5	352	0.115	0.102	311
3-4	3.5	540	0.176	0.089	271
4-5	4.5	485	0.158	0.074	226
5-6	5.5	350	0.114	0.060	184
6-7	6.5	242	0.079	0.048	148
7-8	7.5	106	0.035	0.038	117
8-9	8.5	47	0.015	0.030	91
9-10	9.5	22	0.007	0.023	71
10-11	10.5	6	0.002	0.018	55
11-12	11.5	1	0.000	0.014	42
	Total =	2317	1	0.69	2101

**Tabla 4.7 Nuevos Resultados de la Función de Distribución de Weibull. Estación Isla Mujeres.**

Punto Medio	Weibull	Frecuencia Weibull
0.35	0.07	225
1.05	0.10	314
1.75	0.11	328
2.45	0.10	313
3.15	0.09	286
3.85	0.08	256
4.55	0.07	224
5.25	0.06	194
5.95	0.05	167
6.65	0.05	143
7.35	0.04	121
8.05	0.03	102
8.75	0.03	86
9.45	0.02	72
10.15	0.02	60
10.85	0.02	50
11.55	0.01	42
12.25	0.01	35
	0.99	3018

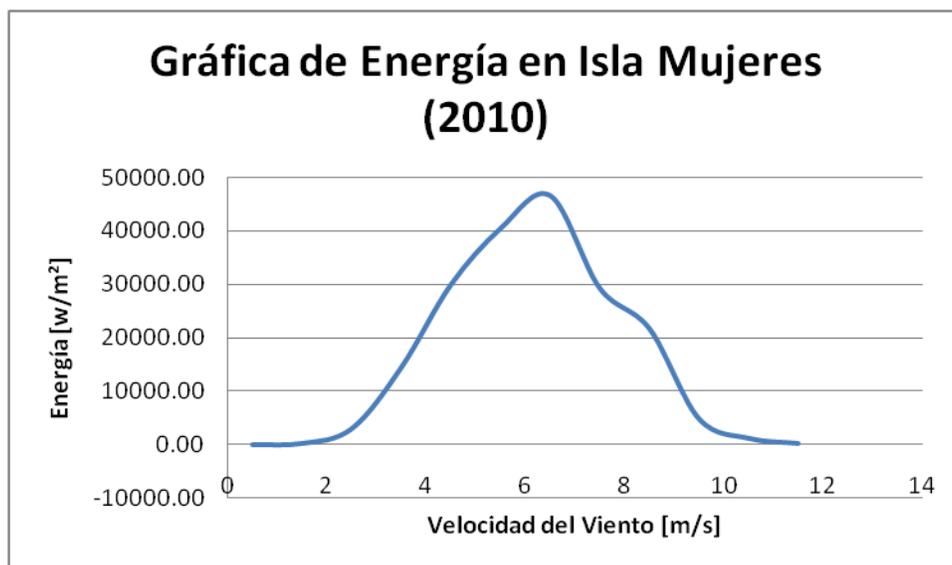
#### 4.3.2.5 Energía Disponible

Finalmente, se calcula la cantidad de energía disponible, en donde para la estación de Isla Mujeres se ha construido la tabla 4.8, de acuerdo con esta tabla se estima que la energía disponible por ser aprovechada en este periodo de tiempo es alrededor de 192.494 KW/m<sup>2</sup>.

**Tabla 4.8 Cantidad de Energía Disponible en Isla Mujeres**

INTERVALO	Potencia [W]	Energía [W/m <sup>2</sup> ]
0-1	0.1	1.80
1-2	1.6	236.50
2-3	7.5	3005.63
3-4	20.6	14499.98
4-5	43.8	30022.30
5-6	79.9	40544.52
6-7	132.0	46712.89
7-8	202.7	29359.30
8-9	295.1	21787.26
9-10	412.0	4874.96
10-11	556.2	1205.18
11-12	730.8	243.59
	Total =	192493.9

En la figura 4.21, se observa que la mayor captación de energía se encuentran en velocidades de 4-9 m/s durante todo el año.



