

ANÁLISIS DE REGRESIÓN DE LOS PRIMEROS ENSAYOS DE UN PROTOTIPO DE MOLINO DE VIENTO DE EJE VERTICAL CON GEOMETRÍA VARIABLE

Víctor Rodrigo¹, Lucas Rodrigo², Mario F. Bergoglio³, Carlos G. Medaglia⁴, Javier A. Carletto⁵
Laboratorio de Energías Alternativas - Facultad de Ing. y Cs. Agropecuarias – Univ. Nac. de San Luis
Ruta Provincial N°55 (Ex 148) Ext. Norte – CP.5730 -Villa Mercedes San Luis.
Tel. 02657 - 531000 / 430980 / 430954 - (Int. 7169)
e-mail: victorrodrigo@gmail.com

Recibido 09/08/16, aceptado 07/10/16

RESUMEN: La finalidad perseguida por este trabajo, es realizar un análisis estadístico de las primeras pruebas en vacío y en carga de un generador eólico de eje vertical con geometría variable desarrollado íntegramente en nuestra institución. Con esto se pretende predecir el comportamiento del dispositivo, a través de dichos análisis, teniendo en cuenta el nivel de confianza de los mismos, y complementar estos con las pruebas realizadas en el túnel de viento. Las fuerzas ejercidas por el viento son aprovechables al máximo en las paletas dispuestas en tal sentido gracias a su geometría variable, siendo totalmente despreciable la resistencia que ofrecen las paletas opuestas, las cuales modifican su posición cuando no corresponde recibir de frente la fuerza del viento. Debido a esta cualidad geométrica, es posible aprovechar la fuerza del viento cualquiera sea su dirección.

Palabra Claves: Molino, Eje Vertical, Geometría Variable, Energía Renovable, Viento.

INTRODUCCION

El Molino de Viento de Eje Vertical con Geometría Variable tiene la característica de poseer siempre una de sus aspas enfrentadas al viento y con la mínima brisa comienza a girar. Si el viento cambia de dirección, este molino continúa girando sin cambios bruscos en su velocidad. Figura 1.

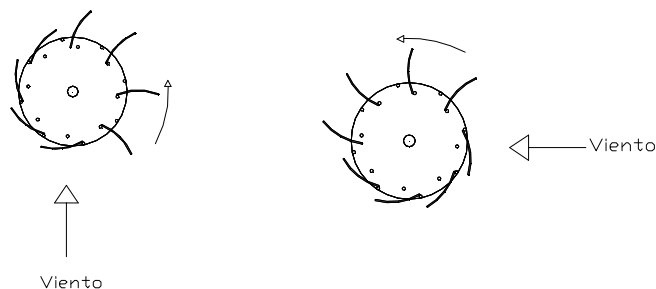


Figura 1: Incidencia del viento sobre el Molino

Este trabajo consiste en el estudio estadístico de las variables intervinientes en la puesta en marcha de un prototipo de molino de viento de eje vertical con geometría variable, del cual ya se realizaron los cálculos teóricos en trabajos precedentes. (Rodrigo et. al. 2008).

Las pruebas se realizaron en un túnel de viento (diseñado y construido en el Taller de Usos Múltiples, por alumnos de las carreras de Ing. Electromecánica e Ing. Electrónica) bajo diversas condiciones de carga y se extrajeron datos, los cuales se utilizaron para realizar un análisis estadístico, a fin de poder inferir el comportamiento del dispositivo sometido a distintas velocidades de viento.

¹ Docente Investigador CyT - UNSL

² Docente Investigador CyT - UNSL

³ Docente Investigador CyT - UNSL

⁴ Alumno Pasante

⁵ Docente Investigador CyT - UNSL

A continuación se adjuntan fotos del dispositivo aerogenerador, y del túnel de viento.



Figura N°2: Fotografías del Túnel de Viento y del prototipo del aerogenerador

DESARROLLO

El objetivo principal del presente trabajo es la realización de un estudio estadístico de algunas de las variables involucradas en el funcionamiento del aerogenerador. Para este fin se describirán las diferentes etapas a la que se sometió el proyecto.

