

Design of a wind energy conversion emulator system

L.G. González¹, E. Figueres², G. Garcerá², O. Carranza³

¹Departamento de Electrónica y Comunicaciones, Universidad de los Andes, Núcleo La Hechicera. Mérida 5101, Venezuela. Tlf.: +5802742402907. lgerardo@ula.ve

²Grupo de Sistemas Electrónicos Industriales, Universidad Politécnica de Valencia. Camino de vera s/n, 46022, Valencia, España.

Tlf.: +34963877007. efiguere@eln.upv.es, ggarcera@eln.upv.es.

³Escuela Superior de Cómputo, Instituto Politécnico Nacional. Av. Juan de Dios Bátiz s/n, 07738, DF-México. Tlf.: +525557296000. ocarranzac@ipn.mx

Abstract

The aim of this paper is designing a system emulator for eolic energy conversion with variable speed and nominal power of 2kW. The emulator defines wind profiles for evaluating control techniques regarding power converters and maximum power point tracking algorithms covering a wide range of operating speeds. This system consists of a commercial frequency inverter and an induction motor coupled to a permanent magnet synchronous generator without a gear box. The energy generated is processed and delivered to the grid through a back-to-back power converter using sensorless control and vector control techniques. Additionally, all control algorithms were implemented using the TMS320F2812 DSP from Texas Instruments.

Keywords: wind power emulator, permanent magnet synchronous generator, vector control, maximum power point tracking.

Diseño de un emulador para sistemas de conversión de energía eólica

Resumen

Este artículo presenta el diseño del emulador de un sistema de conversión de energía eólica a velocidad variable para una potencia nominal de 2kW, el emulador permite reproducir perfiles de viento definidos, con el fin de evaluar técnicas de control relacionadas con el convertidor de potencia y algoritmos de seguimiento del punto de máximo de potencia en un amplio rango de velocidades de operación. El sistema está compuesto por un variador de frecuencia comercial y motor de inducción acoplado a un generador sincrónico de imanes permanentes sin caja de engranajes. La energía generada es procesada y entregada a la red de distribución mediante un convertidor de potencia *back-to-back*, utilizando técnicas de control sin sensores y control vectorial, todos los algoritmos de control son implementados utilizando el DSP TM-S320F2812 de Texas Instruments.

Palabras clave: emulador de energía eólica, generador sincrónicos de imanes permanentes, control vectorial, técnicas de seguimiento del punto de máxima potencia.

1. Introducción

En el contexto mundial el rol de la energía eólica ha aumentado significativamente su uso, disminuyendo las emisiones de dióxido de

carbono a la atmósfera que producen el efecto invernadero. En particular, los sistemas de conversión de energía eólica (SCEE), se consideran como la más rentable de todas las fuentes renovables explotadas en la actualidad [1]. En los úl-

timos años, el diseño y prueba de los sistemas de control modernos han sido basados sobre el uso emuladores, un conjunto de dispositivos de hardware y software que permiten reproducir el comportamiento dinámico de un proceso industrial en un ambiente controlado. El uso de emuladores es justificado bajo ciertas situaciones, por ejemplo cuando la naturaleza del proceso controlado no permite realizar pruebas deterministas en el entorno natural, o el experimento conlleva importantes riesgos sobre la operación global del proceso ó que la planta no está disponible por su alto costo. Para poder utilizar un emulador, se requiere generalmente que sea de bajo costo y seguro, que permita reproducir efectivamente el comportamiento dinámico del sistema a emular. La principal motivación de usar un emulador para las aplicaciones de energía eólica, es la posibilidad de repetición de las variables físicas ambientales fundamentales, que en este caso puede ser manipulada la velocidad del viento y su densidad. Los emuladores pueden conferirse a emular la condiciones climáticas en un recinto dispuesto para ello, por ejemplo utilizando un túnel de viento, variando la velocidad del viento con ventiladores [2, 3] o también realizar emuladores netamente electromecánicos que son compactos, emulando la turbina eólica mediante un conjunto de motor y variador de velocidad con un sistema de control, que permite modelar las características estáticas y dinámicas de la turbina eólica mediante modelos matemáticos [4-7]. Con el uso de generadores sincrónicos la frecuencia de la tensión de salida varía en función de la velocidad de rotor, por lo que es necesario utilizar convertidores de potencia que permitan entregar la energía generada con una frecuencia fija a la red de distribución. En este artículo se estudia el diseño de un emulador de un sistema de conversión de energía eólica de velocidad variable, compuesto por un generador síncrono de imanes permanentes (GSIP) acoplado a un convertidor de potencia *back-to-back*. En el mismo las inductancias de línea del GSIP son usadas como elementos pasivos de filtrado en el convertidor, y el GSIP es acoplado mecánicamente a un motor de inducción donde es accionado por un variador de frecuencia variable.

2. Modelo del generador sincrónico de imanes permanentes y el sistema mecánico del emulador

2.1. Modelo del generador sincrónico de imanes permanentes (GSIP)

Los generadores sincrónicos con imanes permanentes en la superficie del rotor pueden presentar una distribución del flujo sinusoidal, y eléctricamente pueden ser representados en el sistema de referencia síncrono dq mediante las tensiones en bornes u_{sd} y u_{sq} mostradas en las ecuaciones (1) y (2).

$$u_{sd} = -R_s i_{sd} + \omega_e \psi_{sq} \dot{\psi}_{sd} \quad (1)$$

$$u_{sq} = -R_s i_{sq} - \omega_e \psi_{sd} - \dot{\psi}_{sq} \quad (2)$$

donde R_s es la resistencia debido al cobre en el estator; i_d y i_q son, son las inductancias en el sistema de referencia síncrono y son las tensiones s las corrientes en el estator. ψ_{sd} , ψ_{sq} Son los flujos magnéticos en el estator, mostrados en las ecuaciones (3) y (4), y son producto de las corrientes de línea i_{sd} , i_{sq} y del campo magnético producto de los imanes permanentes (ψ_{PM}).

