

# Control de orientación de un aerogenerador de baja potencia para regular el voltaje de salida

Benjayil Rodríguez-Solano<sup>A</sup>, Alfredo Reyna-Gómez<sup>A</sup>,  
Jesús Alberto Avilés-Álvarez<sup>B</sup>, Eduardo Campos-Mercado<sup>C</sup>,  
Octavio García-Salazar<sup>D</sup>

<sup>A</sup>Universidad del Istmo, Santo Domingo Tehuantepec, Oaxaca, México.

<sup>B</sup>Universidad Autónoma de la Ciudad de México, Plantel del Valle, México.

<sup>C</sup>CONACYT-Universidad del Istmo, Santo Domingo Tehuantepec, Oaxaca, México.

<sup>D</sup>Universidad Autónoma de Nuevo León, FIME-CIIA, Nuevo León, México.

## RESUMEN

*Se describen el modelo matemático, la estrategia de control y el algoritmo de operación para regular el voltaje de salida de un aerogenerador de eje horizontal. El modelo se obtiene utilizando el enfoque de Euler-Lagrange, considerando al aerogenerador como un robot manipulador con tres Grados De Libertad (GDL). La estrategia de control y el algoritmo de operación se basan en un controlador por modos deslizantes de primer orden y el cambio de orientación en función del voltaje producido, respectivamente. Se construyó un prototipo de baja potencia con sistema de orientación activo para su validación. El desempeño del sistema en lazo cerrado se muestra con los resultados experimentales obtenidos en el laboratorio de túnel de viento.*

## PALABRAS CLAVE

Modelo matemático, aerogenerador, sistema de orientación, control por modos deslizantes.

## ABSTRACT

*The mathematical model, the control strategy and the operation algorithm to regulate the output voltage produced by the horizontal axis wind turbine are described. The model is obtained by using the Euler-Lagrange approach considering the wind turbine as a manipulator robot with three degrees of freedom. The control strategy and operation algorithm are based on a first order sliding mode controller and the change of the orientation in function of the produce voltage by the electric generator, respectively. A low power prototype with an active yaw system for their validation was built. The performance of the closed-loop system is shown with the experimental results obtained in the wind tunnel laboratory.*

## KEYWORDS

Mathematical model, wind turbine, yaw system, sliding mode control.

## INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas la energía eólica se ha vuelto una fuente renovable de gran interés para mitigar los estragos que se han generado en el ambiente. Sin embargo, se tiene el inconveniente que la magnitud y la dirección del viento son variantes en el tiempo, como se explica en.<sup>1,2</sup> Para contrarrestar este inconveniente, los aerogeneradores cuentan con diversos mecanismos, entre los que destaca el sistema de orientación. En el caso de los aerogeneradores de alta potencia el sistema de orientación es activo, normalmente utilizado para alinear el eje del rotor eólico en la dirección predominante del viento, sin embargo, en los aerogeneradores de baja potencia el sistema de orientación es pasivo. La desventaja que tiene éste, radica en que el rotor eólico siempre permanece orientado en la dirección predominante del viento, en consecuencia, no es posible regular la potencia de salida del generador eléctrico ante diferentes magnitudes en la velocidad del viento<sup>3,4</sup>. Con base a lo anterior se propone implementar un sistema de orientación activo a un aerogenerador de baja potencia con la finalidad de lograr mayor captación de energía o en su defecto sacarlo de operación para evitar daños mecánicos o eléctricos.

Para conocer la dinámica acoplada entre el sistema de orientación y la potencia de salida, es necesario contar con una representación matemática que describa la relación entre el empuje aerodinámico y el área de barrido del rotor eólico manipulada por el sistema de orientación.

En,<sup>5</sup> se muestra el modelo matemático de un aerogenerador de eje horizontal donde se consideran efectos aerodinámicos, aeroelásticos y mecánicos; sin embargo, no se analiza la relación entre el sistema de orientación y la potencia producida por el aerogenerador. En consecuencia, se propone utilizar el enfoque de Euler-Lagrange para obtener el modelo matemático de un aerogenerador, considerándolo como un robot manipulador con tres GDL para relacionar la dinámica acoplada.

