

Sistema de control para una turbina eólica

Ramón Jaramillo Martínez

Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas, Av. López Velarde No
801 CP 98060 Zacatecas, México., (045) 492-905-04-18.
jaramillo.ramon@hotmail.com

Rafael Cabrera Ovalle

Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas, Av. López Velarde No
801 CP 98060 Zacatecas, México., (045) 492-905-04-18.
rcabrerao@live.com.mx

Francisco Eneldo López Monteagudo

Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas, Av. López Velarde No
801 CP 98060 Zacatecas, México., (045) 492-905-04-18.
eneldolm@yahoo.com

Resumen

La potencia entregada por las turbinas eólicas es afectada por las constantes fluctuaciones en la velocidad y dirección del viento, razón por la cual se hace necesaria la utilización de sistemas de control que permitan un buen rendimiento de los aerogeneradores. En este trabajo se proponen dos sistemas de control PI independientes; el primer sistema de control permite la regulación del ángulo de ataque del viento en las aspas de la turbina a través de un actuador electromagnético; por otra parte, el segundo sistema de control orienta la góndola hacia la velocidad de viento predominante.

Palabras Claves: Actuador, Energía eólica, Seguidor, Sistemas de conversión de energía eólica (WECS).

1. Introducción

En la actualidad, los cambios climáticos obligan la revaloración sobre las formas de producción de energía a fin de lograr una armonía entre la economía y el medio ambiente. En las últimas décadas las energías renovables han tomado popularidad en la sociedad debido a la necesidad de reducir los gases de efecto invernadero, propiciando el desarrollo tecnológico y el fortalecimiento de energías sustentables [1].

La utilización de la energía eólica para la producción de energía tiene sus orígenes a finales del siglo XIX [2]; sin embargo, no fue hasta la recesión del petróleo en la década de los 70's, cuando comenzó a tomar mayor popularidad principalmente en los países desarrollados [3]. En el 2013, la capacidad instalada ha supuesto un incremento notable en países como China, Estados Unidos, Alemania, España e India, que representan el 73% de la capacidad mundial instalada [4].

La principal desventaja de aprovechar la energía cinética del viento para la producción de energía eléctrica, son las constantes fluctuaciones en la velocidad y dirección del viento, siendo esta es la causa principal por la cual el costo real sea hasta cierto punto incierto [2]. Dichas condiciones ambientales cambiantes traen como consecuencia, que los sistemas de control aplicados a los Sistemas de Conversión de Energía Eólica (Wind Energy Conversion Systems WECS) no sean una tarea fácil [5], ya que, además se debe considerar los cambios abruptos en la carga eléctrica, fuertes no linealidades, varias restricciones y gran interacción entre sus sistemas variables [6].

Principales configuraciones de los WECS

Los sistemas de conversión de energía eólica pueden operar bajo dos modos [7]:

- **Velocidad constante:** En este caso la turbina eólica opera a una velocidad constante sin importar los cambios de velocidad y dirección del viento, almacenando la energía producida en una batería y transformándola por medio de un convertidor a una señal de corriente alterna con las características de voltaje y

frecuencia de la red eléctrica; estos sistemas son utilizados cuando el WECS está alejado de la red eléctrica.

Esta configuración es la más simple pero también la menos eficiente, ya que la potencia entregada se ve afectada por las ráfagas y turbulencias del viento.

- **Velocidad variable:** Mediante el seguimiento de máxima eficiencia de potencia a bajas velocidades del viento, y la regulación de la velocidad angular y potencia de los valores nominales del generador eléctrico para fuertes vientos, esta configuración busca mejorar la eficiencia del sistema en modo de velocidad variable.

Para lograr este objetivo se emplean configuraciones complejas que implica la utilización de convertidores de potencia para transformar la energía en una señal de corriente directa, para volver a transformarla en una señal de corriente alterna con los requerimientos de la red eléctrica; este modo de operación es útil para la interconexión a la red.

