



Ingeniería Energética

E-ISSN: 1815-5901

orestes@cipel.ispjae.edu.cu

Instituto Superior Politécnico José Antonio

Echeverría

Cuba

López, Osley; Rojas, Dieter; Vilaragut, Miriam; Costa, Angel  
Simulación de aerogeneradores de velocidad y paso variable utilizando redes neuronales artificiales  
Ingeniería Energética, vol. XXXI, núm. 1, 2010, pp. 35-42  
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría  
La Habana, Cuba

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=329127743005>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica  
Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto



# Simulación de aerogeneradores de velocidad y paso variable utilizando redes neuronales artificiales

Osley López  
Dieter Rojas

Miriam Vilaragut  
Angel Costa

Recibido: Diciembre del 2008  
Aprobado: Diciembre del 2008

## Resumen/ Abstract

Con el objetivo de aprovechar al máximo la energía del viento y, a la vez, llevar a cabo un control rápido y preciso de la potencia máxima suministrada al aumentar la misma se han venido utilizando cada vez más sistemas de control capaces de operar en el punto óptimo de entrega de potencia para determinados valores de velocidad del viento y limitarla cuando éste supera su valor máximo. Este sistema de control, considerado en su conjunto, debe responder con la exactitud, estabilidad y rapidez necesaria ante la variabilidad y aleatoriedad del viento. La relación entre sus variables de salida (velocidad de la turbina y paso de la pala) y la de entrada (velocidad del viento) que sea capaz de aprovechar la máxima potencia disponible en el viento en una zona de trabajo y de limitarla en otra, es altamente complicada pues depende de factores constructivos y de diseño de la turbina y del generador. Esta característica es muy difícil de representar (sea con el objetivo de simulación o con el de control) mediante relaciones funcionales matemáticas convencionales. En este trabajo los autores proponen representar dicha relación mediante la utilización de Redes Neuronales Artificiales entrenadas para ser capaces de responder adecuadamente ante cualquier entrada. Basados en los parámetros y características de un aerogenerador real de velocidad y paso variables y utilizando el toolbox de Redes Neuronales del MATLAB SIMULINK los autores obtuvieron un modelo neuronal del sistema de control de la velocidad y el paso de la turbina comprobando su correcta operación ante diferentes perturbaciones de la red eléctrica mediante este mismo lenguaje de simulación. Se demostró que estas redes pueden ser utilizadas con éxito en la simulación y el control de este tipo de máquinas en cualquier condición de operación.

Palabras claves: simulación de aerogeneradores, modelo neuronal para aerogeneradores

*In order to capture the maximum energy from the wind, control systems operating always at an optimum power has been utilized. This control system, considered as a whole, must be able of respond with an adequate precision and speed in response to the randomness and variability of the wind.*

*The relationship between the wind speed, the blade pitch and the generator speed in order to produce the maximum power and also be able to limit the output power for large wind speeds is a very complicated one and it is very difficult to find its mathematical function. In this paper, the authors, utilizing the MATLAB SIMULINK toolboxes, propose representing this functional relation by means of an Artificial Neural Network (ANN). The parameters and characteristics of an existing wind turbine generator are utilized and it is demonstrated that it is possible to use an ANN in the simulation and control of a variable speed, variable pitch wind turbine that capture the maximum power from the wind.*

Keywords:

## INTRODUCCIÓN

Una de las tendencias de desarrollo más importantes y actuales en el campo de la construcción de aerogeneradores lo es la realización de turbinas eólicas de paso variable y velocidad variable<sup>1,2,3</sup>. Esto se debe a que, con este tipo de control, se consigue aprovechar al máximo la energía del viento en la zona normal de trabajo y limitar la potencia extraída en la zona de potencia máxima. Ahora bien, debido a lo complejo del proceso de conversión de energía en las turbinas eólicas, la relación entre velocidad del viento, velocidad del rotor y potencia extraída es altamente no lineal y si a eso se le añade que es necesario encontrar también el punto de potencia máxima se llega a la conclusión de que el control para este tipo de turbina es muy difícil de ser realizado con algoritmos de control convencionales.

