Ingeniería Energética Vol. XXXII, 3/2011 Agosto – Noviembre p-75- 86 ISSN 1815 - 5901

Simulación del Comportamiento Dinámico de un Pequeño Aerogenerador de Imán Permanente Sin Multiplicador en operación autónoma haciendo uso del MatLab

Utilization of Software MatLab in the dynamic simulation of Direct driven Permanent Magnet generator for wind turbine in autonomous operation

Osley - López González
Alberto Nilo - Basanta Otero

Recibido: Septiembre del 2009
Aprobado: Abril del 2010

Resumen/ Abstract

En este trabajo los autores hacen uso del software MATLAB SIMULINK versión 7.7.0.471 R2008b para el análisis del comportamiento de un sistema generación eólico de 2 kW autónomo sin multiplicador con generador de imanes permanentes y batería de Plomo-ácido. Se utilizan para ello los modelos de los generadores de imanes permanentes, batería, convertidores así como otros elementos del sistema eléctrico existente en el toolbox SimPowerSystems de este software y se obtiene y discute el comportamiento dinámico de las variables del conjunto turbina-generador, las variables del bus de directa, así como también las variables de la carga, ante diferentes condiciones de trabajo del sistema. Los resultados basados en simulaciones muestran el correcto funcionamiento de todas las variables de control que regulan el sistema generador eólico-elemento almacenador-carga eléctrica consumida, cuando se somete a perturbaciones típicas como lo son la variación en racha del viento y variación de la carga repentina.

Palabras clave: aerogenerador de imanes permanentes sin multiplicador autónomo

The utilization of the popular software MATLAB SIMULINK 7.7.0.471 in order to analyze a 2kW Direct driven Permanent Magnet generator for wind turbine in autonomous operation, including battery of Lead-acid is exposed by the authors. The existent models of the SimPowerSystems MATLAB toolbox are used in order to obtain and discuss the dynamic behavior of the principal variables under different conditions of work of the system.

Key words: autonomous operation, permanent magnet generator ,wind turbines

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la energía eólica se ha convertido en una de las más importantes y prometedoras fuentes de energías renovables, debido a que es una energía limpia, no contaminante y disponible en la naturaleza. Es el sector energético que más crecimiento ha tenido en estos tiempos. Nuestro país no se ha mantenido ajeno a esta tendencia de introducir la energía eólica, y un grupo de investigadores se han dedicado al estudio del tema [1]. En el caso de este sector de generación se pueden establecer dos grandes grupos, los primeros son aquellos que están conectados a la red eléctrica y los otros los que forman parte de sistemas autónomos. Ambos presentan

particularidades en su concepción, que exigen una mayor preparación por parte de los especialistas. Dentro de las características más notables que lo diferencian se encuentra que los sistemas autónomos en su mayoría presentan un elemento almacenador de energía (usualmente baterías de plomo-acido) y siempre tienen que abastecer el estado de carga de los usuarios, que puede variar desde cero hasta la potencia máxima permisible, no siendo esto último así en los aerogeneradores conectados a la red, pues estos siempre tienen la posibilidad de suministrar la mayor potencia posible a la red eléctrica, la cual se puede considerar como un bus infinito, sin importar el estado de carga de los usuarios. La operación de aerogeneradores en conjunto con baterías crean importantes retos a los especialistas debido al carácter aleatorio y de difícil predicción de la energía del viento, y las características intrínsecas de la batería que requieren un control de carga que permita alargar su vida útil, es importante destacar que la batería representa aproximadamente un 20 % del costo del sistema total. Por tal razón es importante conocer como responden estos sistemas ante este tipo de comportamiento del viento y ante las diferentes perturbaciones comunes que puedan ocurrir. Esto permitirá, por una parte, hacer una mejor selección del equipamiento a adquirir y por la otra operar de mejor forma dichos sistemas de manera de mantener un suministro de energía eléctrica con la calidad requerida. Para esto es necesario disponer de modelos que simulen estos fenómenos.

En este trabajo los autores hacen uso de la potencialidad del popular software MATLAB SIMULINK versión 7.7.0.471 R2008b en el análisis del comportamiento de este tipo de sistemas. Se utilizan para ello los modelos de los generadores de imanes permanentes, batería, convertidores así como otros elementos del sistema eléctrico existente en el toolbox SimPowerSystems de este software y se analiza el comportamiento de un aerogenerador de 2 kW, autónomo de velocidad variable basado en una máquina de imanes permanentes y una batería de plomo-ácido de 100 A-h ante diferentes condiciones de trabajo. Todos los datos del sistema aparecen en el anexo 1.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ANALIZADO

En la figura 1 se muestra un esquema típico del sistema que se analizará, el cual está compuesto por un aerogenerador de velocidad variable y paso fijo compuesto por un generador de imanes permanentes de 2 kW, 150V y una turbina eólica de velocidad variable y paso fijo cuya potencia nominal es de 1.4 kW. La característica de potencia en función de la velocidad del rotor de la turbina en por unidad aparece en la figura 2. La batería presenta una capacidad de 100 A-h y una tensión nominal 148 V. La carga está compuesta por un grupo de consumidores cuyo consumo máximo es de 1.8 kW y 0.8 kVAr. En el anexo 1 aparecen los datos nominales de las componentes del sistema.

