



Evaluación del Desempeño de una Turbina de Viento con Generador de Inducción Doblemente Alimentado

F. Gonzalez-Longatt¹, O. Amaya¹, M. Cooz¹

¹Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional

RESUMEN

Una gran cantidad de turbinas de viento para aplicación en producción de electricidad trabajan a velocidad variable, empleando generador de inducción doblemente alimentado (doubly fed). En estos aerogeneradores la variación de velocidad permite por un lado reducir la fatiga de componentes mecánicos y las fluctuaciones de voltaje, y por otro aprovechar mejor la energía del viento a velocidades bajas, manteniendo la velocidad de giro próxima al punto de máxima absorción de energía. Además de permitir que la velocidad mecánica del rotor y la frecuencia eléctrica de la red deben ser desacoplados. Las características de éste generador lo presentan como la tecnología de conversión comercialmente dominante en los aerogeneradores actuales. En éste artículo inicialmente se muestran las consideraciones en el modelado del generador de inducción doblemente alimentado incluyendo un control para el ángulo de paso, el regulador para la velocidad del rotor, un controlador para el voltaje en terminales, y el modelo del convertidor, que controla la corriente del rotor del generador. Estos modelos fueron implementados en un programa de simulación digital, y con los parámetros de un aerogenerador típico, se procedió a simular el comportamiento transitorio de esta tecnología de generación conectada a una red de potencia. El comportamiento ante variaciones abruptas en la velocidad del viento fue evaluado por medio de la introducción de una serie de tiempo real de ésta variable, mostrando un adecuado desempeño de los controles, en el seguimiento de la velocidad del viento para mantener la demanda programada al aerogenerador; un excelente comportamiento es observado en la dinámica. Los resultados obtenidos del sistema de prueba, evidencian una respuesta muy rápida y efectiva de los controles. Sin embargo, se observa que la frecuencia de muestreo del controlador de ángulo de paso posee un efecto especialmente en el desempeño en el seguimiento de la demanda. Una discusión completa de conclusiones que muestran interacciones entre controles y variables es mostrada en éste artículo.

PALABRAS CLAVE

Aerogeneradores de velocidad variable, generador de inducción doblemente alimentado, controles, simulación, transitorio.

INTRODUCCIÓN

La energía eólica es tecnología de conversión de energía de mayor crecimiento en la década de 1990, en términos de porcentajes –crecimiento anual de capacidad instalada por tecnología [1]. En el futuro, muchos países alrededor del mundo estarán experimentando altos niveles de penetración de energía eólica. La integración de estos altos niveles de penetración de energía eólica en los sistemas de potencia que originalmente fueron diseñados para grandes generadores sincrónicos, puede requerir estudios con nuevos enfoques, para resolver los nuevos problemas que se pueden presentar [2].

En la década de 1990 las turbinas de viento instaladas operaban a velocidad fija; de modo que sin importar la velocidad del viento, la velocidad del rotor de la turbina es fijada y determinada por la frecuencia de la red de suministro, la relación de velocidades de la caja multiplicadora, y el diseño del generador. Estas turbinas están equipadas con un generador de inducción (típicamente de simple jaula de ardilla) que está conectada directamente a la red [1], [2]. Estos aerogeneradores son diseñados para lograr la máxima eficiencia a una velocidad de viento particular; y este esquema posee la ventaja de ser simple, robusto, confiable, y ha sido bien probado. Sin embargo, el consumo de potencia reactiva no controlado es una desventaja [1].

En los recientes años pasados, las turbinas de viento de velocidad variable han sido el tipo más instalado de aerogeneradores. Estas turbinas están diseñadas para lograr una máxima eficiencia aerodinámica sobre un amplio rango de velocidades de viento; esto se logra adaptando continuamente la velocidad del rotor a la velocidad del viento. El torque en este tipo de turbinas es mantenido más o menos constante en el generador, y los cambios de la velocidad del viento son absorbidos por cambios en la velocidad del generador [1]. Sin embargo, este sistema es más complicado que las turbinas a velocidad fija.

