

Seguimiento del Punto de Máxima Potencia de un Sistema Eólico Libre de Sensores Mecánicos

D.R. López–Flores J.L. Durán–Gómez

Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Chihuahua
División de Estudios de Posgrado e Investigación
Ave. Tecnológico #2909, Col. 10 de Mayo
Chihuahua, Chih., México, CP. 31310
Tel.: (614) 201–2000 Exts. 2112 y 2114
dlopez@ieee.org jlduran@ieee.org

RESUMEN

En este artículo se presenta el análisis, diseño y simulación de un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (SPMP) para un sistema eólico (SE). El SE consiste de una turbina eólica (TE) de eje horizontal acoplado a un generador síncrono de imanes permanentes (GSIM) con puente de diodos trifásico (PDT) y un convertidor elevador *dc-dc* como acoplamiento de impedancia entre el PDT y un banco de baterías de iones de litio (Li-ion) como almacenamiento de energía. El algoritmo de SPMP es diseñado con base al modo de conducción discontinua (MCD) del PDT, como resultado de esto, el algoritmo de SPMP para el SE opera libre de sensores mecánicos y mantiene una variación máxima de la eficiencia aerodinámica de la TE del -3.22% respecto a su valor máximo (0.350756). Los resultados se presentan con base a la simulación conocida como procesador en el bucle, utilizando la tarjeta de control F28M35xx.

Palabras Clave: Energía eólica, diseño, análisis, algoritmo, seguimiento del punto máximo de potencia, simulación, procesador en el bucle.

ABSTRACT

In this paper is presented the analysis, design and simulation of a maximum power point tracker (MPPT) algorithm applied to an eolic system (ES), which consists of a horizontal axis wind turbine (WT) coupled to permanent magnet synchronous generator (PMSG), a three-phase diode bridge (TPDB) and a *dc-dc* boost converter used as an impedance coupling between the TPDB and a lithium-ion (Li-ion) battery bank used to store the electrical energy. The MPPT algorithm is designed based on the discontinuous conduction mode (DCM) of the PDT. As a result, the MPPT algorithm for SE does not require any mechanical sensor and keeps -3.22% as the maximum deviation of the aerodynamic efficiency of the WT, respect to its maximum value (0.350756). The results are presented in a PIL (processor in the loop) simulation using the F28M35XX control card.

Keywords: Wind energy, design, analysis, algorithm, maximum power point tracker, simulation, processor in the loop.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático, es uno de los problemas a nivel mundial que amenazan con la supervivencia de los seres vivos en el planeta tierra. Los métodos convencionales (carbón, gas y

petróleo) para producir energía eléctrica magnifican más este problema día con día. Acciones coordinadas entre gobernantes, ciudadanos y científicos deben ser establecidas para ofrecer alternativas que ayuden a mitigar este problema, de lo contrario la vida como se conoce podría cambiar drásticamente. De acuerdo con los expertos, la energía eólica es una poderosa alternativa para responder al cambio climático en lugar de métodos convencionales para generar electricidad [1]. Sin embargo, lograr un proceso eficiente de conversión de energía eólica a electricidad sigue siendo un reto difícil para los investigadores, debido a que el viento es de naturaleza estocástica [2]. Considerando la eficiencia, peso y dimensiones los investigadores han analizado y desarrollado diferentes configuraciones de TE acopladas a sistemas de potencia con algoritmos SPMP, los cuales buscan extraer la máxima eficiencia aerodinámica de la TE y transformarla en potencia eléctrica para ser almacenada y/o transferida a la red eléctrica [3], [4]. Existen tres técnicas principales de algoritmos SPMP, la primera es conocida como control de velocidad específica, λ , y consiste en regular la velocidad angular Ω_m en el rotor de la TE hasta alcanzar su máxima eficiencia aerodinámica [5]. La segunda es conocida como el control de realimentación de la señal de potencia y consiste en alcanzar el SPMP de la turbina eólica mediante el conocimiento previo de su curva de potencia [6]. La tercera técnica es conocida como el control por perturbación y observación, la cual consiste en introducir una perturbación arbitrariamente pequeña para generar cambios de potencia en la TE y la siguiente perturbación se determina según el estado de potencia anterior de la TE, las perturbaciones continúan a menos que se logra el punto de máxima potencia [7]. Con base en la primera técnica, en este trabajo, se presenta el análisis, diseño y simulación de un algoritmo SPMP para un sistema eólico que consta de una TE de eje horizontal acoplada a un GSIM, un puente de diodos trifásico y un convertidor elevador *dc-dc* como acoplamiento de impedancia entre el PDT y un banco de baterías de Li-ion (Ver Fig. 1).