$$\psi_{sd} = L_d i_{sd} - \Psi_{PM} \quad (3)$$

$$\psi_{sd} = L_q i_{sq} \quad (4)$$

El par eléctrico ejercido por el rotor del GSIP, es representado por la ecuación (5), donde P es el número de pares de polos de la máquina. Si se considera que la superficie del rotor es liso, se cumple la condición ($L_d = L_q$), además de aplicar la técnica de control vectorial $i_d = 0$, técnicamente es posible simplificar el par ejercido por el GSIP como se observa en la ecuación (6), como consecuencia de esta técnica se permite controlar el par eléctrico mediante la componente en cuadratura (i_q). Esta propiedad contribuye en el diseño del emulador, dado que el par ejercido por el GSIP influye sobre la velocidad de rotación y emulará la dinámica de la turbina eólica.

$$T_e = \frac{P}{2} \left[\Psi_{PM} i_{sq} - (L_d - L_q) i_{sd} i_{sq} \right] \quad (5)$$

$$T_e = \frac{P}{2} [\Psi_{PM} i_{sq}] \quad (6)$$

2.2. Modelo del sistema mecánico y turbina eólica

El esquema general del sistema mecánico es utilizado por Seman *et al.* [8] y Beltran *et al.* [9], donde está esencialmente compuesto por dos masas y una caja multiplicadora ideal con relación de transformación (h), inercia J_r , coeficiente de pérdidas por fricción K_r y coeficiente de amortiguamiento B_r asociados a la turbina eólica, y por el lado del generador se tienen, la inercia J_g , el coeficiente de pérdidas por fricción K_g y el coeficiente de amortiguamiento B_g . También el par equivalente del generador por el efecto de la caja multiplicadora T_e^* , que representa el par ejercido por el generador en el eje de la turbina eólica mediante la caja de engranajes, lo mismo ocurre con T_r^* para la turbina eólica.

El efecto de la caja multiplicadora consigue que las velocidades de rotación y los pares equivalentes tengan la relación mostrada en la ecuación (7).

$$h = \frac{\omega_g}{\omega_r} = \frac{T_r^*}{T_e^*} \quad (7)$$

El modelo del sistema, en función de ecuaciones diferenciales es expresado mediante la ecuación (8).

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_r - hT_e - K_t \omega_r - B_t \frac{d\omega_r}{dt} \quad (8)$$

donde los coeficientes del conjunto están dadas por: $J = J_r + h^2 J_g$, $K_t = K_r + h^2 K_g$ y $B_t = B_r + h^2 B_g$ en ellas se observa el efecto multiplicador que tiene la relación de transformación h de la caja de engranajes, efecto que puede entenderse como aumento de las pérdidas por fricción e inercia. En el caso de este artículo se acopla directamente el generador eléctrico a un motor de velocidad variable, asumiendo que la relación de la caja de engranajes es ($h=1$), con esta condición se reducen las pérdidas producidas por la caja multiplicadora, el coeficiente de inercia y de pérdidas por fricción son mostrados en la Tabla 1, y el coeficiente de amortiguamiento es considerado despreciable. La potencia generada por la turbina eólica está definida por la ecuación (9), donde ρ es

la densidad del aire, r es el radio de la turbina eólica, V_w es la velocidad del viento y $C_p(\lambda)$ es el coeficiente de potencia, que depende de la relación de velocidad entre la velocidad del viento y de rotación $\lambda = \frac{r\omega}{V_w}$, donde ω es la velocidad de rotación de la turbina eólica y el GSIP expresado en rad/s. $C_p(\lambda)$ depende en gran medida de la aerodinámica de la turbina eólica [10] y su modelado puede ser representado mediante la ecuación polinomial (10), teóricamente no puede ser superior a $C_p(\lambda) = 0.59$, valor éste debido a las pérdidas aerodinámicas, llamado límite de Betz. Es importante señalar que los coeficientes de $C_p(\lambda)$ a, b, c, d, e son parámetros constantes si el ángulo de ataque de la hélice es fijo.

$$P_r = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 C_p(\lambda) V_w^3 \quad (9)$$

$$C_p(\lambda) = a + b\lambda + c\lambda^2 + d\lambda^3 + e\lambda^4 + f\lambda^5 \quad (10)$$

De la ecuación (9), se obtiene la expresión del par ejercido por la turbina en la ecuación (11).

$$T_r = \frac{1}{2} \rho \pi r^3 C_q(\lambda) V_w^2 \quad (11)$$

donde $C_q(\lambda) = \frac{C_p(\lambda)}{\lambda}$, es el coeficiente de aprovechamiento de par. En este artículo se utilizan los coeficientes adimensionales mostrados en la Tabla 1.

3. Implementación del banco de pruebas

En los emuladores de los sistemas de conversión de energía eólica es posible encontrar dos tipos de topologías distintas en la construcción de emulador en mención [11], la primera de ellas, consiste en fijar el par de referencia al variador de frecuencia la referencia se obtiene a partir de la medición de velocidad de rotor y el par ejercido por la turbina emulada (T_r). Con esta topología se tiene la desventaja de presentarse referencias de par con dinámicas rápidas debido al cálculo de la derivada de la velocidad medida en el rotor, otro inconveniente de esta topología es que el variador de frecuencia estima el par ejercido por el motor para realimentar el lazo de control interno (T_m),

comportamiento que puede afectar el rendimiento del lazo. El esquema del emulador con la topología de referencia de par, se muestra en la Figura 1. Con esta topología la respuesta dinámica del lazo interno (T_{in}) compromete el rendimiento del emulador [11], además de que los variadores de frecuencia comerciales no miden el par asociado en el control de par.

