



# Simulación y análisis del comportamiento dinámico de un aerogenerador conectado a una red de potencia muy grande

Wilbert Acuña  
Ángel Costa

Recibido: Abril del 2008  
Aprobado: Mayo del 2008

## Resumen / Abstract

La utilización de la energía del viento en la generación de electricidad requiere poder llevar a cabo un análisis que permita pronosticar el comportamiento de los aerogeneradores trabajando en paralelo con la red eléctrica, Es necesario conocer, cuándo estos se encuentran en distribución de parques y cuándo están aislados, la posible entrada y salida de estas máquinas de la red por causas de la aleatoriedad del viento o por causas propias del funcionamiento de la propia red ya sea por falla o por otras causas. También es importante saber la forma en que responden los aerogeneradores y el tiempo de duración ante estos fenómenos ya que son elementos de gran importancia para garantizar un funcionamiento estable y eficiente. La obtención de esta información puede lograrse por medio de la simulación del modelo matemático del generador conectado a la red, utilizando la herramienta Simulink que ofrece Matlab. En este artículo se obtiene y analiza el comportamiento de un aerogenerador en paralelo con una red muy grande.

Palabras clave: Aerogeneradores, generador asincrónico, modelo matemático de la máquina asincrónica

The utilization of the wind for generating electric energy requires carrying out the forecast of the performance of wind turbine generators connected to the network. It is necessary to know the possibility of the outage of these machines due to the random nature of the wind or due to miss operation of the network. It is also necessary knowing the way the generators will respond and the time of duration of these failures for guarantying a stable and efficient performance. This information can be obtained utilizing a mathematical model based on Matlab Simulink. In this paper the performance of a wind turbine generator in parallel with an infinite bus and submitted to different disturbances is obtained and analyzed.

*Key words: Wind turbine generators, asynchronous generator, asynchronous machine mathematical model*

## INTRODUCCIÓN

La generación de electricidad de origen eólico tiene por naturaleza un carácter aleatorio de igual forma que su fuente de origen, el viento. La potencia generada por un aerogenerador tiene la característica de tener tensión y frecuencia variable, por lo que se hacen necesarios los sistemas de regulación de estas magnitudes que permitan y garanticen la calidad de la

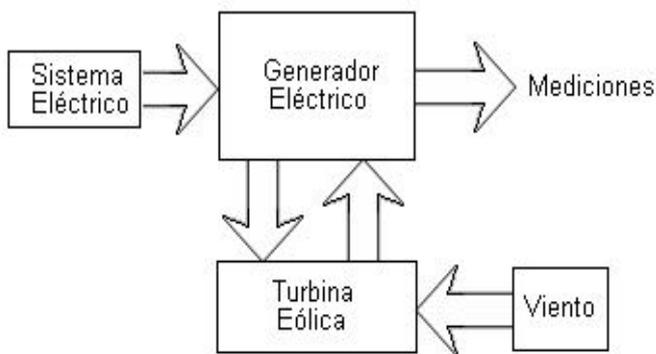
energía generada. Cuando se utiliza una máquina asincrónica, una forma de obtener la energía con calidad es conectarla a una red de potencia mucho mayor a la del aerogenerador, donde el sistema imponga la frecuencia y suministre la potencia reactiva de excitación necesaria que la máquina demanda, en forma de corriente magnetizante, que crea el campo magnético principal, garantizando que se suministre

siempre potencia activa al sistema y se aproveche cualquier velocidad del viento desde la mínima de arranque del aerogenerador hasta las velocidades más altas donde entrega la potencia nominal de diseño.<sup>1</sup>

El caso de estudio que aquí se presentará (cuyos datos se muestran en el anexo), es un sistema de paso fijo y velocidad constante, sin condensadores de compensación, lo que implica fluctuaciones constantes en la potencia generada con la variabilidad del viento.<sup>2</sup> El diseño considera el uso de multiplicador mecánico de velocidad para adaptar la velocidad de rotación del rotor eólico que es en este caso de unas 40 rpm (tomadas de diseño según el ángulo de ataque y perfil aerodinámico de las palas) a un poco más de 1800 rpm del generador eléctrico (4 polos).