En este trabajo se propone un sistema de control para el accionamiento de un aerogenerador (WECS). La solución consiste en el diseño de dos controladores PI independientes; el primer control se emplea en un actuador, el cual es el encargado del giro de las aspas; por otra parte, el segundo control se aplica a un motor de corriente directa encargado de la rotación de la góndola del aerogenerador. Finalmente se evalúan la respuesta de los controladores mediante simulación computacional por medio de Matlab®.

2. Desarrollo

El sistema de conversión de energía eólica propuesto (ver Fig.1), es una configuración de velocidad constante que utiliza un generador síncrono de imanes permanentes (Permanent Magnet Synchronous Generator PMSG), conectado a un convertidor de potencia no controlado para rectificar señal eléctrica y almacenar la energía en un banco de baterías. Un segundo convertidor de potencia transforma la energía almacenada en

una señal de corriente alterna con valores de frecuencia y voltaje demandados por la carga. Con la finalidad de mejorar el rendimiento del sistema se pretende controlar el ángulo de ataque del viento en las aspas de la turbina por medio de un actuador; y mediante un motor DC la orientación de la góndola a la velocidad de viento predominante o en su defecto la peor ubicación (cuando la velocidad nominal del generador es rebasada).

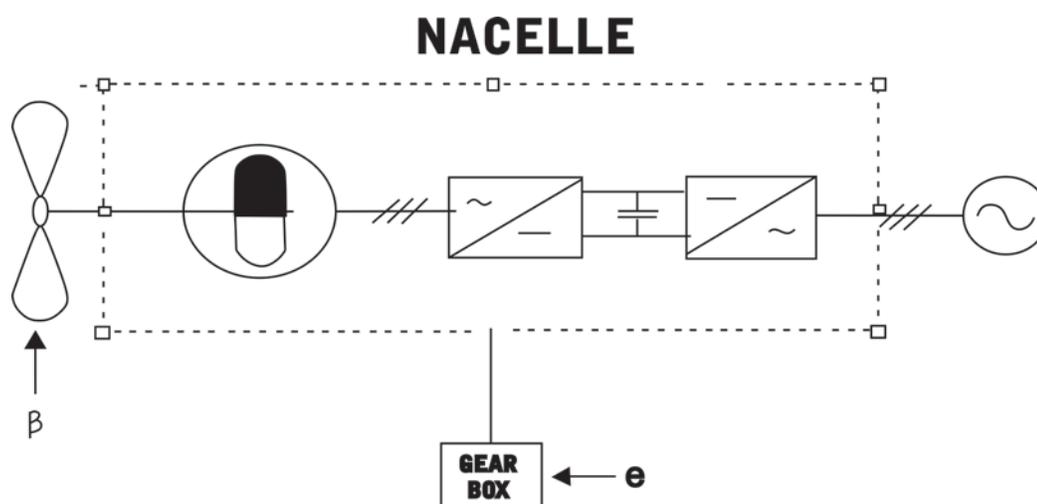


Fig. 1. Sistema de conversión de energía eólica propuesto.

2.1 Actuador

En un principio, el actuador consistía en contrapesos que permitían la rotación de las palas alrededor de sus ejes longitudinales. Como el tamaño de la turbina ha aumentado considerablemente, estos mecanismos rudimentarios fueron reemplazados por dispositivos hidráulicos o electromecánicos.

El actuador de paso es un servo no lineal que gira generalmente todas las hojas o parte de ellos. El actuador puede ser modelado como un sistema dinámico de primer orden con saturación en la amplitud y la derivada de la señal de salida. El comportamiento dinámico

del actuador cuando funciona en su región lineal se describe por la ecuación diferencial [8]:

$$\dot{\beta} = -\frac{1}{\tau}\beta + \frac{1}{\tau}\beta_d \quad (1)$$

Donde $\dot{\beta}$ y β_d son el ángulo actual y deseado respectivamente. La corrección de potencia puede exigir correcciones rápidas y grandes del ángulo. Un diagrama de bloques del modelo del actuador de primer orden se muestra a continuación (ver Fig. 2).

