

Recibido 27 Septiembre 2018, aceptado 4 Diciembre 2018, fecha de publicación 16 Diciembre 2018

ISSN 2448-7775

Aplicación de adquisición de datos de operación de aerogenerador de paso variable

FRANCISCO MEDINA VELARDE¹, NÉSTOR D. GALÁN H.¹

¹Maestría en Ciencias Aplicadas a Ingeniería en Energía.
Universidad Politécnica de Sinaloa (UPSIN), Mazatlán, Sinaloa, México.
fmedina@upsin.edu.mx
ngalan@upsin.edu.mx

RESUMEN En el siguiente artículo se presentan los resultados del desarrollo de una aplicación creada en el GUIDE de Matlab, la cual adquiere y calcula datos relevantes de la operación de un aerogenerador en específico, y los despliega en una pantalla principal mediante gráficas variantes en el tiempo, tablas y cuadros de texto.

PALABRAS CLAVE Aplicación aerogenerador, aerogenerador paso variable, potencia aerogenerador, adquisición de datos aerogenerador.

I. INTRODUCCIÓN

En el campo de la operación de los aerogeneradores es con frecuencia necesario el uso de sistemas automatizados de adquisición de datos del recurso eólico para poder hacer estimaciones precisas que lleven a una mejor selección de sitios y modelos de aerogeneradores para la captación de energía. En la sección de metodología se presentan los modelos matemáticos usados para la estimación de parámetros de operación del aerogenerador, así como las distintas etapas que se observan en el proceso de captura de un aerogenerador. El desarrollo explica el flujo de datos, es decir, una descripción de la secuencia de pasos desde que se capta mediante un sensor un dato, hasta que se estima la potencia capturada por el sistema.

II. METODOLOGÍA

A. ESTIMACIÓN DE LA POTENCIA CAPTURADA POR EL SISTEMA EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO Y ÁNGULO DE PASO

Para un instante de tiempo la potencia capturada por una turbina eólica (1) está determinada por la potencia del viento P_w y por el coeficiente de potencia $C_p(\lambda, \theta)$ propio de cada turbina [1], [2], [3].

$$P_t = P_w C_p(\lambda, \theta) \quad (1)$$

La potencia del viento (2) a su vez está influida por la densidad del aire ρ , el área de captación A_t y la velocidad del viento v_w .

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A_t v_w^3 \quad (2)$$

El coeficiente de potencia (3) depende de 6 coeficientes propios del modelo no lineal de la turbina C_1-C_7 , de la velocidad específica λ y del ángulo de paso θ [4].

$$C_p(\lambda, \theta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\beta} - C_3 \theta - C_4 \theta^{C_5} - C_6 \right) e^{-\frac{C_7}{\beta}} \quad (3)$$

donde

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \theta} - \frac{0.035}{1 + \theta^3} \quad (4)$$

En la estimación de la velocidad específica (5) intervienen los valores de la velocidad del rotor del lado de la turbina ω_{rt} , el radio de captación R_t y la velocidad del viento v_w .

$$\lambda = \frac{\omega_{rt} R_t}{v_w} \quad (5)$$

La velocidad del rotor del lado de la turbina se estima mediante la expresión no lineal (6) [5]. Dicha expresión proviene de igualar el par aerodinámico con el par electromagnético en valores por unidad, y su solución requiere de métodos numéricos computacionales [6]. Se observa que en la expresión aparecen términos propios de la parte aerodinámica como de la parte eléctrica; potencia aparente base S_b , resistencia del estator R_s , resistencia del rotor R_r , reactancia del estator X_s , reactancia del rotor X_r , reactancia de magnetización X_M y voltaje en el estator V_{DQ} .