De acuerdo con la Fig. 1, el modelo matemático estático y dinámico de la turbina eólica, además del GSIM, fueron desarrollados con base en la eficiencia aerodinámica [8], el modelo de una masa [9] y el marco de referencia síncrono *dq*

[10], respectivamente. El modelo matemático del convertidor elevador *dc-dc* fue desarrollado mediante la técnica de promediados de estados [11] y su interfaz de control digital proporcional integral derivativa (PID) de tensión/corriente fue diseñada considerando al menos dos veces más rápido el lazo de control de corriente que el lazo de control de tensión, ambos con márgenes de fase aceptables (30° – 90°) [12]. El controlador PID digital, tiene la función de dar el seguimiento al punto de máxima potencia de la TE con base en la tensión óptima, v_r^* , determinada por el algoritmo SPMP, la cual corresponde a la máxima eficiencia aerodinámica de la turbina eólica. De [13] fue tomado el modelo matemático la batería de Li-on. Para evaluar el desempeño del algoritmo SPMP y el controlador PID digital bajo condiciones aproximadas a la realidad, fueron desarrollados filtros *Kalman* con base en [14] para eliminar señales de ruido aleatorio (SRA) montadas en la tensión v_r y la corriente, i_r , de salida del puente de diodos trifásico.

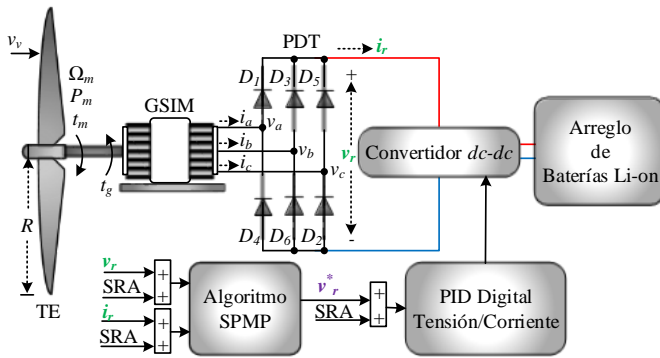


Fig. 1 Esquema a bloques del algoritmo SPMP para el sistema eólico.

En las siguientes secciones será presentado con detalle el diseño y análisis del algoritmo SPMP, además de los resultados por simulación utilizando la técnica de procesador en el bucle y conclusiones.

2. ALGORITMO DE SEGUIMIENTO, SPMP

Considerando una TE pequeña en el esquema de la Fig. 1, su eficiencia aerodinámica puede ser expresada por un polinomio de orden n en función de λ , el cual es conocido como coeficiente de potencia C_p . El C_p relaciona la potencia mecánica P_m liberada por el rotor de la turbina eólica y la potencia eólica P_v disponible por el viento:

$$C_p(\lambda) = \frac{P_m}{P_v} = c_1\lambda^7 + c_2\lambda^6 + \dots + c_7\lambda + c_8 \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{\Omega_m R}{v_v} \quad (2)$$

donde Ω_m representa a la velocidad angular, R representa el radio de la TE y v_v la velocidad del viento. El coeficiente de potencia, C_p , puede ser tomado como se propone en [15], o bien, puede ser

diseñado utilizando datos experimentales y/o la hoja de datos del fabricante de la turbina eólica con la finalidad de optimizar el modelo matemático. En este trabajo, el coeficiente de potencia, C_p , fue diseñado con base a datos experimentales extraídos del módulo de entrenamiento de energía eólica de la empresa FESTO. De acuerdo con [8] la potencia mecánica, P_m , puede ser estimada con la relación:

$$P_m = C_p(\lambda) P_v = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 v_v^3 \quad (3)$$

donde ρ representa la densidad del aire. Evaluando (1) con un dominio de $\lambda = [0 \ 14]$, se obtiene que el máximo coeficiente de potencia, C_{pmax} , corresponde a un valor de 0.350756 para una velocidad específica óptima de $\lambda^* = 6.015$. Cuando esta condición ocurre para cualquier velocidad de viento, v_v , entonces habrá una tensión de salida del PDT óptima, v_r^* , que corresponda al punto de máxima potencia de la TE para cualquier velocidad de viento, v_v . Partiendo de este hecho y conociendo el comportamiento del GSIM acoplado al puente de diodos trifásico, es posible relacionar a la tensión óptima, v_r^* , con base en la potencia mecánica, P_m , y la potencia eléctrica, P_r , del PDT en función del máximo coeficiente de potencia, C_{pmax} . Además, de obtener una expresión para estimar a la velocidad angular mecánica Ω_m en función de la tensión (v_r) y corriente (i_r) de salida del PDT, cuando la turbina eólica está operando cerca de máximo coeficiente de potencia, C_{pmax} .