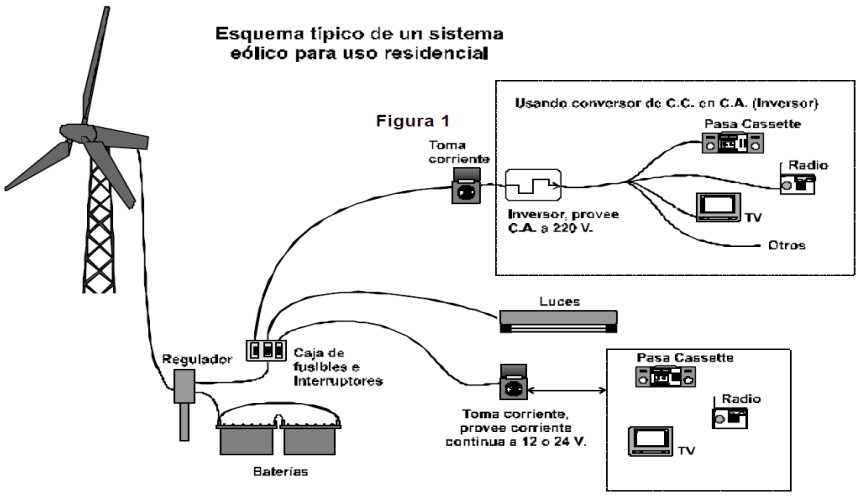

Fig. 1. Sistema eólico autónomo.

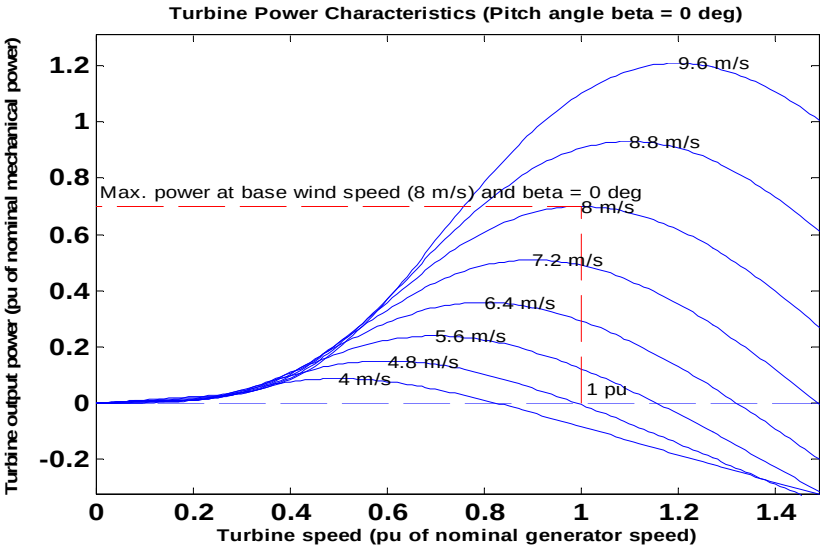

Fig. 2. Característica de la turbina eólica.

MODELOS MATEMÁTICOS DE LAS COMPONENTES DEL SISTEMA

- **Modelo del viento** [2 - 4]

La velocidad del viento varía continuamente con carácter aleatorio en cualquier intervalo de tiempo y es común suponer valor medio constante para determinados intervalos. El más usado es el de diez minutos.
El modelo del viento esta hecho a partir de las expresiones (1) y (2). Este modelo tiene en cuenta el carácter oscilatorio del valor instantáneo de su velocidad así como la existencia de posibles rachas de viento

$$v_v(t) = v_o.\left(1+\sum_k A_k.sen(\omega_k.t)\right)+v_g(t) \quad (1)$$

$$v_g(t) = \frac{2.v_{g\max}}{1+e^{-4(sen(\omega_g t)-1)}} \quad (2)$$

En esta ecuación v_o es la velocidad media del viento, $v_g(t)$ es la expresión en el tiempo de una racha de viento, $v_{g\max}$ el valor máximo que alcanza la racha y ω_g la frecuencia de la racha.

- **Modelo de la turbina eólica** [3 - 5]

El modelo de la turbina eólica que se presenta en este trabajo es el que tiene predefinido el toolbox SimPowerSystems, el cual tiene en cuenta la dinámica de la transformación de la energía que viene del viento, en energía mecánica suministrada al generador, la figura 3 representa el bloque de la turbina.

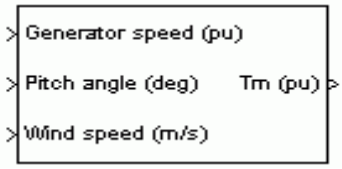

Fig. 3 Bloque de la turbina eólica según el simpowersystems.

