

## Determinación del potencial de generación de energía renovable en la UNAH

Nabil Kawas<sup>1</sup>

Edgar Josué Mejía Escobar, Germán Joaquín Gómez Canales<sup>2</sup>

### RESUMEN

El objetivo de esta investigación es determinar la posibilidad de aprovechar las condiciones ambientales y meteorológicas analizando los parámetros de radiación y viento e instalando equipo meteorológico de gran precisión, asimismo poder determinar el potencial de generación de energía eléctrica sostenible y ambientalmente amigable dentro del campus central de la UNAH. Para el logro de esta tarea se instaló una estación meteorológica automática con sensores de dirección y velocidad de viento de última generación.

De los análisis realizados al parámetro viento, medido a 10 metros, y las estimaciones realizadas a 30, 60 y 80 metros, utilizando la ley exponencial de Hellmann y el método de distribución de Weibull, se verificó que existe un potencial para mover un generador de baja potencia para la producción de energía eólica.

Con respecto a la radiación solar, según los promedios mensuales y los máximos registrados en el lugar de estudio, se determinó que existe el potencial para la generación de energía eléctrica. Estos valores están determinados en menor o mayor potencial según la temporada y la influencia de fenómenos meteorológicos que se presentan en Honduras.

Palabras claves: *radiación solar, viento, energía renovable, sensores, Hellmann, Weibull.*

### ABSTRACT

To determine the possibility of using environmental and weather conditions by

---

<sup>1</sup> Universidad Nacional Autónoma de Honduras. Facultad de Ciencias, Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra. Correo electrónico: nkawas@gamil.com

<sup>2</sup> Universidad Nacional Autónoma de Honduras. Facultad de Ciencias, Estación Meteorológica Experimental Correo electrónico: edgarjosuemejia@gmail.com; joaquin.honduras@gmail.com.

analyzing radiation and wind parameters by installing highly accurate meteorological equipment to determine the potential of sustainable electricity generation that is environmentally friendly for the UNAH's central campus. They installed an automatic weather station, wind direction sensors and speed generation.

The analisis performed to measure wind parameter at 10 feet and the estimations made at 30, 60 and 80 meters using Hellmann's Exponent Law and Weibull distribution method, found out that there is potential for low-power generator for the wind power generation.

In regard to solar radiation, depending on monthly averages and highs registered in the study site, the potential exists for the generation of electrical energy. These values are determined to a lesser or greater potential under the influence of season and weather phenomena that occur in Honduras.

*Key words: solar radiation, wind, renewable energy, sensors, Hellmann, Weibull.*

## **INTRODUCCIÓN**

Una energía alternativa o más precisamente una fuente de energía alternativa, es aquella que puede suplir a las energías o fuentes energéticas actuales, ya sea por su menos efecto contaminante o fundamentalmente por su posibilidad de renovación (Quiñones Cabello, 2006).

El consumo de energía es uno de los grandes medidores del progreso y bienestar de una sociedad. Así, el concepto de crisis energética aparece cuando las fuentes de energía de las que se abastece la sociedad se agotan. En consecuencia, un modelo económico como el actual, cuyo funcionamiento depende de un continuo crecimiento, exige también una demanda igualmente creciente de energía (Quiñones Cabello, 2006).

Las energías renovables se encuentran en un nivel de desarrollo adecuado para su explotación comercial, una de ellas es la energía eólica que ha destacado por ser la más rentable, la que ha crecido en los últimos años exponencialmente. Otra alternativa para la generación de energía es la radiación solar por medio de celdas fotovoltaicas, que en la actualidad sus avances en la captura de radiación solar han sido utilizados en casi todos los ámbitos del quehacer humano (Quiñones Cabello, 2006).

Todos los países del istmo centroamericano han emprendido acciones para

fomentar la participación de las fuentes renovables, la diversificación de las fuentes de energía y el ahorro y uso eficiente de la energía. Muchas de estas acciones se han concretado en el desarrollo de nuevos proyectos, iniciativas y programas. Actualmente en Honduras existen muchos proyectos de energía renovable, algunos de ellos ya instalados (105 MW).

Con estas nuevas opciones y tomando en cuenta el consumo de energía eléctrica en la ciudad universitaria, en este estudio se busca encontrar una alternativa de generar energía renovable, con un sistema híbrido entre eólica y solar.