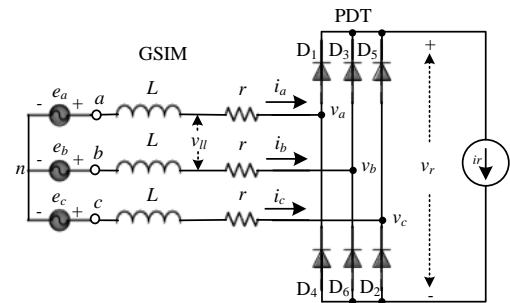


Fig. 2 Modelo equivalente del generador síncrono de imanes permanentes acoplado al PDT.

De acuerdo con [16] y considerando un radio de $R = 0.575 \text{ m}$ en la TE, el puente de diodos trifásico acoplado al GSIM estará operando en MCD para un dominio de velocidad de viento de $v_v = [3 \text{ m/s } 15 \text{ m/s}]$. Este dominio corresponde a la región de SPMP, por debajo de este dominio la turbina eólica está fuera de operación y por arriba del dominio la TE debe operar en potencia constante o disminuir aerodinámicamente su potencia liberada para evitar daños irreversibles en el sistema eólico. De acuerdo con [11], el modo discontinuo de conducción puede ser analizado con base a un PDT acoplado a una fuente trifásica operando como GSIM y considerando la corriente de salida del puente de diodos trifásico, i_r , constante. Esto se puede apreciar en la Fig. 2, donde e_a , e_b y e_c representan las tensiones de fase inducidas por la rotación del eje de la turbina eólica, L y r representan las inductancias y resistencias de fase,

respectivamente. Considerando el MCD en Fig. 2, las típicas formas de onda de tensión (v_r) y corriente (i_r) de salida del puente de diodos trifásico, las tensiones (v_a, v_b, v_c) y corrientes (i_a, i_b, i_c) de fase del GSIM se muestran en la Fig. 3. El proceso que se manifiesta bajo el modo de conducción MCD es el siguiente: existe un intervalo de tiempo de $t = 0$ a t_u donde la fase a y c se encuentran en corto circuito a través de los diodos D_1 y D_5 debido a su estado activo bajo este intervalo. Como resultado, una caída de tensión Δv_r se presenta cada $\pi/3$ en un período de la tensión de salida del PDT, v_r . Para los siguientes intervalos en que se presenta la caída de tensión, Δv_r , el proceso se repite, cambiando el par de fases que estarán en corto, por ejemplo, para el siguiente intervalo $\pi/3$ las fases en corto son b y c (Ver Fig. 3).

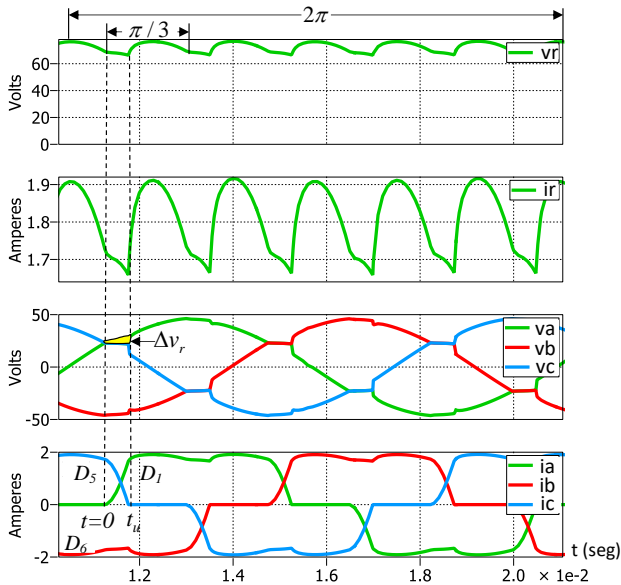


Fig. 3 Típicas forma de onda en MCD del generador síncrono de imanes permanentes acoplado al PDT.

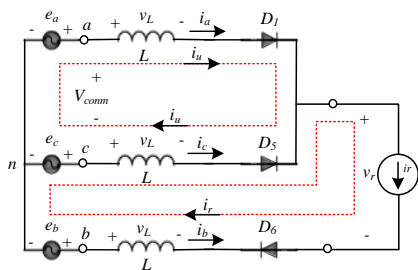


Fig. 4 Subcircuito derivado del MCD en el intervalo $t = 0$ a t_u .