El objetivo principal de este artículo es evaluar el comportamiento de una turbina de viento a velocidad variable, específicamente la que implica el uso de generador de inducción doblemente alimentado. En este artículo inicialmente se presentan los modelos de simulación para turbinas de viento incluyendo sus diferentes componentes electro-mecánicos, además de mostrar los parámetros típicos a ser simulados. Los modelos se implementaron en un programa para la simulación del comportamiento dinámico de sistemas eléctricos de potencia programado en Matlab[®]. Simulaciones considerando variaciones en la velocidad del viento fueron realizadas en un sistema de prueba. Se consideró una típica turbina de viento de velocidad variable accionando un generador doblemente alimentado con todos sus controles; conectado a través de un sistema de transmisión robusto a una barra de potencia infinita. En este artículo se presentan los resultados obtenidos del sistema de prueba, evidencian una respuesta muy rápida y efectiva de los controles. Sin embargo, se observa que la frecuencia de muestreo del controlador de ángulo de paso posee un efecto especialmente dominante en el desempeño en el seguimiento de la demanda. Una discusión completa de conclusiones que muestran interacciones entre controles y variables es mostrada en este artículo.

MODELACIÓN

En esta sección se presenta un número de consideraciones asociadas a la simulación del comportamiento dinámico de turbinas de viento de eje horizontal accionadas por generador de inducción doblemente alimentado (Figura 1). En este artículo se ha prestado atención a la modelación de este aerogenerador, viendo a la turbina de viento como un componente electromecánico como cualquier otro conectado a un sistema de potencia. A fin de lograr un límite razonable en los requerimientos de datos y tiempos de simulación un enfoque cuasi-estacionario es usado en este artículo para describir el rotor de la turbina de viento.

Modelo del Rotor de la Turbina

Un enfoque cuasi-estático es usado para describir el rotor de la turbina de viento. En este caso es bien conocido la ecuación algebraica que define la relación entre la velocidad del viento, el ángulo de paso de la turbina y la potencia mecánica extraída del viento [1]-[2],[4], [5]:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho_{air} A_{wt} C_p (\lambda, \beta) v_w^3 \quad (1)$$

Donde ρ_{air} es la densidad del aire, A_{wt} es el área cubierta por el toro de la turbina de viento, y C_p es el coeficiente de potencia, siendo λ la velocidad periférica de la pala, β el ángulo de paso de la pala, y v_w la velocidad del viento a la altura del cubo. En éste artículo el coeficiente de potencia es representado por una función aproximante de la forma:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.73 \left(\frac{155}{\lambda_i} - 0.58\beta - 0.002\beta^{2.14} - 13.2 \right) e^{-\frac{18.4}{\lambda_i}} \quad (2)$$

donde:

$$\lambda_i = \left[\frac{1}{\lambda - 0.02} - \frac{0.003}{\beta^3 + 1} \right]^{-1} \quad (3)$$

Para aproximar el efecto de las variaciones de alta frecuencia en la variación del viento que se suavizan en la superficie de la superficie del rotor, particularmente cuando la velocidad del viento muy altas, un filtro pasa bajo fue considerado, con una constante de tiempo (τ_f) de 4.0 seg.

Modelo del Generador

Las ecuaciones que describen un generador de inducción doblemente alimentado son idénticas que aquellas de un generador de inducción de jaula de ardilla. La única excepción es que el devanado del rotor no está cortocircuitado. De tal modo, que las ecuaciones de los voltajes quedan dados por [7], [8]:

$$\begin{cases} u_{ds} = -R_s i_{ds} - \omega_s \psi_{qs} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} \\ u_{qs} = -R_s i_{qs} + \omega_s \psi_{ds} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} \\ u_{dr} = -R_r i_{dr} - s\omega_s \psi_{qr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} \\ u_{qr} = -R_r i_{qr} + s\omega_s \psi_{dr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

Los sub-índices d y q indican el eje directo y de cuadratura del generador, mientras que los sub-índices s y r indican las cantidades del estator y rotor respectivamente. Los ejes d y q se encuentran girando a la velocidad sincrónica con el eje q adelantando en 90° al eje d . La posición del eje d coincide con el máximo valor del flujo del estator, por lo que el voltaje u_{qs} es igual al voltaje en terminales y el voltaje u_{ds} es igual a cero. El valor de los flujos se obtiene a partir de la siguiente ecuación [1]-[2]:

$$\begin{aligned} \psi_{ds} &= -(L_{s\sigma} + L_m) i_{ds} - L_m i_{dr} \\ \psi_{qs} &= -(L_{s\sigma} + L_m) i_{qs} - L_m i_{qr} \\ \psi_{dr} &= -(L_{r\sigma} + L_m) i_{dr} - L_m i_{ds} \\ \psi_{qr} &= -(L_{r\sigma} + L_m) i_{qr} - L_m i_{qs} \end{aligned} \quad (5)$$

Donde L_m es la inductancia mutua, L_s y L_r son las inductancias de dispersión del estator y rotor respectivamente. El deslizamiento del rotor se define por la siguiente ecuación [1]:

$$s = \omega_s - \frac{n_{pp}\omega_r}{\omega_s} \quad (6)$$

Donde n_{pp} es el número de pares de polos, ω_r es la velocidad del rotor del generador [rad/s].