Debido a esto, algunos investigadores han propuesto la utilización de la Inteligencia Artificial para conseguir una relación funcional basada en un proceso de aprendizaje y adaptación. En particular se han utilizado con éxito la Lógica Difusa<sup>4</sup> y las Redes Neuronales Artificiales (RNA)<sup>5</sup>. Siguiendo esta misma línea en este trabajo se propone la utilización de una RNA para representar esta relación utilizando el toolbox correspondiente del SIMULINK y elaborando un programa especial para esta aplicación.

Primeramente se hace un planteamiento del problema, explicándose la complejidad de las relaciones funcionales que justifican el empleo de la RNA, posteriormente se describe la RNA utilizada y el programa desarrollado para su utilización. Finalmente se aplica esta red al estudio de diferentes procesos dinámicos que ocurren en el aerogenerador.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Como se planteó anteriormente, la complejidad del proceso de conversión de energía del viento a energía mecánica en un aerogenerador es grande, su expresión matemática simplificada se basa en consideraciones de carácter empírico y dan lugar a la siguiente expresión para la potencia convertida a la forma mecánica en función de la velocidad del viento<sup>3,6</sup>:

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

En esta expresión  $\rho$  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)  $\lambda$  y del ángulo de los palas  $\theta$ . El TSR está dado por:

$$\lambda = \frac{r \cdot \omega_{RT}}{v_v} \quad (2)$$

Donde  $\omega_{RT}$  es la velocidad del rotor de la turbina la cual está relacionada con la velocidad del rotor del generador mediante la razón del multiplicador:

$$k_m = \frac{\omega_R}{\omega_{RT}} \quad (3)$$

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

$$c_p(\lambda, \theta) = c_1 \cdot \left( c_2 \cdot \frac{1}{\Lambda} - c_3 \cdot \theta - c_4 \cdot \theta^x - c_5 \right) \cdot e^{-c_6 \frac{1}{\Lambda}}$$

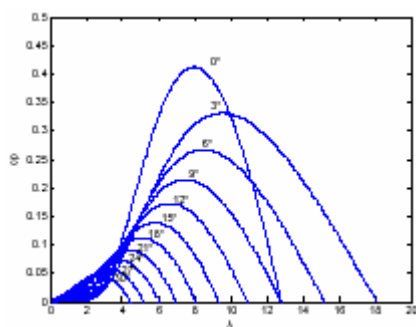
$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{\lambda + 0,08 \cdot \theta} - \frac{0,035}{1 + \theta^3} \quad (4)$$

En turbinas de tamaño medio, como la que se analizará pueden suponerse los siguientes valores para los coeficientes:

$$c_1 = 0,5; c_2 = 116; c_3 = 0,4; c_4 = 0;$$

$$c_5 = 5; c_6 = 21$$

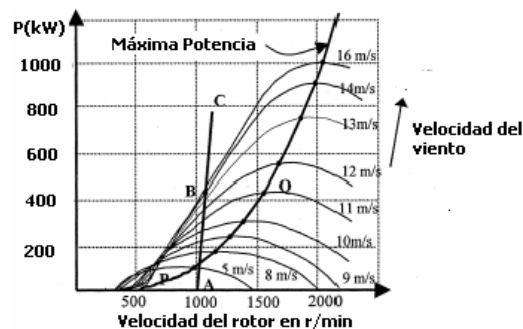
En la figura 1 puede apreciarse la variación de este coeficiente de potencia en función del TSR para diferentes valores del ángulo de paso de la pala.



**Fig. 1. Variación del coeficiente de potencia con variación del ángulo de la pala.**

También es importante señalar que, para un ángulo de la pala constante e igual a  $0^\circ$ , la característica de potencia de salida en función de la velocidad del rotor es tal, que siempre existe, para cada velocidad del viento un valor de velocidad del rotor para el cual la potencia extraída es la máxima.

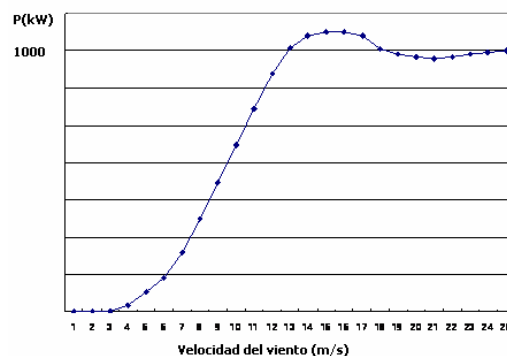
Esto se muestra en la figura 2 con la característica de una turbina de 1000 kW. En este caso, la característica ABC corresponde a la que se obtendría con una máquina de velocidad constante donde puede apreciarse, que la potencia extraída es mucho menor en esta condición. También se muestra en esta figura la característica de potencia máxima.