**Figura 4.21 Energía Disponible en Isla Mujeres (2010).**

#### 4.4 Resumen de Estaciones

Para el resto de las estaciones se han calculado las velocidades promedio del viento para diferentes meses (Tabla 4.9), la cual da una idea general del potencial de aprovechamiento que existe en el estado. Aunque el análisis completo no se presenta en este trabajo.

**Tabla 4.9 Velocidades Promedio Mensuales para las Diferentes Estaciones.**

SITIO	VP Mar (m/s)	VP Abr (m/s)	VP May (m/s)	VP Jun (m/s)
Cancún	1.931	1.965	1.719	1.76
Cozumel	2.865	2.518	2.558	2.408
Holbox	3.522	1.03	0	0
Isla Mujeres	4.852	4.997	4.346	3.799
Playa del Carmen	2.9	2.938	3.114	2.778
Tulum	3.386	3.871	3.978	3.714
UQROO	5.032	6.247	6.613	6.605

## Capitulo V Conclusiones

Las estaciones de la Universidad de Quintana Roo, Isla Mujeres y Cancún fueron seleccionadas por una parte por tener las velocidades más altas con respecto a las demás estaciones y por los periodos de tiempo más significativos, se estima en base a los resultados obtenidos con este trabajo que en el estado de Quintana Roo hay suficiente recurso eólico por ser aprovechado, y que el estudio del mismo es muy importante para lograr proyectos exitosos. Se ha detectado que existe un potencial importante de aprovechamiento de la energía del viento en la zona costera del estado.

El recurso eólico presente en el estado podría ser una alternativa para mitigar la demanda energética de los usuarios, principalmente en la zona costera y en algunas otras partes del estado que aun no cuentan con energía eléctrica debido a la geografía u otros factores del lugar.

La explotación racional de los recursos locales en una región podrían ser utilizados para la sostenibilidad energética ya que hoy en día, ya no es suficiente la explotación de una sola fuente de energía, además de ser necesario concientizar a la gente de hacer el uso eficiente de la misma.

Por otra parte el uso de tecnologías nuevas ayudarían a frenar la producción de gases de efecto invernadero, principales factores del cambio climático, que son originados por el uso excesivo de combustibles fósiles y derivados.

En la parte ecológica y ambiental la instalación de tecnologías para aprovechar el recurso eólico como aerogeneradores o en su caso parques o granjas eólicas, presentan algunas desventajas por el espacio, zonas protegidas, perdida de flora y fauna, paisaje o simplemente como llegar al lugar de instalación por mencionar algunas.

Debido a que los resultados obtenidos en el cálculo de la función de distribución de Weibull no se ajustaron al 100% con los medidos, se recomienda realizar otro análisis ahora con la función de distribución de Rayleigh, la cual, también se ocupa para este tipo de trabajo y que puede resultar en un mejor ajuste entre los datos reales y los teóricos.

## Bibliografía

Agenda Andaluza de la Energía, Consejería de innovación, Ciencia y Empresa, Guía Técnica, Energía Eólica. Consultado en [www.agenciaandaluzadelaenergia.es](http://www.agenciaandaluzadelaenergia.es) el 18/01/2010.

A. Jaramillo O., M.A. Borja, Wind speed analysis in La Ventosa, Mexico: a bimodal probability distribution case.

A. Jaramillo O. and M. A. Borja Bimodal versus Weibull Wind Speed Distributions: an Analysis of Wind Energy Potential in La Venta, Mexico.

Artal Osvaldo, Almonacid Nathalie, Sepúlveda Andrés, Vórtices Atmosféricos En Islas Chilenas. Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Concepción.

B Maribo Pedersen, Danish Technical University, Denmark, Troels Friis Pedersen, Riso National Laboratory, Denmark, Helmut Klug, DEWI, Germany, Nico van der Borg, ECN, Netherlands Neil Kelley, NREL, USA, Jan Åke Dahlberg, FFA, Sweden, Wind Speed Measurement And Use Of Cup Anemometry, 1. Edition 1999.

