

## **DISEÑO DE UN AEROGENERADOR CON FINES DIDACTICOS.**

**Víctor Hernández G., Gilberto González O., Alberto Cruz O., David Morillón G.\* y Alejandro Mesa\*\***

Laboratorio de Investigación en Energías Renovables, FES Cuautitlán - UNAM

\* Instituto de Ingeniería - Universidad Nacional Autónoma de México. E-mail: vichugo@servidor.unam.mx

\*\*Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda - INCIHUSA, CONICET. CRICYT – Mendoza

**RESUMEN:** En el presente artículo, se muestra la propuesta de diseño de un aerogenerador para las condiciones meteorológicas del municipio de Cuautitlán Izcalli, Estado de México. Dicho aerogenerador servirá para demostrar los beneficios de aprovechar las energías renovables, en este caso el viento, para producir energía eléctrica, obteniendo reducción en el consumo de combustibles fósiles y emisión de gases de efecto invernadero.

**Palabras clave:** viento, aerogenerador, energía eléctrica, generación, energías renovables, energía eólica.

### **INTRODUCCIÓN**

El Hombre emplea en todas sus actividades la energía, por tal motivo ha buscado formas de transformarla para darle un uso o aplicación dependiendo de las necesidades que tenga. Ya que el Ingeniero es el encargado del desarrollo del Hombre, es necesario que conozca el empleo de energías renovables y el mejoramiento ambiental. Sabemos que los procesos que más satisfacen al Hombre, como la energía eléctrica, son causantes potenciales de contaminación, es decir, al utilizar un combustible para su generación, se crean gases productos de la combustión los cuales pueden provocar, desde una irritación en las vías respiratorias en el ser humano hasta la lluvia ácida o inversión térmica en el ambiente.

Es necesario contar con alternativas que permitan obtener la energía eléctrica sin afectar nuestros recursos naturales y medio ambiente. Afortunadamente contamos con alternativas que pueden apoyarnos como es el caso del sol, viento y agua. Una forma de producir energía eléctrica es empleando el viento, el cual mueve los álabes o paletas que transmiten el movimiento a un generador eléctrico. Este conjunto de mecanismos recibe el nombre de aerogenerador.

En el Laboratorio de Investigación en Energías Renovables de la FES Cuautitlán, se están realizando proyectos de investigación y docencia enfocados al empleo de las energías renovables incluyendo el cuidado del medio ambiente. Dentro de estos proyectos, se está desarrollando un prototipo experimental de un aerogenerador, considerando las condiciones meteorológicas del municipio de Cuautitlán Izcalli, Estado de México.

Se pretende diseñar un modelo de baja potencia que sea lo más económico posible, ligero, con materiales de fácil adquisición, transportable (ya que se tiene contemplado instalarlo en varias comunidades rurales que integran el municipio de Cuautitlán Izcalli) y que permita realizar tanto investigación sobre el tema, por parte de alumnos de posgrado, como prácticas demostrativas a los alumnos de licenciatura y obtención de título, mediante elaboración de tesis.

### **ANTECEDENTES**

Se han realizado estudios y proyectos con aerogeneradores, de los cuales se puede mencionar los siguientes:

Vladislav et al. 2002, presenta el modelo para una fábrica de energía eólica, compuesta por 72 aerogeneradores.

P. Flores et al. 2005, ofrece un método de predicción de la velocidad del viento, el cual desarrolla predicciones a escala de tiempo que puede ser de minutos hasta horas.

Baris Ozerdem and et al, 2006 presentan el estudio técnico y económico de una fábrica de energía eólica para las condiciones de Izmir, Turkey.

Murat and et al., 2007, estudiaron las características del viento y el posible potencial de generación de energía eólica, en Kırklareli, Turkey.

F. Ben Amar and et al., 2008, presentan el potencial de generación de energía eléctrica de un promedio de cinco años, de la primera sección de la fábrica de energía eólica de Tunes.