Para determinar la variación de tensión de salida del PDT, Δv_r , es necesario analizar el subcircuito eléctrico resultante que se activa cada vez que dos fases se ponen en corto circuito dentro del intervalo $t = 0$ a t_u . De acuerdo con la Fig. 3, el subcircuito eléctrico resultante se muestra en la Fig. 4, en el cual la caída de tensión debido a las resistencias de fase del GSIM (r) y los diodos del PDT (V_D) se consideran mínimas con la finalidad de simplificar el análisis, i_u y v_{comm} representan la corriente y tensión

de conmutación de la fase a y c , respectivamente, presentes en el intervalo $t = 0$ a t_u .

Analizando la trayectoria de la corriente de conmutación, i_u , se presenta la caída de tensión a través de los inductores, entre la fase a y c , y está dada por (4):

$$V_{comm} = 2 \times L_s \frac{di_u}{dt} \quad (4)$$

De acuerdo con la Fig. 4, el $v_{comm} = v_{an} - v_{cn} = \sqrt{2} v_{ll} \text{sen}(w_e t)$, por lo tanto al reordenar y sustituir este hecho en (4), se obtiene la ecuación diferencial (5), de la cual es posible estimar el comportamiento de la corriente de conmutación, i_u , durante el intervalo $t = 0$ a t_u :

$$L_s \frac{di_u}{dt} = \frac{\sqrt{2}}{2} v_{ll} \text{sen}(w_e t) \quad (5)$$

$$L w_e i_u = \frac{\sqrt{2} v_{ll} (1 - \cos(w_e t))}{2} \quad (6)$$

donde $w_e = p\Omega_m$ representa a la frecuencia angular eléctrica y p al número de polos del GSIM. Cuando $t = t_u$, la corriente de conmutación, i_u , alcanza a la corriente de salida del PDT, i_r (Ver Fig. 3). Asumiendo este hecho en (6) podemos obtener una expresión explícita dada por (7) para estimar el tiempo t_u en el que el subcircuito de la Fig. 4 está activo. Esta expresión puede resultar de gran utilidad si se desea conocer los grados correspondientes en que se activa el subcircuito y desarrollar modelos matemáticos más avanzados que relacionen el comportamiento de la velocidad angular mecánica, Ω_m , con la tensión y corriente de salida del PDT.

$$t_u = \frac{\cos^{-1} \left(1 - \frac{\sqrt{2} \times i_r \times L \times w_e}{v_{ll}} \right)}{w_e} \quad (7)$$

El área provocada por la caída de tensión, Δv_r , puede ser estimada en función de $L w_e i_u$ utilizando la expresión (6), esto asumiendo que la corriente de conmutación alcanza a la corriente de salida del PDT ($i_u = i_r$) para $t = t_u$. Considerando que esta área se pierde cada $\pi/3$ del período de la tensión de salida del PDT, v_r , la caída de tensión, Δv_r , es:

$$\Delta v_r = \frac{L w_e i_r}{\pi/3} = \frac{3}{\pi} L w_e i_r = L p \Omega_m i_r \quad (8)$$

De acuerdo con [11], si la inductancia de fase del GSIM es nula ($L = 0$), la tensión de salida del puente de diodos trifásico puede estimarse con base en $v_r^{L=0} = (3/\pi)\sqrt{2} v_{ll}$. Asumiendo este hecho y las pérdidas de tensión debidas a la caída de tensión (Δv_r), la tensión de polarización de los diodos (V_D) del PDT y la resistencia de fase del GSIM. La expresión (9) puede utilizarse para estimar el comportamiento de la tensión de salida del puente de diodos trifásico, v_r , bajo el modo de conducción discontinua:

$$v_r = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} v_{ll} - \frac{3}{\pi} L p \Omega_m i_r - 2i_r r_s - 2V_D \quad (9)$$

Asumiendo que las pérdidas de tensión debidas a la tensión de conmutación (v_{comm}), la tensión de polarización de los diodos (V_D) del PDT y a la resistencia de fase del generador síncrono de imanes permanentes, son mínimas, la tensión entre líneas del GSIM puede estimarse en función a la velocidad angular mecánica de la turbina eólica, Ω_m , el número de polos, p , y la constante de fuerza electromotriz, K , del GSIM:

$$v_{ll} = Kp\Omega_m \quad (10)$$

Sustituyendo (10) en (9) y solucionando para la velocidad angular mecánica de la TE, Ω_m , se obtienen una expresión para estimar a la velocidad angular mecánica de la turbina eólica mediante la tensión y corriente de salida del PDT:

$$\Omega_m = \frac{2\pi V_D + \pi v_r + 2\pi i_r r}{3\sqrt{2}pK - 3Li_r p} \quad (11)$$