**Fig. 2. Variación de la potencia con la variación de la velocidad del rotor.**

Si se quiere extraer del viento en todo momento la máxima potencia disponible, es necesario ajustar, para cada velocidad del viento, la velocidad del rotor en un valor al que corresponda la potencia máxima tal como se muestra en la figura 2.

Ahora bien, este proceso debe hacerse hasta llegar a la velocidad máxima, a partir de este momento entra a jugar el ajuste del ángulo de las palas  $\theta$  para conseguir limitar la potencia a su valor máximo y obtener una característica tal como la mostrada en la figura 3.



**Fig. 3. Característica potencia velocidad.**

Como puede apreciarse, a velocidades menores que la de arranque la potencia de salida debe ser cero, para las comprendidas entre este valor y la potencia máxima la velocidad del rotor y la potencia de salida deben determinarse a partir de las ecuaciones de la 1 a la 4 y, mediante un algoritmo de búsqueda, encontrar el punto de máxima en la curva correspondiente a cada

velocidad y finalmente para velocidades mayores que ésta y menores que la de desconexión debe encontrarse el ángulo de las palas que haga que la potencia sea aproximadamente igual a la máxima.

La complejidad de esta relación funcional hace que sea muy difícil representarla o simularla mediante un algoritmo convencional. Debido a esto, se propone utilizar una RNA.

## MODELO BASADO EN UNA RNA

Utilizando las ecuaciones y las condiciones de trabajo explicadas en el epígrafe anterior y los datos del aerogenerador que se muestran en el anexo I, se entrenó una RNA teniendo como entrada la velocidad del viento y como salidas la potencia entregada, la velocidad del rotor y el ángulo de paso de la turbina tal como se muestra en la figura 4.

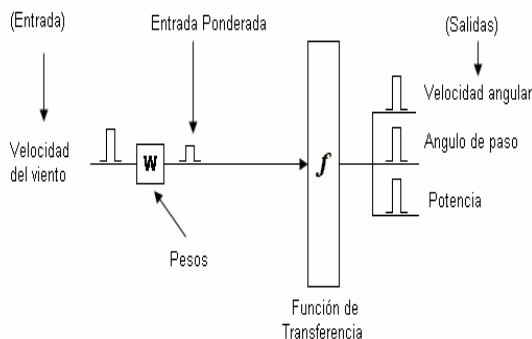


Fig.4. Esquema de la RNA

Para llevar a cabo la simulación utilizando RNA se elaboró un programa denominado EOLO cuya ventana principal con los datos del aerogenerador del anexo se muestran en la figura 5.

La imagen muestra la interfaz de usuario del programa EOLO. En la parte superior, hay una barra de título con el icono del programa y el nombre 'EOLO'. Debajo, hay una barra de menú con 'Archivo'. El área principal está dividida en dos pestañas: 'Hoja de datos' (seleccionada) y 'Simulación'. La pestaña 'Hoja de datos' contiene varios campos de entrada y salida organizados en secciones: 'Parámetros operacionales' (Salida nominal, Velocidad nominal, Velocidad mínima, Velocidad máxima), 'Datos del rotor' (Diámetro del rotor, Rango de revoluciones, Relación de transformación, Momento de inercia), 'Datos del generador' (Potencia nominal, Velocidad nominal, Voltaje nominal, Velocidad sincrónica, Frecuencia, Rango de velocidad, Corriente nominal) y 'Tipo de paso de las palas' (Paso de paso variable, Paso de paso fijo). En la parte inferior, hay botones para 'validar', 'Limpiar', 'Abrir' y 'Guardar'.

Fig. 5. Ventana principal del programa EOLO.

En la figura 6 se muestra la característica de coeficiente de potencia en función del TSR obtenida con este programa.