La expresión que relaciona la potencia convertida a la forma mecánica en función de la velocidad del viento v_v es la siguiente:

$$P_W = \frac{1}{2}.c_p(\lambda,\theta).\rho.\pi.r^2.v_v^3 \quad (3)$$

En esta expresión ρ es la densidad del aire, *r* el radio del rotor y c_p el coeficiente de potencia que depende de la denominada razón de velocidad de la turbina TSR (Tip Speed Ratio) λ y del ángulo de los palas. El TSR está dado por:

$$\lambda = \frac{r.\omega_{RT}}{v_V} \tag{4}$$

La función que relaciona el coeficiente de potencia con el TSR y el ángulo de las palas está dada por:

$$Cp(\lambda,\beta) = C1\times(\frac{C2}{\lambda i} - C3\times\beta - C4)\times e^{-\frac{C6}{\lambda i}} + C6\times\lambda \tag{5}$$

$$\frac{1}{\lambda i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\times\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \tag{6}$$

En (5) y (6) se muestran las expresiones adoptadas por el bloque de la figura 3, estas expresiones se han obtenido mediante estudios empíricos. En la figura 4 se representa el diagrama interno del bloque de la turbina.

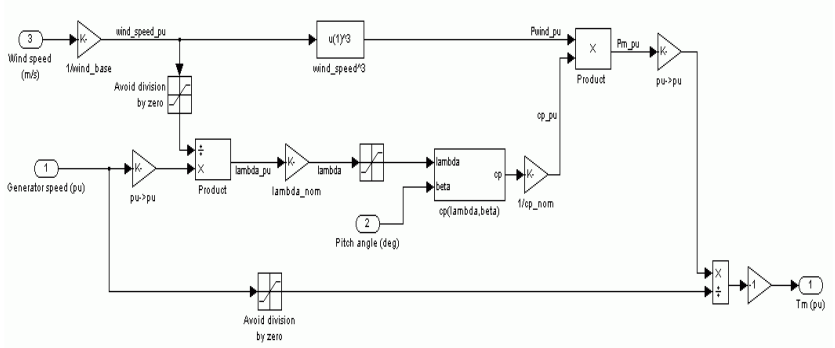

Fig. 4 Diagrama interno del bloque turbina.

En la figura 2 se representa la variación de la potencia de la turbina versus la velocidad angular para diferentes valores de velocidad del viento.

- **Modelo del generador imanes permanentes** [6] - [8].

En la figura 5 se muestra el bloque del generador de imanes permanentes según el toolbox simpowersystems. La máquina tiene la posibilidad de representarse de dos maneras una mediante un modelo sinusoidal de los flujos y otra mediante un modelo trapezoidal. En este trabajo se utilizó la segunda variante.

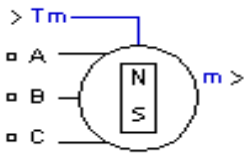

Fig. 5 Bloque generador imanes permanentes.

El modelo asume que el circuito magnético es linear sin saturación del hierro del rotor y el estator, esto puede ser posible debido al gran entrehierro que usualmente presentan este tipo de máquinas.
Las expresiones de la (7 a 10) son expresadas en un marco de referencia de fase (marco a-b-c). Note que la inductancia de fase Ls es asumida como constante y no varía con la posición del rotor.

$$\frac{d}{dt}i_a = \frac{1}{3\cdot L_s}\left[2\cdot u_{ab} + u_{bc} - 3\cdot R_s\cdot i_a + \lambda\cdot p\cdot\omega_f\left(-2\cdot\Phi_a' + \Phi_b' + \Phi_c'\right)\right] \tag{7}$$

$$\frac{d}{dt}i_b = \frac{1}{3 \cdot L_s}\left[-u_{ab} + u_{bc} - 3 \cdot R_s \cdot i_b + \lambda \cdot p \cdot \omega_r\left(\Phi_a' - 2 \cdot \Phi_b' + \Phi_c'\right)\right] \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt}i_c = -\left(\frac{d}{dt}i_a + \frac{d}{dt}i_b\right) \quad (9)$$

$$T_e = p \cdot \lambda\left(\Phi_a' \cdot i_a + \Phi_b' \cdot i_b + \Phi_c' \cdot i_c\right) \quad (10)$$

- **Sistema Mecánico**

El sistema mecánico representa la dinámica mecánica de la máquina.

$$\frac{d}{dt}\omega_r = \frac{1}{J}\left(T_e - F \cdot \omega_r - T_m\right) \quad (11)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_r \quad (12)$$

- **Modelo de la batería**

La figura 6 representa al bloque de la batería, es importante señalar que versiones anteriores del toolbox no la tenían modelada.

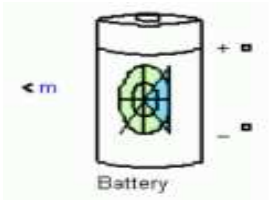

Fig. 6. Bloque batería según el toolbox simpowersystems.