Se puede obtener la relación entre las corrientes y los voltajes del generador de inducción Doblemente Alimentado a partir de las ecuaciones (4) y (5), obteniendo lo siguiente [2]:

$$\begin{aligned} u_{ds} &= -R_s i_{ds} + \omega_s [(L_{s\sigma} + L_m) i_{qs} + L_m i_{qr}] \\ u_{qs} &= -R_s i_{qs} - \omega_s [(L_{s\sigma} + L_m) i_{ds} + L_m i_{dr}] \\ u_{dr} &= -R_r i_{dr} + s\omega_s [(L_{r\sigma} + L_m) i_{qr} + L_m i_{qs}] \\ u_{qr} &= -R_r i_{qr} - s\omega_s [(L_{r\sigma} + L_m) i_{dr} + L_m i_{ds}] \end{aligned} \quad (7)$$

Por su parte la potencia activa y reactiva del generador como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} P_g &= u_{ds} i_{ds} + u_{qs} i_{qs} + u_{dr} i_{dr} + u_{qr} i_{qr} \\ Q_g &= u_{qs} i_{ds} - u_{ds} i_{qs} + u_{qr} i_{dr} - u_{dr} i_{qr} \end{aligned} \quad (8)$$

El torque electromecánico (T_{elec}) generado en la máquina se obtiene mediante la siguiente ecuación [1], [2]:

$$T_{elec} = \psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds} \quad (9)$$

El torque mecánico se obtiene dividiendo la potencia mecánica extraída de la turbina de viento con la velocidad de giro del rotor (ω_r). Los cambios de la velocidad del generador resultan de la diferencia entre el torque mecánico (T_{mec}) y el torque eléctrico calculados de la ecuación de oscilación de la máquina [7], [8].

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H_M} (T_{mec} - T_{elec}) \quad (10)$$

Donde H_m es la constante de inercia del rotor y T_{mec} es el torque mecánico.

Modelo del Control de Angulo de Paso

El control del ángulo de paso solo es activado para altas velocidades del viento, ya que al presentarse éstas el sistema no puede controlarse con el aumento de la potencia generada, debido a que se produciría sobrecarga en el generador y el convertidor, además se presentan daños mecánicos irreparables en la turbina de viento, entonces se puede decir que el ángulo de paso es ajustado para limitar la eficacia aerodinámica del rotor [1]. En éste artículo se ha considerado funcionamiento básico de este sistema de control, expresado en el diagrama de bloque del control de la Figura 3.

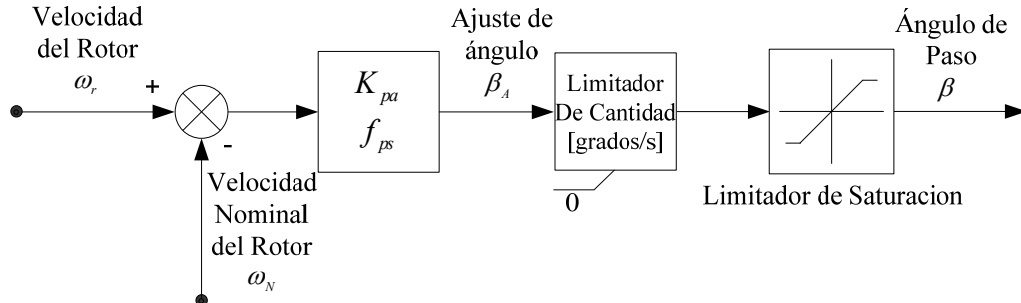


Figura 3. Diagrama de Bloque del Control del Angulo de Paso

Este control se basa en la diferencia entre las velocidades la cual estará dada por las variaciones en la velocidad del rotor, multiplicado por la ganancia respectiva se obtiene el ajuste del ángulo de paso. Sin embargo, se trata de un control discreto con una frecuencia de muestreo, f_{ps} , y que incluye limitación en la proporción máxima de cambio del ángulo de paso y saturación [1], [2].

