



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO Y
MODELADO DEL PERFIL DE VELOCIDADES DE VIENTO COMO PARTE DEL ESTUDIO DE
PREFACTIBILIDAD DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN GUATEMALA**

Byron Alejandro Pérez Ramos

Asesorado por el Msc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque

Guatemala, abril de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO Y
MODELADO DEL PERFIL DE VELOCIDADES DE VIENTO COMO PARTE DEL ESTUDIO DE
PREFACTIBILIDAD DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN GUATEMALA**

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

BYRON ALEJANDRO PÉREZ RAMOS
ASESORADO POR EL MSC. ING. JUAN CARLOS FUENTES MONTEPEQUE

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

GUATEMALA, ABRIL DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Pablo Rodolfo Zúñiga Ramirez
EXAMINADOR	Ing. Julio Rolando Barrios Archila
EXAMINADOR	Ing. Juan Carlos Morataya Ramos
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO Y MODELADO DEL PERFIL DE VELOCIDADES DE VIENTO COMO PARTE DEL ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Posgrado, con fecha 20 de febrero del 2013.



Byron Alejandro Pérez Ramos

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Teléfono 2418-9142

ADSE-MEAPP-0012-2013

Guatemala, 20 de febrero de 2013.

Director:
Guillermo Puente
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Presente.

Estimado Director:

Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación de la estudiante **Byron Alejandro Pérez Ramos** con carné número **2005-16069**, quien opto la modalidad del **"PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO"**. Previo a culminar sus estudios en la **Maestría de Energía y Ambiente**.

Y si habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Sin otro particular, atentamente,

"Id y enseñad a todos"

Ing. Juan C. Fuentes M.
M.Sc. Hidrología
Colegiado No. 2,504

Msc. Ing. Juan Carlos Fuentes M.
Juan C. Fuentes M.
M.Sc. Hidrología
Colegiado No. 2,504

Msc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque.
Coordinador de Área
Desarrollo social y energético

Dra. Mayra Virginia Castillo Montes
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado



Cc: archivo
/la



El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el Visto Bueno del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística del trabajo de Graduación en la modalidad Estudios de Postgrado Titulado: DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO Y MODELADO DEL PERFIL DE VELOCIDADES DE VIENTO COMO PARTE DEL ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN GUATEMALA, presentado por el estudiante universitario BYRON ALEJANDRO PÉREZ RAMOS , aprueba el presente trabajo y solicita la autorización del mismo.

YO Y ENSEÑAR A TODOS

Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica



Guatemala, 4 de ABRIL 2013.

/s/o



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN DE LA METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO Y MODELADO DEL PERFIL DE VELOCIDADES DE VIENTO COMO PARTE DEL ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario **Byron Alejandro Pérez Ramos**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
Decano



Guatemala, abril de 2013

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser mi fuente de sabiduría y ser el origen de mis fuerzas, la luz en mi camino, el soplo de vida, sin su ayuda no hubiera sido posible todo esto.
- Mis padres** Eberto Andrés Pérez y María Ramos de Pérez. Por haberme inculcado principios y valores para tener éxito en las actividades que emprendo. Su amor será siempre mi inspiración.
- Mis Hermanos** Otto, Walter, Xiomara y Carolina Pérez. Por apoyarme en todo momento y por ser una importante influencia en mi carrera.
- Mi Abuela** María Concepción Pérez Luttman. Por haber cuidado de mí, en la infancia y enseñarme a ser una persona de bien. ¡Qué Dios la tenga en su gloria!
- Nancy Palma de Pérez** Por ser mi nueva hermana que Dios me regaló y por ser una importante influencia en mi carrera.

Mi sobrino

Gabriel André Pérez Por ser el angelito que
llenará de alegría a toda mi familia.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser la casa de estudio que me abrió las puertas del conocimiento.
Facultad de Ingeniería	Por permitirme ser parte de esta gloriosa y respetada facultad.
Mis catedráticos	Por compartirme todos sus conocimientos.
Mis amigos	Por brindarme su apoyo incondicional y compartir tantas vivencias para llegar a este sitio.
Ing. Julio Barrios	Por su apoyo incondicional, su amistad y compartir sus conocimientos.
Msc. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque	Por ser mi asesor, y por su atenta colaboración y apoyo en la revisión de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
GLOSARIO	V
RESUMEN.....	VII
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
3. OBJETIVOS.....	5
4. JUSTIFICACIÓN	7
5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
6. ALCANCES Y LIMITACIONES	11
7. MARCO TEÓRICO	13
8. ÍNDICE DE CONTENIDO PROPUESTO PARA EL INFORME FINAL ..	43
9. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN	45
10. MÉTODOS Y TÉCNICAS.....	47
11. RESULTADOS ESPERADOS.....	49

12.	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	51
13.	RECURSOS NECESARIOS.....	53
14.	BIBLIOGRAFÍA.....	55

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Mapa de el potencial de viento en Guatemala	20
2.	Componentes de una torre de medición eólica.....	22
3.	Sitios de medición eólica	24
4.	Perfil vertical del viento con un flujo	35

TABLAS

I.	Localización de los sitios de medición eólica	25
II.	Desglose de equipos de medición instalados y programación.....	26
III.	Parámetros de sensores calibrados e instalados.....	27
IV.	Veletas instaladas	27
V.	Información de sitio programada en Datalogger	27
VI.	Programación de canales en Datalogger.....	28
VII.	Resumen de mediciones eólicas no. 1	29
VIII.	Resumen de mediciones eólicas no. 2	29
IX.	Resumen de mediciones eólicas no. 3	30
X.	Resumen de mediciones eólicas no. 4	31
XI.	Resumen de mediciones eólicas no. 5	31
XII.	Coeficiente de fricción para diferentes tipos de terreno	36
XIII.	Rugosidad para diversos tipos de terreno	38
XIV.	Valores de rugosidad para diversos tipos de terreno	39
XV.	Clases y longitudes de rugosidad por la Danish Wind Association	41
XVI.	Recursos necesarios	53

GLOSARIO

Aerogenerador	Máquina que transforma la energía del viento en energía eléctrica
Anemómetro	Instrumento que mide la velocidad del viento.
Datalogger	Equipo de software utilizado para almacenar datos de mediciones de viento.
Energía eólica	Es la energía obtenida del viento, la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire y es trasmutada en formas de energía eléctrica para actividad humana.
Factibilidad	La disponibilidad de los recursos necesarios para llevar a cabo los objetos o metas señaladas, generalmente se delimita a un proyecto,
Metodología	Proceso que permite mejorar los procesos y técnicas que se requiere para simplificar los problemas.
Parque eólico	Es la agrupación de aerogeneradores que transforma energía eólica en energía eléctrica.
Veleta	Instrumento que indica la dirección del viento.

RESUMEN

En el presente trabajo de graduación se plantea la realización de la metodología del cálculo y modelado de los perfil de velocidad de viento, del estudio de monitoreo de velocidad de viento realizado por el MEM en los lugares donde se piensa que existe potencial eólico y así obtener la calidad de los sitios y localizar los lugares donde se tengan la mejor calidad de viento y sean los más aptos para instalar parques de energía eólica de gran escala y media escala.

En el capítulo 1 se presenta el análisis del estudio de viento del MEM con respecto a sus instrumentos de medición y con los métodos y técnicas utilizados para la medición de velocidad, en el capítulo 2 se presenta la metodología del cálculo y modelación de los perfiles de velocidades de viento, en el capítulo 3 se presenta la realización del mapa de potencial eólico para generación de energía y en el capítulo 4 se presenta la clasificación de los sitios con respecto a su potencial eólico y compararlo con la tecnología en aerogeneradores utilizada en la región.

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se realiza dentro de las líneas de investigación de la Maestría en Energía y Ambiente de la Escuela de Estudios de Posgrado de Ingeniería, en los lineamientos de los estudios de proyectos de investigación de energía eólica y puntualmente en el cálculo y modelado del perfil de la velocidad del viento como parte del estudio de prefactibilidad que son necesarios para iniciar un proyecto de generación de energía eléctrica a partir de aerogeneradores. En los cuales se debe de apoyar del monitoreo de la velocidad de viento y la obtención del perfil de velocidad del viento.

La capacidad de generación eólica depende principalmente de la velocidad de viento, y a su vez ésta depende de, la altura, la humedad y la geografía del terreno. Para calcular el potencial eólico de cualquier región es necesario conocer la velocidad del viento a diferentes alturas y en diferentes épocas del año.

En Guatemala se dice que se encuentra en una posición geográfica donde se tiene viento a velocidades ideales para generar energía por medio del viento, para lo cual se ha realizado estudios de monitoreo de velocidad de viento en distintos sitios alrededor del país, tanto de la iniciativa privada como también por medio de instituciones estatales como el Ministerio de Energía y Minas (MEM).

