



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

Potencial Eólico del Litoral superior de la península de Yucatán

TESIS

Para obtener el grado de
Ingeniero en Sistemas de Energía

PRESENTA

Josué Jonathán Reyes Aquino



DIRECTOR DE TESIS

Dr. José Hernández Rodríguez

ASESORES

Dr. Fernando Enrique Flores Murrieta

Dr. Jorge Ovidio Aguilar Aguilar

Dr. Inocente Bojórquez Báez

Dr. Gliserio Romeli Barbosa pool





UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**Trabajo de Tesis elaborado bajo supervisión del Comité de asesoría y aprobada
como requisito parcial para obtener el grado de:**

INGENIERO EN SISTEMAS DE ENERGÍA

Comité de Trabajo de Tesis

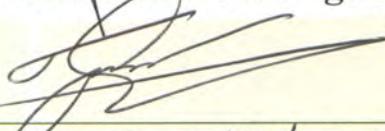


Director:



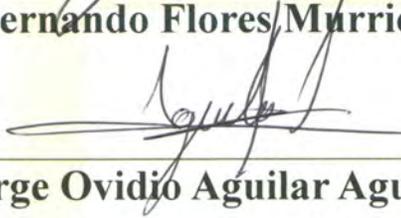
Dr. José Hernández Rodríguez

Asesor:

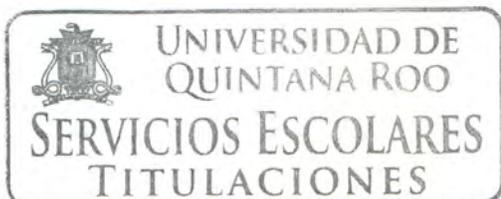


Dr. Fernando Flores Murrieta

Asesor:



Dr. Jorge Ovidio Aguilar Aguilar



Chetumal, Quintana Roo, México, Diciembre de 2013.

DEDICATORIA

Agradezco infinitamente a esas personas importantes en mi vida, que siempre me han apoyado. Sin ustedes esto no sería posible. Con mucho cariño esta tesis se las dedico a ustedes:

Dios

Papá José Luis Reyes Mendoza

Mamá Julia Aquino Antonio

Hermana Angélica Saray Reyes Aquino

Hermano José de Jesús Reyes Aquino

AGRADECIMIENTOS

A mis maestros quienes durante la etapa más importante de mi vida, influyeron con sus lecciones, experiencia y amistad. Gracias a ustedes profesores que me asesoraron en la elaboración de esta tesis, sin ustedes esto habría sido un caos. A todos y cada uno de mis profesores de carrera GRACIAS.

Mil gracias UQROO

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	1
El viento (Capítulo I)	11
La energía del Viento.....	19
Estimación del Potencial Eólico (Capítulo II)	20
Datos y Equipo (Capítulo III)	30
Obtención de Datos.....	31
Toma de Medidas.....	31
Estaciones de Medición.....	36
Resultados (Capítulo IV)	39
Dzilam.....	42
Río Lagartos.....	51
Progreso.....	59
Holbox.....	67
Cancún.....	75
Isla Pérez.....	83
Tabla de Resultados.....	91
Conclusiones (Capítulo V)	92
Bibliografía	95



INTRODUCCIÓN

Cuando se habla de energía eólica se piensa en un tipo de energía distinta a la convencional (proveniente de los combustibles fósiles). Este tipo de energía fue por mucho tiempo la más utilizada por el hombre, ya que se empleaba como impulsor en las naves marítimas, así como para realizar trabajos mecánicos en el bombeo de agua y molienda de granos.

Sin embargo, el uso de la energía eólica decayó al descubrirse el gran potencial y aparente abundancia de la energía térmica (en especial de las provenientes de los combustibles fósiles), las demás fuentes de energía fueron dejándose al olvido, hasta casi desaparecer por completo con la aparición del petróleo.

En la actualidad en un mundo dañado por el uso indiscriminado de la energía de combustión de hidrocarburos, los países se reúnen para ponerse de acuerdo sobre medidas que permitan mitigar el cambio climático, por lo que se ha enfocado nuevamente el interés en las energías renovables.

De entre este tipo de energías, la que ha tenido un desarrollo notable en los últimos años es la energía eólica, esto se debe a que se ha comprobado que la generación eoloelectrónica es una alternativa viable para complementar a la generación convencional, siendo su motor de impulso los programas e implementos incentivos creados por los países industrializados, los cuales han servido de ejemplo al resto de países.

México como país en vía de desarrollo se unió en 1997 al *Acuerdo Eólico de la Agencia Internacional de Energía* el cual busca impulsar la eoloelectricidad como elemento que contribuye al desarrollo sustentable. El resultado se puede ver en el Plan Nacional de Desarrollo, el cual contiene algunos principios del acuerdo dentro de él (Borja et al., 2005).

Desde el año de 1977 cuando se creó este acuerdo hasta el 2012 se encontraban inscritos al acuerdo los países de Australia, Austria, Canadá, Dinamarca, Finlandia, Alemania, Grecia, Irlanda, Italia, Japón, Corea del Sur, México, Holanda, Noruega, Portugal, España, Suecia, Suiza, Reino Unido y los Estados Unidos de América, otros miembros son la Asociación China de Energía Eólica, la Comisión Europea y la Asociación Europea de Energía Eólica (EWEA, 2012).

Estos países han tenido un gran avance eólico permitiendo un crecimiento exponencial de la capacidad total instalada a nivel mundial. Logrando además que otros países decidan invertir en este tipo de energía. Sin embargo, para que se diera este crecimiento, tuvieron que ocurrir muchos acontecimientos con aciertos y fracasos, los cuales sirvieron de aprendizaje para aquellos países que siguieron apostando por la energía eólica y que hoy en día son grandes generadores pero sobre todo productores de equipo y tecnología.

A continuación se presenta de manera sintetizada parte de la historia que ha tenido este tipo de energía utilizada para la obtención de energía eléctrica a lo largo de su relativamente joven vida.

Si bien es cierto que la obtención de la energía cinética del aire en movimiento con un rotor aerodinámico de pocas aspas y eje de rotación horizontal data de hace varios siglos con el uso de los molinos de viento, no fue sino hasta el año de 1888 cuando el estadounidense Charles F. Brush inventó y construyó la primera turbina eólica capaz de generar hasta 12kW (ADIE, 2002). En el año de 1891, tras años de investigación el Danés Paul LaCour optimizó el diseño

de los rotores y desarrolló máquinas de hasta 25kW (Borja et al., 2005). En los años posteriores la investigación continuó hasta que con la aparición del petróleo fue dejada al olvido. No fue sino hasta la década de 1980, cuando debido a las crisis petroleras hubo un impulso notable en el desarrollo de la industria eolieléctrica en EUA, especialmente en California, donde el gobierno del estado otorgó generosos incentivos a las empresas generadoras de energía eolieléctrica, permitiendo que se instalaran cerca de 15.000 aerogeneradores, con una capacidad de generación de 100kW la mayoría de ellos.

Este auge hizo que en la década de 1980 Estados Unidos de América concentrara la mayor capacidad eolieléctrica a nivel mundial, llegando a tener valores cercanos al 95% de la capacidad eolieléctrica instalada en el mundo (ver Tabla 1). Sin embargo, este crecimiento fue rápidamente detenido debido a los múltiples problemas que surgieron tanto en los aerogeneradores como en los métodos utilizados para diseñar las centrales eolieléctricas.

Esta primera etapa sirvió de prueba para tiempos posteriores, ya que fue a partir de la década de 1990 cuando la Unión Europea, empieza a enfocarse abiertamente en la generación eolieléctrica.

Fue en el año de 1990 cuando la Unión Europea abre sus mercados eolieléctricos en Alemania, Dinamarca, Reino Unido, Los Países Bajos y España.

Gracias a ello el tamaño promedio de los aerogeneradores creció rápidamente, al pasar de los 200kW a los 500kW, favoreciendo a la creación de nuevos parques eólicos (ver Figura 1).



FIGURA 1 AEROGENERADORES DE 1980 (IZQUIERDA Y CENTRO) Y DE 1990 (DERECHA)
([HTTP://COMMONS.WIKIMEDIA.ORG](http://commons.wikimedia.org), 2013)

En el año de 1995 la comisión europea publicó un documento en el cual se establecen objetivos para la creación y la resolución de estrategias para el fomento de las fuentes de energía renovable. Este documento titulado *Energía para el Futuro: Fuentes de Energía Renovable; Libro Blanco para una Estrategia Comunitaria y Plan de Acción* pasó a ser al año siguiente el *Libro Verde* en el cual ya se describen las acciones tentativas que deberán conducir a largo plazo, a una participación sustancial de las energías renovables en el balance energético global de la Unión Europea (Borja et al., 2005).



Una de las metas estratégicas enunciadas en Libro Verde ^[1] fue contar con 40,000 MW eoloeléctricos para el año 2010. De ahí el por que a partir de 1996 la eoloelectricidad empezó a crecer a un ritmo tan acelerado. Cabe mencionar que para el año 2010 la capacidad eoloeléctrica instalada en Europa era de 86,279 MW (GWEC, 2011).

La Tabla 1 muestra el crecimiento que tuvo la energía eólica en el mundo, durante la década de 1980 y hasta el año de 1995, un año antes de la creación del *Libro Verde*.

Nótese que durante ese intervalo de tiempo la capacidad instalada en los Estados Unidos de América ocupaba un gran porcentaje del total.

TABLA 1 CAPACIDAD EOLOELÉCTRICA INSTALADA (EARTH POLICY INSTITUTE, 2011)

Capacidad Eoloeléctrica Mundial Instalada, de 1980-1989		
Año	Capacidad Mundial Acumulada	Capacidad Acumulada de EUA
	Megawatts	
1980	10	8
1981	25	18
1982	90	84
1983	210	254
1984	600	653
1985	1,020	945
1986	1,270	1,265
1987	1,450	1,333
1988	1,580	1,231
1989	1,730	1,332
1990	1,930	1,484
1991	2,170	1,709
1992	2,510	1,680
1993	2,990	1,635
1994	3,490	1,663
1995	4,780	1,612

A partir de que la Unión Europea empieza a trabajar para cumplir los objetivos impuestos en el libro verde, el crecimiento eoloeléctrico ha sido mayo a nivel mundial, como puede verse en la Figura 2.

[1] El Libro verde “Por una Política Energética de la Unión Europea” presenta los principales retos a los que la Comunidad (Europea) deberá enfrentarse en los próximos años (de 1995 en adelante) y, en particular, los correspondientes a los distintos sectores de la industria de la energía. Así pues, este Libro verde se inscribe, en lo que respecta en particular a la implantación de un entorno flexible y más eficaz en el sector energético, o de una estructura fiscal más favorable a la protección del medio ambiente y el empleo (Comisión Europea, 1995).

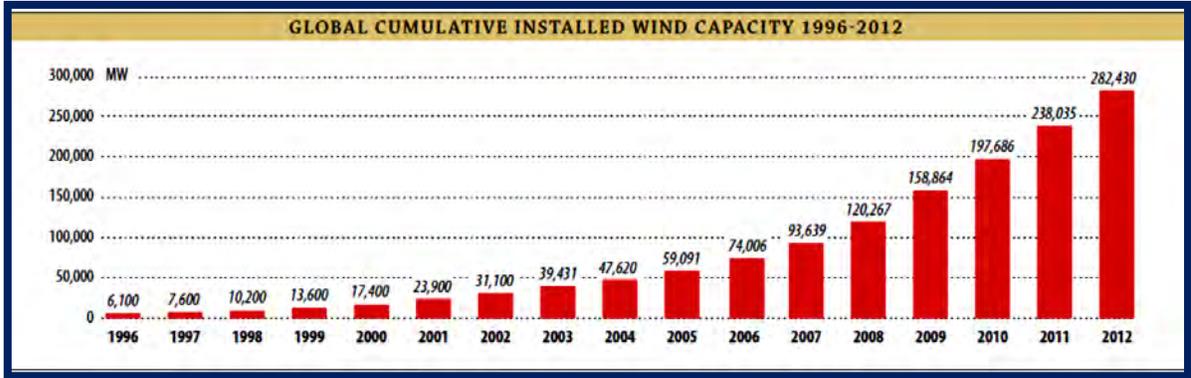


FIGURA 2 GRÁFICA DE LA CAPACIDAD EOLOELÉCTRICA MUNDIAL INSTALADA (GWEC, 2013)

Estos datos dan una perspectiva mundial de lo que está ocurriendo con la energía eólica, además de que se observa que el crecimiento se seguirá dando por más tiempo, dado que se trata de un tipo de energía renovable que está siendo implementada por muchos países debido a su rentabilidad y su compatibilidad con el medio ambiente. Otro punto a su favor son los adelantos en toda su tecnología los cuales han permitido una mejora en la eficiencia de los aerogeneradores, llegando casi al límite de obtención de energía del viento.

En lo que respecta a México el crecimiento eoloeléctrico se ha dado principalmente en dos zonas; El Istmo de Tehuantepec en el estado de Oaxaca y La Rumorosa en el estado de Baja California Norte. Sin embargo estos no son los únicos lugares con potencial eólico en el país.

Además el gobierno Mexicano estima que el potencial eólico del país es aproximado a los 71 GW, de los cuales 11 GW tienen un factor de planta (F.P.) superior al 30%, siendo los valores comunes de 24 a 34% en una central eoloeléctrica (ver Figura 3) (SENER, 2010).

El mapa de la Figura 4 muestra las zonas más factibles para la generación eoloeléctrica según el gobierno mexicano.

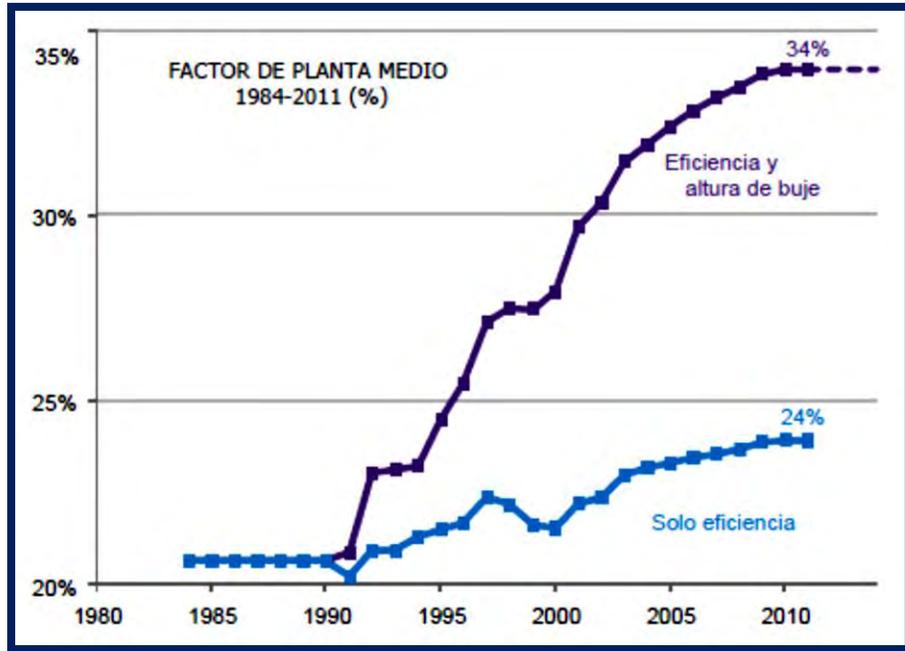


FIGURA 3 AVANCE EN EL FACTOR DE PLANTA MEDIO EN LOS ÚLTIMOS AÑOS (BLOOMBERG, 2011)

Este potencial se concentra principalmente en el Istmo de Tehuantepec con un potencial de 10 GW y factor de planta del 40%, esto solo en el estado de Oaxaca (GWEC, 2011).

Otros lugares prometedores para el desarrollo de energía eólica se encuentran en la región norte y centro de México, así como en la costa del Golfo de México y en la península de Yucatán.

Sin embargo no fue sino hasta en 1994 cuando la Comisión Federal de Electricidad (CFE) logró contratar la construcción de la primera central eoloeléctrica en México, misma que se ubicó en las inmediaciones del poblado La Venta, Juchitán, Oaxaca.

El parque eólico La Venta contó con siete aerogeneradores de 225 kW, que llegaron a operar con un factor de planta de alrededor de 51.7% en su primer año (Borja et al., 2005).

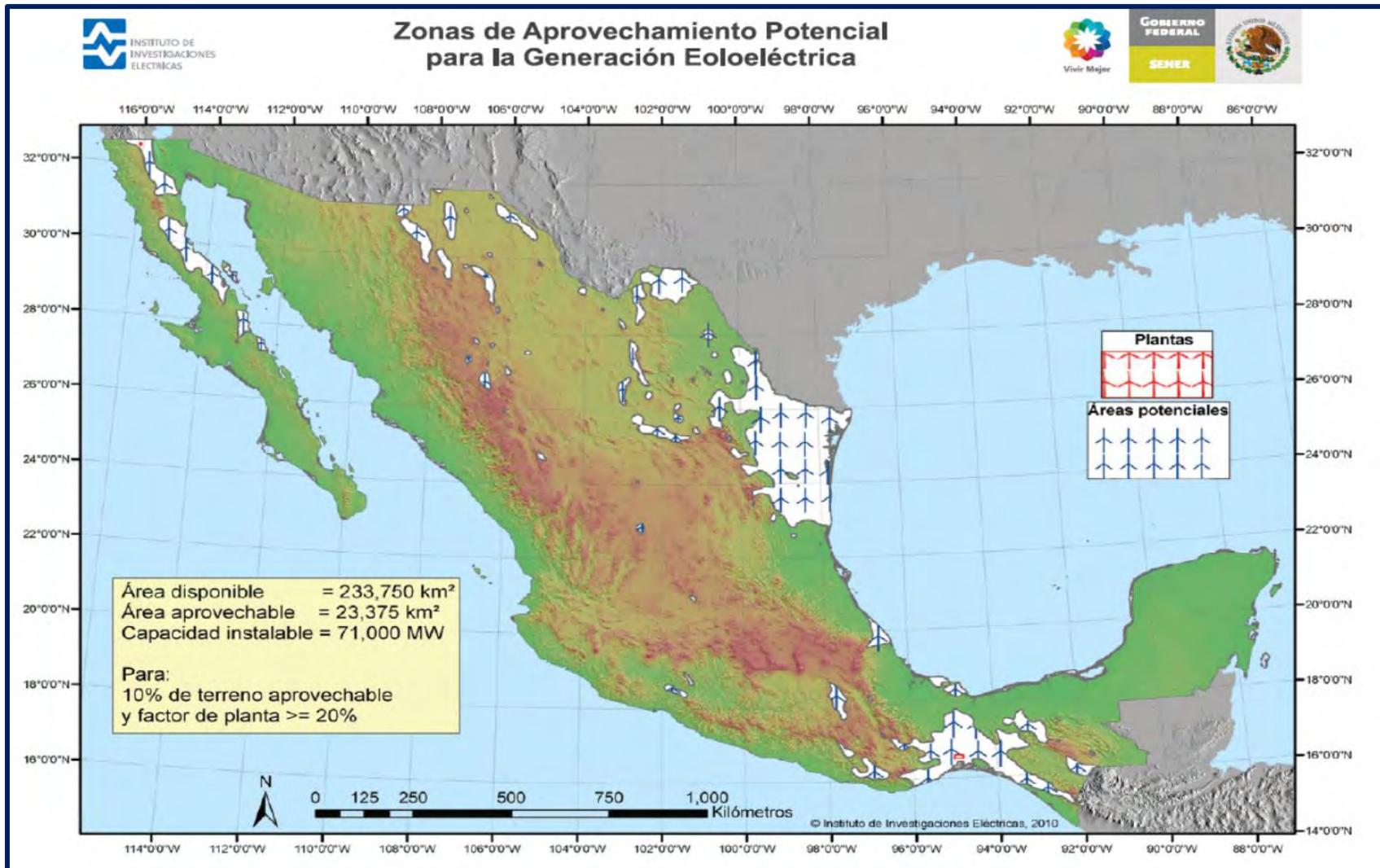


FIGURA 4 MAPA EÓLICO DE LA REPÚBLICA MEXICANA (SENER 2012)



Sin embargo, no fue sino hasta 2006 cuando se puso en marcha un parque eólico de una capacidad relevante, denominado La Venta II (ver Figura 5), este nuevo parque eólico cuenta con 98 aerogeneradores de 850 kW y una capacidad total instalada de 83.3 MW (CFE, 2011).

Con el fin de seguir aumentando su potencial eólico, la Comisión Federal de Electricidad tiene planeado llegar a una cifra histórica de 2000 MW de energía eólica (Alatorre, 2009).

A pesar de su elevado potencial eólico, México contaba hasta finales de 2012 con 1,370 MW de capacidad de generación instalada, quedando debajo de Brasil en América Latina el cual a finales del 2012 contaba con 2,508 MW (GWEC, 2013), siendo que México fue el primer país en América Latina en construir un parque eólico como proyecto prototipo.



FIGURA 5 VISTA AÉREA DEL PARQUE EÓLICO LA VENTA II (CFE, 2012)

La Tabla 2 muestra en un resumen los proyectos eólicos en México, en la cual puede verse que los proyectos principales pertenecen a grupos independientes de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) los cuales en su modalidad de productores privados venden la energía a la CFE o bien utilizan la energía para su autoabastecimiento.

TABLA 2 PROYECTOS EÓLICOS EN MÉXICO (IEA WIND, 2011)

Central Eoloeléctrica	No. Aerog.	Aerog. (kW)	Aerog. Manuf	Capacidad (MW)	Estatus (final 2010)	Tipo ⁽¹⁾	Año (Inicio)	Estado
La Venta I	6	225	Vestas	1.3	Terminado	FGOB	1994	OAX
Guerrero Negro	1	600	Gamesa	0.6	Terminado	FGOB	1998	BCS
La Venta II	98	850	Gamesa	83.3	Terminado	FGOB	2007	OAX
Parques Ecológicos	93	850	Gamesa	79.9	Terminado	POSS	2009	OAX
EURUS	167	1500	Acciona	250	Terminado	POSS	2009	OAX
Bii Nee Stipa	31	850	Gamesa	26.3	Terminado	POSS	2010	OAX
Certe-IIE F1	1	300	Komai	0.3	Terminado	FGOB	2010	OAX
E. Valle México	27	2500	Clipper	67.5	Terminado	POSS	2010	OAX
Mexicali	5	2000	Gamesa	10	Terminado	SGOB	2010	BC
Fuerza Eólica	20	2500	Clipper	50	En construcción	POSS	2011	OAX
La Venta III	121	850	Gamesa	102.9	En construcción	IPP	2012	OAX
Oaxaca I	51	2000	Vestas	102	En construcción	IPP	2012	OAX
Oaxaca II	68	1500	Acciona	102	Contr. Otorgado	IPP	2012	OAX
Oaxaca III	68	1500	Acciona	102	Contr. Otorgado	IPP	2012	OAX
Oaxaca IV	68	1599	Acciona	102	Contr. Otorgado	IPP	2012	OAX
DEMSA	113	2000	Gamesa	227	No iniciado	POSS	2013	OAX
Eoliatec Istmo	82	2000	Gamesa	164	No iniciado	POSS	2013	OAX
Eoliatec Pacífico				160.5	No iniciado	POSS	2013	OAX
Vientos Istmo				180	No iniciado	POSS	2013	OAX
E.A. Istmeña				215.6	No iniciado	POSS	2013	OAX
Bii Hioxo				227.5	No iniciado	POSS	2013	OAX
C. Tamaulipas				54	No iniciado	POSS	2014	TAM
F.E.B. Cal.				300	No iniciado	POSS	2014	BC
San Matías				20	No iniciado	POSS	2014	BC
Rumocannon				72	No iniciado	POSS	2014	BC
B. Cal. 2000				10	No iniciado	POSS	2014	BC
Sta. Catarina				17.5	No iniciado	POSS	2014	NL
GSER				161	No iniciado	POSS	2014	TAM
Dominica EL				200	No iniciado	POSS	2014	SLP
Papaloapan				40	No iniciado	POSS	2014	JAL
Acumulado				3129.2				

(1) FGOB= Gobierno Federal, SGOB= Gobierno Estatal, POSS= Autoabastecimiento Sector Privado, IPP= Productor Independiente, IIE= Instituto de Investigaciones Eléctricas

Si bien la mayoría de los proyectos se han retrasado, estos siguen en proceso y muy próximos a ser puestos en marcha.

La Figura 6 muestra el crecimiento que ha tenido México en su capacidad instalada. Puede verse que ha sido mayor en los últimos años llegando a los 1370 MW a finales del 2012 y se espera llegue a los 3500 MW a finales del 2015 (GWEC, 2013).

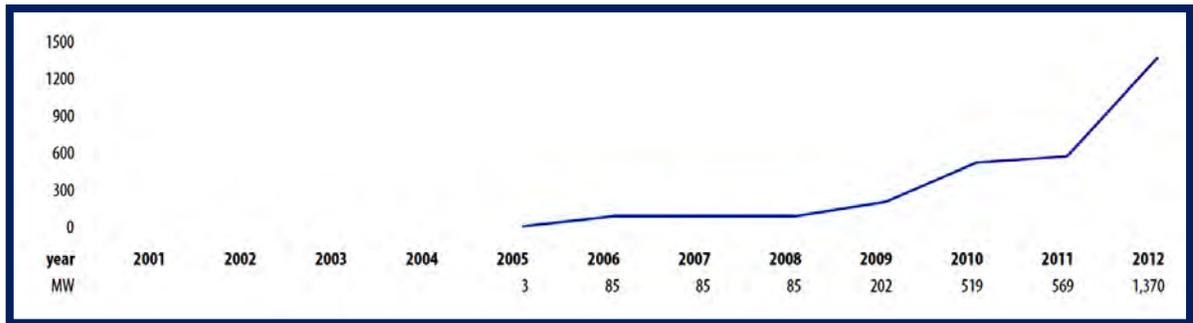


FIGURA 6 GRAFICA DE LA CAPACIDAD EOLOELÉCTRICA INSTALADA EN MÉXICO (GWEC, 2013)

Otro lugar con posible buen potencial eólico en México es la Península de Yucatán, la cual según la CFE tiene una capacidad estimada de entre 1000 MW-2000MW (Acosta, 2006). Pero a pesar de tener una significativa capacidad no se han realizado los estudios suficientes y aunque el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) se encuentra patrocinando algunos estudios, los resultados aun no se obtienen. El Laboratorio Nacional de Energías Renovables de Estados Unidos (NREL), ha realizado algunos estudios de los recursos eólicos de la península de Yucatán y ha obtenido un mapa (SENER, 2010) (ver Figura 7).

Conforme el tiempo pasa, cada vez son mas los lugares en los que se puede aprovechar la energía del viento y en lo que respecta al caso de México la Global Wind Energy Council explica que debido a los recientes desarrollos tecnológicos, los cuales se han traducido en turbinas más confiables y eficientes, han aumentado significativamente el número de sitios factibles al desarrollo, en un mercado donde no hay incentivos económicos directos para la energía eólica, tales como créditos fiscales, tarifas de alimentación, entre otros (GWEC, 2011).

En este trabajo, se pretende comprobar mediante el análisis de datos provenientes de estaciones meteorológicas, si es que existe realmente un potencial de aprovechamiento del recurso eólico en la zona norte de la Península de Yucatán. Considerando que este tipo de estaciones fueron instaladas para conocer condiciones meteorológicas y no el potencial eólico.

Para cumplir este objetivo, es necesario:

- Hacer un análisis de potencial en base a las estaciones meteorológicas.
- Recabar y analizar la información para el estudio de potencial a partir de estaciones meteorológicas.

Para lo cual el presente trabajo, se ha estructurado de la siguiente forma:

Capitulo 1: Se presenta una revisión bibliográfica del viento; su origen, algunas fuerzas que intervienen en él y los principales tipos de viento que existen.

Capítulo 2: En este capítulo, se presenta la forma de estimar o evaluar el potencial o recurso eólico disponible en un sitio determinado.

Capítulo 3: En este capítulo, se habla de los métodos de muestreo empleados en la obtención y tratamiento de datos anemométricos así como de los instrumentos de medición para evaluar el recurso eólico.