Modelo del Control de Velocidad del Rotor

El control de velocidad de las turbinas de viento a velocidad variable opera de la siguiente forma [1]:

- La velocidad del rotor es medida con una frecuencia de muestreo f_{ps} .
- Desde este valor de velocidad, un ajuste de potencia es calculado, usando la característica de la relación entre la velocidad del rotor y la potencia.
- Tomando en cuenta la velocidad real del generador, un ajuste de toque es derivado desde el ajuste de potencia.
- Finalmente, un ajuste de corriente de calculado desde el ajuste de torque.

En un modelo de orden reducido, este ajuste de corriente es alcanzado inmediatamente como un resultado del enfoque de modelación. Sin embargo este esquema resulta limitativo. En este artículo se ha implementado un regulador para la velocidad del rotor, que determina un ajuste para la potencia activa basado en el valor real de la velocidad del rotor, por lo tanto al igual que el control anterior la velocidad del rotor es una entrada de este control. Un simple controlador proporcional integral con saturación ha sido considerado [3]. En Figura 4 se observa el esquema representativo del control de velocidad, donde claramente se muestran las entradas y salidas del mismo.

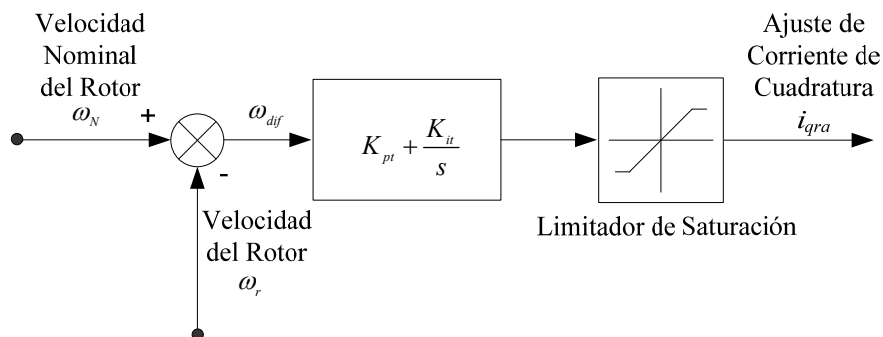


Figura 4. Diagrama de Bloque del Control de la Velocidad del Rotor para una Turbina de Viento

Modelo del Control de Voltaje en Terminales

Las turbinas de velocidad variable son capaces de variar la potencia reactiva de acuerdo con una potencia activa y voltaje en terminales dado. Esto le otorga la posibilidad de controlar el voltaje. Ahora bien para el caso de una turbina de viento de velocidad variable con generador de inducción doblemente alimentado, estos ajustes realizados por el control se efectúan variando la componente de eje directo de la corriente del rotor [1]. El control de voltaje en terminales se encuentra basado en las siguientes premisas: para aumentar el voltaje en terminales, es necesario que se genere más potencia reactiva, y para disminuir el voltaje en los terminales de la máquina, se debe reducir la cantidad de potencia reactiva [2].

En las turbinas de velocidad variable están plenamente habilitadas para variar su potencia reactiva mediante ajustes de la corriente de eje directo [4]. Esta regulación se puede realizar de dos formas, la primera de ellas consiste en variaciones de la corriente actual de la componente

directa de la corriente del rotor y la segunda de ellas se realiza variando la potencia reactiva actual. Es válido acotar que aunque el reactivo sea manejado de formas distintas sus resultados son muy similares [1]. El controlador de voltaje para un generador de inducción doblemente alimentado es descrito en la Figura 5.

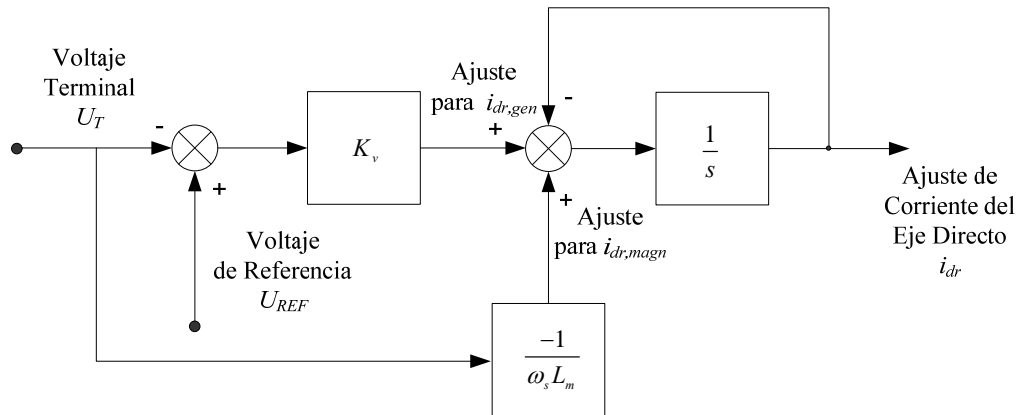


Figura 5. Diagrama de Bloque del Controlador de Voltaje en Terminales de una Turbina de Viento con Generador de Inducción Doblemente Alimentado