$$\frac{\rho A_t V_w^3}{2 S_b \bar{\omega}_{rt}} C_p(\lambda, \theta) - T_e = 0 \quad (6)$$

donde

$$T_e = \frac{\tau X_{sp} \bar{V}_{DQ}^2 (\bar{\omega}_{rt} - 1)}{(\tau (\bar{\omega}_{rt} - 1) \bar{R}_s - \bar{X}_s)^2 + (\bar{R}_s + \tau (\bar{\omega}_{rt} - 1) X')^2} \quad (7)$$

$$\tau = \frac{\bar{X}_r}{\bar{R}_r} \quad (8)$$

$$X_{sp} = \bar{X}_s - X' \quad (9)$$

$$X' = \bar{X}_s - \frac{\bar{X}_M}{\bar{X}_r} \quad (10)$$

B. ETAPAS DE OPERACIÓN DE UN AEROGENERADOR

En función de la potencia desarrollada en la turbina, se pueden observar 4 etapas, Fig. 1, en el proceso de captura, cada una asociada a un rango de velocidades del viento [1].

La Etapa I o de carga menor a la de corte de entrada, comprende las velocidades entre 0 y 3.5 m/s y el viento no tiene la suficiente energía cinética para poder capturar energía de él. La acción requerida es la desconexión del generador de la red.

La Etapa II o de carga parcial, está comprendida entre las velocidades entre 4 y 12 m/s y el viento tiene la suficiente energía cinética para la producción, mas no la suficiente para llegar a la potencia nominal del generador. La acción requerida es orientar las palas en el ángulo de mayor captación.

La Etapa III o de carga completa, está comprendida entre las velocidades entre 12 y 20 m/s. En este rango la potencia del viento supera la capacidad nominal del generador, por lo tanto la acción requerida es orientar el ángulo de paso a un ángulo tal, que la potencia capturada sea la nominal, a pesar de los embates del viento, para ello será necesario resolver ecuaciones para determinar el ángulo en función de la velocidad del viento.

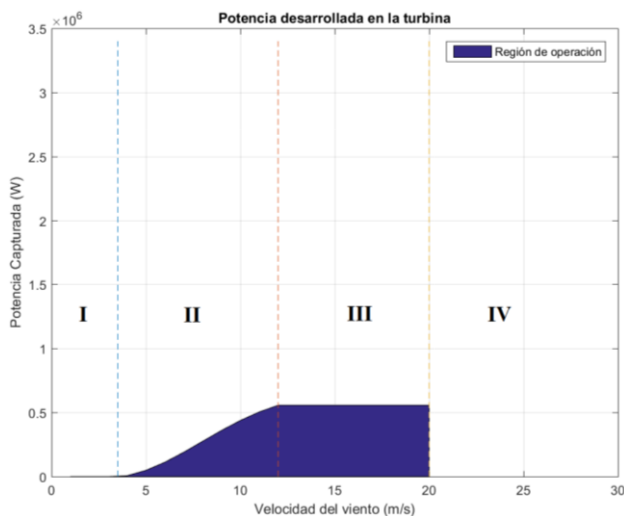


Fig. 1. Etapas de captura de energía de un aerogenerador.

La Etapa IV o de sobrecarga está comprendida por todas las velocidades superiores a 20 m/s. En estas velocidades no es segura la operación del aerogenerador y la acción requerida es la desconexión y freno del sistema.

III. DESARROLLO Y RESULTADOS

La Tabla I, muestra las variables que la aplicación monitorea, así como la forma en la que se obtienen sus valores ya sea por sensores o por la estimación mediante ecuaciones.

La Fig. 2 muestra el flujo de datos en los diferentes dispositivos en la aplicación de adquisición de datos. Es de notarse que los sensores requeridos fueron el BMP180 que adquiere temperatura y presión, así como un anemómetro de cazoleta para la velocidad del viento.

El controlador Arduino Mega 2560 adquiere los datos de los sensores y hace un acondicionamiento de señal que es enviado en serie por medio del puerto USB a una computadora con el IDE de Matlab.

Matlab recibe los datos, y en un algoritmo define la etapa de captura de potencia del sistema y actúa en consecuencia, resolviendo las ecuaciones necesarias para obtener las estimaciones para desplegarlas en pantalla y a su vez enviando la señal a un servomotor, que simula la posición del sistema de posicionamiento del ángulo de paso.

TABLA I. VARIABLES EN PANTALLA DE LA APLICACIÓN.

