



## Actualidad

# Diseño e implementación de un Túnel de viento para un para pruebas de aerogeneradores

*\*Por: Gustavo Espinoza García, Diego Abraham Ibarra, Francisco Eneldo López Monteagudo y Claudia Reyes Rivas*

## Resumen

En el artículo se muestra el diseño y construcción de un sistema de accionamiento para el control de velocidad de un ventilador industrial que reproduce señales del viento similares a las del medio ambiente mediante un túnel de viento, para prueba de aerogeneradores. La velocidad se regula controlando la velocidad del motor trifásico que mueve el ventilador mediante un variador de velocidad SIEMENS.

El sistema permite generar señales de viento con un perfil definido por una base de datos cuyos valores fueron medidos con un anemómetro ó utilizar señales reguladas con valores constantes. Para la implementación del sistema de control y la comunicación de los dispositivos, se empleó un procesador digital de señales, que actúa como interfaz para transmitir los datos entre el entorno de programación desarrollado en VisSim y la etapa de control y regulación.

**Palabra(s) Clave(s):** Túnel de viento, aerogeneradores, control de ventiladores, y energía eólica.

## 1. Introducción

Los túneles de viento son instalaciones en las que se obtienen flujos de aire rectilíneo y uniforme a una velocidad determinada en la cámara de ensayos.

Mediante el túnel de viento se estudian las acciones del aire ó el viento sobre un objeto, el mismo consta de una instalación en la que se obtiene un flujo de aire rectilíneo y uniforme a una velocidad determinada proporcionando

una corriente con las características deseadas, con determinados niveles de calidad, de manera que en su cámara de ensayos pueden realizarse pruebas al hacer incidir esta corriente sobre objetos reales. De esta forma puede predecirse el efecto real que el viento ejerce sobre el objeto de estudio, pudiendo asimismo diseñarse y evaluarse para buscar soluciones en caso necesario ó bien para reducir su efecto [1, 2 y 3].

Cuando el objeto sometido a la corriente de aire en el túnel es un aerogenerador se puede evaluar el comportamiento del sistemas de control del mismo mediante la simulación de las condiciones reales del viento a que estaría sometido el aerogenerador, tanto en su componente horizontal, que es la más importante (cientos y hasta miles de km) y la vertical (10 km o más) que siempre se compensa, con el ascenso o el descenso del aire, ya que a medida que asciende el viento, el cono giratorio se hace más ancho, por lo cual disminuye su velocidad de giro [4 y 5].

## 2. Sistema de control Del túnel de viento

Los túneles de viento son instalaciones experimentales que sirve para reproducir señales de viento similares a las del medio ambiente en diferentes condiciones, desde baja velocidad, media y hasta fuertes ráfagas, para evaluar el rendimiento y durabilidad de aviones, automóviles, edificios y otros equipos.

El túnel de viento construido para pruebas de aerogeneradores cuenta con un ventilador industrial que genera un flujo variable de aire que se hace incidir sobre las aspas de un aerogenerador donde la energía cinética del



aire se transforma en energía mecánica de rotación. El rotor de la turbina eólica está conectado a un generador eléctrico cuya eficiencia depende sobre todo del viento y de las características de diseño del aerogenerador según [9 y 10].

En el diseño del túnel de viento se considero la velocidad media del viento y su densidad tomando como referencia mediciones reales, además en la instalación del aerogenerador se tomaron en consideración aspectos como la altura del rotor y las características de las aspas recomendadas en [11 y 12].

El sistema de control tiene varias opciones a elegir por el usuario manual, automática o virtual.

### 3 Control manual



El control manual es una acción que ejecuta el usuario desde el equipo de cómputo únicamente para activarlo ó desde los interruptores. La función de los interruptores es encender, cambiar el sentido del giro y detectar presencia de fallas en el sistema y mediante un potenciómetro se varia la señal de consigna que se envía al variador para aumentar o disminuir la velocidad del ventilador. El panel de control se muestra en la figura #1.