En este proyecto, se propone el diseño de un aerogenerador para las condiciones ambientales de Cuautitlán Izcalli, basándose en las experiencias de otros diseñadores de aerogeneradores, por lo que se espera contribuir al conocimiento de las energías renovables, principalmente en la referente al viento.

### **AEROGENERADOR**

Los aerogeneradores son dispositivos mecánico – eléctrico que cuentan con alabes orientados de tal forma, que el viento al pasar sobre ellos, mueven un generador eléctrico. El diseño de los aerogeneradores presenta complicaciones debido a que se requiere del estudio de las condiciones de velocidad y frecuencia de los vientos, tiene que estar a una altura en la cual el

viento no tenga obstáculos, su estructura debe estar bien cimentada y soportar las deformaciones por las fuerzas de la naturaleza y el clima. Los alabes deben estar diseñados para canalizar el aire que pasa sobre de ellos y deben estar contruidos de un material liviano pero resistente a las inclemencias del tiempo.

## PROPUESTA DE DISEÑO

El primer paso realizado para el diseño, fue el analizar las condiciones de velocidad del viento del municipio de Cuautitlán Izcalli, empleando datos estadísticos del 2000 al 2008, proporcionados por la estación meteorológica de la FES Cuautitlán. El municipio de Cuautitlán Izcalli, se encuentra situado en una zona plana donde no existen obstáculos, ni de edificaciones altas ni de montañas, por lo que se cuenta con un potencial aprovechable de energía eólica. En la tabla 1 se presentan las velocidades del viento promedio mensual desde el año 2000 al 2008.

Tabla 1.- Velocidad del viento promedio mensual (m/s)

MES	2008	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000	PROM
ENERO	5,40	4,82	5,48	5,17	8,14	5,26	4,36	3,56	4,71	5,21
FEBRERO	5,02	4,60	5,80	6,27	10,70	5,80	4,95	4,65	5,69	5,94
MARZO	5,45	7,06	6,39	10,84	7,90	6,62	5,21	7,02	4,47	6,77
ABRIL	5,28	5,40	5,97	6,97	8,41	4,38	5,61	4,93	6,95	5,99
MAYO	5,02	5,75	5,34	9,03	6,37	7,03	6,03	4,94	5,90	6,16
JUNIO	5,76	5,52	5,10	12,24	6,06	6,36	5,00	5,16	5,80	6,33
JULIO	5,90	5,28	4,70	7,00	6,46	6,27	4,75	4,59	6,15	5,68
AGOSTO	4,60	7,34	4,41	6,02	4,98	4,59	4,65	5,11	5,92	5,29
SEPTIEMBRE	-	5,51	5,51	6,30	5,53	4,76	4,44	4,48	6,06	5,32
OCTUBRE	-	5,74	6,48	6,41	5,73	5,69	5,40	3,52	5,28	5,53
NOVIEMBRE	-	5,25	4,50	5,72	7,55	7,26	5,15	4,68	4,75	5,61
DICIEMBRE	-	4,93	4,47	4,54	6,14	6,92	4,21	3,89	4,52	4,95
PROM	5,3	5,6	5,3	7,2	7,0	5,9	5,0	4,7	5,5	5,73
MAX	5,9	7,3	6,5	12,2	10,7	7,3	6,0	7,0	7,0	7,77
MIN	4,6	4,6	4,4	4,5	5,0	4,4	4,2	3,5	4,5	4,41

Fuente: Datos estadísticos del 2000 al 2008, proporcionados por la estación meteorológica de la FES Cuautitlán.

El diseño de los componentes del sistema aerogenerador: generador eléctrico, rotor eólico y sistema de orientación, se basa en la compatibilidad de los parámetros de la turbina eólica con los del generador eléctrico y a su vez con las características típicas del viento predominante en las zonas de influencia.

