

## Velocidad del viento en el municipio de Enrique Estrada, Zac.

Juan Carlos Gaytán Ramos, Juan Manuel García González, Víctor Manuel García Saldívar, Ricardo Conejo Flores, Adriana Elizabeth González Cabrera

Unidad Académica de Ciencias Químicas. Universidad Autónoma de Zacatecas. Carretera Zacatecas-Guadalajara Km. 6, Ejido La Escondida  
Campus UAZ Siglo XXI. Zacatecas, Zacatecas CP 98160 México.

### Resumen

El objetivo de este estudio es evaluar la velocidad del viento en el Municipio de General Enrique Estrada, Zac. en el periodo comprendido del 16 de julio del 2014 al 31 de diciembre de 2015, con el fin de cuantificar el potencial eólico de la región. La importancia de medir el potencial eólico en esta región, es para evaluar la factibilidad de transformar la energía eólica en electricidad, aprovechando que en este espacio en específico, se encuentra parte del corredor industrial con el cual cuenta el estado de Zacatecas. El Municipio está localizado en el centro del Estado, está delimitado al norte y al oeste con el Municipio de Fresnillo, Zac., al sur y al este delimita con el Municipio de Calera de Víctor Rosales, Zac. La cabecera municipal está localizada a una Latitud de 23°00'00'' N, y una Longitud de 102°44'00'' O, la altitud es de 2,150 msnm. Esta región queda incluido dentro del clima tipo BSk, semiseco templado, que se caracteriza por un periodo de lluvias de cuatro meses desde principios de junio y todo el verano, y seco el resto del año, los vientos dominantes en primavera, verano y otoño son del sur y suroeste, en invierno son del norte y del este [1]. En junio de 2010 se instaló una torre de 60 m en la Unidad Académica de Veterinaria. En la torre se colocaron tres anemómetros de tres copas con una veleta RM-Young a 20 m, 40 m y 60 m, además, se instaló un barómetro y un sensor de temperatura Vaisala a 40 m. Los datos fueron registrados en un datalogger CR-1000 de Campbell Scientific®, tomados cada uno o dos segundos y promediados cada 10 minutos. De forma periódica se revisó el estado físico y operacional, con los ajustes requeridos. Los datos recabados a partir del datalogger se organizaron en promedios por hora, por día, por mes y finalmente por año. Los resultados obtenidos para la velocidad promedio mensual en el periodo evaluado a las 3 diferentes alturas evaluadas, presentó valores máximos promedio en los meses de noviembre de 2014 (6.97 m/s), mayo de 2015 (7.93 m/s), diciembre de 2015 (7.40 m/s), y valores mínimos en el mes de septiembre de 2015 con valores menores a 4.9 m/s. La velocidad promedio en el periodo evaluado es de 6.6 m/s, lo que de acuerdo a la Clasificación de los Vientos es un viento tipo 4 que puede proporcionar una energía de 200 W/m<sup>2</sup> a 250 W/m<sup>2</sup>. Los datos complementarios promedios obtenidos son: Presión atmosférica 788 mbar; temperatura 17.3 °C y densidad de aire 0.946 kg/m<sup>3</sup>. La velocidad del viento es proporcional a la altura en la torre, existe más variación de la velocidad de viento entre 20 m y 40 m en comparación de 40 m y 60 m.

**Palabras clave:** Energía eléctrica; energía eólica; potencial eólico; anemómetro de tres copas

## 1.- INTRODUCCIÓN

En la actualidad la producción de energía eléctrica utilizando algún tipo de energía renovable en México es el 24 %. En particular la energía eólica contribuye con un 1.12 % en dicha producción. La energía eólica es una alternativa muy viable a explotar en los próximos años. En el estado de Zacatecas se inició con la operación de aerogeneradores para aprovechar el potencial eólico por la calidad de sus vientos y como alternativa al no contar con recursos energéticos no renovables. Parte del corredor industrial con el cual cuenta el estado de Zacatecas comprende a los Municipios de Zacatecas, Morelos, Calera de Víctor Rosales, General Enrique Estrada y Fresnillo de González Echeverría. De ahí la importancia de cuantificar el potencial eólico en esta región. En este trabajo se presenta la evaluación realizada en el Municipio de General Enrique Estrada, el cual está localizado en el centro del Estado, está delimitado al norte y al oeste con el Municipio de Fresnillo, Zac., al sur y al este delimita con el Municipio de Calera de Víctor Rosales, Zac. La cabecera municipal está localizada a una Latitud de 23°00'00'' N, y una Longitud de 102°44'00'' O, la altitud es de 2,150 msnm. Esta región queda incluida dentro del clima tipo BS1k, semiseco templado, que se caracteriza por un periodo de lluvias de cuatro meses desde principios de junio y todo el verano, y seco el resto del año, los vientos dominantes en primavera, verano y otoño son del sur y suroeste, en invierno son del norte y del este [1]