Modelo del Convertidor Electrónico de Potencia

El convertidor es modelado como una fuente de corriente que suministra una corriente sinusoidal con frecuencia eléctrica del rotor. Esta suposición es solamente verdad si el lazo de control de la corriente del convertidor electrónico de potencia conectado al devanado del rotor es capaz de alcanzar un nuevo valor para la corriente del rotor [1]. Con modernos convertidores electrónicos de potencia con altos cambios de frecuencias y controladores avanzados, esto es generalmente el caso en el convertidor opera en los límites diseñados. Esto es lo más reciente, sin embargo, no es verdad durante una caída de voltaje causada por la falla en la red. No obstante, esto no es considerado un problema, porque la respuesta del convertidor electrónico de potencia para la caída de voltaje es caracterizada por un fenómeno de muy alta frecuencia que no afecta las cantidades investigadas con la simulación dinámica de sistemas de potencia.

SIMULACIÓN Y RESULTADOS

A fin de evaluar el comportamiento de una turbina de viento a velocidad variable, empleando un generador de inducción doblemente alimentado; los modelos antes descritos fueron implementados dentro de un programa desarrollado en Matlab[®] para el análisis de la dinámica de sistemas eléctricos de potencia. En la Figura 6, se muestra la red de prueba sobre la cual se efectuaron simulaciones.

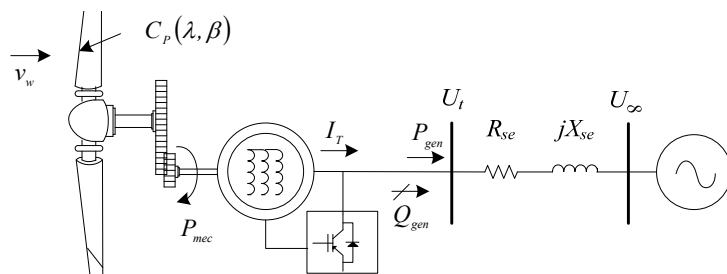


Figura 6. Red de Prueba

Los parámetros característicos de la turbina de viento de velocidad variable de eje horizontal considerada se muestran en la Tabla 1; y las curvas de coeficiente de potencia para varios ángulos

de paso (β). En la Tabla 2, se muestran los datos del generador de inducción empleado y de las Tablas 3 a la 5 se muestran los valores de los parámetros asociados a los diferentes controles.

Tabla 1. Parámetros de la Turbina de Viento a Velocidad Variable [1]

<i>Característica de la turbina</i>	<i>Valor</i>
Velocidad Mínima del Rotor	9 rpm
Velocidad Nominal del Rotor	18 rpm
Diámetro del Rotor	75 m
Área de Barrido	4418 m ²
Potencia Nominal	2 MW
Velocidad Nominal del Viento	14 m/s
Relación de la caja convertidora	1:100
Constante de Inercia	2.5s

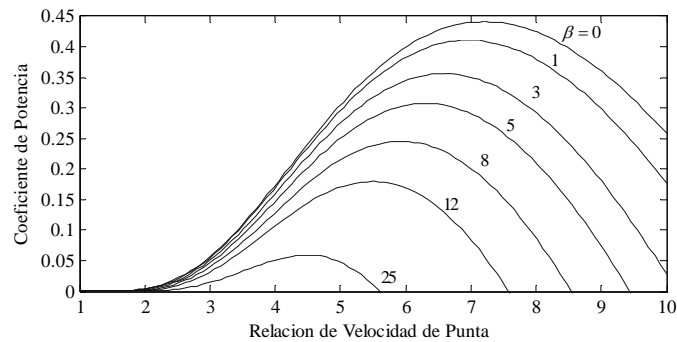


Figura 7. Coeficiente de Potencia de turbina de Viento a Velocidad Variable

Tabla 2. Parámetros del Generador de Inducción Doblemente Alimentado [1]