Cripps Edward, M. Dunsmuir William T. Modelling the Variability of Sydney Harbour Wind Measurements.

Dennis L. Elliott, N. Schwartz Marc, Recent Wind Resource Characterization Activities at the National Renewable Energy Laboratory, NRELdCP-440-23095 UC Category: 1 210.

Fernández Díez Pedro, Departamento De Ingeniería Eléctrica Y Energética, Universidad De Cantabria, Energía Eólica.

Foussekis D., Mouzakis F., Papadopoulos P., Vionis P., Wind Profile Measurements using a LIDAR and a 100m Mast.

F. Manwell James and G. McGowan Jon, A. L. Rogers, *DNV - Global Energy Concepts, Washington, USA* Wind Energy Explained, Theory, Design and Application, Second Edition

Gary L. Johnson, Wind Energy Systems, Electronic Edition, Manhattan, KS.

Global Wind Energy Counce GWEC, Global Wind, 2008 Report.

González Ávila María Eugenia, Beltrán Morales Luis F., Troyo Diéguez Enrique y Ortega Rubio Alfredo. Potencial de Aprovechamiento de la Energía Eólica para la Generación de Energía Eléctrica en Zonas Rurales de México.

Hunt V. Daniel. "Diccionario de Energía". Tomo 7. Publicaciones Marcombo, S. A. México – Barcelona. 1984.

INEGI. Marco Geoestadístico Municipal, II Censo de Población y Vivienda 2005 (MGM-II Censo 2005).

J. Hernández Rodríguez, Curso Eólica Tec de Cancún , Tercera Parte

Joan Aymamí y José Vidal, Meteosim TrueWind SL, Nuevo atlas eólico de alta resolución del estado de Jalisco (México).

Juan Coronado, Situación de la Generación Eólica de Energía en el Perú.

Keevallik Sirje, Soomere Tarmo, Pärj Riina and Zukovac Veera. Outlook for wind measurement at Estonian automatic weather stations.

Krebs Henning, Steinbach Eik, Wilmers Walter. How to perform complete wind measurements. Consultado en [www.wilmers.com/download/complete-windmeasurements-ewec2006.pdf](http://www.wilmers.com/download/complete-windmeasurements-ewec2006.pdf) el 18/01/2010.

L. Archer Cristina and Z. Jacobson Mark. Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, Stanford, California, USA. Evaluation of global wind power.

Lansolar Magazine Energía Eólica. Consultado en [www.lansolar.com/paginas/revista/ENERGIA\\_EOLICA.pdf](http://www.lansolar.com/paginas/revista/ENERGIA_EOLICA.pdf) - España

Lecuona Neumann Antonio, LA ENERGÍA EÓLICA: Principios básicos y tecnología, Leganés, 2002.

M. D. Elliott, Schwartz, G. Scott, S. Haymes, D. Heimiller, R. George, Atlas de Recursos Eólicos del Estado de Oaxaca, NREL/TP-500-35575.

Mortensen Niels G., sen Jens, Badger Jake, H. Jørgensen Bo , B. Hasager Charlotte, S. Paulsen Uwe, F. Hansen Ole, Enevoldsen Karen. *Wind Energy Department, Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark*. Wind Atlas For Egypt: Measurements, Micro- And Mesoscale Modelling.

Movimiento Balanceado, consultado en [www.udec.cl/~jinzunza/fluidos/fluidos4.pdf](http://www.udec.cl/~jinzunza/fluidos/fluidos4.pdf) el 21/02/2011.

National Renewable Energy Laboratory, Wind Resource Assessment Handbook, Fundamentals for Conducting a Successful Monitoring Program, NREL Subcontract No. TAT-5-15283-01.

Rudnick Van De Wyngard Hugh, Energía Eólica, La Generación Eólica. Universidad Católica de Chile.

S. Rohatgi Janardan and Nelson Vaughn, *Wind Characteristics: An Analysis the Generation of Wind Power*. Alternative Energy Institute West Texas A&M University Canyon, Texas, USA, 1994.

