

## **Análisis estadístico del viento en la zona del Valle de Toluca para la generación de energía eólica**

Jorge Montoya, Felipe Castillo y Martin Quintero

J. Montoya, F. Castillo y M. Quintero.  
Universidad Politécnica del Valle de Toluca Km. 5.6 carretera Toluca - Almoloya de Juárez  
Calle loma bonita s/n Santiaguito Tlalcilcali, Almoloya de Juárez, Estado de México. C.P. 50900.  
joismt@yahoo.com.mx

M. Ramos.,V.Aguilera.,(eds.). Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Handbook -©ECORFAN- Valle de Santiago, Guanajuato, 2013.

## Abstract

In this paper we present the analysis of wind speed measurements generated in the Toluca Valley of Mexico State, by the UPVT, in the year 2010, were compared the probability curves that resulted from the histograms, obtaining basic information for planning the installation of wind turbines, and calculation of the volumes of locally available energy.

## 7 Introducción

Como parte de los proyectos de investigación de la UPVT, se encuentra el de generación de energías alternativas, se tiene planeado aprovechar el viento para generar energía eléctrica que pueda ser aprovechada por familias de escasos recursos, principalmente en localidades en las que aun no cuentan con el recurso.

En las instalaciones del “Centro de Estudios Universitarios Independencia, S.C”, ubicado en la localidad de San Mateo Oztacatipan, Municipio de Toluca, Estado de México; la localidad se localiza al Noreste de la Ciudad de Toluca a una distancia de 6.5 Km; ubicado entre los 19° 19’ 13’’ y 14° 20’ 42’’ de latitud norte y entre los 99° 95’ 32’’ y 99° 37’ 20’’ de longitud Oeste del Meridiano de Greenwich y a una altitud de 2,600 Mts. SNM.

Oztacatipan colinda al norte con el ejido de San Cristóbal Huichochitlán; al sur, con San Lorenzo Tepaltitlán y el ejido de Santa María Totoltepec; al oriente, con San Pedro Totoltepec, y al poniente con San Andrés Cuexcontitlán. Su territorio se conforma por una extensión de 229 hectáreas de propiedad y 1,230 de ejido, lo que hace una superficie total de 1,459 hectáreas. Su división política la conforman la delegación de Oztacatipan y cinco subdelegaciones: San Nicolás Tolentino, San José Guadalupe, San Diego de los Padres, Santa Cruz y San Blas; estas cinco subdelegaciones están integradas por barrios, además de las sedes de las subdelegaciones, los barrios de Jicaltepec, la Candelaria, San Martín, la Magdalena, Canaleja, Santín y la Crespa. La estación se instaló el 7 de marzo del 2009 y se ubica a una altura aproximada de 11 metros sobre el nivel del piso; esto debido a que los datos disponibles, de la velocidad del viento de la zona, son registrados a una altura de 50 y más metros, según INEGI Delegación Estado de México. Hasta el 9 de noviembre del 2010, se tienen 180,000 registros. Circulación de aire. Se considera viento a toda masa de aire en movimiento, que surge como consecuencia del desigual calentamiento de la superficie terrestre, siendo la fuente de energía eólica, o mejor dicho, la energía mecánica que en forma de energía cinética transporta el aire en movimiento. La Tierra recibe una gran cantidad de energía procedente del Sol que en lugares favorables puede llegar a ser del orden de 2000 Kw./m<sup>2</sup> anuales; el 2% de ella se transforma en energía eólica capaz de proporcionar una potencia del orden de 1017 Kw.

A) Irradiancia solar sobre una superficie horizontal

B) Irradiancia solar absorbida por la Tierra

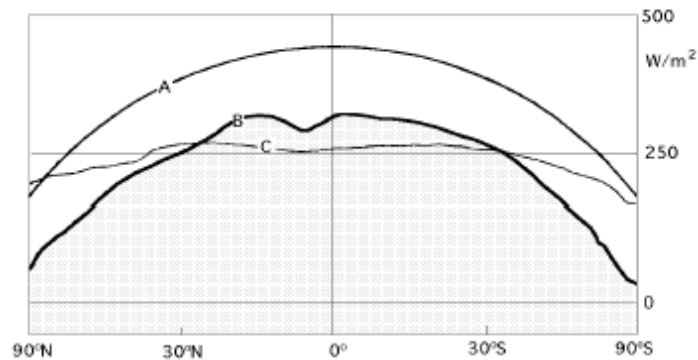
### C) Irradiancia radiada al espacio exterior

La Tierra funciona como una gran máquina térmica que transforma parte del calor solar en la energía cinética del viento, Grafico 7.