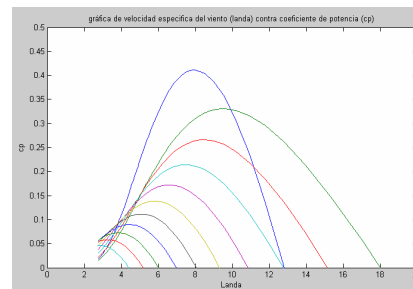


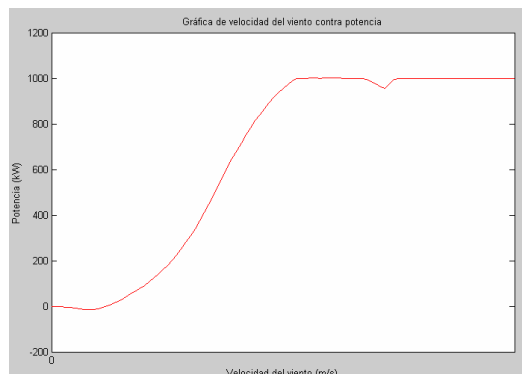
Fig. 6. Característica de coeficiente de potencia en función de TSR obtenida con el programa EOLO.

En la figura 7 se muestra la ventana que permite cambiar los datos de entrenamiento de la RNA.

La imagen muestra la interfaz de usuario para el entrenamiento de la RNA en el programa EOLO. La pestaña 'Simulación' está seleccionada. En esta pestaña, hay una sección 'Patrones de entrenamiento' y una 'Simulación de la Red'. Los campos de entrada incluyen 'Numero de neuronas' (valor 30), 'Numero de iteraciones' (valor 300) y 'Meta a alcanzar' (valor 0). Hay un botón 'Entrenar' para iniciar el proceso.

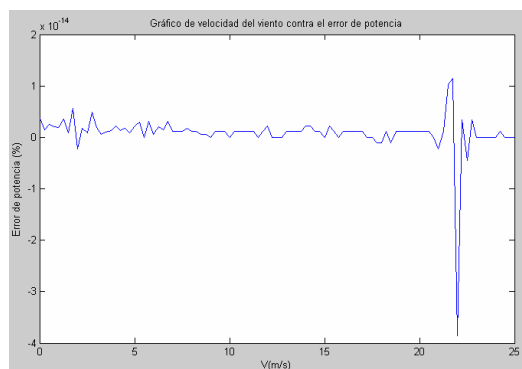
Fig. 7. Ventana para el entrenamiento de la RNA.

En la figura 8 aparece otros de los resultados del programa EOLO, la característica de potencia de salida en función de la velocidad del viento obtenida a partir del entrenamiento de la RNA.



**Fig. 8. Característica de potencia de salida en función de velocidad del viento obtenida con el programa EOLO.**

El programa también evalúa los errores los cuales se muestran en la figura 9. Como puede apreciarse estos errores son prácticamente despreciables. Aunque no se muestra en este trabajo, también el programa calcula y evalúa los errores en la velocidad del rotor y en el ángulo del paso de la turbina.



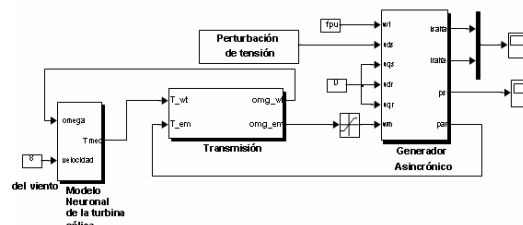
**Fig. 9. Característica del error cometido en función de la velocidad.**

### UTILIZACIÓN DEL MODELO BASADO EN RNA EN EL ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DINAMICO DEL AEROGENERADOR

Este modelo fue utilizado en el análisis del comportamiento dinámico del aerogenerador ante diferentes perturbaciones existentes en la red eléctrica. Para ellos se utilizó el

modelo en SIMULINK que aparece en la figura 10.

Los modelos del generador y la transmisión mecánica son los que aparecen en la referencia 3.

