

## Análisis comparativo entre el modelo dinámico y el modelo de la IEC para obtener la curva de potencia de turbinas eólicas

RODRÍGUEZ-LÓPEZ, Iliana\*†, ESTRADA-GONZÁLEZ, César y HERNÁNDEZ-ARRIAGA, Isaac

*Centro de Tecnología Avanzada*

Recibido 7 de Abril, 2017; Aceptado 16 de Junio, 2017

### Resumen

La curva de potencia de un aerogenerador de eje horizontal indica la potencia de salida a diferentes velocidades del viento. Actualmente existe una gran variedad de métodos paramétricos y no paramétricos para calcular la potencia de salida de los aerogeneradores. En este trabajo se presenta una comparación de dos métodos paramétricos para el cálculo de la curva de potencia: el modelo de la norma IEC-61400-12-1 publicada por la Comisión Electrotécnica Internacional y el método dinámico basado en la ecuación de Langevin para modelos estocásticos. El objetivo fue modelar con datos reales obtenidos con los instrumentos de medición del mástil meteorológico ubicado en La Ventosa, Oaxaca, México durante el período de un año. Con estos datos se realizó la curva de potencia obtenida con estos modelos y se determinó que la turbulencia si afecta a la curva de potencia del aerogenerador en el sitio de prueba. Finalmente se proponen recomendaciones de ajuste de datos y aumento de la tasa de muestreo.

**Turbina Eólica, curva de potencia, método paramétrico, método dinámico, turbulencia**

### Abstract

The power curve of a horizontal axis wind turbine indicates the output power at different wind speed. At present, there is a great variety of parametric and non-parametric methods to calculate the output power of wind turbines. This work present a comparison of two parametric methods for the calculation of the power curve: the IEC-61400-12-1 model published by the International Electrotechnical Commission and the dynamic method based en the Langevin equation for the models stochastic. The objective was to model with the real data obtained with the instruments of measurement of the meteorological mast located in La Ventosa, Oaxaca, during the period of one year. With these data the power curves obtained with these models were realized and determined that the turbulence really affect the power curve of the wind turbine at the test site. Finally there are recommendatios proposed of data adjustment and increase the sampling rate.

**Wind turbine, power curve, parametric method, dynamic method, turbulence**

**Citación:** RODRÍGUEZ-LÓPEZ, Iliana, ESTRADA-GONZÁLEZ, César y HERNÁNDEZ-ARRIAGA, Isaac. Análisis comparativo entre el modelo dinámico y el modelo de la IEC para obtener la curva de potencia de turbinas eólicas. Revista de Innovación Sistemática 2017. 1-2:31-38

\*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: ing.ilianarodriguez@gmail.com)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

## Introducción

En México la principal fuente de obtención de energía eléctrica es por energías convencionales, como son los combustibles fósiles. Los cuales durante el proceso de transformación desprenden compuestos químicos como dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero que dañan y contaminan al medio ambiente (Contreras, Venegas, Arroyo, & Jiménez, 2016) (Jiménez, López, Molinero, & Casillas, 2016). Debido a esto, México es un país en vías de desarrollo en la implementación de energías renovables, como es la energía eólica (AMDEE, 2014), siendo una de las fuentes de energía renovables mejor posicionada para la generación de energía eléctrica (Hernández, Mina, & Claudio, 2016).

El Centro de Tecnología Avanzada sede Querétaro (CIATEQ) ha trabajado desde el 2015 en el desarrollo de turbinas eólicas de baja y mediana potencia, siendo una de sus principales líneas de investigación: el diseño, manufactura y pruebas de aerogeneradores.

Las turbinas eólicas son dispositivos mecánicos que convierte la energía del viento en energía eléctrica, funcionando bajo el principio de sustentación que se desarrolla en el aspa por su diseño aerodinámico, donde el rendimiento máximo de conversión se debe al límite de Betz (Villarrubia, 2012), es decir, se extrae del viento como máximo, solo el 59.3% de energía.