El bloque batería implementa un modelo genérico para representar las más populares tipos de baterías recargables. En la figura 7 se muestra el circuito equivalente usado para simular la batería:

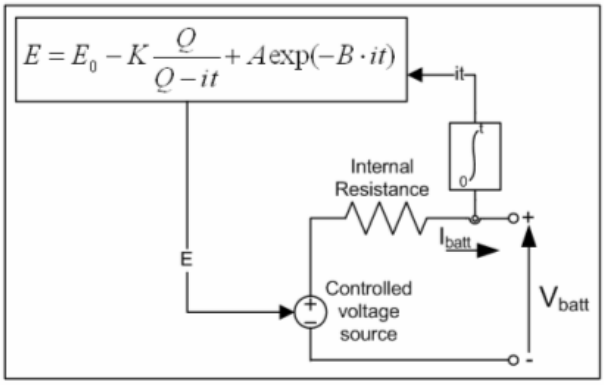

Fig. 7 Circuito equivalente del modelo de la batería

El modelo asume que la resistencia interna no varía durante la carga y descarga, tampoco varía con la amplitud de la corriente. Los parámetros del modelo son deducidos de la característica de descarga y se asumen son los mismos para la carga. La capacidad de la batería no cambia con la amplitud de la corriente (no se manifiesta el efecto Peukert). La temperatura no afecta el comportamiento del modelo. La autodescarga de la batería no se representa. Esta se puede representar adicionándole una gran resistencia en paralelo con los terminales de la batería. La batería no tiene efecto memoria.

- **Modelo de los consumidores**

Los consumidores son representados por un bloque de carga trifásica, figura 8.

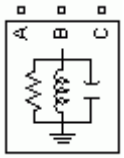

Fig. 8. Bloque carga trifásica.

EL bloque carga RLC paralelo trifásica, implementa una carga trifásica balanceada como una combinación paralela de los elementos resistencia, inductancia y capacitancia (RLC). A la frecuencia especificada, la carga exhibe una impedancia constante. Este bloque brinda la posibilidad de seleccionar la conexión de la carga (delta o estrella).

MODELO EN SIMULINK DEL SISTEMA

En la figura 9 se muestra el modelo en SIMULINK del sistema analizado.

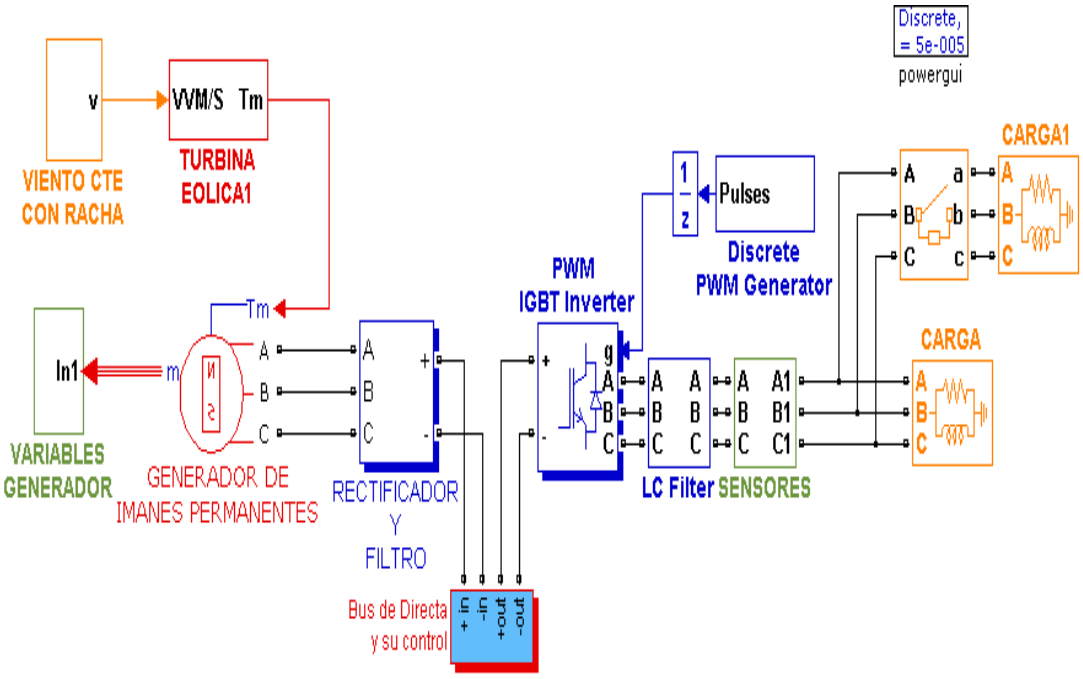

Fig. 9. Modelo en SIMULINK del sistema.

Como se aprecia, está compuesto por varios bloques, de izquierda a derecha nos encontramos con un bloque denominado variables del generador, este recoge la información pertinente a los valores de corriente, tensión, velocidad angular y torque electromagnético, entre otras variables. El bloque generador, el bloque velocidad del viento, el bloque turbina eólica, este último bloque incluye el modelo de la turbina presentado en el epígrafe 3.2, además de su control. El próximo bloque es el rectificador y filtro, este modela una rectificador trifásico a diodos y un filtro L-C. El bloque central denominado bus de directa y su control esta formado por la batería y su control a través de un chopper, así como dos interruptores con su control que determinan cuando funciona la batería como fuente generadora y cuando el generador eólico. El bloque inversor esta formado por un puente trifásico a IGBT, además se puede apreciar que existe un bloque que es el encargado de suministrar los pulsos a los semiconductores, denominado Discrete PWM generador, el bloque LC filter representa el filtro de alterna necesario para obtener formas de ondas sinusoidales en la carga, el bloque sensores tiene los instrumentos de medición que permiten ver las formas de onda de tensión y corriente de la carga, además tiene un bloque de protección de la carga., finalmente aparecen los bloques carga uno, carga y el interruptor que los separa o los une.