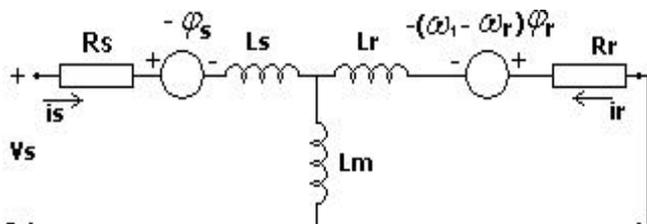
### MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL SISTEMA

En la figura 1 se muestra un esquema en bloque que representa la concepción general del esquema simulado. El modelo para la simulación en el Simulink de Matlab se obtiene por medio de las ecuaciones deducidas del circuito equivalente tipo T, como muestra la figura 2, donde se representa con fuente de tensión el efecto de los flujos de estator y del rotor en régimen dinámico, deduciendo las ecuaciones de este circuito según las leyes de Kirchhoff se puede obtener el modelo matemático para este régimen de trabajo.



Esquema general del sistema simulado.

1



Circuito equivalente de la máquina de inducción para régimen dinámico.

2

El modelo matemático en por unidad del generador responde a las siguientes ecuaciones vectoriales eléctricas:<sup>3,4</sup>

$$\vec{U}_s = R_s \vec{i}_s + \frac{d\vec{\varphi}_s}{d\tau} + j\omega_1 \vec{\varphi} \quad \dots (1)$$

$$0 = R_r \vec{i}_r + \frac{d\vec{\varphi}_r}{d\tau} + j(\omega_1 - \omega_r) \vec{\varphi}_r \quad \dots (2)$$

y a la siguiente ecuación mecánica:

$$M_e = 2H\omega_1 \frac{d\omega_r}{d\tau} + M_c \quad \dots (3)$$

En estas ecuaciones  $\vec{U}_s$  es el vector de tensiones del estator,  $\vec{i}_s$  e  $\vec{i}_r$  son los vectores de corriente del estator y el rotor respectivamente,  $\omega_1$  es la velocidad del campo magnético giratorio del estator (igual a la frecuencia si se trabaja en por unidad),  $\omega_r$  la velocidad del rotor,  $H$  la constante de tiempo mecánica en segundos,  $\tau$  el tiempo normalizado en radianes,  $M_e$  el torque o momento electromagnético,  $M_c$  el momento de la carga y  $\vec{\varphi}_s$   $\vec{\varphi}_r$  los vectores de concatenaciones de flujo del estator y el rotor los cuales, son iguales a:

$$\begin{aligned} \vec{\varphi}_s &= L_s \vec{i}_s + L_m \vec{i}_r \\ \vec{\varphi}_r &= L_m \vec{i}_s + L_r \vec{i}_r \end{aligned} \quad \dots (4)$$

En la ecuación 4 a su vez,  $L_s$  es la inductancia propia del estator,  $L_r$  la inductancia propia del rotor y  $L_m$  la inductancia mutua entre ambos lados.

Debe señalarse que, aunque se sabe que se trabaja en régimen generador, las ecuaciones antes planteadas utilizan la convención motora.

El modelo matemático de la turbina se puede asumir bastante aproximado por la ecuación 5, de carácter empírico.<sup>5</sup>

$$c_p(\lambda, \theta) = c_1 \cdot c_2 \cdot \frac{1}{\lambda} - c_3 \cdot \theta - c_4 \cdot \theta^x - c_5 \cdot e^{-c_6 \frac{1}{\lambda}} \quad \dots (5)$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda + 0,08 \cdot \theta} - \frac{0,035}{1 + \theta^3} \quad \dots (6)$$

Los coeficientes anteriores para turbinas de mediana potencia pueden asumirse como sigue:

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

$$c_5 = 5; c_6 = 21$$

La figura 3 muestra la relación del coeficiente aerodinámico de potencia ( $C_p$ ) en función de la relación de velocidad periférica del rotor eólico (TSR) representado por la letra  $\lambda$ , para diferentes valores del ángulo de ataque de las palas. La expresión del TSR se muestra como la ecuación 7.

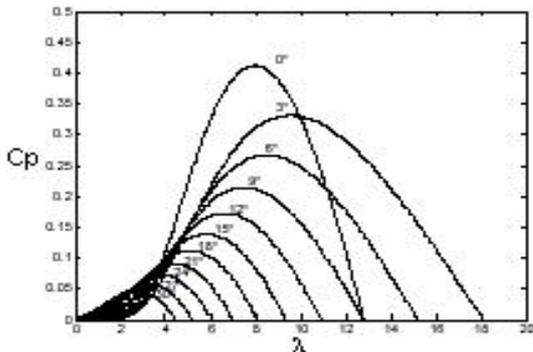
$$\lambda = \frac{r \cdot \omega_{RT}}{v_v} \quad \dots (7)$$

$\omega_{RT}$ : Velocidad del rotor de la turbina.

$v_v$ : Velocidad del viento.

$r$ : Radio del rotor de la turbina eólica.

$\theta$ : Ángulo de ataque de los alabes.