Capítulo 4. De una serie de estaciones instaladas en la península de Yucatán, se han seleccionado 6 sitios, de los cuales se han tomado datos por periodos de tiempo que van de 5 meses a 1 año. Presentando los resultados obtenidos de cada una de las ellas.

Capítulo 5: Conclusiones.

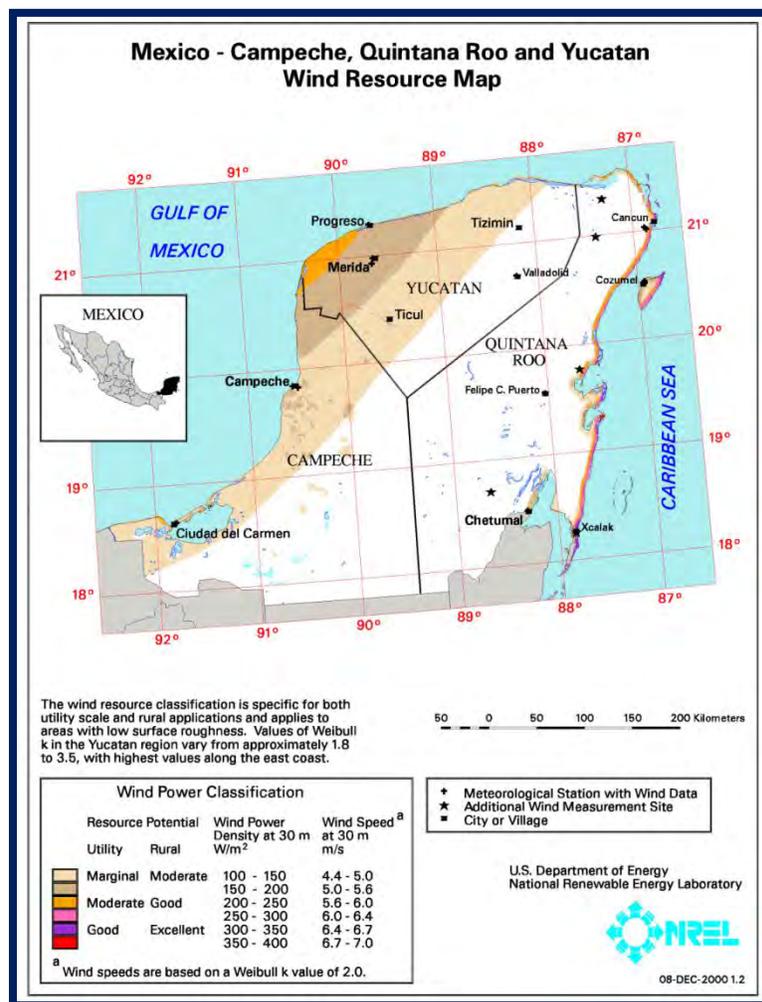


FIGURA 7 MAPA EÓLICO DE LA PENÍNSULA DE YUCATÁN (NREL, 2000)

El Viento

Capítulo I

La atmosfera es una capa muy delgada en comparación con las dimensiones de la tierra. El movimiento del aire se realiza fundamentalmente en la troposfera y sobre el mismo influyen los siguientes factores:

- La radiación solar, mayor en la zona ecuatorial que en los polos.
- La rotación de la tierra, que produce el efecto Coriolis, desviando la dirección de los vientos hacia la derecha en el hemisferio norte y hacia la izquierda en el sur.
- La acción sobre las masas de aire de las diferencias de presión atmosférica, distintos tipos de superficies terrestres (continentes y mares) y la orografía.

El aire tiende a ascender en las regiones ecuatoriales debido a su calentamiento por la radiación solar, en una zanja denominada *zona de convergencia intertropical*.

En el ecuador, a nivel de la superficie llega aire más fresco procedente de los trópicos (*vientos alisos*). En las latitudes medias, los vientos son básicamente del oeste pero con tendencias hacia las zonas polares.

Para un valor de la latitud próximo a 50° se produce una separación entre el aire tropical cálido y el aire polar frío, formándose un *frente polar*, que presenta muchas ondulaciones dando lugar a depresiones frontales. En zonas polares, el aire frío tiende a desplazarse a latitudes mas bajas.

En la figura 1.1, se muestran los esquemas de circulación general atmosférica, así como los campos de presión y de viento.

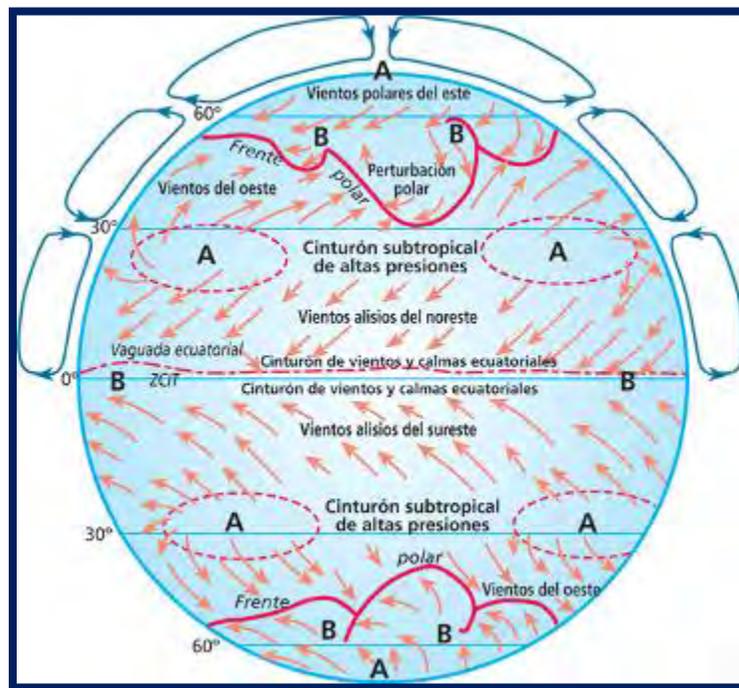


FIGURA 3.1 CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA (WWW.KALIPEDIA.COM, 2012)

En cada hemisferio se pueden distinguir tres grandes núcleos o regiones: tropical, templado y polar.

Los núcleos tropicales a ambos lados del ecuador están separados por una zona de calmas y bajas presiones ecuatoriales con vientos prácticamente nulos.

Los núcleos templados están separados de los tropicales por zonas de altas presiones subtropicales situadas hacia los 30° de latitud. Estas zonas son de calma y de muy escasas precipitaciones, encontrándose en ellas los desiertos más importantes (Sahara, Arabia, Gobi en el hemisferio norte y Kalahari y Australia en el sur).

Las zonas templadas presentan vientos dominantes del oeste y su circulación es mas irregular que en la zonas tropicales. En estas regiones entran frecuentemente masas de aire de origen tropical o polar dando lugar a sucesivos frentes cálidos y fríos con frecuente aparición de formaciones nubosas y precipitaciones.

Finalmente, en las zonas polares se presentan generalmente altas presiones y escasas precipitaciones. Desde ellas se originan un flujo, aproximadamente de dirección este, hacia la zona de bajas presiones situada en latitudes próximas a los 60° (Villarrubia, 2004).

EL VIENTO

El viento es el movimiento del aire respecto a la superficie terrestre. Este movimiento es fundamentalmente horizontal. La velocidad y dirección del viento es el resultado de la acción de las siguientes fuerzas (Villarrubia, 2004):

- Fuerza debido al gradiente horizontal de presión (F_p): esta fuerza va dirigida desde las isobaras de alta presión a las de baja presión, presentando una dirección perpendicular a las mismas (ver figura 1.2).

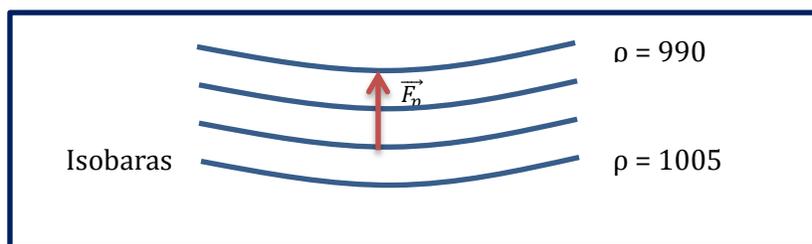


FIGURA 1.2 FUERZA DE PRESIÓN

La Fuerza de presión en el aire (por unidad de masa), F_p está dada por:

$$F_p = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \quad (1)$$

Donde

ρ Es la densidad del aire (kg/m^3) y

n Es la dirección normal a las líneas isobaras (adimensional).

- Fuerza debida a la rotación de la tierra (fuerza Coriolis) (F_d): debida al movimiento de rotación del globo terrestre de oeste a este, la trayectoria de una masa de aire en movimiento sufre una desviación hacia la derecha en el hemisferio norte (en sentido contrario en el hemisferio sur) (ver figura 1.3).

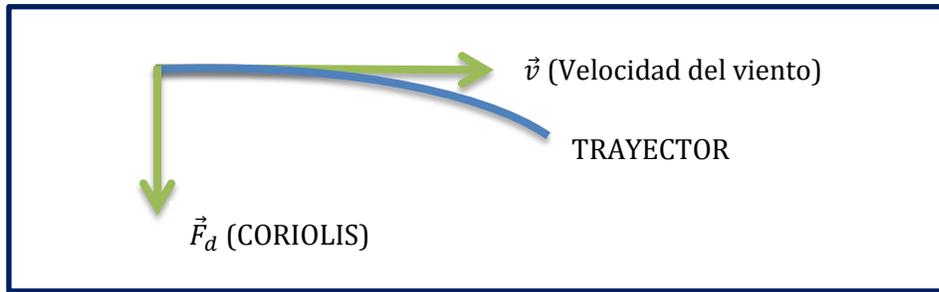


FIGURA 1.3 FUERZA DE CORIOLIS

La Fuerza Coriolis (por unidad de masa), F_d se expresa como:

$$f_d = fU \quad (2)$$

Donde

U Es la velocidad del viento (m/s) y

f Es el parámetro de Coriolis [$f = 2w \sin(\phi)$], donde ϕ representa la latitud y w la rotación angular de la tierra.

- Fuerza centrífuga debida a la curvatura de las isobaras (F_c): esta fuerza actúa según la dirección del radio de curvatura de la trayectoria, en sentido opuesto al centro de curvatura de la misma (ver figura 1.4).

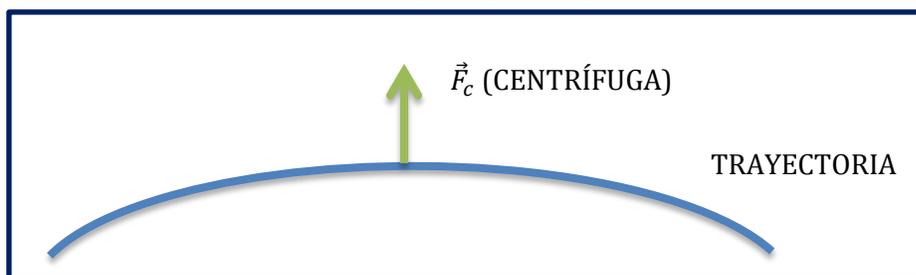


FIGURA 1.4 FUERZA CENTRÍFUGA

- Fuerza debida al rozamiento (F_r): interviene en las capas bajas de la atmósfera próximas a la superficie terrestre. Depende de factores tan diversos tales como el tipo de superficie o la orografía de la misma (ver figura 1.5).

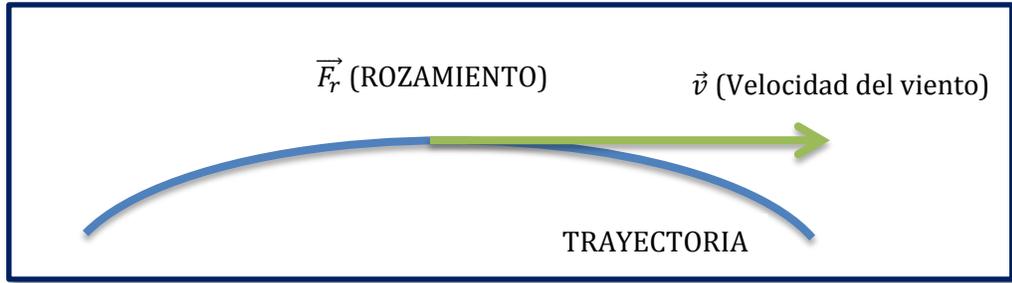


FIGURA 1.5 FUERZA DE ROZAMIENTO

Según el tipo de fuerzas considerado se distinguen los siguientes tipos de vientos:

- *Viento geostrófico*. Es el viento resultante de la acción conjunta de las fuerzas debidas al gradiente de presión (F_p) y de Coriolis (F_d). Este tipo de viento es paralelo a las isobaras; en general puede decirse que es tanto mayor cuanto mas próximas estén las isobaras (mayor gradiente de presión) y para un mismo gradiente de presión disminuye cuando aumenta la latitud (ver figura 1.6).

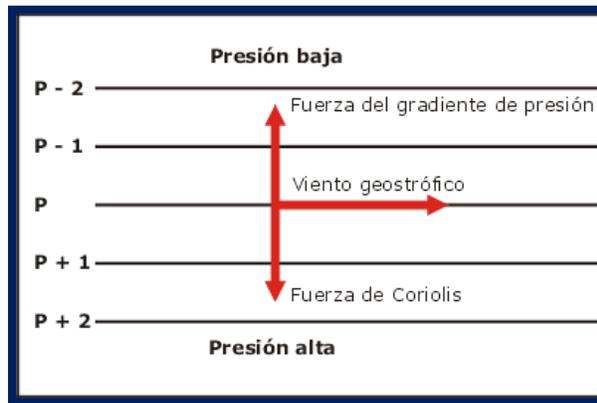


FIGURA 1.6 VIENTO GEOSTRÓFICO (WWW.BVSDE.PAHO.ORG ,2012)

La magnitud del viento geostrófico U_g es una función del balance de fuerzas y esta dada por:

$$U_g = -\frac{1}{f\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \quad (3)$$

- *Viento de gradiente*. Es el resultante de la combinación de las fuerzas debidas al gradiente de presión (F_p), de Coriolis (F_d) y de la centrífuga (F_c):

$$\frac{U_{gr}^2}{R} = -fU_{gr} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \quad (4)$$



Donde

R es el radio de la curvatura de la trayectoria del aire, y al sustituir de la ecuación (3) U_g tenemos:

$$U_g = U_{gr} + \frac{U_{gr}^2}{fR} \quad (5)$$

La fuerza debida al gradiente de presión actúa perpendicularmente a las isobaras (desde las altas a las bajas presiones) y la fuerza centrífuga hacia la parte convexa de la trayectoria (ver figura 1.7). Por eso, en el caso de un anticiclón, la fuerza centrífuga (F_c) se suma a la fuerza de presión (F_p), mientras que en una depresión se resta. Por ello, y para un mismo gradiente de presión alrededor de un anticiclón, la velocidad del viento geostrófico es inferior a la del viento de gradiente.

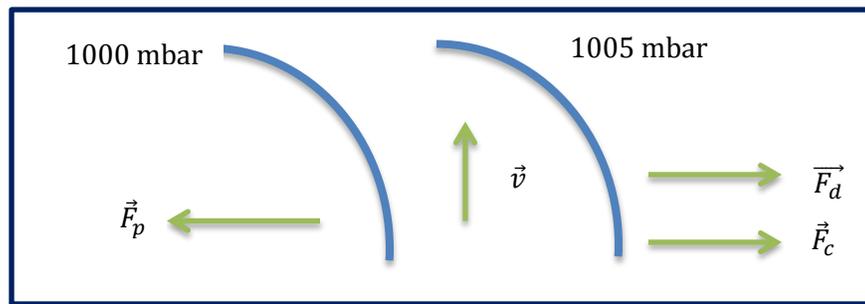


FIGURA 1.4 VIENTO DEL GRADIENTE

El viento de gradiente constituye una buena aproximación al viento real en aquellas condiciones en las que la fuerza de rozamiento es despreciable. Esta situación se da en las capas que no están próximas a la superficie terrestre, ya que la rugosidad de la misma introduce variaciones relativamente importantes en el movimiento del aire.

Por estas razones, los vientos geostróficos y los de gradiente predicen y describen bastante bien las condiciones de viento reales por encima de unos 1000 m de altura sobre el nivel de suelo. A alturas menores, por ejemplo de unos 100 m, el *viento de superficie* está muy influenciado por dos factores: la rugosidad de la superficie terrestre y los obstáculos. Para aplicaciones de energía eólica, nos interesa conocer los vientos de superficie, ya que de ellos se extrae la energía mecánica para el accionamiento de los aerogeneradores.

VIENTOS ORIGINADOS POR FENÓMENOS PARTICULARES: VIENTOS LOCALES

Existen condiciones climáticas locales que originan un tipo de vientos que se apartan de las leyes generales expuestas anteriormente para los vientos globales a gran escala. Entre ellos cabe citar (Villarrubia, 2004):

a) *Brisas de mar y brisas de tierra*

Durante el día la tierra se calienta más rápidamente que el mar, dado que el calor específico del suelo es menor que el del agua. Por consiguiente, se produce una corriente de aire ascendente creándose una depresión que provoca la circulación del aire de mar a tierra (*brisa marina*).

Durante la noche, el fenómeno se invierte y el viento sopla de tierra a mar (*brisa terrestre*) (ver figura 1.8). Durante el anochecer y el amanecer acostumbran a aparecer periodos de calma. Los periodos de calma se observan en las proximidades de las costas alcanzando el aire un recorrido máximo de alrededor de unos 20 km, aunque sus efectos pueden en algunos casos hacerse notar hasta unos 50 km de la línea de costa. La velocidad del viento no acostumbra a sobrepasar 18 km/h (5m/s), aunque las condiciones orográficas locales pueden en algunos casos aumentar o disminuir los valores de la velocidad del viento de brisa. En general, las brisas de tierra son más débiles que las de mar.

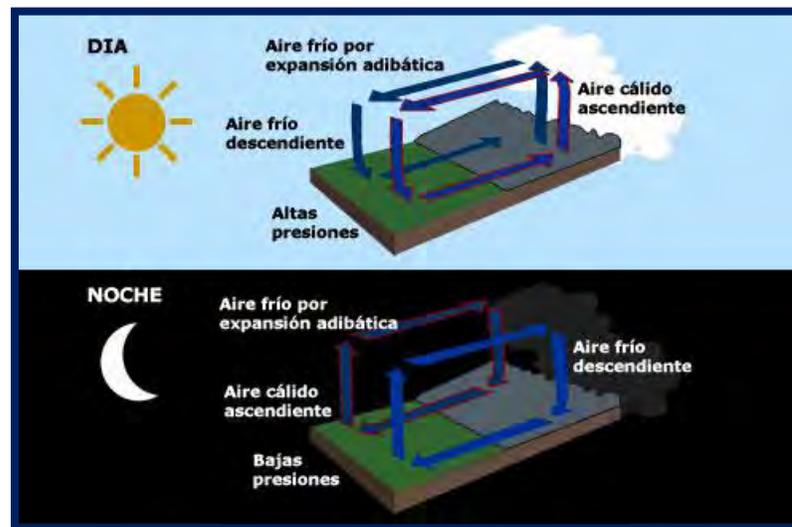


FIGURA 1.8 BRISAS DE MAR Y TIERRA
(WWW.AMBIENTUM.COM, 2012)

b) *Brisas de valle y de montaña (vientos anabáticos y catabáticos)*

En una montaña, al anochecer, el aire en contacto con el terreno más elevado de la montaña se enfría más rápidamente que el aire situado sobre el valle, por lo que tiende a descender hacia el valle siguiendo la ladera. Es el denominado *viento catabático*, generalmente de carácter suave (ver figura 1.9).

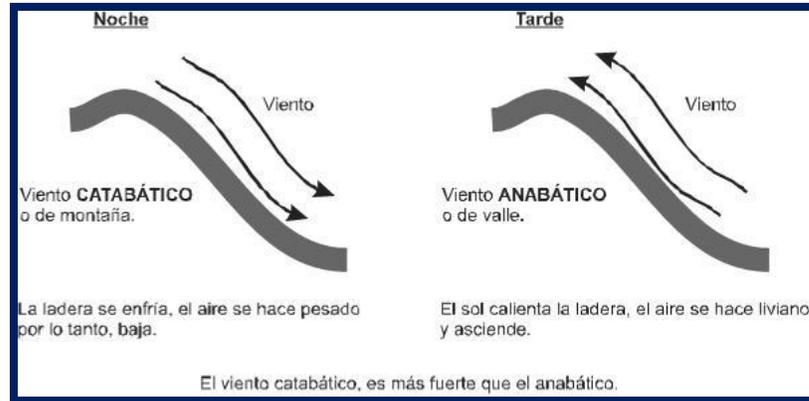


FIGURA 1.9 PROCESO DE FORMACIÓN DE VIENTOS ANABÁTICOS Y CATABÁTICOS

Durante el día, y por efecto de la radiación solar, el proceso se invierte y es el viento en contacto con el terreno situado en la proximidad de los valles, el que tiende a ascender por la ladera (*viento anabático*).

Este tipo de vientos también se conoce con el nombre de *vientos cañón o brisas de montaña*. En la Figura 1.9 se muestra el mecanismo de formación de este tipo de viento.

c) *Foehn*

Cuando el aire remonta la pendiente de una cadena de montañas, sufre una expansión y en consecuencia un enfriamiento. Si la altura es elevada, su disminución de temperatura puede ser notable y en consecuencia se produce condensación de la humedad del mismo en forma de nieblas, lluvias o incluso nieve.

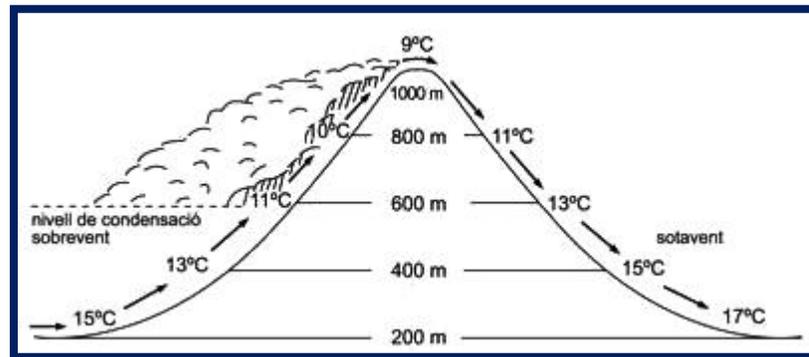


FIGURA 60 PROCESO DE FORMACIÓN DEL VIENTO FOEHN

Al descender por la ladera opuesta hacia los valles situados a sotavento, se produce un calentamiento, con lo cual al llegar al fondo del valle el aire es cálido y seco. Este fenómeno se produce siempre que una cadena montañosa es franqueada por masas de aire húmedo y es característico de algunos valles alpinos de donde recibe su nombre. En otras cadenas montañosas, tales como los Andes o los Pirineos, se producen situaciones parecidas.



d) *Otros vientos locales*

Son numerosos los ejemplos de vientos locales tales como:

- Mistral, viento del norte o noroeste que sopla a lo largo del valle del Ródano, en Francia, hasta el mar Mediterráneo, sobre todo en primavera y otoño.
- Tramontana, viento frío y seco del norte o noroeste en el golfo de León en el Mediterráneo.
- Cierzo, Maestral o Terral, que sopla del noroeste a lo largo del valle del Ebro.
- Sirocco, viento cálido y seco procedente del norte de África y Arabia, generalmente en primavera y verano.
- En Estados Unidos y en Canadá, el Northerly y el Chinook que proceden del Pacífico.
- En el sureste Asiático, los Monzones, son una forma a gran escala de brisa terrestre o marina, debido a la diferencia de temperaturas que se establecen entre el continente asiático y el océano, según la estación del año.

LA ENERGÍA DEL VIENTO

A la hora de evaluar el viento para un posible aprovechamiento de su energía es necesario conocer la zona para tener una idea de los tipos de viento con que se contarán. Esto debido a que las masas de aire varían dependiendo su posición geográfica (ver Figura 1.1), sin embargo esta manera de ver el viento es a gran escala y únicamente representa al viento de manera muy general, es necesario entonces conocer una escala menor la cual depende de condiciones climáticas locales. Estos vientos representan de mejor manera el lugar a evaluar, aun así dado que los vientos varían según las estaciones del año es necesario llevar a cabo un estudio completo de las velocidades de viento. Por lo anterior es necesario conocer teóricamente la manera de aprovechar la energía del viento mediante un proceso estadístico el cual se explica en el siguiente capítulo.

Estimación del Potencial Eólico

Capítulo II

ENERGÍA DEL VIENTO

La cantidad de energía que contiene el viento esta en función de su velocidad y su masa, por lo tanto a mayor velocidad de viento mayor será la energía obtenida.

En la Figura 2.1 se ilustra la manera de determinar la masa del flujo de aire dm/dt , a través del disco del rotor de área A en m^2 .

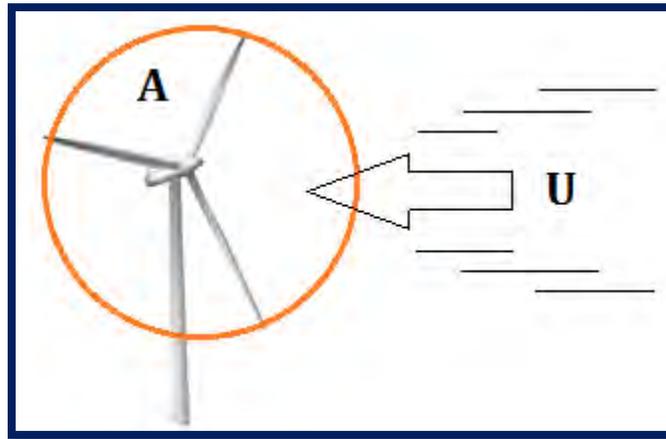


FIGURA 2.1 FLUJO DE AIRE EN EL ROTOR DEL AEROGENERADOR.

De la ecuación de continuidad de mecánica de fluidos, la razón del flujo de masa es una función de la densidad de aire ρ en kg/m^3 , y la velocidad del aire U en m/s y esta dada por:

$$\frac{dm}{dt} = \rho AU \quad (6)$$

La energía cinética por unidad de tiempo P , o potencia, del flujo esta dada por:

$$P = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} U^2 = \frac{1}{2} \rho AU^3 \quad (7)$$

La potencia eólica por unidad de área, P/A o densidad de potencia eólica WPD (por sus siglas en inglés) es:

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho U^3 \quad (8)$$

Se debe notar que:

- La densidad de potencia eólica es proporcional a la densidad del aire. Para condiciones estándares (nivel del mar, 15°C) la densidad del aire es considerada como 1.255 kg/m^3 .
- La potencia del viento es proporcional al área de barrido del rotor.
- La densidad de potencia eólica es proporcional al cubo de la velocidad del viento.



Actualmente el potencial de producción de una turbina eólica debe tener en consideración la mecánica del fluido a través del rotor, la aerodinámica, así como la eficiencia de la combinación del rotor-generador. En la práctica, las mejores turbinas eólicas de eje horizontal han alcanzado eficiencias de hasta 45% (Manwell et al., 2009).

Dado que el viento es frenado por los obstáculos con los que se encuentre y por la rugosidad de la superficie de la tierra, la velocidad del viento de varía directamente proporcional a la altura. De ahí que sea necesario estimar la variación de la velocidad del viento con la altura, es decir modelar el perfil vertical de velocidad de viento. Esto puede conocerse mediante la Ley de perfil logarítmico del viento.

$$\frac{U(z)}{U(z_r)} = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0}\right)} \quad (9)$$

Donde

- $U(z)$ Es la velocidad de viento que se desea conocer (m/s),
- $U(z_r)$ Es la velocidad de viento a la altura de referencia (m/s),
- z La altura a la que se desea estimar la velocidad de viento (m),
- z_0 El coeficiente de longitud de rugosidad (m) y
- z_r La altura de referencia (m).

La Tabla 2.1 muestra algunos valores para z_0 .

Otra manera de modelar el perfil vertical de velocidad de viento es utilizando la Ley exponencial de Hellmann.

$$\frac{U(z)}{U(z_r)} = \left(\frac{z}{z_r}\right)^\alpha \quad (10)$$

Donde

- $U(z)$ Es la velocidad de viento (m/s) a la altura z (m),
- $U(z_r)$ Es la referencia de la velocidad de viento (m/s) a la altura z_r (m), y
- α Es el exponente de Ley de potencia (adimensional).