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA ANTE DIFERENTES CONDICIONES DE TRABAJO

En el presente trabajo se analiza el comportamiento del sistema durante dos condiciones de trabajo diferentes y se muestran los resultados principales de la simulación. Las situaciones seleccionadas son la variación en racha del viento y variación de la carga.

- **Variación del viento en racha**

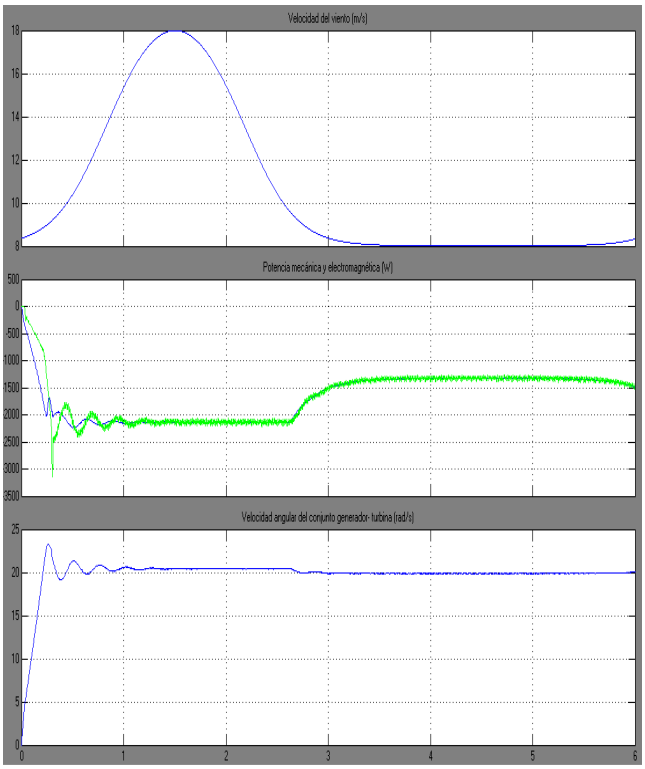

Fig. 11. Velocidad del viento (m/s), Potencia mecánica y electromagnética (W) y velocidad angular (rad/s).

En la figura 11 (gráfico superior) se observa la variación del viento en racha a partir de los 8 m/s con un valor máximo de 16 m/s, es importante tener en cuenta que el primer segundo de la corrida no arroja resultados confiables dado que al comienzo de la simulación no se inicializaron las variables con valores lógicos (la mayoría tienen valor igual cero). Observando la variación de potencias en el tiempo, figura 11 (gráfico intermedio) se apreciará que ambas alcanzaron el estado estable y lo mantuvieron hasta aproximadamente 2,75 segundos donde las potencias comenzaron a disminuir hasta un valor cercano a 1400 W, efecto provocado por la disminución del viento, desde 9 hasta 8 m/s este último es el nominal y según los datos de la turbina eólica a ese valor le correspondería una potencia de 1400W, en el caso de la velocidad angular, figura 11 (gráfico inferior), en el momento que comienza a disminuir la potencia mecánica también esta disminuye aunque en un valor pequeño . La figura 12 muestra las variables de la batería, donde el estado de carga está aumentando debido la circulación de la corriente hacia la batería (corriente negativa), es interesante ver que en el mismo instante que comenzó a variar las potencias en la figura 11 (gráfico superior), ocurre un decremento del valor de la corriente de la figura 12 (gráfico inferior), esto se debe a que cuando el viento era mayor de 10 m/s la turbina era capaz de entregar mayor potencia suministrándole la necesaria a la carga y la restante a la batería, pero en el momento que disminuye el viento, solamente puede entregar potencia a la carga.

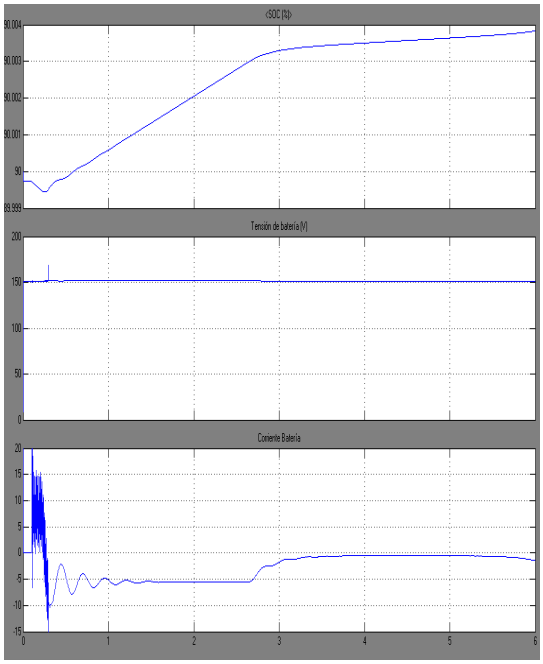

Fig. 12. Variables batería (Porciento de carga (SOC%)-Tensión (V)- Corriente (A)).