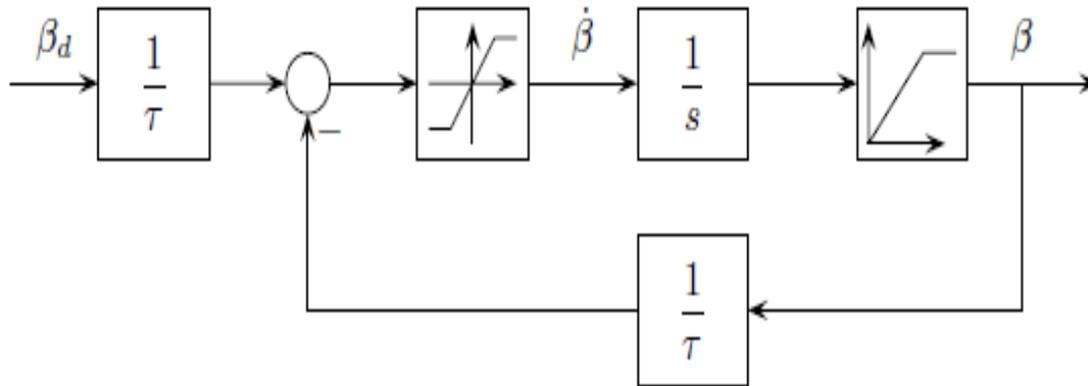


Fig. 2. Diagrama a bloques del actuador.

En el control del ángulo de ataque, existen dos regiones de interés, la región I y la región III (ver Fig. 4.). En la región I, el ángulo de ataque debe ser el más eficiente de acuerdo con el tipo de perfil aerodinámico utilizado; por otro lado, en la región III, el ángulo debe ser el menos óptimo con la finalidad de reducir la velocidad de la turbina.

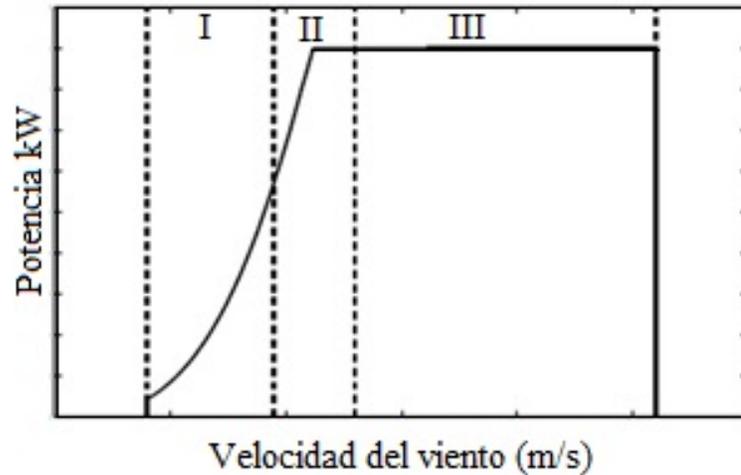


Fig. 4. Curva de potencia de una turbina ideal.

En la región III, el control se puede lograr de dos maneras [9]:

- Control de paso, consiste en reducir la elevación de las aspas gradualmente. Requiere un cambio relativamente grande en el ángulo de paso para disminuir la potencia de manera significativa.
- Control por pérdida aerodinámica, consta de un cambio pequeño en el ángulo de paso.

En el trabajo se propone el segundo sistema de control, ya que permite minimizar las oscilaciones ocasionadas por las variaciones de velocidad, esto se logra con una respuesta del control relativamente lenta.

La función de transferencia que describe el comportamiento del actuador es [8]:

$$\beta_{act} = \frac{\alpha}{s + \alpha} \quad (2)$$

donde $\alpha = 1/T_{\beta}$, entonces la función de transferencia en se puede representar de la siguiente manera:

$$\beta_{act} = \frac{1}{T_{\beta}s + 1} \quad (3)$$

Aplicando un control PI, la función en lazo cerrado es la siguiente [5-7]:

$$\frac{\beta(s)}{\beta_d(s)} = \frac{K_b}{T_{\beta}s^2 + s + K_b} \quad (4)$$

donde K_b es la ganancia del controlador y T_{β} es el parámetro que define el tiempo de respuesta del sistema de orientación utilizado. La siguiente figura muestra la respuesta a la entrada escalón del sistema en lazo cerrado para $K_b = 0.15$ y $T_{\beta} = 2$ (ver Fig. 5.).