En 2005 Estrada *et al.*, realizaron un estudio del potencial eólico en el norte del país, el promedio reportado es de 380 W/m<sup>2</sup>, con una velocidad promedio de 6 m/s. de igual manera, Martínez (2007) realizó un estudio de puntos importantes en México, donde determinó velocidades promedio mayores a 7 m/s en la región central del estado de Zacatecas, demostrando que en este espacio territorial existe una gran oportunidad para aprovechar el potencial eólico que se puede obtener.

Con el Proyecto FOMIX 16112 “Evaluación de los potenciales eólico del cerro de la Virgen y solar de Zacatecas” liderado por García Saldivar, la Universidad Autónoma de Zacatecas contribuyó al estudio del mapeo del potencial eólico en el centro del Estado. La contribución realizada fue: la hecha por Reducindo *et al.* (2008), García *et al.* (2009), Perales (2011),

González (2011), Armas (2016), García *et al.* (2018) contribuyen al estudio de la evaluación del potencial eólico en: la ciudad de Zacatecas, el Municipio de Villa de Cos y el Municipio de General Enrique Estrada.

El objetivo de este estudio es evaluar la velocidad del viento en el Municipio de General Enrique Estrada, Zac. en el periodo comprendido del 16 de julio del 2014 al 31 de diciembre de 2015, con el fin de cuantificar el potencial eólico de la región.

## 1.1.- Marco Teórico

El viento se produce por el movimiento de las masas de aire en la tropósfera, este movimiento es debido a la diferencia de temperaturas que hay en las capas de la atmósfera, ya que la densidad del aire es más baja a mayores temperaturas generando cambios en la presión. Los vientos que son aptos desde el punto de vista energético, se producen a nivel de la superficie terrestre. (Reta, 2014). El parámetro que ayuda a la respuesta de que si un espacio es factible de uso para la transformación de energía eólica a eléctrica es la densidad de potencia ( $W/m^2$ ), la expression matemática para evaluarla se presenta en la ecuación 1 (Perales, 2011):

$$\frac{P}{\pi r^2} = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad 1$$

Donde  $P$  es la potencia en Watts,  $v$  es la velocidad en m/s,  $r$  es el tamaño del rotor en metros y  $\rho$  la densidad del aire seco tomada como  $1.225 \text{ kg/m}^3$ , la que corresponde a la presión atmosférica promedio a nivel del mar y a 15 C. Por la altura (msnm,  $z$ ) a la cual se encuentra el Municipio General Enrique Estrada, Zac. y la temperatura promedio del medio ambiente ( $T_m$ ) es necesario calcular la densidad del aire seco a estas nuevas condiciones utilizando la ecuación 2(García, 2009).

$$\rho = 1.225 e^{\left(-\frac{z}{8435} + \frac{T_m - 15}{288}\right)} \quad 2$$

Como requisito para una buena aproximación de la evaluación del potencial eólico, es que la velocidad del viento debe ser medida a una altura mínima de 10 m sobre el nivel de piso

(msnp), para extrapolarse a alturas mayores empleando la ley de la altura de Hellman (ecuaciones 3 y 4), basado en una velocidad medida a cierta altura, y considerando el coeficiente de fricción o rugosidad del terreno (Tablas I y II) y la altura a la cual se desea conocer la velocidad.

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{H}{H_0}\right)^\alpha \quad 3$$

$$\frac{v}{v_0} = \frac{\text{Ln} \frac{H}{z}}{\text{Ln} \frac{H_0}{z}} \quad 4$$

donde  $v$  es la velocidad del viento a altura  $H$ ,  $v_0$  es la velocidad del viento a una altura  $H_0$ ,  $\alpha$  es el coeficiente de fricción del terreno y  $z$  es el coeficiente de rugosidad del terreno.