Una vez que se ha obtenido el modelo matemático se selecciona la estrategia de control según la tarea que se pretenda realizar, en algunos trabajos la estrategia de control está enfocada a la optimización de la energía captada<sup>6,7</sup>. En,<sup>8</sup> los autores se focalizan en el control del sistema de orientación sin considerar las dinámicas acopladas. Debido a la naturaleza del sistema se implementa una estrategia de control por modos deslizantes de primer orden, que resulta ser una alternativa para atacar el problema de sistemas no lineales. En otros trabajos se desarrolla el análisis de estabilidad de controladores por modos deslizantes aplicados a robots manipuladores<sup>9</sup>.

En la primera sección de este artículo se describen las ecuaciones que representan la dinámica del sistema y el algoritmo de control. En la segunda se detalla el prototipo con el sistema de orientación activo. Los resultados experimentales obtenidos se muestran en la tercera y finalmente, en la cuarta sección se presentan las conclusiones de este trabajo.

## MODELADO MATEMÁTICO Y CONTROL

Para obtener el modelo matemático del aerogenerador, se considerará a éste como un robot manipulador con tres GDL y se utiliza el enfoque de Euler-

Lagrange<sup>10</sup>. En la figura 1 se muestran los sistemas de coordenadas ubicados en las articulaciones del aerogenerador utilizando la convención de Denavit-Hartenberg (D-H) para describir los tres GDL del sistema. El movimiento de rotación sobre el eje  $z_0$ , representa el primer GDL ( $q_1(t)$ ) utilizado para manipular la orientación del aerogenerador. El segundo GDL ( $q_2(t)$ ) es la rotación de las palas sobre el eje  $z_1$ , este movimiento de rotación es provocado por el empuje aerodinámico<sup>11</sup>. El tercer GDL ( $q_3(t)$ ) es producido por el desbalanceo del rotor eólico, normalmente este GDL se manipula durante la instalación del aerogenerador en el proceso de acoplamiento entre el rotor eólico y el generador eléctrico.

Después de un análisis cinemático y dinámico del aerogenerador de eje horizontal, se obtiene la siguiente expresión:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = \tau \quad (1)$$

donde  $M(q) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  representa la matriz de inercia,  $C(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  la matriz de fuerzas centrífugas y de Coriolis;  $G(q) \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$  el vector de gravedad,  $\tau \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$  el vector de entradas de control y  $q = [q_1(t), q_2(t), q_3(t)]^T$  es el vector de coordenadas generalizadas.

Con la finalidad de simplificar el modelo matemático de la ecuación (1) se aceptan las siguientes consideraciones:

- 1.- Los centros de masa se encuentran en el origen de los sistemas de coordenadas fijados en las articulaciones del aerogenerador.
- 2.- El tercer Grado De Libertad se mantiene constante y en el origen durante todo el experimento, esto es  $q_3(t) = \dot{q}_3(t) = \ddot{q}_3(t) = 0$ .

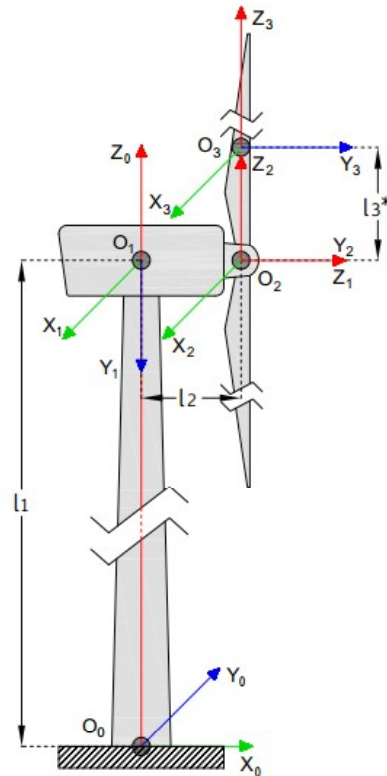


Fig. 1. Distribución de los sistemas de coordenadas en un aerogenerador de eje horizontal implementando la convención de D-H.