## METODOLOGÍA

Para llevar a cabo este estudio se determinó instalar una estación meteorológica automática con sensores de dirección y velocidad de viento, un data logger suficientemente robusto para el procesamiento de la información, y un sistema GPRS. Se utilizó el sensor de viento 05103 (ver imagen 1) y un data logger CR850 (ver imagen 2).

Imagen 1. Veleta para medir dirección y velocidad



Imagen 2. Data logger CR850 de viento



## TRATAMIENTO DE LOS DATOS

Se empezó por identificar y completar una base de datos digital sobre el parámetro climatológico de viento, registrados en otros lugares aledaños. También se tomó en cuenta la serie climatológica en la Estación Meteorológica Experimental (EME) de la UNAH y los datos capturados en la estación meteorológica automática utilizada en este proyecto.

Este proceso consistió en las actividades digitalización y procesamiento de 20 años de información ya existentes, con control de calidad. En la estación meteorológica automática se configuraron 3 tablas para poder capturar datos cada 10 minutos, horarios y diarios.

### *Extrapolación de datos en la vertical*

Debido a que los datos se midieron a la altura de 10 metros, fue necesario estimar velocidades a mayores alturas, utilizando la ley exponencial de Hellmann que relaciona las velocidades de dos alturas cualesquiera y se expresa con la ecuación siguiente (Muciño Morales, 2009):

$$V_h = V_{10} \left(\frac{h}{10}\right)^\alpha$$

En la que  $V_h$  es la velocidad del viento a la altura  $h$ ,  $V_{10}$  es la velocidad del viento a 10 metros de altura y  $\alpha$  es el exponente de Hellmann que varía con la rugosidad del terreno, cuyos valores se describen en la tabla 1.

Tabla 1. Rugosidad del terreno

Lugares llanos con hielo o hierva	$\alpha = 0.08 \div 0.12$
Lugares llanos (mar, costa)	$\alpha = 0.14$
Terrenos poco accidentados	$\alpha = 0.13 \div 0.16$
Zonas rústicas	$\alpha = 0.2$
Terrenos accidentados o bosques	$\alpha = 0.2 \div 0.26$
Terrenos muy accidentados y ciudades	$\alpha = 0.25 \div 0.4$

En este estudio se utilizó el valor para zonas rústicas, es decir 0.2, debido a que en los alrededores del sitio de estudio existen obstáculos naturales y generados por el hombre, tales como colonias (viviendas), algunas edificaciones de comercios y el terreno es quebrado.

### *Distribución de Weibull y rosa de los vientos*

1. Distribución de direcciones: la distribución de direcciones de viento es de vital importancia a la hora de ubicar las turbinas eólicas en terrenos no uniformes o formando varios conjuntos de ellas e, incluso, para conocer la variabilidad direccional del régimen de vientos al que debe responder el sistema de orientación de la máquina (ver gráfico 1).

La rosa de los vientos (ver imagen 3) solo indica la distribución relativa de las direcciones del viento y no el nivel real de la velocidad media del viento, para ello es necesario hacer un análisis de las velocidades del viento a través de distribuciones de probabilidad como la de Weibull (Muciño Morales, 2009).

- 2. Rosa de los vientos: un vistazo a la rosa de los vientos es extremadamente útil para situar aerogeneradores. Si una gran parte de la energía del viento viene de una dirección particular, lo que se necesitara, cuando se coloque una turbina eólica, será tener la menor cantidad de obstáculos posibles en esa dirección, así como un terreno lo más liso posible (Joaquín Mur Amada).