Variable	Forma de obtención	Descripción de la obtención
Velocidad del viento	Sensor	Anemómetro de cazoleta conectado a arduino y al PC.
Densidad del viento	Estimación	Se usa la ecuación de los gases ideales y se resuelve en Matlab [7].
Temperatura	Sensor	BMP180 conectado a arduino y al PC.
Presión atmosférica	Sensor	BMP180 conectado a arduino y al PC.
Ángulo de paso	Estimación	Solución a una ecuación no lineal mediante método numérico en Matlab dependiendo del modo de operación del aerogenerador.
Velocidad de la turbina	Estimación	Solución a una ecuación no lineal mediante método numérico en Matlab [7].
Coefficiente de potencia	Estimación	Solución a una ecuación no lineal mediante método numérico en Matlab [7].
Par	Estimación	Solución en Matlab.
Velocidad específica	Estimación	Solución en Matlab.
Potencia eólica	Estimación	Solución en Matlab.
Potencia capturada	Estimación	Solución en Matlab.
Frecuencia de muestreo	Estimación	Cronometrado en Matlab.
Periodo de muestreo	Estimación	Cronometrado en Matlab.

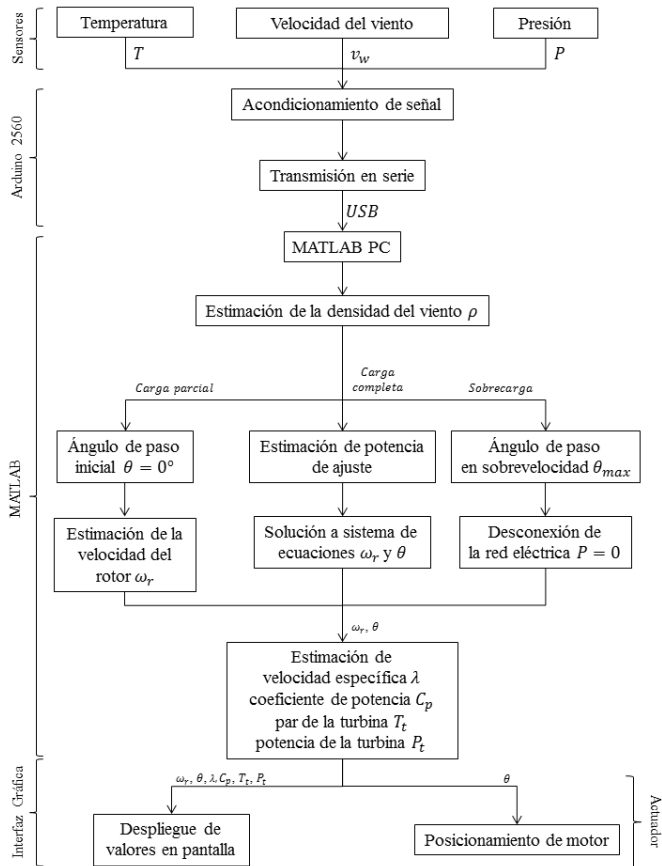


Fig. 2. Flujo de datos de la aplicación.

La Fig. 3 muestra una captura de la pantalla principal de la aplicación, observándose 3 componentes principales.

- Gráficas variables en el tiempo para un intervalo de 20 s de las variables:
 - Velocidad del viento (m/s).
 - Velocidad de la turbina (rpm).
 - Ángulo de paso (°).
 - Potencia capturada.
- Cuadros de textos para las variables de la Tabla I.
- Tabla alimentada en tiempo real de las variables de la Tabla I y la fecha de la toma de la medición.

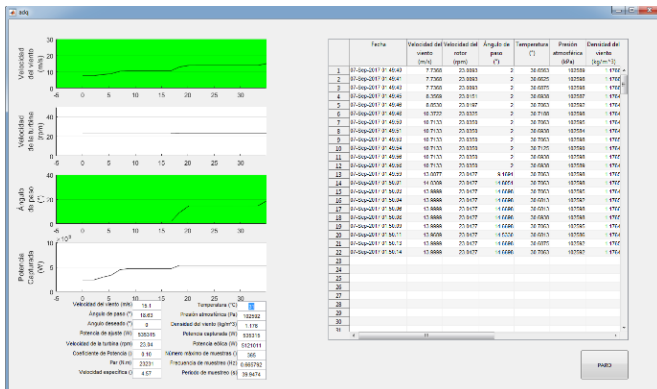


Fig. 3. Interfaz Gráfica de Aplicación.