En el 2010 completo el MEM de realizar su estado de monitoreo de velocidad de viento, el cual se baso en monitorear en distintos sitios la velocidad del viento, utilizando imágenes satelitales para la selección de los sitios, donde se tiene indicios de tener buena velocidad de viento para generar energía eólica.

Actualmente solo se conoce los datos de viento que se logro recopilar de los distintos sitios, pero para complementar los estudios de monitoreo se debe de encontrar la metodología para calcular los perfiles de viento de los sitios monitoreados para después poder construir el mapa de potencial eólico de Guatemala basándose en el potencial eólico que se tenga en cada sitio y solo así se podrá dar cuenta realmente cual es el potencial eólico que se tiene en el país.

2. ANTECEDENTES

En el 2001, la capacidad eólica instalada en el ámbito mundial alcanzó un récord de 23 300 MW. La tecnología eólica se encuentra en posición de hacer una importante contribución al suministro mundial de energía para los próximos años (2012 – 2030). Es una de las fuentes alternativas más económicas y aunque los cálculos varían mucho, sólo en Estados Unidos, se considera que se tiene el potencial de proporcionar entre 10 % y 20 % del suministro doméstico. ((BUN-CA)., 2002).

En América Central existen lugares con gran potencial para la generación eólica. En el caso de Costa Rica la generación por medio de parques eólicos es de 71 MW, abasteciendo el 2 % de la demanda nacional. En los otros países de la región ya se han levantado mapas eólicos que identifican posibles lugares con potencial de generación y que permitirán a los desarrolladores de proyectos incursionar en el negocio de la venta de energía eléctrica en el mercado de ocasión. ((BUN-CA)., 2002)

En Guatemala se tiene un estimado de potencia eólica sin explotar de 7 800 MW (Eólica en Guatemala: licitan 300 MW de energías renovables, 2012).

En el 2012 existió un interés creciente en Guatemala en construir parques de energía eólica, se encuentran empresas interesadas (Viento Blanco S.A. y San Antonio el Sitio S.A.), de las cuales se sabe que han hecho estudios de velocidad de viento, pero son celosas con esa información, actualmente con la única información de velocidad de viento es con el estudio que realizó el

Ministerio de Energía y Minas (MEM) por medio de su Dirección General de Energía.

El MEM inició en el 2006 un proyecto en medir la velocidad de viento en períodos de dos años, mediante la instalación de torres de medición, que cuentan con equipos de medición de velocidad y dirección de viento, radiación solar, presión y temperatura. (Dirección General de Energía, 2009).

3. OBJETIVOS

General

Elaborar la metodología para el cálculo y modelación del perfil de velocidad de viento, para conocer el potencial que existe en Guatemala del recurso del viento.

Específicos

1. Analizar el estudio de monitoreo de la velocidad de viento realizado por el MEM para determinar su veracidad, ya que es el único que existe con acceso al cualquier persona.
2. Analizar los perfiles de velocidades de viento en todos los sitios, porque así se obtendrá el potencial eólico del país.
3. Determinar el potencial eólico del país en base al perfil de velocidades de viento para poder fomentar la inversión en construcción de parques eólicos de energía eléctrica.

4. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación se realiza por el desconocimiento y la incertidumbre que se tienen sobre los perfiles de velocidad de viento en Guatemala elaborado para el desarrollo de la generación de energía eléctrica por medio de la energía eólica.

El Ministerio de Energía y Minas (MEM) con el propósito de fomentar la generación de energía por medio del viento fue que realizó el estudio de velocidad de viento, entonces lo que sigue es hacer el cálculo y modelado de los perfiles de velocidad de viento para conocer la estimación de la velocidades de viento a distintas alturas y esto una parte del estudio de prefactibilidad de cada lugar y así poder fomentar que en el futuro en los lugares donde se detecte potencial, eso haría que exista interés en completar los estudios de prefactibilidad en los lugares donde se tengan resultados prometedores, para tener en el futuro tengamos generación de energía por medio de recurso eólico.

La cantidad de energía (mecánica o eléctrica) que pueda generar una turbina eólica depende de las características del viento vigentes en el sitio de instalación. La producción puede variar en un factor de dos a tres entre un sitio regular y uno excelente, de manera que la rentabilidad de un proyecto depende directamente del recurso eólico local. Por esta razón, es necesario un estudio técnico detallado de las características del viento en un sitio específico (perfil de velocidad de viento) antes de avanzar en un proyecto de cualquier magnitud.

Existe actualmente un creciente mercado eléctrico y leyes que apoya la generación de energía con recursos renovables, y que ya existen empresas de iniciativa privada intentando ingresar proyectos de energía eólica, y que futuros estudios como este, lleve a fomentar más interés en las empresas en invertir en este recurso, con esto se puede pensar que el futuro energético de Guatemala llevaría hacia un futuro más limpio y sustentable.

5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Se dice que en Guatemala se encuentra una posición geográfica y estratégica donde se tiene una idea que el viento es óptimo para generar energía eólica (aproximadamente 7 800 MW), esto lleva a pensar ¿Existirán estudios que determinen con veracidad la velocidad del viento para generar energía eléctrica en el país? Y por consiguiente ¿Será necesario realizar la metodología para el cálculo del perfil de velocidad de viento en el país? Lo cual lleva a la interrogante, ¿Con esta información es posible conocer verdaderamente el potencial eólico en el país?

Por lo cual ha incentivado el interés para realizar estudios por medio de empresas privadas (Viento Blanco S.A. y San Antonio el Sitio S.A.) y el gobierno por medio del MEM. Pero lamentablemente la iniciativa privada no permite el acceso a sus datos que han recopilado. Por otra parte el estudio de velocidades de viento que elaboró el MEM está abierto al público y es información gratuita para cualquiera que la quiera utilizar.

El estudio de velocidades de viento del MEM fue realizado con el propósito de incentivar la inversión en generación de energía eléctrica por medio del viento, lo cual lleva a la pregunta ¿Qué se debe de conocer exactamente para poder fomentar la inversión en construcción de parque eólicos para generar energía eléctrica?

6. ALCANCES Y LIMITACIONES

Los alcances de la presente investigación están enfocados específicamente a nivel nacional y distribuidas en todo el territorio nacional y en cual busca incentivar:

- Incentivar estudios de pre factibilidad de distintas instituciones nacionales como internacionales, para la construcción de parques eólicos en el país.
- A las empresas de bajo capital y estén interesadas en invertir en este tipo de energía les ayude como parte de sus estudios de prefactibilidad y les dé una idea en que lugares puedan invertir bien su dinero.
- Fomentar el estudio de las distintas técnicas que se utilizan para la obtención de perfil de viento, y proponer que sean parte de los cursos de las universidades y a las carreras que sean a fin del tema.
- Fomentar que a partir de este estudio sea de ayuda para formen parte de futuras tesis de investigaciones y estudios de perfectibilidad en los distintos lugares donde se hicieron los estudios del cálculo del perfil de viento.
- Y sirva de una manera más de fomentar la introducción de esta tecnología de generación de energía por medio del recurso eólico al país y como una industria mas ayude a aliviar la situación actual del país y de más empleo y ayude a tener un mercado eléctrico más sostenible.

- Y el presente trabajo quedará limitado como una parte del estudio de prefactibilidad, solo servirá para tomar un criterio y selección de los lugares que tienen potencial eólico y es factible continuar los estudios de prefactibilidad como por ejemplo: estudio topográfico del lugar donde se piensa instalar el parque eólico, estudio de suelo, estudio de fauna y flora, estudio topográfico, estudio de ubicación de líneas eléctricas etc. Lo cual lo hace una herramienta adicional para el estudio de prefactibilidad.

7. MARCO TEÓRICO

El recurso eólico

La energía eólica tiene su origen en la solar, más específicamente en el calentamiento diferencial de masas de aire por el sol, ya sea por diferencias de latitud (vientos globales) o el terreno (mar-tierra o vientos locales). Las diferencias de radiación entre distintos puntos de la tierra generan diversas áreas térmicas y los desequilibrios de temperatura provocan cambios de densidad en las masas de aire que se traducen en variaciones de presión. De los sistemas de vientos globales, uno de los más importantes es el de los alisios, el cual tiene su origen en el mayor calentamiento de la región ecuatorial. En general, este sistema es activo entre las latitudes de 30 grados norte y sur, por lo que es de alta relevancia para la región de América Central. ((BUN-CA)., 2002).

De la energía solar que llega a la tierra por radiación (unos 1,018 kW-h por año), sólo alrededor del 0,25 % se convierte en corrientes de aire. Esta cantidad es todavía 25 veces mayor al consumo energético total mundial. La dirección del viento está determinada por efectos topográficos y por la rotación de la tierra. Es de gran importancia el conocimiento de las direcciones dominantes para instalar los equipos que extraerán la energía proveniente de este recurso. Los aerogeneradores se deben colocar en lugares donde exista la menor cantidad de obstáculos posibles en estas direcciones. ((BUN-CA)., 2002).