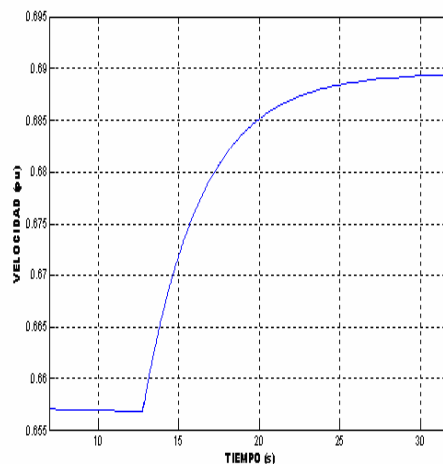


**Fig. 10. Modelo en SIMULINK para el análisis del comportamiento dinámico.**

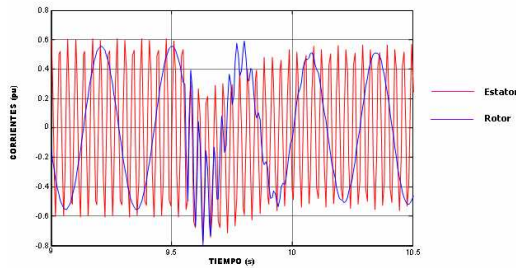
Se analizaron las tres perturbaciones siguientes:

1. Variación brusca de la tensión durante un tiempo prolongado.
2. Valle de tensión.
3. Cortocircuito súbito.

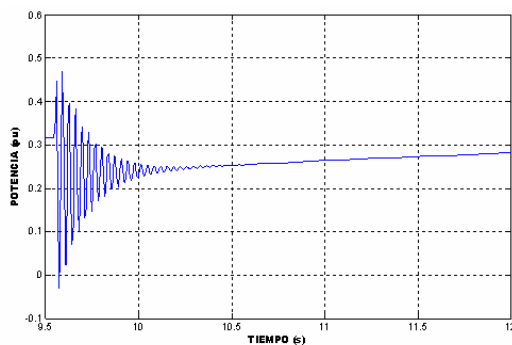
En las figuras 11, 12 y 13 se muestra el comportamiento de la velocidad, las corrientes del estator y el rotor y la potencia entregada ante una disminución de tensión del 15%.



**Fig. 11. Comportamiento de la velocidad ante una disminución de tensión de un 15%.**



**Fig. 12. Comportamiento de las corrientes del estator y el rotor ante una disminución de tensión de un 15%.**



**Fig. 13. Comportamiento de la potencia entregada ante una disminución de tensión de un 15%.**

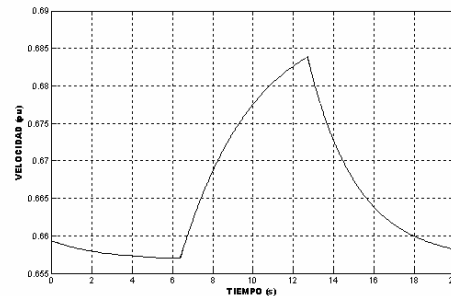
Al disminuir la tensión, y mantenerse constante la velocidad del viento el torque o par electromagnético del generador tiene que mantenerse constante pero como éste es proporcional al cuadrado de la tensión y al deslizamiento<sup>7</sup>, éste último tiene que aumentar y, como es conocido, en el cuadrante de operación generadora, un aumento del deslizamiento implica un aumento de la velocidad tal como indica la figura 11.

En la figura 12 se aprecia muy claramente que, antes de ocurrir la perturbación, la frecuencia del estator es muy superior a la del rotor como es de esperar debido a los pequeños valores de deslizamiento con los que se trabaja en la zona estable. Ahora bien, en el mismo instante de ocurrir la perturbación de tensión aparecen componentes transitorias de corriente continua que inducen tensiones y corrientes de frecuencia de la red en el rotor.

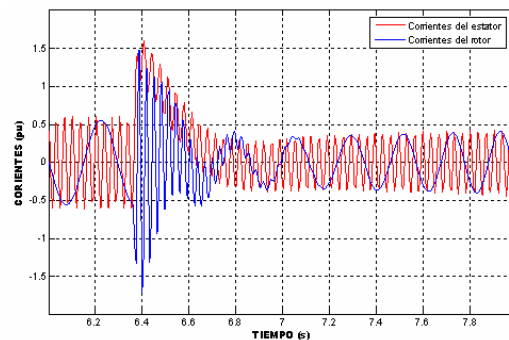
Estas componentes desaparecen muy rápidamente como puede apreciarse, y al volverse a alcanzar el estado estable, la frecuencia del rotor retorna a ser mucho más baja que la del estator (aunque un poco mayor debido a un mayor deslizamiento).