La energía eólica tiene como ventajas la de ser inagotable, gratuita y no lesiva al medio ambiente, pero cuenta también con los grandes inconvenientes de ser dispersa y aleatoria.

Bajo la acción de la presión, el aire de la atmósfera se desplaza de un lugar a otro a diferentes velocidades, dando lugar al viento.

**Grafico 7 Irradiancia solar**



El gradiente de velocidades es mayor cuanto mayor sea la diferencia de presiones y su movimiento viene influenciado por el giro de la Tierra.

Las causas principales del origen del viento son:

- a) La radiación solar que es más importante en el Ecuador que en los Polos
- b) La rotación de la Tierra que provoca desviaciones hacia la derecha en el Hemisferio Norte y hacia la izquierda en el Hemisferio Sur
- c) Las perturbaciones atmosféricas.

El movimiento de la Tierra se rige por la siguiente relación entre aceleraciones:  
 $a(\text{absoluta}) = a(\text{relativa}) + a(\text{arrastre}) + a(\text{Coriolis})$ .

Ecuación que aplicada al movimiento del aire y simplificada adecuadamente proporciona la siguiente ecuación vectorial:

$$\frac{dx}{dt} = - \frac{\nabla p}{\rho} - \nabla \psi - 2 (w \wedge r) \quad (7)$$

En la que  $v$  es la velocidad del viento,  $p$  la presión,  $\rho$  la densidad,  $w$  la velocidad angular de la Tierra,  $r$  el vector de posición de las partículas y  $\nabla \psi$  la aceleración de origen gravitatorio.

Esta ecuación vectorial da lugar a las ecuaciones diferenciales (Navier Stokes) que rigen el movimiento del aire sobre la Tierra, de la forma:

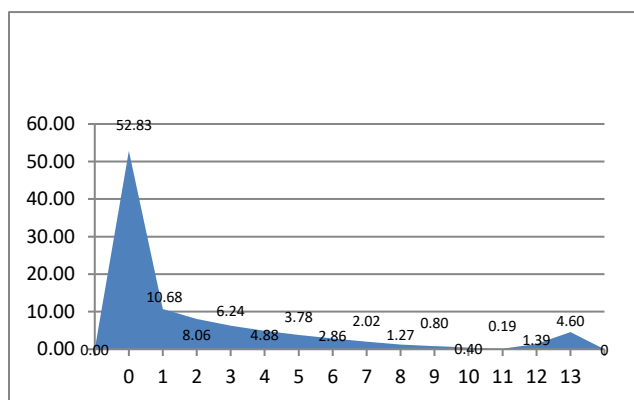
$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2x}{dt^2} &= - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - 2 w (\cos \psi \frac{dz}{dt} - \text{sen } \psi \frac{dy}{dt}) \\ \frac{d^2y}{dt^2} &= - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - 2 w \cos \psi \frac{dx}{dt} \\ \frac{d^2z}{dt^2} &= - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + 2 w \cos \psi \frac{dx}{dt} - g \end{aligned} \right\} \quad (7.1)$$

En aquellas zonas en donde la radiación solar es más intensa, como en el Ecuador, el globo terrestre acumula calor principalmente en el océano, calor que, por el contrario, se pierde en los Polos; sin embargo, ni el Ecuador ni los Polos vienen a ser, por término medio, los lugares más calientes, o más fríos, de la superficie terrestre. Velocidad del Viento: De los 180,334 registros del periodo marzo-noviembre de 2010, podemos observar que 1063 registros quedaron invalidados, quedando 179,271. La tabla número 7 muestra la velocidad del viento registrada en metros por segundo; según la experiencia en la generación de energía eólica, la velocidad del viento que puede ser aprovechable es a partir de 4 m/s, lo cual nos deja solamente con 39,780 registros (22.19%) que la pueden generar, debido a que del total, 139,491 están por debajo de esa velocidad, lo que representa el 77.81%. Cabe hacer mención que en el 47.75% de los registros correspondieron a una quietud total (0 m/s de velocidad); de entrada, esto nos deja en una total desventaja en relación a lo que se pretende, es evidente que para nuestro proyecto requerimos del viento. La contraparte, la podemos observar en los registros con velocidad de 13 y más m/s; en el intervalo de velocidad de 13 a 24 m/s, se registra un promedio de 18 mediciones por cada salto unitario de velocidad en m/s. En velocidades de 25, 30, 36 y 38 m/s, se tienen 4,569, 607, 777 y 1,801 registros respectivamente. La velocidad más alta registrada es de 50 m/s con tres datos. En la tabla 7 se puede observar la gran cantidad de registros que son no aprovechables para nuestro proyecto.