TABLA 2.1 VALORES (APROXIMADOS) DE LONGITUD SUPERFICIAL DE RUGOSIDAD PARA VARIOS TIPOS DE TERRENO (VILLARRUBIA, 2004)

TIPO DE TERRENO	Z ₀ (mm)
Muy suave, hielo o lodo	0.01
Mar abierto en calma	0.2
Mar picado	0.5
Superficie de nieve	3
Césped	8
Pasto quebrado	10
Campo preparado para cultivo	30
Cultivo	50
Pocos árboles	100
Varios árboles, hileras de árboles, pocas construcciones	250
Bosques, tierras cubiertas con árboles	500
Suburbios	1500
Centros de ciudades con edificios altos	3000

La Tabla 2.2 muestra los valores de α para diferentes tipos de terreno, sin embargo estos valores pueden variar desde 1/7 hasta 1/2 en un mismo sitio debido a la dirección del viento, la estación del año, la hora del día, entre otros, de ahí que se sugiera obtener este valor empíricamente.

TABLA 3.2 COEFICIENTE DE FRICCIÓN PARA VARIOS TIPOS DE TERRENO (VILLARRUBIA, 2004)

TIPO DE TERRENO	α
Lagos, océanos, superficies suaves y duras	0.1
Césped	0.15
Terrenos de cultivo, arbustos, setos o vallas	0.2
Campo boscoso con muchos árboles	0.25
Pueblo pequeño con algunos arboles o arbustos	0.3
Área de la ciudad con edificios altos	0.4

Otro valor que varía con la altura es la densidad ρ , afectando también la cantidad de energía asociada con el viento (ecuación 8), para ello se realizará el calculo de la densidad de aire en función de la altura y temperatura promedio del lugar a estudiar. La ecuación es la siguiente:

$$\rho_{sm} = 1225e^{\left(\left(-\frac{z}{8435}\right) - \left(\frac{T_m - 15}{288}\right)\right)} \quad (11)$$

Donde



- ρ_{sm} Es la densidad mensual,
- T_m La temperatura promedio mensual y
- z La altura sobre el nivel del mar.

Para evaluar la viabilidad del uso del viento como fuente de energía, es necesario llevar a cabo un proceso de caracterización en el cual interviene un procedimiento de toma de datos el cual incluye las variables a medir (velocidad, dirección), frecuencia de muestreo, periodos de promedio, etc. Además del tratamiento de estos datos mediante técnicas estadísticas, forma de presentación (rosa de los vientos, valores medios horarios, etc.), distribuciones de probabilidad, etc.

Es necesario entonces disponer de medidas de velocidad y dirección de viento durante un periodo de tiempo suficientemente representativo de por lo menos un año, para poder conocer la variabilidad y aleatoriedad del viento según la estación, día y hora. Además conocer la afectación que puede causar al viento la orografía, rugosidad del terreno y obstáculos del lugar.

Una vez que los datos se han obtenido, se pueden analizar mediante varios métodos estadísticos, sin embargo dada la practicidad y precisión del método directo este será el utilizado para este trabajo.

Supóngase que se tiene una serie de N registros de velocidades de viento U_i , cada uno promediado sobre el tiempo para un intervalo Δt . Este conjunto de datos puede ser empleado para calcular los siguientes parámetros (Manwell et al., 2009):

Velocidad de los vientos

Se utilizan intervalos para promediar la velocidad del viento en los estudios de evaluación de recursos que incluyen periodos de 10 minutos (la norma para programas de monitoreo de energía eólica) (Elliot et al., 2004).

La velocidad del viento estacionaria es determinada por;

$$\bar{U} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i \tag{ 12}$$

Donde

N Es el número de muestras de la velocidad del viento durante un intervalo de 10 minutos (de preferencia 300) y

U_i Son los valores medidos de la velocidad del viento, en el intervalo de 10 minutos, con una frecuencia 0.5 Hz.

La velocidad de viento promedio esta dada por;

$$U = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} u_i \tag{ 13}$$

Donde

N Es el número de intervalos de 10 minutos en un período s , mientras que u_i Son los datos de la velocidad estacionaria en el período s .

Rosa de los vientos

Diagrama polar el cual consiste en una serie de líneas que parten del centro de un círculo y apuntan en la dirección de donde el viento viene (ver Figura 2.2). La longitud de cada línea representa la frecuencia del viento en aquella dirección particular (Parker, 2001).

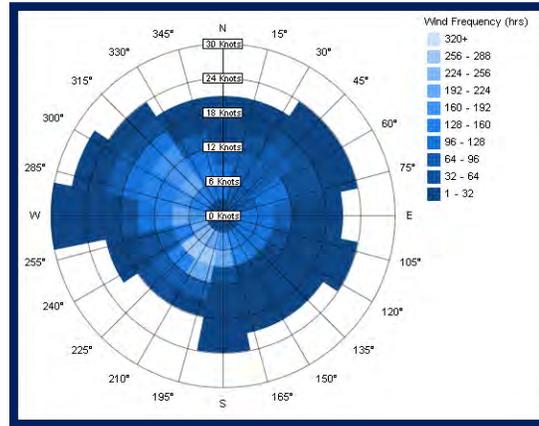


FIGURA 2.2 ROSA DE LOS VIENTOS ([HTTP://FILES.WIKIHELP.AUTODESK.COM](http://files.wikihelp.autodesk.com), 2012)

Desviación estándar estacionaria

La desviación estándar es una medida del grado de proximidad de los datos en torno al valor de la media. Cuanto menor es la desviación estándar, mas estrechamente se agrupan los datos alrededor de la media (Harris, 2007).

$$\sigma_U = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (U_i - \bar{U})^2} \quad (14)$$

Desviación estándar promedio

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (u_i - U)^2} \quad (15)$$

Turbulencia

La turbulencia en el viento es causada por la disipación de la energía cinética contenida en el viento en energía térmica a través de la creación y destrucción progresiva de pequeños remolinos (o ráfagas). El viento turbulento puede tener un termino medio relativamente

constante sobre lapsos de tiempo de una hora, pero sobre las veces mas cortas (minutos o menos) puede ser muy variable (Manwell et al., 2009).

Intensidad de turbulencia

El parámetro básico de la turbulencia es la intensidad de turbulencia. En este cálculo ambas velocidades se calculan sobre un lapso de tiempo más largo que las de las turbulencias, pero más pequeños que las de los periodos asociados con otros tipos de variaciones de velocidad de viento. El tamaño de este lapso de tiempo es por convección igual a 10 minutos. La tasa de frecuencia de muestreo por al menos una vez por segundo (1 Hz) (Manwell et al., 2009). Por tal motivo la intensidad de turbulencia I_T esta definida por:

$$I_T = \frac{\sigma_u}{U} \quad (16)$$

Densidad de potencia

La densidad de potencia promedio por unidad de área \bar{P}/A esta dada por:

$$\frac{\bar{P}}{A} = \left(\frac{1}{2}\right) \rho \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i^3 \quad (17)$$

Energía disponible

La energía disponible en periodos $N \Delta t$ (lo ideal serian 10 minutos), por unidad de área esta dada por:

$$\frac{\bar{E}}{A} = \left(\frac{1}{2}\right) \rho \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i^3 = \left(\frac{\bar{P}}{A}\right) (N\Delta t) \quad (18)$$

Distribución de Rayleigh

La ecuación de distribución de Rayleigh proporciona el número total de horas al año que se prevé pueda soplar el viento a la velocidad media U del lugar, esto al describir la distribución de velocidades del viento con una aproximación razonable dentro de ciertos límites, siendo la velocidad media U el parámetro a utilizar.

Para velocidades del viento por debajo de 15 km/hora (4.16 m/s), la distribución de Rayleigh tiene poca precisión, no siendo útil su aplicación en lugares con una velocidad media del viento inferior a 13 km/hora (3.6 m/s) (Fernández, 2002).

La función de densidad de probabilidad y la función de distribución acumulativa se obtienen por:

$$f(U) = \frac{\pi}{2} \left(\frac{U}{\bar{U}_2}\right) \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{U}{\bar{U}}\right)^2 \right] \quad (19)$$



$$F(U) = 1 - \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{U}{\bar{U}} \right)^2 \right] \quad (20)$$

La Figura 2.3 muestra un ejemplo de densidad de probabilidad para diferentes velocidades promedio.

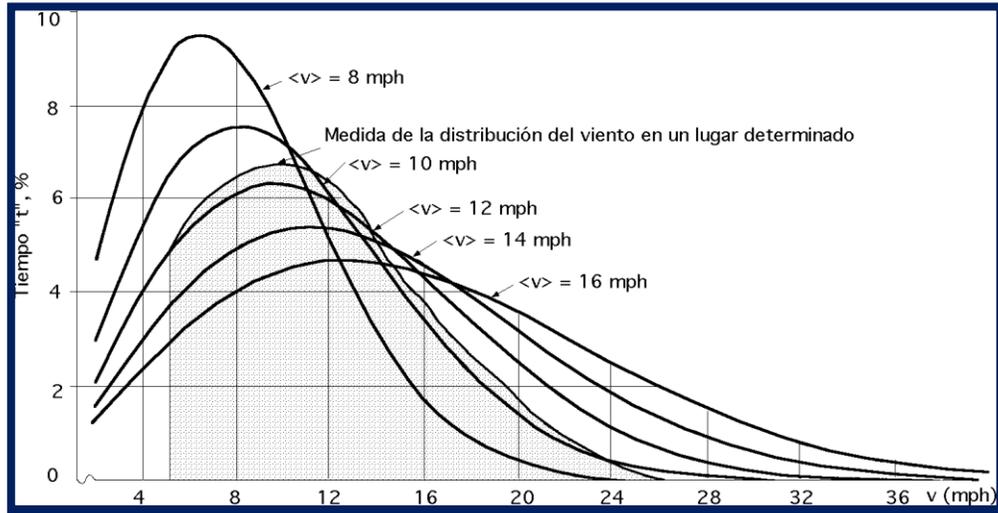


FIGURA 2.3 EJEMPLO DE LA FUNCIÓN DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD DE RAYLEIGH (FERNÁNDEZ, 2002)

Distribución de Weibull

Para la caracterización del viento se utiliza la ley de densidad de probabilidad de Weibull que facilita una expresión matemática para predecir el comportamiento de la velocidad de viento a lo largo de un periodo de tiempo que suele ser un año (INIECO, 2011).

La función de distribución de Weibull es del tipo de dos parámetros: k , un factor de forma, y c , un factor de escala. Ambos de estos parámetros están en función de \bar{U} y σ_U . La función de densidad de probabilidad y la función de distribución acumulativa se obtienen por:

$$p(U) = \left(\frac{k}{c} \right) \left(\frac{U}{c} \right)^{k-1} \exp \left[-\left(\frac{U}{c} \right)^k \right] \quad (21)$$

$$F(U) = 1 - \exp \left[-\left(\frac{U}{c} \right)^k \right] \quad (22)$$

Donde

U Es la velocidad de viento (m/s),

c El factor de escala el cual suele ser próximo a la velocidad media del viento (m/s), y



k El factor de forma que caracteriza la simetría o sesgo de la función de probabilidad (adimensional).

Para $1 \leq k < 10$, una buena aproximación de k es:

$$k = \left(\frac{\sigma_U}{\bar{U}}\right)^{-1.086} \quad (23)$$

Mientras tanto para encontrar el valor c puede usarse la siguiente ecuación:

$$c = \frac{\bar{U}}{\Gamma(1 + 1/k)} \quad (24)$$

Donde Γ es la función gamma la cual es igual a

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{x-1} dt \quad (25)$$

Debido a que obtener el factor de escala c no es un proceso sencillo, una forma de estimar su valor es mediante la siguiente función (Borja et al, 2007):

$$c \cong \frac{\bar{U}}{C_0 + C_1x + C_2x^2 + C_3x^3 + C_4x^4} \quad (26)$$

Donde:

$$C_0 = 0.886259184149$$

$$C_1 = 0.00852888014766$$

$$C_2 = 0.0257748943765$$

$$C_3 = -0.002117760028167$$

$$C_4 = 0.000664358428$$

$$x = 4(1 + 1/k) - 6$$

El valor de k relaciona la ley de Weibull y la de Rayleigh. Si $k = 2$, estas dos leyes coinciden. Los fabricantes de aerogeneradores suelen relacionar las prestaciones de sus maquinas con distribuciones de vientos tipo Rayleigh. Los emplazamientos óptimos para los parques eólicos suelen tener distribuciones de vientos próximas a una distribución de Weibull con parámetro de forma igual a 2 (INIECO, 2011).

Mediante el uso de la función de distribución de probabilidades de Weibull, se puede estimar la frecuencia de aparición de las velocidades de los vientos, en periodos de tiempo diferentes al medido originalmente (Pérez, 2012).

La grafica de distribución de Weibull representa los datos obtenidos durante la medición identificando las frecuencias y las velocidades de viento (ver Figura 2.4).

Es decir los datos se agrupan según hayan sido sus velocidades (representadas en el eje de las X) y frecuencias (representadas en el eje de las Y). Mediante estos datos se obtiene la distribución de probabilidades de Weibull la cual al compararse con los datos obtenidos permitirá saber la distribución de las velocidades de vientos.

Existen distintos softwares que obtienen la distribución de probabilidades de Weibull, uno de ellos es el Windographer (ver Figura 2.5) el cual se utilizo para la realización de esta tesis (ver capítulo 4).

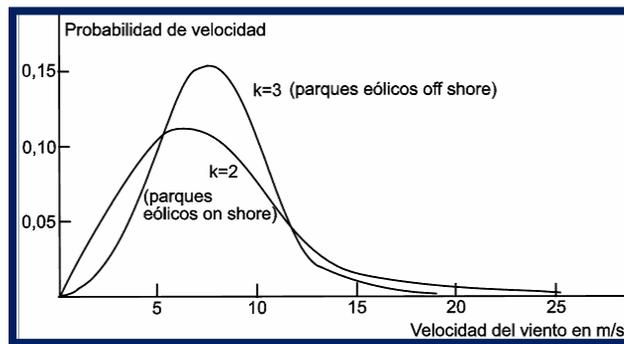


FIGURA 2.4 FUNCIÓN DE PROBABILIDAD DE WEIBULL (INIECO, 2011)

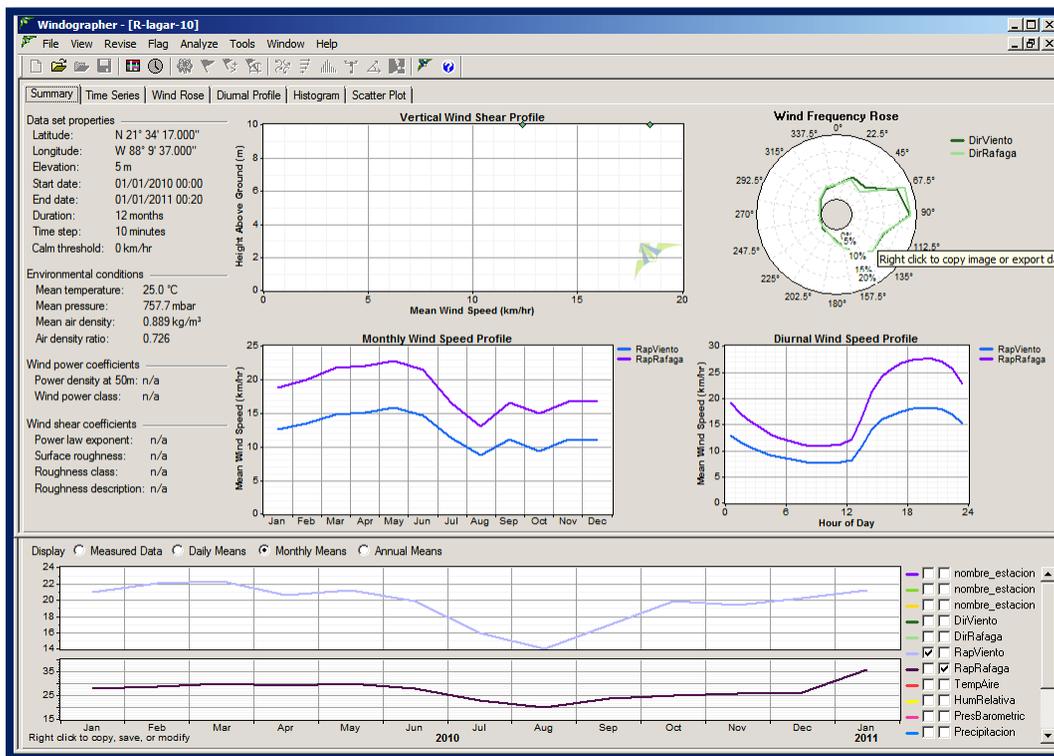


FIGURA 2.5 PANTALLA DE INICIO DE WINDOGRAPHER

Datos y Equipo

Capítulo III



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 (Sánchez, 2011).

OBTENCIÓN DE DATOS

A la hora de evaluar el viento hay que determinar las características del mismo, para lo cual habrá que considerar cada uno de los siguientes aspectos (Mur, 2005).

- Condiciones generales del viento en un emplazamiento (medias diarias, estacionales, anuales).
 - Datos de 10 minutos a 1 hora de promedio
 - Condiciones meteorológicas (temperatura, presión atmosférica, humedad relativa, densidad del aire).
 - Distribución de frecuencias de dirección.
 - Variación temporal de la velocidad.
 - Potencial eólico disponible.
- Características del viento para el funcionamiento del sistema.
 - Datos de 10 minutos a 1 hora de promedio.
 - Perfil vertical de velocidad horizontal.
 - Variaciones temporales.
 - Relaciones con la dirección.
 - Variación de la velocidad vertical.
 - Relaciones entre el viento vertical y la dirección.
 - Relaciones entre el viento vertical y el horizontal.
 - Datos de 1 minuto a 10 minutos de promedio.
 - Factores de ráfaga.
 - Relaciones entre la velocidad, dirección y factor de ráfagas.
 - Características de la turbulencia.
 - Relaciones entre dirección y turbulencia.
 - Relaciones entre velocidad y turbulencia.
 - Desviación de la velocidad.

TOMA DE MEDIDAS

La toma de medidas es la parte básica de la evaluación del potencial eólica ya que a partir de ellos se podrá conocer que tan viable es el lugar para un proyecto eólico. Es por esto que es necesario utilizar instrumentos perfectamente calibrados, cuyo único propósito sea el generar los datos de manera continua con el menor margen de error posible.

Los instrumentos de medida necesarios son:

- Anemómetros.
- Veletas.
- Termómetros.
- Barómetros.

La Figura 3.1 muestra los instrumentos típicos de medición de una estación anemométrica.

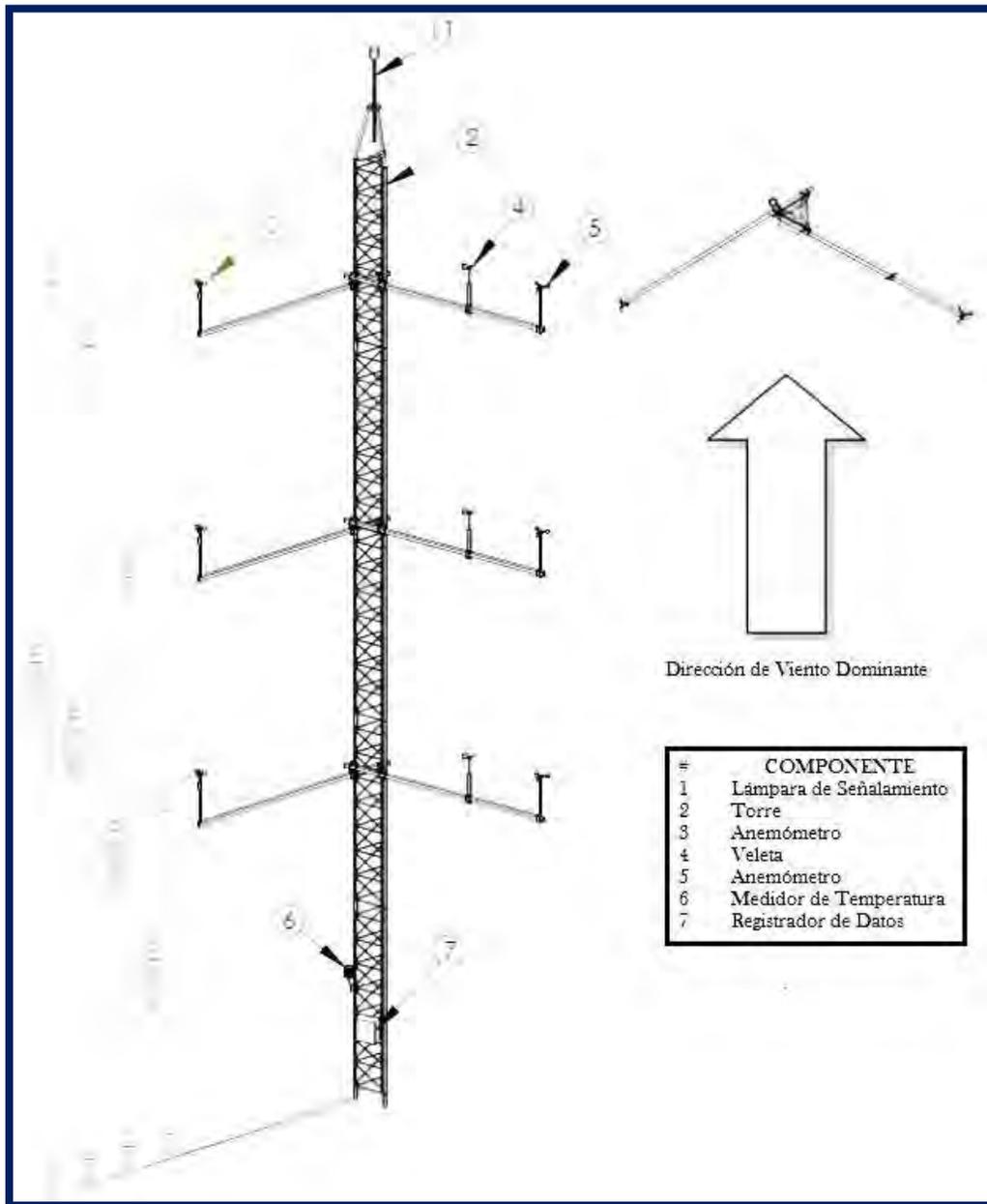


FIGURA 3.1 ESTACIÓN ANEMOMÉTRICA (NYSERDA, 2010)

Anemómetros

Son los sensores utilizados para determinar la velocidad del viento. Pueden clasificarse según su principio de operación.

- Transferencia de Momento: copa, propela y placas de presión.
- Presión en sensores estacionarios: tubos de pitot y esferas de arrastre.
- Transferencia de calor: alambres y películas calientes.
- Métodos especiales: desplazamiento de iones, desplazamiento de vórtices, etc.



FIGURA 3.2 ANEMÓMETRO DE COPAS (WWW.NRGSYSTEMS.COM/2013)

A pesar de la gran cantidad de instrumentos disponibles, el más utilizado para aplicaciones de energía eólica es el anemómetro de copas (ver Figura 3.2), el cual consta de tres o cuatro copas conectadas a un eje vertical para su rotación, en el 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. 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 para ajustar esta señal con valores de compensación electrónica y realizar el cálculo de velocidad de viento.

Veletas

El sensor empleado normalmente para medir la dirección del viento es la veleta, la cual consiste en un dispositivo montado sobre un eje vertical y de giro libre, con un contrapeso en uno de los extremos de tal modo que puede moverse cuando el viento cambia de dirección (ver figura 3.3). Normalmente, el movimiento de la veleta está amortiguado para prevenir cambios demasiado rápidos de la dirección del viento. La veleta es movida a velocidades de viento igual o mayores a 1 *m/s*.



FIGURA 3.3 VELETA (WWW.NRGSYSTEMS.COM/2013)

La mayoría de las veletas tienen un potenciómetro como transductor, que convierte la posición en señal eléctrica, la señal eléctrica es transmitida por un conductor hasta un registrador de datos. El registrador de datos envía un voltaje de tensión conocida a través del potenciómetro, donde la tensión de caída es registrada, la relación entre estos dos voltajes determina la posición de la veleta comprendida entre 0° y 359° .

Termómetros

Para determinar la densidad del aire es necesario registrar la temperatura ambiente y la presión atmosférica.

Para la medida de la temperatura ambiente se utilizan termómetros, los cuales para evitar el calentamiento excesivo del sensor por efecto del sol y evitar así medidas erróneas, es introducido dentro de una pantalla de protección de la radiación solar (ver figura 3.4).

En ocasiones, estos dispositivos incorporan también un sensor para la medición de humedad relativa, siendo en realidad termohigrómetros.



FIGURA 3.4 TERMÓMETRO (WWW.NRGSYSTEMS.COM/2013)

El típico sensor de temperatura ambiente está constituido de tres partes: el transductor, un dispositivo de interface y una carcasa como radiador. El material del que está hecho el transductor es generalmente níquel (Ni) o platino (Pt) con una relación entre su resistencia y temperatura, los elementos utilizados en estos sensores son los termistores 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.

Barómetros

La medida de la presión atmosférica se realiza mediante un barómetro (ver figura 3.5).

Generalmente el barómetro se instala al pie de la estación anemométrica, en el interior de un armario junto al sistema de adquisición de datos y las baterías.



FIGURA 3.5 BARÓMETRO (WWW.NRGSYSTEMS.COM/2013)

Existen muchos tipos de barómetros, 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 operación.

Sistema de adquisición de datos (SAD)

Todas las señales generadas por los sensores anteriores se introducen en un SAD, que es un dispositivo electrónico que va registrando los datos (ver Figura 3.6). Tiene una capacidad de procesamiento limitado, que permite transformar las señales eléctricas que llegan a los sensores en valores físicos asociados con la variable en cuestión, además de realizar sencillos cálculos estadísticos sobre un determinado periodo de muestreo.

El SAD toma registros puntuales cada pocos segundos durante el periodo definido, presentando las medias para ese intervalo de todas las magnitudes registradas.

Algunos registradores de datos se comunican con un ordenador personal y utilizan software específico para activar el registrador de datos, ver y analizar los datos recogidos, mientras que otros tienen un dispositivo de interfaz local (teclado, pantalla LCD) y puede ser utilizado como un dispositivo independiente.



FIGURA 3.6 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS (WWW.NRGSYSTEMS.COM/2013)

ESTACIONES DE MEDICIÓN

Los datos utilizados en esta investigación provienen de tres tipos de estaciones meteorológicas, las cuales se describen a continuación:

- Estación Meteorológica Automática (EMA): recopila y monitorea algunas variables meteorológicas del sitio donde está estratégicamente colocada. Genera archivos promedio cada 10 minutos de 600 mediciones, de cada una de las variables, esta información es enviada vía satélite en intervalos de 1 ó 3 horas. La EMA puede ir montada en dos tipos de estructuras; andamio (ver Figura 3.7) o torre (ver Figura 3.8).
- Estación Sinóptica Meteorológica (ESIME): a diferencia de la estación automática, esta se encuentra ubicada exclusivamente en los observatorios meteorológicos y cada tres horas envía un mensaje sinóptico el cual es un reporte generado simultáneamente que presenta información meteorológica del tiempo presente y pasado de manera codificada. La ESIME va montada en una estructura tipo torre (ver figura 3.8).
- Estación Meteorológica Weatherhawk: estación de tipo básico, dada su sencillez puede ir montada en un tubo o mástil (ver Figura 3.9). La información de sus variables medidas es transmitida a un SAD el cual puede enviar la información a un computador remoto (hasta 800mts).