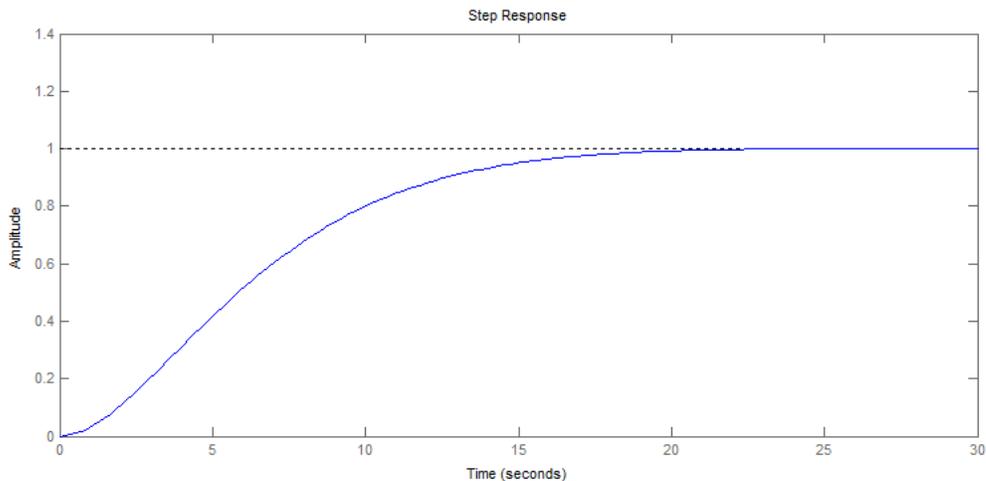


Fig. 5. Respuesta a la entrada escalón del sistema en lazo cerrado

2.2 Seguidor

El objetivo de este sistema es controlar la posición de un aerogenerador de acuerdo con la posición de referencia entregada por una veleta, esto con el fin de posicionar la turbina frente a la corriente de viento predominante.

En el sistema propuesto, un par de potenciómetros funcionan como un dispositivo de medición de error; a través del controlador se pretende llevar el error a cero (ver Fig. 6).

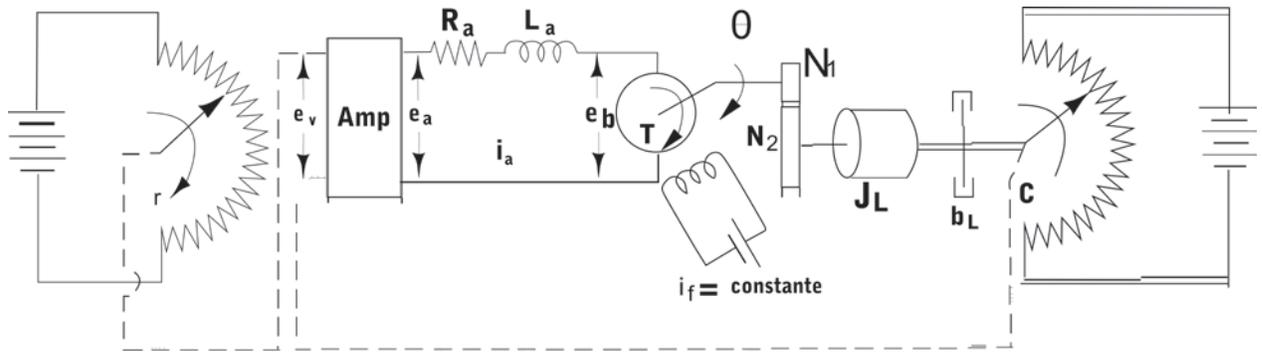


Fig. 6. Diagrama físico del seguidor.