Gráfico 1. Distribución de Weibull

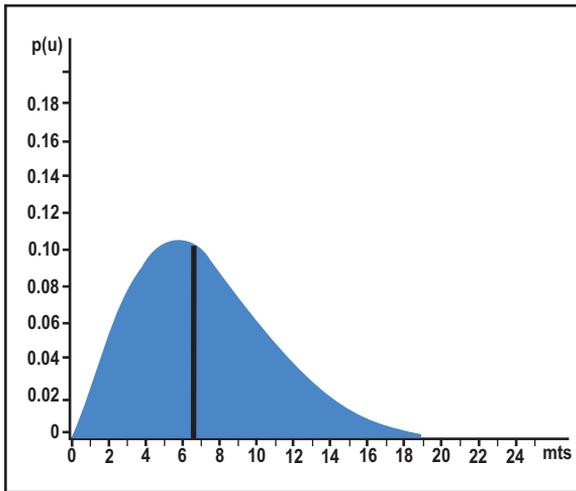
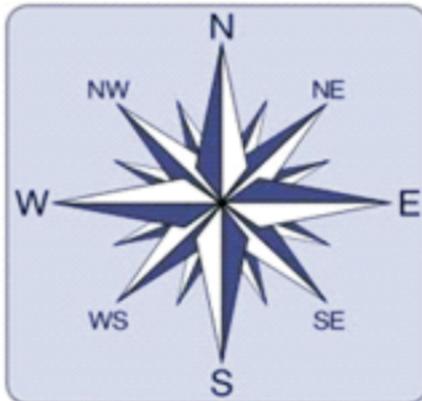


Imagen 3. Rosa de los vientos



El conocimiento de la distribución de probabilidades de velocidades de viento  $p(v)$  es muy importante a la hora de determinar el potencial eólico disponible, además sirve para otros parámetros energéticos de interés. Para la industria eólica es muy importante ser capaz de describir la variación de las velocidades del viento, ya que los proyectistas de turbinas necesitan la información para optimizar el diseño de sus aerogeneradores, así como para minimizar los costes de generación.

Si se miden las velocidades del viento a lo largo de un año, se observará que en la mayoría de áreas los fuertes vendavales son raros, mientras que los vientos frescos y moderados son bastante comunes (Muciño Morales, 2009). La variación del viento en un emplazamiento típico suele describirse utilizando la llamada distribución de Weibull, que esta descrita por la ecuación siguiente:

$$F(V) = \frac{K}{C} * \left(\frac{V}{C}\right)^{K-1} * e^{-\left(\frac{V}{C}\right)^K}$$

Donde:

$v$ : es la velocidad

$k$ : parámetro de forma ( $0 < k < \infty$ )

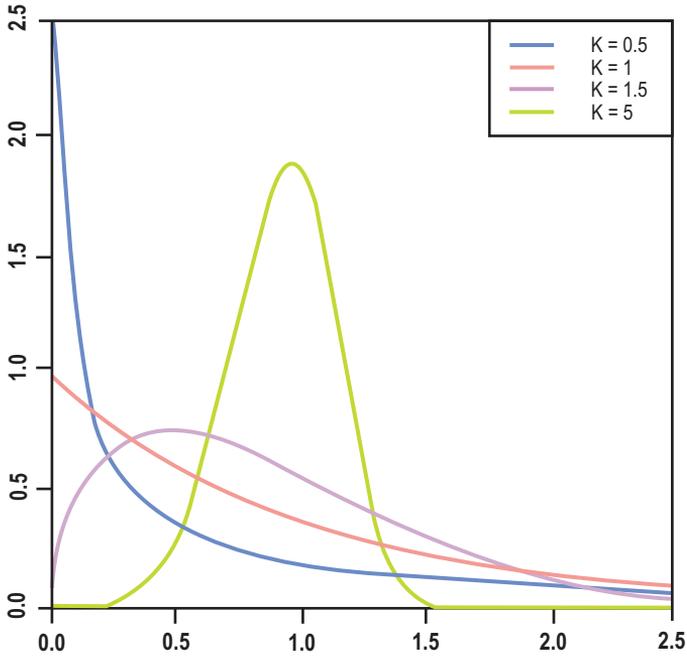
$c$ : parámetro de escala ( $0 < c < \infty$ )

El parámetro  $k$ , como su nombre lo indica, determina la forma, o perfil, de la distribución, la cual es función de este valor.

El parámetro  $c$  indica la escala de la distribución, es decir, muestra que tan aguda o plana es la función. Una distribución biparamétrica está completamente definida por los parámetros de forma y de escala, los valores de estos parámetros varían dependiendo del emplazamiento en estudio.

El factor de forma  $k$  varía en un rango de 1.5 a 3.0. En la gráfico 2 se muestran distintas curvas de Weibull para distintos valores de  $k$ .