En consecuencia, se tiene:

$$\begin{aligned} & [m_3 l_2^2 + I_{yy1} + I_{xx2} S_2^2 - 2I_{xz2} C_2 S_2 + \\ & I_{zz2} C_2^2] \ddot{q}_1 - [I_{xy2} S_2 - I_{yz2} C_2] \ddot{q}_2 = \tau_1 \\ & [-I_{xy2} S_2 + I_{yz2} C_2] \ddot{q}_1 + [I_{yy2}] \ddot{q}_2 + [I_{xy2} C_2 S_2 - \\ & I_{xz2} (C_2^2 - S_2^2) - I_{zz2} C_2 S_2] \dot{q}_1^2 - [I_{xy2} C_2 + \\ & I_{yz2} S_2] \dot{q}_1 \dot{q}_2 = \tau_2 \\ & [-m_3 l_2 S_2] \ddot{q}_1 - [m_3 l_2 C_2] \dot{q}_1 \dot{q}_2 + m_3 g C_2 = \tau_3 \end{aligned}$$

Ahora, para manipular la orientación del aerogenerador se propone un controlador por modos deslizantes de la siguiente forma:

$$\tau_1 = K \text{sign}[e_1(t) + \alpha \dot{e}_1(t)] \quad (2)$$

donde  $K$  y  $\alpha$  representan las ganancias del controlador,  $e_1(t)$  es el error producido por la diferencia entre la orientación deseada ( $q_{1d}=\theta_d$ ) y la orientación actual ( $q_1(t)=\theta(t)$ ), esto es:

$$e_1(t) = \theta_d - \theta(t) \quad (3)$$

En la ecuación (1) se encuentra la representación matemática de los tres grados de libertad del aerogenerador, el primero de ellos corresponde al sistema de orientación, el cual estará manipulado por la estrategia de control descrita en la ecuación (2). En este caso se puede observar que el controlador por modos deslizantes no depende de las ecuaciones que describen la dinámica del sistema, sino que únicamente de la señal de error y de su derivada. Dadas las características del sistema descrito por la ecuación (1) y la robustez del controlador propuesto en la ecuación (2), se asume que el sistema en lazo cerrado es asintóticamente estable,<sup>9</sup> esto es  $e_1(t) \rightarrow 0$ .

Cabe recordar que el objetivo de manipular la orientación del aerogenerador es debido a la influencia que esta tiene sobre el empuje aerodinámico ( $\tau_2$ ), expresado por la siguiente ecuación:

$$\tau_2 = \frac{1}{2} \rho C_T v^2 A(\pi, r, \theta, t) \quad (4)$$

con

$$A(\pi, r, \theta, t) = \pi r^2 \sin \theta(t) \quad (5)$$

donde  $\rho$  representa la densidad del aire,  $C_T$  es el coeficiente de empuje aerodinámico,  $v$  la velocidad del viento y  $A$  el área de barrido del rotor eólico.

Observe que esta última puede variar de 0 a  $\pi r^2$  conforme  $\theta(t)$  varía de 0 a 90 grados, en consecuencia se tiene que el ángulo de orientación estará restringido entre 0 y 90 grados. De lo anterior se puede concluir que si controlamos la orientación del aerogenerador podremos manipular el empuje aerodinámico y en consecuencia el voltaje producido por el generador eléctrico, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$V_{salida} = \beta \tau_2 \quad (6)$$

donde  $\beta$  representa el coeficiente de interacción entre el rotor eólico, la máquina eléctrica y el puente rectificador. Por cuestiones prácticas se asume que este valor es constante, sin embargo, se requiere de un análisis más elaborado para representar de forma precisa la relación que se describe en la ecuación anterior. Finalmente, para controlar el voltaje de salida se define el error  $e_2(t)$  como la diferencia entre el voltaje de referencia ( $V_{referencia}$ ) y el voltaje de salida ( $V_{salida}$ ) del aerogenerador, esto es:

$$e_2(t) = V_{referencia} - V_{salida}(t) \quad (7)$$

el cual es implementado en el algoritmo de operación descrito en la sección de resultados.

### PLATAFORMA EXPERIMENTAL

Con la finalidad de validar las ecuaciones que describen la dinámica del sistema en lazo cerrado, se desarrolló un prototipo de baja potencia para manipular el voltaje de salida con base a la orientación del rotor eólico. El prototipo consta de las partes descritas en la figura 2.