El diagrama de bloques se muestra en la siguiente figura (ver Fig. 7):

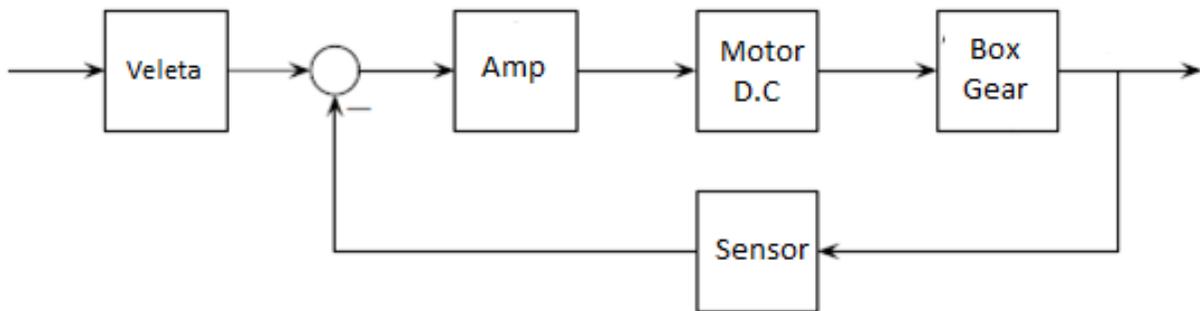


Fig. 7. Diagrama a bloques del seguidor.

La señal de entrada determina la posición angular r de la veleta, la cual es la entrada de referencia para el sistema. La posición c determina la posición angular del aerogenerador; la diferencia entre las dos posiciones es la señal de error.

$$e = r - c \quad (5)$$

es decir

$$e_r = K_0 * r \quad (6)$$

$$e_c = K_0 * c \quad (7)$$

donde K_0 es una constante de proporcionalidad. Para una corriente de campo constante el par que desarrolla el motor es:

$$T = K_2 * i_a \quad (8)$$

donde K_2 es la constante de par del motor e i_a es la corriente de armadura. Para el flujo constante, el voltaje inducido e_b es directamente proporcional a la velocidad angular.

$$e_b = K_3 * \frac{d\theta}{dt} \quad (9)$$

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + e_b = e_a \quad (10)$$

donde K_3 es la constante de la fuerza electromotriz y θ es el desplazamiento angular de la flecha del motor. La velocidad del motor determinada por el voltaje de la armadura e_a : La ecuación para el equilibrio del par es:

$$J_0 \frac{d^2\theta}{dt^2} + b_0 \frac{d\theta}{dt} = T = K_2 * i_a \quad (11)$$

donde J_0 es la inercia y b_0 es coeficiente de fricción viscosa. La función de transferencia entre el desplazamiento angular de la flecha del motor y el voltaje de error está dada por:

$$\frac{\theta(s)}{E_v(s)} = \frac{K_1 K_2}{s(L_a s + R_a)(J_0 s + b_0) + K_2 K_1 s} \quad (12)$$

La velocidad angular en el eje del generador es producida después del engranaje y es N veces menor. La relación entre $E_v(s)$, $R(s)$ y $C(s)$ es:

$$E_v(s) = K_0 [R(s) - C(s)] = K_0 E(s) \quad (13)$$

La función de transferencia en la trayectoria directa del sistema es:

$$G(s) = \frac{K_0 K_1 K_2 n}{s[(L_s s + R_a)(J_0 s + b_0) + K_2 K_3]} \quad (14)$$

Dado que L_a es pequeña, la función se puede representar como:

$$G(s) = \frac{K_0 K_1 K_2 n}{s[R_a(J_0 s + b_0) + K_2 K_3]} \quad (15)$$

Para el sistema propuesto se consideran los siguientes parámetros (ver Tabla 1).

Tabla 1. Parámetros del sistema.