Aspectos técnicos de la energía eólica:

Tipos de viento: los vientos que interaccionan en el globo terrestre son:

Los geostróficos (globales) y los terrestres (locales). (WIND POWER. ORG, 2002)

- Vientos estróficos (globales): estos vientos son generados, principalmente, por las diferencias de temperatura, presión y muy poco, por la superficie terrestre. Se encuentran a una altura superior a los 1 000 metros sobre el nivel del suelo y su velocidad puede ser medida utilizando globos de sonda. (WIND POWER. ORG, 2002).
- Vientos terrestres (locales): estos vientos son mucho más influenciados por la superficie terrestre a altitudes de hasta 100 metros. Son frenados por la rugosidad de la superficie de la tierra y por los diferentes obstáculos que se encuentren en su recorrido. Sus direcciones cerca de la superficie serán ligeramente diferentes de las de los geostróficos debido a la rotación de la tierra. (WIND POWER. ORG, 2002).

Conocer el comportamiento de estos vientos es de gran importancia, ya que influyen en forma diferente en la producción de energía eólica siempre y cuando los globales sean menos intensos, ya que la dirección depende de la superposición de ambos vientos.

Teniendo esto en cuenta, los vientos terrestres o locales se clasifican en:

- Brisas marinas: durante el día la superficie terrestre se calienta más rápido que el mar, esto ocasiona que el aire que se encuentra en tal superficie se caliente y pierda densidad provocando que se eleve, dejando una diferencia de presión en la superficie. Luego de alcanzar cierta altura, el aire desciende al mar y, producto de la diferencia de presión causada es atraído el aire frío del mar. (WIND POWER. ORG, 2002).
- Brisas terrestres: en la brisa terrestre, la cual aparece al anoecer, ocurre el mismo proceso que en la marina, sólo que se invierte el sentido del flujo de aire, esto significa que el viento viaja de la superficie terrestre hacia el mar, ya que la tierra pierde el calor más rápido que el agua, disminuyendo, por consiguiente, la temperatura. Las velocidades de estos vientos son menores a los producidos en las brisas marinas, ya que en la noche existe una diferencia de temperatura menor que en el día entre la superficie terrestre y el mar. (WIND POWER. ORG, 2002).
- Vientos de montaña: un ejemplo de vientos de montaña son los de valle que se originan en las laderas, ya que miran hacia el sur (en el hemisferio norte) o hacia el norte (hemisferio sur). Durante el día, el aire caliente que se encuentra en las laderas pierde densidad elevándose hacia la cima y recorriendo toda la superficie de la ladera. En la noche se invierte el flujo del aire: de la cima hacia abajo, recorriendo la superficie de la ladera. Si el fondo del valle tiene cierta inclinación, el aire puede ascender y descender por el valle; a este efecto se le conoce como “viento de cañón”. (WIND POWER. ORG, 2002).

La energía en el viento: la energía en el viento es cinética. Su valor es el producto de la masa por 1/2 del cuadrado de la velocidad del viento "v". La masa contenida en una unidad de volumen [1 m³] de aire se define como la densidad ρ [kg/m³] del aire. Entonces, la energía cinética por unidad de volumen (o sea la contenida en una unidad de volumen) es igual a:

$$E_c = 1/2 \rho v^2 \left[J/m^3 \right]$$

Ecuación No.1 Ecuación de energía cinética del viento.

Asimismo, la energía cinética del viento depende de la densidad del aire, es decir, de su masa por unidad de volumen. En otras palabras, cuanto "más pesado" sea el aire, más energía recibirá la turbina. A presión atmosférica normal y a 15 °C el aire pesa unos 1 225 kilogramos por metro cúbico, aunque la densidad disminuye ligeramente con el aumento de la humedad. Además, el aire es más denso cuando hace frío que cuando hace calor: a grandes altitudes (en las montañas) la presión es más baja y éste es menos denso. (WIND POWER. ORG, 2002).

La potencia del viento: el volumen que por segundo pasa a través de un área A [m²] normal a la dirección de la velocidad del viento es igual al producto $A * v$ [m³/s](WIND POWER. ORG, 2002). Entonces el flujo de energía por segundo, o sea, la potencia a través de un área A es igual a:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad [W]$$

Ecuación No. 2 fórmula de potencia del viento.

Donde, P es la potencia real en watts, ρ es la densidad del aire en el punto a tratar, en kg/m^3 y está en función de la altura sobre el nivel del mar, temperatura y en menor grado de la humedad, A es el área del rotor en m^2 , y v es la velocidad del viento en m/s .

Podemos observar que P es directamente proporcional al área de barrido del rotor, esto justifica el uso de rotores de hasta 100 metros de diámetro. La velocidad del viento elevada al cubo afecta principalmente la potencia, por lo cual es el factor más importante en esta ecuación, y estas velocidades la que varía dependiendo de varios factores. (Bañuelos Ruedas & Ángeles Camacho, 2008).

Parámetros necesarios para el cálculo de la generación eólica

El análisis requerido depende directamente de la aplicación y la escala prevista; naturalmente, un proyecto a gran escala conectado a la red requiere de un estudio más profundo que un pequeño sistema aislado. El método más exacto (aunque más costoso) para conocer el potencial de producción de energía del viento, es la instalación de uno o más anemómetros, los cuales, periódicamente, generan datos de la velocidad y la dirección del viento en forma electrónica. ((BUN-CA)., 2002).

Estos datos se analizan detalladamente en relación con las características del terreno y las mediciones de estaciones meteorológicas cercanas, con el fin de estimar la producción potencial de energía a largo plazo y durante diferentes épocas del año. Información meteorológica de sitios aledaños puede apoyar el análisis del potencial eólico; sin embargo, este tipo de información generalmente tiende a subestimar el recurso eólico. ((BUN-CA)., 2002).

Hay tres componentes del viento que determinan la potencia disponible de un sistema de conversión de energía eólica:

Velocidad del viento: es un parámetro crítico porque la potencia varía según el cubo de la velocidad del viento, o sea, una o dos veces más alta significa ocho veces más de potencia. Además, la velocidad varía directamente con la altitud sobre el suelo, por la fricción causada por montañas, árboles, edificios y otros objetos. Las turbinas eólicas requieren una velocidad de viento mínima para empezar a generar energía: para pequeñas turbinas, este es, aproximadamente, de 3,5 metros por segundo (m/s); para turbinas grandes, 6 metros por segundo, como mínimo. ((BUN-CA)., 2002).

Características del viento (turbulencia): mientras que los modelos de viento globales ponen el aire en movimiento y determinan, a grandes rasgos, el recurso del viento en una región, rasgos topográficos locales, que incluyen formaciones geográficas, flora y estructuras artificiales, pueden mostrar la diferencia entre un recurso eólico utilizable y uno que no lo es. ((BUN-CA)., 2002).

Densidad del aire: temperaturas bajas producen una densidad del aire más alta. Mayor densidad significa más fluidez de las moléculas en un volumen de aire dado y más fluidez de las moléculas encima de una pala de la turbina produce un rendimiento más alto de la potencia, para una velocidad del viento dada. ((BUN-CA)., 2002).

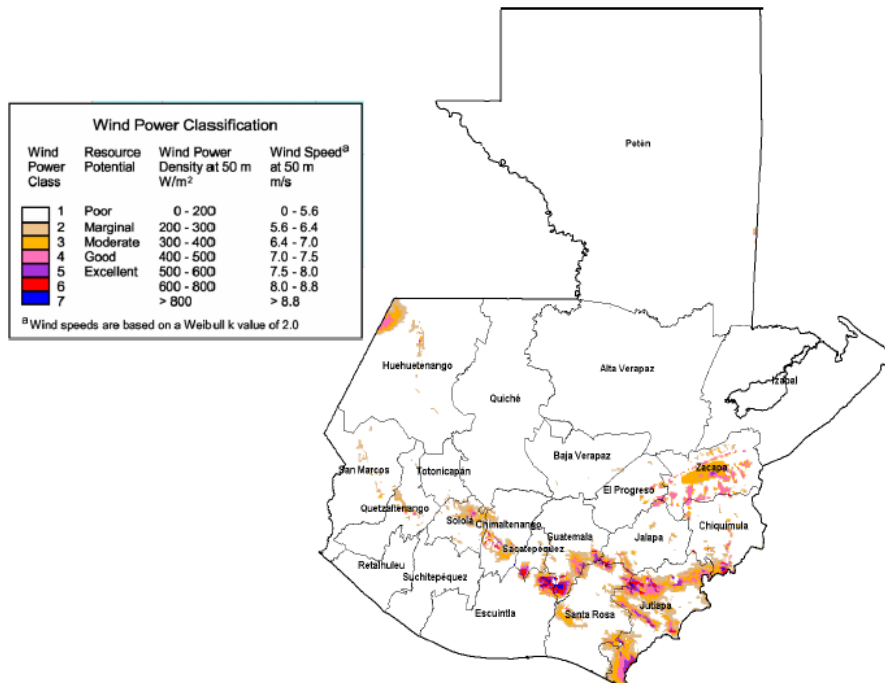
Mapa eólico de Guatemala

Con la ayuda técnica y financiera del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) se desarrolló el proyecto Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA) en el 2006, con la finalidad de promover la utilización de la energía eólica y solar, minimizando las barreras causadas por la falta de información, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Mapas de velocidad (m/s) y densidad de potencia del viento (W/m^2) a una altura de 50 metros, para los países de Centroamérica y Cuba.
- Mapas de radiación solar global anual y directa normal, en $kWh/m^2/día$, para Centroamérica y Cuba.
- Herramienta geoespacial que muestra el potencial eólico y solar de Guatemala, así como, información geográfica y de infraestructura, entre otras.