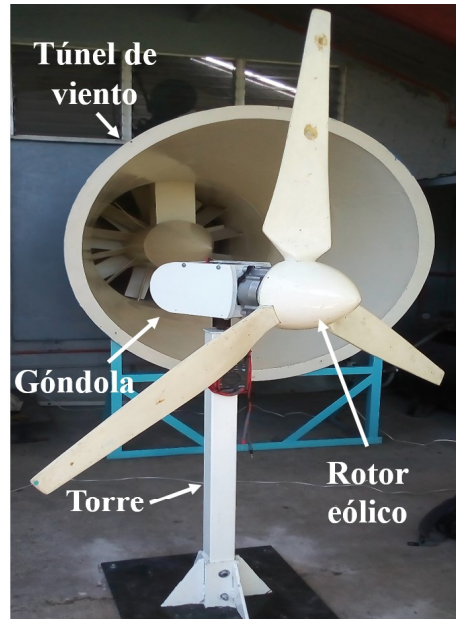


Fig. 2. Aerogenerador prototipo de 1.6 kW.

El rotor eólico mide 1.8 m de diámetro, está fabricado con fibra de vidrio y diseñado para operar a barlovento con una velocidad mínima de viento de 4.5 m/s. Dentro de la góndola se encuentran instalados el generador síncrono de imanes permanentes de 1.6 kW de potencia, un puente rectificador, el sistema embebido y mecánico para manipular la orientación del rotor eólico, y en consecuencia controlar el voltaje producido por el aerogenerador (figura 3).

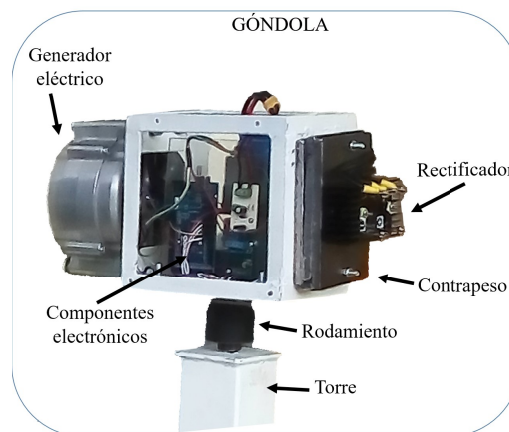


Fig. 3. Componentes instalados dentro de la góndola.

El sistema embebido y mecánico se muestran en la figura 4a y 4b, respectivamente, el sistema embebido está formado por una tarjeta arduino Mega2560, un regulador de 5 volts, un driver VNH5019, una batería Lipo de 14.6 V, un moto-reductor 37D de C.D. 131:1 y un encoder con una resolución de 2096 pulsos por revolución. El sistema mecánico está formado por un cople de acero de 0.0127 m (1/2 in), placa de acero al carbono de 0.00476 m (3/16 in) de espesor y dos rodamientos 6203 2RS1/2 C3.