La segunda topología, usada en este artículo corresponde al caso donde se fija la velocidad de referencia al variador de frecuencia como se muestra en la Figura 2 en este caso es sensado el par asociado al generador eléctrico en el caso del emulador diseñado, el par es estimado, debido

a la utilización de la técnica de control vectorial ($i_d=0$) [12]. Con el uso de esta técnica, se obtiene una relación lineal entre la corriente de línea y el par electromagnético. Con esta topología la velocidad de referencia al variador de frecuencia es calculada a partir del par electromagnético estimado y el par ejercido por la turbina emulada (T_{ref}).

Existen emuladores de SCEE que utilizan motores de corriente continua como elemento mecánico de tracción [7], pero se tiene el inconveniente de presentar elevado costo en comparación de las máquinas de corriente alterna. El esquema del emulador mostrado involucra un lazo de velocidad, manejado por el variador de velocidad,

Tabla 1
Parámetros emulador SCEE

Inductancia de línea (Inversor)	25 mH	Frecuencia de línea (Red)	50 Hz
Resistencia parásita inductor (Inversor)	0,4 Ω	Frecuencia de muestreo (f_s)	10 kHz
Tensión DC-Link	800 v	Frecuencia de conmutación (f_{sw})	5 kHz
Resistencia de línea GSIP (r_s)	5 Ω	Inductancia generador ($L_d=L_q$)	5 mH
Tensión de línea	230 v (rms)	Densidad del aire (ρ)	1,08 Kg/m ³
Radio turbina (r)	1,525 m	Inercia del sistema (J)	0,5 K*m ²
Pérdidas por fricción (K_f)	0,01 Nm*s/rad		
Coefficientes turbina (a, b, c, d, e, f)	(0,0344, -0,0864, 0,1168, -0,0484, 0,00832, -0,00048)		

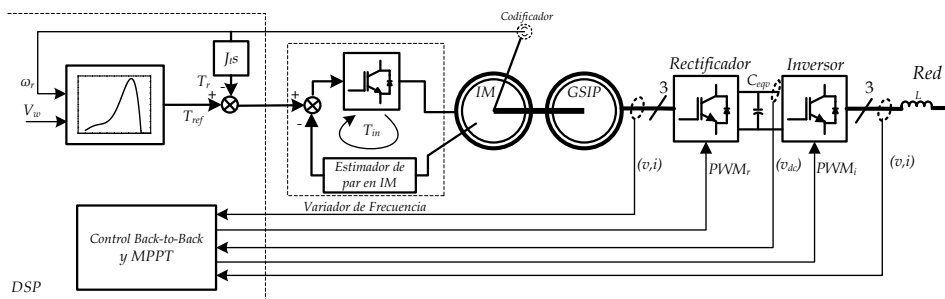


Figura 1. Emulador con topología de referencia de par.

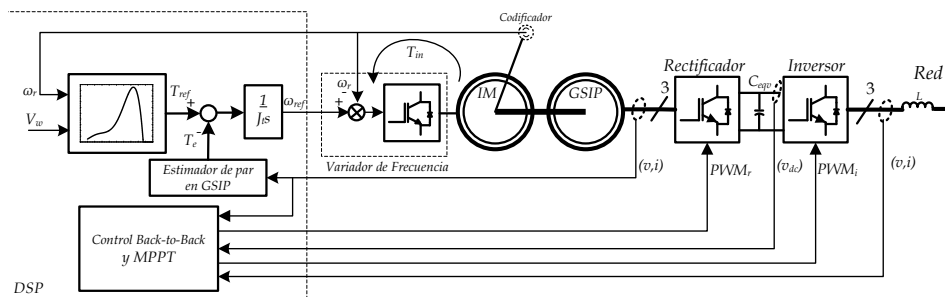


Figura 2. Emulador con topología de referencia de velocidad.

Micromaster 440 de la marca Siemens[®], con una entrada analógica en un rango de 0 a 10V que representa la velocidad de referencia de la turbina eólica. En relación a la configuración utilizada en el variador de velocidad, es utilizado un control de velocidad, con una referencia analógica externa, también se usa la opción de entrada de codificador que permite corregir el problema del deslizamiento típico de un motor de inducción. El motor utilizado es del modelo *1LE1002CC322AA4Z* de marca Siemens[®], con una potencia nominal de *5,5kW*, 6 polos, velocidad nominal *950rpm* y par máximo *55Nm*. El codificador utilizado corresponde al modelo *1XP8012-10 HTL*, de la marca Siemens[®], este codificador genera 4096 pulsos por revolución, además genera pulsos en cuadratura que permite conocer el sentido de giro del motor. La señal proveniente del encoder utilizada por la unidad de procesamiento DSP mediante el módulo de codificación por pulsos en cuadratura, permite determinar la velocidad de rotor del motor de inducción. El algoritmo del control es realizado en un procesador digital de señales DSP *TM-S320F2812* de Texas Instruments, y el esquema de control corresponde al propuesto en González *et al.* [13], y mostrado en la Figura 3a, donde la estructura de control está en función de la región de operación [14] en el caso de no superar la potencia nominal, el algoritmo de seguimiento de máxima potencia (MPPT) fija la referencia al lazo de control de velocidad, y cuando la potencia nominal es alcanzada, un lazo de control de potencia limita la velocidad de referencia. En este sistema

de control es usado el estimador simplificado de Kalman como técnica para estimar la velocidad de rotor en el GSIP [15], el convertidor back-to-back utiliza la modulación por ancho de pulsos [16] y es controlado mediante los lazos de corriente en el sistema de referencia síncrono utilizando los controladores PI descritos en González *et al.* [17]. El emulador construido con los parámetros de la Tabla 1, es mostrado en la Figura 3b.