Túnel de viento e instrumental de medición

Debido a que el lugar geográfico en donde se realizan las pruebas no es considerado una zona de vientos fuertes y constantes, sino mas bien una zona de ráfagas leves y variables; se sometió al dispositivo a pruebas realizadas en un túnel de viento que posee nuestra institución, el cual fue diseñado y construido en la misma, en un proyecto final realizado previamente. Dicho túnel permite realizar pruebas más productivas, debido a la eficiencia que se consigue con este dispositivo de prueba al someter al aerogenerador a vientos cuyas velocidades pueden ser controlados por el usuario.

Por otro lado, se hizo uso de diversos instrumentos, tales como, anemómetro, sensor de temperatura y tacómetro, a fin de tomar conocimiento de la variación de las diferentes magnitudes que estos instrumentos miden.

A continuación se detallan las características principales del túnel de viento, y de los instrumentos usados en el proceso de toma de datos.

Túnel de Viento	Velocidad Máxima: 80 Km/h
	Superficie de trabajo: 1,44 m ²
	Caudal máximo de Aire: 40,6 m ³ /s
	Superficie de entrada: 3,42 m ²
	Cantidad de ventiladores: 4
	Potencia de cada ventiladores: 3 HP
	Largo del túnel: 7 m
Anemómetro (Marca Lutron)	Velocidad máxima de trabajo: 35 m/s (126 Km/h)

Tabla N°1: Resumen de las características del túnel de viento e instrumentos usados en las mediciones

Aerogenerador

El aerogenerador utilizado toma como base el diseñado en un trabajo previo (Rodrigo et al. ASADES 2008), sobre el cual se llevaron a cabo algunas modificaciones que permitan adaptarlo a las pruebas a las cuales fue sometido y a los fines de generación que debía cumplir.

Uno de los cambios sobre la morfología del dispositivo fue producido en el eje principal del aerogenerador, a fin de instalar sobre el extremo inferior del mismo una polea conductora que permita transferir a través de una correa el movimiento de rotación a un generador y de esa forma medir a futuro, la capacidad de generación eléctrica del mismo.



Fig. N°3: Detalle del eje antes y después de ser modificado

La polea conductora se eligió en función de los siguientes factores:

- Material
- Medidas comerciales
- Primeras pruebas en vacío
- Revoluciones mínimas en el alternador según catálogo de fabricantes.

Antes de determinar las características de la polea conductora, el aerogenerador fue sometido en condición de vacío (es decir sin estar conectado a ninguna carga o generador) a vientos originados dentro del túnel de viento trabajando a su máxima potencia. A través del uso de un tacómetro se pudo determinar, en dichas pruebas, una velocidad máxima de rotación del molino de $24,08 \frac{1}{s}$ (230 rpm). Éstas se contrastaron con las vueltas mínimas de funcionamiento necesarias en el generador (de acuerdo a datos proporcionados por el fabricante), las cuales según gráfico son de 1000 rpm. Relacionando ambos valores y considerando un coeficiente de seguridad, se optó por una polea conductora de 310 mm de diámetro y una conducida (en el generador) de 50 mm. De esta manera se espera llegar a las 1000 rpm mínimas del generador con:

$$n_{molino} * d_{molino} = n_{generador} * d_{generador} \quad (1)$$

$$n_{molino} = n_{generador} * \frac{d_{generador}}{d_{molino}} = 1000 \text{ rpm} * \frac{50 \text{ mm}}{310 \text{ mm}} = 161 \text{ rpm} = 16,85 \frac{1}{s}$$

El generador que se dispone es un alternador marca INDIEL modelo A115

Montaje del conjunto en el túnel de viento

Una vez determinada la transmisión, se procedió a montar el conjunto (molino-generador) en una base de madera.

En dicha base se instaló un brazo metálico en forma de “L” en donde se dispuso un anemómetro para medir las velocidad del viento alcanzadas y junto a uno de los tensores del aerogenerador se instaló un tacómetro para medir las RPM alcanzadas por el mismo.

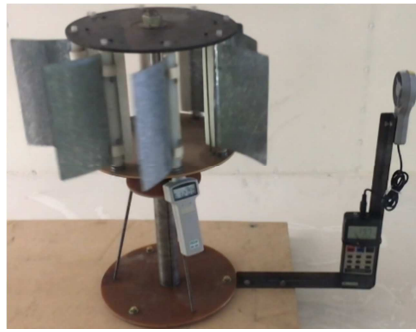


Fig. N°4: Montaje del prototipo en el túnel de viento

Luego de esto se lo sometió a diversas pruebas en dos etapas, una en vacío (es decir con el molino desconectado mecánicamente del generador), y otra con carga donde el dispositivo estuvo conectado al alternador.