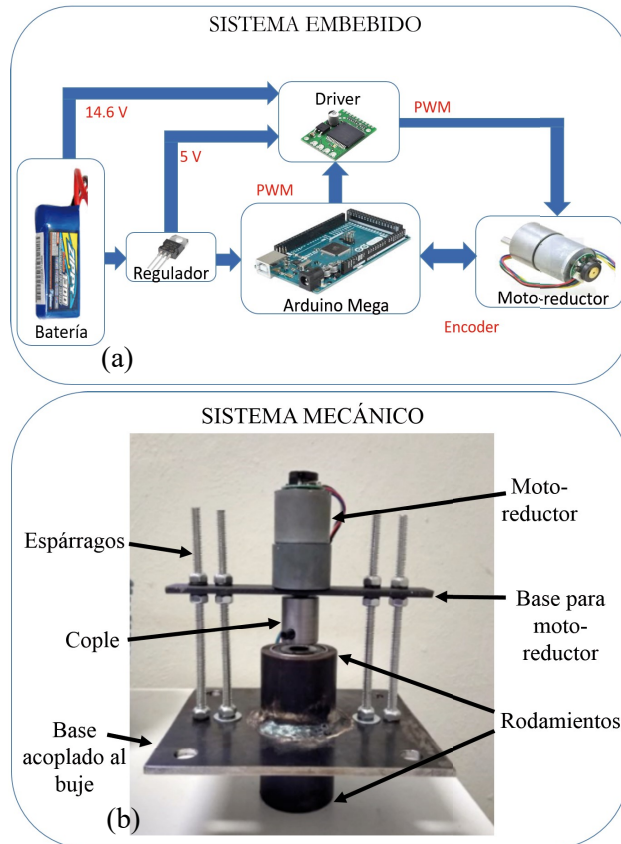


Fig. 4. Sistema para manipular la orientación del aerogenerador.

En la tarjeta Arduino Mega2560 se implementó la estrategia de control para regular el voltaje producido por el aerogenerador con una velocidad de viento de 5.5 m/s y con un período de muestreo de 0.001 segundos. La primera etapa del algoritmo de control es adquirir la medición del voltaje obtenido por el rectificador, utilizando un divisor de voltaje con dos resistencias de 330 y 560 k $\Omega$ , para posteriormente modificar o mantener la orientación del rotor eólico respecto a la dirección del viento. La orientación del rotor eólico se obtiene con la lectura de los pulsos producidos por el encoder incorporado al moto-reductor. Este último, se manipula enviando una señal PWM (Pulse Width Modulation, por sus siglas en inglés) al driver VNH5019 con la finalidad de producir el torque que se requiere para rotar la góndola y lograr alcanzar el voltaje de referencia de 5 volts.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los experimentos se realizaron en el laboratorio del túnel de viento del Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL), para mantener constante

la velocidad del viento durante las pruebas del sistema en lazo cerrado. Antes de iniciar con las pruebas se realizó la caracterización de la dirección del viento respecto a la orientación y ubicación del aerogenerador en el sitio. Con lo anterior se determinó que la dirección del viento está a 90 grados de la orientación que se eligió como punto de referencia para iniciar las pruebas. La sintonización de las ganancias del control se obtiene de manera experimental con base al desempeño del sistema en lazo cerrado.

En las figuras 5, 6 y 7 se muestran los resultados obtenidos del primer experimento, el cual consistió en mantener la orientación del aerogenerador a 90 grados, es decir, el plano del rotor tendría que permanecer perpendicular a la dirección del viento, con el objetivo de obtener el voltaje nominal de salida del aerogenerador, ante una velocidad promedio de viento de 5.5 m/s, durante todo el experimento.

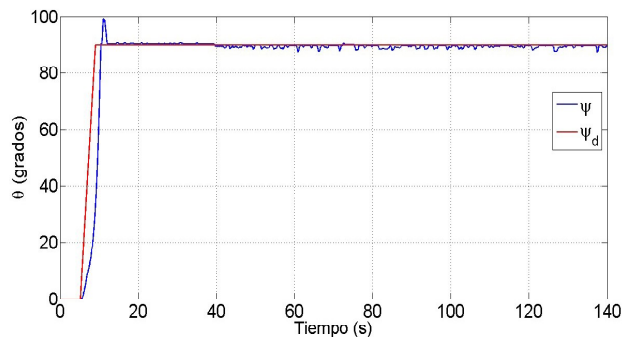


Fig. 5. La línea de color azul representa la orientación del aerogenerador. La línea de color rojo representa la dirección predominante del viento.

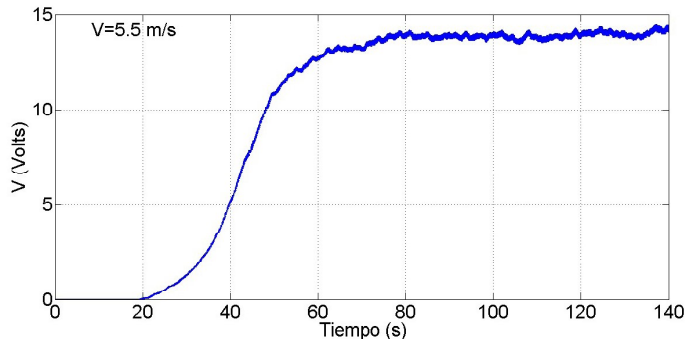


Fig. 6. Curva del voltaje producido por el aerogenerador sometido a una velocidad promedio del viento de 5.5 m/s.