En la figura 13 se muestra el comportamiento del torque mecánico y electromagnético, que al igual que las potencias sufren un decremento de sus valores debido a la disminución de la velocidad del viento. En la figura 14 se puede apreciar el comportamiento de la tensión del bus de directa, aquí se observa que la variación de la tensión del bus es casi imperceptible aspecto positivo a favor del sistema.

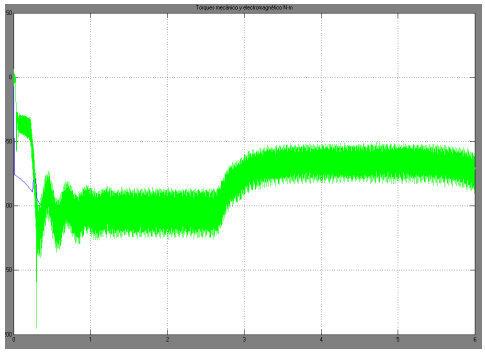

Fig. 13. Torque mecánico y electromagnético (N-m).

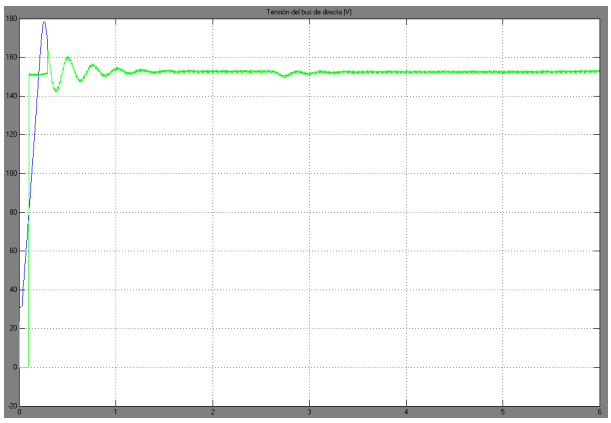

Fig. 14. Tensión en el bus de directa (V).

En la figura 15 se puede apreciar las tensiones y corrientes en la carga, en la zona central del gráfico se representa la imagen ampliada de ambos parámetros existiendo total claridad en su forma de onda sinusoidal, aunque no puede determinarse a simple vista, se determinó el tiempo entre máximos consecutivos indicando un tiempo de 16.66 ms (60 Hz), las formas de ondas tres y cuatro de la figura 15 son los valores eficaces de la tensión y corriente.

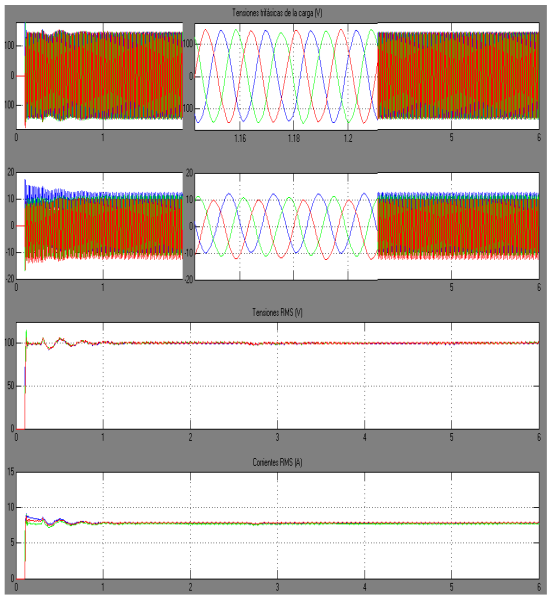

Fig. 15. Tensiones y corrientes trifásicas en la carga

- **Variación de la carga (3-5 segundos)**

En la figura 16 y 17 se observan que la entrada de la carga extra (a los 3 segundos) se manifiesta como una variación del torque electromagnético, el cual tiende a aumentar instantáneamente y a oscilar junto al mecánico hasta alcanzar el estado de equilibrio poco antes de un segundo después, en el momento que se retira la carga extra ocurre el proceso inverso, ahora el torque electromagnético tiende a disminuir, aunque nuevamente se llega a un estado de equilibrio igual al anterior. El comportamiento de la velocidad angular es lógico pues el aumento del torque repentinamente, hace que se retarde un poco la velocidad, al igual que cuando ocurre una disminución del torque electromagnético tiende a acelerarse la máquina, con un pequeño aumento de velocidad.

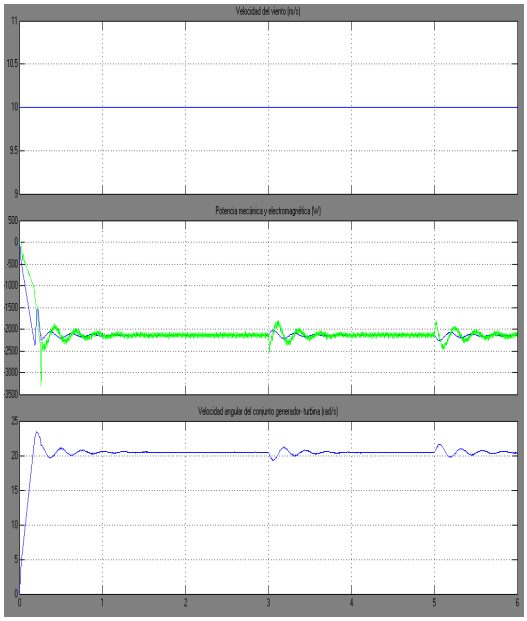

Fig. 16 Velocidad viento(m/s), Potencia mecánica y electromagnética (W) y velocidad angular (rad/s).