En el siguiente mapa se puede observar las áreas donde existe potencial de viento.

Figura 1. Mapa de el potencial de viento en Guatemala



Fuente: Guía del inversionista 2010. Dirección General de Energía y Minas, Ministerio de Energía y Minas.

Proyecto de torres de medición eólica en Guatemala (proyecto actualmente finalizado e desinstalados)

Descripción del proyecto

Uno de los objetivos de la política energética del Gobierno de Guatemala, es fomentar el aprovechamiento de los recursos renovables de energía con que cuenta el país, así como, promover la localización, evaluación e inventario de estos (recursos renovables) energéticos que sirvan y fomenten la generación de energía limpia.

Se están desarrollando acciones que fomenten el uso de la energía proveniente del viento, a través de la instalación de torres de medición de viento, las cuales, generan información básica que ayude a fomentar y que se puedan desarrollar de acuerdo al potencial identificado, proyectos de generación de energía eléctrica, bombeo de agua, entre otras aplicaciones.

El proyecto consiste en la instalación de torres de medición del recurso eólico, que registran velocidad y dirección del viento y temperatura, entre otros.

Período de tiempo de las mediciones

El proyecto que desarrolla la Dirección General de Energía del Ministerio de Energía y Minas, consiste en la medición del recurso eólico, por un período de medición de dos años por sitio seleccionado, mediante la instalación de torres de medición eólica, torres que cuentan con equipos que brindan información sobre el comportamiento de la velocidad y dirección del viento y temperatura, principalmente.

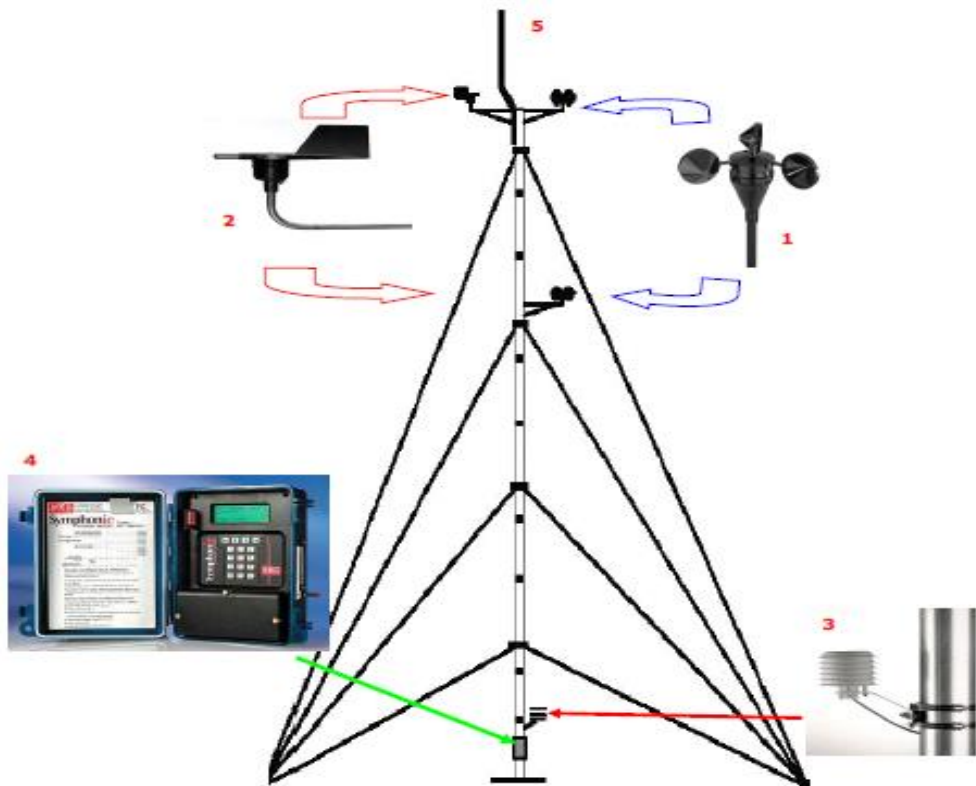
Torres de medición eólica

La torre de medición instaladas por la Dirección General de Energía tiene una altura de 30 metros (a excepción de las torres de medición instaladas en Nentón, Huehuetenango y Guanagazapa, Escuintla que tiene una altura de 51 metros), en él se encuentran instalados equipos que miden el comportamiento del viento (velocidad y dirección) y temperatura, cada diez minutos y la almacenan en un registrador.

Las torres son marca NRG y tienen los siguientes equipos y componentes:

1. Medidores de velocidad, debidamente calibrados
2. Medidores de dirección de viento
3. Un sensor de temperatura
4. Un registrador (*data logger*)
5. Un pararrayo, con su alambre y dos varillas de tierra
6. Torre tubular de 30 con sus tensores y anclas

Figura 2. **Componentes de una torre de medición eólica**



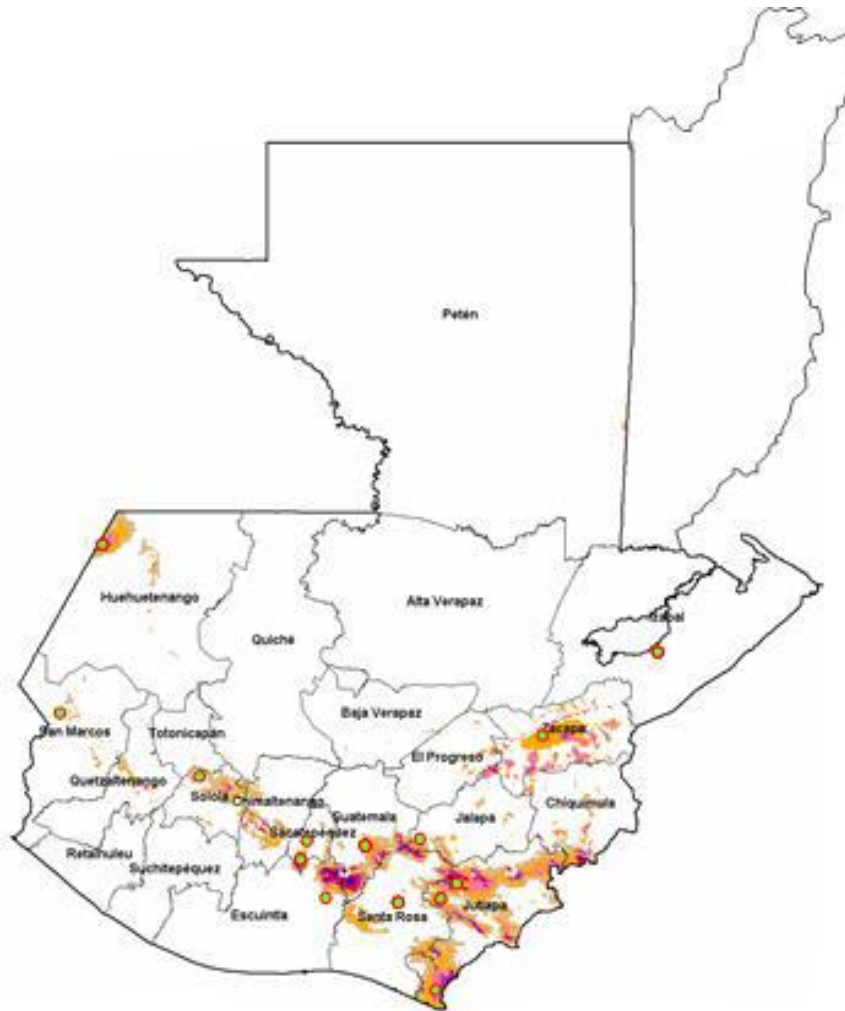
Fuente: Guía del Inversionista 2010. Resumen de mediciones eólicas. Dirección General de Energía Minas, Ministerio de Energía y Minas.