4. Resultados experimentales

Para analizar el comportamiento de las técnicas de seguimiento de máxima potencia y la estructura de control planteada para el prototipo del SCEE, inicialmente es necesario determinar el estado estacionario de la potencia generada por la turbina eólica emulada en función a la velocidad del viento y velocidad de rotación, para ello es utilizado los parámetros de la turbina eólica mostrada en la Tabla 1, ante un perfil de viento y velocidad de referencia de rotor, mostrado en la Figura 4a. El procedimiento utilizado, consiste en fijar una velocidad de viento y una velocidad de referencia en el rotor, en el lazo de control de velocidad. Bajo estas condiciones, la velocidad del viento definida, además de la velocidad de rotación determinan un par mecánico (T_r) mediante el modelo de la turbina eólica. Al mismo tiempo el control de velocidad impone un par electromecánico (T_e) que permite alcanzar la velocidad de referencia (ω_{ref}).

La velocidad de rotación de referencia (ω_{ref}), mostrada en la Figura 4a, se fija con una penden-

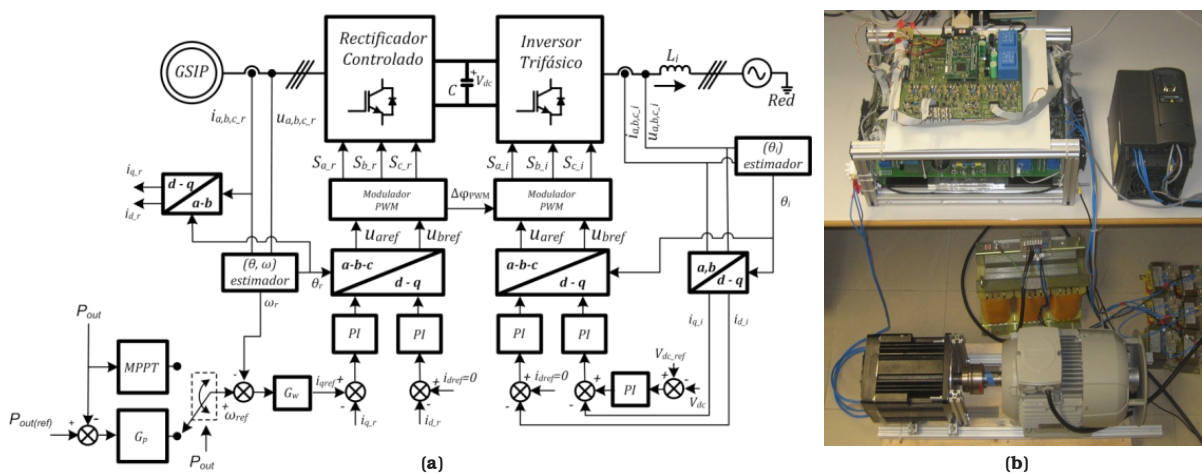


Figura 3. (a) Esquema de control, y (b) Emulador de laboratorio (SCEE).

te de 184.94 rpm/min, pendiente que representa cambios lentos en comparación a la velocidad de respuesta del lazo de velocidad, con lo que se puede inferir que esta dinámica impuesta permite obtener la potencia de salida en estado estable y que no esté afectada por la inercia asociada al sistema mecánico.

La potencia de salida es mostrada en la Figura 4b, y es utilizada para caracterizar el sistema, la potencia es estimada en la salida de la etapa rectificadora, mediante la ecuación (12), en donde son utilizadas las variables del lazo de corriente activa, de modo que V_{dc} es la tensión del bus de continua, d_q e i_q son el ciclo de servicio y la corriente del lazo de control de corriente activa en el sistema de referencia síncrono. En esta potencia, están incluidas las pérdidas producidas por el cobre del GSIP, las pérdidas por fricción del sistema mecánico y las pérdidas de la etapa rectificadora, por lo que la potencia calculada menos las pérdi-

das producidas en la etapa inversora resulta en la potencia efectiva a ser entregada a la red.

$$P_{out(rectificador)} = V_{dc} \cdot d_q \cdot i_q \quad (12)$$

Luego de recopilar datos mediante la aplicación de intercambio de datos en tiempo real del DSP [18], En la Figura 5a y b, se muestra la potencia de salida, en función de la velocidad de rotación para diferentes velocidades del viento, también es mostrada la potencia de salida en función de la relación de velocidades (λ). Estas figuras permiten de manera gráfica evaluar el comportamiento de la técnica de control en el SCEE.

