

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL AIRE Y ECUACIONES DE DISEÑO DE AEROGENERADORES PARA LA INSTALACIÓN DE PARQUES EÓLICOS

Recibido: octubre 2019

Revisado noviembre 2019

Norman Orózco¹

RESUMEN

El trabajo de graduación denominado "Determinación de los Parámetros Fisicoquímicos del aire y Ecuaciones de Diseño de Aerogeneradores para la Instalación de Parques Eólicos", es un trabajo de investigación teórico-práctico en tres Departamentos: Estanduela Zacapa, Santa Catarina Ixtahuacán Sololá y San Juan Alotenango Sacatepéquez.

Se utilizó una muestra de 53 datos fisicoquímicos para cada departamento tomados a través de satélite Web de la empresa The Weather Company y un análisis experimental de la velocidad del viento en cada departamento para determinar la altura de referencia de las velocidades del viento en relación con la muestra por satélite.

El estudio del diseño de aerogeneradores se divide en dos etapas, la primera corresponde el estudio del comportamiento del viento a través de las variables fisicoquímicas, humedad, presión atmosférica y temperatura para determinar un modelo que representa la velocidad del viento como pronóstico y el potencial eólico.

En la segunda etapa se utilizan las ecuaciones de diseño para fijar

parámetros y características del aerogenerador y como complemento a la opción de no aplicar un método de ecuaciones de diseño del aerogenerador se selecciona un aerogenerador comercial de catálogo analizando su rendimiento energético a través de la curva de potencia y comparando la eficiencia de ambos métodos.

Finalmente se hace una comparación entre los tres departamentos para demostrar cual es el mejor sitio para iniciar un estudio de emplazamiento eólico. El conocimiento adquirido con el desarrollo del proyecto beneficiara a sectores departamentales, empresas privadas o gubernamentales que posean capacidad para implantar un proyecto de producción energética y como un medio de desarrollo sostenible para el país.

Palabras clave: Velocidad del viento, Distribución de Weibull, Coeficiente de Potencia, Potencial Eólico, Diseño de Aerogeneradores, Factor de capacidad.

ABSTRACT

The graduation work called "Determination of Air Physicochemical Parameters and Wind Turbine Design Equations for the Installation of Wind Farms" is a theoretical-practical research work in

¹ Ingeniero Químico con mención en Energía de la Universidad Rafael Landívar, norman.orozco@outlook.com

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL AIRE Y ECUACIONES DE DISEÑO DE AEROGENERADORES PARA LA INSTALACIÓN DE PARQUES EÓLICOS

three Departments: Estanzuela Zacapa, Santa Catarina Ixtahuacán Sololá and San Juan Alotenango Sacatepéquez.

We used a sample of 53 physicochemical data for each department taken through satellite Web of the company The Weather Company and an experimental analysis of the wind speed in each department to determine the reference height of the wind speeds in relation to the sample by satellite.

The study of the design of wind turbines is divided into two stages, the first corresponds to the study of wind behavior through physicochemical variables, humidity, atmospheric pressure, and temperature to determine a model that represents wind speed as a forecast and wind potential.

In the second stage, the design equations are used to set parameters

and characteristics of the wind turbine and as a complement to the option of not applying a wind turbine design equations method, a commercial wind turbine catalog is selected, analyzing its energy efficiency through the curve of power, and comparing the efficiency of both methods.

Finally a comparison is made between the three departments to show which is the best place to start a wind farm study. The knowledge acquired with the development of the project will benefit departmental sectors, private or governmental companies that have the capacity to implement an energy production project and as a means of sustainable development for the country.

Keywords: Wind speed, Weibull distribution, power coefficient, wind potential, wind turbine design, capacity factor.

INTRODUCCIÓN

En Guatemala según la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE), la Matriz energética actual comprendida en el informe de la semana 09 de octubre al 15 de octubre del año 2016 se utiliza un 51.83% de energía renovable la cual un 2.80% corresponde al uso de la energía eólica.

El recurso aprovechable de los vientos generalmente se evalúa desde una altura de 10m hasta 100m de altura, el viento es altamente influenciado por la orografía lejana y cercana del terreno, el régimen dominante de los vientos, rugosidad,

densidad del aire, turbulencias y la altura a la que se capta el recurso sobre la superficie.

Los aerogeneradores representan un equipo accionado a través del viento mediante palas que transforman la velocidad del viento en energía cinética, luego en energía mecánica y finalmente en energía eléctrica, los parques eólicos se diseñan en áreas o zonas rurales en las que tienen desde medias a altas velocidades de viento, necesarias para iniciar la generación de energía eléctrica.