Parámetro	Descripción	Valor	Unidades
r	Desplazamiento angular de la veleta.	0 – 5	V
c	Desplazamiento angular de la góndola.	0 – 5	V
K_0	Ganancia del detector de error.	$24/\pi$	V/rad
K_1	Ganancia del amplificador.	10	$V * N$
K_2	Constante de voltaje inducido.	0 – 5	V
K_3	Constante de par del motor.	0 – 5	V
R_a	Resistencia de armadura.	0.2	Ω
J_m	Momento de inercia del motor referido a la flecha del motor.	1×10^{-5}	$\text{kg} * \text{m}^2$
J_L	Momento de inercia de la carga referido a la flecha de salida.	4.4×10^{-3}	$\text{kg} * \text{m}^2$
b_L	Coefficiente de fricción viscosa de la carga referido a la flecha de salida.	4×10^{-2}	$\frac{N * m}{\text{rad}/\text{seg}}$
n	relación de engranes	1/10	<i>adimensional</i>

La función de transferencia final es:

$$G(s) = \frac{5.5}{s(0.13s + 1)} = \frac{42.3}{s^2 + 7.69s + 42.3}$$

Obtenemos la siguiente respuesta a la entrada escalón (ver Fig. 8) y el diagrama de bode en lazo abierto (ver Fig. 9):

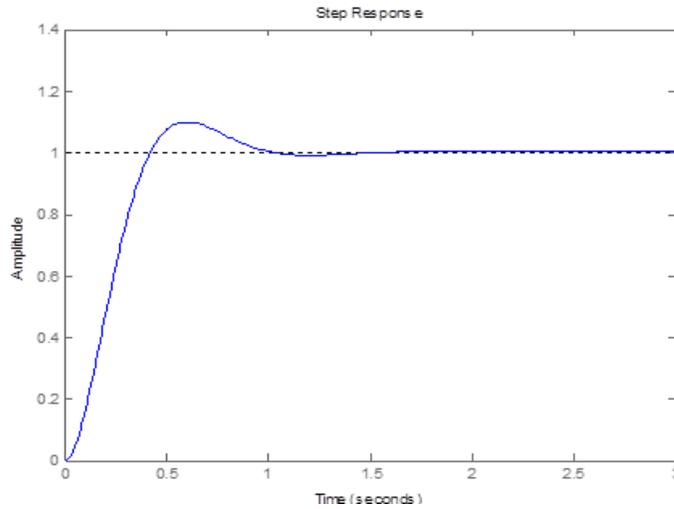


Fig. 8. Respuesta al escalón unitario.

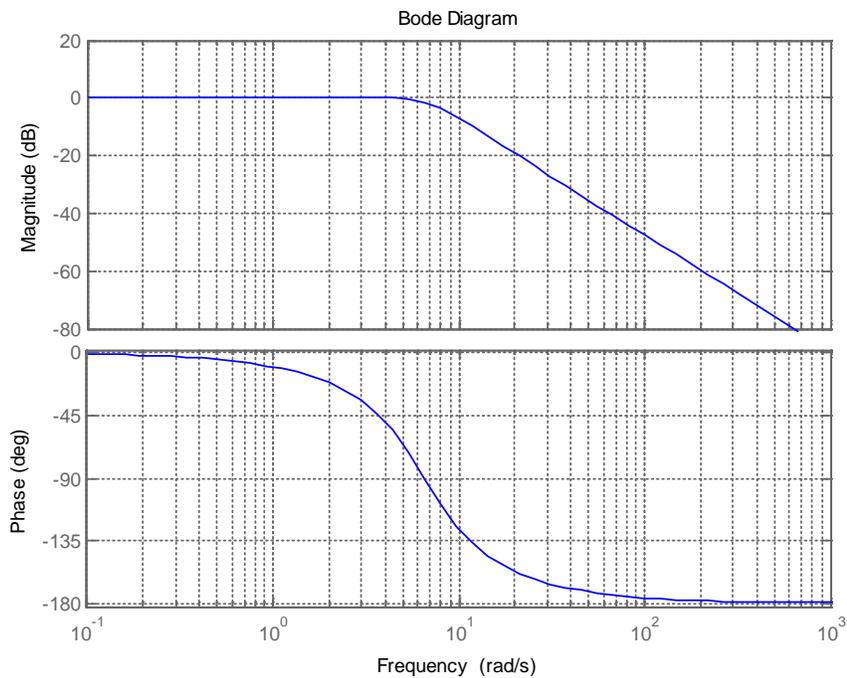


Fig. 9. Diagrama de bode del sistema.