Variación del coeficiente aerodinámico ( $C_p$ ) con el coeficiente TSR ( $\lambda$ ).

3

Este modelo debe tener la base de datos de las velocidades del viento medidas en el lugar del emplazamiento de la turbina. Con las ecuaciones anteriores y la utilización del Simulink de Matlab se obtiene el esquema de la figura 4 para la simulación y obtención de las respuestas en el tiempo de las magnitudes de interés más relevantes, aunque el modelo sirve para encontrar muchas otras respuestas que pudieran ser de interés en otras investigaciones; por cuestiones de espacio este artículo solo recoge las más importantes.

El número de entrada al bloque *red eléctrica* significa el tipo de perturbación analizar pudiéndose seleccionar las siguientes:

1. Tensión constante.
2. Caída de tensión.

3. Subida de tensión.
4. Valle de tensión.
5. Cortocircuito.

Estas son los fenómenos más frecuentes que presenta la red, en el caso de la subida (3) y de la caída (2) de tensión se pueden variar el porcentaje de variación porcentaje debajo o por encima de la tensión nominal respectivamente, ya sea el caso y en la perturbación (4), se puede variar el valor de tensión del valle.

El número de entrada al bloque *vientos* permite seleccionar el tipo de variación del viento, existiendo las siguientes posibilidades:

1. Viento constante.
2. Rampa creciente saturada.
3. Rampa decreciente saturada.
4. Viento oscilante con racha.
5. Racha natural o de Weibull.
6. Rampa creciente - decreciente.

Estas son las formas más naturales de variación de la velocidad del viento, el esquema permite ver el efecto que causa en el sistema cualquier tipo de viento con estas variaciones, los distintos tipos de vientos al igual que las tensiones pueden seleccionarse cambiando el número correspondiente a cada estímulo en el bloque de *constante* que está en la entrada de los bloques de *vientos* y *tensiones* respectivamente. En la figura 4 se muestra el esquema de simulación en Simulink utilizado. En este esquema se aprecian tres bloques fundamentales: El bloque *Máquina Asíncrona* que recoge el modelo del generador propiamente dicho (ecuaciones 1, 2 y 4), el bloque de la *Red* que simula distintos regímenes de trabajo a los que se puede enfrentar el aerogenerador en algún momento y el bloque de la *Turbina* (ecuaciones 3, 5, 6 y 7), este recoge el modelo del rotor eólico y la respuesta a diferentes tipos de viento a que pueda someterse el rotor, los demás elementos constituyen el bloque de *medición*.

### COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA ANTE VARIACIONES EN LA VELOCIDAD DEL VIENTO

Para hacer este análisis se supondrán dos representaciones para la velocidad del viento: la variación en racha y la variación en rampa, debido a que son las características de su variabilidad que pueden tener más incidencia en el comportamiento del generador eólico en la red.

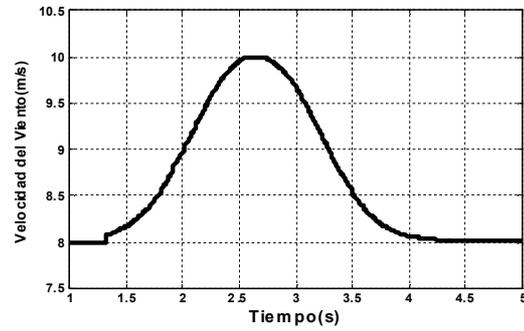
Para la variación en racha se supondrá la siguiente expresión:<sup>5</sup>

$$V_{racha}(t) = \frac{2 \cdot v_{m\acute{a}x}}{1 + e^{-4(\sin(w_{racha} \cdot t) - 1)}} \quad \dots (8)$$

donde:

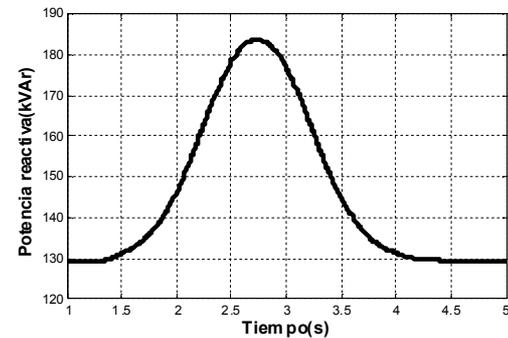
$V_{r\max}$  : Velocidad máxima de la racha.  
 $w_{racha}$  : Frecuencia de la racha. Se supuso que se partía de una velocidad del viento de 8 m/s, valor para el cual el generador entrega 124 kW. En la figura 5 se muestra la variación del viento en forma de racha de acuerdo con la ecuación 8.