El presente trabajo versa sobre un estudio de la probabilidad de instalar parque eólico en los departamentos

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS DEL AIRE Y ECUACIONES DE DISEÑO DE AEROGENERADORES PARA LA INSTALACIÓN DE PARQUES EÓLICOS

de Estanzuela Zacapa, Santa Catarina Ixtahuacán Sololá y San Juan Alotenango Sacatepéquez, evaluando las condiciones de operación y diseño mínimas.

Se tomó una muestra de 53 datos entre los meses de enero a mayo del año 2016, en cada departamento el cual corresponde a los siguientes datos fisicoquímicos: viento, humedad, presión, punto de rocío y Temperatura.

Entre los meses de toma de datos se realizaron visitas en cada departamento excluyendo Estanzuela Zacapa, los cuales se tomaron mediciones para comparar con los datos teóricos (muestra de 53 datos) y determinar la altura de referencia a la que fue medida los datos satelitales.

En función de los datos obtenidos se realizó un análisis estadístico con el

software Minitab17 con el fin de determinar la relación de variables entre la presión, humedad y temperatura con el fin de establecer un modelo matemático que describa el comportamiento del viento para Estanzuela Zacapa, Santa Catarina Ixtahuacán Sololá y San Juan Alotenango.

Determinado los modelos del comportamiento del viento se procedió con un modelo estadístico gráfico para determinar el potencial eólico y se diseñó un aerogenerador adaptado a sus condiciones climatológicas.

Finalmente se determinó que el mejor departamento para iniciar un estudio ambiental fue Ixtahuacán Sololá debido a las condiciones climatológicas y por su potencial eólico.

RESUMEN DE RESULTADOS

Tabla No. 35 Comparación de características de cada departamento.

Características	Estanzuela Zacapa	Ixtahuacán Sololá	San Juan Alotenango
Análisis del medio			
Error Ecuación del viento	32%	52%	-13%
Potencia real del viento	99.42 W/m ²	214.68 W/m ²	102.97 W/m ²
Potencial eólico	195.15 kWh/m ²	1880.6 kWh/m ²	902.02 kWh/m ²
Método 1			
Velocidad de diseño	3.45 m/s	8.09 m/s	7.35 m/s
Altura de la Torre	60 m	75 m	65 m
Díámetro del rotor	60 m	90 m	70 m
Velocidad de giro del rotor	19.07 rpm	12.62 rpm	16.25 rpm
Par en el eje	13.14 N-m	601.51 N-m	177.53 N-m
Gearbox	78.66	118.86	92.31
Potencia Eléctrica útil	24.43 kW	1850.21 kW	330.26 kW
Factor de capacidad	0.042	0.37	0.31
Método 2			
Número de aerogeneradores	45	6	10
Energía de 1 aerogenerador	1537.32 MWh	8883.1 MWh	7672.1 MWh
Factor de capacidad	0.051	0.29	0.25
Total Resultados Positivos	7	6	6

Mejor opción
 El valor no es significativo
 Opción no recomendada

Ixtahuacán Sololá muestra la mayor cantidad de características como la mejor opción de emplazamiento eólico.

*los resultados aplican un factor de corrección

(Elaboración propia, 2016)

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL AIRE Y ECUACIONES DE DISEÑO DE AEROGENERADORES PARA LA INSTALACIÓN DE PARQUES EÓLICOS

Tabla No. 36 Comparación física de la potencia eólica disponible.

Departamento	Potencia Eólica disponible (kW)	Potencia Eólica disponible (HP)	Comparación física
Estanzuela Zacapa	65.60 kW	87.97 HP	2% de potencia de una locomotora
Ixtahuacán Sololá	1987.34 kW	2,665.10 HP	67% de potencia de una Locomotora
San Juan Alotenango Sacatepéquez	886.29 kW	a 1,188.53 HP	30% de potencia de una locomotora

(Elaboración propia, 2016)

Tabla No. 37 Comparación física de la potencia eólica útil y real.

Departamento	Potencia Eólica útil (kW)	Potencia eólica Real (kW)	Comparación física
Estanzuela Zacapa	26.24 kW	24.43 kW	33 caballos de potencia
Ixtahuacán Sololá	794.94 kW	1850.21 kW	62% de potencia de una Locomotora
San Juan Alotenango Sacatepéquez	354.52 kW	330.06 kW	11% de potencia de una locomotora

(Elaboración propia, 2016)

En función a la tabla las condiciones del medio en Estanzuela Zacapa no poseen capacidades para producir una potencia adecuada.

Tabla No. 38 Comparación del factor de capacidad y la capacidad de abastecimiento.