Figura # 1. Modo manual.

### 4. Control virtual

En el modo virtual se utilizan datos del viento medidos con un anemómetro bajo distintas condiciones ambientales, en diversos lugares y a varias alturas para recopilar información de distintos tipos de viento. El sistema de control virtual se muestra en la figura #2.

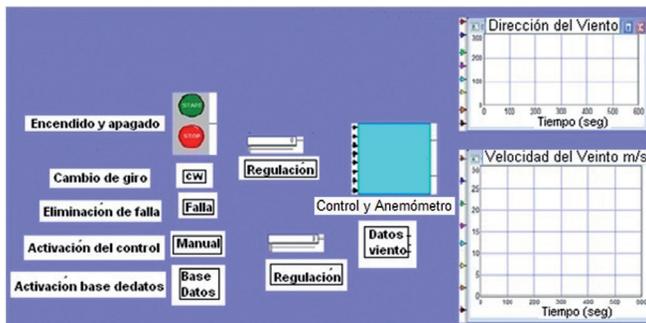


Figura #2: Sistema de control virtual.

### 5. Control automático

En el modo automático se diseño y construyó un sistema de control a lazo cerrado para que las señales obtenidas sigan el comportamiento del sistema en condiciones reales de funcionamiento. El diagrama de bloques se muestra en la figura # 3.

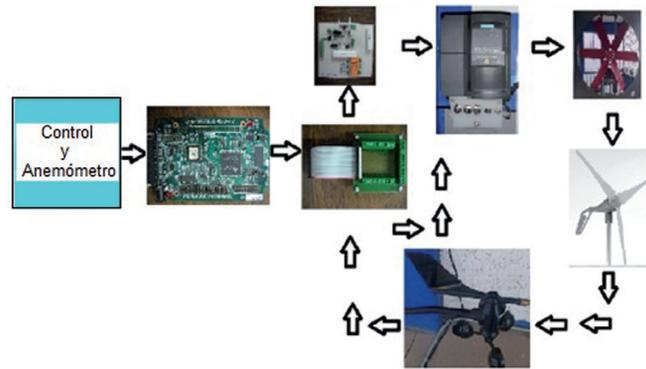


Figura # 3: Sistema de control a lazo cerrado.

El sistema de control a lazo cerrado consta de una computadora desde la cual se envían las señales que controlan la velocidad del ventilador industrial por medio de un procesador digital de señales (PDS), programado por bloques incrustados con el software VisSim. Las ganancias del controlador se determinaron con la metodología descrita en [15].

Para retroalimentar el sistema de control se utilizó un anemómetro de copas el cual transforma el viento a frecuencia para su análisis y comparación con la frecuencia de referencia. El anemómetro posee una veleta con la cual se obtiene la dirección del viento, en la figura # 4 se muestra el anemómetro Davis utilizado



Figura # 4. Anemómetro Davis.

### Etapa de potencia

En la etapa de potencia se acondicionaron las señales para garantizar el flujo requerido de las señales de entrada y salida al variador de velocidad, la retroalimentación de la velocidad del viento se realiza mediante un anemómetro para completar el lazo cerrado como se muestra en la figura # 5.

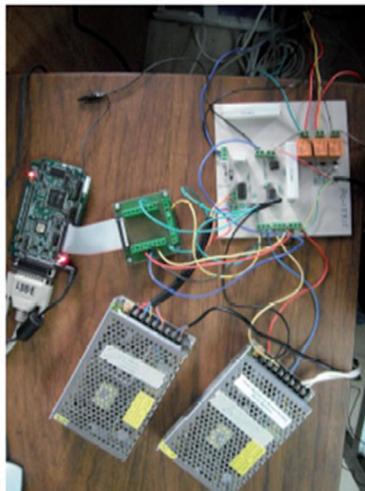


Figura # 5. Etapa de potencia.