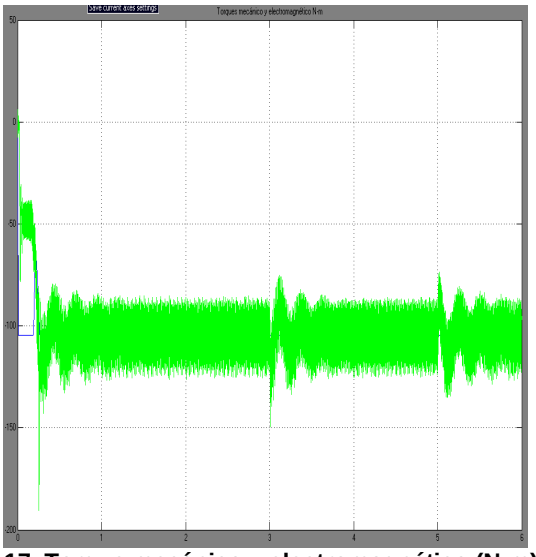

Fig. 17. Torque mecánico y electromagnético (N-m).

En el transitorio antes mencionado, se debe destacar que siempre el estado de equilibrio se logró a un valor igual al máximo posible por el generador eólico. Al igual que en el caso anterior, la figura 18 (gráfica inferior) muestra una corriente de carga de la batería, que varía su valor disminuyéndolo en el momento que ocurre el aumento de carga, esto pasa debido a que el generador eólico siempre tratará de cubrir la carga, en la propia figura 18 (gráfica superior) se aprecia que el porciento de carga describe un aumento, efecto acorde con la variación de corriente de carga de la batería.

La figura 19 muestra la tensión del bus de directa, en la cual se puede apreciar una variación debido a la entrada y salida de la carga extra, esta variación también se refleja en la figura 20 donde aparecen las tensiones y corrientes trifásicas de la carga, se aprecia claramente el aumento pronunciado de la corriente, no siendo tan significativo la disminución de la tensión.

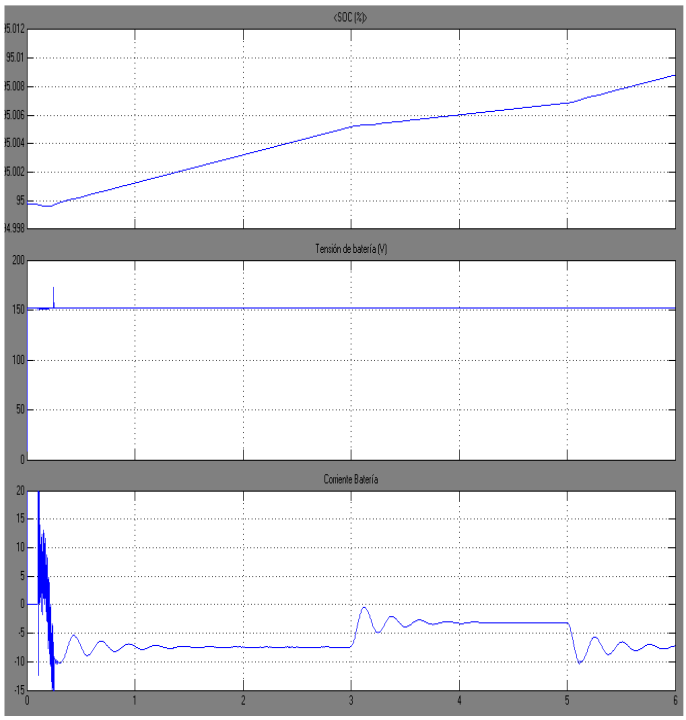

Fig. 18 Variables batería (Porciento de carga (SOC%)-Tensión (V)- Corriente (A)).

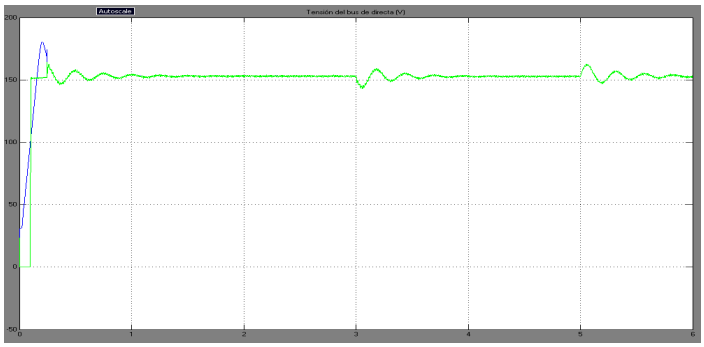

Fig. 19. Tensión en el bus de directa (V).