Con estas pruebas fue posible recabar varios datos que permitieron realizar los análisis que se desarrollan a continuación.

- 1° Etapa: Molino en vacío

Análisis de regresión lineal

Lo que se pretende observar es si los datos obtenidos en las pruebas pueden ser representados por una recta para poder predecir valores intermedios al campo o rango obtenido.

En este análisis se tomaran los datos del aerogenerador en vacío (es decir sin carga y sin correa) comparando con el viento obtenido en el túnel de viento. El nivel de significación α o nivel de confianza será de $\alpha = 0,01$.

Revoluciones ($\frac{1}{s}$)	Revoluciones (rpm)	Viento ($\frac{m}{s}$)	Viento ($\frac{km}{h}$)
1,88	18	3,22	11,60
5,44	52	4,30	15,50
6,91	66	5,44	19,60
8,69	83	6,58	23,70
9,84	94	7,61	27,40
10,89	104	8,63	31,10
12,35	118	9,61	34,60
14,24	136	10,83	39,00
15,39	147	12,08	43,50
16,75	160	12,66	45,60
17,80	170	13,75	49,50
18,85	180	15,00	54,00
20,00	191	16,52	59,50
21,46	205	17,50	63,00
22,20	212	18,75	67,50

Tabla N°2: Mediciones sin carga

Estos datos se volcaron en un programa estadístico (STATGRAPHICS) el cual utiliza el método de Mínimos Cuadrados para obtener la recta representativa del grupo:

Análisis de regresión:

Modelo de la ecuación a obtener:

$$y = a + bx \quad (2)$$

Como el giro del aerogenerador depende de las condiciones de viento, las variables que se analizaron fueron las siguientes (cabe destacar que se optó por trabajar con rpm y $\frac{km}{h}$ como ya que los valores se leen directamente del instrumento):

- Variable dependiente (y): revoluciones en vacío (*rpm*)
- Variable independiente (x): velocidad del viento ($\frac{km}{h}$)

Los datos de ordenada y pendiente del análisis son:

Parámetros	Estimación	Estadístico T	P-valor
Ordenada (a)	-0,169	-0,03	0,97
Pendiente (b)	3,31	27,48	0

Tabla N°3: Datos de ordenada y pendiente

Una vez obtenidos los datos de ordenada y pendiente debe plantearse un Test de Hipótesis para cada parámetro:

$$H_0: a = 0$$

$$H_1: a \neq 0$$

Como puede observarse en los datos obtenidos para la ordenada el P-valor obtenido es mayor a el nivel de significación ($0,97 > 0,01$), por lo tanto no rechaza H_0 y el valor de ordenada debe ser igual a 0.

$$H_0: b = 0$$

$$H_1: b \neq 0$$

En el dato obtenido para la pendiente el P-valor obtenido es igual a 0 que es inferior al nivel de significación ($0 < 0,01$) por lo tanto se rechaza H_0 y el valor de ordenada es igual a 3,31. Por todo lo expuesto en estos test el modelo lineal representativo para este conjunto de datos es:

$$y = 0 + 3,31 * \text{velocidad del viento} \quad (3)$$

El grafico del modelo será:

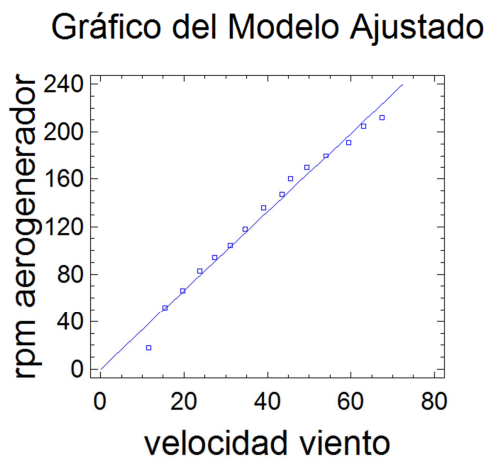


Fig. N°5: Gráfico del modelo ajustado

Por ejemplo: si se requiere saber cuáles son las rpm del aerogenerador a $51 \frac{km}{h}$ de viento, el valor obtenido será:

$$\text{Revoluciones} = 3,31 * 51 = 168,8 \text{ rpm}$$

Analizando la varianza (ANOVA) el P-valor obtenido fue de 0, inferior al nivel de significación requerido de 0,01. Frente a las hipótesis:

- H_0 : existe relación estadística significativa entre variables
- H_1 : no existe relación estadística significativa entre variables

No se rechaza la hipótesis H_0 , Por lo tanto existe una relación estadística significativa entre las rpm del aerogenerador en vacío y la velocidad del viento.