De acuerdo a la norma, para conocer la capacidad de producción de potencia eléctrica, es necesario realizar la prueba de la curva de potencia, llevada a cabo en el terreno de sitio (IEC-61400-12-1, 2005-12) la cual consiste en obtener mediciones de datos de un mástil meteorológico en un período de tiempo de 10 minutos, indicando mediante gráficos cual es la potencia disponible a diferentes velocidades del viento.

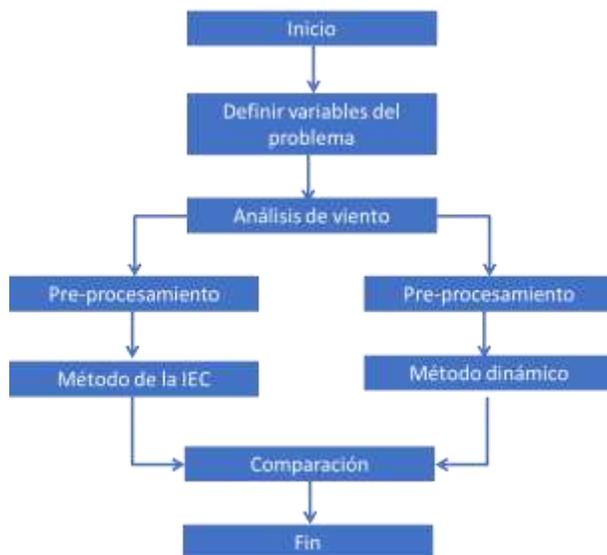
Por lo que es necesario analizar y comparar el método de la curva de potencia con dos modelos paramétricos: Modelo dinámico y el modelo normalizado (IEC). Con el fin de determinar si el factor de turbulencia afecta a la prueba de la curva de potencia que se lleva a cabo en el Centro Regional de Energías Renovables (CERTE), de La Ventosa, Oaxaca. Región que cuenta con un comportamiento de distribución bimodal del viento durante el año (Jaramillo & Borja, 2004) (José, 2016) existiendo altas ráfagas de viento y provocando mayor cantidad de turbulencia en el sitio de prueba. Impactando en la producción de energía anual (AEP) del aerogenerador, la cual es la estimación de la producción energética total de una turbina eólica durante un periodo de un año.

La primera sección de este trabajo, comprende un análisis del viento de La Ventosa, Oaxaca, siendo de gran importancia este estudio para determinar el comportamiento anual de la velocidad y dirección del viento utilizando el programa de Matlab® y WindoGrapher®. En la segunda sección se describe el método de la IEC para la realización de la curva de potencia, utilizando la norma IEC-61400-12-1.

Posteriormente en la tercera sección se realiza una descripción general del método dinámico para la realización de la prueba de la curva de potencia y finalmente, se muestran los resultados obtenidos en ambos métodos, realizando una comparación para determinar la variabilidad de ambas graficas de potencia de la turbina eólica.

### Metodología a desarrollar

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra los pasos desarrollados en cada etapa.



**Figura 20** Diagrama de la metodología desarrollada

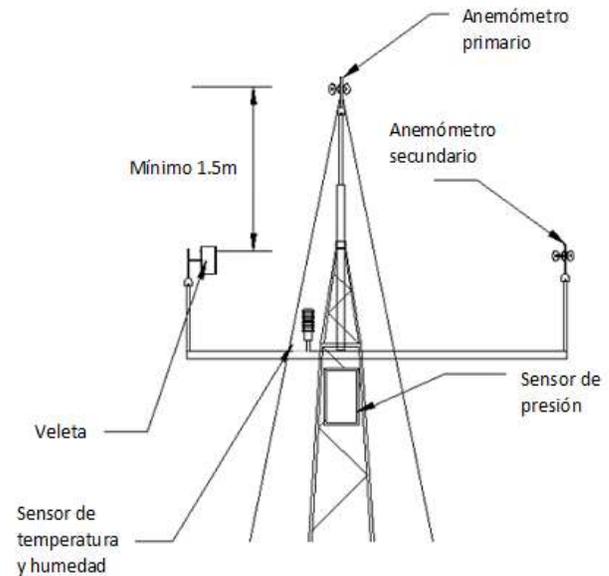
*Fuente (Elaboración propia)*

### VARIABLES DEL PROBLEMA

El viento es el aire en movimiento que se produce en la atmosfera debido a las diferencias de temperaturas, provocadas por la radiación solar. Se caracteriza por tener una velocidad y dirección, las cuales son afectadas por diferentes factores como: la zona geográfica, el clima y la topografía del terreno.