**Tabla 7**

Velocidad del Viento m/s	Frecuencia	%
0	94,716	52.83
1	19,140	10.68
2	14,441	8.06
3	11,194	6.24
4	8,749	4.88
5	6,783	3.78
6	5,120	2.86
7	3,621	2.02
8	2,278	1.27
9	1,442	0.80
10	716	0.40
11	336	0.19
12	2,489	1.39
13 y más	8,246	4.60
Total	179,271	100.00

Fuente: Estación Meteorológica CEUNI, marzo-diciembre 2010.

**Grafico 7.1** Estación Meteorológica CEUNI, marzo-diciembre 2010

Velocidad del viento aprovechable: Si consideramos que la velocidad del viento, a partir de la cual se genera energía eléctrica, es de 4 m/s, solamente nos estamos quedando con 39,780 registros lo cual representa el 22.89% del total de los registros, ver tabla 2; para nosotros resulta indispensable, conocer la hora del día en que se producen estas velocidades, nuestra hipótesis es que son vientos que se generan después de las 16:00 horas.

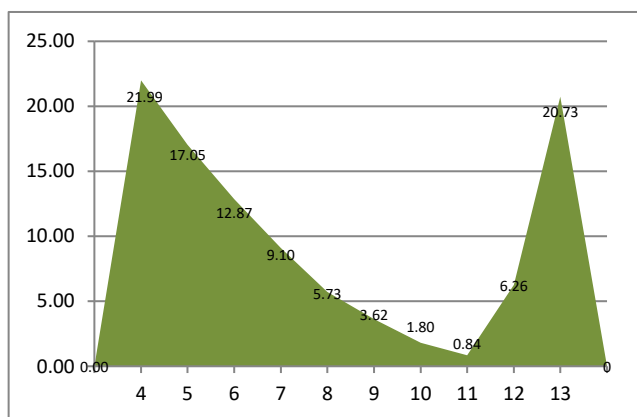
Haciendo una inferencia, podemos decir que solamente el 22.89% del tiempo es aprovechable para la generación de energía, lo cual pudiera no ser suficiente para el apoyo que se pretende dar a las familias de escasos recursos y sin el servicio de energía eléctrica.

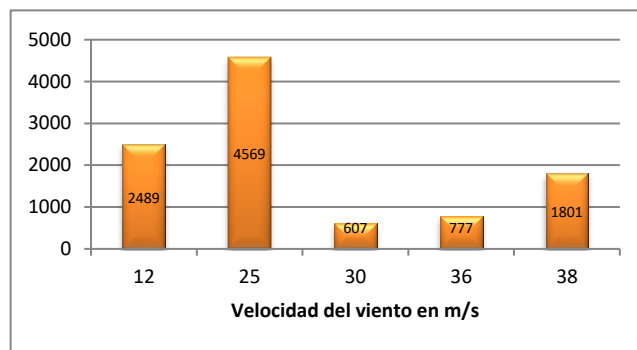
Como era de esperar, los vientos suaves tienen una mayor incidencia, la zona según INEGI presenta un viento promedio de 9 m/s durante todo el año. En la tabla 7.1 podemos observar que en la medida que aumenta la velocidad del viento, disminuyen los registros; esto sucede desde 4 m/s y hasta los 11 m/s, de 8736 disminuye paulatinamente hasta 336 registros, ver gráfico 7.2; observándose un incremento de registros considerable en velocidades de 12 m/s, vuelven a disminuir los registros casi hasta cero y se presenta un repunte en velocidades de 25 m/s, de esa velocidad en adelante el comportamiento es muy errático, ver gráfico 7.3. Los repuntes se dan en 30, 36 y 38 m/s. Las velocidades del viento en km/hora respectivamente son 90, 108, 129 y 136, lo que representan velocidades del viento bastante considerables.