Gráfico 2. Curvas de Weibull



Los valores  $k$  y  $c$  se deben obtener a partir de las medidas tomadas en el emplazamiento. Para lograrlo se ajustan los datos obtenidos mediante mínimos cuadrados a la distribución de Weibull mediante las fórmulas, utilizando la ecuación lineal de regresión y sabiendo que  $y = \ln(-\ln(F))$ ,  $x = \ln(v)$ .

Donde:

$v$  = es la velocidad medida

$k$  = el parámetro de forma,  $k$ , es la pendiente de la recta de regresión

*Deducción del parámetro  $c$*

$$b = K * \ln(c)$$

$$\frac{b}{K} = \ln(c)$$

$$c = e^{\left(\frac{b}{K}\right)}$$

### *Densidad de potencia*

El recurso eólico en un sitio que puede ser descrito a grandes rasgos por la velocidad media del viento, pero la densidad de potencia disponible en el viento proporciona una indicación más correcta del potencial de energía eólica de un sitio. La densidad de potencia es proporcional a la suma del cubo de la velocidad promedio a corto plazo del viento y la densidad del aire. Debido a este término cúbico, dos sitios con la misma velocidad promedio del viento, pero con diferentes distribuciones, pueden tener valores muy diferentes de densidad de potencia. La densidad de potencia disponible en el viento se calcula con la siguiente ecuación:

$$\text{Densidad de potencia} = 0.5 * \rho * v^3 * F(v)$$

Donde:

$\rho$ = densidad del aire

$v$ = velocidad del viento

$F(v)$ = probabilidad de ocurrencia de la velocidad (distribución de probabilidad de Weibull)

Esta ecuación solo debe utilizarse para registros individuales de medición y no para los registros promedio a largo plazo, tales como el valor mensual o anual. Utilizar esta ecuación con promedios a largo plazo subestimará la densidad de potencia disponible en el viento, debido a que los promedios a largo plazo no incluirán la mayoría de los registros de más alta velocidad.

### **METODOLOGÍA**

Se instaló un sensor para medir radiación solar directa (piranómetro), por lo cual se configuró para recolectar información de radiación en  $W/m^2$  en valores horarios, máximos diarios, máximos diarios absolutos y promedios diarios; generando, digitalizando y procesando esta información durante un año y así poder determinar el potencial con que cuenta la ciudad universitaria en la generación de energía eléctrica por medio de la radiación solar (ver imagen 4).

Se generaron tablas con valores promedios horarios y máximos absolutos horarios, calculando los valores promedios diarios y posteriormente mensuales.

Imagen 4. Piranómetro



## RESULTADOS

### *Viento*

Tomando en consideración algunos aspectos sobre la ubicación del sitio de estudio y los resultados obtenidos, se puede deducir que los efectos locales marcan un patrón significativo en la velocidad del viento, las velocidades varían según el día y la noche, donde durante la noche el viento tiende ser calmo o muy suave; posteriormente, durante el día, tiende a acelerarse después de la 9:00 a.m.

Este patrón local cambia cuando existen fenómenos a otra escala meteorológica y de temporadas ya definidas, como la sinóptica, donde se presentan efectos con alguna frecuencia, pero de corta duración, volviéndose a las condiciones locales cuando estos efectos se disipan.

Para fines de este estudio y debido a estos comportamientos, se tomó en cuenta solamente el viento diurno con un horario entre las 6:00 a.m. y 7:00 p.m. En este periodo de datos recolectados se presentan valores muy desiguales, por ejemplo, los meses de abril y mayo arrojan valores promedios entre 1.60 y 2.10 m/s, siendo estos los meses con menor potencial de generación.

Igualmente se observa que existen varios meses con valores de velocidad por arriba de 3.0 m/s, como noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo, relacionado