Tabla I. Rugosidad del terreno (Armas, 2016)

| Tipo de terreno                                     | Coeficiente de fricción |
|---|-------------------------|
| Liso (mar, arena, nieve)                            | 0.10 – 0.13             |
| Moderado rugoso (pasto, cultivos cereales)          | 0.13 – 0.18             |
| Rugoso simple (plantíos medianos, poblados rurales) | 0.19 – 0.20             |
| Rugos (bosques, barrios urbanos)                    | 0.20 – 0.27             |
| Muy rugoso (ciudades, edificios altos)              | 0.27 -0.30              |

Tabla II. Longitud de Rugosidad (Armas, 2016)

| Tipos de terreno                              | Longitud de rugosidad $z$ (m) |
|---|-------------------------------|
| Superficie de agua tranquila                  | 0.0002                        |
| Áreas abiertas sin obstáculos                 | 0.03                          |
| Áreas rurales con obstáculos a más de 1 km    | 0.1                           |
| Áreas urbanas y rurales con varios obstáculos | 0.4                           |
| Bosques o áreas urbanas pobladas              | 1.6                           |

El viento se clasifica tomando como base su velocidad. Nuñez (2012) presenta en la Tabla III una clasificación de los vientos como apoyo para la evaluación de un sitio de interés. Dependiendo del tipo de viento disponible se puede plantear el tipo de generador eléctrico requerido.

Tabla III. Clasificación de los vientos (Nuñez, 2012)

| Clase | Potencial | Velocidad [m/s] a 10 m de altura | Densidad de Potencia Eólica [W/m <sup>2</sup> ] a 10 m de altura |
|-------|-----------|----------------------------------|--|
| 1     | Pobre     | 0.0 - 4.4                        | 0 – 100  |
| 2     | Marginado | 4.4 - 5.1                        | 100 – 150  |
| 3     | Moderado  | 5.1 - 5.6                        | 150 – 200  |
| 4     | Bueno     | 5.6 - 6.0                        | 200 – 250  |
| 5     | Excelente | 6.0 - 6.4                        | 250 – 300  |
| 6     | Excelente | 6.4 - 7.0                        | 300 – 400  |
| 7     | Excelente | 7.0 - 9.4                        | 400 – 1000   |

El siguiente paso será el seleccionar una turbina que facilite la transformación de energía eólica a eléctrica. Para conocer la potencia desarrollada por una turbina eólica es necesario conocer el coeficiente de potencia  $C_p$ , el cual indica la potencia del viento que puede aprovechar la turbina (ecuaciones 5 y 6).

$$C_p = \frac{P_{\text{útil}}}{P_{\text{viento}}} = \frac{(v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2)}{2v_3^2} \quad 5$$

$$P_{\text{turbina}} = \frac{1}{2} \rho v^3 C_p \quad 6$$

Es necesario e indispensable conocer la distribución de probabilidad de los datos de la velocidad del viento. En la literatura se propone que la función de probabilidad de Weibull (ecuación 7) representa adecuadamente la distribución de velocidades, la cual incluye a un factor de forma  $k$ , además del factor de escala  $c$ , que determina la forma en cómo se distribuye la función.

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad 7$$

## 2.- MÉTODOS Y MATERIALES

En junio de 2010 se instaló una torre de 60 m en la Unidad Académica de Veterinaria (Figura 1. a). En la torre se colocaron tres anemómetros de tres copas con una veleta RM-Young (Figura 1. b) a 20 m, 40 m y 60 m. Además, se instaló un barómetro y un termohigrómetro Vaisala a 40 m (Figura 1. c). Los datos fueron registrados en un datalogger CR-1000 de Campbell Scientific®, tomados cada uno o dos segundos y promediados cada 10 minutos. De forma periódica se revisó el estado físico y operacional, con los ajustes requeridos. Los datos recabados a partir del datalogger se organizaron en promedios por hora, por día, por mes y finalmente por año.

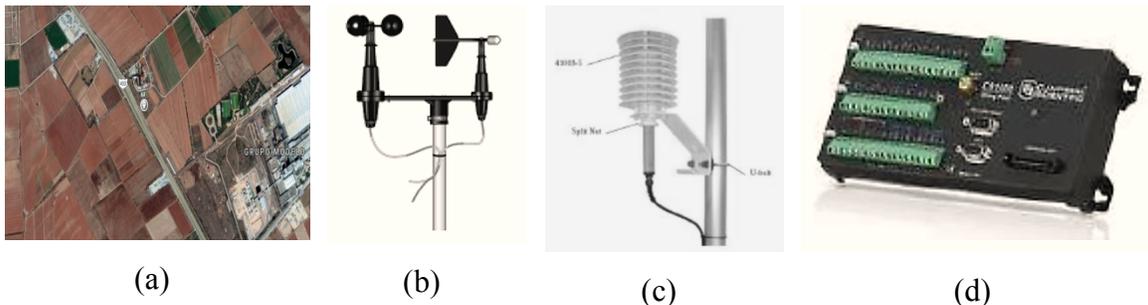


Figura 1. (a) Ubicación de la torre de medición (Tomada de google maps). (b) Anemómetro y veleta RM-Young (Armas, 2016). (c) Termohigrómetro Vaisala (Armas, 2016). (d) Datalogger CR1000 de Campbell Scientific (Armas, 2016)

### 3.- RESULTADOS

En la Figura 2, se presentan los resultados obtenidos para la velocidad promedio mensual en el periodo evaluado a las 3 diferentes alturas medidas. Presentó valores máximos promedio en los meses de noviembre de 2014 (6.97 m/s), mayo de 2015 (7.93 m/s) y diciembre de 2015 (7.40 m/s), los valores mínimos se presentan en el mes de septiembre de 2015 con valores menores a 4.9 m/s.