4. Discusión

Los dos controladores llegan a valor deseado de una manera aceptable (ver Fig. 7 y Fig. 5), el controlador del sistema de orientación tiene un sobre impulso debido a que se espera una respuesta más rápida, a diferencia del actuador se diseñó el controlador con la finalidad que la respuesta sea lenta y el sistema no este oscilando constantemente de manera significativa.

La representación de la función de transferencia del actuador, así como los parámetros fueron tomados de [5]. Para el caso del seguidor fueron tomados de [10].

5. Conclusiones

En este trabajo se propuso un sistema de conversión de energía eólica, para el cual se propusieron dos controles PI independientes obteniendo buena respuesta; sin embargo, actualmente hay WECS complejos que requieren controladores más complejos a fin de buscar el mejor rendimiento mediante la interacción de sus variables de entrada y salida.

Se observa, el sistema de control propuesto es relativamente sencillo y podría significar una gran ganancia en la extracción de potencia, ya que garantiza el correcto posicionamiento del aerogenerador, así como el ángulo de ataque óptimo del viento en las aspas de la turbina.

A diferencia de las turbinas eólicas orientadas por una veleta, con el sistema del seguidor propuesto no es necesario que la velocidad del viento tenga la fuerza necesaria para hacer girar la góndola de tal manera que permite aprovechar velocidades de viento bajas.

6. Referencias

- [1] J. Reneses and E. Centeno, "Impact of the Kyoto Protocol on the Iberian Electricity Market: A scenario analysis," *Energy Policy*, vol. 36, pp. 2376-2384, 2008.
- [2] A. V. da Rosa, "Chapter 15 - Wind Energy," in *Fundamentals of Renewable Energy Processes (Second Edition)*, A. V. d. Rosa, Ed., ed Boston: Academic Press, 2009, pp. 723-797.
- [3] T. Ackermann, "Chapter 2 - Historical Development and Current Status of Wind Power " in *Wind power in Power Systems*, T. Ackermann, Ed., ed, 2005, pp. 7-23.
- [4] World Wind Energy Association, "2013 Half-year," Report 2013.
- [5] E. Gonzalez, F. Vazquez, F. Morilla, and A. Beltran, "Modelado y Análisis de Interacción de un Generador Eólico para Control Multivariable," in *Congreso Anual 2009 de la Asociación de México de Control Automático*, Zacatecas, Mexico, 2009.
- [6] M. E. González, F. Vázquez, and F. Morilla, "Control Multivariable Centralizado con Desacoplo para Aerogeneradores de Velocidad Variable," *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, vol. 7, pp. 53-64, 2010.
- [7] E. Gonzalez, F. Vazquez, F. Morilla, and D. Diaz, "Modelo Matemático y Modos de Operación de un Aerogenerador de Velocidad Variable," presented at the IX Congreso Internacional sobre Innovación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca Morelos, México, 2011.
- [8] F. D. Bianchi, H. De Battista, and R. J. Mantz, *Wind turbine control systems: principles, modelling and gain scheduling design*: Springer, 2007.
- [9] T. Ackermann, *Wind Power in Power Systems*: Wiley, 2005.
- [10] O. Katsuhiko, *Ingeniería de Control Moderna*, Pearson, Tercera Edición, pp.143-144.

7. Autores

Ramón Jaramillo Martínez. Graduado de Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica en 2013, en la Universidad Autónoma de Zacatecas. Actualmente es estudiante de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería, en la Universidad Autónoma de Zacatecas, con domicilio en la Avenida Ramón López Velarde 801, CP 98060 Zacatecas, Zacatecas, México. jaramillo.ramon@hotmail.com

Rafael Cabrera Ovalle. Graduado de Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica en 2012, en la Universidad Autónoma de Zacatecas. Actualmente es estudiante de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería, en la Universidad Autónoma de Zacatecas, con domicilio en la Avenida Ramón López Velarde 801, CP 98060 Zacatecas, Zacatecas, México. rcabrerao@live.com.mx

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