Para la realización de la prueba de la curva de potencia se deben obtener los datos de los equipos de medición, ubicados en la torre anemométrica (ver Figura 21 Instrumentos de medición en la torre anemométrica

*Fuente* ).



**Figura 21** Instrumentos de medición en la torre anemométrica

*Fuente (IEC-61400-12-1, 2005-12)*

Los datos obtenidos por estos equipos son:

- Velocidad de viento
- Dirección del viento
- Presión
- Temperatura y humedad

Una vez obtenidos los datos se procede a realizar un análisis de viento para obtener: la rosa de los vientos con el fin de determinar la dirección predominante del viento, y realizar un análisis de distribución de frecuencias de la velocidad del viento modelada con RealiaSoft Weibull de probabilidad de función de distribución (PDF).

**Análisis del Viento**

La Ventosa, Oaxaca, México se caracteriza por tener un gran potencial eólico, por su ubicación geográfica.

Oaxaca está ubicado en medio de cuerpos montañosos que forman una especie de embudo, facilitando el flujo del viento entre el océano Pacífico y el Golfo de México. Observándose velocidades de vientos altos, debido al efecto del fuerte de gradiente de presión en las montañas, provocados por los fuertes vientos que provienen del Golfo de México pasando por el paso de Chivela y desembocando al Océano Pacífico (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la**



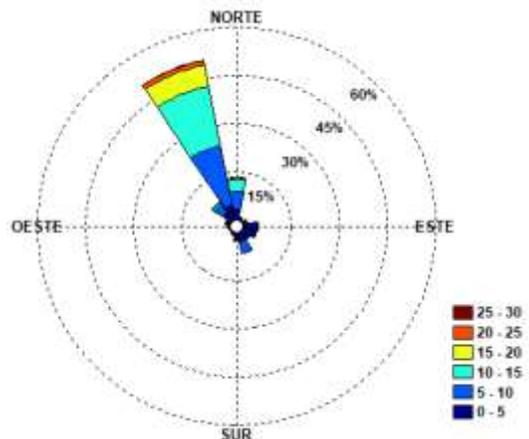
**Figura 22** Localización de La Ventosa

Fuente (Carranza- Edwards, 2000)

Con los datos proporcionados se realizó la rosa de los vientos (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) con el objetivo de determinar la dirección predominante del viento de La Ventosa, Oaxaca, dando como resultado que el sector predominante es al noroeste, con velocidades que van desde los 0 m/s hasta los 30 m/s.

Sector de velocidad	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO	Total
0 - 5	3722	640	2665	3030	2312	546	397	1837	15149
5 - 10	11351	87	240	440	2015	31	22	1600	15786
10 -15	10524	0	2	0	20	1	131	519	11197
15 - 20	3436	0	0	0	0	0	28	130	3594
20 - 25	746	0	0	0	0	0	0	13	759
25 - 30	27	0	0	0	0	0	0	0	27
Total	29806	727	2907	3470	4347	578	578	4099	46512

**referencia.**)



**Figura 23** Rosa de los vientos

Fuente (Elaboración propia)

En la

Tabla 4 se muestran las repeticiones de datos dirigidos en la dirección de algún sector y el rango de velocidad, analizando 46512 datos en un periodo de un año a una altura de 40 m.