En las figuras 6 y 7 se muestran las variaciones de la potencia reactiva y la potencia activa respectivamente. Ambas varían en igual proporción que el viento, durante el tiempo que dura la racha la producción de energía aumenta y con ella la penetración, pudiendo llegar a valores aportados a la red por encima de la potencia nominal, en este caso para una aparición súbita de una racha de viento que puede llegar brevemente hasta 10 m/s se obtiene prácticamente la generación máxima de 275 kW, que es la potencia nominal (figura 8); si la racha estuviera por encima de este valor y atendiendo al factor de servicio del generador se pudiera entregar más potencia a la red.



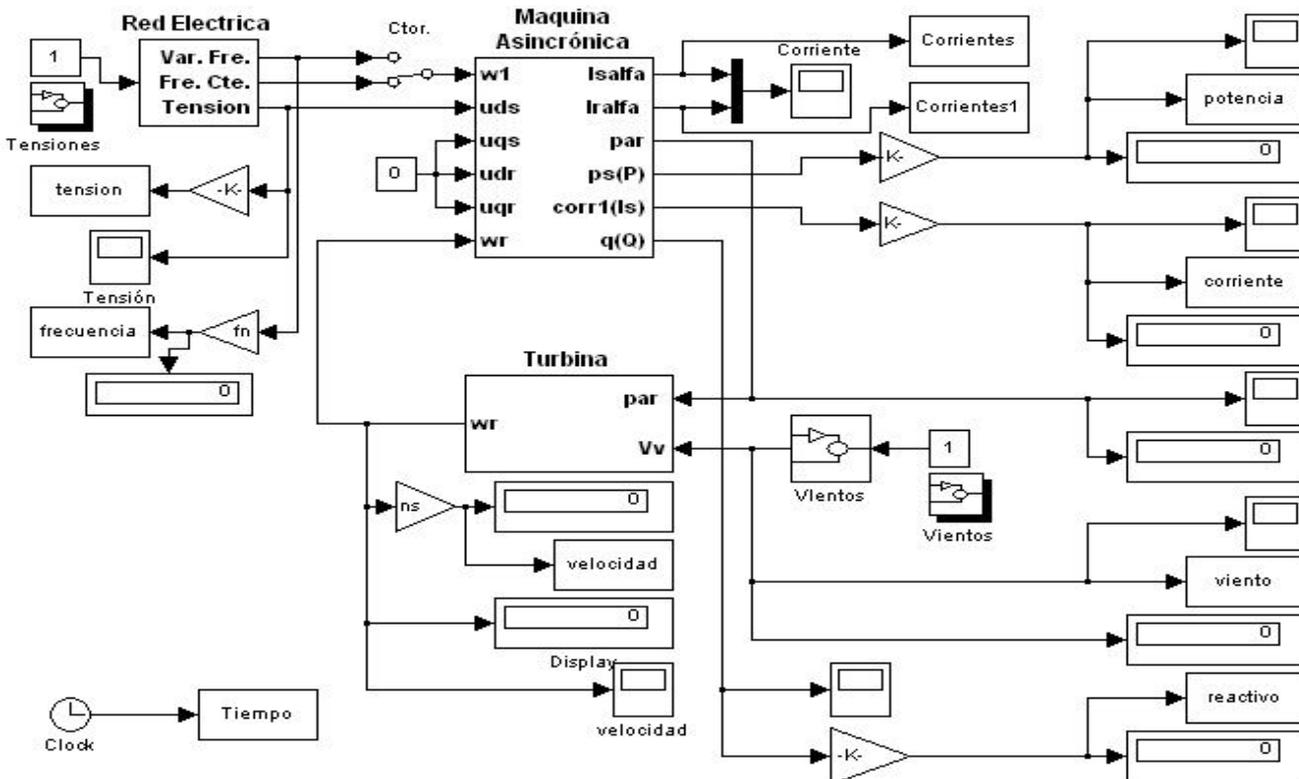
Variación del viento en forma de racha.

5



Variación de la potencia reactiva con la racha.

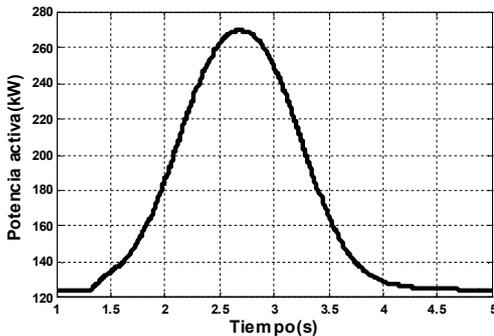
6



Esquema general de simulación del sistema aerogenerador-red eléctrica.