### 6. Resultado modo manual

Los resultados que se recopilaron del control manual son aquellos datos que el usuario modifica según la necesidad que se le presenta, ya sea realizando pruebas, demostraciones, ó simplemente en trabajo de campo. En el modo manual se realizaron diversas pruebas, en la figura # 6 se muestra un ejemplo de la respuesta del sistema.

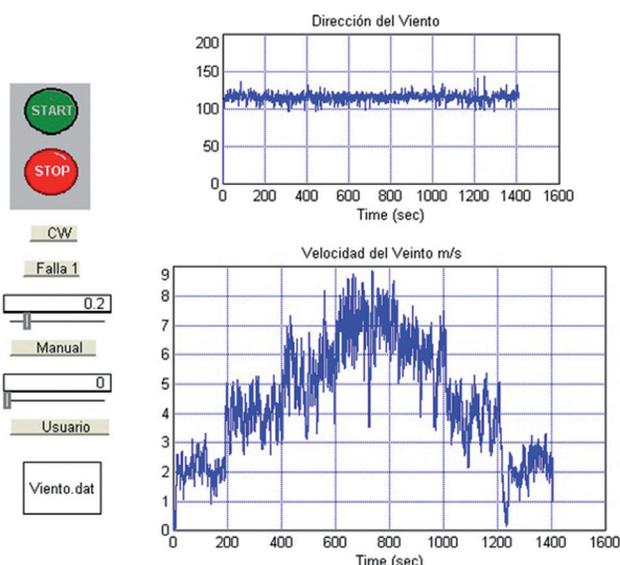


Figura # 6. Resultados en el modo manual.

### 7. Resultado modo automático

Las pruebas hechas consistieron en aplicar los diferentes valores calculados a los controladores, analizar la respuesta de velocidad del viento obtenida y evaluar como el controlador lleva el sistema al valor deseado. En el modo automático se utilizó el software virtual, el cual controla el sistema desde una computadora, con la tarjeta (EZDSP2407) se realiza la interconexión de la parte virtual con la real, mediante sus puertos de entrada salida se controla el variador, un ejemplo de los resultados obtenidos se muestran en la figura # 7.

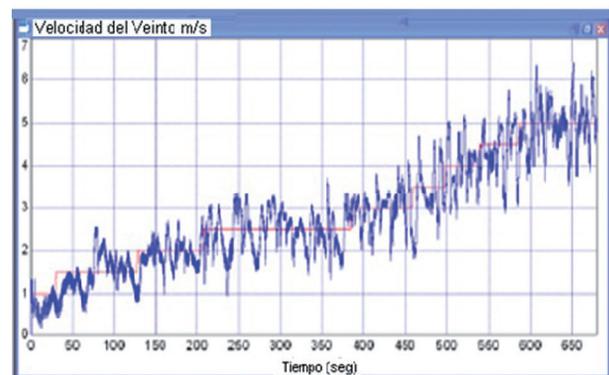


Figura # 7. Resultado en modo Automático.

Las oscilaciones de la señal de salida son debidas a las perturbaciones que está sometido el sistema de control para lo cual se recomienda crear una barrera de aislamiento del viento externo en el túnel que evite la interferencia del flujo del viento entregado por el ventilador.

### 8. Resultados a velocidad constante

Al sistema de control desarrollado se le realizaron diversas pruebas a diferentes velocidades del ventilador industrial, la selección del valor de velocidad deseada se realiza por medio de un controlador deslizable colocado en el programa virtual en un rango asignado de 1 a 10, equivalente a velocidades desde cero hasta velocidad nominal, de esta forma el sistema estabiliza al valor de velocidad deseada. Un ejemplo se muestra en la figura # 8

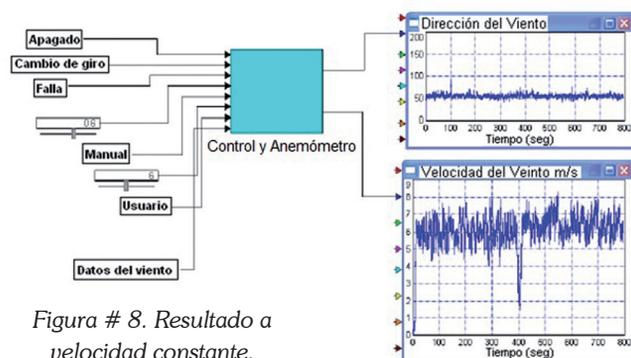


Figura # 8. Resultado a velocidad constante.