Departamento	Energía del aerogenerador unitario	Capacidad de abastecimiento	Energía del parque	Capacidad de abastecimiento anual	Factor de capacidad
Estanzuela Zacapa	1,537.32 MWh	437 casas	69,179.19 MWh	19,216 casas	0.051
Ixtahuacán Sololá	8,883.10 MWh	2468 casas	53,298.58 MWh	14,805 casas	0.29
S.J Alotenango Sacatepéquez	7,762.10 MWh	2156 casas	76,720.91 MWh	21,312 casas	0.25

(Elaboración propia, 2016)

A partir de los datos obtenidos en cada metodología se determinó que el mejor departamento para realizar un estudio de emplazamiento fue Ixtahuacán Sololá el cual posee las siguientes características:

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL AIRE Y ECUACIONES DE DISEÑO DE AEROGENERADORES PARA LA INSTALACIÓN DE PARQUES EÓLICOS

Tabla No. 39 Ecuación de la velocidad del viento

Descripción	Valor
Ecuación	$V = 0.947P^2 + 109.5H^2 - 1920P - 138.2H + 973186$
%error en ecuación (media)	52%
Potencia media del viento	664.65 W/m ²
Potencia máxima aprovechable	392.14 W/m ²
Potencia real del viento	214.68 W/m ²
Potencial eólico	1,880.60 kWh/m ²

(Elaboración propia, 2016)

Parámetros de diseño (Método 1)

Tabla No. 40 Parámetros de diseño de un aerogenerador Ixtahuacán Sololá

Características	valor
Altura de la torre	75 m
Diámetro del rotor	90 m
velocidad de diseño	8.09 m/s
eficiencia global	32.30%
Velocidad de giro del Rotor	12.62 rpm
Potencia Eólica disponible	1987.34 kW
Potencia Eólica Aprovechada	794.94 kW
velocidad específica	7.35
Par en el Eje	601.51 N-m
Gearbox	118.86
Factor de Capacidad	0.37
Potencia eléctrica útil	1850.21 kW

(Elaboración propia, 2016)

Diseño y Selección de Equipo (Método 2)

Tabla No. 41 Diseño y Selección de Equipo Ixtahuacán Sololá

Descripción	Resultado
Marca de Aerogenerador	Vestas
Modelo	V117-3.45MW IEC IIA
Número de Aerogeneradores	6
Energía de 1 Aerogenerador	8883.10 MWh
Energía Total	53,298.58 MWh
Factor de Capacidad	0.29

(Elaboración propia, 2016)

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL AIRE Y ECUACIONES DE DISEÑO DE AEROGENERADORES PARA LA INSTALACIÓN DE PARQUES EÓLICOS

Tabla No. 42 Comparación del método 1 y el método 2 en función del abastecimiento de demanda de 130,000 MWh/año.

Descripción	Método 1	Método 2
Número de Aerogeneradores	11	6
Energía Total	121,030 MWh	53,298.58 MWh
Factor de Capacidad	0.37	0.29

(Elaboración propia, 2016)

CONCLUSIONES

1. El comportamiento de la velocidad del viento tiene mejor precisión si se reduce el número de variables que se relacionan entre sí; tomando el criterio estadístico de determinación de la mayor influencia la temperatura y presión fueron las variables más influyentes en el modelo del comportamiento del viento seguido de la humedad, por lo que se confirmó que el Viento es una variable compuesta por la temperatura, presión y humedad como se establece en la Ley de Betz.
2. Los parámetros de diseño en Estanzuela Zacapa en función de las condiciones climatológicas del medio, la altura de diseño fue de 60 m, Diámetro del rotor de 60 m y una potencia eólica aprovechada de 26.24 kW.
3. Los parámetros de diseño en Ixtahuacán Sololá en función de las condiciones climatológicas del medio, la altura de diseño fue de 75 m, Diámetro del rotor de 90 m y una potencia eólica aprovechada de 794.94 kW.
4. Los parámetros de diseño en San Juan Alotenango Sacatepéquez en función de las condiciones climatológicas del medio, la altura de diseño fue de 65 m, Diámetro del rotor de 70 m y una potencia eólica aprovechada de 354.52 kW.
5. El Potencial Eólico en Estanzuela Zacapa fue $195.15 \text{ KW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$, En Ixtahuacán Sololá fue de $1,880.60 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ y en San Juan Alotenango fue de $902.02 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ siendo Ixtahuacán Sololá y San Juan Alotenango en función del factor de capacidad las opciones más viables de emplazamiento.
6. De los tres departamentos Ixtahuacán Sololá representa la opción más viable de emplazamiento de un parque eólico basado en su potencial y rendimiento en comparación a la selección de un aerogenerador de catálogo "Vestas V117-3.45MW IEC IIA".

RECOMENDACIONES

1. La mejor alternativa para realizar un estudio sobre implantación de un parque eólico de los tres departamentos analizados es Ixtahuacán Sololá sin embargo

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL AIRE Y ECUACIONES DE DISEÑO DE AEROGENERADORES PARA LA INSTALACIÓN DE PARQUES EÓLICOS

San Juan Alotenango también representa una buena opción para realizar el estudio de emplazamiento eólico.