En cuanto al comportamiento de la potencia, al ocurrir la perturbación, se provocan oscilaciones de la misma debidas a la interacción entre las componentes de corriente continua y corriente alterna de las corrientes y tensiones que desaparecen rápidamente y hacen tender la potencia al valor que tenía antes de ocurrir la perturbación ya que la velocidad del viento no ha cambiado.

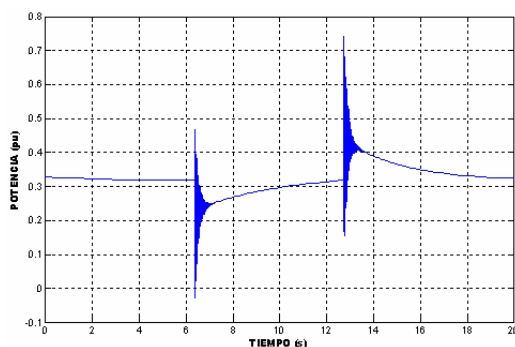
El valle de tensión simulado fue una disminución de la tensión en un 15% durante 4 segundos, pasados los cuales el valor de tensión se recupera. En la figura 14 se muestra el comportamiento de la velocidad, en la figura 15 el comportamiento de las corrientes del estator y el rotor y en la figura 16 el de la potencia.



**Fig. 14. Comportamiento de la velocidad ante un valle de tensión.**



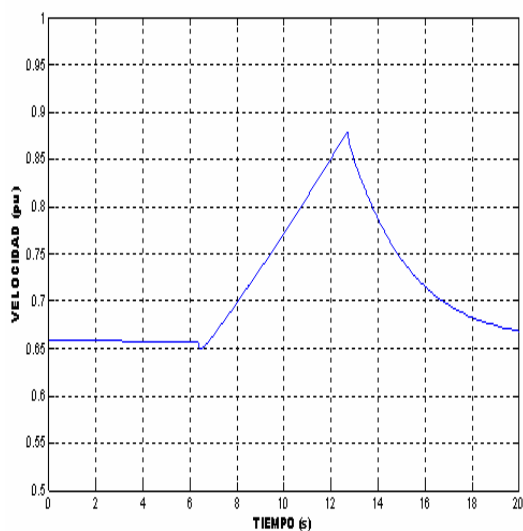
**Fig. 15. Comportamiento de las corrientes del estator y el rotor ante un valle de tensión.**



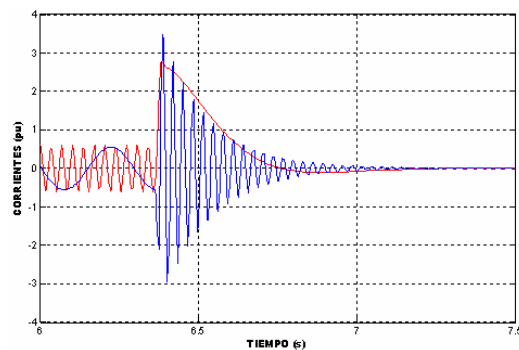
**Fig. 16. Comportamiento de la potencia entregada ante un valle de tensión.**

En este caso al ocurrir una recuperación de tensión sucede en ese instante un proceso contrario al de la caída por lo cual la explicación es similar a la del caso anterior.

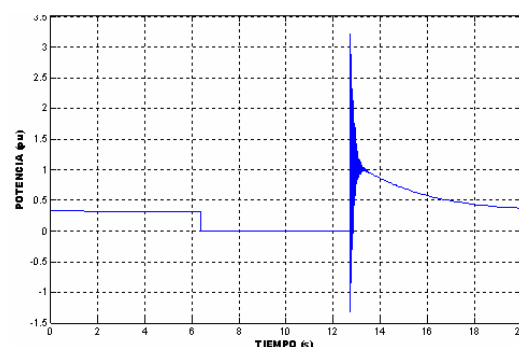
Finalmente, en las figuras 17, 18 y 19 aparece el comportamiento de la velocidad, las corrientes y la potencia ante un cortocircuito simétrico súbito.