Villanueva Miguel, *Energía Eólica*, CEAC, 2004

Wind Energy Institute of Canada, *Operational status* Fall 2008.

Wind Energy Development A Guide for Local Authorities in New York. *Global Energy Concepts*, 2002.

## **ANEXOS**

## ANEXO A. ESTIMACIÓN DEL RECURSO EÓLICO ESTACIÓN CANCÚN (SMN).

A continuación se presenta la estimación del recurso eólico para la estación meteorológica de Cancún para diferentes meses del año 2009:

### PATRON DE VELOCIDADES

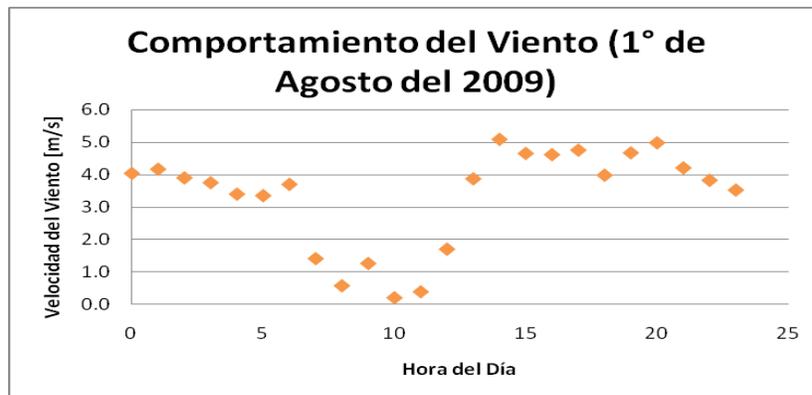
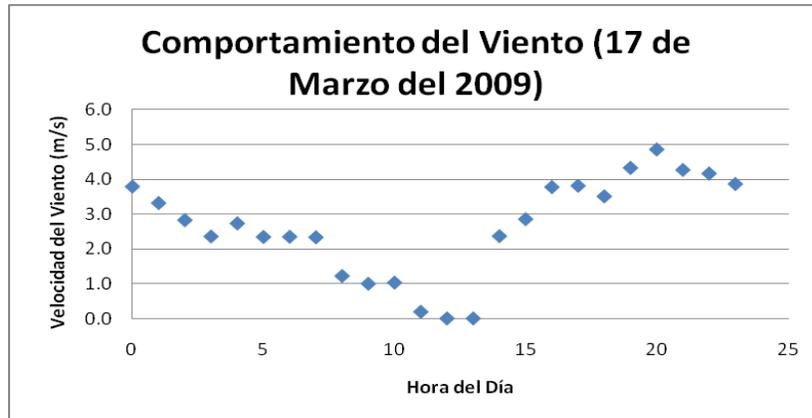
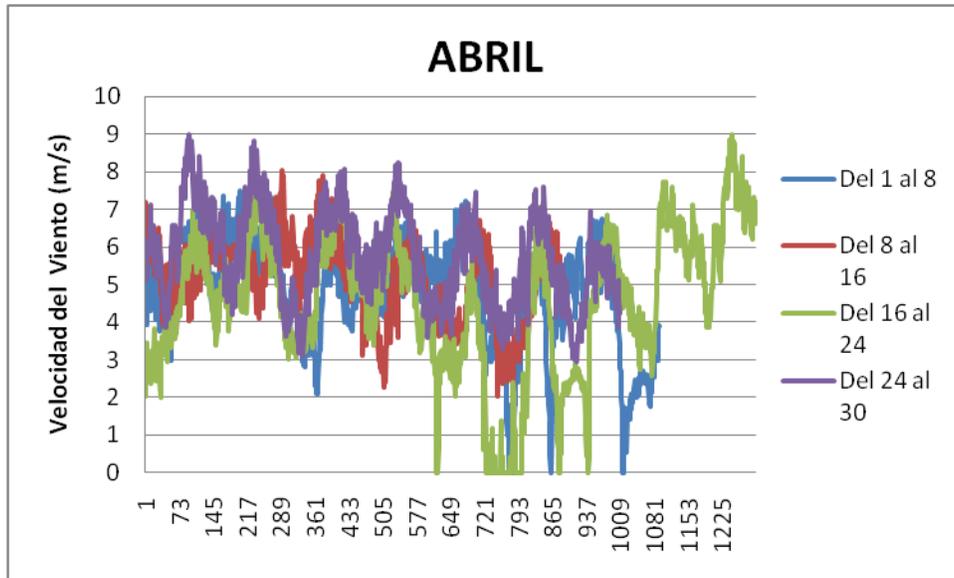
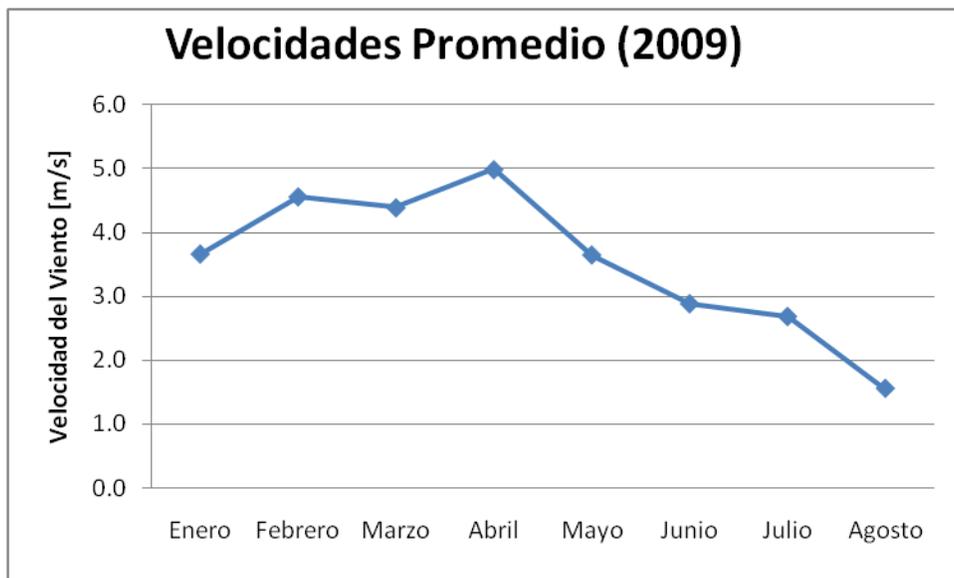