Tomando en cuenta la eficiencia del GSIM acoplado al puente de diodos trifásico ($n_{GSIM+PTD}$) en la relación que existe entre la potencia mecánica de la turbina eólica y la potencia eléctrica del PDT, se puede obtener una expresión que relaciona el sistema aerodinámico de la TE con el sistema eléctrico:

$$\frac{1}{2}C_p(\lambda)\rho\pi r^2 v_v^3 = n_{GSIM+PTD} v_r i_r \quad (12)$$

Considerando que la tensión de salida del PDT, v_r , puede estimarse con base en (9) y resolviendo (12) para i_r :

$$i_r = \frac{\pi C_p(\lambda) R^2 v_v^3 \rho}{2v_r n_{GSIM+PTD}} \quad (14)$$

Cerca del punto de máxima eficiencia aerodinámica de la TE su velocidad específica, λ^* , toma un valor de 6.015 y el coeficiente de potencia máximo, $C_p(\lambda^*) = C_{pmax}$, toma el valor de 0.350756. Bajo esta condición de (2), la velocidad de viento óptima (v_v^*) y la velocidad mecánica angular óptima (Ω_m^*), pueden ser estimadas mediante $v_v^* = (\Omega_m R)/\lambda^*$ y $\Omega_m^* = (\lambda^* v_v^*)/R$, respectivamente. Introduciendo el punto de máxima potencia de la turbina eólica en (9) y (14), podemos finalmente relacionar la tensión óptima de salida del PDT, v_r^* , con el SPMP del sistema eólico con base en: la velocidad específica (λ^*), el coeficiente de potencia máximo (C_{pmax}), la estimación de la velocidad angular mecánica (Ω_m) a través de (11) y la medición de tensión (v_r) y corriente (i_r) de salida del puente de diodos trifásico:

$$i_r^* = \frac{\pi C_{pmax} R^2 (v_v^*)^3 \rho}{2v_r n_{GSIM+PTD}} \quad (15)$$

$$v_r^* = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} K p (\Omega_m^*) - \frac{3}{\pi} L p (\Omega_m^*) i_r^* - 2i_r^* r_s - 2V_D \quad (16)$$

El diagrama a bloques de la Fig. 5 muestra el algoritmo SPMP para el sistema eólico basado en las ecuaciones (11), (15) y (16). De acuerdo con la Fig. 5, la velocidad angular mecánica, Ω_m , es estimada con base (11) y las mediciones de tensión (v_r) y corriente (i_r) de salida del PDT. Considerando las condiciones de máxima potencia la corriente óptima de salida del PDT, i_r^* , es

estimada a través de (15). Finalmente la tensión óptima de salida del puente de diodos trifásico, v_r^* , es estimada con base a la corriente óptima de salida del PDT (i_r^*) y la velocidad angular mecánica óptima (Ω_m^*) a través de (16).

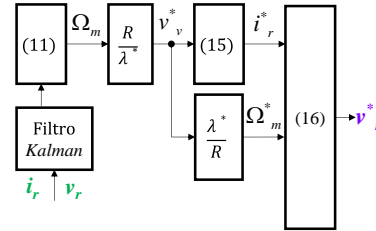


Fig. 5 Diagrama a bloques del algoritmo SPMP para el sistema eólico.

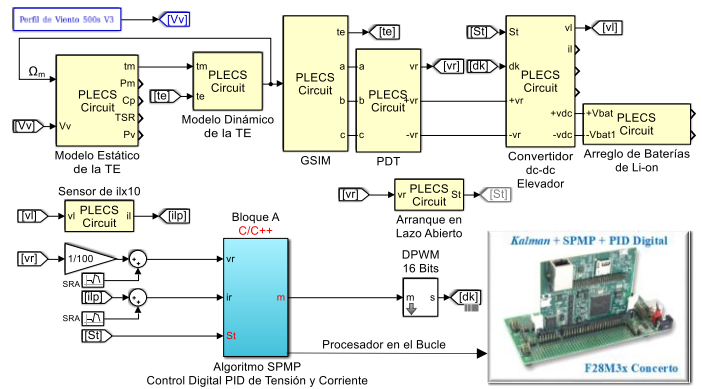


Fig. 6 Esquema de simulación del algoritmo SPMP para el sistema eólico desarrollado en PLECS®/Simulink®.