**Fig. 17. Comportamiento de la velocidad ante un cortocircuito súbito y su limpieza a los cuatro segundos.**



**Fig. 18. Comportamiento de las corrientes ante un cortocircuito súbito.**



**Fig. 19. Comportamiento de la potencia de salida ante un cortocircuito súbito y su limpieza en cuatro segundos.**

Aquí es de destacar el hecho de que un generador asincrónico prácticamente casi no contribuye al cortocircuito y que se recupera rápidamente al limpiarse el cortocircuito y reestablecerse la tensión.

## CONCLUSIONES

Como resultado de este trabajo puede concluirse que las RNA constituyen una herramienta muy apropiada para la simulación del comportamiento de las turbinas eólicas de velocidad variable y de paso variable ya que son capaces de representar las complejas relaciones funcionales existentes en la misma lo cual redundará en una disminución del tiempo de simulación y una simplificación del modelo.

Es también de destacar las facilidades que brinda el programa EOLO basado en MATLAB SIMULINK para el entrenamiento de la RNA y para la determinación de la característica de potencia del aerogenerador.



Finalmente es necesario decir que estos algoritmos utilizados ahora para la simulación, pueden ser útiles también para el control del aerogenerador.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Miller, A. et al: *A variable speed wind turbine power control*, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol 12, issue 2, June 1997.
- [2] Podar, Gauttam et al: *Sensorless Variable Speed Controller for Existing Fixed Speed Wind Power Generator with Unity Power Factor Operation*, *IEEE Transactions on Industrial Applications*, Vol 50, issue 5, October 2003.
- [3] Xing Zuogal, et al: *Integration of Large Doubly Fed Wind Power Generation System into Grid*, *International Conference on Electrical Machines and Systems*, Nanking, China, 2005.
- [4] M. G. Simoes et al: *Fuzzy logic based intelligent control of a variable speed cage machine wind generation system*, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Volume 12, issue 1, January 1997.
- [5] Hui Li, et al: *Mc Laren, Neural Network Based Sensorless Maximum Wind Energy Capture with Compensated Power Coefficient*, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol 41, No. 6, November/December, 2005.
- [6] Z. Lubosny: *Wind Turbine Operation in Electric Power Systems*, *Advanced Modelling*, Springer Verlag, Berlín, 2003
- [7] Sainz Feito, Javier:: *Máquinas Eléctricas*, Editorial Prentice Hall, 2002.

## AUTORES

### Osley López González

Ingeniero Electricista ,Adiestrado en el Departamento de Ingeniería Eléctrica del Centro de investigaciones y pruebas electro energéticas (CIPEL).  
[osleylg@yahoo.es](mailto:osleylg@yahoo.es),  
[osley.lg@electronica.cujae.edu.cu](mailto:osley.lg@electronica.cujae.edu.cu)

### Dieter Rojas Remis,

Ingeniero Electricista Especialista Eléctrico en la D.I.P Eólica perteneciente a la Empresa de Ingeniería y Proyectos para la Electricidad (INEL).  
[dieterrr@gmail.com](mailto:dieterrr@gmail.com)

### Miriam Vilaragut Llanes,

Ingeniero Electricista. MSc en la especialidad. DrCT Profesor Auxiliar del departamento docente de Ingeniería Eléctrica del CIPEL y Directora del centro..  
[vilaragut@gmail.com](mailto:vilaragut@gmail.com)

### Angel Costa Montiel,

Ingeniero Electricista DrCT Actualmente se desempeña como Profesor Titular del Departamento Docente de Ingeniería Eléctrica del CIPEL  
[aacostamontiel@yahoo.es](mailto:aacostamontiel@yahoo.es)

## Anexo I Datos del Aerogenerador

PARAMETRO	VALOR
Potencia nominal en kW	1000
Velocidad de arranque en m/s	4
Velocidad nominal en m/s	12
Velocidad de salida en m/s	25
Diámetro del rotor en m	61
Velocidad del rotor en r/min	12-25
Razón del multiplicador	78,1
Tensión nominal en V	690
Frecuencia nominal en Hz	50
Corriente nominal en A	837
Velocidad nominal del motor en r/min	1680
Diapasón de velocidades del rotor en r/min	940-1680