Figura A1. Patrón de Velocidades Diario. Estación Cancún (2009)



*Figura A2. Comportamiento del Viento para el mes de Abril. Estación Cancún (2009)*



*Figura A3. Velocidades Promedio (Anual). Estación Cancún, 2009.*

## ROSA DE LOS VIENTOS

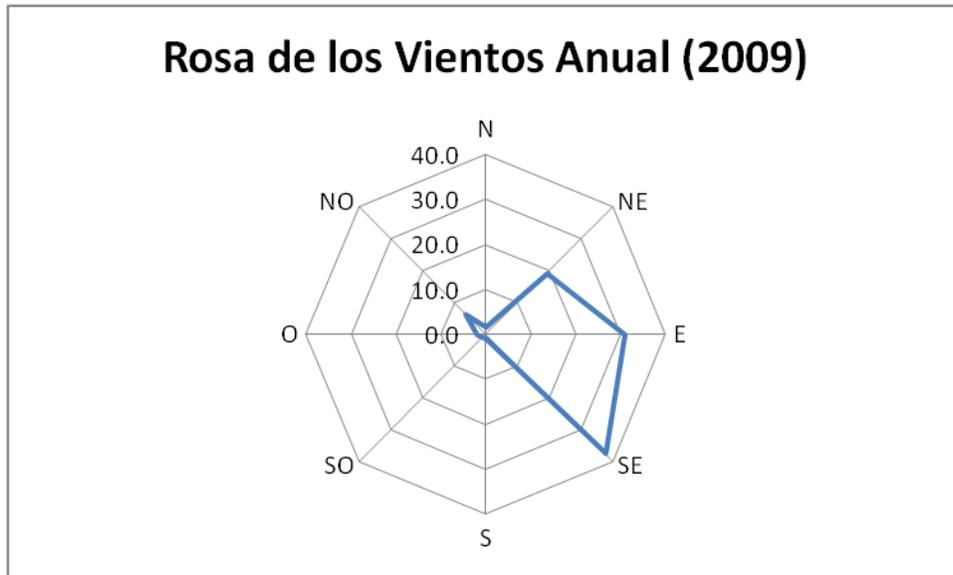


Figura A4 Rosa de los Vientos para el mes de Enero. Estación Cancún (2009)

## HISTOGRAMA DE VELOCIDADES

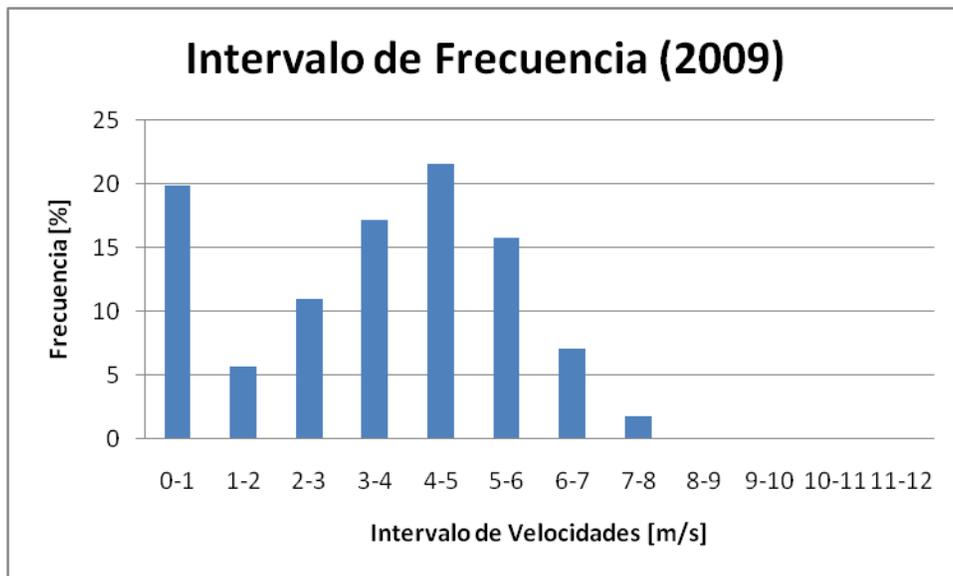
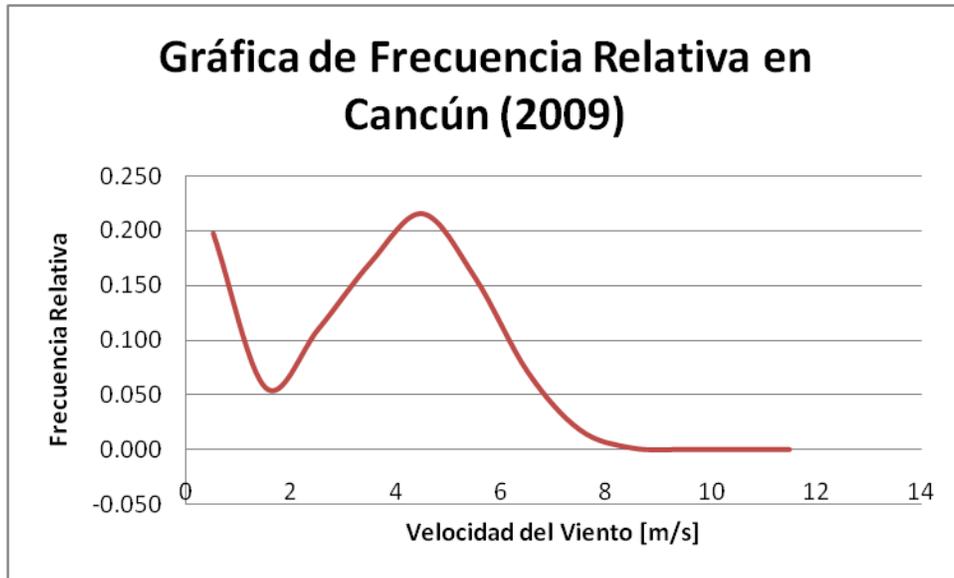