Sector de velocidad	N	NE	E	SE	S	SO	O	NO	Total
0 - 5	3722	640	2665	3030	2312	546	397	1837	15149
5 - 10	11351	87	240	440	2015	31	22	1600	15786
10 -15	10524	0	2	0	20	1	131	519	11197
15 - 20	3436	0	0	0	0	0	28	130	3594
20 - 25	746	0	0	0	0	0	0	13	759
25 - 30	27	0	0	0	0	0	0	0	27
Total	29806	727	2907	3470	4347	578	578	4099	46512

Tabla 4 Repeticiones de datos clasificados por la dirección y el sector de velocidad a 40 m de altura

Realizando el grafico de velocidades promedio del viento mensual (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) se observa que el mes donde existe mayores ráfagas de viento es en enero alcanzando los 12 m/s de la velocidad del viento promedio, mes donde se produce mayor cantidad de potencial eólico. Otra observación es que en la gran parte del año el viento promedio esta entre los 8 m/s velocidad en que una turbina opera exitosamente.

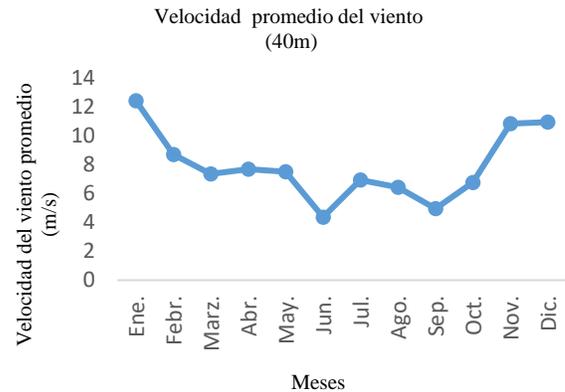


Gráfico 2 Velocidad mensual promedio del viento

Fuente (Elaboración propia)

Para realizar la curva de potencia se debe analizar el viento con la distribución de probabilidad Weibull (IEC-61400-12-1, 2005-12).

Esta distribución de probabilidad es utilizada para analizar las velocidades del viento en los recursos de la energía eólica (Sánchez, 2002). En el Gráfico 3, se muestra la distribución de frecuencia anual y la distribución Weibull con un factor  $k=1.54$  y  $c=8.89$  m/s.

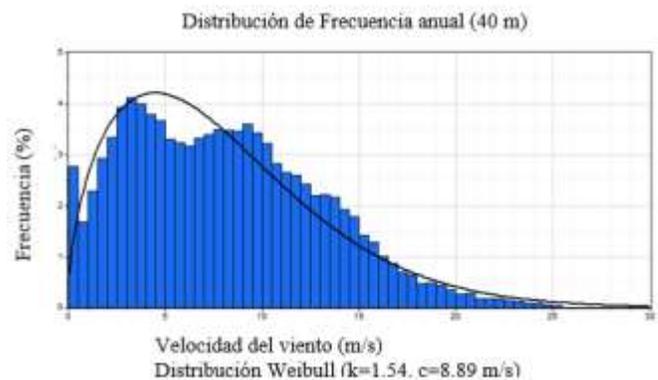


Gráfico 3 Distribución de frecuencias

Fuente (Elaboración propia)

Debido a la zona geográfica de La Ventosa Oaxaca, se realiza un análisis de distribución Weibull PDF doble, con la finalidad de ajustar la distribución al comportamiento de la frecuencia de datos. En el

Gráfico 4 se observa el resultado de aplicar la distribución Weibull PDF para la estación invernal del año analizado, se eligió esta estación ya que esta compuesta por los meses donde el viento predominante es mayor (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Dando como resultado una grafica con distribución bimodal, es decir, esta compuesta por dos distribuciones.



Gráfico 4 Weibull PDF – invierno

Fuente (Elaboración propia)

Donde los parámetros de la distribución Weibull PDF doble se muestra en la Tabla 5, resultados obtenidos con el programa RealiaSoft®.

Parámetros		
Distribución:	Weibull-Mixta	
Parámetros	Weibull 1	Weibull 2
k	2.363253	3.505796
c	4.34005	13.415674

Tabla 5 Parámetros de Weibull PDF- Bimodal

Fuente (Elaboración propia)

**Método de la IEC**

El procedimiento normativo para estimar la curva de potencia de una turbina eólica se describe en la IEC-61400-12-1. Esta norma es presentada por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC), para estimar la extracción de potencia de la turbina. Este procedimiento colecta datos para  $\{u(t), P(t)\}$  en promedios de 10 min. Donde  $u(t)$  es la velocidad del viento y  $P(t)$  es la potencia de salida.