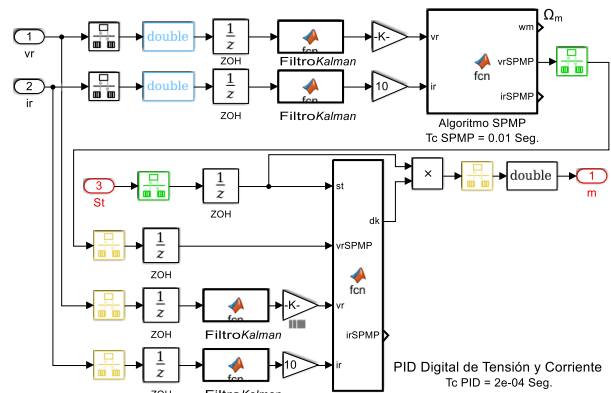


Fig. 7 Algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia para el sistema eólico y controlador PID digital.

3. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

La Fig. 6 muestra la implementación del sistema eólico y el algoritmo SPMP en el entorno de simulación de PLECS®/Simulink® utilizando la técnica de procesador en el bucle. El algoritmo SPMP y el controlador PID digital de

tensión/corriente fueron convertidos a código C/C++ y programados en la tarjeta de control F28M3x Concerto de *Texas Instruments*. La técnica de procesador en el bucle garantiza que el comportamiento del código de implementación coincida con el diseño. Además, permite probar el desempeño del algoritmo SPMP y el controlador PID digital operando en la tarjeta de control F28M3x para el control del sistema eólico (implementado en *PLECS*[®]/*Simulink*[®]). La Fig. 7 muestra con detalle la implementación del algoritmo SPMP y el controlador digital PID (Bloque A de la Fig. 6). El algoritmo SPMP opera con una velocidad de 0.01 s mientras que el algoritmo de control digital PID opera a razón de 5 kHz.

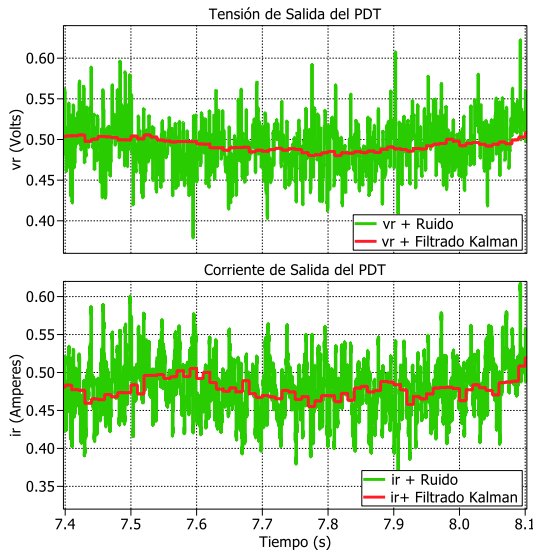


Fig. 8 Eliminación de ruido en v_r e i_r con base en el filtro *Kalman*.

De acuerdo con el esquema de simulación de las Figs. 6 y 7, en la Fig. 8 se muestra el comportamiento de la tensión (v_r con atenuación $\times 100$) y la corriente (i_r con atenuación $\times 10$) de salida del PDT ante condiciones de ruido aleatorio. Además, de cómo el ruido aleatorio es removido de las señales de tensión (v_r) y corriente (i_r) del PDT mediante los filtros *Kalman* situados a la entrada del algoritmo SPMP (Ver Fig. 7). El mismo resultado fue obtenido utilizando los filtros *Kalman* situados a la entrada del algoritmo PID digital (Ver Fig. 7) para remover el ruido aleatorio presente en la tensión y corriente del puente de diodos trifásico.

La Fig. 9 muestra la capacidad del algoritmo SPMP para mantener a la turbina eólica cerca de su máxima eficiencia aerodinámica ($C_{pmax} = 0.350756$) bajo un perfil de viento compuesto por una región de escalones, además de una segunda región con fluctuaciones (componentes de baja y alta frecuencia). La máxima variación registrada del C_p con respecto al C_{pmax} para la región de escalones de viento fue del 3.22 %, mientras que para la región de fluctuaciones presento una variación máxima de 2.48 %. Considerando que el algoritmo SPMP se puede resolver con base a dos mediciones eléctricas

(libre de sensores mecánicos) y con base a 3 ecuaciones (ligera implementación y bajo costo computacional) los resultados obtenidos se pueden considerar aceptables.