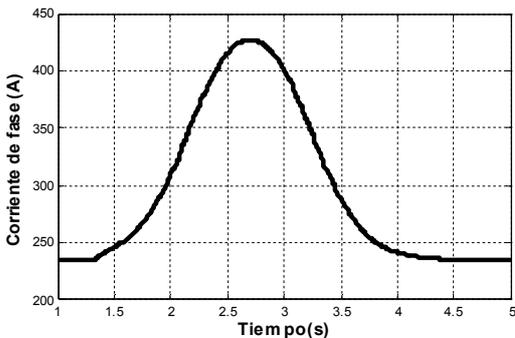
De igual forma, el valor efectivo de la corriente que se inyecta a la red sigue también el mismo comportamiento en forma de campana, hasta establecerse nuevamente en el valor inicial de donde partió la velocidad del viento constante, como muestra la figura 8, unos 340A correspondiente a 8m/s de viento.

La velocidad del rotor eólico, y de hecho, la velocidad del generador asincrónico (afectado por la relación de transformación del multiplicador mecánico de velocidad), aumenta llegando hasta unas 1818 rpm, en solo un segundo aproximadamente según puede apreciarse en la figura 9.



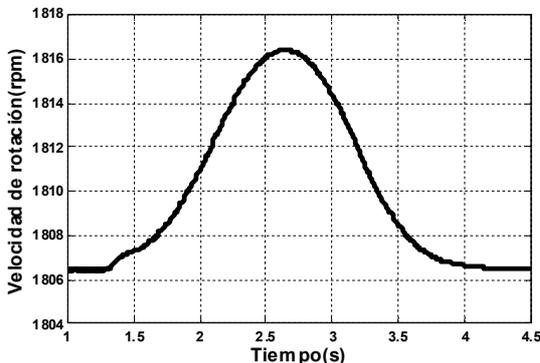
Variación en el tiempo de la potencia activa.

7



Respuesta en el tiempo de la corriente de fase.

8



Comportamiento de la velocidad del rotor.

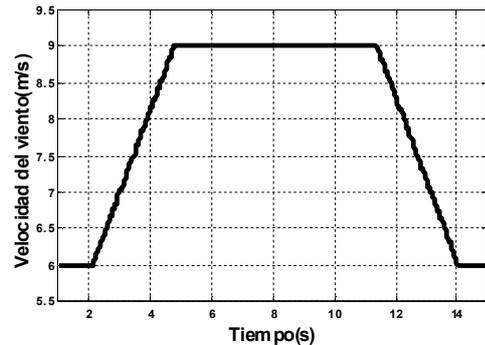
9

Seguidamente se analizarán los efectos del aumento de la velocidad del viento de forma de rampa y pendiente recta el cual hace crecer súbitamente todas las magnitudes que dependen de la velocidad de rotación que es la primera que se afecta de forma directa, (figura 10).

Para condiciones estables de la red, ante frecuencia y tensión constante, y suponiendo una eventual variación del viento en forma recta o rampa que crece proporcional en función del tiempo, se establece brevemente y luego cae de forma decreciente como puede ser un comportamiento normal del mismo.

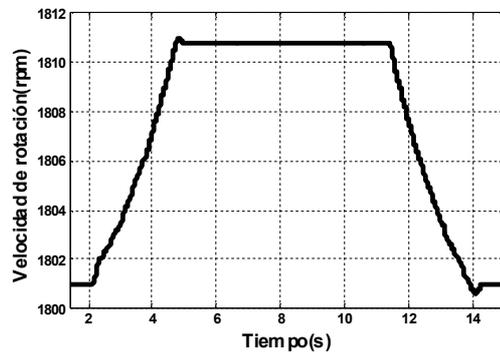
En la figura 11 se muestra la variación de la velocidad del rotor en el tiempo y en las figuras 12, 13 y 14 se presentan las variaciones de la potencia reactiva, la potencia activa y el valor efectivo de la corriente de fase las cuales, al igual que ocurría en el anterior caso, siguen fielmente la variación del viento.

Al igual que en el caso anterior, las principales variables o magnitudes que describen el comportamiento electromecánico del generador siguen fielmente la variación del viento debido a que, en este tipo de sistema de generación eólica, la variabilidad del viento se trasmite a la red eléctrica.



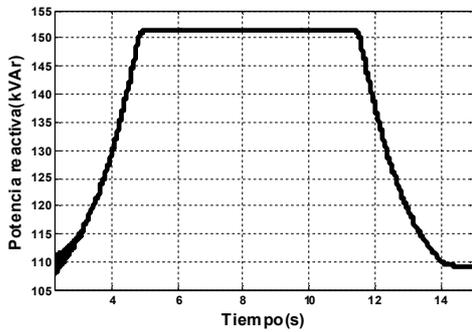
Forma del viento en rampa creciente y decreciente.