<i>Características del Generador</i>	<i>Valor</i>
Número de Polos	4
Velocidad del Generador	900-1900 rpm
Inductancia Mutua L_m	3.0 p.u.
Inductancia de dispersión del Estator $L_{s\sigma}$	0.10 p.u.
Inductancia de dispersión del Rotor $L_{r\sigma}$	0.08 p.u.
Resistencia del Estator R_s	0.01 p.u.
Resistencia del Rotor R_r	0.01 p.u.
Constante de Inercia H_m	0.5s

Tabla 3. Parámetros del Control del Ángulo de Paso [2]

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
K_{pa}	175
F_{ps}	0.02
Pendiente	5grads/s

Tabla 4. Parámetros del Control de Potencia Activa [2]

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
K_{pt}	3.45
K_{it}	0.005

Tabla 5. Parámetros del Control de Potencia Reactiva [3]

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
K_v	50
U_{REF}	1

A fin de evaluar el comportamiento dinámico en condiciones normales de operación de la turbina de viento a velocidad variable mostrado en el sistema de prueba; inicialmente se ha

considerado una serie de tiempo de velocidad del viento como mostrada en la Figura 8(a); con velocidad promedio de 14 m/s.

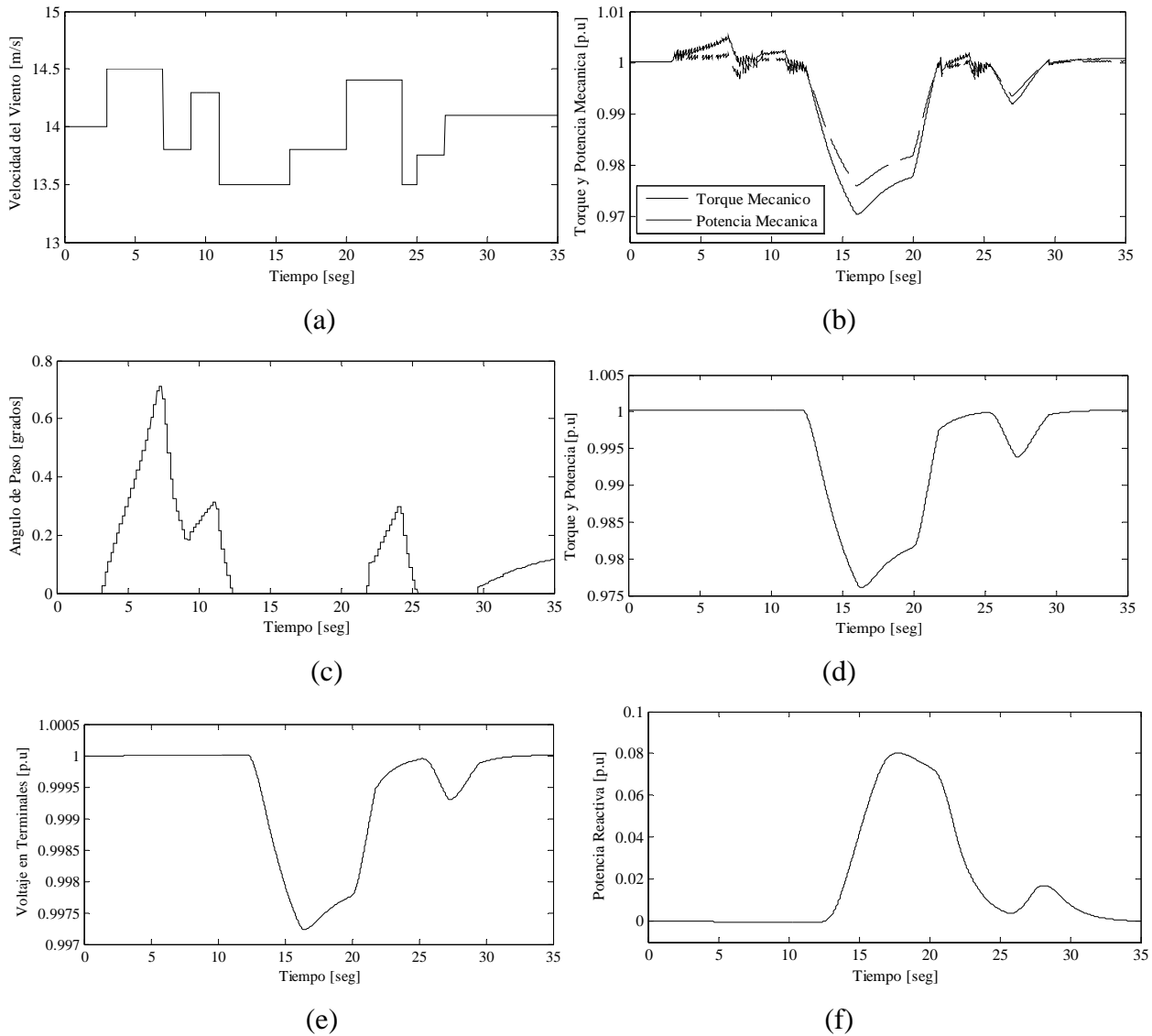


Figura 8. Resultados de las Simulaciones: (a) Secuencia de Velocidad del Viento, (b) Potencia mecánica, (c) Angulo de paso, (d) Potencia Activa, (e) Voltaje en Terminales y (f) Potencia reactiva

Inicialmente la máquina opera a potencia nominal y factor de potencia unitario, al producirse los cambios en la velocidad del viento, velocidades mayor a la nominal obliga a producir más potencia, por lo que el control de ángulo de paso debe actuar para mantener la velocidad de giro; y entonces la potencia entregada debe mantenerse cercana a la nominal, respetando el factor de potencia unitario. Esto se observa en las respectivas curvas en la Figura 8 desde 0 hasta 13 segundos. Importante mención merece el hecho de las oscilaciones de alta frecuencia están presentes en el torque y la potencia mecánica del rotor de la turbina, consecuencia de la acción del ángulo de paso.

Por otra parte cuando la velocidad del viento disminuye por debajo de la nominal (14 a 22 segundos Figura 8(a)), el ángulo de paso no actúa, y debe ajustar su valor de potencia eléctrica al

valor máximo extraíble de la turbina; sin embargo el cambio en la potencia activa ocasiona que el voltaje en terminales, por lo que los controles asociados comienzan a actuar inyectando potencia reactiva a fin de restituir el voltaje en terminales al ajuste. Las simulaciones mostradas, evidencian que ante abruptos cambios en el viento, la respuesta de la turbina de viento es aceptable.