4.1. Comportamiento experimental del MPPT a lazo cerrado

De manera gráfica el comportamiento de un algoritmo de seguimiento de la máxima poten-

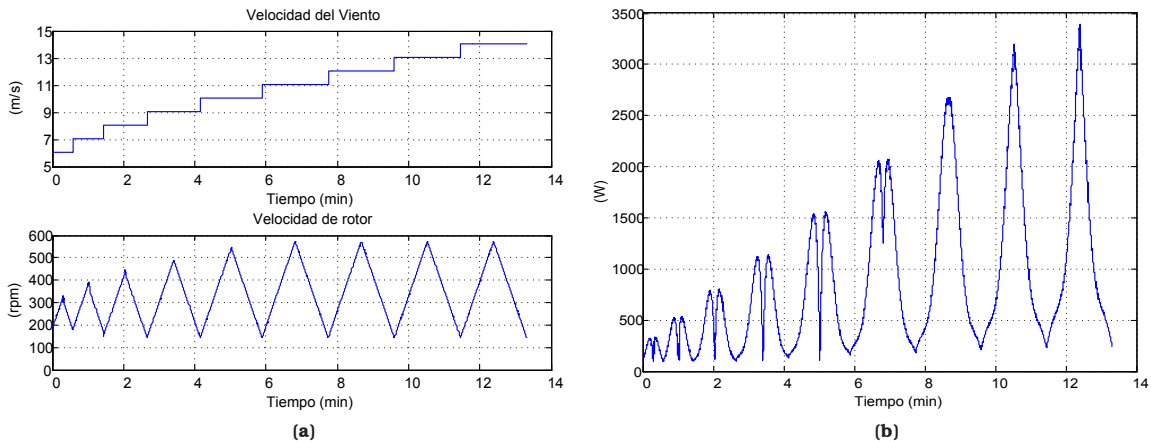


Figura 4. (a) Velocidad del viento y de rotor, (b) Potencia de salida.

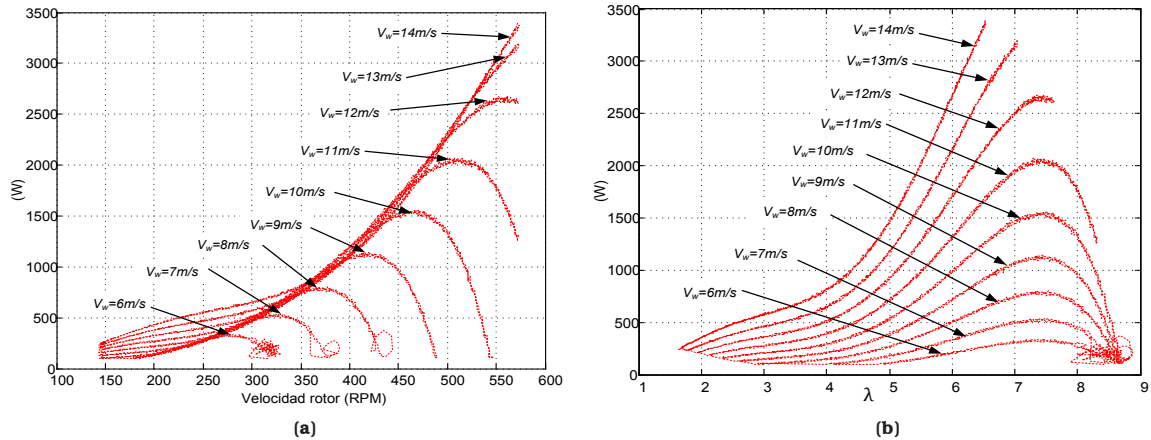


Figura 5. Curvas características Turbina-Generador, (a) en función a velocidad de rotor, (b) en función a λ .

cia en aplicaciones de energía eólica debe cumplir con la dinámica mostrada en la figura 6 este comportamiento se obtiene con perturbaciones de tipo escalón en la velocidad del viento de 6, 8, 10, 13 y 14m/s y un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia, perturbar y observar [19-21], con $\Delta\omega_{ref}=1\text{rad/s}$, y $t_{(establecimiento)}=0,5\text{s}$. En la Figura 6 se observa que el comportamiento de la potencia converge a la cresta de cada una de curvas correspondientes., excepto para el caso donde la velocidad del viento es de 13 y 14m/s, que es donde se supera la potencia nominal del sistema y el algoritmo de control limita la potencia de salida.

En la Figura 6a, se observa el comportamiento en función de la velocidad de rotación, la dinámica se desplaza sobre las curvas características del sistema hasta llegar a su máximo punto, al llegar a éste, el algoritmo oscila en torno al punto de potencia nominal (2kW) de manera indefinida hasta que ocurra un cambio en la velocidad del viento.

En la Figura 6b se muestra el comportamiento de manera distinta, la potencia de salida en función de λ , parámetro que involucra la velocidad de rotación y la del viento, es por esto que se observa transiciones rápidas entre las curvas características del sistema. De igual manera la trayectoria del sistema se desplaza sobre las curvas características de éste, hasta alcanzar su máxima potencia. Cuando la potencia de salida es superior la velocidad de rotación es limitada de manera que se opera en la región de potencia constante de forma independiente a la velocidad del viento.

4.2. Comportamiento experimental del MPPT a lazo abierto

Esta técnica se encarga de medir la velocidad del viento y definir el punto de operación del sistema de control [22], donde el algoritmo MPPT fija la velocidad de referencia del lazo de control para cada velocidad del viento. Con un conocimiento previo del modelo dinámico, es posible predecir la velocidad de rotación donde maximice la potencia de salida, también es necesario medir la velocidad de rotación del sistema mecánico o en su defecto estimarla con técnicas sin sensores [23]. El comportamiento del sistema de conversión de energía eólica ante el perfil de viento es mostrado en la Figura 7a, y utilizando el MPPT a lazo abierto, se obtiene la potencia de salida del GSIP mostrada en la Figura 7b. En esta figura se observa el comportamiento del sistema en las regiones de búsqueda de máxima potencia, que ocurre cuando se opera a una potencia inferior a la potencia nominal del sistema (2kW) y potencia constante, que ocurre cuando se opera a potencia nominal. En la región de máxima potencia se observa una dinámica similar al del perfil del viento, mientras que en la región de potencia constante se trata de mantener fija la potencia de salida a 2kW mediante un lazo de control de potencia.