Sitios de mediciones eólicas

El proyecto de medición eólica que en 2010 desarrolla la Dirección General de Energía, inició en el 2006, a la fecha ya se cuentan con resultados de la medición del viento, y estos corresponden a los sitios localizados en: Estanzuela, Zacapa; San Marcos, San Marcos; Santa Catarina Ixtahuacán, Sololá; Alotenango, Sacatepéquez; Moyuta, Jutiapa, Chiquimulilla, Santa Rosa y Mataquescuintla, Jalapa; Jutiapa, Jutiapa; Quesada, Jutiapa; Morales, Izabal; Villa Canales, Guatemala, Nentón, Huehuetenango y Guanagazapa, Escuintla.

En el siguiente mapa se muestra los sitios en donde se cuentan con resultados del de medición eólica.

Figura 3. Sitios de medición eólica



Fuente: Guía del Inversionista 2010. Resumen de mediciones eólicas. Dirección General de Energía Minas, Ministerio de Energía y Minas.

En la siguiente tabla, se muestran las ubicaciones de las torres de medición eólica, en la se incluye el nombre del sitio, fecha de inicio y de finalización de la medición, así como, de aquéllas torres que aún se encuentran en medición, altura sobre el nivel del mar, distancia de la capital al sitio y las coordenadas geográficas.

Tabla I. Localización de los sitios de medición eólica

LOCALIZACIÓN DE LAS TORRES DE MEDICIÓN EÓLICA								
No.	Torre No.	Nombre del sitio	Inicio de medición	Final de Medición	Altitud en msnm	Distancia de la capital en km	Coordenadas Geográficas	
							N	W
1	0001	Finca Matazano, Chispan, Estanzuela, Zacapa	12-Ene-06	28-Feb-08	197	141	15°01'30.8"	89°33'46.6"
2	0010	El Rodeo, San Marcos, San Marcos	14-Ene-06	31-Dic-08	3340	275	15°02'33.5"	91°51'41.5"
3	0020	Santa Catarina Ixtahuacán, Solola	15-Ene-06	12-Feb-08	3013	170	14°50'46.7"	91°21'35.6"
4	0030	Finca Candelaria, Alotenango, Sacatepequez	16-Ene-06	13-Mar-08	1091	70	14°25'41.1"	90°48'47.5"
5	0050	Samororo, Mataquesuintla, Jalapa	12-Oct-06	24-Feb-10	1493	55	14°30'41"	90°16'59.8"
6	0060	Durazno, Jutiapa Jutiapa	25-Oct-06	En medición	1850	140	14°23'5.9"	90°1'39.2"
7	0070	Salamar, Moyuta Jutiapa	28-Oct-06	15-Mar-09	32	164	13°51'24.5"	90°6'21.1"
8	0080	Guayabales, Chiquimula, Santa Rosa	11-Dic-07	En medición	769	130	14°7'2.8"	90°19'7.6"
9	0090	La Brea, Quesada, Jutiapa	13-Dic-07	En medición	1318	115	14°20'7.3"	90°4'2.0"
10	0100	Finca Bella Vista, Parcelamiento, San Gil Morales Izabal	23-Jul-08	En medición	599	240	15°29'11.1"	88°56'47.7"
11	0110	Finca la Concha, El Jocotillo, Villa Canales, Guatemala	10-Sep-08	En medición	1126	42	14°23'43.4"	90°29'43.0"
12	0120	Aldea Chacaj, Nenton, Huehuetenango	16-Oct-08	En medición	690	384	15°54'20.6"	91°48'37.2"
13	0130	Monte Maria, Alotenango, Sacatepequez	10-Jun-09	En medición	791	80	14°23'38.5"	90°48'49.5"
14	0140	La Unión, Guanagazapa, Escuintla	24-Jun-10	En medición	429	96	14°10.482'	90°34.393'

Fuente: Guía del inversionista 2010. Resumen de mediciones. Dirección General de Energía
Ministerio de Energía y Minas.

Resultados de las mediciones del viento por sitio

Los resultados de las mediciones que se presentan a continuación son el resultado del proyecto de Torres de Medición Eólica, que en el 2010 desarrollo el Ministerio de Energía y Minas a través de la Dirección General de Energía. La información que presenta corresponde a información mensual y anual por sitio.

Los resultados de medición que se presentan en este capítulo fueron obtenidos de la Dirección General de Energía del Ministerio de Energía y Minas, en la Guía del Inversionista 2010, en el documento denominado Resultados del Proyecto de mediciones del viento en Guatemala.

Dicha información fue capturada en los distintos puntos el país, utilizando para el efecto, en cada sitio torres de medición las cuales generalmente tenían una altura de 30 metros. En la que se encontraban instalados equipos que medían a cada 10 minutos el comportamiento del viento, velocidad, dirección y temperatura, cuyos datos fueron almacenados en un registrador conocido como datalogger.

Tabla II. **Desglose de equipos de medición instalados y programación**

Componente	Modelo	Numero de Item	Numero de serie	Altura de instalación (m)
DataLogger	Symphonie	3147	30907667	1.5
Anemómetros	NRG # 40C	1900	ver tabla	30 y 20
Veletas	NRG #200P	1904	-	30
Sensor de Temperatura	NRG # 110S	1906	-	5

Fuente: Referencia a Guía del inversionista 2010. Resumen de mediciones eólicas. Dirección General de Energía Ministerio de Energía y Minas.

Tabla III. Parámetros de sensores calibrados e instalados

Componente	Modelo	Número de Serie	Pendiente (slope)	Offset	Altura de Instalación (m)
Anemómetros	NRG #40C	25017	0.765	0.35	30
		25016	0.765	0.35	20

Fuente: Guía del inversionista 2010. Resumen de mediciones eólicas. Dirección General de Energía Ministerio de Energía y Minas.

Tabla IV. Veletas instaladas

Componente	Modelo	Número de Serie	Pendiente (slope)	Offset	Altura de Instalación (m)
Veletas	NRG #200P	-	0.351	0	30

Fuente: Guía del inversionista 2010. Referencia a resumen de mediciones eólicas. Dirección General de Energía Ministerio de Energía y Minas.

Tabla V. Información de sitio programada en Datalogger

Componente	Modelo	Fecha y Hora	Número de Sitio	Unidades	Altitud	Latitud y Longitud	Password de Datos
DataLogger	Symphonie	12/01/2006 00:00 a.m. -6 GTM	0001	SI	197m	N 15°01.513' W 89°33.779'	No

Fuente: Guía del inversionista 2010. Resumen de mediciones eólicas. Dirección General de Energía Ministerio de Energía y Minas.

Tabla VI. Programación de canales en Datalogger

Canal	Tipo	Leyenda	Factor de Escala	Offset	Unidades	Altura	No. de Serie
1	Frecuencia	NRG #40C Anem. m/s	0.765	0.35	m/s	30m	25017
2	Frecuencia	NRG #40C Anem. m/s	0.765	0.35	m/s	20m	25016
3	Frecuencia						
4							
5							
6							
7	Analógico	#200P Wind Vane	0.351	0	Grado	30m	-
8	Analógico						
9	Analógico	#110S Temp. °C	0.138	-86.383	°C	5m	-
10	Analógico						
11							
12							

Fuente: Guía del inversionista 2010. Resumen de mediciones eólicas. Dirección General de Energía Ministerio de Energía y Minas.

Resumen de mediciones

En los siguientes cuadros se muestran los resultados comparativos de las mediciones por año y por sitio.

Tabla VII. Resumen de mediciones eólicas no. 1

AÑO 2006	VELOCIDAD PROMEDIO DEL VIENTO en m/s _ a 30 metros						
	Estanzuela, Zacapa	El Rodeo, San Marcos, San Marcos	Santa Catarina Ixtahuacán, Sololá	Alotenango, Sacatepéquez	Samororo, Mataquescuintla, Jalapa	Durazno, Jutiapa, Jutiapa	Salamar, Moyuta, Jutiapa
Ene	4.7	7.8	5.4	9			
Feb	4.9	6.2	4.5	8.3			
Mar	4.9	6.5	4.1	6.7			
Abr	5.0	5.7	3.8	4.9			
May	4.0	4.4	2.9	3.6			
Jun	3.2	5.0	3.8	4.0			
Jul	3.3	5.9	4.6	5.0			
Ago	3.8	5.8	4.4	4.7			
Sep	3.5	5.0	3.6	3.9			
Oct	3.6	5.1	3.4	3.8			
Nov	3.8	5.6	3.6	7.1	7.9	7.0	4.9
Dic	4.5	6.8	4.7	8.2	9.3	7.5	4.7
Prom	4.1	5.8	4.1	5.8	7.6	6.5	4.5

Fuente: Guía del inversionista 2010. Resumen de mediciones eólicas. Dirección General de Energía Ministerio de Energía y Minas.