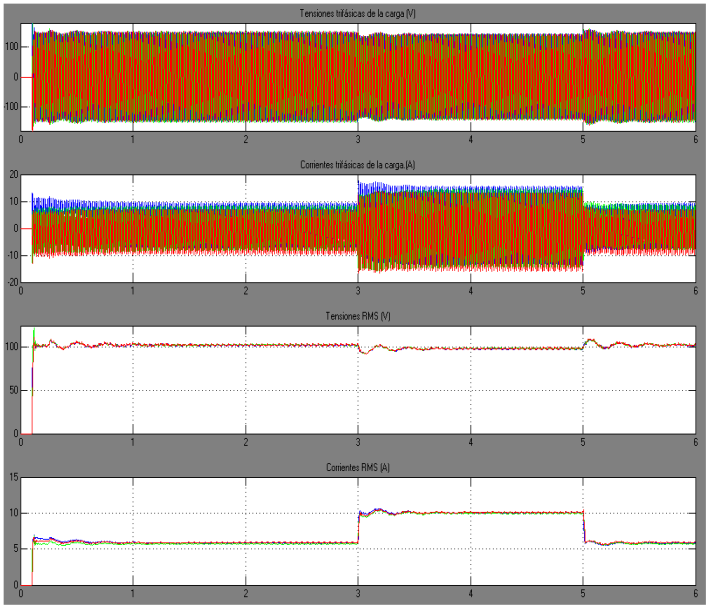

Fig. 20. Tensiones y corrientes trifásicas en la carga.

CONCLUSIONES

Se ha demostrado a través de este trabajo la enorme potencialidad del MATLAB SIMULINK, particularmente del toolbox denominado SimPowerSystems para llevar a cabo el análisis dinámico de sistemas eólicos autónomos. El sistema bajo estudio demostró ser robusto cuando fue perturbado mediante una racha de viento considerable, así como cuando se sometió a una variación de carga repentina. Una de las características más notable del sistema de control fue la correcta regulación de la tensión del bus de directa, no permitiendo grandes variaciones , factor que influye directamente en la tensión de alimentación de los consumidores, garantía de una mejor calidad de la energía. El presente trabajo es ejemplo de las importantes posibilidades que nos brinda el software usado para la modelación y análisis, además como paso introductorio en el futuro diseño de prototipos experimentales de sistemas eólicos autónomos.

REFERENCIAS

[1[COLECTIVO DE AUTORES, G. E. N. Diez Preguntas sobre Energía Eólica, CUBASOLAR. p 335 p. ISBN 978-959-7113-34-8.
[2] WILBERT ACUÑA, A. C.OSTA, MIGUEL CASTRO. Utilización del MATLAB en el Análisis de Sistemas Híbridos Diesel Eólicos. Simulación del Sistema. En: V Conferencia Internacional de Energías Renovables, Ahorro de Energía y Educación Energética, CIER 2007. La Habana, Cuba. Mayo del 2007.

[3] XING ZUOGIAL, Z. Q., YAO XINGJIA, JING YANJUN. Integration of Large Doubly Fed Wind Power Generator System into Grid. En: International Conference on Electrical Machines and Systems. Nangking, China. September 2005.
[4] J. G. SLOOTWEG, W. H. D. H., H. POLINDER, W. L. KLING."General Model for representing Variable Speed Wind Turbines in Power System Dynamic Simulation". IEEE Transactions on Power Systems.February,2003.vol18, No 1,
[5] SIEGFRIED HEIER. Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems. Editado por: John Wiley & Sons Ltd. 1998. ISBN ISBN 0-471-97143-X.
[6] GRENIER, D., L.-A. DESSAINT, O. AKHRIF, Y. BONNASSIEUX, AND B. LEPIOUFLE. "Experimental Nonlinear Torque Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor Using Saliency". IEEE Transactions on Industrial Electronics. October 1997, vol. 44, No. 5, p.680-687.
[7] AMENEDO, J. L., J.C. DÍAZ Y S. GÓMEZ;Sistemas Eólicos de Producción de Energía Eléctrica. Rueda. Rueda,S.L, Madrid, 2003. p 461, ISBN 84-7207-139-1.
[8] KELVIN TAN. "Student Member". IEEE, Syed Islam,Senior Member,IEEE;Optimum Control Strategies in Energy Conversion of PMSG Wind Turbine System Without Mechanical Sensors, IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION. JUNE 2004.vol. 19,No.2,

AUTORES

Osley López González
Ingeniero Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica Instituto Superior Politécnico, José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana. Cuba.
osley.lg@electrica.cuaje.edu.cu

Alberto Nilo Basanta Otero.
Ingeniero Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica, Instituto Superior Politécnico, José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana. Cuba.
e-mail: alberto@electrica.cujae.edu.cu

ANEXO 1

DATOS DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA

PARÁMETRO	VALOR
Potencia Nominal del Generador en kW	2
Tensión Nominal en V	150
Velocidad Nominal en r/min	200
Número de Polos	36
Resistencia del Estator en ohms	0,1764
Inductancia del Estator en mH	1,5
Tensión en Vacío en Volts por Kr/min	850
Inercia en Kg-m^2	0,5
Fricción en N-m-s	0,01
Filtros de Directa L (µH)-C(µF)	400-7000
Filtros Alterna L (mH)-Qc(kvar)	2-3000
Tensión Nominal Batería V	148
Potencia Nominal de la Turbina Eólica (kW)	1,4
Velocidad del Viento Nominal m/s	8