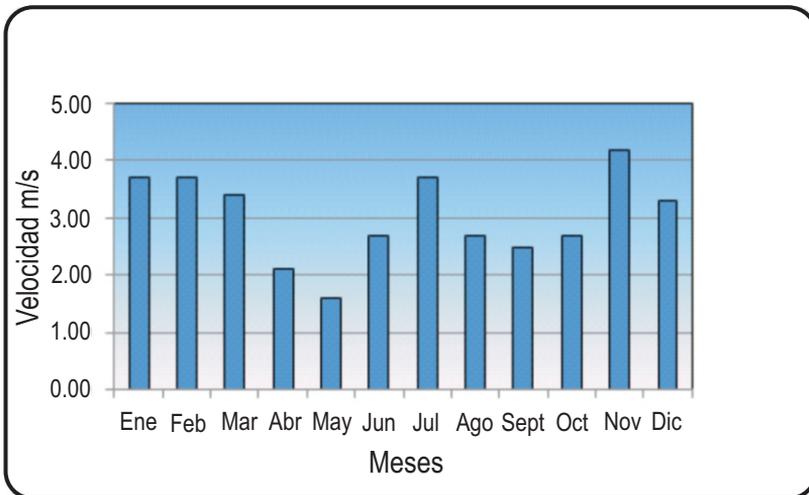
esto con la presencia de sistemas anticiclónicos migratorios y asociados al desplazamiento de las masas frías desde las zonas polares y latitudes medias del hemisferio norte. En los gráficos de estos meses existen unos picos máximos de corta duración en la escala temporal de entre 2 a 4 días, donde el viento se acelera considerablemente.

El mes de julio presenta valores muy significativos de 3.7 m/s, esta aceleración está asociada a la intensificación de los vientos alisios, generados por el anticiclón de la Bermudas y relacionado al periodo de canicular que se presenta en esta época en varias regiones de Honduras (Gómez Canales, 2013).

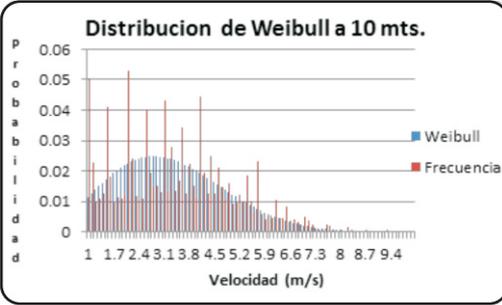
A continuación se presentan gráficos del comportamiento de la velocidad del viento a 10 metros, de forma mensual, durante el periodo de abril de 2012 a marzo de 2013.

*Comportamiento mensual del viento*

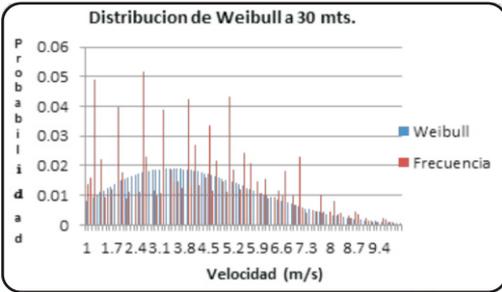
Gráfico 3. Velocidad del viento, abril 2012-marzo 2013



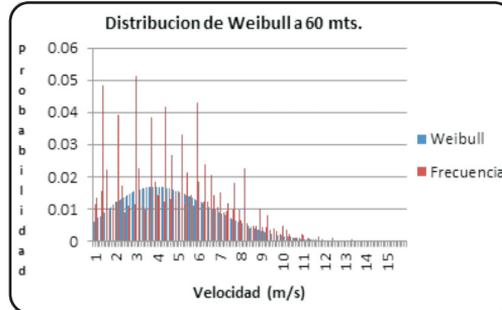
Distribución de Weibull: se realizó un análisis con la distribución Weibull para la serie de datos de la estación automática utilizada en el estudio, el cual se realizó para vientos a una altura de 10, 30, 60 y 80 metros durante el periodo de abril de 2012 hasta marzo de 2013, obteniéndose los siguientes resultados (Mejía Escobar, 2013):



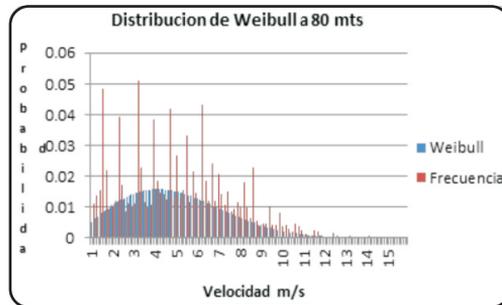
<b>VIENTO A 10 metros</b>	
<b>PARÁMETRO</b>	
Velocidad promedio (m/s)	3.25
Densidad de potencial (W/m <sup>2</sup> )	39.79
Factor de escala C	3.7152
Factor de forma (k)	2.2206