Figura A5 Histograma de Velocidades para el mes de Enero. Estación Cancún (2009)



*Figura A6. Frecuencia Relativa para el mes de Enero. Estación Cancún (2009)*

Función de Distribución de Weibull

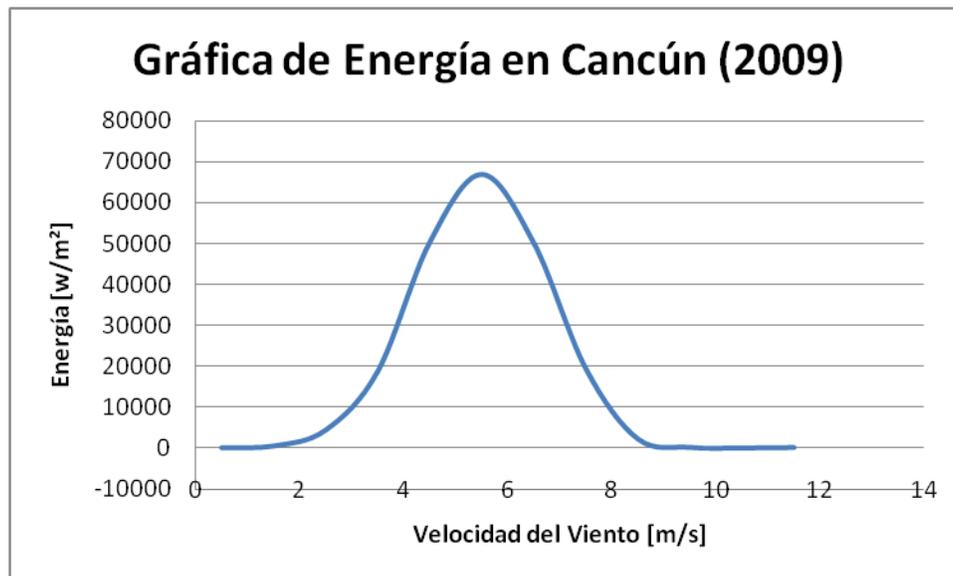
*Tabla A1. Resultados de Función de Distribución de Weibull. Estación Cancún*

INTERVALO	Punto Medio	Frecuencia en horas	Frecuencia Relativa	Weibull	Frecuencia Weibull
0-1	0.5	1056	0.198	0.13	672
1-2	1.5	301	0.057	0.14	767
2-3	2.5	586	0.110	0.12	653
3-4	3.5	913	0.171	0.10	509
4-5	4.5	1151	0.216	0.07	381
5-6	5.5	838	0.157	0.05	277
6-7	6.5	380	0.071	0.04	199
7-8	7.5	96	0.018	0.03	141
8-9	8.5	8	0.001	0.02	99
9-10	9.5	0	0.000	0.01	69
10-11	10.5	0	0.000	0.01	48
11-12	11.5	0	0.000	0.01	33
	Total =	5329	1	0.722	3847.48

## Energía Disponible

**Tabla A2. Cantidad de Energía Disponible en Cancún**

INTERVALO	Potencia [W]	Energía [w/m <sup>2</sup> ]
0-1	0.1	63.41
1-2	1.6	488.67
2-3	7.5	4402.08
3-4	20.6	18798.81
4-5	43.8	50404.48
5-6	79.9	66992.39
6-7	132.0	50143.78
7-8	202.7	19392.68
8-9	295.1	2213.15
9-10	412.0	137.32
10-11	556.2	0.00
11-12	730.8	121.80
	Total =	213158.6



**Figura A7. Curvas de Energía para el mes de Enero. Estación Cancún (2009).**