*Cálculo teórico de la tensión eficaz inducida en una bobina.*

Para calcular la tensión o fuerza electromotriz inducida  $e$  en una bobina habrá que calcular cómo varía el flujo en el tiempo, ya que la tensión inducida se calcula con la siguiente expresión:

$$e = \frac{-d\phi}{dt}$$

$e$  = fuerza electromotriz inducida (V)

$\Phi$  = flujo magnético (Wb)

Donde el flujo se obtiene como:

$$\phi = B(t) \cdot S \cdot N$$

$B(t)$  = inducción o campo magnético en función del tiempo (T)

$S$  = superficie de una espira de la bobina atravesada por el campo magnético (m<sup>2</sup>)

$N$  = número de espiras que constituyen una bobina (número de vueltas)

El flujo magnético en este tipo de aerogenerador es un flujo axial (es decir perpendicular al radio de giro del aerogenerador), de manera que los dos rotores de imanes permanentes generan un campo magnético entre cada uno de sus pares de polos de manera alterna, como se deriva de la disposición de los imanes.

Por tanto, si se toma como referencia una bobina cualquiera, el flujo que ve pasar a través de ella, en una vuelta entera del generador, tendrá: número de polos entre 2 valores máximos de flujo (por ejemplo cuando pasa por delante de la bobina un par de polos con el Norte en el rotor frontal y el sur en el rotor trasero) y número de polos entre 2 valores mínimos de flujo

(cuando pasa por delante de la bobina un par de polos con el sur en el rotor frontal y el norte en el rotor trasero). Esto se observa en la figura 1 (la bobina está quieta y el rotor gira), se evalúan los valores de B(t) en ciertos ángulos determinados de giro del rotor con 8 pares de polos.

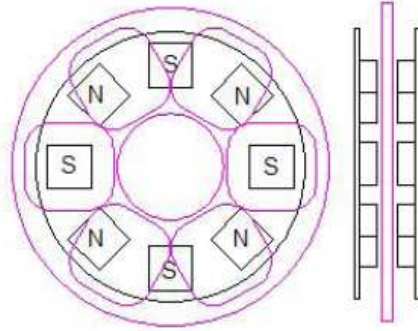


Figura 1. Posicionamiento de una bobina respecto los imanes del rotor.

La ecuación para calcular la tensión en una bobina es:

$$V = \frac{BSN2\pi n}{15\sqrt{2}}$$

Donde:

$$B = \frac{Br}{1.9} = \frac{1.11 T}{1.9} = 0.5842 T$$

$$S = (1.15a)^2 = (1.15 \times 0.05m)^2 = 0.00331m^2$$

N = 100 espiras

$$V = \frac{BSN2\pi n}{15\sqrt{2}} = \frac{(0.5842T)(0.00331m^2)(100)(2)n}{15\sqrt{2}} = 0.0573n$$

Por lo tanto el valor teórico de la tensión en cada bobina, en función de las rpm es:

$$V = 0.0573n \text{ (V/rpm)}$$

Las parejas de bobinas están desfasadas 120° entre ellas, las cuales se pueden conectar en serie o en paralelo (la bobina 1 con la 4, la 2 con la 5 y la 3 con la 6), obteniendo un sistema de generación eléctrica trifásico. Al conectar en serie las bobinas se puede considerar que la bobina 1 con la 4 formando una sola bobina equivalente con el doble de resistencia, inductancia y tensión. Lo mismo sucede con las otras parejas de bobinas al conectarse en serie la 2 con la 5 o la 3 con la 6.

Finalmente, para conocer cuál será la tensión alterna de línea de salida habrá que estudiar tres casos de interconexión de las bobinas; un primer caso de conexión en estrella con las parejas de bobinas conectadas en serie, una segunda posible conexión en triángulo con las parejas de bobinas conectadas en serie, y el tercer caso que será el que se explica en la conexión definitiva de las bobinas del generador de este proyecto, en el que se realiza la conexión Doble-Estrella que consiste en conectar las bobinas en fase en paralelo y las 3 parejas en estrella.

#### Turbina eólica

El diseño del álabes está basado en la teoría del ala, utilizando un perfil estandarizado para las secciones de los álabes. Para el cálculo de las dimensiones del rotor se ha empleado las ecuaciones aerodinámicas siguientes.