<b>VIENTO A 30 metros</b>	
<b>PARÁMETRO</b>	
Velocidad promedio (m/s)	4.02
Densidad de potencial (W/m <sup>2</sup> )	61.22
Factor de escala C	4.656
Factor de forma (k)	2.1109



<b>VIENTO A 60 metros</b>	
<b>PARÁMETRO</b>	
Velocidad promedio (m/s)	4.6642
Densidad de potencial (W/m <sup>2</sup> )	80.77
Factor de escala C	5.28775929
Factor de forma (k)	2.1225



<b>VIENTO A 80 metros</b>	
<b>PARÁMETRO</b>	
Velocidad promedio (m/s)	4.9674
Densidad de potencial (W/m <sup>2</sup> )	91.8
Factor de escala C	5.6274
Factor de forma (k)	2.1197

### Radiación solar

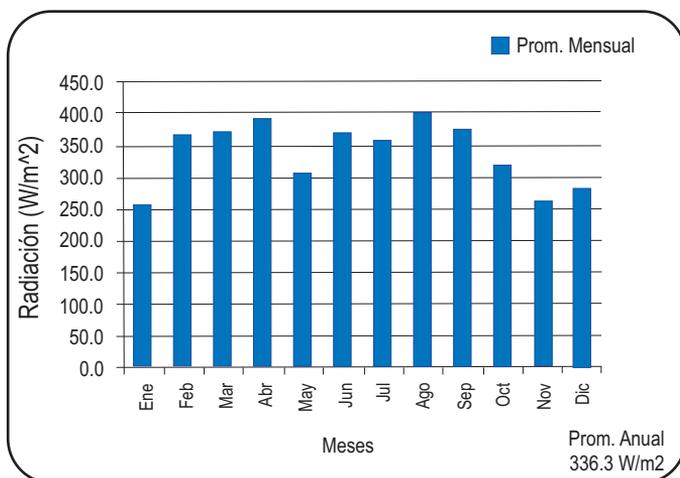
Con esta información obtenida se verificó que existe el potencial requerido para la generación de energía eléctrica, obteniéndose un promedio anual de 336.3.7 W/m<sup>2</sup>, se obtuvieron valores máximos absolutos, que oscilan entre los 1,000 y 1,396 W/m<sup>2</sup>, en un horario entre las 10:00 a.m. y las 3:00 p.m. Estos valores varían dependiendo de la nubosidad existente asociada a los diferentes fenómenos meteorológicos.

Durante el año, la mayoría de los meses presentan un gran potencial de radiación, con valores promedios por arriba de 300 W/m<sup>2</sup>, relacionados algunos a la temporada seca que se presenta en esta región de país, también existen meses con un gran potencial, aunque están dentro de la temporada de lluvias; esta radiación se presenta de forma diurna, presentándose la menor cantidad de radiación en horas de la tarde.

El menor potencial de generación se presenta entre los meses de noviembre a enero, con valores por debajo de 300 W/m<sup>2</sup>, temporada en la que se presenta invasión de masas frías desde las zonas polares y latitudes medias, manteniendo abundante nubosidad por varios días e impidiendo la penetración de los rayos solares hasta la superficie terrestre.

Estos desplazamientos de masas frías se presentan en territorio hondureño con una frecuencia de 2 a 3 por mes, dependiendo en gran medida los efectos meteorológicos en la escala global (Kawas, 2013).

### Radiación solar promedio mensual



Meses	(W/m <sup>2</sup> )
Ene	254.5
Feb	364.3
Mar	371.4
Abr	389.3
May	302.0
Jun	368.8
Jul	355.7
Ago	399.0
Sep	372.4
Oct	316.2
Nov	260.2
Dic	281.2
Prim.	336.3