10



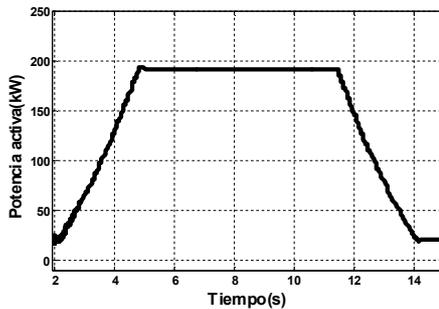
Velocidad de rotación del rotor eólico en el tiempo.

11



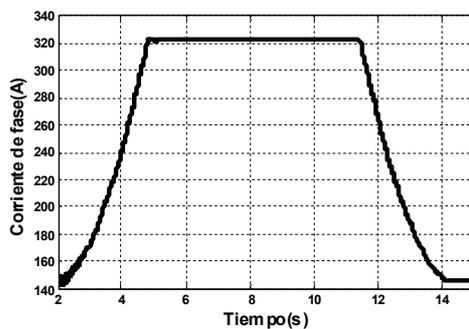
Respuesta de la potencia reactiva con respecto al tiempo.

12



Respuesta de la potencia activa con respecto al tiempo.

13



Comportamiento de la corriente de fase en el tiempo.

14

## COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA ANTE PERTURBACIONES EN LA RED

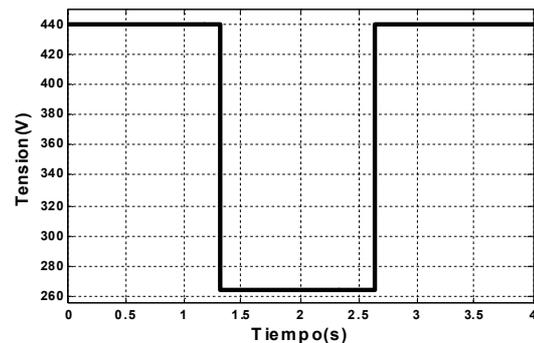
Por condiciones normales de la red los niveles de tensión pueden variar por causas diversas como una variación brusca de la carga ya sea por conexión o desconexión, inadecuada regulación de carga o un déficit momentáneo de generación, una forma típica de comportamiento es la que se muestra en la figura 15, conocido como valle de tensión

Para este caso se supuso una caída de un 20 % que se restablece en un tiempo algo mayor a un segundo, puede entonces verse como varían las distintas magnitudes del generador ante este comportamiento de la tensión (figura 15).

En la figura 16 se muestra el comportamiento de la velocidad de rotación del generador, la cual, como se

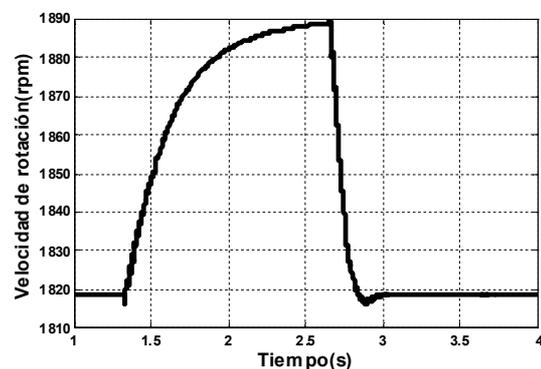
aprecia, aumenta con la disminución de la tensión y recupera su valor inicial al desaparecer el valle, este comportamiento se debe a que, al no cambiar la velocidad del viento no varía la potencia mecánica de entrada al generador, sin embargo, el momento y la potencia eléctrica entregadas a la red dependen del cuadrado de la tensión<sup>1</sup>, lo que hace que al disminuir esta, exista un desequilibrio entre la potencia mecánica de entrada al generador (que viene de la turbina eólica) y la potencia eléctrica suministrada que acelera al rotor. Al aumentar la velocidad de este, aumenta el deslizamiento y, como el momento electromagnético y la potencia eléctrica son directamente proporcionales al deslizamiento, se recupera la condición de estado estable a un deslizamiento y una velocidad superiores. Al recuperarse la tensión a su valor anterior ocurre el proceso contrario.

En las figuras 17, 18 y 19 se muestran el comportamiento de la potencia reactiva, la potencia activa y la corriente. En estado estacionario, la corriente aumenta debido a ser menor la tensión, sin embargo se observa que la potencia activa entregada ha disminuido. Esto se debe a un aumento de las pérdidas de cobre en el motor por el aumento de la corriente.