El diámetro del rotor se calculó de la siguiente forma:

$$P = \frac{1}{2} \rho AV^3 C_p \eta_e \eta_t$$

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$d = \sqrt{\left( \frac{8 \cdot P}{\pi \cdot \rho \cdot V^3 \cdot C_p \cdot \eta_e \cdot \eta_t} \right)}$$

Donde:

d: Diámetro del rotor de la turbina eólica (m)

P: Potencia de diseño del aerogenerador (W)

p: Densidad del aire, variable con la a.s.n.m (1.23 kg/m<sup>3</sup> a nivel del mar)

V: Velocidad del viento (m/s)

A: Área barrida por la turbina (m<sup>2</sup>)

C<sub>p</sub>: Coeficiente de potencia (adimensional)

η<sub>e</sub>: Eficiencia del generador

η<sub>t</sub>: Coeficiente de transmisión (igual a 1 por ser transmisión directa)

Cálculo del diámetro del rotor

$$d = \sqrt{\left( \frac{8 \cdot P}{\pi \cdot \rho \cdot V^3 \cdot C_p \cdot \eta_e \cdot \eta_t} \right)} = \sqrt{\left( \frac{8(150)}{\pi(1.23)(5.73)^3(0.75)(0.45)} \right)} = 2.21 \text{ mts}$$

Considerando una potencia requerida de 150 W, un C<sub>p</sub> = 0.45 parámetro acorde al diseño, una velocidad promedio de 5.73 m/s, un generador tripala y una eficiencia en el generador del 75%, que es un valor típico para este tipo de generadores, obtenemos un valor de 2.21 metros.

El coeficiente de potencia indica con qué eficiencia el aerogenerador convierte la energía del viento en electricidad. Para calcular el coeficiente de potencia para cada velocidad, se divide el valor de la potencia eléctrica para cada velocidad sacado de la curva de potencia, por el área de barrido del rotor, obteniendo así la potencia disponible por metro cuadrado.

Posteriormente, para cada velocidad, se divide el resultado anterior por la cantidad de potencia en el viento por m<sup>2</sup>. Aunque la eficiencia media de estos aerogeneradores suele estar por encima del 20%, la eficiencia varía mucho con la velocidad del viento. Como se observa, la eficiencia mecánica del aerogenerador más alta (45%) se da a velocidades alrededor de 9 m/s. Este valor es un dato elegido deliberadamente por los constructores de turbinas, ya que:

i) A bajas velocidades del viento la eficiencia del aerogenerador no es importante, ya que la energía del viento no es mucha.

ii) A altas velocidades la eficiencia tampoco interesa que sea muy alta por un doble motivo, según la densidad de potencia a altas velocidades esta es baja y además hay peligro de ruptura del aerogenerador, por lo que este se para a esas velocidades.

La eficiencia interesa que sea alta en aquellas zonas de velocidades de viento más frecuentes, donde se encuentra la mayor parte de la energía.

El perfil del alabe que se pretende utilizar es el perfil NACA4412 linealizado y se seleccionó un rotor tripala que es el que mejor se adecua a las condiciones de velocidad del Municipio de Cuautitlán Izcalli, Estado de México.

*Cálculo de la velocidad de giro*

La velocidad de giro de la turbina eólica se obtiene de la siguiente expresión:

$$N = \left( \frac{60 \cdot \lambda \cdot V_D}{\pi \cdot d} \right) N = \left( \frac{60(5)(5.73)}{\pi(2.21)} \right) = 247.59 \text{ RPM}$$

Donde:

λ: Celeridad

N: Velocidad de giro de la turbina eólica (RPM)

V<sub>D</sub>: Velocidad de diseño (m/s)

En la ecuación de la velocidad de giro se seleccionó el valor de 5 para la celeridad de diseño, valor moderado, conveniente para zonas de regímenes de viento moderados, como es el caso de la zona de aplicación de esta turbina.