2. El análisis recomendado para determinar la viabilidad de emplazamiento de un parque eólico basado en su potencial eólico debe realizarse con una muestra mínima de 360 datos promediados de mediciones de intervalos de 1 hora para poder determinar con exactitud el comportamiento de la velocidad del viento y Es necesario contar con una instalación meteorológica para realizar dichas mediciones para tener mayor exactitud en comparación a los datos satelitales.
3. Dentro de las mediciones es necesario el estudio del cambio de movimiento o direcciones del viento a través de un análisis de gráfico de una rosa de los vientos para poder determinar el factor de orientación de emplazamiento del parque eólico.
4. Según la descripción del fabricante (Vestas) se requiere un estudio mínimo de 4 años para proporcionar el modelo e iniciar la fase de construcción del parque eólico.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Autor desconocido (2012) *Energía Eólica*. [En red, Consultado el 20 de marzo del 2016] disponible en:
https://www.uclm.es/profesorado/ajbarbero/FAA/EEOLICA_Febrero2012_G9.pdf
f

5. Para el marco regulatorio de las políticas ambientales es necesario contar con instrumentos públicos tales como el orden territorial, sistemas de evaluación de impacto ambiental, normas de emisión y calidad, Normas ISO 14000, declaración de zonas, participación ciudadana y educación ambiental e instrumentos privados como los sistemas de producción más limpia, Auditorías Ambientales, Buenas prácticas Agrícolas.
6. Al realizar un Estudio de Impacto Ambiental se debe abocar con el ministerio de ambiente y recursos naturales para presentar el estudio inicial y asignación de análisis a través de un consultor ambiental de la siguiente forma: avocación al órgano competente (ministerio de vivienda ordenamiento territorial y medio ambiente o dirección nacional de medio ambiente), comunicación del proyecto (detalles de impactos, medidas de mitigación y auto calificación) y clasificación del proyecto (A, B, C), solicitud de la autorización (asesoría de otro organismo del estado) y Resolución de la autorización ambiental previa.

2. Autor desconocido (S.F) *Parámetros de diseño de aerogeneradores eólicos*. [En red, Consultado el 2 de mayo del 2016] disponible en:
<http://www.exa.unne.edu.ar/fisica/maestria/modulo2/eolica/eolo42002.pdf>

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS DEL AIRE Y ECUACIONES DE DISEÑO DE AEROGENERADORES PARA LA INSTALACIÓN DE PARQUES EÓLICOS

3. Cardona, J.L. (1981). *Energía eólica y aeroturbinas*. ED: Instituto Nacional de Industria.
4. Castro M.; Cruz I. (1997) *Energía Eólica. Monografías técnicas de energías renovables*. Ed: Progensa.
5. Catálogo Elektron (1999). *Energías Renovables. Medición Ambiental. Kits educativos*. Barcelona (España).
6. CIEMAT (1994). *Principios de conversión eólica*. Madrid (España).
7. D. Le Gourierés (1985). *Energía Eólica*. Ed: Masson, Barcelona (España).
8. D. Le Gourierés. (1985). *Energía Eólica: teoría, concepción y cálculo práctico de las instalaciones*. Ed: Masson, Barcelona (España).
9. Eggleston, D. M.; Stoddard, F.S. (1987) *wind turbine engineering design*. Ed. Van Nostrand Reinhold Company, New York.
10. EWEA. European Wind Energy Association (S.F) *Energía Eólica, energía Limpia durante generaciones*.
11. General tools (2016) *Compas* [En red, Consultado el 4 de marzo del 2016] disponible en:
<http://www.generaltools.com/productdoc/index/downloadpdf/type/manuals/pdf/PTH8708->
12. Grupo Centrans (2016) *Eólica san Antonio el sitio* [En red, Consultado el 8 de julio del 2016] disponible en:
<http://centransgroup.com.gt/eolico-san-antonio/>
13. IDAE (1992). *Manual de la Energía eólica* Madrid España.
14. Johnson G.L. (1985) *wind power energy systems*. Ed. Prentice-Hall Inc. New Jersey.
15. The Weather Company (S.F) *Tiempo en Estanzuela, San Juan Alotenango e Ixtahuacán*. [En red, Consultado el 31 de mayo del 2016] disponible en:
<https://weather.com/es-US>
16. Tomas Perales Benito. (2005) *Guía del Instalador de Energías renovables*. Ed: Creaciones,
17. Vestas (2016) *3MW brochure* [En red, Consultado el 8 de julio del 2016] disponible en:
<http://nozebra.ipapercms.dk/Vestas/Communication/Productbrochure/3MWbrochure/3MWProductBrochure/>
18. WindPower (2016) *Manual de referencia de energía eólica*. [En red, Consultado el 10 de marzo del 2016] disponible en:
<http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/stat/units.htm>