La norma describe la metodología para la curva de potencia, desde la prueba de equipos, proceso de medición y resultados de las mediciones.

La medición de la curva de potencia se deriva aplicando el “método de bins” con la finalidad de normalizar los datos usando las siguientes ecuaciones:

$$u_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} u_{n,i,j} \tag{1}$$

$$P_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} P_{n,i,j} \tag{2}$$

Donde  $u_i$  es la velocidad normalizada y promediada del viento en el bin  $i$ ,  $u_{n,i,j}$  es la normalización de la velocidad del viento del conjunto de datos  $j$  en el bin  $i$ ,  $P_i$  es la normalización del potencial de salida del conjunto de datos  $j$  en el bin  $i$  y  $N_i$  es el número de datos de 10 min en el bin  $i$ .

El sistema de adquisición de datos para este método se basa en muestras de datos estadísticos descriptivos:

- Valor medio
- Desviación estándar
- Valor máximo
- Valor mínimo

**Método dinámico**

El objetivo de la metodología del método dinámico es determinar la conducta real de viento en la turbina eólica, basado en la ecuación de Langevin, teniendo como propósito obtener la curva de potencia de la turbina eólica, a partir de datos de alta frecuencia de mediciones de la velocidad del viento  $u(t)$  y la potencia de salida  $P(t)$ .

El método utiliza datos frecuentes en lugar de promedios de 10 min, obteniendo una curva de potencia confiable, hasta con una cantidad de muestreo pequeña. Para obtener una parte determinista y otra parte estocástica. La parte determinística corresponde al comportamiento real de la turbina eólica y la parte estocástica corresponde a otros factores externos como la turbulencia del viento.

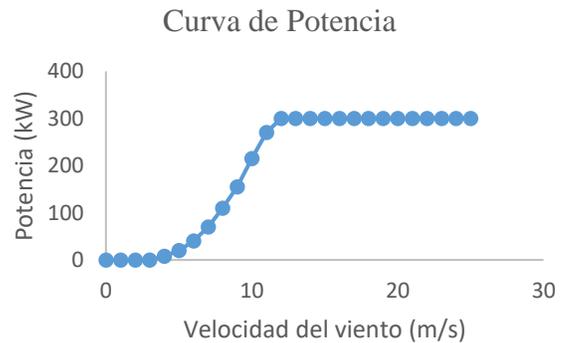
La potencia de un aerogenerador se realiza mediante un proceso estocástico satisfaciendo la propiedad de Markov (M., S. Suresh, A. Immanuel, & G. Edwin, 2013).

$$P(t) = P_{stat}(u) + p(t) \tag{3}$$

Donde  $P(t)$  es la serie de datos de potencia,  $P_{stat}$  es el valor de potencia estacionaria dependiente de la velocidad  $u$  y  $p(t)$  corresponde al tiempo corte de fluctuaciones causado por la turbulencia.

**Resultados**

En las siguientes gráficas se muestran los resultados obtenidos comparando el método de la IEC y el método dinámico para la prueba de la curva de potencia de una turbina eólica ubicada en La Ventosa, Oaxaca, México.