Tabla VIII. Resumen de mediciones eólicas no. 2

AÑO 2006	VELOCIDAD PROMEDIO DEL VIENTO en m/s _ a 30 metros						
	Estanzuela, Zacapa	El Rodeo, San Marcos, San Marcos	Santa Catarina Ixtahuacán, Sololá	Alotenango, Sacatepéquez	Mataquescuintla, Jalapa	Durazno, Jutiapa, Jutiapa	Salamar, Moyuta, Jutiapa
Ene	4.7	8.1	5.3	9.1	10.1	8.6	4.8
Feb	4.7	5.6	3.7	6.3	6.0	5.8	4.1
Mar	5.2	6.4	4.2	7.4	8.5	7.9	5.0
Abr	5.0	5.3	3.7	4.8	4.4	4.8	3.1
May	4.5	4.3	3.1	3.8	4.5	4.5	2.7
Jun	3.1	4.9	3.6	4.0	3.9	4.7	2.7
Jul	3.4	5.9	4.4	4.5	4.7	5.1	2.8
Ago	3.0	6.1	4.0	3.2	3.8	4.4	2.5
Sep	2.9	5.6	3.9	3.8	4.0	4.4	2.8
Oct	2.5	5.5	3.6	3.8	4.9	3.9	2.7
Nov	3.7	7.9	4.6	9.4	11.6	8.9	5.3
Dic	3.7	6.7	4.2	7.0	7.8	7.0	4.3
Prom	3.9	6.0	4.0	5.6	6.2	5.8	3.6

Fuente: Guía del inversionista 2010. Resumen de mediciones eólicas. Dirección General de Energía Ministerio de Energía y Minas.

Tabla IX. Resumen de mediciones eólicas no. 3

VELOCIDAD PROMEDIO DEL VIENTO en m/s _ a 30 metros											
AÑO 2006	Estanzuela, Zacapa	Santa Catarina Ixtahuacán, Sololá	Alotenango, Sacatepéquez	Mataquescuintla, Jalapa	Durazno, Jutiapa, Jutiapa	Salamar, Moyuta, Jutiapa	Guayabales Chiquimulilla Santa Rosa	La Brea, Quesada, Jutiapa	Morales, Izabal	Villa Canales, Guatemala	Nentón, Huehuetenango
Ene	4.5	5.3	9.3	10.1	8.5	5.4	3.4	5.0			
Feb	4.4	3.8	5.3	6.3	6.2	3.4	2.1	3.1			
Mar			5.4	6.1	6.1	4.1	2.3	2.7			
Abr				5.4	5.4	3.7	2.1	2.6			
May				3.8	4.5	2.5	1.7	2.3			
Jun				4.7	5.2	2.7	1.9	2.5			
Jul				4.0	4.2	2.8	2.0	2.9	3.6		
Ago				3.6	3.8	2.7	1.7	2.2	3.5		
Sep				3.0	3.2	2.5	1.6	1.8	3.9	2.5	
Oct				8.4	5.7	3.3	2.2	2.7	5.0	6.2	3.8
Nov				9.6	7.2	6.2	5.0	4.7	4.1	8.9	4.3
Dic				9.1	8.0	5.0	3.1	4.5	3.7	8.4	4.8
Prom	4.4	4.5	6.7	6.2	5.7	3.7	2.4	3.1	4.0	6.5	4.3

Fuente: Guía del inversionista 2010. Resumen de mediciones eólicas. Dirección General de Energía Ministerio de Energía y Minas.

Tabla X. Resumen de mediciones eólicas no. 4

AÑO 2009	VELOCIDAD PROMEDIO DEL VIENTO en m/s_ a 30 metros								
	Mataquescu ntla Jalapa	Durazno, Jutiapa, Jutiapa	Salamar, Moyuta, Jutiapa	Guayabales, Chiquimulilla, Santa Rosa	La Brea, Quesada, Jutiapa	Morales, Izabal	Villa Canales, Guatemala	Nentón, Huehue	Monte María, Alotenango, Sacatepéque z
En	8.5	7.3	5.0	2.8	3.5	3.8	7.9	4.4	
Feb	10.3	8.7	6.9	4.8	5.4	4.0	9.1	6.6	
Mar	7.6	7.5	6.8	3.5	3.9	4.5	7.5	6.0	
Abr	5.5	5.8		2.1	2.9	4.2	5.3	5.4	
May	3.6	3.9		1.8	2.0	3.7	3.5	3.9	
Jun	2.8	3.3		1.7	1.7	3.5	2.8	2.5	2.5
Jul	7.5	6.7		2.1	4.3	3.9	6.1	5.4	3.6
Ago	6.5	6.4		2.0	3.7	3.7	5.8	5.0	
Sept	3.9	4.4		1.6	2.2	3.4	3.8	3.0	
Oct	4.3	4.4			2.2	3.6	4.3	3.0	2.6
Nov	7.6	6.2			2.7	3.8	7.1	2.6	3.8
Dic	6.0	5.7			-	3.3	5.6	3.0	4.3
PROM	6.2	5.8	6.2	2.5	3.1	3.8	5.7	4.2	3.4

Las mediciones en Nentón, Huehuetenango son a 51 metros de altura.

Fuente: Guía del inversionista 2010. Resumen de mediciones eólicas. Dirección General de Energía Ministerio de Energía y Minas.

Tabla XI. Resumen de mediciones eólicas no. 5

AÑO 2010	VELOCIDAD PROMEDIO DEL VIENTO A 30 m				
	Durazno, Jutiapa, Jutiapa	La Brea, Quesada, Jutiapa	Villa Canales, Guatemala	Nentón, Huehue	Monte María, Alotenango, Sacatepéquez
Enero	7.7	5.0	8.2	4.1	7.0
Febrero	5.9	3.4	5.9	3.5	4.4
Marzo	5.4	3.1	5.7	4.1	3.9
Abril	4.3	2.3	4.0	4.8	3.2
Mayo	5.2	2.6	3.5		2.5
Junio		2.3	3.2		
Julio		2.1	3.2		
PROM	5.7	3.0	4.8	4.1	4.2

Información disponible a la fecha

Fuente: Guía del inversionista 2010. Resumen de mediciones eólicas. Dirección General de Energía Ministerio de Energía y Minas.

De la información anterior, los mejores resultados de las mediciones de viento corresponden a las torres instaladas en San Marcos, San Marcos; Alotenango, Sacatepéquez; Mataquescuintla, Jalapa; Jutiapa, Jutiapa; y Villas Canales Guatemala. Para estos sitios, las mayores velocidades de viento se dieron entre los meses de noviembre a marzo.

Factores que afectan la velocidad del viento

Se puede considerar que la velocidad del viento es afectada por varios factores, destacando:

- Factores naturales: orografía del terreno, temperatura, vegetación natural, cultivos, estación del año.
- Factores artificiales: construcciones y obstáculo permanente y temporal, tales como edificios, casas, cercas, chimeneas, torres de telefónica móvil, etc.

Los obstáculos topográficos naturales o edificados perturban el régimen laminar del viento, sobre todo en las capas más bajas, pues al encontrar un obstáculo el viento es desviado vertical y horizontalmente y, debido a la concentración del flujo laminar, aumenta en la parte superior y disminuye en la parte inferior.

En las ciudades se produce una situación diferenciada de las condiciones generales del entorno y se puede llegar a tener el efecto llamado isla de calor lo cual produce vientos locales.

Experimentalmente se ha comprobado que a una gran altura de la superficie del suelo, alrededor de un kilómetro, la superficie terrestre influye muy poco sobre el viento. Sin embargo, en las capas más bajas de la atmósfera, las velocidades del viento se ven afectadas por la fricción con la superficie terrestre. (Bañuelos Ruedas & Angeles Camacho, 2008)

Cálculo de la velocidad del viento a diferentes alturas

Debido a que las mediciones preliminares generalmente se realizan a 10 metros, aunque hay casos en que se realizan a menores alturas originalmente con otros fines, tal como monitoreo agrícola, la técnica comúnmente usada para estimar velocidades a mayores alturas es extrapolar los valores obtenidos y de esta manera construir el perfil de velocidad del viento del sitio. (Bañuelos Ruedas & Angeles Camacho, 2008).

Los vientos están mucho más influenciados por la superficie terrestre a altitudes de hasta 100 metros. El viento es frenado por la rugosidad de la superficie de la tierra y por los obstáculos. La velocidad del viento varía directamente proporcional con la altura, esto es, a menor altitud del viento se ve más afectado por la rugosidad y obstáculos del terreno ya que existe mayor fricción y se generan turbulencias. Para modelar el perfil vertical de la velocidad el viento existen dos métodos generales, el método de perfil logarítmico y el método de ley de exponencial. (Jaramillo Salgado, 2010).