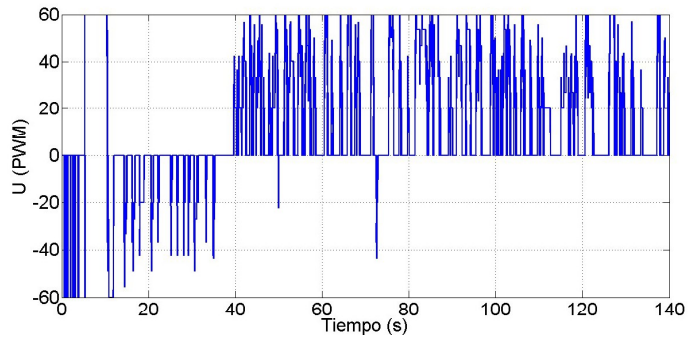


Fig. 7. Señal de control PWM generada para regular a 90 grados la orientación del aerogenerador.

En la segunda prueba se tiene como objetivo la regulación del voltaje de salida del aerogenerador. Para lograr esta tarea es necesario variar la orientación del aerogenerador, por lo cual se propone el siguiente algoritmo de operación:

- 1.- Variar el ángulo deseado ( $\theta_d$ ) en función del error ( $e_2(t)$ ) producido entre el voltaje de referencia ( $V_{referencia}$ ) y el voltaje de salida ( $V_{salida}$ ) del aerogenerador, esto es:

$$e_2(t) = V_{referencia} - V_{salida}(t) \quad (8)$$

- 2.- Con base a la ecuación anterior se propone que el ángulo deseado ( $\theta_d$ ) esté definido por la siguiente expresión:

$$\theta_d(k) = \theta_d(k-1) + \mu_1 e_2(t) \quad (9)$$

donde  $\mu_1=0.0005$ , representa la tasa de cambio del ángulo de orientación.

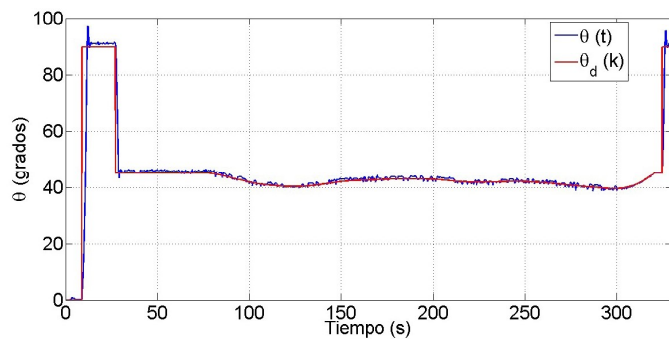


Fig. 8. Orientación del aerogenerador y ángulo de orientación deseado,  $\theta_d(k)$ , descrito por la ecuación (9).

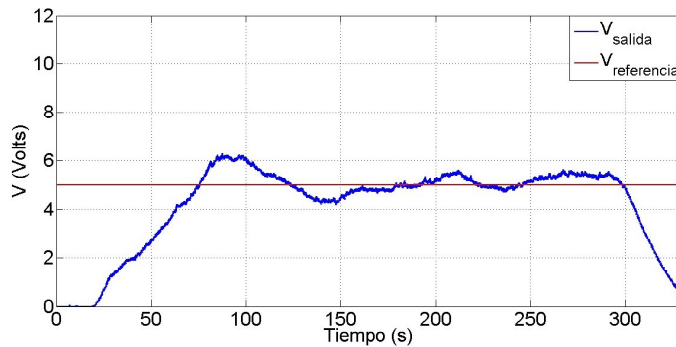


Fig. 9. Voltaje de salida del aerogenerador contra el voltaje de referencia.