Los resultados del seguimiento de la señales del viento, su dirección entre otras, se capturaron con ayuda del visim introduciéndose las tablas de datos de viento real medido con un anemómetro digital en distintos lugares al aire libre. Una muestra de la base de datos registrada en el control virtual se muestra en la tabla # 1.

	Fecha	Tiempo	Velocidad del aire m/s	Temperatura °C
1	25/03/2012	13.45	2.7	27.3
2	25/03/2012	13.50	3.1	27.3
3	25/03/2012	13.55	3.6	27.3
4	25/03/2012	14.00	5.4	27.3
5	25/03/2012	14.05	5.3	27.3
6	25/03/2012	14.10	3.9	27.3
7	25/03/2012	14.15	4.1	27.3
8	25/03/2012	14.20	3.9	27.3
9	25/03/2012	14.25	5.2	27.3
10	25/03/2012	14.30	5.3	27.3

El control sigue los valores reales del medio ambiente tabulados obteniéndose una señal simulada del viento real y de cualquier tipo de clima siempre y cuando se adquieran los valores reales y sean ingresados a la base de datos correctamente. En la figura # 9 se muestran los resultados obtenidos.

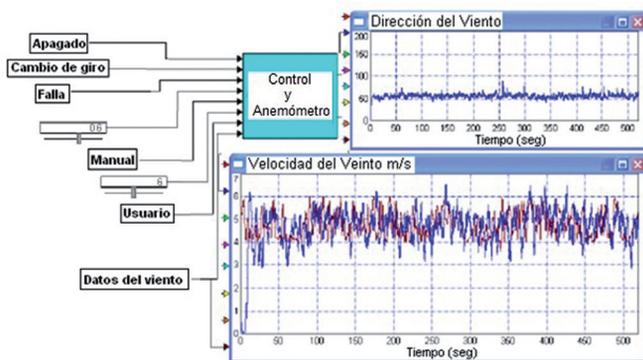


Figura # 9. Resultado de seguimiento de señal

## 9. Conclusiones

1. Se desarrollo una plataforma de control para la implementación del sistema de accionamiento basada en el programa visual (VisSim) y el procesador digital de señales EZDSP2407. El sistema de control virtual desarrollado para el control del ventilador industrial se puede aplicar para mejorar tecnológicamente el manejo de ventiladores que sean controlados manualmente, además con el control se pueden simular velocidades similares a las del viento real (medio ambiente).

2. Los resultados obtenidos demuestran la factibilidad del control voltaje/frecuencia del motor trifásico del ventilador para generar viento en condiciones similares a las condiciones reales para realizar estudios de aerogeneradores mediante un túnel de viento.

3. La utilización de un anemométrico para determinar la velocidad del viento es factible sin embargo se aprecian algunas desviaciones en las señales obtenidos tanto en el control manual como automático debido a la presencia de perturbaciones originadas por las turbulencias, por tal razón se recomienda hacer un túnel completamente cerrado.

## 10. Referencias

[1] S. Heier. Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems, 1998, 385 p.

[2] G. T. Trewartha, "The Earth's Problem Climates", American Geographical Society, vol. 52, No. 1, pp. 144-146, Jan, 1962.

[3] O. Wasynczuk, "Dynamic Behavior of a Class of Wind Turbine Generators during Random Wind Fluctuations", Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, vol. 100, No. 1, pp. 2837 - 2845, February 2007.

[4] R. Spte and S. Bhowmik, et all, "Wind turbines", John Wiley and Sons, vol. 16, No. 1, pp. 1 - 161, January 2013.