Perfil por Ley exponencial de Hellman o Perfil por Ley de Potencia

Es la más común de estas expresiones y más simple (Bañuelos Ruedas & Angeles Camacho, 2008), el cual que relaciona las velocidades de viento en dos alturas cualesquiera y es expresada en la ecuación siguiente:

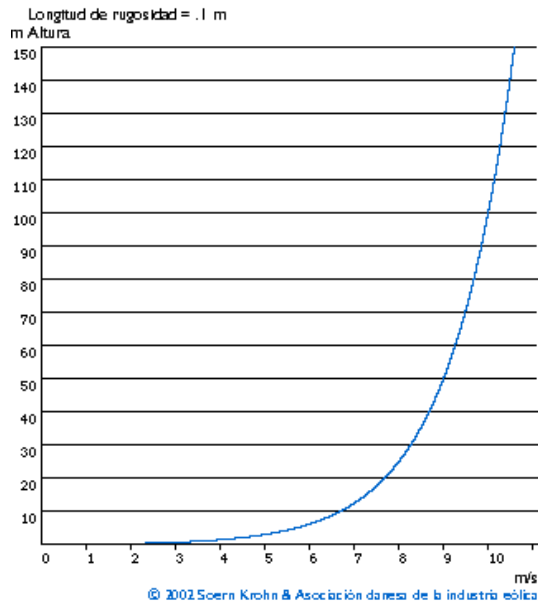
$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{H}{H_0}\right)^\alpha$$

Ecuación No. 3: perfil de viento por ley Exponencial de Hellman o Ley de Potencia

Donde v es la velocidad a la altura H , V_0 la velocidad a la altura H_0 (frecuentemente referida a una altura de 10 metros) y α Es el coeficiente de fricción o exponente de Hellman. Este coeficiente está en función del tipo de terreno sobre el cual se está midiendo la velocidad del viento, frecuentemente se toma como un valor de $1/7$ para terrenos abiertos.

Es necesario considerar que este parámetro puede variar para un mismo sitio desde un valor de $1/7$ durante el día hasta $1/2$ durante la noche. A esta última ecuación también se le conoce como la ley de potencia.

Figura 4. Perfil vertical del viento con un flujo



Fuente: (Bañuelos Ruedas & Angeles Camacho, 2008)

El parámetro α es determinado empíricamente y la ecuación puede ser usada para ajustar datos razonablemente bien en el rango de 10 hasta 100-150 metros si no hay obstáculos en forma de picos agudos en el terreno. El exponente α varía con la altura, hora del día, época del año, naturaleza del terreno, velocidades de viento y temperatura, como se ha comprobado en análisis realizados en varias partes del mundo.

La tabla XII muestra valores del exponente de Hellmann, que se dan en función de la rugosidad del terreno, como las encontradas en las referencias y que en general dan los datos indicados en la siguiente tabla. (Bañuelos Ruedas & Angeles Camacho, 2008).

Tabla XII. **Coefficiente de fricción para diferentes tipos de terreno**

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

Fuente: (Bañuelos Ruedas & Angeles Camacho, 2008).

Ley de Perfil Logarítmico

Otra fórmula, aprobada en Europa es la conocida como la ley del perfil logarítmico del viento (Bañuelos Ruedas & Angeles Camacho, 2008), tomando como base la velocidad del viento conocida a una altura dada. La cual está indicada en la siguiente ecuación:

$$\frac{v}{v_0} = \frac{\ln(H/z_0)}{\ln\left(H_0/z_0\right)}$$

Ecuación No. 4: Ley de Perfil Logarítmico de Viento

Donde Z_0 es llamado coeficiente de longitud de rugosidad y seda en metros, el cual depende básicamente del tipo de terreno, espaciamiento y altura de rugosidades (agua, pasto, etc.) y tiene valores desde 0,0002 hasta 1,6 o más. Estos valores pueden encontrarse en tablas, y son estimados, ya que depende de varios factores, además de la rugosidad del terreno, pues incluso esta puede cambiar durante el día y noche, durante el año, ya que los lugares de medición o monitoreo pueden ser tierras de uso agrícola y obviamente la longitud de los cultivos es variable.

Sin embargo, una vez que se ha calculado la velocidad a otras alturas, se pueden aplicarlas ecuaciones para calcular la potencia o energía promedio aprovechable, mediante las ecuaciones de Weibull o de Rayleigh (Bañuelos Ruedas & Angeles Camacho, 2008) en forma manual o con el uso de programas especializados como el WAsP.

Algo que conviene destacar es que Z_0 , para un terreno homogéneo, se puede obtener mediante mediciones realizadas a dos alturas distintas sobre el terreno y en caso necesario con esta Z_0 se puede calcular la velocidad a otras alturas y la idealización matemática del perfil de velocidad sería la expresada, dándole más simplicidad a los cálculos.

Es importante considerar que así como se usa una rosa de los vientos para trazar el mapa de la cantidad de energía procedente de diferentes direcciones, se puede usar también una rosa de las rugosidades para describir la rugosidad del terreno en diferentes direcciones desde el futuro emplazamiento de una turbina eólica.

En las tablas XIII y XIV se pueden tomar un valor estimado de dicho factor de rugosidad, sin embargo al hacer cálculos del factor cuando se cuenta con mediciones de velocidad del viento a diferentes alturas se puede comprobar que los factores dados en tablas no siempre se cumplen. (Bañuelos Ruedas & Angeles Camacho, 2008).

Tabla XIII. **Rugosidad para diversos tipos de terreno**

Clase de Rugosidad	Descripción	Longitud de la rugosidad z(m)
0	Superficie del agua	0.0002
1	Áreas abiertas con muy poca protección contra el viento	0.03
2	Terreno agrícola con algo protección contra el viento de más de 1 km de distancia de separación	0.1
3	Distritos urbanos y terreno agrícola con mucha protección contra el viento	0.4
4	Ciudades grandes o bosques	1.6

Fuente: (Bañuelos Ruedas & Angeles Camacho, 2008).

Tabla XIV. **Valores de rugosidad para diversos tipos de terreno**

Tipo de terreno	Z_0 (mm)
Muy suave; hielo o lodo	0.01
Mar abierto en calma	0.20
Mar picado	0.50
Superficie de nieve	3.00
Césped	8.00
Pasto quebrado	10.00
Campo preparado para cultivo	30.00
Cultivo	50.00
Pocos árboles	100.00
Varios árboles, hileras de árboles, pocas construcciones	250.00
Bosques, tierras cubiertas con árboles	500.00
Suburbios	1500.00
Centros de ciudades con edificios altos	3000.00

Fuente: (Bañuelos Ruedas & Angeles Camacho, 2008).

Una manera de tener coeficientes de fricción y rugosidad confiables, para poder realizar estimaciones en sitios similares por su cercanía y por sus condiciones ambientales, es contando con registros de mediciones de velocidad del viento a diferente altura de al menos un año. Se obtiene primero el exponente α para dos diferentes alturas y velocidades.

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

Ecuación No. 5: fórmula de coeficiente de fricción

Con esto se puede determinar la siguiente expresión:

$$z_o = \frac{H_0^\alpha \ln(H) - H^\alpha \ln(H_0)}{H_0^\alpha - H^\alpha}$$

Ecuación No. 6: fórmula de coeficiente de rugosidad.

De esta manera ambos coeficientes de fricción y de rugosidad se cumplen para dos diferentes mediciones y entonces se puede presentar el perfil de viento correspondiente y factores para un día, época, año y para las diferentes direcciones del viento. (Bañuelos Ruedas & Angeles Camacho, 2008)

Tabla XV. **Clases y longitudes de rugosidad por la Danish Wind Association**

Clase de rugosidad	Longitud de rugosidad	Índice de energía (%)	Tipo de paisaje
0	0,0002	100	Superficie del agua.
0.5	0,0024	73	Terreno completamente abierto con una superficie lisa, p.ej., pistas de hormigón en los aeropuertos, césped cortado, etc.
1	0,03	52	Área agrícola abierta sin cercados ni setos y con edificios muy dispersos. Sólo colinas suavemente redondeadas.
1.5	0,055	45	Terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 1250 m.
2	0.1	39	Terreno agrícola con algunas casas y setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 500 m.
2.5	0.2	31	Terreno agrícola con muchas casas, arbustos y plantas, o setos resguardantes de 8 metros de altura con una distancia aproximada de 250 m.
3	0.4	24	Pueblos, ciudades pequeñas, terreno agrícola, con muchos o altos setos resguardantes, bosques y terreno accidentado y muy desigual.
3.5	0.8	18	Ciudades más grandes con edificios altos.
4	1.6	13	Ciudades muy grandes con edificios altos y rascacielos.

Fuente: (Bañuelos Ruedas & Angeles Camacho, 2008).