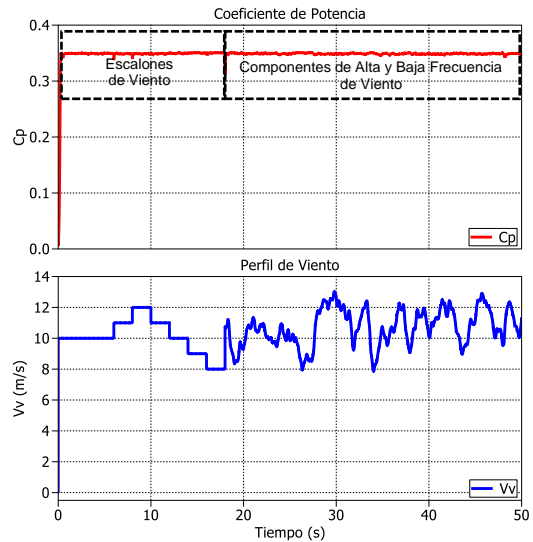


Fig. 9 Evaluación del algoritmo SPMP: comportamiento del coeficiente de potencia, C_p , ante un perfil de viento.

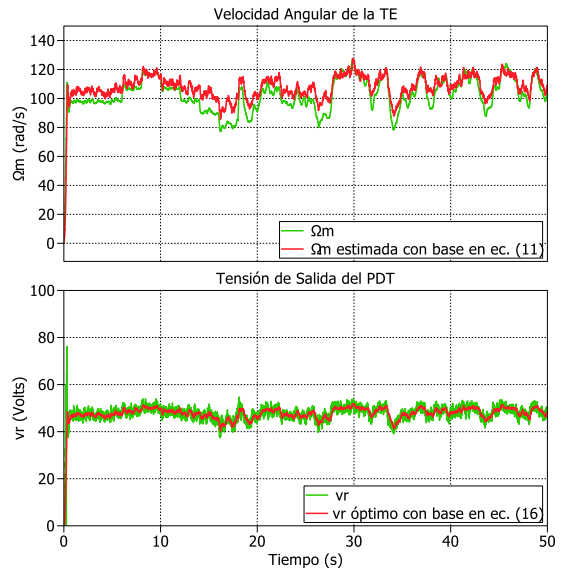


Fig. 10 Estimación de la velocidad angular mecánica, Ω_m , y la tensión óptima, v_r^* , utilizando el algoritmo SPMP.

Considerando el perfil de viento de la Fig. 9, en la Fig. 10 se muestra la estimación de la velocidad angular mecánica, Ω_m , y la tensión óptima, v_r^* , con base en algoritmo SPMP. En ella se puede observar que la tensión óptima, v_r^* , es ajustada constantemente para mantener a la turbina eólica cerca de su máxima eficiencia aerodinámica a pesar de que la estimación de la velocidad angular mecánica, Ω_m , presenta ligeras variaciones con respecto a su valor real por simulación, sin embargo el perfil

de la predicción de la velocidad angular mecánica, Ω_m , es muy similar al perfil del viento, como resultado, el coeficiente de potencia, C_p , se mantiene cerca de su valor máximo.

La Tabla 1 muestra los parámetros del sistema eólico y el algoritmo SPMP utilizados con fines de simulación (Ver Figs. 6 y 7).

Tabla 1. Parámetros de simulación del SE y el algoritmo SPMP.

TE	
Momento de inercia (J)	0.0055 $Kg\cdot m^2$
Densidad del aire (ρ)	1.225 Kg/m^3
Radio (R)	0.575 m
$c_1= 5.837e^{-7}$, $c_2= 2.823e^{-5}$, $c_3= 0.000509$, $c_4= -0.004067$ $c_5= 0.01159$, $c_6= 0.005924$, $c_7= 0.01586$ y $c_8= 0.005284$	
GSIM	
Resistencia de fase (r)	2.6 Ω
Inductancia de fase (L)	1.6 mH
Fuerza electromotriz (K)	0.04753
Polos (p)	6
PDT	
Tensión de polarización (V_D)	0.7 V
Resistencia de encendido (R_D)	42 $m\Omega$
Convertidor $dc-dc$	
Capacitor de entrada (C_i)	470 μf
Inductor (L)	80 mH
Frecuencia de conmutación (f_c)	5 kHz
Arreglo de Baterías de Li-on	
Tensión nominal (V_{nom})	200 V
Controlador Digital Linealizado para $v_r = 10m/s$	
Tensión	$3.824 \frac{(z - 0.9828)^2}{(z - 1)(z - 0.9)}$
Corriente	$2.7571e^5 \frac{(z - 0.9828)^2}{(z - 1)(z - 0.9667)}$