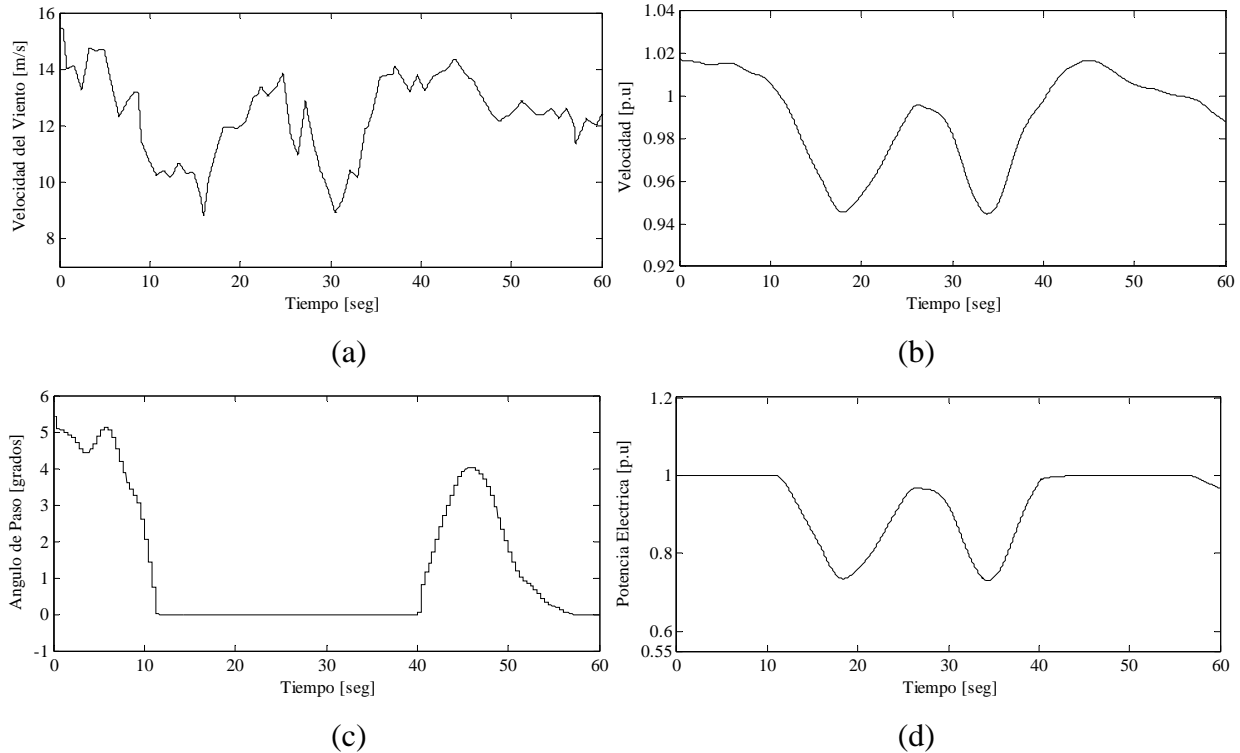


Figura 9. Resultados de las Simulaciones: (a) Secuencia de Velocidad del Viento, (b) Velocidad del rotor, (c) Angulo de paso, (d) Potencia Activa

Un examen más realista del desempeño de la turbina de viento, es hecho aplicando una a secuencia de un minuto de velocidad de viento medidos reportado en [1] y mostrada en la Figura 9(a). Este viento posee una alta variabilidad, lo que lo hace más realista. Entre 0 y 11.6s la velocidad del rotor y el ángulo de paso poseen transitorios de gran interés, esto se debe principalmente a que la velocidad ha superado su valor nominal y el control del ángulo de paso actúa para controlar la potencia mecánica que se le transfiere al rotor y mantener la potencia eléctrica igual a la nominal. Entre 11.6s y 40.4s, se observa un transitorio largo ya que aquí se producen fluctuaciones considerables en la velocidad del rotor las cuales se logran percibir de gran manera en la potencia generada. el ángulo de paso no presenta ninguna variación ya que la velocidad del rotor se encuentra por debajo de la velocidad nominal, por tal motivo este no actúa. Finalmente entre 40.4s y 56.55s, en este tramo se observa como la velocidad del rotor se incrementa tal hasta llegar a un punto máximo. Esta variación en la velocidad es controlada en su mayoría por el control del ángulo de paso el cual en cierta forma actúa para modificar la potencia mecánica de la máquina.

CONCLUSIONES

Simulaciones efectuadas sobre un sistema de prueba han permitido examinar el comportamiento de turbinas de viento de velocidad variable impulsando generador de inducción doblemente alimentado ante variaciones en la velocidad del viento. Una serie de tiempo para la

velocidad del viento en la forma de escalones permitió un examen de la respuesta de los controles del sistema; mostrando ser robusto el control; una simulación con una secuencia de un minuto de velocidad de viento medidos, mostrando un adecuado desempeño de los controles, en el seguimiento de la velocidad del viento para mantener la demanda programada al aerogenerador; un excelente comportamiento es observado en la dinámica.