En la Figura 3, se presenta la distribución de frecuencia de velocidad del viento para el periodo evaluado. es interesante observar que de acuerdo a esta figura, la velocidad promedio del viento es de 9 m/s

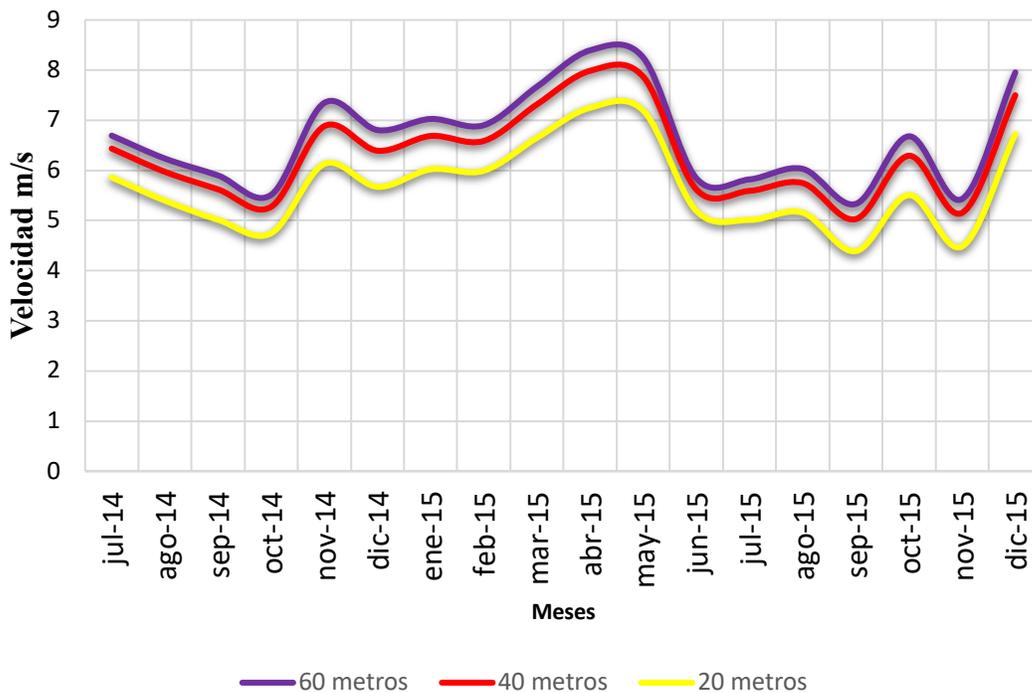


Figura 2. Velocidad promedio del viento en el periodo evaluado a las diferentes alturas sensadas.