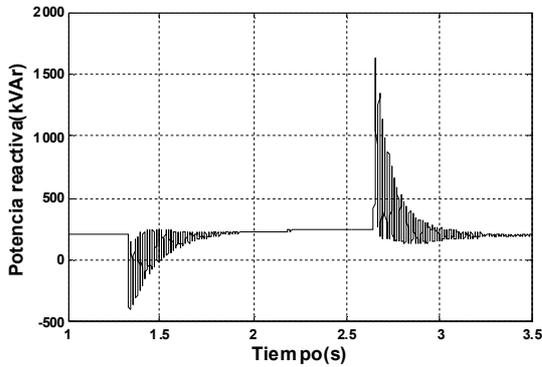
Variación súbita de la tensión de red (valle de tensión).

15



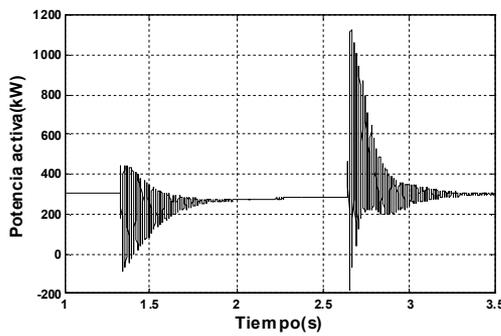
Respuesta de la velocidad de rotación ante el valle de tensión.

16



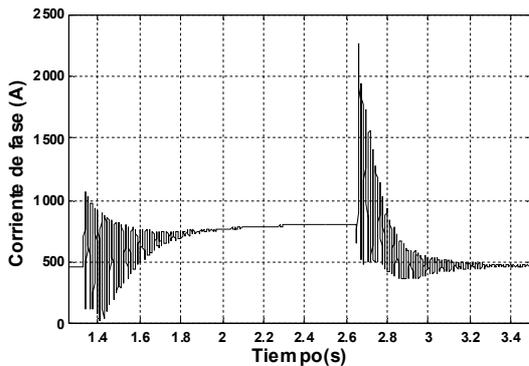
Respuesta de la potencia reactiva.

17



Respuesta de la potencia activa con el tiempo.

18



Respuesta en el tiempo de la corriente de fase.

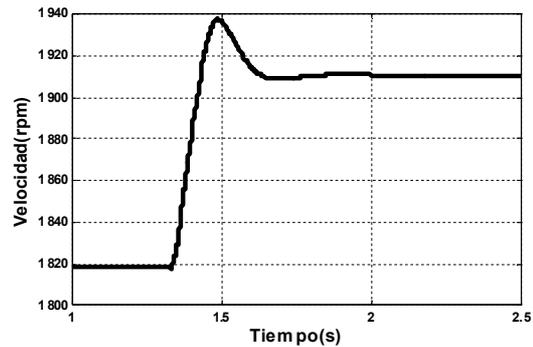
19

Es interesante también observar que la potencia reactiva permanece prácticamente constante a pesar de que, al disminuir la tensión la corriente magnetizante debe ser menor. Esto se debe también al aumento de corriente que provoca un aumento del consumo de potencia reactiva en las reactancias de dispersión de la máquina; o sea, que la disminución de consumo de reactivo en la reactancia magnetizante es compensado por el aumento de consumo de reactivo en las reactancias de dispersión.

En régimen transitorio, al ocurrir súbitamente la caída y después la recuperación de la tensión se observan oscilaciones debidas a la aparición de componentes de corriente continua tanto en el estator como en el

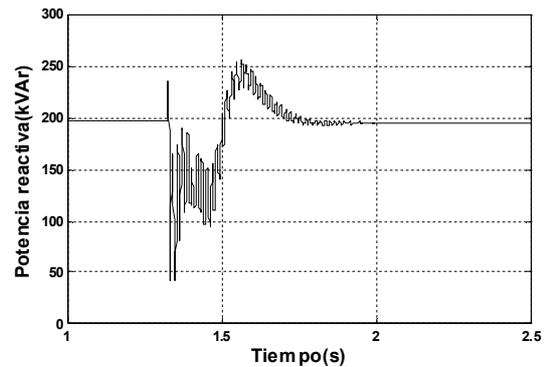
rotor. Estas últimas son las que provocan la aparición de las oscilaciones de la corriente del estator (tal y como ocurre en el cortocircuito simétrico súbito del generador sincrónico).