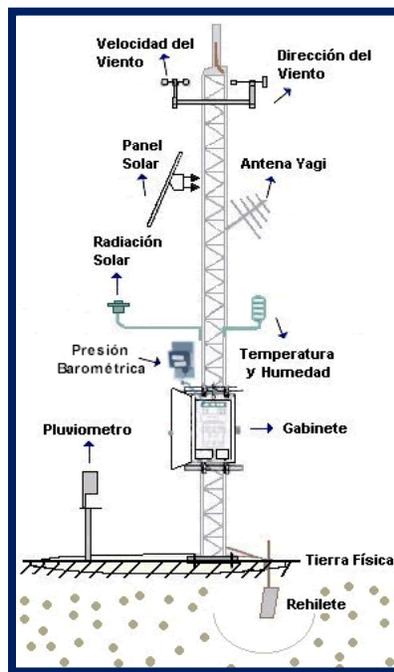


FIGURA 3.7 ESTACIÓN METEOROLÓGICA TIPO ANDAMIO (SMN.CNA.GOB.MX/EMAS/)

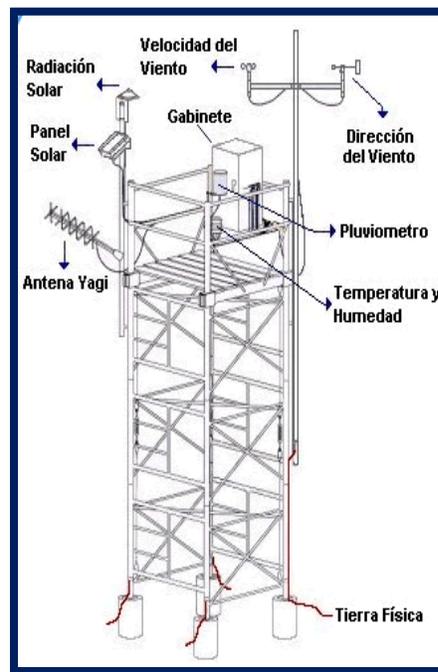


FIGURA 3.8 ESTACIÓN METEOROLÓGICA TIPO TORRE (SMN.CNA.GOB.MX/EMAS/)



FIGURA 3.9 ESTACIÓN WEATHERHAK

Los datos utilizados para la elaboración de este trabajo son pertenecientes a las siguientes dependencias:

- Servicio Meteorológico Nacional (SMN)
El Servicio Meteorológico Nacional cuenta con estaciones tipo EMA y ESIME las cuales además de los sensores de una estación anemométrica integran dos sensores más para medir:
 - Radiación solar global
 - Precipitación pluvial
- Secretaría de Marina (SEMAR)
Enlazadas al Servicio Meteorológico Nacional, los tipos de estaciones que utilizan son del tipo torre, semejantes a la Figura 3.8, contando con los sensores mencionados de una estación anemométrica, integrando un sensor de más, el de precipitación pluvial.
- Comisión de Energía del Estado de Quintana Roo (CENER)
Estación anemométrica del tipo Weatherhak (ver figura 3.9) que tiene añadidos los sensores de
 - Precipitación pluvial y
 - Radiación solar global

El mapa de la figura 3.10 muestra la ubicación de las principales estaciones en la península de Yucatán.



FIGURA 3.10 ESTACIONES METEOROLÓGICAS EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN

Estas estaciones son las que proporcionaron los datos que se analizarán en el siguiente capítulo.

Cabe señalar que la ubicación de las estaciones es de suma importancia para la validación de los datos ya que estas no deben tener obstáculos cercanos que impidan conocer el verdadero valor de las variables a medir. De entre las estaciones descritas anteriormente las mejor ubicadas son las del SMN ya que estas se encuentran alejadas de zonas muy pobladas y libres de obstáculos alrededor de ellas, contrario a algunas estaciones de la CENER las cuales se encuentran dentro de zonas urbanas y llegan a verse afectadas por edificios grandes alrededor de ellas.

La buena obtención de datos se puede apreciar al analizar los datos de velocidad de viento los cuales en la mayoría de las estaciones de la CENER son muy cercanas a 0 m/s mientras que en las estaciones del SMN los valores son relativamente altos (mayores a 5 m/s). Esto es de suma importancia ya que fue un filtro que permitió escoger las estaciones que se analizaron, las cuales se detallan en el siguiente capítulo.

Resultados

Capítulo IV



Al analizar el recurso eólico se determina que tan factible es la obtención de energía eólica en un lugar. De entre las estaciones con que se contaban, fueron elegidas seis de ellas del litoral superior de la península de Yucatán, las cuales se encuentran en la costa, libres de obstáculos que puedan afectar los valores de medición.

Las estaciones seleccionadas para este trabajo son una parte representativa del litoral superior de la península de Yucatán siendo este el primer punto por cual fueron seleccionadas, el segundo punto fue la velocidad de viento, escogiendo las que mejores valores presentaron.

La ubicación de cada estación es presentada en la tabla 4.1:

TABLA 4.1 ESTACIONES SELECCIONADAS

Estado	Lugar	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)
Yucatán	Dzilam	21°23'26"	88°54'15"	2
Yucatán	Rio Lagartos	21°34'17"	88°09'37"	5
Yucatán	Progreso	21°18'00"	89°39'00"	2
Yucatán	Isla Pérez	22°23'03"	89°40'55"	3
Quintana Roo	Cancún	21°01'46"	86°51'08"	4
Quintana Roo	Holbox	21°31'23.6"	87°22'43.4"	8



FIGURA 4.1 ESTACIONES ANALIZADAS



La información histórica de las estaciones fue obtenida en formato Excel (extensión .xlsx), los cuales fueron revisados para encontrar cualquier inconsistencia que pudiera afectar su posterior proceso, se ordenaron según el nombre del lugar donde se encuentra cada estación, su año y mes correspondiente. Una vez filtrados los datos se eligió el año a analizar el cual correspondió al 2010 ya que este año es el mas reciente que con el cual se contaba. Estos libros de Excel fueron introducidos al software Windographer (extensión .windog), el cual permitió analizar el viento en cada una de las estaciones.

El Windographer permitirá obtener distintas graficas las cuales representan el comportamiento del viento.

Los datos que pueden introducirse a Windographer son:

- Dirección de viento
- Dirección de ráfaga
- Velocidad de viento
- Velocidad de ráfaga
- Temperatura del aire
- Humedad relativa
- Presión barométrica
- Precipitación
- Radiación solar

Sin embargo, para este trabajo sólo se utilizaron los relacionados al viento, temperatura y presión.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de cada una de las estaciones.

DZILAM

De un total de 52,562 datos el 99.68% de ellos fueron válidos a partir de los cuales se obtuvieron los siguientes resultados.

VELOCIDADES MEDIAS

La Figura 4.2 nos muestra las velocidades a través de los meses las cuales se mantienen en un rango de 14 a 21 km/h (3.8 a 5.8 m/s), siendo la primera mitad del año la que mayores velocidades alcanza, llegando a tener rachas de 30 km/h (8.3 m/s), además se puede apreciar que la diferencia de velocidades entre la media y la ráfaga se mantiene casi constante. La velocidad promedio del año fue de 19.4 km/h (5.38 m/s).

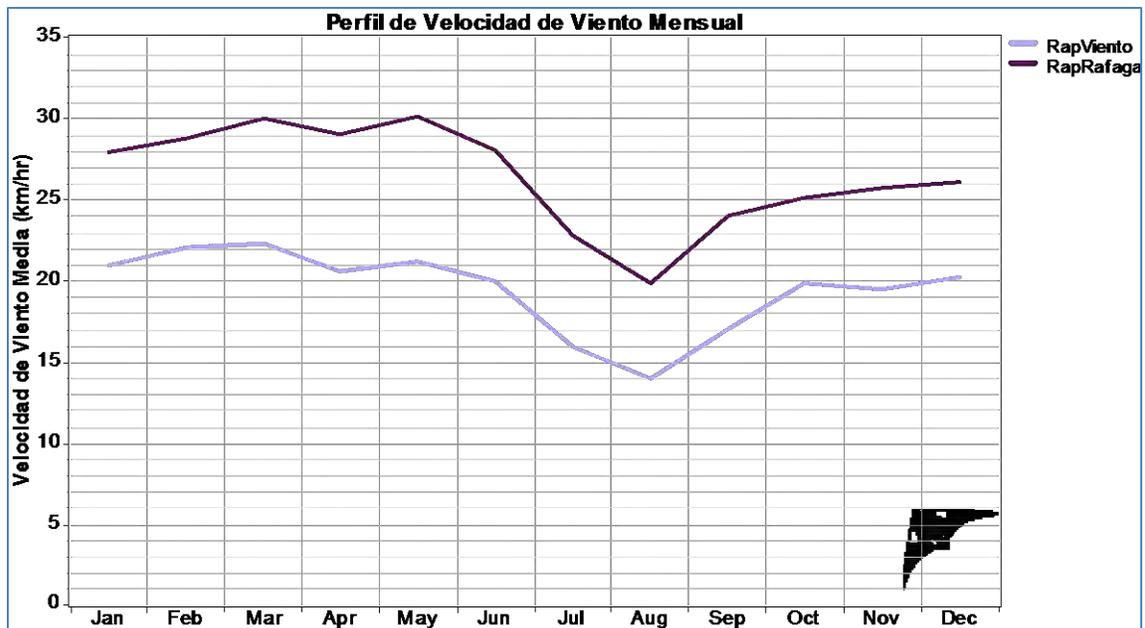


FIGURA 4.2 VELOCIDADES MEDIAS DE VIENTO POR MES EN DZILAM

ROSA DE LOS VIENTOS

La manera de representar la frecuencia de vientos es mediante la rosa de los vientos la cual representa los 16 sectores geográficos en los que se puede presentar el viento (Pérez, 2012).

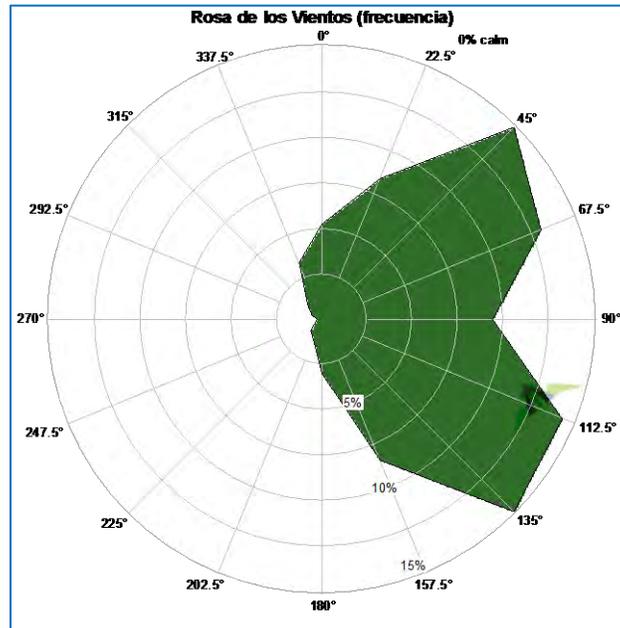


FIGURA 4.3 ROSA DE LOS VIENTOS POR FRECUENCIA EN DZILAM

Dado que el norte en la rosa de los vientos es representado por 0° ó 360° , entonces se puede deducir de la Figura 4.3 que el viento tiene una mayor frecuencia hacia la dirección este, manteniéndose la mayor parte del tiempo en un ángulo de 90° el cual va de los 45° (noroeste) a los 135° (sureste).



PERFIL DIURNO

El perfil diario medio permite ver las velocidades medias que tomó el viento durante las 24 horas del día en todo el año de medición (ver Figura 4.4). En el caso de Dzilam puede verse un marcado descenso de velocidades a medida que transcurre la mañana llegando a un punto mínimo entre las 8 y 11 en el cual se tiene una velocidad cercana a los 14 km/h (3.8 m/s), a medida que el día transcurre comienza el ascenso hasta llegar a su punto máximo entre las 21 y 22 horas con una velocidad cercana a los 27 km/h (7.5 m/s) a partir de esta hora comienza el descenso con lo cual el ciclo se repite.

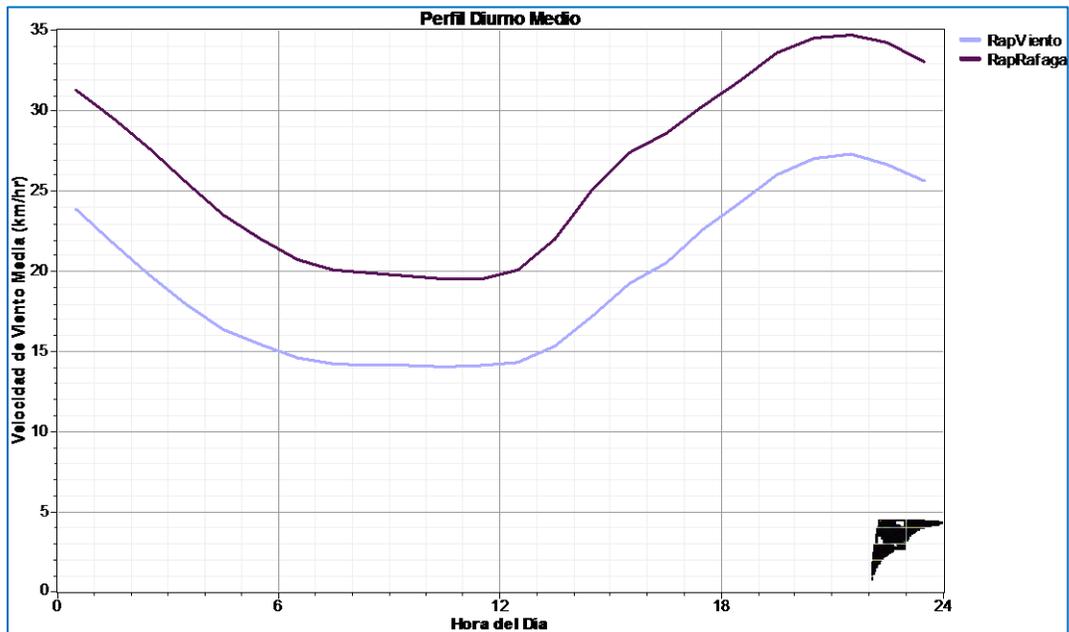


FIGURA 4.4 PERFIL DIURNO MEDIO EN DZILAM



ROSA DE VELOCIDADES MEDIAS DE VIENTO

A diferencia de la primer rosa de los vientos, la cual muestra la frecuencia de vientos, en la Figura 4.5 se observan las velocidades medias que se obtuvieron en cada dirección. La primer rosa mostraba una mayor frecuencia de vientos entre 45° y 135° sin embargo ahora se observa que no necesariamente estos vientos son los mejores, ya que según la Figura 4.5 las velocidades mas altas se encuentran entre los 292.5° (noroeste) y 67.5° (noroeste), siendo estos los que ocurren con menor frecuencia.

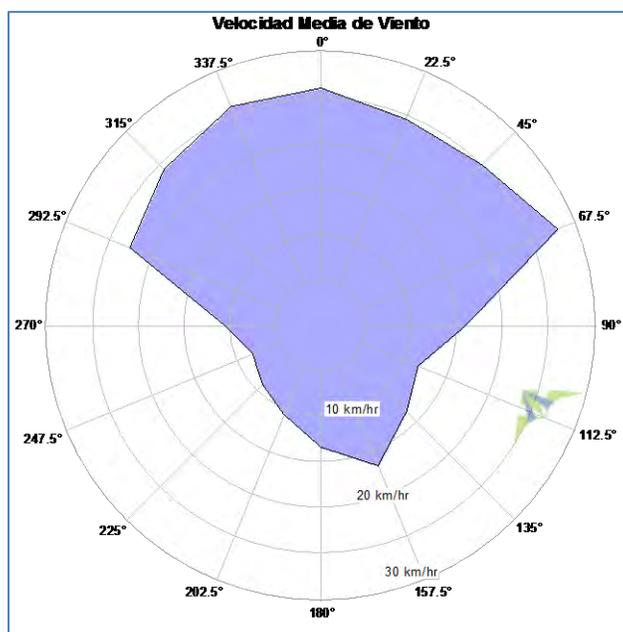


FIGURA 4.5 VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN DZILAM

Sin embargo, a los 67.5° se presentan los vientos con una velocidad mayor aun cuando la temporada sea de vientos bajos tal como se ve en la Figura 4.5 y 4.6 los cuales representan los meses con velocidades de viento mas altas y mas bajas respectivamente, presentando además una alta frecuencia de ellos.

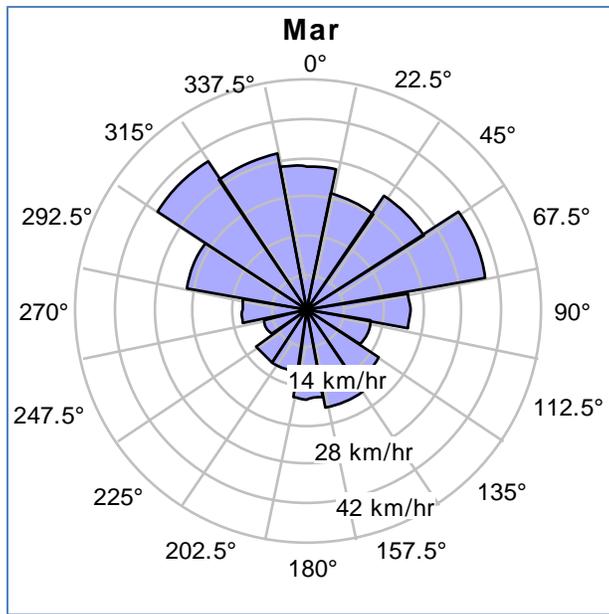


FIGURA 4.6 VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO PARA EL MES DE MARZO EN DZILAM

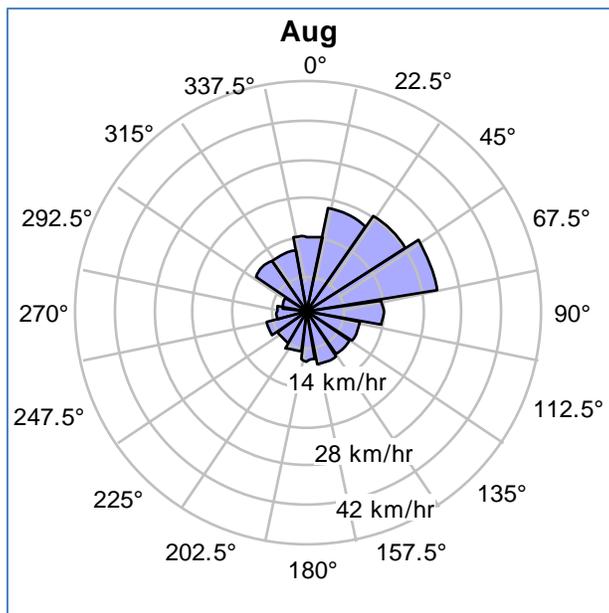


FIGURA 4.7 VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO PARA EL MES DE AGOSTO EN DZILAM



FUNCIÓN DE PROBABILIDAD DE WEIBULL

La función de probabilidad de distribución permite caracterizar el viento, es decir saber la distribución de velocidades de viento. De acuerdo a la Figura 4.8, para el caso de Dzilam, se determinó que la mayor frecuencia de vientos se da entre los 10 y 25 km/h (2.7 y 6.9 m/s), sin embargo en la zona de vientos de 15 a 25 km/h (4.1 a 6.9 m/s) los valores obtenidos no coinciden del todo con la gráfica de Weibull obtenida, esta parte se compensa con los vientos cercanos a los 10 km/h (2.7 m/s).

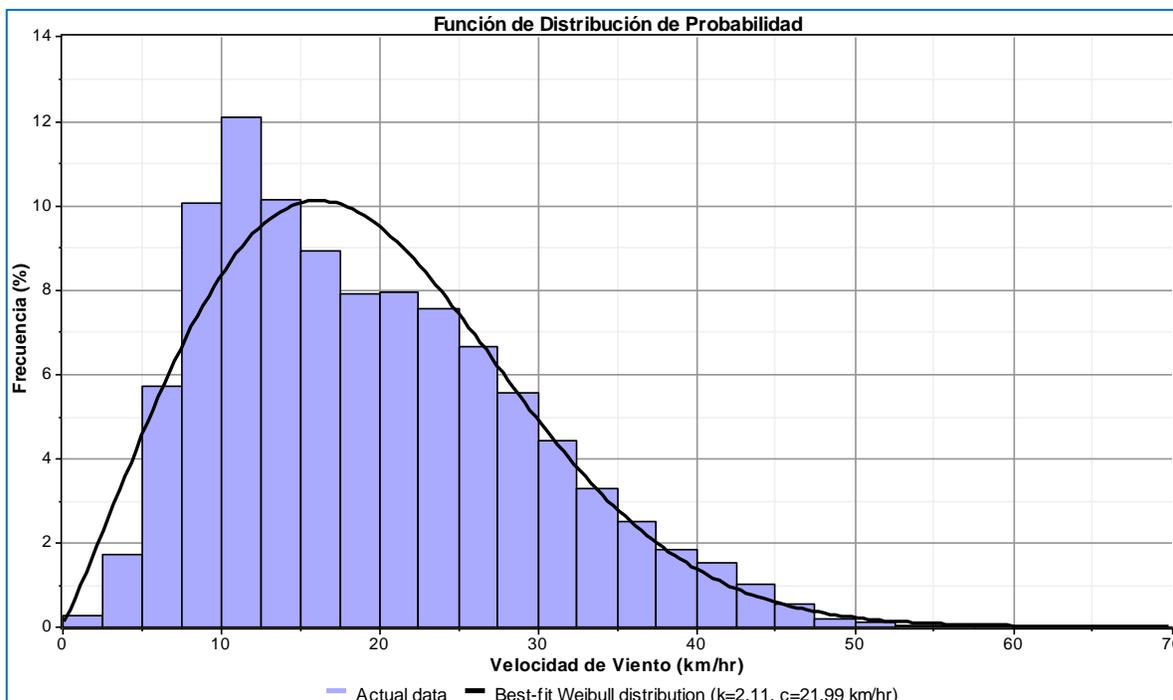


FIGURA 4.8 DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD DE WEIBULL EN DZILAM

Estas zonas serán entonces las que a futuro presentarán un margen de exactitud menor con respecto a las demás velocidades de viento.

A pesar que los vientos se encuentran bastante dispersos, estos mantienen uniformidad lo cual se refleja en que el factor de forma k sea igual a 2.11, con un factor de escala igual a 21.99 km/h (6.10 m/s), reflejado en la altura de la gráfica de Weibull.

PRESIÓN BAROMÉTRICA, TEMPERATURA Y DENSIDAD DE AIRE

Como se mencionó en el Capítulo 2, contando con los datos de temperatura y presión atmosférica se puede obtener la densidad de aire utilizando la ecuación 11. Sin embargo dependiendo de la altitud del lugar y la temperatura media pueden tomarse datos normalizados para la obtención de la densidad de aire.

En la Figura 4.9 se encuentran los datos obtenidos de temperatura y presión atmosférica. En el caso de la temperatura se puede apreciar que estas oscilan entre los 21° y los 28° C,

presentando las temperaturas más bajas en invierno, y las más altas durante los meses de mayo a septiembre. Durante los meses de diciembre a enero se llevó a cabo un cambio muy drástico ya que el aumento de un mes a otro fue de 8° C.



FIGURA 1.9 PRESIÓN BAROMÉTRICA Y TEMPERATURA EN DZILAM

La presión barométrica se mantiene estable en los 1000 mbar de enero a junio, sin embargo ocurre un error en la transmisión de datos del barómetro provoca que durante los meses de julio a octubre se tengan presiones de 0 mbar. Este error se ve reflejado en la figura 4.10 de densidad de aire donde de igual manera los meses afectados presentan valores iguales a 0 kg/m³. El resto de los meses mantiene una densidad de aire cercana a los 1.26 kg/m³.



FIGURA 4.10 DENSIDAD DE AIRE EN DZILAM

La Tabla 4.1 muestra los valores medios, mínimos y máximos anuales obtenidos.

TABLA 4.4 VALORES ANUALES DE TEMPERATURA, PRESIÓN Y DENSIDAD

	Media	Min	Max
Temperatura (°C)	25.14	9.7	38.4
Presión (mbar)	1,015.6	1,000.9	1,030
Densidad de Aire (kg/m ³)	1.19	1.12	1.26

POTENCIA ENERGÉTICA

De los datos de presión atmosférica y temperatura del aire obtenido se puede calcular la densidad del aire, con la cual se calcula la potencia energética del viento o densidad de potencia del viento. El parámetro anterior se utiliza como indicador de la cantidad de energía posible a obtener en el lugar.

La potencia energética del viento obtenidos en Dzilam (ver figura 4.11) es un su mayoría cercana a los 300 W/m^2 en las direcciones de 0° , 67.5° , 292.5° , 315° y 337.5° . Del resto de las direcciones se obtienen valores menores a los 240 W/m^2 . Se tiene entonces que los vientos con dirección noroeste son los que mejor densidad de potencia tienen, además de tener las velocidades más altas (ver Figura 4.5), sin embargo dado que su frecuencia es baja se espera que su energía total no sea muy alta. En lo que respecta a la dirección 67.5° se comprobó que es la mejor dirección para el aprovechamiento energético en Dzilam, al contar con los valores más altos en todos los resultados.

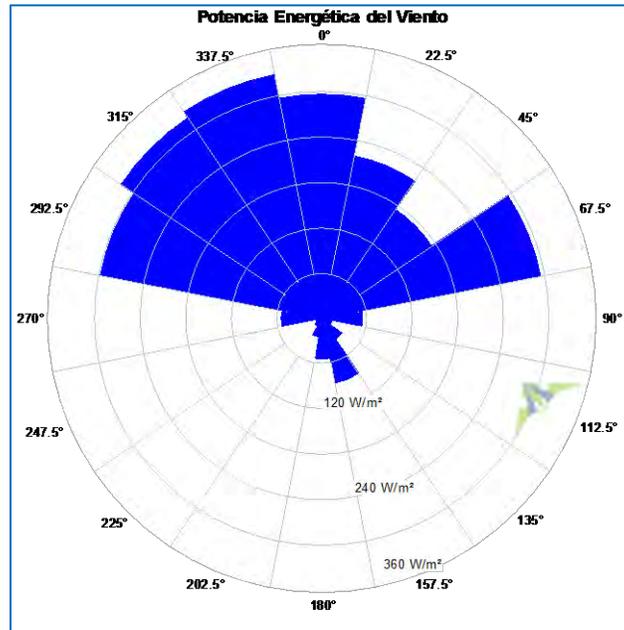


FIGURA 4.11 POTENCIA ENERGÉTICA DEL VIENTO EN DZILAM

ENERGÍA TOTAL

Como se ha mencionado la mayor cantidad de energía se obtiene de los vientos de mayor magnitud, sin embargo, si estos no tienen la suficiente frecuencia no son de mucho provecho. La Figura 4.12 muestra la dirección en la cual se obtiene mayor energía. Claramente se puede ver que hacia los 67.5° es donde la energía tiene una frecuencia mucho mayor al resto, al contar con casi un 30% de ella.

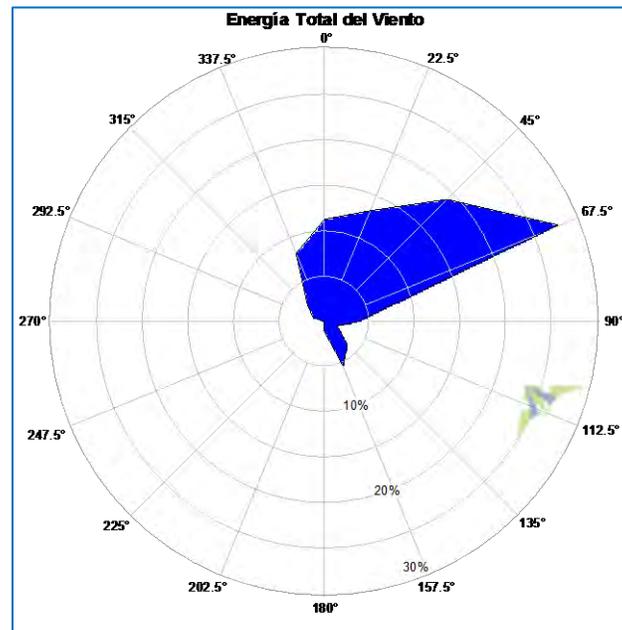


FIGURA 4.12 ENERGÍA TOTAL DEL VIENTO EN DZILAM

Luego de haber observado las diferentes rosas de los vientos se puede corroborar que el mejor ángulo de aprovechamiento es a los 67.5° ya que es en esta zona donde se presentan vientos de mayor velocidad, frecuencia, y además resultó tener una mejor densidad de potencia respecto a las demás direcciones. Al comparar estas rosas también se observa que a pesar de que una de las direcciones con mayor frecuencia de vientos se da hacia el sureste estos no son lo suficientemente altos para producir energía, ocurriendo lo inverso en la parte noroeste donde se produce energía a pesar de que la frecuencia de los vientos en tales direcciones es muy baja.