El Coeficiente de Correlación obtenido en el análisis es de 0,99. Este coeficiente indica que existe una relación fuerte entre las variables.

El estadístico R^2 del modelo es de 98%, indicando que el 98% de los datos se ajustan al modelo planteado

Con la ecuación obtenida se pueden llegar a predecir valores puntuales que se sitúen dentro del rango de valores analizados. Quiere decir que si se requiere valores superiores o inferiores a los planteados, este modelo no será el más adecuado. Se requerirá de un nuevo análisis para darle una mayor confianza al estudio.

- 2º Etapa: Molino en carga

Análisis de regresión lineal

Lo que se pretende observar es si los datos obtenidos en las pruebas pueden ser representados por una recta para poder predecir valores intermedios al campo o rango obtenido.

En este análisis se tomaran los datos del aerogenerador con correa colocada (es decir sin carga eléctrica y con correa colocada entre el generador y el dispositivo eólico) comparando con el viento obtenido en el túnel de viento. El nivel de significación α o nivel de confianza será de $\alpha = 0,01$.

Revoluciones ($\frac{1}{s}$)	Revoluciones (rpm)	Viento ($\frac{m}{s}$)	Viento ($\frac{km}{h}$)
1,98	19	12,08	43,50
3,24	31	12,66	45,60
5,13	49	13,75	49,50
5,96	57	15,00	54,00
7,43	71	16,52	59,50
8,90	85	17,50	63,00
9,73	93	18,75	67,50

Tabla N° 4: Mediciones con carga

Estos datos fueron volcaron en un programa estadístico (STATGRAPHICS) el cual utiliza el método de Mínimos Cuadrados para obtener la recta representativa del grupo:

Análisis de regresión:

Modelo de la ecuación a obtener:

$$y = a + bx \tag{2}$$

Como el giro del aerogenerador depende de las condiciones de viento, las variables a analizar serán las siguientes (cabe destacar que se optó por trabajar con rpm y $\frac{km}{h}$ ya que los valores se leen directamente del instrumento):

- Variable dependiente (y): revoluciones en vacío (*rpm*)
- Variable independiente (x): velocidad del viento ($\frac{km}{h}$)

Los datos de ordenada y pendiente del análisis son:

Parámetros	Estimación	Estadístico T	P-valor
Ordenada (a)	-104,98	-9,82	0,0002
Pendiente (b)	2,97	15,42	0

Tabla N°5: Datos de ordenada y pendiente

Una vez obtenidos los datos de ordenada y pendiente debe plantearse un Test de Hipótesis para cada parámetro:

$$H_0: a = 0$$

$$H_1: a \neq 0$$

Como puede observarse en los datos obtenidos para la ordenada el P-valor obtenido es menor al nivel de significación ($0,002 < 0,01$), por lo tanto rechazo H_0 y el valor de ordenada debe ser igual a $-104,98$.

$$H_0: b = 0$$

$$H_1: b \neq 0$$

En el dato obtenido para la pendiente el P-valor obtenido es igual a 0 que es inferior al nivel de significación ($0 < 0,01$) por lo tanto se rechaza H_0 y el valor de ordenada es igual a 2,97.