En la Figura 8a, se observa el coeficiente de aprovechamiento de potencia C_p para el MPPT en lazo abierto, el cual permanece en su valor máximo cuando la potencia del sistema no supera la potencia nominal, de lo contrario el sistema opera de manera ineficiente limitando la potencia de entrada a la potencia nominal. En la Figura 8b, se

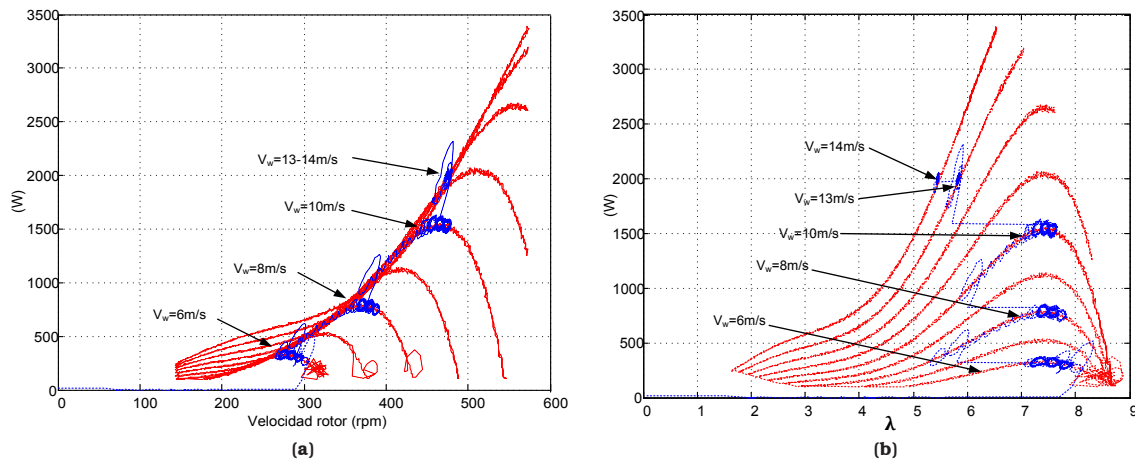


Figura 6. Comportamiento del MPPT en aplicaciones de energía eólica.

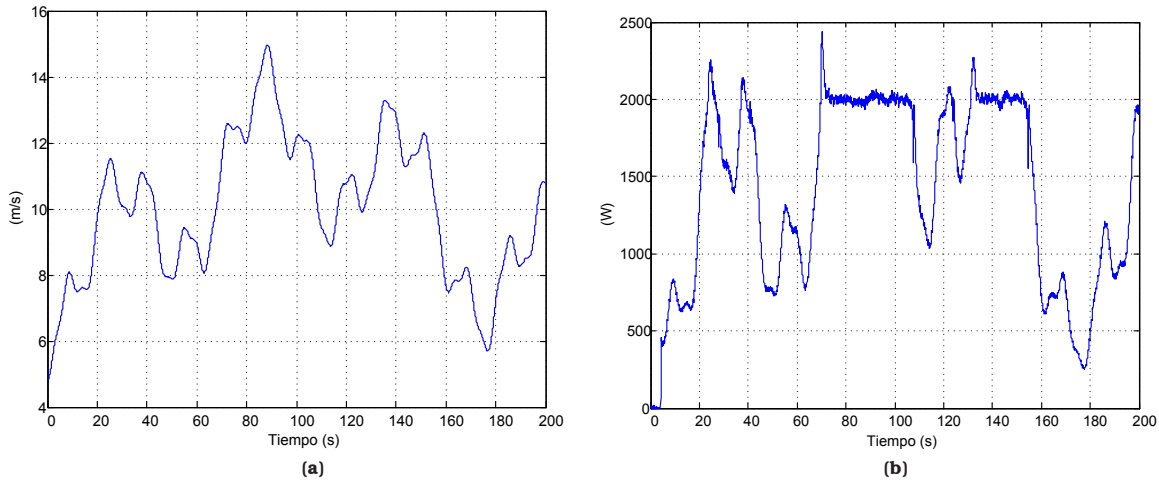


Figura 7. (a) Perfil de viento y (b) potencia de salida con MPPT a lazo abierto.

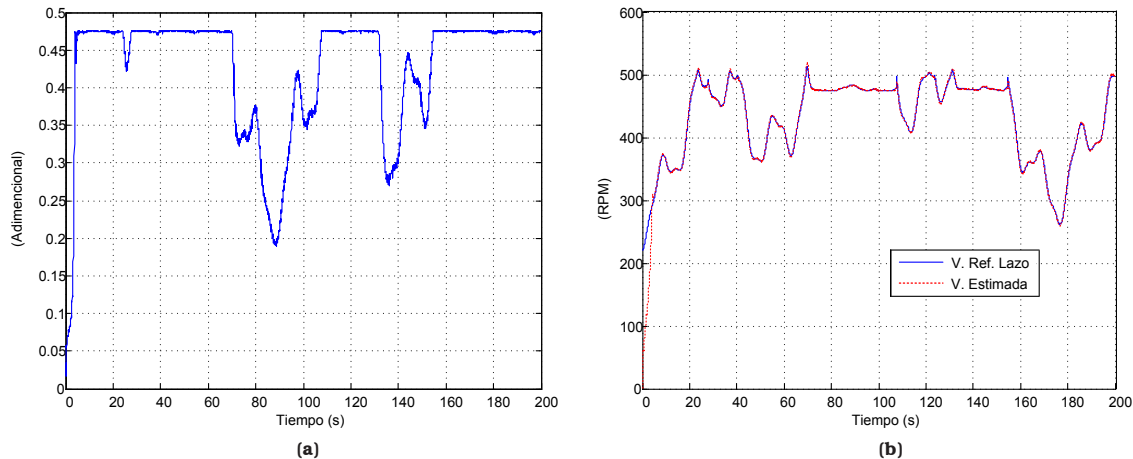


Figura 8. (a) Coeficiente de aprovechamiento C_p , (b) comportamiento lazo de velocidad, con MPPT a lazo abierto.

observa la dinámica de la velocidad de rotación definida por el MPPT a lazo abierto y el comportamiento del lazo de velocidad de rotación mediante la velocidad estimada.