RIO LAGARTOS

De esta estación se obtuvieron 52,562 datos de los cuales el 99.68% de ellos fueron válidos correspondientes al año 2010. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

VELOCIDADES MEDIAS

Las velocidades de vientos se mantienen entre los 10 y 15 km/h (2.7 y 4.1 m/s) durante 9 meses del año, siendo los meses de abril y mayo los de mayor magnitud. Podría decirse entonces que la primera mitad del año es la que presenta los mejores vientos, y es a partir de junio que estas velocidades empiezan a descender hasta un mínimo cercano a los 9 km/h (2.5 m/s) en el mes de agosto donde poco a poco empiezan a subir repitiéndose el ciclo.

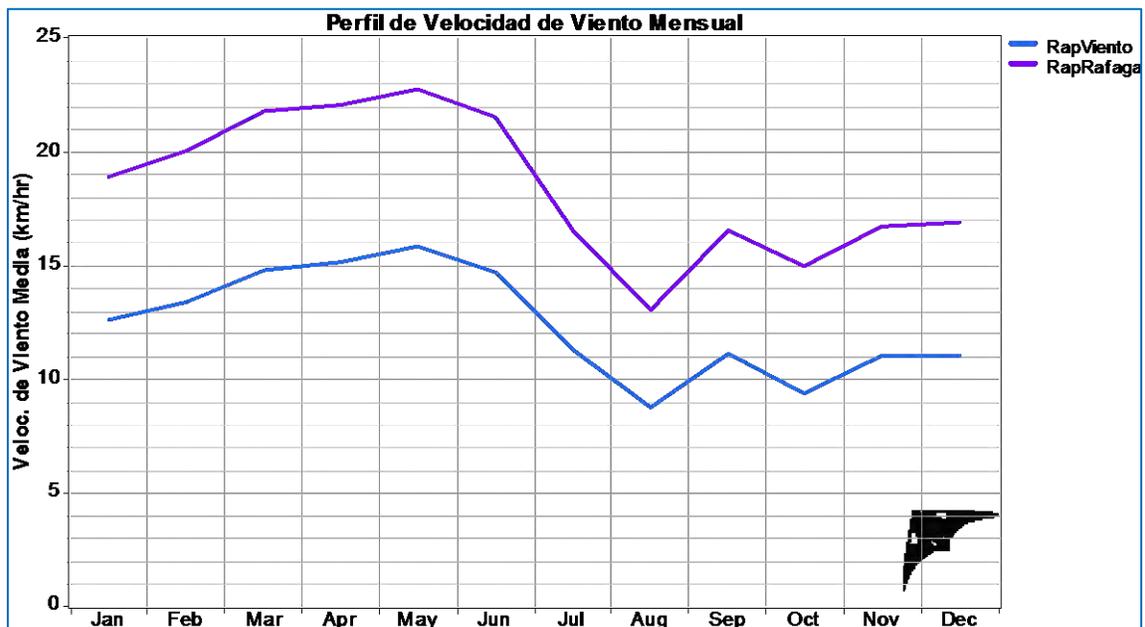


FIGURA 4.13 VELOCIDADES MEDIAS DEL VIENTO POR MES EN RIO LAGARTOS

ROSA DE LOS VIENTOS

La frecuencia de vientos se presenta en casi un 18% hacia los 90° o dirección este, siendo esta la de mayor frecuencia, aunque no muy por encima de los casi 16% hacia los 67.5°. El resto de las frecuencias se varía de los 337.5° (noroeste) a los 157.5° (suroeste) (ver Figura 4.14).

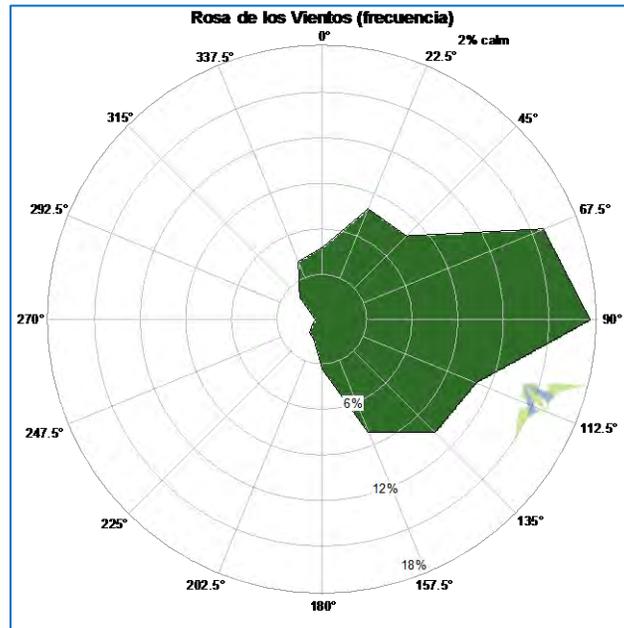


FIGURA 4.14 ROSA DE LOS VIENTOS POR FRECUENCIA EN RIO LAGARTOS

PERFIL DIURNO

Las velocidades medias por hora del día muestran un descenso conforme el día comienza (ver Figura 4.15). A las 0 horas la velocidad ya trae un descenso muy marcado, el cual al llegar a las 9 y 10 horas presenta su mínimo entre 7 y 8 km/h (1.9 y 2.2 m/s), a partir de las 11 horas la velocidad empieza a subir lentamente pero a las 12:30 horas sube con mucha rapidez hasta las 16 horas pasando de 8 a 17 km/h (2.2 a 4.7 m/s), de las 17 a las 21 horas el ascenso es menor manteniéndose en 18 km/h (5 m/s) hasta las 21 horas a partir de la cual comienza el descenso.

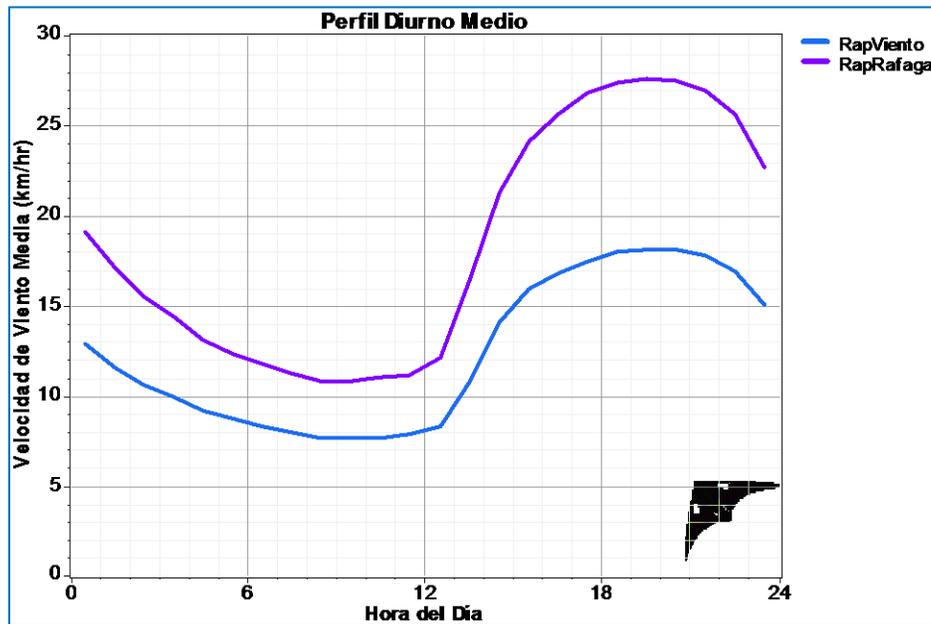


FIGURA 4.15 PERFIL DIURNO DE VELOCIDAD EN RIO LAGARTOS



ROSA DE VELOCIDADES MEDIAS DE VIENTO

Si bien las mayores frecuencias de viento se daban a los 90° (ver Figura 4.14), con las velocidades medias del viento no sucede lo mismo (ver figura 4.16). Las direcciones con mayores velocidades se dan hacia los 315°, 337.5° y 157.5° con velocidades cercanas a los 18 km/h (5 m/s). Los 90° presentan velocidades cercanas a los 15 km/h (4.1 m/s), el resto de las direcciones presentan velocidades medias menores a los 12 km/h (3.3 m/s).

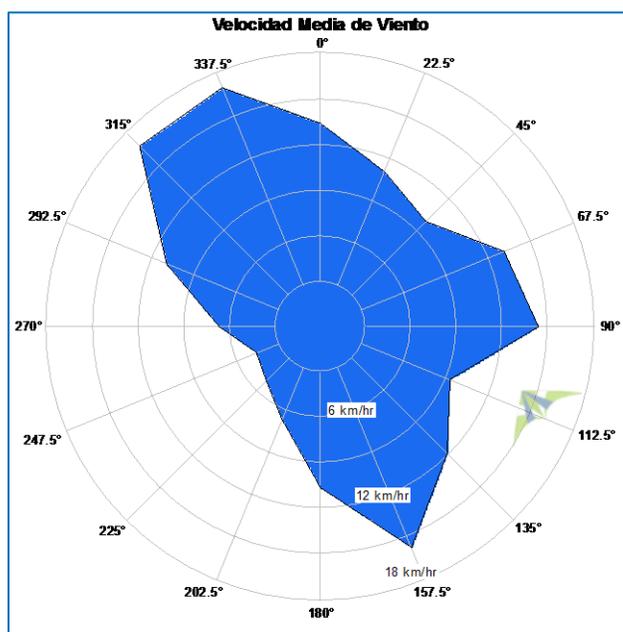


FIGURA 4.16 VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN RIO LAGARTOS

FUNCIÓN DE PROBABILIDAD DE WEIBULL

La Figura 4.17 permite ver que la mayor frecuencia de velocidades se presentará entre los 5 y los 15 km/h (1.3 y 4.1 m/s) lo cual es bastante disperso por lo tanto su factor de forma es de 1.91, mientras su valor de escala c es igual a 13.98 km/h (3.88 m/s). De esta gráfica se ve que las velocidades de viento de mayor magnitud, las cuales son de 20 km/h (5.5 m/s) presentarán una frecuencia apenas arriba del 3% y los vientos cercanos a 30 km/h (8.3 m/s) una frecuencia menor al 1%. Otro punto importante es el que la grafica obtenida tiene una buena coincidencia respecto a los valores medidos, por lo cual se puede concluir que los valores obtenidos de la distribución de Weibull son bastante cercanos a los reales.

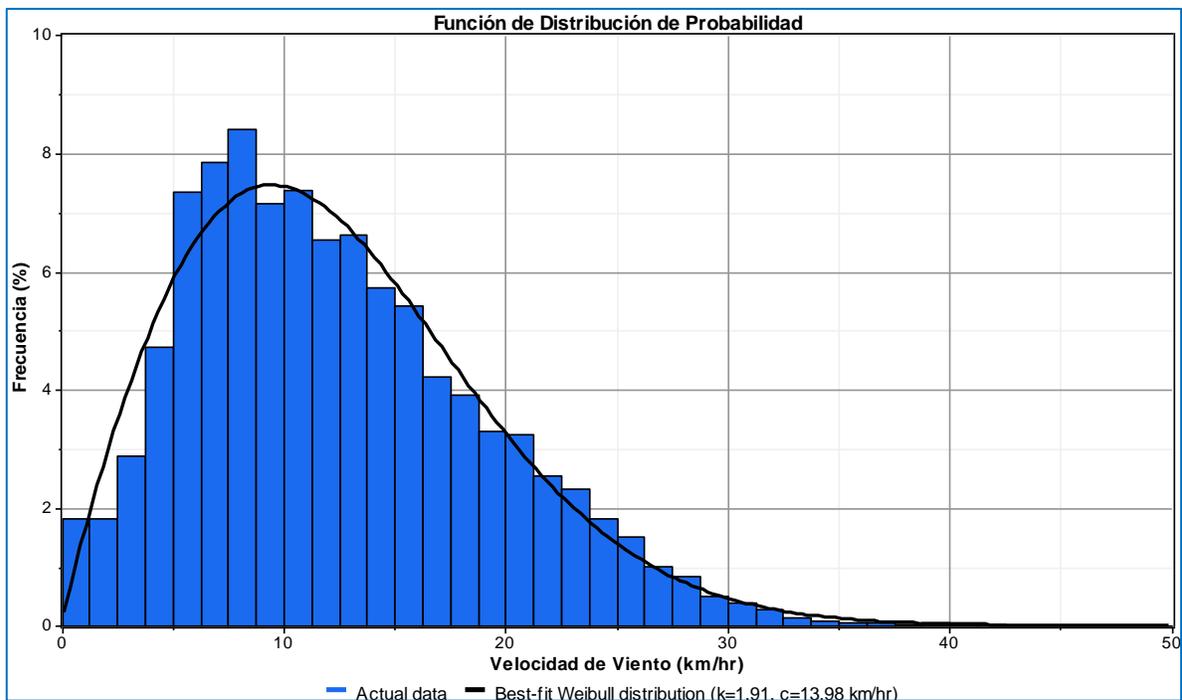


FIGURA 4.17 DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD DE WEIBULL EN RIO LAGARTOS

PRESIÓN BAROMÉTRICA, TEMPERATURA Y DENSIDAD DE AIRE

Como era de esperar las temperaturas de Río lagartos no variaron mucho con respecto a Dzilam debido a la cercanía que presentan, manteniéndose entre los 21° y los 29°, presentando los valores mínimos a principio y fin de año (ver Figura 4.18). Lo mismo ocurre con la presión barométrica, presentan valores parecidos, sin embargo igual que en la estación de Dzilam en esta estación ocurrió un error de comunicación con la lectura de presión barométrica durante los meses de julio a octubre lo cual se ve reflejado en la obtención de densidad de aire (ver Figura 4.19).



FIGURA 4.18 PRESIÓN BAROMÉTRICA Y TEMPERATURA EN RIO LAGARTOS

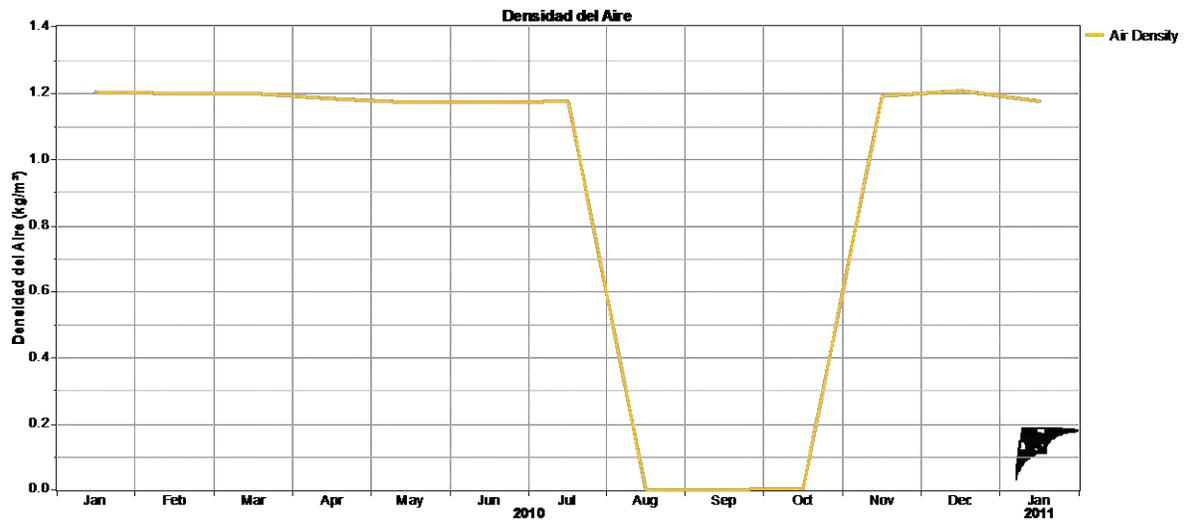


FIGURA 4.19 DENSIDAD DE AIRE EN RIO LAGARTOS

Las medias obtenidas así como los valores mínimos y máximos son presentadas en la Tabla 4.3.

TABLA 4.3 VALORES ANUALES DE TEMPERATURA, PRESIÓN Y DENSIDAD

	Media	Min	Max
Temperatura (°C)	24.97	9.5	37.7
Presión (mbar)	1,013.87	998.7	1,028
Densidad de Aire (kg/m3)	1.18	1.12	1.26



POTENCIA ENERGÉTICA

La potencia energética más alta se concentra en tres zonas. La parte noroeste con dirección 315° y 337.5° tiene densidades de potencia superiores a los 90 W/m². La zona suroeste con dirección 157.5° también presenta una densidad de potencia cercana a los 90°. La última zona con dirección este presenta densidades de potencia menores a los 64W/m² (ver Figura 4.20).

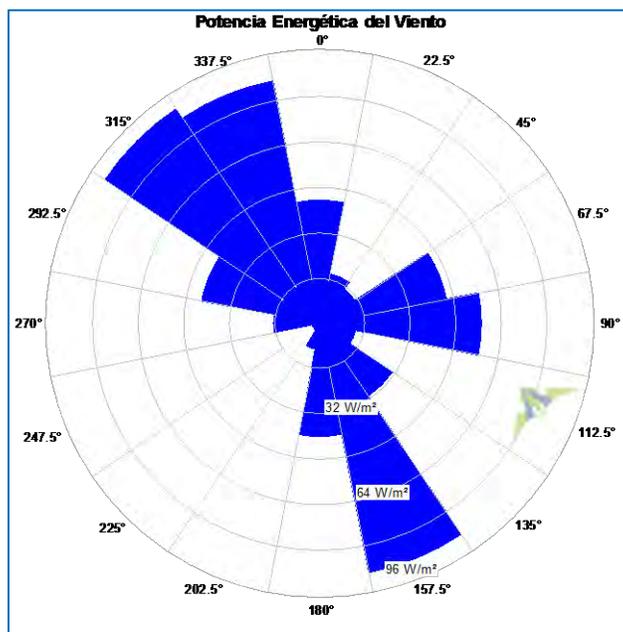


FIGURA 4.20 POTENCIA ENERGÉTICA DEL VIENTO EN RIO LAGARTOS

En general podría decirse que los resultados de potencia energética en Río Lagartos no son muy buenos ya que incluso comparados con los Dzilam puede verse que son valores muy bajos.

ENERGÍA TOTAL

La mayor energía que se obtiene del viento se da a los 90° con un 24% del total, a los 67.5° y 157.5° la energía obtenida es un cercana al 17%, mientras que las demás direcciones se reparten el resto del porcentaje con valores menores al 8% (ver Figura 4.21).

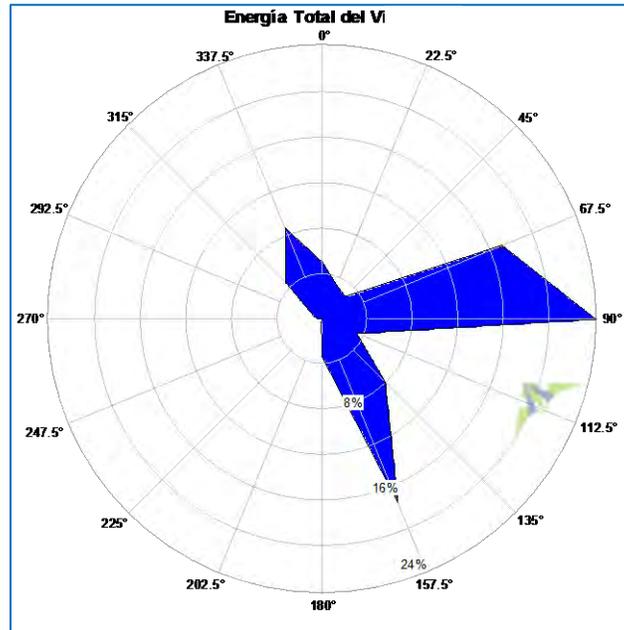


FIGURA 4.21 ENERGÍA TOTAL DEL VIENTO EN RIO LAGARTOS

Si se compara la energía total del viento con la densidad de potencia, se observa que la energía que se obtendrá de Río Lagartos no es muy alta ya que gran parte de la frecuencia se concentra en la zona este, hacia los 90° y esta zona tiene densidades de potencias menores a los 64 W/m² por lo que la única zona que mejor producción tendría es hacia los 157.5° donde se cuenta con casi el 17% de frecuencia y una densidad de potencia cercana a los 90 W/m².



PROGRESO

De un total de 24,178 datos que representan los meses de enero a junio del año 2010, el 99.58% (24,077) de ellos son datos válidos.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

VELOCIDADES MEDIAS

Los vientos son superiores a los 8 m/s y aunque los primeros meses suelen ser los de mejor viento, puede verse de la Figura 4.22 que estos vientos se mantuvieron casi estables durante el medio año medido, por lo que es de esperar que al descender el viento en los siguientes meses, esto no afecte en gran medida la cantidad de energía obtenida al año.

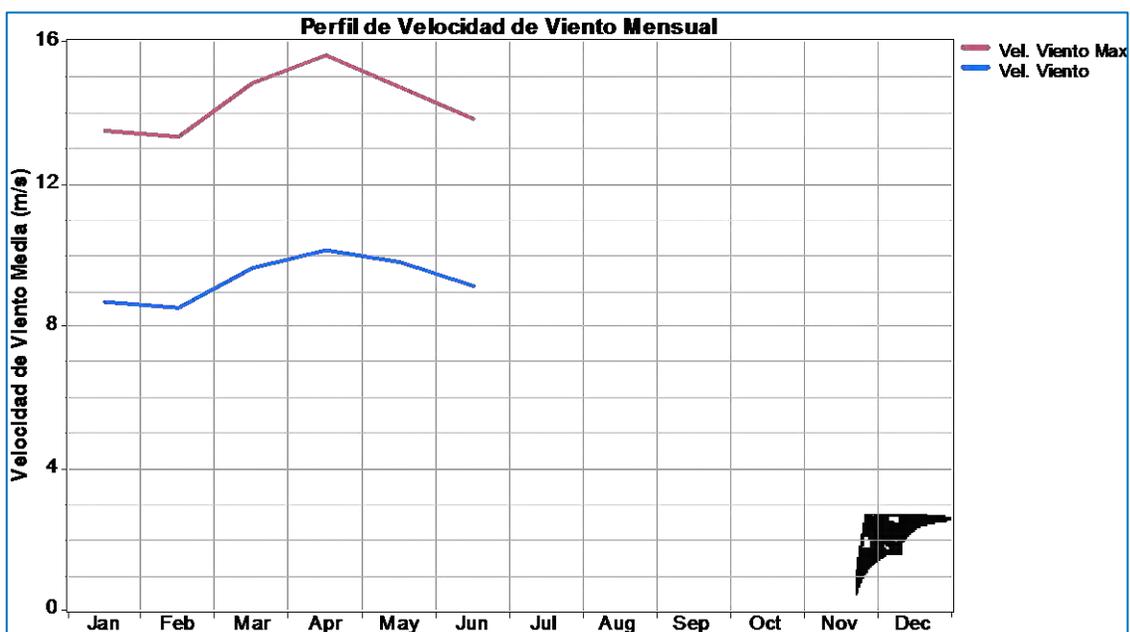


FIGURA 4.22 VELOCIDADES MEDIAS DEL VIENTO POR MES EN PROGRESO



ROSA DE LOS VIENTOS

Las mayores frecuencias de vientos ocurren en el rango de 0° a los 135° (ver Figura 4.23) lo cual nos indica que el viento con dirección Este es el predominante. A los 45° la frecuencia de vientos es mayor a 15% y muy cercana al 18%, siendo ésta dirección la dominante. Frecuencias mayores al 12% pero menores a 15% se presentan a los 90° y 67.5° . Frecuencias entre el 9% y el 12% se presentan a los 112.5° y 135° dejando el resto de las frecuencias a las demás direcciones.

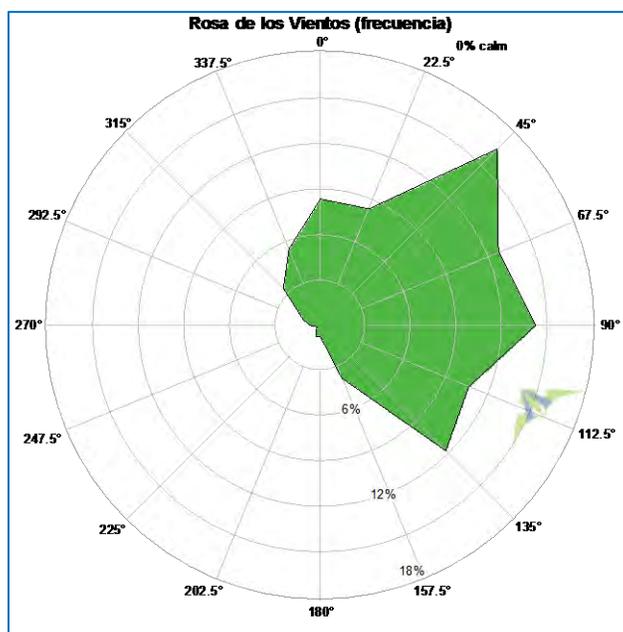


FIGURA 4.23 ROSA DE LOS VIENTOS POR MES EN PROGRESO(SEIS MESES)



PERFIL DIURNO

A pesar de que los datos obtenidos son de seis meses, se observa que se sigue con la tendencia del perfil diario de los anteriores lugares. Puede verse que el viento tiende a bajar conforme amanece (ver Figura 4.24). El punto mínimo se da entre las 5 y 6 horas con vientos apenas arriba de los 7 m/s. A partir de las 6 horas comienza el ascenso hasta llegar a su punto máximo entre las 16 y 18 horas con vientos apenas arriba de los 11 m/s, es en este punto cuando comienza el descenso y el ciclo se repite. Cabe resaltar que las ráfagas de viento no descienden de los 11 m/s, llegando hasta los 17 m/s.

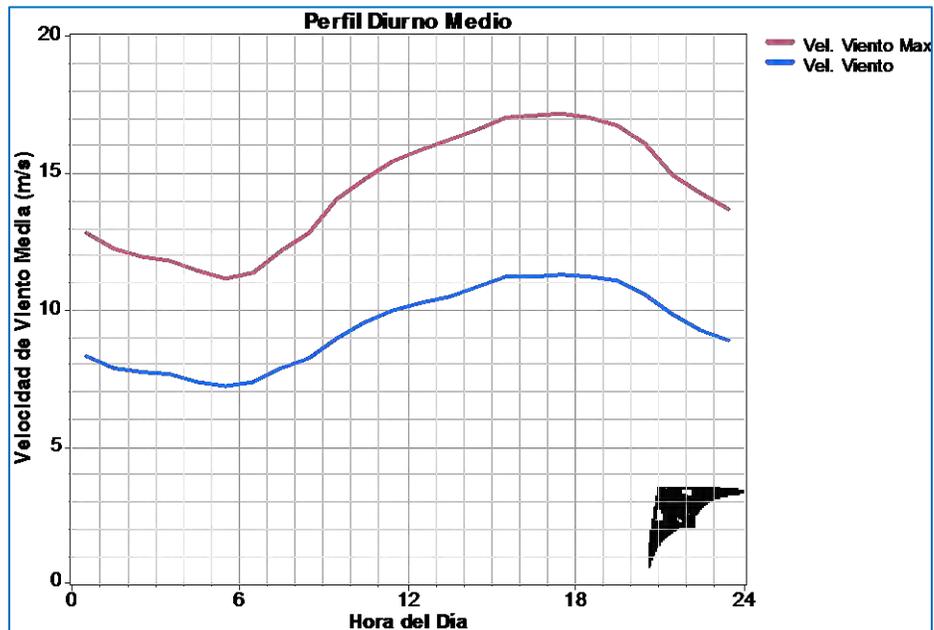


FIGURA 4.24 PERFIL DIURNO DE VELOCIDAD EN PROGRESO (SEIS MESES)



ROSA DE VELOCIDADES MEDIAS DEL VIENTO

En general puede verse en la Figura 4.25 que las velocidades se distribuyen en casi todas las direcciones, presentando altas velocidades en distintos sectores. Sin embargo, hay tres sectores que cuentan con velocidades superiores a los 10 m/s, estos sectores son a los 45°, 67.5° y 135°. A los 0°, 22.5°, 157.5°, 270°, 292.5°, 315° y 337.5° las velocidades son mayores a los 8 m/s y en la mayoría de los casos muy cercanas a los 10 m/s. El resto presentan velocidades menores a los 6 m/s.