[5] G. D. Roth et all, "Formaciones nubosas y otros fenómenos meteorológicos", Ediciones Omega, Barcelona 2003. ISBN: 84-282-1319-4

[6] G. V. Kuik, et all, 'Sustainable Energy Technologies', Amsterdam, the Netherlands, Springer-Verlag, 2007, ISBN: 2010-06-29 19:09:45.

[7] Hiriart, et all 'Wind power spectrum", vol 37, pp. 213-220, 2011.

[8] M. Predescu, et all, "Impact of the design method of permanent magnets synchronous generators for small direct drive wind turbines for battery operation", ICREPQ, en línea. Consulta 25 septiembre 2012, disponible en: <http://www.icrepq.com/icrepq07/240>

[9] W. Hulshorst, "Manual Práctico de evaluación de una instalación de energía eólica a pequeña escala" Consulta 22 enero 2013, disponible en: <http://www.todointeresante.com/2010/07/manual-instalacion-energia-eolica.html>

[10] R. Farmingdale et all, "Manuales de operación de Lab-Volt Sistemas Inc., NJ 07727", publicados en el 2009. Consulta 28 enero 2013, disponible en: [www.labvolt.com](http://www.labvolt.com)

[11] E. Complex et all, "Manuales de operación de Wind Energy Trainer, Indore - 452 010", publicados en el 2008. Consulta 28 enero 2013, disponible en: [www.nvistech.com](http://www.nvistech.com)

[12] B. Paredes, et all, "Túnel de Viento, Tecnología Química, Ambiental y de los Materiales, Universidad Rey Juan Carlos, publicados en el 2012. Consulta 21 febrero 2013, disponible en:



<http://www.exploraciencia.profes.net>

[13] L. Fernández, C. García. “Comparative study on the performance of control systems for doubly fed induction generator wind turbines operating with power regulation”, publicado en Energy, Science Direct Elsevier vol. 33, pp 1438–1452, 2008.

[14] B. Boukhezzar, L. Lupu y H. Siguerdidjane, “Multivariable control strategy for variable speed, variable pitch wind turbines. Renewable”, publicado en Energy, Science Direct Elsevier vol. 32, pp 1273–1287, 2007.

[15] L. F. Arroyo y G. G. Tinoco, “Generación de Electricidad por medio de Energía Eólica, datos adjuntos de la UAZ, Energías Alternas”, tesis de licenciatura de la Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas 20 Abril 2012. ☺

### **11. Autores**

Francisco Eneldo López Monteagudo. Graduado de Ingeniero Electricista en 1981, Doctor en Ciencias Técnicas en 1999, en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba. Profesor titular de la Universidad Central de las Villas Cuba desde 1981 hasta el 2009. Actualmente es profesor-investigador Titular de la escuela de ingeniería eléctrica de la Universidad Autónoma de Zacatecas, con domicilio en la Avenida Ramón López Velarde 801, CP 98060 Zacatecas, Zacatecas, México. eneldolm@yahoo.com

Gustavo Espinoza García. Graduado de Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica en 2012, en la Universidad Autónoma de Zacatecas, con domicilio en la Avenida Ramón López Velarde 801, CP 98060 Zacatecas, Zacatecas, México. gustavoesga@hotmail.com

Diego Abraham Ibarra. Graduado de Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica en 2012, en la Universidad Autónoma de Zacatecas, con domicilio en la Avenida Ramón López Velarde 801, CP 98060 Zacatecas, Zacatecas, México. panditakacheton@hotmail.com

Claudia Reyes Rivas Máster en Ingeniería, Especialidad en Control, Profesora Titular, Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas, México clausy\_17@yahoo.com

**\* Gustavo Espinoza García, Diego Abraham Ibarra, Francisco Eneldo López Monteagudo y Claudia Reyes Rivas.  
Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica,  
Universidad Autónoma de Zacatecas,  
Av. López Velarde No 801 CP 98060  
Zacatecas, México.**