Los resultados obtenidos del sistema de prueba, evidencian una respuesta muy rápida y efectiva de los controles. Sin embargo, se observa que la frecuencia de muestreo del controlador de ángulo de paso posee un efecto especialmente dominante en el desempeño en el seguimiento de la demanda; debido a los pasos discretos de cambio que implican en el sistema mecánico.

La integración de esta clase de generación a los sistemas de potencia es algo totalmente factible y viable. Los resultados obtenidos en este trabajo dan a entender que es una clase de generación que puede solventar los requerimientos energéticos sin ser agresivos al ambiente. Aunque no se deben obviar todas las variaciones que se introducen en los sistemas de potencia.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Thomas Ackermann, *Wind Power in Power Systems*. John Wiley & Sons, Ltd Stockholm, Sweden, 2005.
- [2] J. G. Slootweg. “Wind Power. Modeling and Impact on Power System Dynamics”. PhD Thesis. University of Delft. Netherland. December, 2003.
- [3] P. Ledesma, “Análisis dinámico de sistemas eléctricos con generación eólica”, Tesis Doctoral Universidad Carlos III de Madrid, España, 2001.
- [4] S. Heier. *Grid integration of wind energy conversion systems*. Chicester, UK: JohnWiley & Sons Ltd., 1998.
- [5] Patel, M.R. *Wind and Solar Power Systems*. CRC Press, Boca Raton, FL. 2000.
- [6] J.G. Slootweg, H. Polinder, W.L. Kling, “Dynamic Modeling of a Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator”, Faculty of Information Technology and Systems, Delft University of Technology, Netherland, 2001.
- [7] P. Kundur, *Power system stability and control*, New York: McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [8] Paul C. Krause, Oleg Wasynczuk, Scott D. Soudhoff, *Analysis of Electric Machinery*. McGraw-Hill, 1989.