**Tabla 7.1** Estación Meteorológica CEUNI, marzo-diciembre 2010

Velocidad del Viento m/s	Frecuencia	%
4	8,749	4.88
5	6,783	3.78
6	5,120	2.86
7	3,621	2.02
8	2,278	1.27
9	1,442	0.80
10	716	0.40
11	336	0.19
12	2,489	1.39
13 y m	8,246	4.60
Total	39,780	100.00

**Gráfico 7.2** Estación Meteorológica CEUNI, marzo-diciembre 2010

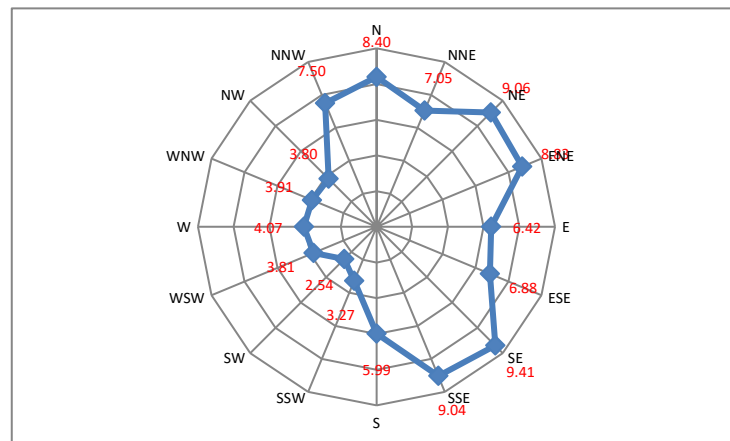


**Grafico 7.3** Velocidad del viento

Rosa de Viento: Para la ubicación de los aerogeneradores que se compren o se construyan, es indispensable conocer la dirección del viento. De los 179,000 registros, el 9.41% proviene del SE, el 9.06% del NE, el 9.04% del SSE, del ENE el 8.83%, del N proviene el 8.40% para los porcentajes más altos, ver tabla 7.2; de los datos registrados podemos concluir que los vientos predominantemente vienen del Este. En la Grafico 7.4 se puede observar que efectivamente el viento predominante es del Este al Oeste, con menor número de registros en las direcciones de WSW, SSW, SW con 3.81, 3.27 y 2.54% respectivamente.

**Tabla 7.2** Rosa de Viento Enero - Diciembre 2010

Dirección del viento	Frecuencia	%
N	15,062	8.40
NNE	12,646	7.05
NE	16,242	9.06
ENE	15,837	8.83
E	11,517	6.42
ESE	12,331	6.88
SE	16,863	9.41
SSE	16,212	9.04
S	10,739	5.99
SSW	5,869	3.27
SW	4,562	2.54
WSW	6,835	3.81
W	7,289	4.07
WNW	7,014	3.91
NW	6,814	3.80
NNW	13,439	7.50

**Grafico 7.4** Rosa de Viento Enero - Diciembre 2010

## 7.1 Conclusiones

En este trabajo se encontró que el área del valle de Toluca es apropiada para la instalación de aerogeneradores de pequeña capacidad debido a que presenta niveles apropiados de velocidad de viento pero no es constante durante el día, ya que se tienen varias horas de calma, por lo que se recomienda la instalación híbrida con algún otro sistema de generación alternativa como puede ser las celdas solares lo cual permitiría eficientar la generación eléctrica en cantidades menores a los 6 kw por instalación.

## 7.2 Referencias

Bosque Sendra Joaquín, “Sistema de Información Geográfica”, ed. RIALP, Madrid España, 2004.

Freedman David A., Statistical Models (Cambridge Series in Statistical and Probabilistic Mathematics) [Paperback], 2009.

Recuero Lopez Manuel, Curso de energías Renovables, Edit. UPM, 2001 Madrid España.

Reed David D., “Resource Assessment in Forested Landscapes”, ed. WILEY, USA, 1997  
SEAS, Estudios Superiores Abiertos S.A., “Energía eólica”, Ávila, España, 2010.