En la Figura 9a se muestra la referencia de corriente dado por el lazo de velocidad y la corriente de línea, expresadas en valores *rms*. En la parte superior de la Figura 9b, se observa la corriente de línea medida en el GSIP, en esta figura la base de tiempo es de *20s/div*, con lo que la ejecución del experimento es de 200s. En esta figura es superpuesta la corriente multiplicada por el factor correspondiente para obtener su valor pico, a fin de corroborar los datos obtenidos mediante la aplicación de intercambio de datos en tiempo real del DSP. En la misma figura, en la parte inferior es mostrada la corriente de salida de la etapa

inversora, teniendo la misma relación de amplitud con respecto a la corriente del GSIP.

En la Figura 10a y b, se observa el comportamiento del estimador MPPT, superpuesto sobre la plantilla de potencia mostradas en la Figura 5a y b, en función de la relación de velocidades (λ). El comportamiento del algoritmo presenta una trayectoria vertical para valores de λ , con $\lambda = 7,34$, hasta llegar a la potencia nominal.

Al llegar a este punto la trayectoria es de manera horizontal, reduciendo la relación de velocidades λ hasta limitar la potencia de salida. Visto de otra manera, la Figura 10b, muestra el comportamiento del algoritmo MPPT en función de la velocidad rotación la trayectoria es superpuesta sobre las crestas de la familia de curvas, además cuando el punto de operación supera la potencia nominal, la

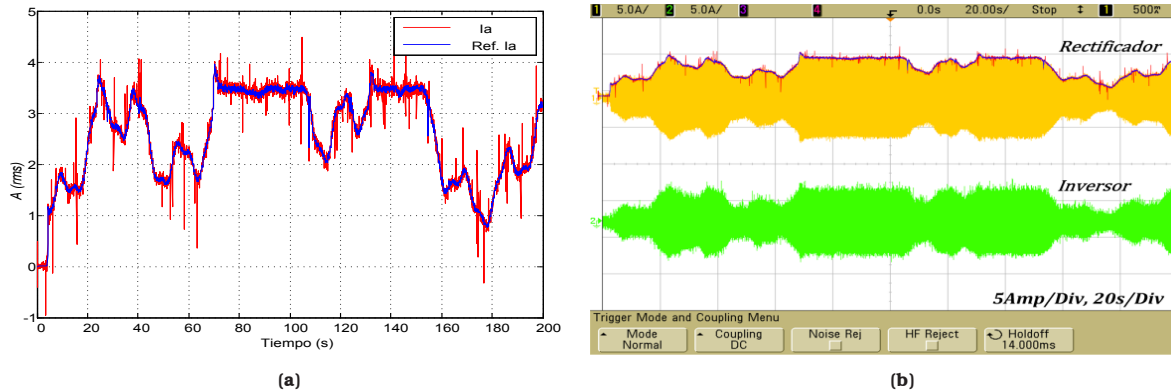


Figura 9. (a) Comportamiento lazo de corriente, con MPPT a lazo abierto, (b) Comparación corriente medida en generador y referencia del lazo de control.

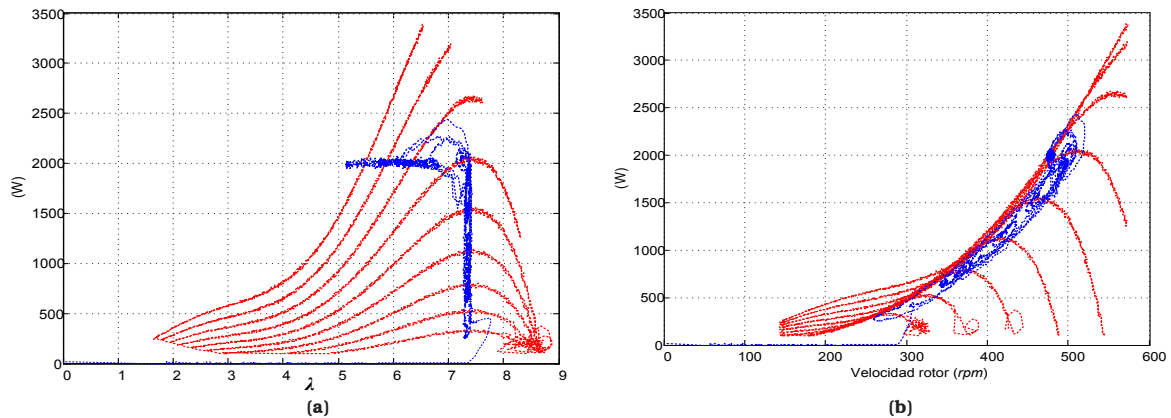


Figura 10. Comportamiento del algoritmo MPPT a lazo abierto, (a) en función a λ , (b) en función de la velocidad de rotación (rpm).

trayectoria permanece superpuesta sobre la curva correspondiente a la velocidad de viento presente.