8. ÍNDICE DE CONTENIDO PROPUESTO PARA EL INFORME FINAL

RESUMEN

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES

JUSTIFICACIÓN

OBJETIVOS

CAPÍTULO 1: ANÁLISIS DEL MONITOREO DE VELOCIDADES DE VIENTO

- 1.1. Análisis de los sitios monitoreados
 - 1.1.1. Obtener de los sitios con potencial de viento
 - 1.1.2. Análisis de los sitios monitoreados
- 1.2. Instrumentación utilizada para realizar el monitoreo
- 1.3. Criterios y técnicas para el monitoreo

CAPÍTULO 2: CÁLCULO Y MODELACIÓN DE LOS PERFILES DE VELOCIDADES DE VIENTO

- 2.1. Factores a considerar para el cálculo del perfil de velocidad de viento
 - 2.1.1. Fricción del viento
 - 2.1.2. Rugosidad del terreno
- 2.2. Metodología para el cálculo de los perfiles de viento

CAPÍTULO 3: REALIZACIÓN DEL MAPA DE POTENCIAL EÓLICO

- 3.1. Modelado de los perfiles de viento
 - 3.1.1. Normalización de los perfiles de viento
 - 3.1.2. Análisis de disección de los perfiles de viento
 - 3.1.3. Análisis de el error de los perfiles de viento
- 3.2. Realización del mapa de potencial eólico del país

CAPÍTULO 4: CLASIFICACIÓN DE LOS SITIOS CON RESPECTO A SU POTENCIAL EÓLICO

- 4.1. Clasificación de los sitios por su potencial eólico
- 4.2. Comparación de resultados con las distintas aerogeneradores usados en la región

ANÁLISIS DE RESULTADOS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

9. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

Con la metodología para cálculo y modelado de los perfiles de velocidad de viento en los sitios donde se monitoreo la velocidad de viento, alrededor del territorio nacional por parte del MEM es demostrar que todos los sitios monitoreados son óptimos para la generación de energía eléctrica por medio del recurso eólico.

10. MÉTODOS Y TÉCNICAS

El contenido general del presente trabajo de tipo cuantitativo, se concentra en el cálculo y análisis de los perfiles de velocidad de viento en los puntos de monitoreo alrededor del territorio nacional según estudio de velocidad de viento del MEM, y normalizar los datos según la distribución requerida y con esta información hacer comparaciones con los distintos aerogeneradores que están en el mercado y se utilizan en la región y compararlas entre ellas para conocer la factibilidad de la viento en los distintos lugares es aceptable para promover el desarrollo de energía eólica.

Fase 1. Análisis del monitoreo de velocidad de viento

En esta parte se analizaran los datos que son necesarios del estudio de velocidad de viento del Ministerio de Energía y Minas, para así poder realizar el cálculo de los perfiles de velocidad de viento en todos los lugares donde se realizó el monitoreo de la velocidad de viento. En esta parte se analizaran los instrumentos que fueron utilizados para realizar el monitoreo así como analizar los criterios que se utilizaron para colocar los instrumentos, y ver si fue el ideal el que se utilizo para el monitoreo de estos datos.

Fase 2. Cálculo de los perfiles de velocidad de viento

Ya con los datos requeridos de todos los sitios donde se monitoreó la velocidad de viento, se procederá al cálculo de los perfiles de velocidad de viento, por medio de formulas matemáticas, considerando la rugosidad y la

fricción de viento específica de cada lugar donde se realizó el monitoreo de la velocidades de viento.

Fase 3. Normalización de los cálculos del los perfiles de velocidad de viento

Ya contando con los perfiles de velocidad de viento de los distintos sitios que se monitorearon, se procede a normalizar los datos por medio de técnicas estadísticas, y a trabajar los datos obtenidos por medio de distribuciones estadísticas adecuadas (Weibull o Rayleigh), lo cual sirve para garantizar la calidad de los cálculos, analizando los niveles de errores y así es más fácil manipular estos datos para hacer cálculos técnicos con los datos ya normalizados.

Fase 4. Análisis de los datos y cálculo de potencia de los aerogeneradores

Con los datos normalizados se procederá a analizar los datos para conocer el potencial eólico para generación de energía eléctrica en los distintos sitios monitoreados, por medio de el modelado de los perfiles de velocidad con los datos técnicos que se generaron y con los perfiles modelados y normalizados poder compararlos con los distintos aerogeneradores utilizados en la región y compararlos entre ellos para poder determinar cual aerogenerador es el indicado para cada lugar, y así poder determinar qué sitios es factible y tiene potencial de generación de energía eólica. Y poder dar conclusiones finales del estudio, recomendaciones y referencias.

11. RESULTADOS ESPERADOS

- Obtener los perfiles de velocidad del viento en todos los puntos de monitoreo según el estudio de velocidades de viento del Ministerio de Energía y Minas.
- Por medio de el cálculo de los perfiles de velocidad de viento, encontrar los lugares donde no se tiene las velocidades para que sea factible el uso de aerogeneradores que se utilizan en esta región para generar energía eléctrica a gran escala, y que sirva este estudio para ver si es factible utilizar otro tipo de tecnología en aerogeneradores como los de eje vertical o tecnología a menor escala.
- Por medio del cálculo de los perfiles de velocidad de viento, conocer los lugares donde si tienen las velocidades de viento donde es más factibles la generación de energía eléctrica a gran escala por medio de los aerogeneradores verticales, y ver cuáles del mercado se podrían acoplar mejor a los lugares. Para poder continuar con los estudios de prefactibilidad.

12. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

ACTIVIDAD	TIEMPO ESTIMADO	FECHAS ESTIMADAS
Corrección y aprobación de Protocolo	2 semanas	11/02/2013 al 15/02/2013
Redacción del primer capítulo	2 semanas	18/02/2013 al 9/03/2013
Redacción del segundo capítulo	3 semanas	11/03/2013 al 29/03/2013
Redacción del tercer capítulo	3 semanas	01/04/2013 al 13/04/2013
Redacción del cuarto capítulo	2 semanas	15/04/2013 al 13/05/2013
Corrección y aprobación del Informe Final	6 semanas	15/05/2013 al 17/05/2013

13. RECURSOS NECESARIOS

Los recursos necesarios serán utilizados de mayor porcentaje en visitas a campo, para corroborar los terrenos donde realizaron los estudios del MEM de medición de velocidad de viento, corroborar los tipos de terreno para estar seguro de que los coeficientes de rugosidad y de fricción de viento son los correctos. Lo demás recursos serán utilizados para gastos de redacción del informe final.

Tabla XVI. Recursos necesarios

VISITA A CAMPO	COSTO POR VISITA	COSTO TOTAL
Renta de vehículo agrícola	Q600	Q3 000
Combustible	Q200	Q1 000
Viáticos	Q200	Q1 000
Hospedaje	Q250	Q1 250
Imprevistos	Q300	Q1 500
	TOTAL DE VISTA A CAMPO	Q7 750

GASTOS DE REDACCION	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
Precio de Hoja	Q0,15	Q7,50
Gastos de Impresión	Q0,50	Q25,00
Imprevistos	Q100 ,00	Q100,00
	TOTAL DE GASTO DE REDACCION	Q132,50

Fuente: elaboración propia.

14. BIBLIOGRAFÍA

1. Association, W. W. (2012). 2012 Half - Year Report. Bonn, Germany: WWEA.
2. Bañuelos Ruedas, F., & Angeles Camacho, C. (2008). Análisis y Validación de Metodología Usada Para la Obtención de Perfiles de Velocidad de Viento. Mexico Distrito Federal: IEEE seccion Mexico.
3. (BUN-CA)., N. (2002). Manuales sobre energía renovable: Eólica. San Jose, Costa Rica: FOCER.
4. Dirección General de Energía, d. M. (2009). Resumen de mediciones del proyecto de torres de medición. Guatemala, Guatemala.
5. Doctor Conrado Moreno Figueredo. (2009). Distribución de los aerogeneradores en un parque eólico. Obtenido de <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia41/HTML/Articulo03.htm>
6. Ecologia Verde. (12 de 07 de 2009). Ecologia Verde. Obtenido de <http://www.ecologiaverde.com/la-energia-eolica-es-el-futuro/>

7. Eólica en Guatemala: licitan 300 MW de energías renovables. (2012). REVE (Revista Eolica de Vehiculo Eolico) , 1.
8. Jaramillo Salgado, D. O. (2010). Tendencias tecnológicas y aplicaciones de la energía eólica para la generación eléctrica. Capacitación para los estados miembros de la olade curso capev 7 2010 (pág. 75). Mexico, Mexico DF: Centro de Investigación en Energía. Universidad Nacional Autónoma de México.
9. McEwan, L. (2010). El Cambio Climatico Global. Libros del Zorzal.
10. Mundial, A. E. (2012). La capacidad eólica mundial supera los 250.000 MW. Reve Revista Eolica del Vehiculo Electrico , 2.
11. sustentable, R. T. (2006). Revista Futuros. Obtenido de http://www.revistafuturos.info/futuros14/energia_eolica.htm
12. WIND POWER. ORG. (2002). La Asociación Danesa de la Industria Eólica. Obtenido de <http://www.windpower.org>