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un algoritmo SPMP para un sistema eólico con base al modo de conducción discontinua del puente de diodos trifásico acoplado al GSIM. Los resultados de simulación fueron presentados mediante la técnica de procesador en el bucle, los cuales indican que la máxima eficiencia aerodinámica de la TE puede ser mantenida mediante dos mediciones eléctricas (v_r y i_r) y tres ecuaciones (ver Fig. 5). Como resultado, la implementación del algoritmo SPMP en la tarjeta de control F28M3x es ligera y no requiere de algún sensor mecánico para el proceso de SPMP del sistema eólico. El algoritmo SPMP puede estimar la velocidad angular mecánica, Ω_m , además de ajustar la tensión de salida del puente de diodos trifásico, v_r , para alcanzar el punto de máxima de potencia del SE. Los filtros *Kalman* resultaron favorables en el proceso de reducción de ruido aleatorio montado en las señales de tensión (v_r) y corriente (i_r) de salida del PDT, como consecuencia, el algoritmo SPMP maximiza su capacidad de respuesta. La técnica de simulación de procesador en el bucle resultó en una poderosa herramienta para el proceso de diseño y validación de los

algoritmos (SPMP, controlado PID digital y filtros *Kalman*) ejecutándose en la tarjeta de control F28M3x con base en código C/C++.

5. REFERENCIAS

- [1] IDAE, "Evolución tecnológica y prospectiva de costes por tecnologías de energías renovables a 2020 – 2030", *Estud. Técnico PER 2011-2020*, p. 230, 2011.
- [2] F. Zhang, Z. Xu, and K. Meng, "Optimal sizing of substation-scale energy storage station considering seasonal variations in wind energy", *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 13, pp. 3241–3250, 2016.
- [3] P.J. Schubel and R.J. Crossley, "Wind turbine blade design", *Wind Turbine Technol. Princ. Des.*, pp. 1–34, 2014.
- [4] G. Mandic, "Lithium-ion ultracapacitor energy storage integrated with a variable speed wind turbine for improved power conversion control", Ph.D. dissertation, *The University of Wisconsin-Milwaukee*, 2012.
- [5] A. Dahbi, N. Nait-Said, and M.S. Nait-Said, "A novel combined MPPT-pitch angle control for wide range variable speed wind turbine based on neural network", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 22, pp. 9427–9442, 2016.
- [6] V. Galdi, A. Piccolo, and P. Siano, "Designing an adaptive fuzzy controller for maximum wind energy extraction", *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 23, no. 2, pp. 559–569, 2008.
- [7] Z.M. Dalala, Z.U. Zahid, W. Yu, Y. Cho, and J.S. Lai, "Design and analysis of an MPPT technique for small-scale wind energy conversion systems", *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 28, no. 3, pp. 756–767, 2013.
- [8] A.M. Eltamaly and H.M. Farh, "Maximum power extraction from wind energy system based on fuzzy logic control", *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 97, pp. 144–150, 2013.
- [9] W.K. Ahmed, "Mechanical Modelling of Wind Turbine: Comparative Study", vol. 3, no. 1, pp. 3–6, 2013.
- [10] L.G. González Morales, "Mejora de la eficiencia y de las prestaciones dinámicas en procesadores electrónicos de potencia para pequeños aerogeneradores sincrónicos operando en régimen de velocidad variable", Tesis Doctoral, *Universidad Politécnica de Valencia*, 2011.
- [11] N. Mohan, "Electronica de potencia: convertidores, aplicaciones y diseño", Edición en español por McGraw-Hill, 2009.
- [12] K. Ogata, "Sistemas de control en tiempo discreto", *2da Edición*, vol. 4, no. 3, 1996.
- [13] M. Chen, S. Member, and G.A. Rinc, "Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I–V performance", vol. 21, no. 2, pp. 504–511, 2006.
- [14] Q. Li, R. Li, K. Ji, and W. Dai, "Kalman filter and its application", *Proc. - 8th Int. Conf. Intell. Networks Intell. Syst. ICINIS 2015*, no. 10, pp. 74–77, 2016.
- [15] S. Papathanassiou, "Models for variable speed wind turbines", Ph.D. dissertation, *National Technical University of Athens*, 1997.
- [16] G.M. Foglia, A. Di Gerlando, M.F. Iacchetti, and R. Perini, "Comprehensive steady-state analytical model of a three-phase diode rectifier connected to a constant DC voltage source", *IET Power Electron.*, vol. 6, no. 9, pp. 1927–1938, 2013.