Seguidamente se llevará a cabo el análisis del comportamiento del sistema ante variaciones en la frecuencia. Se supone un aumento de la frecuencia de la red en un 5 % (el cual es mayor que el permisible en la red pero que ilustra mejor sus efectos), el comportamiento de la velocidad de rotación, la potencia reactiva, la potencia activa y la corriente se muestran en las figuras 20, 21, 22 y 23.



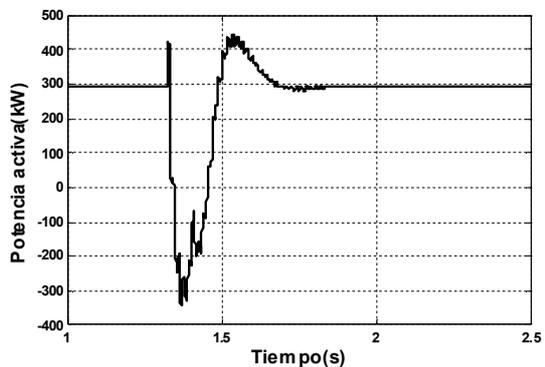
Comportamiento en el tiempo de la velocidad de rotación.

20



Potencia reactiva con respecto al tiempo cuando varía la frecuencia.

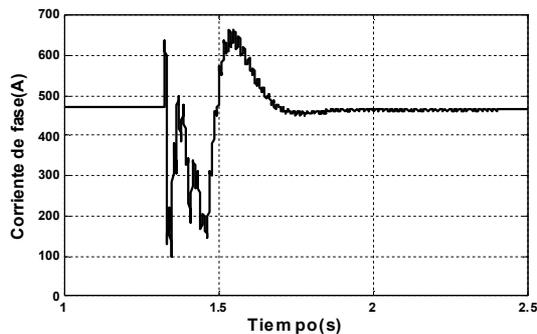
21



Respuesta de la potencia activa en el tiempo.

22

La velocidad del rotor aumenta con la velocidad del viento permaneciendo constante, esto ocurre debido al aumento de la velocidad del campo giratorio del estator provocado por el aumento de la frecuencia. Las potencias activa y reactiva y la corriente recuperan sus valores iniciales después del periodo transitorio a pesar del aumento de la frecuencia debido a que, en este caso, el deslizamiento no varía. Las oscilaciones ocurridas en el período transitorio se deben a la variación de velocidad que inducen componentes de tensión de corriente continua y corriente alterna tanto en el estator como en el rotor.



Forma de la corriente de fase en el tiempo.

23

## CONCLUSIONES

Como puede apreciarse, el modelo utilizado basado en el Simulink del Matlab permite analizar el comportamiento de un generador eólico asincrónico de velocidad constante ante la variabilidad del viento y las perturbaciones que puedan ocurrir en la red.

Se observa cómo este tipo de sistema de generación eólica, cuya principal ventaja es su sencillez y confiabilidad, presenta la desventaja de reflejar en la red eléctrica las variaciones ocurridas en el viento y de afectarse directamente por las perturbaciones ocurridas en la red. Ahora bien, esta misma característica de dependencia directa entre la red y el comportamiento del viento, le dan la ventaja de poder contribuir con su inercia de forma directa a la regulación primaria de la frecuencia tal y como hacen los generadores sincrónicos convencionales.

## REFERENCIAS

1. **Sainz Feito, Javier:** *Máquinas Eléctricas*, Prentice Hall, 2002.
2. **Heier, S.:** *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*, Wiley and Sons, New York, 1998
3. **Costa, Angel:** *Variadores de velocidad por variación de la frecuencia*, Monografía, Ciudad de La Habana, Noviembre del 2000.
4. **Kovacs, P.:** *Transient Phenomena in Electrical Machines*, Elsevier Publications, Amsterdam, 1994.

**5. Zuogial, Xing; Zheng Qionling; Yao Xingjia and Jing Yanjun:** Integration of Large Doubly Fed Wind Power Generator System into Grid, International Conference on Electrical Machines and Systems, Nangking, China, September, 2005.

## AUTORES

### Wilbert Acuña Rodríguez

Ingeniero Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica, Asistente, Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMM), Holguín, Cuba

### Ángel Costa Montiel

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Ciudad de La Habana, Cuba

e-mail:aacm@electrica.cujae.edu.cu

## ANEXO

Potencia Nominal	300 kW
Tensión	440 V
Factor de potencia	0,88
Frecuencia	60 Hz
Velocidad sincrónica	1 800 rpm
Velocidad de rotación	1 780 rpm
Rendimiento	0,95
Torque nominal en N-m	1 200
Inercia del generador en kg-m <sup>2</sup>	4,71
Inercia de la turbina en kg-m <sup>2</sup>	30 213
Razón del multiplicador	90