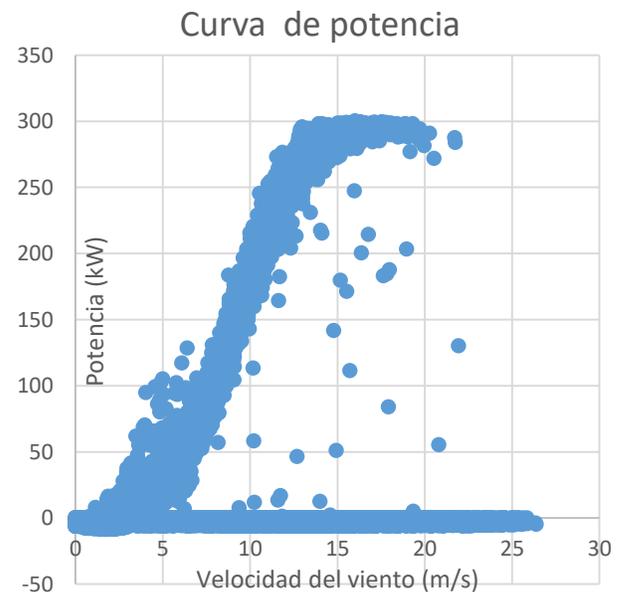


**Gráfico 5** Curva de Potencia con el método de la IEC

Fuente (Elaboración propia)

Obteniendo los siguientes datos:

- Velocidad de cut-in es de 3 m/s
- Velocidad de cut-out fue de 25 m/s
- AEP es de 554,428 kWh.



**Gráfico 6** Curva de potencia con el método dinámico

Fuente (Elaboración propia)

En la Gráfico 6 se observa la curva de potencia con el método dinámico, la cual axiste una gran variabilidad de datos.

### Agradecimiento

El primer autor agradece a CONACYT por hacer posible esta investigación, así como al CEMIE-Eólico por la obtención de datos analizados para este trabajo y a CIATEQ por la colaboración en el proyecto P07.

### Conclusiones

Al realizar la prueba de la curva de potencia con ambos métodos, podemos observar que existe una variabilidad de datos entre ambos modelos. La curva realizada con la curva de potencia de la IEC utiliza datos estadísticos descriptivos, haciendo que la curva sea menos precisa ya que no considera la turbulencia del sitio. Siendo un gran factor ya que, en La Ventosa, Oaxaca, existe tiene vientos fuertes, dando origen a la turbulencia del sitio, debido a la zona geográfica y este factor debe ser considerado para evitar peligros en la turbina.

### Referencias

AMDEE. (2014). Asociación Mexicana de Energía Eólica. Obtenido de <http://www.amdee.org/>

Carranza- Edwards, A. (2000). Ambientes sedimentarios recientes de la llanura costera sur del Istmo de Tehuantepec. Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Ciencias del Mar y Limnología.

Contreras, A. L., Venegas, T. T., Arroyo, L. J., & Jiménez, B. R. (2016). Análisis armónico de

un aerogenerador y un STATCOM basado en una técnica mejorada para la obtención de la solución periódica. *Revista Aplicaciones de la Ingeniería*, 34.

Hernández, O., Mina, J., & Claudio, A. (2016). Emulador de Turbina Eólica basado en el Control Vectorial de una Máquina Eléctrica. *Revista de Aplicaciones de la Ingeniería*, 117-130.

IEC-61400-12-1. (2005-12). Wind Turbines. Part 12-1: Power Performance Measurements of Electricity Producing Wind Turbines. IEC.

Jaramillo, O. A., & Borja, M. A. (2004). Wind speed analysis in La Ventosa, Mexico: a bimodal probability distribution case. *ELSEVIER*.

Jiménez, R. A., López, G. V., Molinero, H. D., & Casillas, F. C. (2016). Metodología de Diseño del Perfil Aerodinámico de Hub para Turbinas de Viento de Eje Horizontal de Baja Capacidad. *Revista de Aplicaciones de la Ingeniería*, 9-25.

José, C. D. (Noviembre de 2016). Evaluación de la confiabilidad de torres de aerogeneradores sujetas a viento turbulento. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

M., L., S. Suresh, K., A. Immanuel, S., & G. Edwin, P. (2013). A comprehensive review on wind turbine power curve modeling techniques. *ELSEVIER*, 1-9.

Sánchez, G. (Mayo de 2002). Evaluación del Recurso Eólico, Factibilidad Técnica y Aportación de Potencia Eólico-Eléctrica a un Sistema de Bombeo en Soto la Marina Tamaulipas. Monterrey, N. L.

Villarrubia, L. M. (2012). Ingeniería de la Energía Eólica. Barcelona, España: Alfaomega.