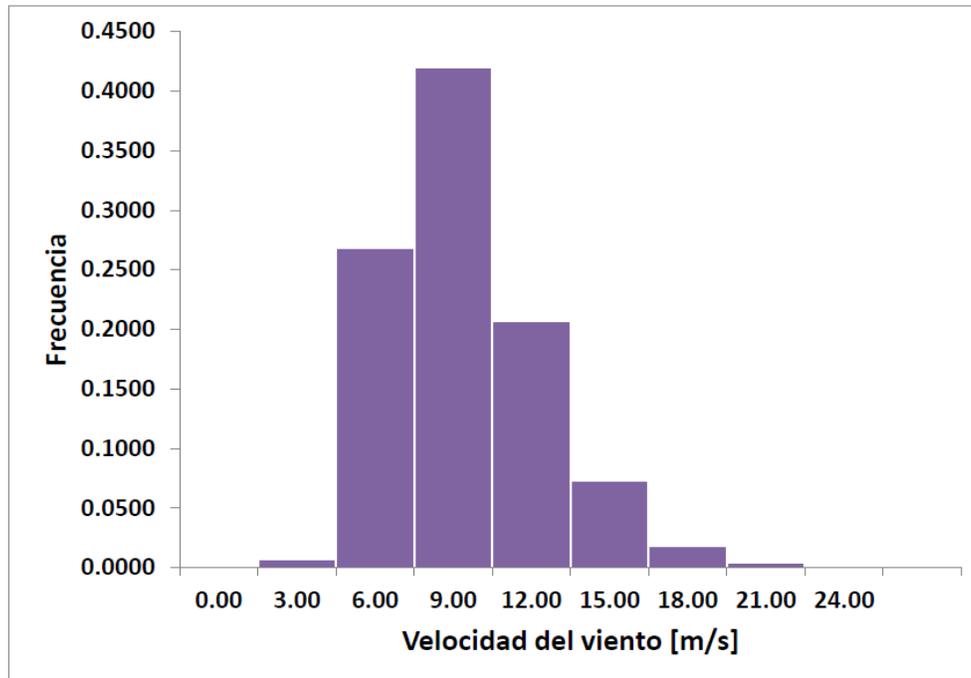


Figura 3. Distribución de Frecuencia de la velocidad del viento medida a 60 m. en el periodo evaluado

## 4.- DISCUSIÓN

La velocidad promedio en el periodo evaluado es de 6.6 m/s, lo que de acuerdo a la Clasificación de los Vientos es un viento “Bueno” que puede proporcionar una energía de 200 W/m<sup>2</sup> a 250 W/m<sup>2</sup>. Los datos complementarios promedios obtenidos son: Presión atmosférica 788 mbar; temperatura 17.3 °C y densidad de aire 0.946 kg/m<sup>3</sup>. La dirección del viento dominante es de 202.5 ° (Suroeste). De acuerdo a la Figura 3, la distribución de la velocidad del viento puede ser representada por la Distribución de Weibull con valores de  $k = 1.71$  y  $c = 5.76$  m/s. Por ultimo, de acuerdo a la Tabla III, se tiene que esta velocidad del viento, puede ser clasificada como un viento Clase 4.

## 5.- CONCLUSIONES

El resultado para esta región muestra una densidad de potencia eólica no muy propicia para la producción de energía eléctrica a gran escala, pero sí para algunas pequeñas empresas localizadas en el Corredor. Se sugiere emplear una Turbina Tipo III

## REFERENCIAS

- Armas Saldivar P. (2016) “Evaluación del potencial eólico en el cerro de la Virgen y solar en Zacatecas” Tesis de Maestría. Unidad Académica de Posgrado en Ingeniería. UAZ.
- Estrada Gasca C. A. et al (2005), “Visión a Largo Plazo Sobre la Utilización de las Energías Renovables en México”, Reporte Anexo 6-1, Centro de Investigación en Energía-UNAM.
- García González Juan Manuel, García Saldivar Víctor Manuel, Durón Torres Sergio Miguel, Miramontes de León Gerardo (2009), “*Evaluación del potencial eólico en la ciudad de Zacatecas Campus UAZ Siglo XXI*”. Congreso Internacional y Feria Industrial de Energía Guanajuato 2009.
- García González Juan Manuel, Conejo Flores Ricardo, Carranza Téllez José, García Saldivar Víctor Manuel (2018) *El Recurso Eólico del Municipio de General Enrique Estrada, del Estado de Zacatecas* CETEC 2018. Machala, Ecuador.
- González Medina F. J. (2011), “*Estudio Comparativo de Datos Anemométricos de las Torres: La Niña, la Pinta y la Santa María Ubicadas en el Cerro de la Virgen y Campus Siglo XXI de la UAZ*”. Tesis de Licenciatura 2011. P.A.I.Q. de la U.A.C.Q. de la U.A.Z.
- Martínez R. (2007), *Las Energías Renovables en México. Potencial, Retos y Oportunidades*, Presentación en Foro Consultivo Científico Tecnológico, Veracruz, Ver.
- Núñez Contreras J. L. (2012), Diseño e implementación de un prototipo de generación híbrido eólico-fotovoltaico de bajo costo para aplicación en el sector rural del estado de Zacatecas, Tesis de maestría, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas.
- Perales Canales L. (2011), *Evaluación del potencial eólico en el Cerro de la Virgen en Zacatecas - Análisis de datos tomados del 08 de agosto de 2007 al 08 de agosto de 2008* Tesis de Maestría defendida en mayo de 2011
- Reducindo Ruiz Isnardo, Gerardo Miramontes de León y Ernesto García Domínguez, Víctor M. García Saldivar, Juan M. García y Sergio M. Durón Torres (2008), *Sistema de registro y administración de datos de una red de estaciones de monitoreo eólicas y solares*. XXXII Semana Nacional de Energía Solar, Mérida Yucatán.
- SENER. (2016) *Perspectiva de energía Renovable 2016-2030* México