5. Conclusión

Este artículo se presenta el desarrollo experimental de un emulador de SCEE utilizando un variador de frecuencia que acciona un motor de corriente alterna emulando una turbina eólica. La velocidad de rotación es impuesta por una unidad de procesamiento DSP. Se utiliza la estimación del par electromagnético ejercido por el GSIP el cual se evita el uso de sensores de par en el eje mecánico. El comportamiento experimental del emulador ante un perfil de viento y una dinámica de la turbina eólica conocida es satisfactorio. Con el uso de emulador implementado se permite la repetitividad de las condiciones ambientales programadas entregando la energía generada por el emulador de la turbina a la red comercial mediante el convertidor de potencia utilizado.

Referencias bibliográficas

1. H. Yang, Z. Wei, L. Chengzhi, Optimal design and techno-economic analysis of a hybrid solar-wind power generation system, *Applied Energy*, Vol. 86, (2009), 163-169.
2. Predescu M et al. Wind Tunnel Assessment of Small Direct Drive Wind Turbines with Permanent Magnets Synchronous Generators. In *International Conference on Renewable Energies and Power Quality, ICREPQ '08*, Santander, Spain; March 12-14, 2008.
3. Predescu M, Bejinariu A, Mitroi O, Nedelcu A, Influence of the Number of Blades on the Mechanical Power Curve of Wind Turbines. In *International Conference on Renewable Energies and Power Quality, ICREPQ '09*, Valencia, Spain; April 15-17, 2009.
4. Martinez F., Herrero L., De Pablo S., Open loop wind turbine emulator, *Renewable Energy*, Vol. 63, (2014), pp. 212-221.

5. Kumsup S., Tarasantisuk, C., Real-time wind turbine emulator for testing wind energy conversion systems, *Energy Conference and Exhibition (EnergyCon), 2010 IEEE International*, (2010), pp.7-9.
6. Bouzid M., Zine S., Allaoui T., Massoum A., Adaptive Fuzzy Logic Control of Wind Turbine Emulator, *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*, Vol. 4, No. 2, (2014), pp. 233-240.
7. N. C. Sahoo, A. S. Satpathy, N. K. Kishore, B. Venkatesh, D.c. motor-based wind turbine emulator using LabVIEW for wind energy conversion system laboratory setup, *International Journal of Electrical Engineering Education*, Vol. 50, (2013), pp. 111-126.
8. Seman S, Iov F, Niiranen J, Arkkio A, Comparison of Simulators for Variable Speed Wind Turbine Transient Analysis. *International Journal of Energy Research*, Vol. 30, (2006), 713-728.
9. Beltran B, Ahmed-Ali T, Benbouzid MEH. Sliding Mode Power Control of Variable-Speed Wind Energy Conversion Systems, *IEEE Trans Energy Conversion*, Vol. 23, (2008), 551-558.
10. S. Bhowmik, R. Spée, J. H. R. Enslin, Performance Optimization for Doubly Fed Wind Power Generation Systems, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 35, (1999), 949-58.
11. Munteanu I, Cutululis NA, Brateu AI, Ceanga E, Optimal Control of wind energy Systems, Springer-Verlag London, 2008.
12. Kazmierkowski MP, Blaabjerg F, Krishnan R. Control in Power Electronics Selected Problems. San Diego, California: Elsevier; 2002.
13. L.G. González, E. Figueres, G. Garcerá, O. Carranza, Maximum-power-point tracking with reduced mechanical stress applied to wind-energy-conversion systems. *Applied Energy*, Vol. 87, (2010), 2301-2312.
14. L.G. Gonzalez, E. Figueres, G. Garcerá, O. Carranza, Modelling and Control in Wind Energy Conversion Systems (WECS), In: 13th International European Conference on Power Electronics and Applications, EPE2009, Sep 8-10, 2009, Barcelona, Spain.
15. L.G. Gonzalez, E. Figueres, G. Garcerá, O. Carranza, F. Gonzalez-Espin, Synchronization techniques comparison for sensor less control applied to Wind Energy Conversion Systems (WECS), In: 13th International European Conference on Power Electronics and Applications, EPE2009, Sep 8-10, 2009, Barcelona, Spain.
16. L.G. González, E. Figueres, G. Garcerá, R. González, Effects of the PWM carrier signals synchronization on the DC-link current in back-to-back converters, *Applied Energy*, Vol. 87, (2010), 2491-2499.
17. L. G. Gonzalez, G. Garcerá, E. Figueres, Mejora de la eficiencia y de las prestaciones dinámicas en procesadores electrónicos de potencia para pequeños aerogeneradores sincrónicos operando en régimen de velocidad variable. Universidad de Valencia, 2011.
18. Texas Instruments, RTDX 2.0. Reference Guide, TMS320x281x DSP Literature Number: SPRUFC7, October 2007.
19. E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, Desing of a Maximum Power Tracking System for Wind-Energy-Conversion Applications, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 53, (2006), 486-94.
20. Md. Arifujjaman, M. Tariq Iqbal, J.E. Quicoe, Energy capture by a small wind-energy conversion system, *Applied Energy*, Vol.85, (2008), 41-51.
21. B. Neammanee, K. Krajangpan, S. Sirisumrannukul, S. Chatratana, Maximum Peak Power Tracking-Based Control Algorithms with Stall Regulation for Optimal Wind Energy Capture, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 128, (2008), 411-417.
22. Koutroulis E, Kalaitzakis K, Design of a Maximum Power Tracking System for Wind-Energy-Conversion Applications, *IEEE Trans Ind Electronics*, Vol. 53, (2006), 486-494.
23. Senjyu T et al. Sensor-less maximum power point tracking control for wind generation system with squirrel cage induction generator, *Renewable Energy*, Vol. 34, (2009), 994-999.

Recibido el 15 de Septiembre de 2014

En forma revisada el 16 de Marzo de 2015