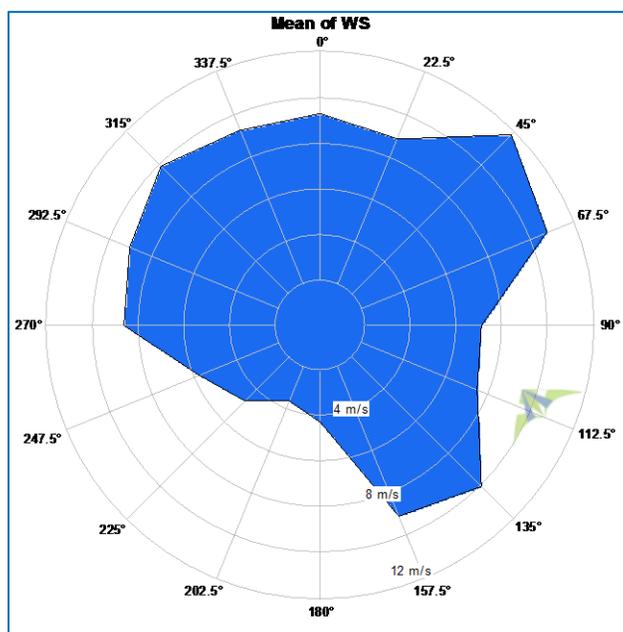


FIGURA 4.25 VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN PROGRESO (SEIS MESES)



FUNCIÓN DE PROBABILIDAD DE WEIBULL

En la distribución de probabilidad de Weibull obtenida (ver Figura 4.26) vemos una distribución muy uniforme presentando un factor de forma relativamente alto con un valor de 2.56 y factor de escala de 10.51 m/s. Se puede decir que con estos datos las probabilidades de tener buenos vientos son altas ya que la mayor frecuencia de ellos se da entre los 6 y 12 m/s, presentando buena cantidad de vientos altos los cuales al compararlos con la grafica de distribución de Weibull presentan una gran coincidencia. Otro punto importante es el que los datos no se encuentran tan dispersos sino que se concentran en un intervalo de 5 a 15 m/s, el resto de los vientos tienen frecuencias menores al 4%.

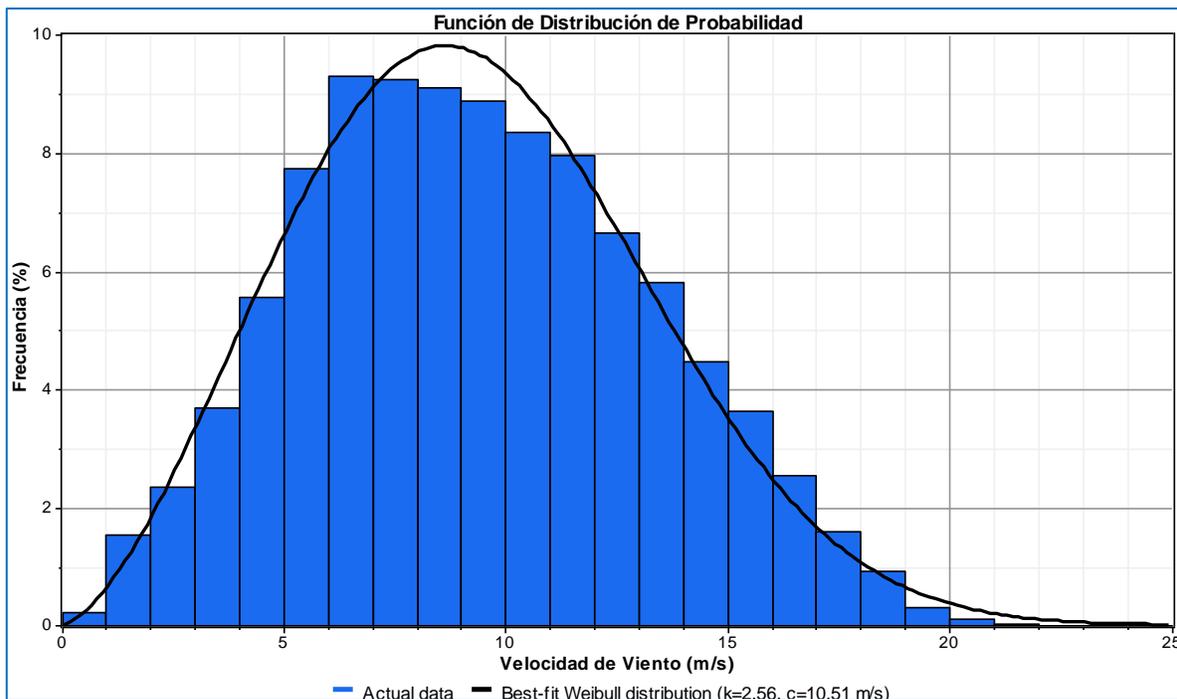


FIGURA 4.26 DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD DE WEIBULL EN PROGRESO (SEIS MESES)

PRESIÓN BAROMÉTRICA, TEMPERATURA Y DENSIDAD DE AIRE

Como en todo inicio de año las temperaturas son relativamente bajas, llegando a su máxima temperatura media durante los meses de mayo y junio. En el caso de la presión atmosférica puede notarse un descenso marcado durante el mes de febrero (ver Figura 4.27) el cual se refleja en la densidad de aire, sin embargo conforme la temperatura y la presión aumentan, la densidad desciende llegando a un mínimo de 1.04 kg/m^3 (ver Figura 4.28).

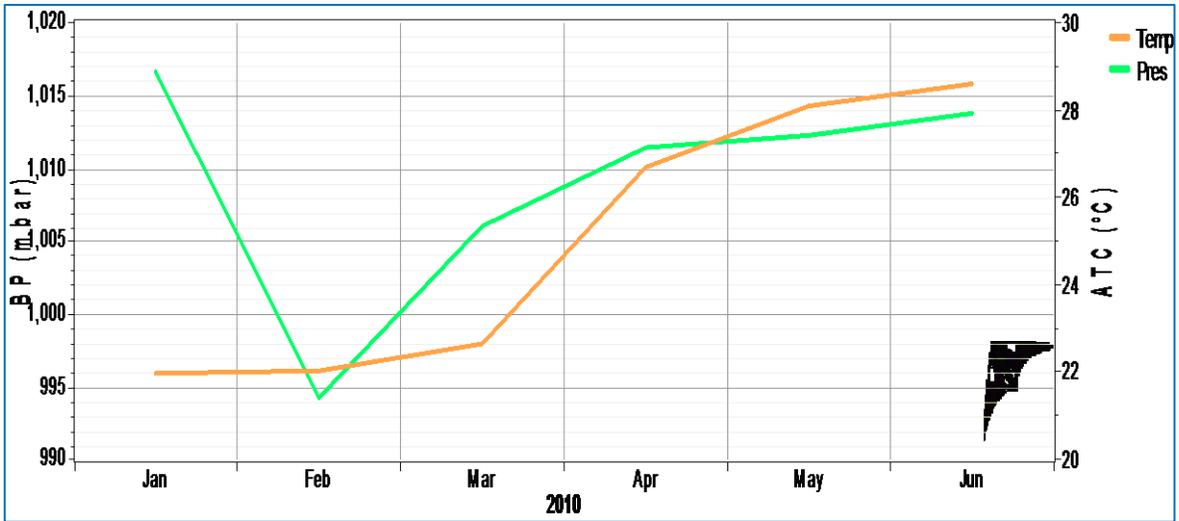


FIGURA 4.27 PRESIÓN BAROMÉTRICA Y TEMPERATURA EN PROGRESO

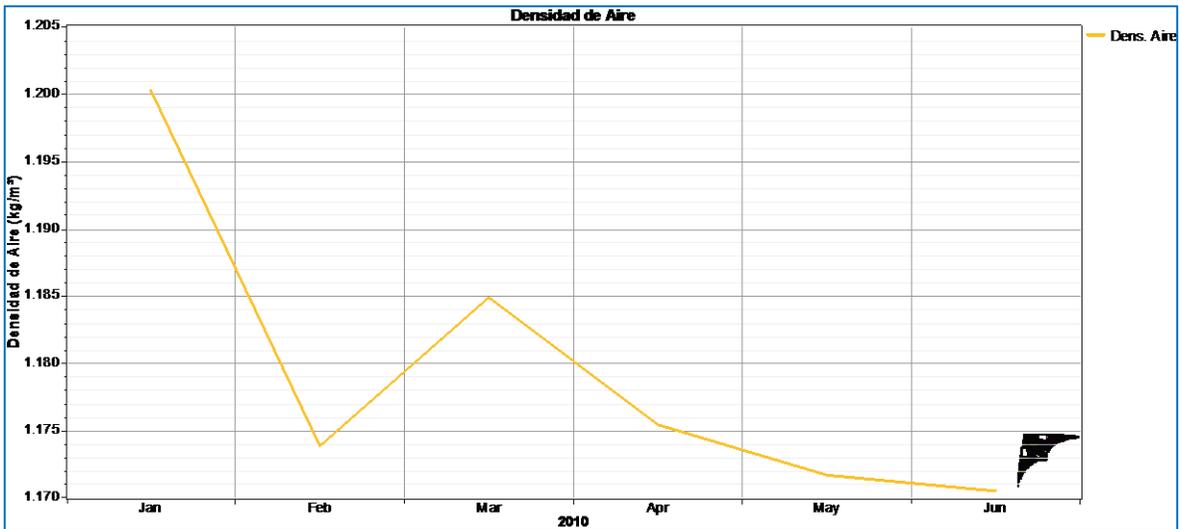


FIGURA 4.28 DENSIDAD DE AIRE EN PROGRESO

Los valores medios, mínimos y máximos se presentan en la Tabla 4.4.

TABLA 4.4 VALORES ANUALES DE TEMPERATURA, PRESIÓN Y DENSIDAD DE AIRE

	Media	Min	Max
Temperatura (°C)	24.73	10.5	39.7
Presión (mbar)	1,009	867	1,038
Densidad de Aire (kg/m3)	1.18	1.04	1.25



POTENCIA ENERGÉTICA

La potencia energética obtenida en Progreso fue en su gran mayoría superior a los 500 W/m² (ver Figura 4.29) superando a las demás estaciones por mucho. Con dirección 45° se tiene la mayor cantidad de potencia en todo Progreso la cual es de 1,250 W/m², le sigue la dirección 67.5° con una densidad de potencia apenas arriba de los 1000 W/m², hacia los 135° se cuenta con densidades de potencia cercanas a los 880 W/m², hacia los 157.5° se cuenta con 750 W/m², el resto de direcciones cuenta en su mayoría con densidades de potencia menores a los 750 W/m² pero mayores a 500 W/m², lo cual clasifica a Progreso como el lugar con valores mas altos de potencia energética, sin embargo, falta analizar la energía total.

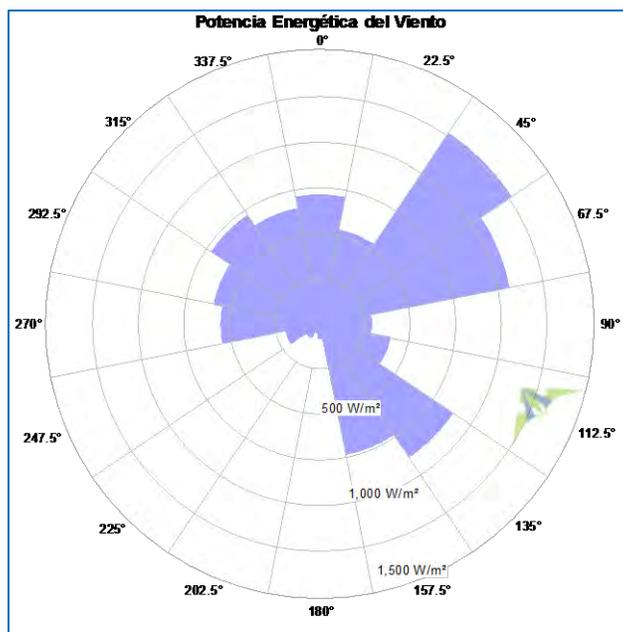


FIGURA 4.29 POTENCIA ENERGÉTICA DEL VIENTO EN PROGRESO (SEIS MESES)



ENERGÍA TOTAL

Hacia los 45° se obtiene la mayor cantidad de energía con más de un 25% del total, le sigue con casi un 20% los 67.5°, hacia los 135° se cuenta con cerca de 13% y el resto de direcciones se encuentra en la zona de calma (ver Figura 4.30).

Si se compara esta rosa con la de densidad de potencia se puede ver que hacia los 45° es donde mejor se aprovechará el viento ya que es la segunda dirección con mejor densidad de potencia y la primera en velocidades y frecuencia. El resto de la energía se reparte en los 67.5° y los 135° los cuales cuentan con buenas velocidades de viento y buena cantidad de frecuencia lo cual compensa su relativa baja densidad de potencia.

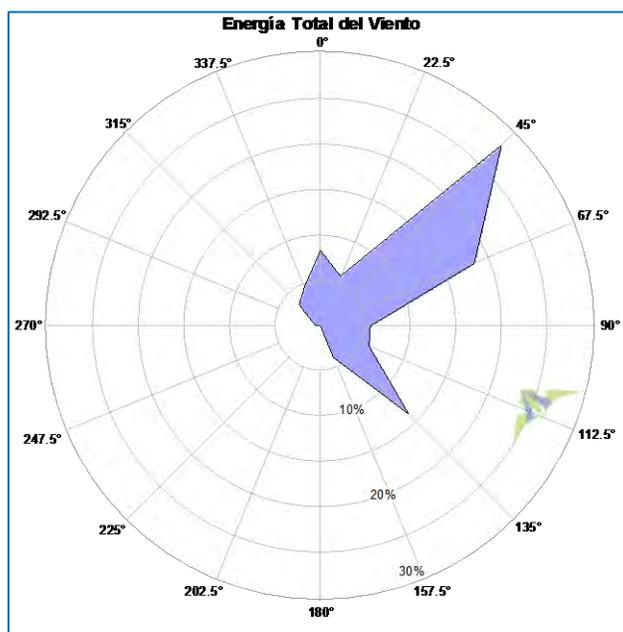


FIGURA 4.30 ENERGÍA TOTAL DEL VIENTO EN PROGRESO (SEIS MESES)

HOLBOX

De un total de 22,371 datos, solo el 36.65% fueron válidos es decir 8,198. Esto debido a que según la CENER, la estación presentaba fallas de comunicación y gran cantidad de la información no se pudo recuperar, de ahí que en algunos meses solo se tengan datos de algunos días. Desafortunadamente esta estación ya fue retirada y solo queda una estación de capitania de puerto en este lugar los cuales no compartieron su información. Aun así con los datos recabados se obtuvieron los siguientes resultados.

VELOCIDADES MEDIAS

Como puede verse en la Figura 4.31 los datos son muy pocos, sin embargo pueden proporcionar datos valiosos de lo que ocurre con los vientos en esa región. Como se ha visto en las anteriores graficas, las velocidades de viento mas altas se dan a principio y final de año por lo que se concluye que en lo que respecta a Holbox la mejor época de viento, con valores superiores a los 15 km/h (4.1 m/s) se dan en los meses de enero y febrero a partir del cual empieza a descender hasta el mes de julio que es cuando empieza a ascender a partir de los 5 km/h (1.3 m/s).

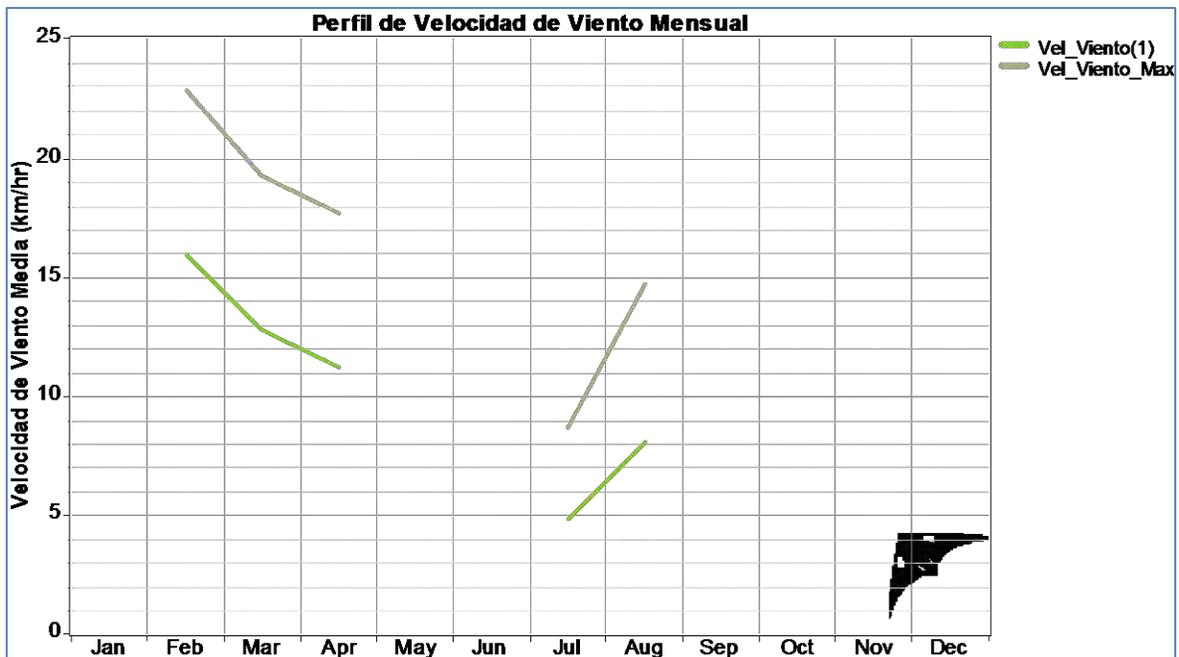


FIGURA 4.31 VELOCIDADES MEDIAS DEL VIENTO POR MES EN HOLBOX



ROSA DE LOS VIENTOS

Se pueden apreciar cinco zonas dominantes, sin embargo solamente hacia los 67.5° se rebasa el 15%, hacia los 315° y los 45° se rebasa el 12% y hacia los 112.5° y 0° se cuenta con un 12%, el resto de las direcciones se encuentra muy cercano al 9% (ver Figura 4.32).

Igual que en el resto de las rosas de Vientos por frecuencia hacia los 67.5° se tiene la mas alta frecuencia de viento o muy cercana a ella, con lo cual ahora no es tan necesario tener una buena base de datos para saber que esta zona es de las mas beneficiadas.

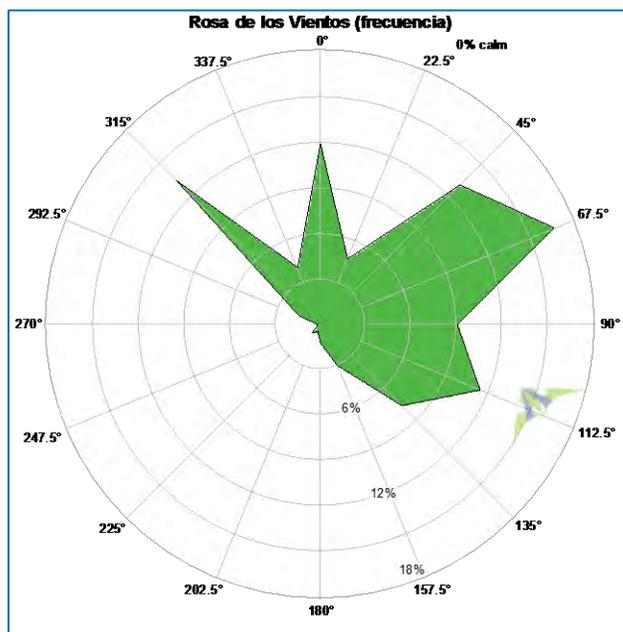


FIGURA 4.32 ROSA DE VIENTOS POR FRECUENCIA EN HOLBOX (CINCO MESES)

PERFIL DIURNO

Como era de esperarse las velocidades de viento disminuyen conforme amanece y comienzan a subir conforme el día transcurre, sin embargo en Holbox ocurre este fenómeno a muy temprana hora ya que como puede verse el mínimo se da a las 3:00 horas con una velocidad de 8 km/h (2.2 m/s) y a partir de las 4:00 horas la velocidad empieza a ascender hasta llegar a su máximo cercano a las 14:00 horas con una velocidad de 13 km/h (3.61 m/s) a partir de la cual comienza a descender (ver Figura 4.33).

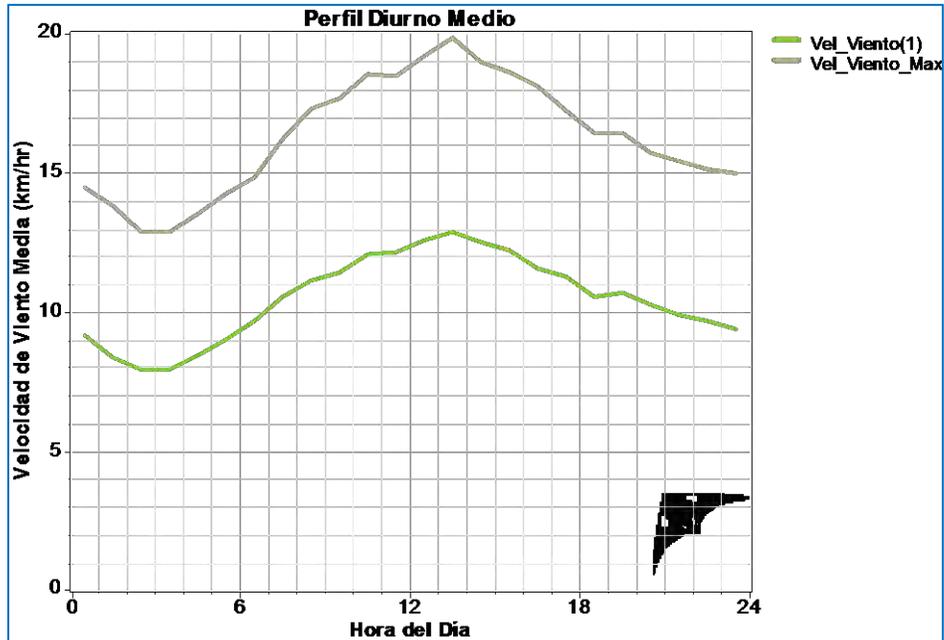


FIGURA 4.33 PERFIL DIURNO DE VELOCIDAD EN HOLBOX (CINCO MESES)

ROSA DE VELOCIDADES MEDIAS DEL VIENTO

En esta rosa (ver figura 4.34) se puede ver que hay dos zonas con vientos muy superiores al resto, una de ellas con dirección 292.5° supera los 20 km/h (5.5 m/s) y la otra dirigida hacia los 315° esta muy cerca de los 20 km/h (5.5 m/s), las otras dos direcciones que le siguen son hacia los 112.5° y 157.5° con velocidades apenas arriba de los 12 km/h (3.3 m/s), el resto de las direcciones se encuentra debajo de estas velocidades.

Desafortunadamente de las dos direcciones que contienen mayor velocidad de viento solo hacia los 315° se cuenta con una frecuencia de vientos considerable cercana al 14%, desaprovechando las velocidades superiores a los 20 km/h (5.5 m/s) obtenidas hacia los 292.5° .



Otro punto a considerarse es que a pesar que hacia los 67.5° se tenía la mayor frecuencia de vientos, estos no son de gran importancia ya que sus velocidades se encuentran por debajo de los 8 km/h (2.2 m/s).

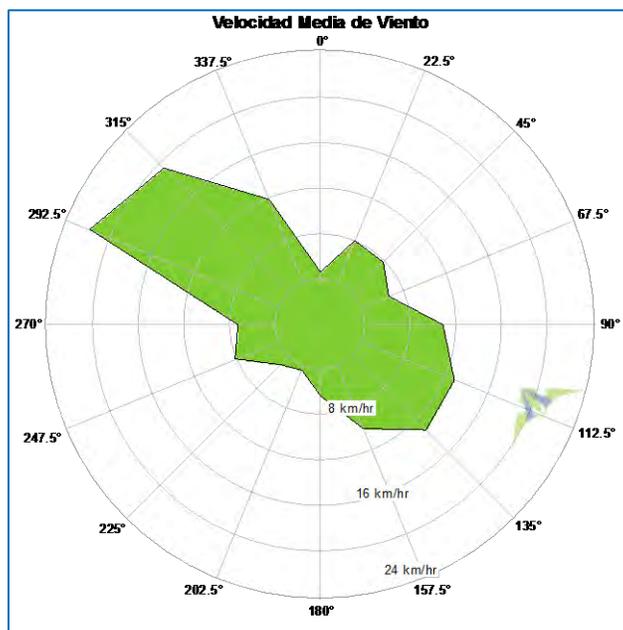


FIGURA 4.34 VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN HOLBOX (CINCO MESES)

FUNCIÓN DE PROBABILIDAD DE WEIBULL

Los datos obtenidos de velocidad de viento son muy bajos y dispersos (ver Figura 4.35), basta con observar lo irregular que se encuentra la grafica en los valores de 0 a 10 km/h (0 a 2.7 m/s) presentando frecuencias cercanas al 14% y menores al 4% en un pequeño cambio de velocidad. Aun así los datos tuvieron una mayor frecuencia entre las velocidades de 5 a 15 km/h (1.3 a 4.1 m/s) pero debido a la irregularidad de los valores se espera, según la grafica de Weibull que los vientos mas frecuentes se presenten entre los 3 y 8 km/h (0.8 y 2.2 m/s) aproximadamente, con una exactitud no muy buena, siendo estas además velocidades muy bajas al compararlas con valores de otras estaciones.

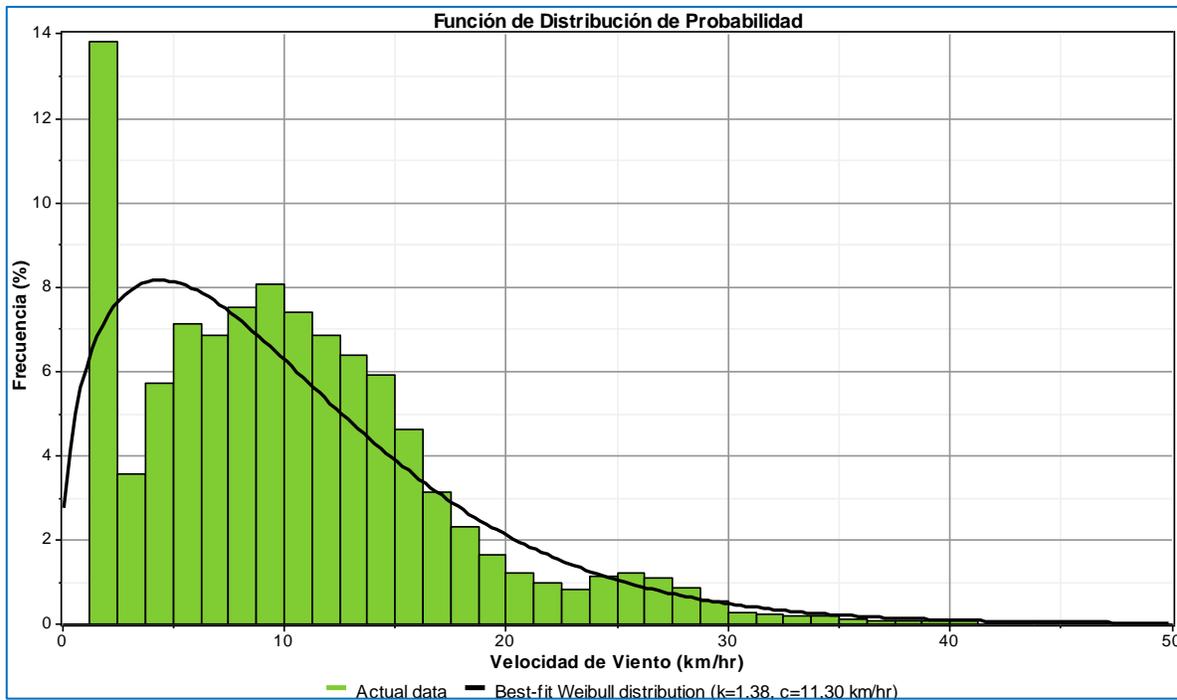


FIGURA 4.35 DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD DE WEIBULL EN HOLBOX (CINCO MESES)

PRESIÓN BAROMÉTRICA, TEMPERATURA Y DENSIDAD DE AIRE

La Figura 4.36 se encuentra incompleta, sin embargo en lo que respecta a la temperatura se puede ver que durante el inicio de año se presentaron las temperaturas mas bajas cercanas a los 20°C y fueron subiendo hasta los 28°C en abril donde se supone no variaron mucho hasta en el mes de julio que empezaron a subir llegando al mes de agosto donde se tiene la ultima medida de temperatura mas alta cercana a los 31°C. Como no se tienen medidas del resto de los meses no se sabe hasta que temperatura se llevo pero es de esperar que conforme se acercaba el fin de año las temperaturas fueran descendiendo para volver a iniciar el año con temperaturas bajas. Con las presiones no se puede saber con exactitud que fue lo que sucedió ya que en durante los primeros meses de medición los valores mostraban un descenso de 1020 a 980 hPa hasta abril donde ya no se tienen valores, sin embargo al llegar a julio se observa un ascenso muy abrupto de los valores pasando de 900 a 1000 hPa por lo que no se sabe si hubo un error que hizo descender los valores a cero o simplemente un fuerte descenso en la presión.