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Según el análisis realizado al parámetro de viento medido a 10 metros y las estimaciones realizadas a 30, 60 y 80 metros, utilizando la ley exponencial de Hellmann y el método de distribución de Weibull, se verificó que existe un potencial para mover un generador de baja potencia para la generación de energía eólica.
2. La influencia de los diferentes fenómenos meteorológicos determinan el comportamiento del viento en el lugar de estudio, dominando en gran medida los efectos locales, dando lugar a observar viento muy suave o calmo por la noche y acelerándose al momento de un mayor calentamiento de la superficie terrestre durante el día; este comportamiento cambia significativamente cuando existe la presencia de fenómenos a una mayor escala (escala sinóptica) y el viento se mantiene una velocidad uniforme durante la noche y el día (presencia de empujes polares, ciclones tropicales, etc.).
3. Según los datos recolectados de radiación solar y su análisis, se concluye que según el promedio mensual, que fue de  $336.3 \text{ W/m}^2$  y a los máximos de radiación que se registraron en el lugar de estudio, existe el potencial para la generación de energía eléctrica. Estos valores están determinados en menor o mayor potencial según la temporada y por la presencia de fenómenos meteorológicos que influyen Honduras; estos datos se presentaron en las tablas y gráficos de los resultados obtenidos.
4. Es recomendable realizar mediciones a estas alturas y poder tener un valor más real, instalando sensores similares a los que se utilizaron a 10 metros y así mejorar la metodología usada, ya que con dichas mediciones podríamos calcular los valores de turbulencia en el lugar de estudio.
5. Debido a que el valor obtenido de velocidad media del viento en la Ciudad Universitaria fue de  $3.3 \text{ m/s}$  a 10 metros y a esta velocidad se podría generar energía eléctrica con molinos de baja potencia y que se encontró un potencial satisfactorio para la generación de energía eléctrica a partir de la radiación solar, sería muy interesante y provechoso hacer un estudio de factibilidad económica de fuentes de energía renovable con un sistema híbrido entre energía eólica y solar, por lo anterior es necesario medir viento a 30, 60 y 80 metros con los sensores respectivos y así complementar este estudio.

## AGRADECIMIENTO

A la Dirección de Investigación Científica de la UNAH por el apoyo prestado en el desarrollo de este trabajo, a los compañeros de la Estación Meteorológica Experimental de la UNAH por su valiosa cooperación en la instalación del equipo y por su labor ininterrumpida durante 34 años de generación de información meteorológica.

## BIBLIOGRAFÍA

- Borja D., Marco A. (2003). *Proyecto eólico*. Disponible en:  
<http://www.iiw.org.mx/boletin042003/tend.pdf>.
- Cancino Solórzano, Y. y Bernart, Xiberta. (2007). *Situación actual de la energía eólica en México: alcances y perspectivas*.
- Cepal, Naciones Unidas. (2009). *Istmo centroamericano: las fuentes renovables de energía y el cumplimiento de la estrategia 2020*.
- Coto Torres, Jeffrey. Diseño de un sistema alternativo de generación de energía renovable por medio de la utilización de colectores solares fotovoltaicos.
- CIEMAT. (1997). Principios de conversión de la energía eólica.
- Criado, Víctor. Manual práctico de evaluación de una instalación de energía eólica a pequeña escala.
- Muro Sáenz, Fernando (1988). Estadística práctica.
- Meted Ucar. Disponible en: [http://www.meted.ucar.edu/oceans/currents\\_es/wind](http://www.meted.ucar.edu/oceans/currents_es/wind)
- Muciño Morales, David Eduardo. (2009). *Evaluación del recurso eólico de la ciudad universitaria en México*.
- MurAmada, Joaquín. *Curso de energía eólica*.
- Neumann, Antonio Lecuona. (2002). *La energía eólica: principios básicos y tecnología*.
- Oñate Arrestí, D. (2006). *Diseño de una instalación solar fotovoltaica*. Disponible en:  
[http://www.torresrefrigeracion.com/pdf/art\\_fot\\_014.pdf](http://www.torresrefrigeracion.com/pdf/art_fot_014.pdf)
- Orbegozo, Carlos; Arivilca, Roberto. (2010). *Energía solar fotovoltaica* .
- Pinilla Álvaro, S. (1997). *Manual de aplicación de la energía eólica* .
- Quiñones Cabello, Ana María. (2006). *Energías alternativas. Solución para el desarrollo sustentable*. Chile.
- Valverde Martínez, Aniceto. (1987). *Aprovechamiento de la energía eólica* .Murcia Universidad.
- Sistemas fotovoltaicos conectados a la Red. (2008). Disponible en:  
<http://www.iie.org.mx/proyectofotovoltaico>