Por todo lo expuesto en estos test el modelo lineal representativo para este conjunto de datos es:

$$y = -104,98 + 2,97 * \text{velocidad del viento} \quad (4)$$

El grafico del modelo será:

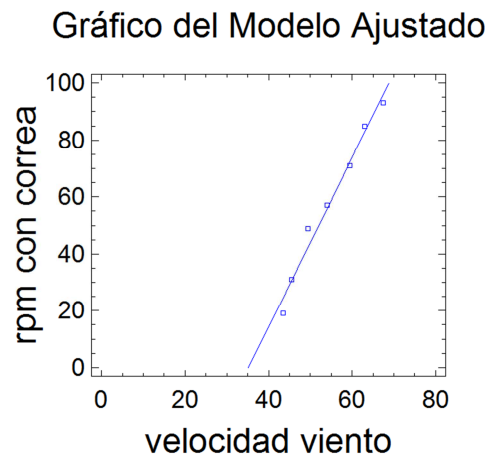


Fig. N°6: Gráfico del modelo ajustado

Por ejemplo: si se requiere saber cuáles son las rpm del aerogenerador a $60 \frac{km}{h}$ de viento, el valor obtenido será:

$$\text{Revoluciones} = -104,98 + 2,97 * 60 = 73,22 \text{ rpm}$$

Analizando la varianza (ANOVA) el P-valor obtenido fue de 0, inferior al nivel de significación requerido de 0,01. Frente a las hipótesis:

- H_0 : existe relación estadística significativa entre variables

- H_1 : no existe relación estadística significativa entre variables

No se rechaza la hipótesis H_0 , Por lo tanto existe una relación estadística significativa entre las rpm del aerogenerador con correa colocada y la velocidad del viento.

El Coeficiente de Correlación obtenido en el análisis es de 0,989. Este coeficiente indica que existe una relación fuerte entre las variables.

El estadístico R^2 del modelo es de 97,94%, indicando que el 97,94% de los datos se ajustan al modelo planteado.

Con la ecuación obtenida se pueden llegar a predecir valores puntuales que se sitúen dentro del rango de valores analizados. Esto implica que si se requiere valores superiores o inferiores a los planteados, este modelo no será el más adecuado. Se requerirá de un nuevo análisis para darle una mayor confianza al estudio.

Se llevaron a cabo pruebas preliminares del alternador conectado eléctricamente, y se pudo observar como a medida que aumentaba la carga del mismo (a través de una resistencia eléctrica), el molino reaccionaba ofreciendo mayor resistencia a la rotación, hasta llegar al punto de velocidad angular nula.

CONCLUSIONES

Luego de llevar adelante un análisis estadístico basado en las variables que definen un comportamiento real del dispositivo, se puede inferir que la mayor pendiente, se debe a que con menor variación de velocidad de viento, se obtiene una variación más grande en las rpm del molino, lo cual era de esperarse ya que al no tener carga conectada, es más fácil producir la rotación del equipo.

Por otro lado, se observa que la velocidad de viento necesaria para iniciar la rotación del aerogenerador es muy superior al que se necesita cuando el dispositivo se encuentra en vacío. Esto se debe al tipo de transmisión utilizado, por lo que se evalúan otras variantes a esta transmisión.

Las pruebas preliminares con el alternador conectado eléctricamente permitieron inferir resultados satisfactorios ya que el conjunto se comportó según se preveía, respondiendo eficazmente a las variaciones de carga resistiva.

A lo anterior debe añadirse la ventaja de poder funcionar con vientos de gran velocidad sin comprometer ningunas de sus partes constructivas, y obtener una buena potencia sobre la base de su alta cupla motriz. Por esto y el punto anteriormente mencionado este Molino de Eje Vertical con Geometría Variable trabaja con potencias relativamente constante ante una gran gama de velocidades de vientos.

REFERENCIAS

Bastianon R. (1999). Energía del Viento y diseño de Turbinas Eólicas. Ed. DUNKEN. Buenos Aires - Argentina

Rodrigo et al (2008). Análisis teórico de las fuerzas actuantes en un molino de viento de eje vertical con geometría variable. ASADES.

Rodrigo R. y Rissio M. (2008). Trabajo Final "Molino de Viento de Eje Vertical con Geometría Variable". FICA (Ex FICES) - UNSL

ABSTRACT: The objective of this project is to do a statistical analysis of the first tests, with and without charge, of a vertical-shaft windmill with variable geometry, which was developed entirely in our institution. It expects predict the behavior of the device through aforementioned analysis considering confidence level of it, and complementing it whit test in a wind tunnel. The wind applies useful strengths over rotor's flaps which changes its direction due to its geometrical variability, being totally insignificant resistance of opposite flaps which changes its position when they do not have to receive the wind's strength. The variable geometry enables the mill's rotor to rotate no matter where the wind is blowing from.

Key Words: Windmill, vertical shaft, geometrically variable, renewable energy source, wind.