IV. CONCLUSIONES

Se desarrolla una aplicación que, partiendo de un modelo matemático de una turbina en específico, estima valores de potencia capturada en base a variables del entorno adquiridas mediante sensores, cuyas señales son acondicionadas mediante microcontroladores y desplegadas en una computadora para su monitoreo y estudio posterior.

La aplicación considera para la estimación de los datos, un control de ángulo de paso activo, con una frecuencia de muestreo que tiene la cualidad de mantenerse fija siempre que el equipo de cómputo donde opere lo permita, habitualmente en un valor de 10 segundos.

A. TRABAJOS FUTUROS

- Incluir más de un modelo matemático de turbina.
- Selección de variables a graficar en tiempo real.
- Mejoras a la usabilidad de la aplicación con inclusión de pestañas o ventanas emergentes.
- Incluir controles de usuario para la frecuencia de muestreo.
- Animaciones gráficas de posición del ángulo de paso.

REFERENCIAS

- [1] Zbigniew Lubosny, *Wind Turbine Operation in Electric Power Systems Advanced Modeling*.: Springer, 2003.
- [2] Erich Hau, *Wind Turbines. Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, 2nd ed. Krailling, Alemania: Springer, 2006.
- [3] José Antonio Carta González, Roque Calero Pérez, Antonio Colmenar Santos, y Manuel Alonso Castro Gil, "Centrales de energía eólica," en *Centrales de energías renovables - Generación eléctrica con energías renovables*. Madrid, España: Pearson Educación, 2009, pp. 333-473.
- [4] P O Ochieng, A W Manyonge, and A O Oduor, "Mathematical Analysis of Tip Speed Ratio of a Wind Turbine and its Effects on Power Coefficient," *International Journal of Mathematics and Soft Computing*, vol. 4, no. 1, pp. 61-66, 2014.
- [5] Néstor Daniel Galán Hernández, *Análisis de Parques Eólicos con Generadores de Jaula de Ardilla y Regulación de Voltaje con StatCom*. Guadalajara, México: CINVESTAV, 2014.
- [6] Francisco Medina Velarde y Néstor Daniel Galán Hernández, "Implementación de Controlador en Aerodinámica de Generador Eólico de Paso Variable," MCA Energía, Universidad Politécnica de Sinaloa, Mazatlán, Tesis de Maestría 2018.
- [7] IUPAC, *Compendium of Chemical Terminology 2nd ed. (the "Gold Book")*. Compiled by A. D. McNaught and A. Wilkinson.. Oxford : Blackwell Scientific Publications., 1997.
- [8] Todd Young and Martin J Mohlenkamp, *Introduction to Numerical Methods and MATLAB Programming for Engineers*. Athens, USA, 2015.
- [9] Bosch. (2013, Abril) BMP180 Datasheet - Bosch. [Online]. http://www.datasheetlib.com/datasheet/1177342/bmp180_bosch.html
- [10] Alternative Energy Tutorials. (2017) Induction Generator as a Wind Power Generator. [Online]. <http://www.alternative-energy-tutorials.com/wind-energy/induction-generator.html>
- [11] Mathworks. (2015) MATLAB Support Package for Arduino Hardware. [Online]. <https://www.mathworks.com/help/supportpkg/arduino/index.html>
- [12] Mouna Ben Smida and Anis Sakly, "Different Conventional Strategies of Pitch Angle Control for Variable Wind Turbines," in *15th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control & Computer Engineering*, Hammamet, Tunisia, 2014.
- [13] Paul C Krause, Oleg Wasynczuk, and Scott D Sudhoff, *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*. New York: IEEE Press, 2002.