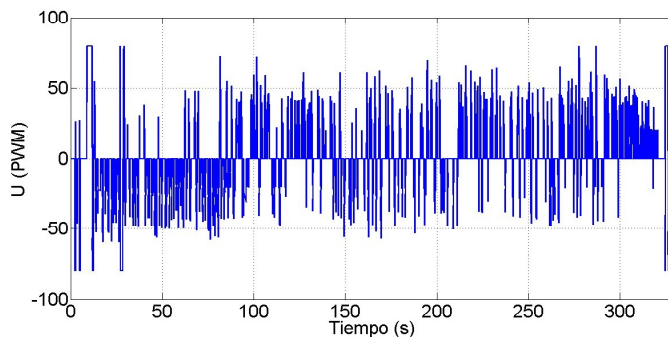


Fig. 10. Señal de control PWM generada para regular la orientación del aerogenerador.



3.- Dado que la mayor captación de energía se obtiene orientando el aerogenerador a 90 grados, se propone que  $\theta_d(k)$  este acotado entre 0 y 90 grados.

En las figuras 8, 9 y 10 se muestran los resultados obtenidos de la segunda prueba, con una velocidad promedio de viento de 5.5 m/s,  $\theta_d(0)=0$  y  $V_{referencia}=5$  volts.

## CONCLUSIÓN

El modelo matemático permite garantizar la estabilidad del sistema de orientación con la estrategia de control implementada. El controlador mostró robustez, ante incertidumbre en los parámetros del sistema, para alcanzar el ángulo de orientación calculado por el algoritmo de operación. Los resultados experimentales obtenidos muestran que la propuesta del sistema de orientación activo para regular el voltaje de salida del aerogenerador aquí presentada es válida.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó con el apoyo del Proyecto P20 del CEMIE-Eólico provenientes del Fondo SENER-CONACYT-Sustentabilidad Energética. Las pruebas experimentales se realizaron en el laboratorio del túnel de viento del Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL).

Este artículo fue presentado en el Simposio Iberoamericano Multidisciplinario de Ciencias e Ingenierías 2018, organizado por la Universidad Politécnica de Pachuca.

## REFERENCIAS

1. Hau, E. (2006). Wind turbines, fundamentals, technologies, application, economics. Segunda edición. Springer-Verlag. Berlín.
2. Zhi Wu, Hengsheng Wang. (2012). "Research on Active Yaw Mechanism of Small Wind Turbines". Energy Procedia, Vol. 16, pp. 53-57.
3. Farret F. A., Pfitscher L. L., Bernardon D. P. (2002). "Sensorless Active Yaw Control for Wind Turbines". Industrial Electronics Society. pp 1370-1375.
4. Ayanesh Y. Joshi, Sankalp G. Soni. (2015). "Design of Active Yaw Control Mechanism for Small Horizontal Axis Wind Turbines". Int. Journal of Research and Scientific Innovation, Vol. 2, pp. 47-49.
5. Ekelund, T. (2000). "Yaw control for reduction of structural dynamic loads in wind turbines". Journal of Wind Engineering. Vol. 85. pp. 241-262.
6. Wael Farag, H. El-Hosary, K. El-Metwally, A. Kamel, (2016) "Design and implementation of a variable-structure adaptive fuzzy-logic yaw controller for large wind turbines", Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, Vol. 30, pp. 2773–2785.
7. H. M. Hassan, W. A. Farag, Abdel Latif ElShafei, and M. S. Saad (2011). "Design of Multi-Objective Robust Pitch Control for Large Wind Turbines", World Congress on Sustainable Technologies, pp 95, London, UK.
8. Wael Farag, H. El-Hosary, K. El-Metwally, A. Kamel, (2017). "A Comparative Study and Analysis of Different Yaw Control strategies for Large Wind Turbines". ACCS 2017, pp. 132-139.

9. Jinkun Liu, Xinhua Wang. (2011). "Sliding Mode Control for Robot. In: Advanced Sliding Mode Control for Mechanical Systems". Springer, Berlin, Heidelberg.
10. Spong, M. W., Hutchinson S., Vidyasagar M., (2004). Robot Modeling and Control. Primera edición. John Wiley & Sons.
11. Manwell, J.F., McGowan, J.G., Rogers, A.L. (2009). Wind energy explained: Theory, Design and Application. Segunda edición. John Wiley & Sons. Reino Unido.