En resumen, los parámetros de diseño considerados son los siguientes:

Potencia eléctrica:	150 W
Velocidad nominal de diseño:	5.73 m/s
Perfil utilizado:	NACA 4412
Numero de palas:	3
λ:	5
RPM:	247.59 rpm
C <sub>p</sub> :	0.45
C <sub>t</sub> :	0.8
Eficiencia de transmisión (η <sub>t</sub> ):	1 (transmisión directa)
p:	1,23 kg/m <sup>3</sup>

Para obtener el valor teórico de la tensión en cada bobina, en función de las rpm calculadas se tiene:

$$V = 0.0573n \text{ (V/rpm)}$$

$$V = 0.0573 (247.59)$$

$$V = 14.187 \text{ V}$$

La corriente del generador se calculo de la siguiente forma:

$$P = V I$$

$$I = P / V$$

$$I = 150 \text{ W} / 14.187 \text{ V}$$

$$I = 10.57 \text{ A}$$

El calibre del alambre magneto de la bobina está determinado por el valor de 10.57 A, dando como resultado alambre calibre 17 AWG.

## CONCLUSIONES

Con el diseño del aerogenerador se espera iniciar su construcción y montaje, el cual será ubicado en la azotea de la Unidad Multidisciplinaria de Investigación de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. Con el cual se podrá realizar tanto investigación como prácticas de apoyo a la docencia. Con pruebas realizadas al equipo se podrá realizar otro estudio para mejorar el diseño, además de la formación de estudiantes, en servicio social y tesis de licenciatura.

## BIBLIOGRAFÍA

- ANES. 2008. Notas del curso: Energía Eólica. 32 Semana Nacional de energía solar. Mérida Yucatán.  
ANES. Mérida Yucatán.  
Campbell, Peter, 1994. Permanent Magnet Materials and Application”, Cambridge University Press.  
Gasch, R., Twele J., 1995. Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation, James& James, Inglaterra  
González, Salome, 2000. Aerogeneración: Una Fuente Energética Competitiva, Depósito Legal AS- 3233-98 ISBN 8492334533, 2000.  
Hansen, O.L., 1995. Aerodynamics Wind Turbines, Rotors, Loads and Structure. James& James-Inglaterra.  
ITDG, 2000. Small Wind Systems for Battery Charging, Documentos internos, Lima.  
Muljadi, E. Green, J., 2002. Cogging Torque Reduction in a Permanent Magnet Wind, Turbine Generator, National Renewable Energy Laboratory, U.K.  
Romero Paredes Arturo.2008. Notas del curso: Energías renovables para ecoturismo. 32 Semana Nacional de energía solar.

## REFERENCIAS

- Akhmatov Vladislav y Hans Knudsen, 2002. An aggregate model of a grid-connected, offshore wind farm for power stability investigations importance of windmill mechanical system. Electrical power and energy system 24, 707 - 717.  
Ben Amar F., M. Elamouri, R. Dhifaoui, 2008. Energy assessment of the First wind farm section of Sidi Daoud, Tunisia.  
Flores P., A. Tapia, G. Tapia, 2005. Application of a control algorithm for wind speed prediction and active power generation, Renewable Energy 30, 523–536.  
Kirkclareli, Turkey. Renewable Energy 32. 1739–1752  
Murat Gokcek, Ahmet Bayu Iken, Sukru Bekdemir, 2007. Investigation of wind characteristics and wind energy potential in Ozerdem Baris, Serra Ozer, Mahir Tosun. 2006. Feasibility study of wind farms: A case study for Izmir, Turkey. Journal of Renewable Energy.  
Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 94, 725–743

## ABSTRACT

Presently article, the proposal of design of an aerogenerador is shown for the meteorological conditions of the municipality of Cuautitlán Izcalli, State of Mexico. This aerogenerador will be good to demonstrate the benefits of taking advantage of the renewable energy, in this case the wind, to produce electric power, obtaining reduction in the consumption of fossil fuels and emission of gases of effect hothouse.

**Keywords:** aerogenerador, electric power, generation, renewable energy, eolic energy .