La densidad de aire varió durante los meses, sin embargo, estos cambios no fueron tan grandes como en la presión, mostrando la densidad de aire máximos en 1.22 Kg/m³ y mínimos de 1.14 Kg/m³ (ver figura 4.37).

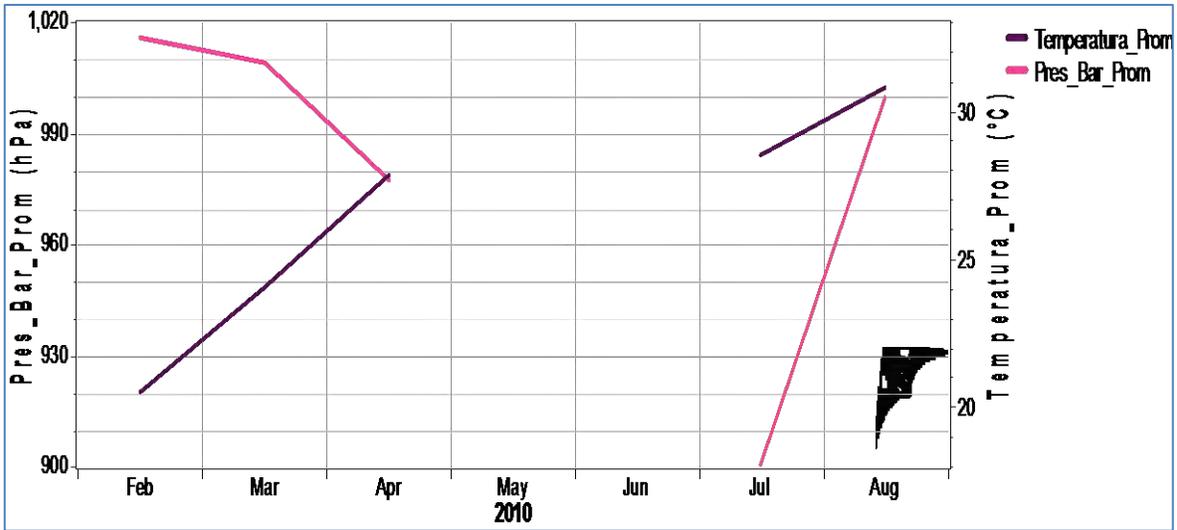


FIGURA 4.36 PRESIÓN BAROMÉTRICA Y TEMPERATURA EN HOLBOX



FIGURA 4.37 DENSIDAD DE AIRE EN HOLBOX

Los valores medios, mínimos y máximos de temperatura, presión atmosférica y densidad de aire se presentan en la Tabla 2.5

TABLA 5.5 VALORES ANUALES DE TEMPERATURA, PRESIÓN Y DENSIDAD

	Media	Min	Max
Temperatura (°C)	25.89	17.56	34.16
Presión (hPa)	985.3	466.1	1,022
Densidad de Aire (kg/m3)	1.19	0.53	1.22

POTENCIA ENERGÉTICA

La potencia energética de Holbox resultó tener únicamente dos secciones dominantes (ver Figura 4.38), se puede ver que hay pequeñas frecuencias distribuidas en distintas direcciones, sin embargo de todas ellas únicamente hacia los 315° se tiene una frecuencia (cercana al 15%)(ver figura 4.32) y densidad (cercana a 200 W/m^2) considerable, el resto de ellas no son significativas. El otro punto dominante en la densidad de potencia es hacia los 292.5° el cual presentó los mejores vientos superiores a los 20 km/h (5.5 m/s) (ver Figura 4.34) pero desafortunadamente la frecuencia en esa dirección es casi nula al no llegar ni siquiera al 3% (ver Figura 4.32), así que su potencia energética cercana a los 240 W/m^2 no podrá ser aprovechada.

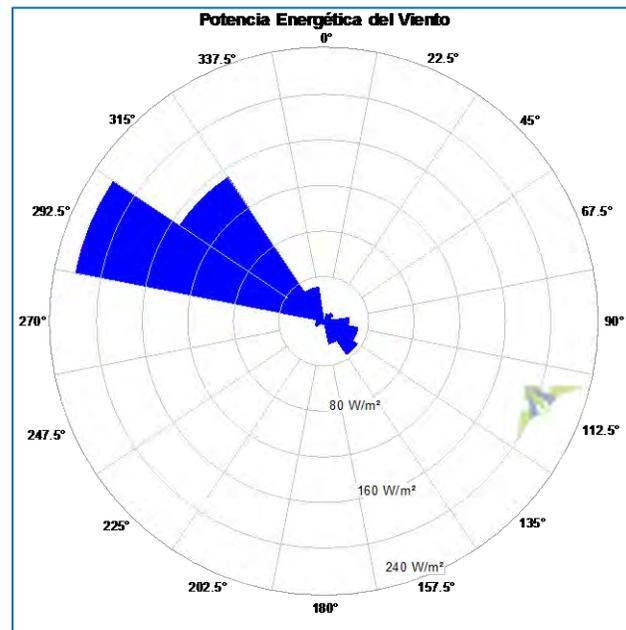


FIGURA 4.38 POTENCIA ENERGÉTICA DEL VIENTO EN HOLBOX (CINCO MESES)



ENERGÍA TOTAL

De la figura 4.38 de potencia energética se puede saber que no habrá muchas direcciones con potencial, esto puede apreciarse en la Figura 4.39. De ahí que solo una dirección tenga casi el 54% del total de energía mientras el resto de las direcciones se encuentra por debajo del 9%. Así que aunque los 67.5° tengan la mayor frecuencia de vientos, esto no sirve de nada si sus velocidades son muy bajas, también si la velocidad es buena como en los 292.5° pero su frecuencia es muy baja de nada servirá. Se concluye entonces que solo hacia los 315° se puede aprovechar la potencia energética del viento.

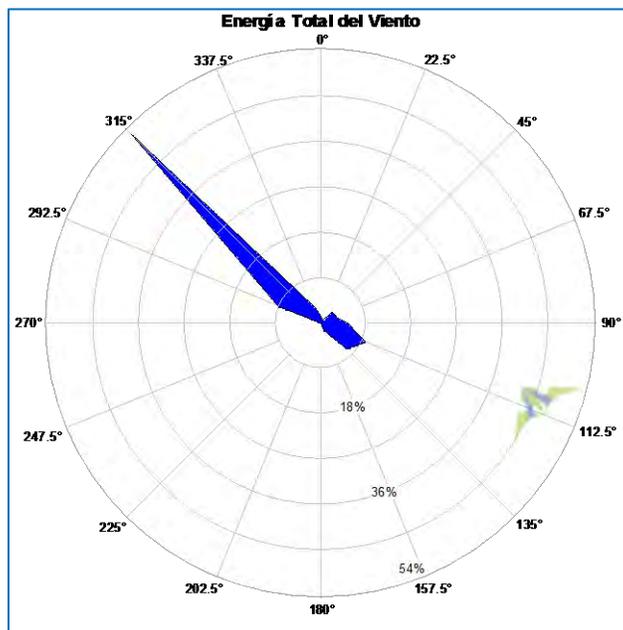


FIGURA 4.39 ENERGÍA TOTAL DEL VIENTO EN HOLBOX (CINCO MESES)

CANCÚN

De un total de 18,679 datos el 99.52% (18,589) de ellos fueron válidos. A continuación se presentan los resultados obtenidos.

VELOCIDADES MEDIAS

Los datos comenzaron el 26 de febrero y terminaron el 6 de julio y puede verse en la Figura 4.40 que la velocidad de viento se mantuvo entre los 6 y los 7 km/h (1.6 y 1.9 m/s). Como se vio en las otras estaciones meteorológicas las velocidades de viento descendían en los meses de junio o julio para llegar a un mínimo en agosto o septiembre, sin embargo como va la grafica obtenida de Cancún parece que el descenso no es muy marcado, posiblemente porque las velocidades de los vientos son bajas y no se ve tanto la diferencia de velocidades. Desafortunadamente los demás datos no se pudieron conseguir.

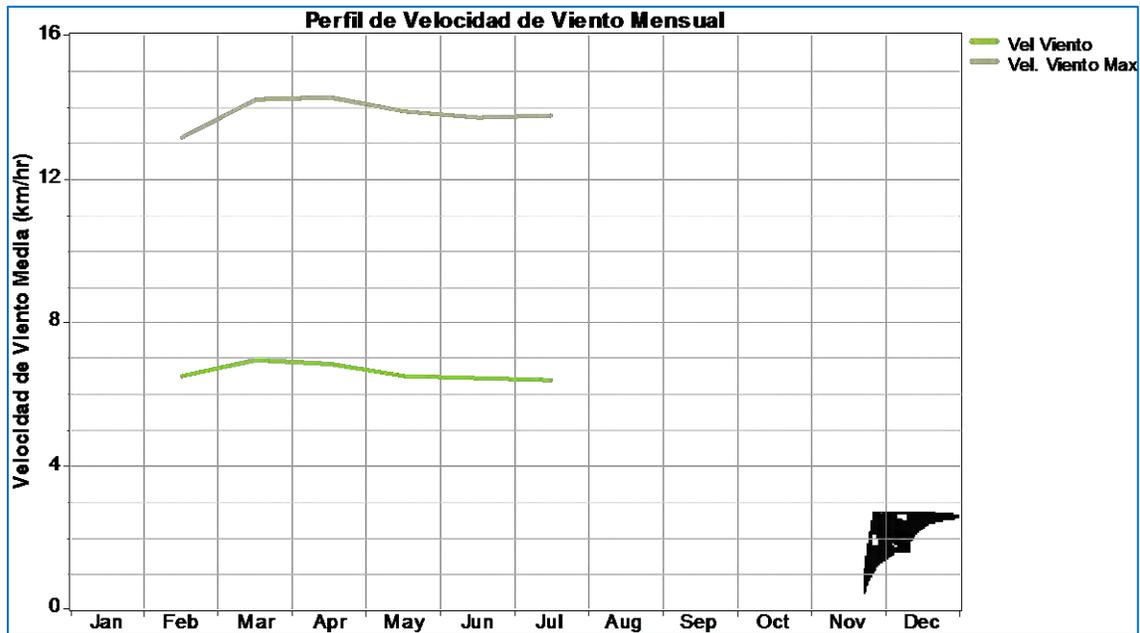


FIGURA 4.40 VELOCIDADES MEDIAS DEL VIENTO POR MES EN CANCÚN (SEIS MESES)



ROSA DE LOS VIENTOS

La frecuencia de vientos se comporto de manera normal, muy parecida al resto de estaciones meteorológicas. Las direcciones predominantes en este caso fueron dos, hacia los 67.5° y hacia los 135° con el 21% de las frecuencias para cada dirección. Entre el 8 y 12% se quedaron las direcciones de 45° y 112.5° , el resto de las direcciones se encuentra en la zona de calma (ver Figura 4.41).

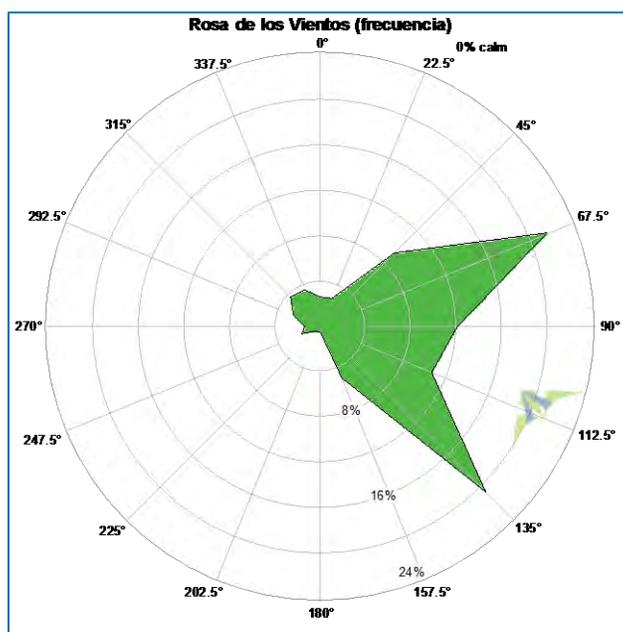


FIGURA 4.41 ROSA DE LOS VIENTOS POR FRECUENCIA EN CANCÚN (SEIS MESES)

PERFIL DIURNO

El perfil diario nos muestra que las velocidades mínimas de 5 km/h (1.3 m/s) se dan entre las 4:00 y 5:00 horas y que a partir de esta hora empiezan a ascender hasta llegar a su máximo de 9 m/s entre las 14:00 y 15:00 horas a partir de la cual comienzan su descenso (ver Figura 4.42).

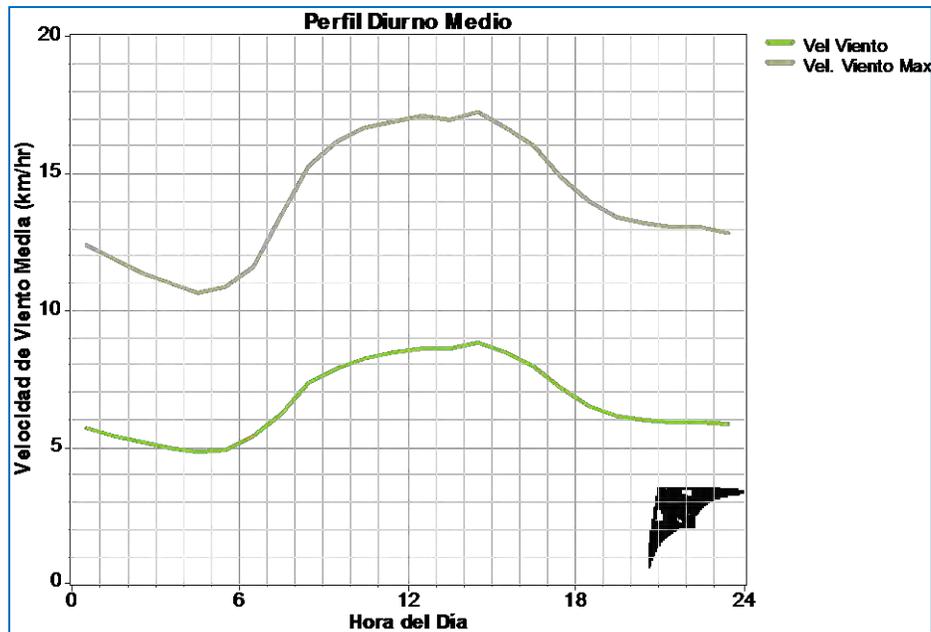


FIGURA 4.42 PERFIL DIURNO MEDIO EN CANCÚN (SEIS MESES)



ROSA DE VELOCIDADES MEDIAS DE VIENTO

En la Figura 4.43 se aprecia que la dirección sureste es la predominante al tener las velocidades más altas cercanas a los 12 km/h (3.3 m/s) tanto a los 135° como a los 157.5°. Hacia el noroeste en los 292.5° y 315° se cuenta con velocidades cercanas a los 8 km/h (2.2 m/s), el resto de direcciones tiene velocidades menores a los 6 km/h (1.6 m/s).

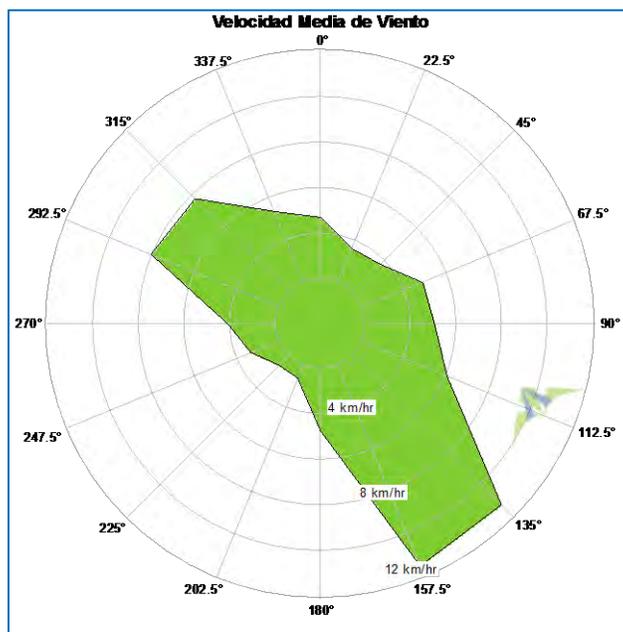


FIGURA 4.43 VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN CANCÚN (SEIS MESES)

FUNCIÓN DE PROBABILIDAD DE WEIBULL

De la Figura 4.44 se concluye que la mayor frecuencia de vientos (entre 9 y 10%) se da con aquellos que son menores a 7 km/h (1.9 m/s). Además las velocidades de vientos mas altas, entre los 8 y 13 km/h (2.2 y 3.61 m/s) presentan menor exactitud respecto a la gráfica de Weibull, por lo que en un futuro podrían variar mucho y por ultimo los vientos arriba de 15 km/h (4.1 m/s) que son los mas importantes presentan frecuencias menores al 2%.

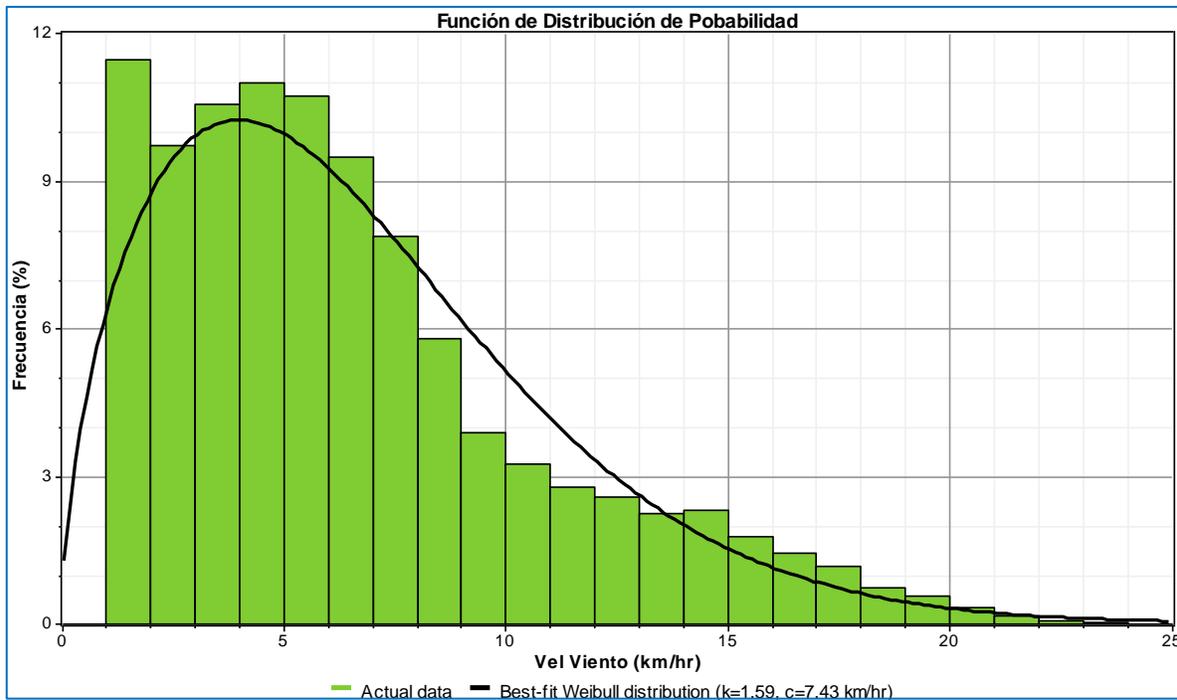


FIGURA 4.44 DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD DE WEIBULL EN CANCÚN (SEIS MESES)

PRESIÓN BAROMÉTRICA, TEMPERATURA Y DENSIDAD DE AIRE

Las temperaturas se comportaron de manera normal, comenzando con las más bajas y subiendo conforme transcurre el año. El mes de febrero trae ya una tendencia hacia arriba por lo que es de esperarse que en enero hubiera temperaturas menores a los 21° C. La máxima temperatura se da en junio cuando se rebasan los 30° C, en ese momento se estabilizan las temperaturas y se espera que comiencen a disminuir (ver Figura 4.45).

Las presiones bajan de febrero a abril de 1,014 a 1,009 hPa, para luego subir hasta 1,011 en mayo y comenzar a descender en junio y julio hasta los 1,010 hPa (ver Figura 4.45).

La densidad de aire en febrero tenía 1.20 kg/m³ y descendió hasta los 1.16 kg/m³ en junio, manteniéndose estable en los demás meses de medición (ver Figura 4.46).

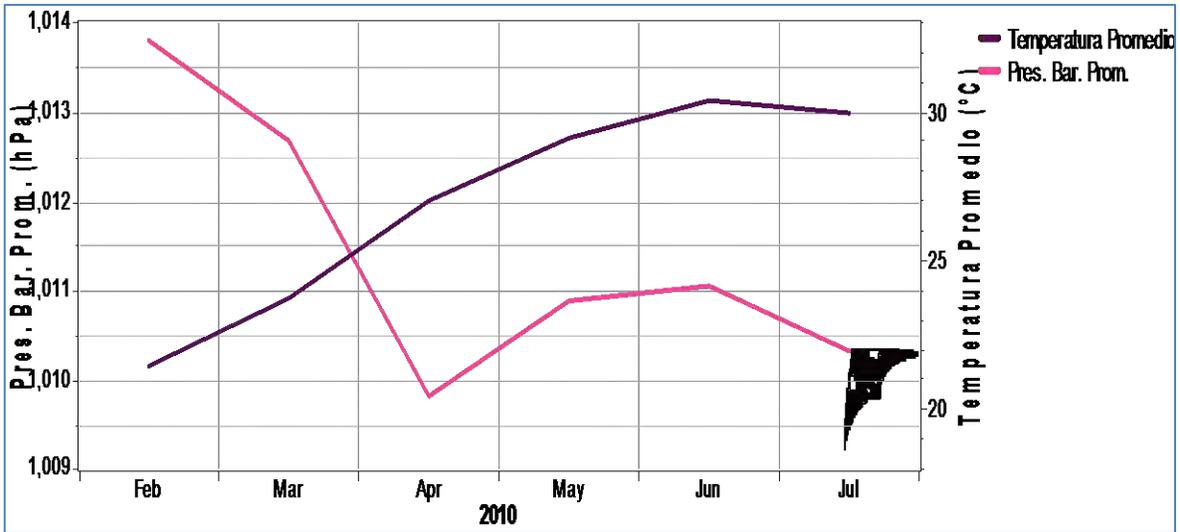


FIGURA 4.45 PRESIÓN BAROMÉTRICA Y TEMPERATURA EN CANCÚN

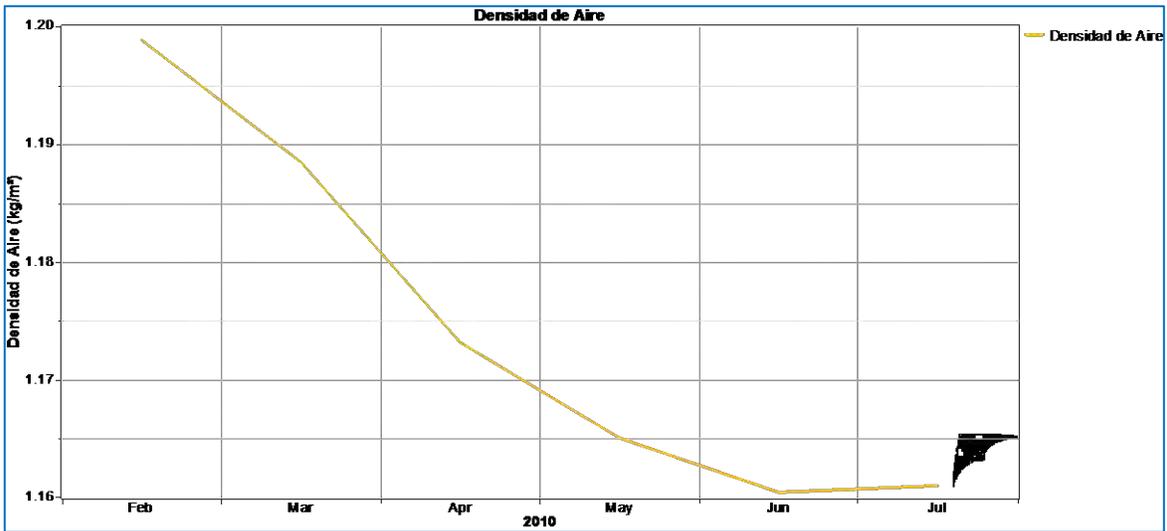


FIGURA 4.46 DENSIDAD DE AIRE EN CANCÚN

Los valores medios, mínimos y máximos se presentan en la Tabla 4.6.

TABLA 4.6 VALORES ANUALES DE TEMPERATURA, PRESIÓN Y DENSIDAD

	Media	Min	Max
Temperatura (°C)	27.54	14.67	34.04
Presión (hPa)	1,011.4	790.7	1,020
Densidad de Aire (kg/m3)	1.17	0.9	1.23



POTENCIA ENERGÉTICA

De la Figura 4.47 se puede ver que hay dos zonas dominantes las cuales son en las direcciones de 135° y 157.5° con densidades de potencia de 27 W/m^2 , las densidades más cercanas son de casi 12 W/m^2 y se encuentran en las direcciones de 292.5° y 315° , el resto de las direcciones tiene valores de potencia energética despreciables.

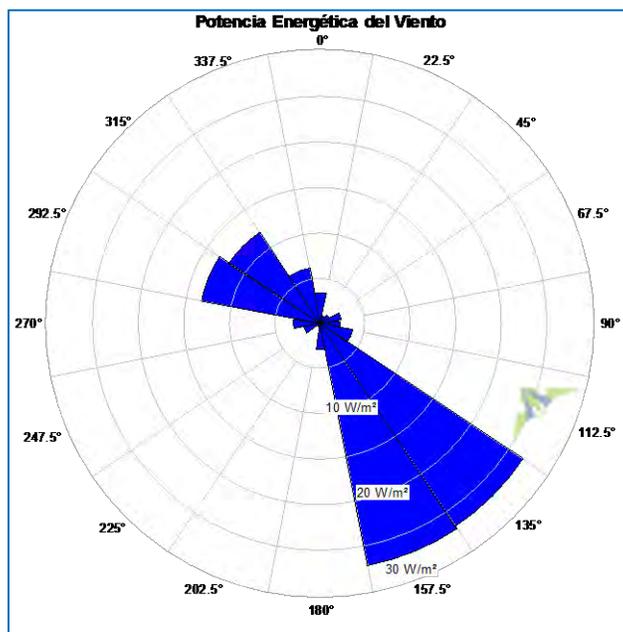


FIGURA 4.47 POTENCIA ENERGÉTICA DEL VIENTO EN CANCÚN (SEIS MESES)

ENERGÍA TOTAL

Se puede ver entonces donde se presentará la mayor cantidad de energía total.

En base a la Figura 4.48 se aprecia la dirección que presenta el mayor porcentaje de energía y se puede comprobar con la rosa obtenida (ver figura 4.48) la cual nos indica que hacia los 135° se obtiene casi el 60% de la energía, dejando a los 157.5° con un 15% de frecuencia. El resto de las direcciones tienen valores nulos, debido principalmente a las bajas velocidades de viento que presentaron.

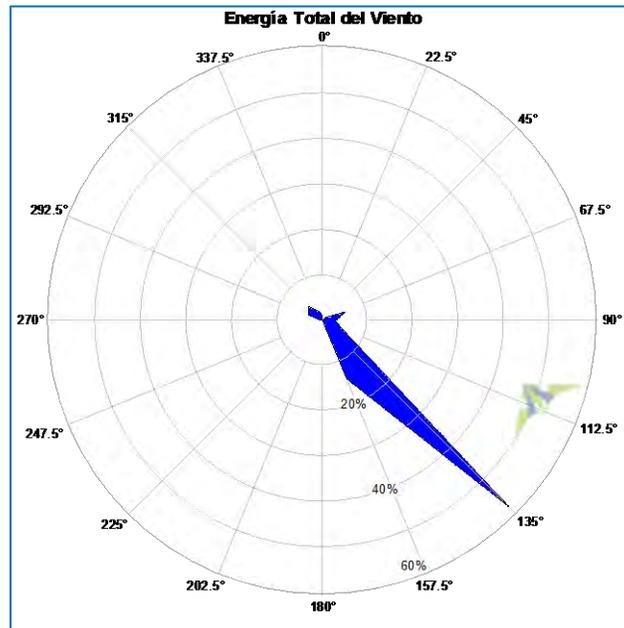


FIGURA 4.48 ENERGÍA TOTAL DEL VIENTO EN CANCÚN (SEIS MESES)



ISLA PÉREZ

De un total de 34,944 datos, el 88.65% (30,979) de ellos fueron valores válidos. A partir de estos se obtuvieron los siguientes resultados.

VELOCIDADES MEDIAS

Siguiendo el mismo patrón que en las otras estaciones se observa en la Figura 4.49 que la primera mitad del año presenta los mejores vientos, ubicándose entre los 25 y 28 km/h (6.94 y 7.7 m/s) y en los meses de agosto y octubre los vientos fueron cercanos a los 20 km/h (5.5 m/s).

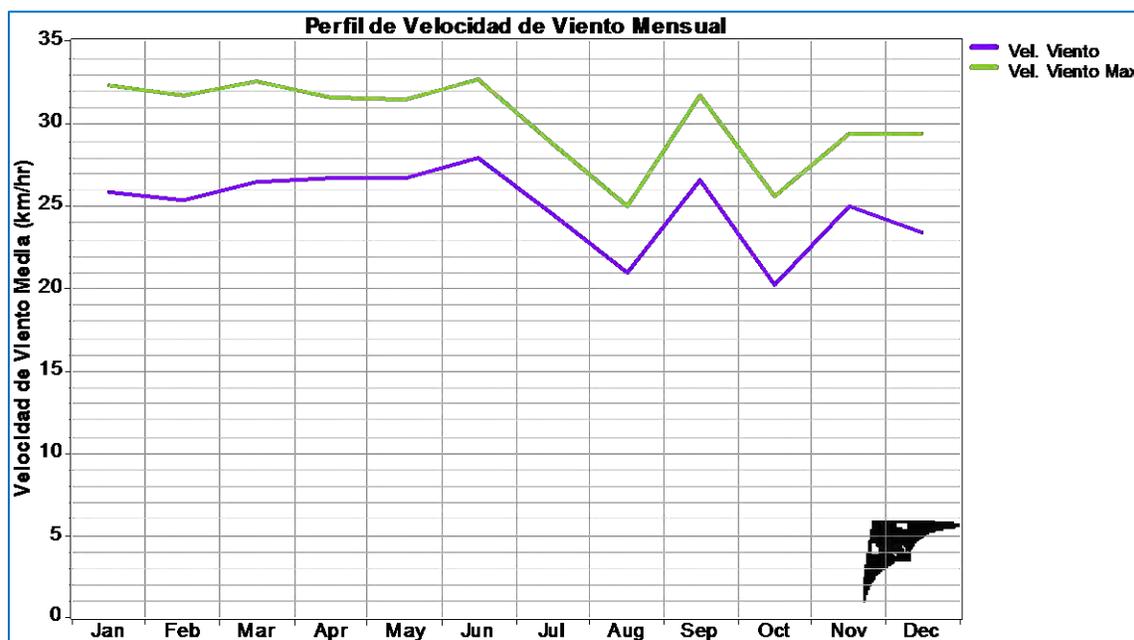


FIGURA 4.49 VELOCIDADES MEDIAS DE VIENTO POR MES EN ISLA PÉREZ

ROSA DE LOS VIENTOS

Los vientos dominantes son en dirección Este-Sureste con casi el 52% del total. De estos un 18% se concentra en dirección 90°, un 20% hacia los 112.5° y cerca del 14% en dirección 135°, el resto se encuentra esparcido en pequeñas proporciones menores al 10% en distintos puntos como puede verse en la Figura 4.50.

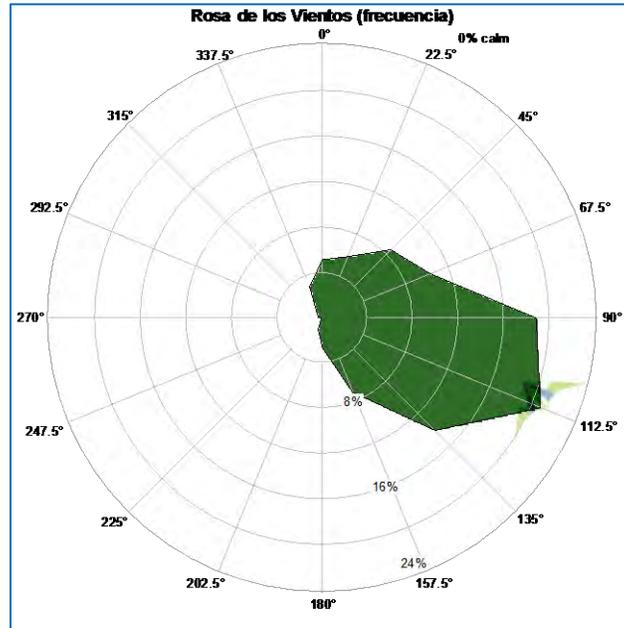


FIGURA 4.50 ROSA DE LOS VIENTOS POR FRECUENCIA EN ISLA PÉREZ

PERFIL DIURNO

A diferencia de las demás estaciones en Isla Pérez ocurre algo distinto con el perfil diario de velocidad ya que conforme amanece, la velocidad de viento disminuye (ver Figura 4.51), además de que la diferencia de velocidades no es tan marcada como en el resto de las estaciones [de 22 a 28 km/h (6.1 a 7.7 m/s)]. Esto es debido a que no existe una marcada diferencia entre la brisa de mar y la terrestre al estar ubicada la estación en una pequeña isla.

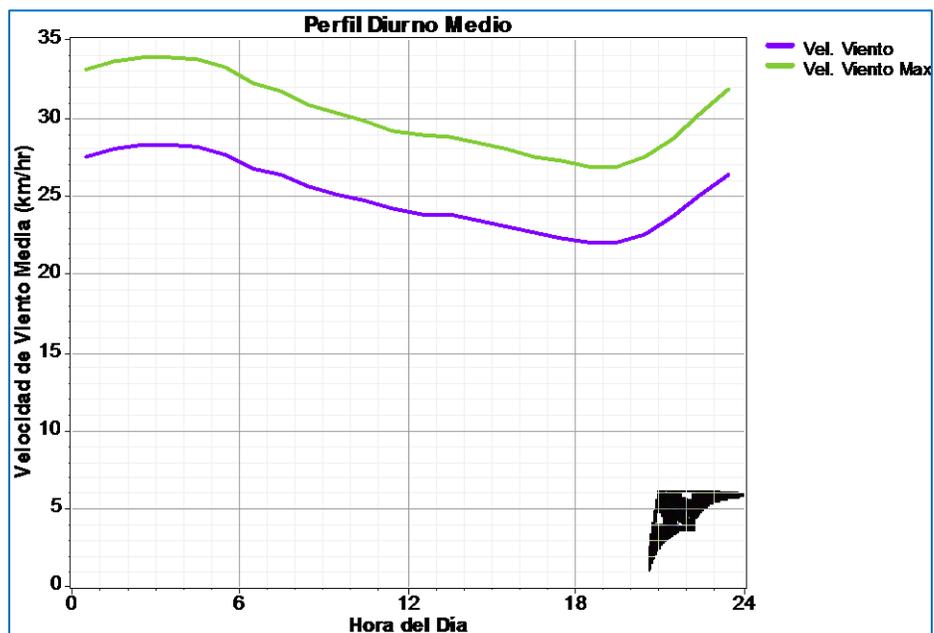


FIGURA 4.51 PERFIL DIURNO DE VELOCIDAD EN ISLA PÉREZ



ROSA DE VELOCIDADES MEDIAS DE VIENTO

A pesar de que la mayor frecuencia de vientos se da en dirección Este, los vientos con mayores velocidades se dan en distintas direcciones como puede verse en la Figura 4.52 con vientos superiores a los 25 Km/h en las direcciones de 0°, 90°, 112.5°, 135°, 157.5° y 337.5°, siendo la dirección Suroeste la menor beneficiada por los vientos.

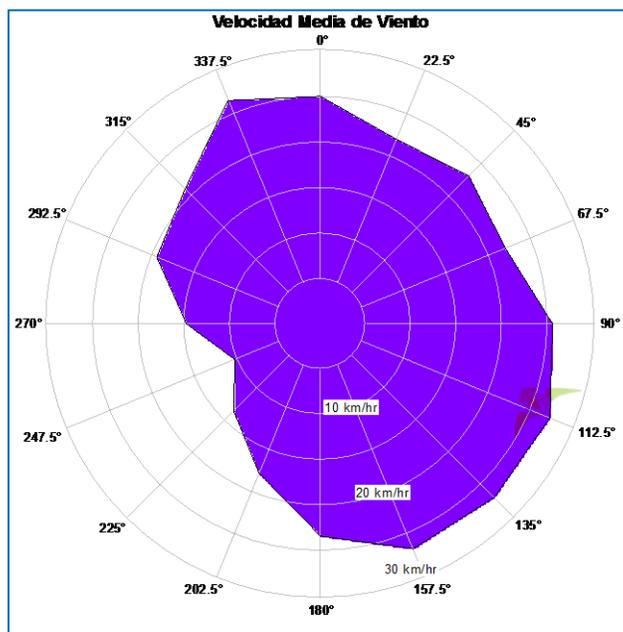


FIGURA 4.52 VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN ISLA PÉREZ

FUNCIÓN DE PROBABILIDAD DE WEIBULL

La curva obtenida de la distribución de probabilidad de Weibull es bastante uniforme lo que la hace bastante confiable (ver Figura 4.53). Los vientos mas frecuentes se encuentran en un rango de 18 a 30 km/h (5 a 8.3 m/s). El factor de escala $c=27.97$ km/h (7.76 m/s) nos demuestra que los vientos son relativamente buenos al compararlos con los valores de otras estaciones, además de que la mayor concentración de frecuencias se da en un amplio margen de altas velocidades de viento.

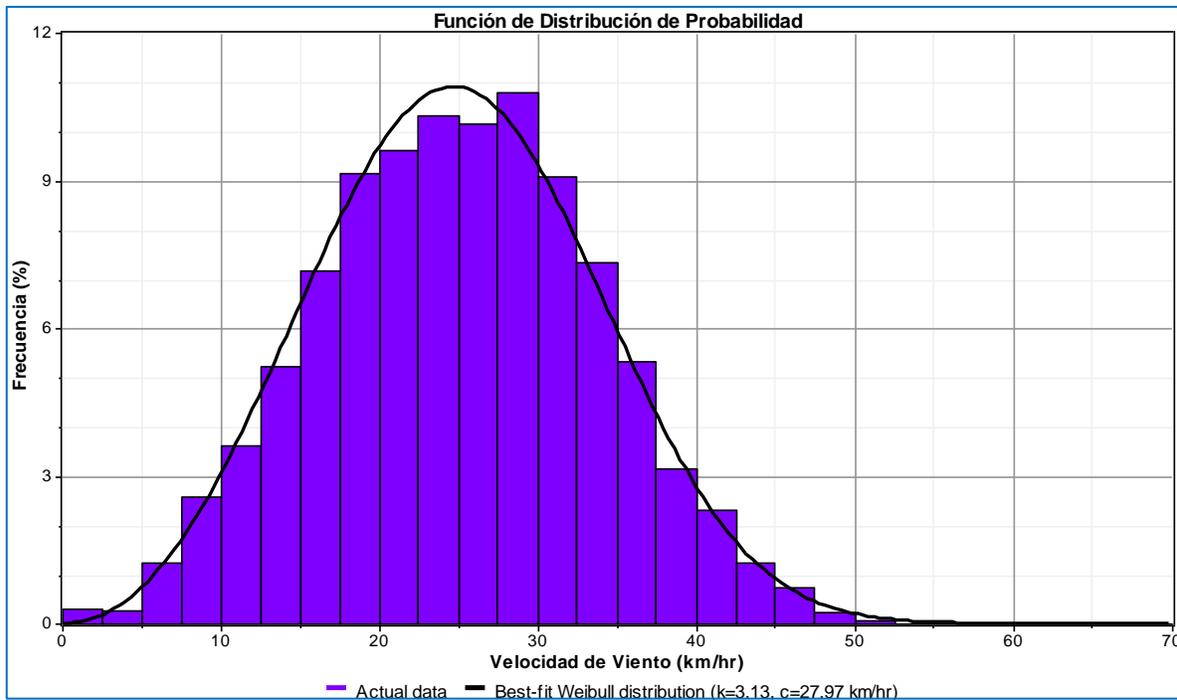


FIGURA 4.53 DISTRIBUCIÓN DE PROBABILIDAD DE WEIBULL EN ISLA PÉREZ

PRESIÓN BAROMÉTRICA, TEMPERATURA Y DENSIDAD DEL AIRE

Las temperaturas comienzan bajas a principio de año, comenzando a subir en marzo y llegando a su punto máximo en agosto, a partir del cual comienzan a descender hasta su mínimo en diciembre (ver Figura 4.54).

La presión barométrica se comporta de igual manera siendo menor cuando las temperaturas son bajas, presentando algunos errores de medición de enero a abril, de ahí que baje a cero, sin embargo, en el resto de los meses se mantiene normal, con valores muy cercanos a la atmosfera estándar (ver Figura 4.54).

En cuanto a la densidad, de la Figura 4.55 se puede concluir que la densidad del aire se mantiene proporcional a la presión barométrica con valores serán cercanos a los estándar de 1.2 kg/m³.



FIGURA 4.54 PRESIÓN BAROMÉTRICA Y TEMPERATURA EN ISLA PÉREZ



FIGURA 4.55 DENSIDAD DEL AIRE EN ISLA PÉREZ

Los valores medios, mínimos y máximos se presentan en la Tabla 4.7.

TABLA 4.7 VALORES ANUALES DE TEMPERATURA, PRESIÓN Y DENSIDAD

	Media	Min	Max
Temperatura (°C)	25.49	16.1	33.00
Presión (hPa)	1,014.8	1,001.9	1,031
Densidad de Aire (kg/m ³)	1.18	1.15	1.29

POTENCIA ENERGÉTICA

De la Figura 4.50 se sabe que la mayor frecuencia de vientos se concentra en las direcciones 90° , 112.5° y 135° . Es en esas direcciones donde según la figura 4.56 se tienen densidades de potencia cercanas a los 300 W/m^2 . Sin embargo, en la dirección 337.5° se presenta la mayor potencia energética con casi 360 W/m^2 y al 0° la densidad de potencia es de 300 W/m^2 . El resto de las direcciones cuenta con valores menores de los 240 W/m^2 .

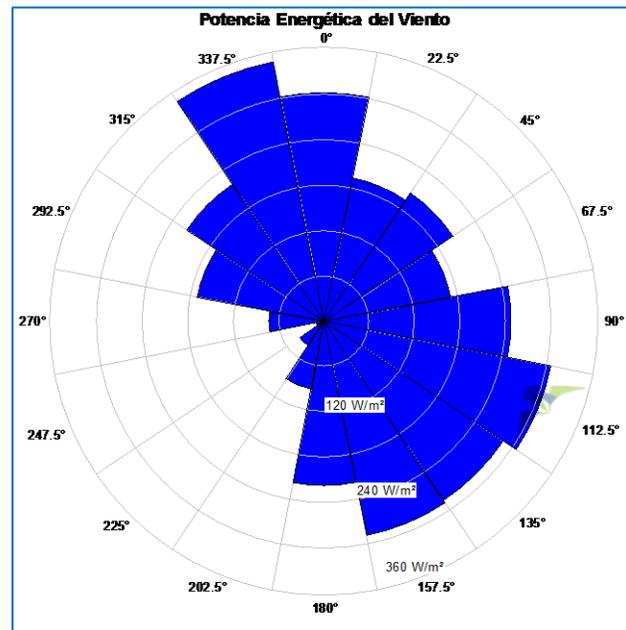


FIGURA 4.56 POTENCIA ENERGÉTICA DEL VIENTO EN ISLA PÉREZ

ENERGÍA TOTAL

Como se venía viendo la mayor cantidad de energía se concentra en tres direcciones (90°, 112.5° y 135°) las cuales representan mas del 55% del total (ver Figura 4.57). Del resto de las direcciones la energía obtenida es casi imperceptible a pesar de que como se vio en las Figuras 4.52 y 4.56 direcciones de viento como 337.5° y 0° cuentan con los mayores valores de velocidad de viento y densidades de potencia superiores a las del resto. Aun así los valores obtenidos en las tres direcciones de viento dominantes son los únicos visibles en la figura de Energía Total de Viento.

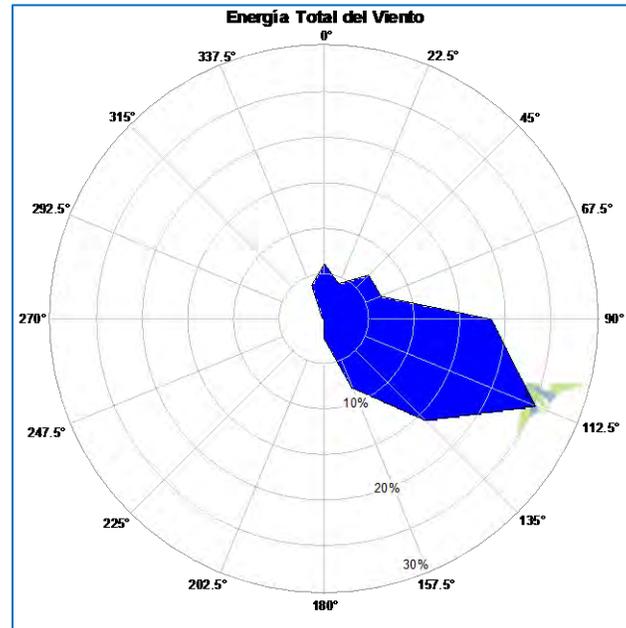


FIGURA 4.57 ENERGÍA TOTAL DEL VIENTO EN ISLA PÉREZ



TABLA DE RESULTADOS

Estación	Velocidad de Viento		Dirección de Viento		Temperatura	Presión Barom.	Densidad de Aire	Potencial		
	Media (m/s)	Desv. Estand.	Dir. Dominante	% del total	Media (°C)	Media (mbar)	Media (Kg/m ³)	Dir. Dominante	% del Total	Potencia (W/m ²)
Dzilam	5.39	0.76	45° a 135°	68	25.14	1,015.65	1.19	67.5°	30	300
Rio Lagartos	3.44	1.88	67.5° a 90°	34	24.97	1,013.87	1.18	90°	24	54
Progreso	9.3	0.64	45° a 135°	64	24.7	1,009	1.18	45°	27	1250
Holbox	2.92	1.19	45° a 67.5°	30	25.9	985	1.19	315°	54	150
Cancún	1.8321	1.19	67.5° y 157.5°	42	27.5	1,011	1.17	135°	60	27
Isla Pérez	6.95	2.44	90° a 135°	54	25.5	1,014.85	1.18	112.5°	25	300

● Estación con datos de un año
 ● Estación con datos de seis meses
 ● Estación con datos de cinco meses

Conclusiones

Capítulo V



En este trabajo se ha realizado una evaluación del potencial de aprovechamiento de la energía del viento en el norte de la península de Yucatán, a través del uso de estaciones meteorológicas.

Aún a pesar de que el uso de estaciones meteorológicas en este tipo de trabajos, en general se consideran poco confiables, se ha realizado una selección cuidadosa para incluir solo aquellos sitios en donde dichos equipos se han instalado frente a las costas, por lo cual se garantiza poco efecto debido a perturbaciones por obstáculos.

Para el procesamiento de datos se utilizó el software Windographer el cual dada la sencillez de su interfaz, así como su compatibilidad con los formatos de datos manejados fue el software más indicado para la realización de este trabajo.

De acuerdo con los datos, se observa que tres estaciones registran valores promedio de velocidad de viento para los periodos considerados por arriba de 5.5 m/s y tres estaciones tienen valores por debajo de los 3.5 m/s. De esto se concluye que en las zonas costeras de Dzilam, Progreso e Isla Pérez existe recurso eólico aprovechable, el cual cuenta con densidades de potencia mayores a los 300 W/m². Por el contrario en las zonas analizadas de Rio Lagartos, Holbox y Cancún el recurso eólico no es el suficiente para ser aprovechado.

Un dato importante a señalar es que los datos proporcionados por las estaciones meteorológicas están tomados a alturas menores de 10m, por lo que si se proyectan dichos valores a 40 ó 60m, entonces es de esperar valores de la velocidad mucho mayores, por lo cual es posible deducir que sí existe un buen potencial de generación de energía con el viento, lo cual coincide con algunas estimaciones que ha realizado el Laboratorio Nacional de Energía Renovable de los Estados Unidos (NREL) para dicha zona.

De entre las estaciones que reportan bajos valores, se ve que hay mucha diferencia con respecto al resto, aun y cuando están en una misma zona y debería esperarse resultados muy parecidos. En este sentido, hay que considerar que muchas de las estaciones ya han cumplido periodos de operación superiores a los dos años, y no ha sido posible obtener acceso a información sobre el tipo de verificación o mantenimiento dado a los sensores.

Esto implica que un factor a considerar en la incertidumbre de las mediciones está asociado a la posible descalibración de los instrumentos. Así también habría que considerar también que dichas estaciones no fueron instaladas para propósitos específicos de evaluar el potencial del viento y por lo tanto pueden estar presentando algún otro tipo de problemas.

Por otra parte, otro problema frecuente encontrado en las estaciones fue la pérdida de datos debido a fallas de comunicación, de ahí que en algunas estaciones no se contara con al menos un año completo de medición.

Este tipo de trabajo, es solo un primer análisis a la factibilidad de aprovechamiento del viento en la zona, el cual debe ser complementado con mediciones más específicas con instrumentos ex profeso para este fin.



Con esta trabajo, en general se ha encontrado que si es factible el aprovechamiento del recurso eólico en la zona costera de la Península de Yucatán, y que sería suficiente para aplicaciones desde bombeo de agua a generación de energía eléctrica, aunque para justificar una explotación a gran escala debe primero corroborarse con mediciones mas puntuales y con las metodologías señaladas en las normas internacionales.

Bibliografía



Borja, M. et al., (2005) *Primer Documento del Proyecto Eoloeléctrico del Corredor Eólico del Istmo de Tehuantepec*. México, Instituto de Investigaciones Eléctricas.

EWEA, (2012) The European Wind Energy Association. [En línea]. Bélgica, disponible en: <http://www.ewea.org>

ADIE, (2002) Asociación Danesa de la Industria Eólica. [En línea]. Dinamarca, disponible en: <http://www.windpower.org>

Comisión Europea, (1995) *Por una Política Energética de la Unión Europea - Libro Verde*. Luxemburgo, Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas.

Global Wind Energy Council, (2011) *Global Wind Report, Annual Market Update 2010*. Bélgica, Global Wind Energy Council.

Bloomberg New Energy Finance (2011) *Grid Parity For Onshore Wind*. Reino Unido, Bloomberg New Energy Finance.

Secretaría de Energía, (2010) “Zonas de Aprovechamiento Potencial para la Generación Eoloeléctrica”. [En línea]. México, disponible en: <http://sener.gob.mx/webSener/res/1803/Eolico.pdf>

International Energy Agency, (2012) *IEA Wind 2011 Annual Report*. Estados Unidos de América, IEA Wind.

Comisión Federal de Electricidad, (2011) *Primer Foro de Energías Renovables y Cambio Climático*. Oaxaca, Comisión Federal de Electricidad.

Alatorre, C., (2009) *Energías renovables para el Desarrollo Sustentable en México*. México, Secretaría de Energía.

Global Wind Energy Council, (2013) *Global Wind Report, Annual Market Update 2010*. Bélgica, Global Wind Energy Council.

Acosta, A. (2006) “Parque Eólico en el Istmo de Tehuantepec”. [En línea]. México, disponible en: <http://www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/4289/2/aracelyacosta.pdf>

Secretaría de Energía, (2010) “Potencial Eólico en México”. [En línea]. México, disponible en: <http://www.renovables.gob.mx>

National Renewable Energy Laboratory (2000) *Mexico-Campeche-Quintana Roo and Yucatan Wind Resource Map*. Estados Unidos de América, National Renewable Energy laboratory.

Villarrubia, M., (2004) *Energía Eólica*. Barcelona, Ediciones Ceac.

Manwell, J. et al., (2009) *Wind Energy Explained: Theory, design and application*. Segunda Edición, Gran Bretaña, John Wiley and Sons Ltd.



Elliot, D. et al., (2004) *Atlas de Recursos Eólicos del Estado de Oaxaca*. Oaxaca, Secretaría de Desarrollo Industrial y Comercial.

Parker, A. (2001) *Contaminación del Aire por la Industria*. Barcelona, Editorial Reverté.

Harris, D. (2007) *Análisis Químico Cuantitativo*. Tercera Edición, Barcelona, Editorial Reverté.

Fernández, P. (2002) *Energía Eólica. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética*. Cantabria, Universidad de Cantabria.

INIECO. (2011) *Desarrollo de Proyectos de Instalaciones de Energía Mini-Eólica Aislada*. Málaga, Editorial Vértice.

Borja, M. et al., (2007) *Notas del curso: "Actualización en Energía Eólica"*, México, Instituto de Investigaciones Eléctricas.

Pérez, C. (2012) Estudio de Patrones Energéticos de Un Sistema de Generación Eólica de Baja Potencia instalado en el Noreste de Mérida, Yucatán. Tesis de Maestría. Mérida, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.

Sanchez, C. (2011) Evaluación del Potencial Eólico en el Estado de Quintana Roo. Tesis de Ingeniería. Chetumal, Universidad de Quintana Roo.

Mur, J. (2005) *Curso de Energía Eólica. Master Europeo en Energías Renovables y Eficiencia Energética*. Zaragoza, Universidad de Zaragoza.

New York State Energy Research Development Authority (2010) *Wind Resource Assessment Handbook*. Estados Unidos de América, NYSERDA.

Talayero, A, y E. Telmo (2008) *Energía Eólica*. Zaragoza, Prensas Universitarias de Zaragoza.

JM Industrial (2013) "Datalogger". [En línea]. México, disponible en: http://www.jmi.com.mx/documento_literatura/DATALOGGER.pdf

Comisión Nacional del Agua (2012) "Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA's)". [En línea]. México, disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/emas/>

Comisión de Energía del Estado de Quintana Roo (2012) "Presentación de la Red de Estaciones Meteorológicas de Quintana Roo". [En línea]. México, disponible en: <http://biblioteca.coqcyt.gob.mx/bvic/Captura/upload/RED-DE-MONITOREO-PROY.PDF>

Secretaría de Marina (2013) "Mapa de Estaciones Meteorológicas". [En línea]. México, disponible en: http://meteorologia.semar.gob.mx/red_emas2.html

La información de las estaciones de Dzilam, Progreso y Rio Lagartos fue proporcionada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

La información de las estaciones de Cancún y Holbox fue proporcionada por la Comisión de Energía del Estado de Quintana Roo (CENER).



La información de la estación de Isla Pérez fue proporcionada por la Secretaria de Marina (SEMAR).