

Modelación de un Sistema de Conversión de Energía Eólica de Velocidad Variable considerando el Fenómeno de Pandeo de la Torre

Pablo Sánchez

Nelson Aros

Universidad de La Frontera, Departamento de Ingeniería Eléctrica

Avda. Francisco Salazar 01145, Temuco, Chile

Resumen

Se estudia el efecto de pandeo de la torre de un sistema de conversión de energía eólica, de velocidad variable (SCEEVV), sobre la producción de energía eléctrica. El modelo utilizado para describir el problema de pandeo en SCEEVV está basado en la aplicación de la teoría de momento de elemento de aspa, BEM en régimen estacionario, la teoría de generadores eléctricos y la teoría de estructuras tipo vigas. El modelo resultante es multivariable, no lineal y con perturbaciones externas. Un análisis en lazo abierto es realizado y los resultados arrojan que variaciones en las entradas ejercen diferentes efectos sobre el SCEEVV cuando se tiene y no se tiene en cuenta el fenómeno de pandeo de la torre. Si el fenómeno es agregado en los cálculos de transferencia de potencia, entonces un porcentaje de energía eléctrica no es verdaderamente transferida a la red, mientras que si no se tiene en cuenta, el mismo porcentaje es falsamente transferido a la red.

Palabras claves: *conversión de energía eólica; modelo no lineal; Hammerstein*

Abstract

We study the effect of buckling of the tower of a wind energy conversion, variable speed (SCEEVV) on the production of electricity. The model used to describe the problem of buckling SCEEVV is based on the application of the theory of time blade element, BEM in steady state, the theory of electric generators and the theory of beam type structures. The resulting model is multivariable, nonlinear and external shocks. Open-loop analysis is performed and the results show that variations in the inputs have different effects on SCEEVV when you have and do not take into account the phenomenon of buckling of the tower. If the phenomenon is added in the calculations of power transfer, then an x% of electricity is not truly transferred to the grid, whereas if not taken into account, the x% is falsely transferred to the network.

Keywords: *wind energy conversion; nonlinear model; Hammerstein*

1. Introducción

Continuamente la tecnología utilizada en los distintos procesos industriales ha ido evolucionando en eficiencia a un ritmo creciente, lo cual ha implicado el establecimiento de líneas de trabajo en donde se deban optimizar los costos y la energía utilizada (Saez, 2000). De acuerdo a ello los procesos de generación de energía eléctrica no están exentos, han sido objeto de muchos estudios, en particular la generación por medio de energía eólica, con un fuerte énfasis desde 1980 -llamado periodo moderno de la tecnología eólica- por sus ya muy conocidas bondades y desventajas de utilización, pero al mismo tiempo aplicando una potente tecnología aún en etapa de maduración (Baker,2007).

Por otra parte, en Amirat (2009) se realiza un estudio de monitoreo de condiciones y diagnóstico de fallas de aerogeneradores con producciones de potencia del orden de los MW; y se indican que las fallas más comunes son en las etapas: eléctrica (17.5%), aerodinámica (13.4%), hidráulica (13.3%) y de control (12.9%), mientras que en las que menos fallas se presentan son en las etapas; estructural (1.5%), frenado mecánico (1.2%) y en el eje de alta y baja velocidad (1.1%).

En Arifujjaman (2009) se realiza un estudio de realizabilidad de las etapas de acondicionamiento de señal por medio de electrónica de potencia aplicado a aerogeneradores basados en generadores de imanes permanentes, cuya producción de potencia no supera los 2 KW y menciona el porcentaje de fallas de las etapas, lo cual revela que las etapas con mayor cantidad de fallas son: Aerodinámica (33.4%), eléctrica (20%), hidráulica (13.5%) y control (16.5%), mientras que las etapas con menor cantidad de fallas son: estructural (1.9%), frenado mecánico (1.2%) y en el eje de alta y baja velocidad (1%).

En un sistema de conversión de energía eólica -WECS- uno de los principales problemas es lograr la transferencia óptima de energía desde el campo de viento a la carga, aún más en un sistema de conversión de velocidad variable, la transferencia de energía convive en una dependencia bilateral, esto es, absorción de energía cinética del viento y entrega de energía eléctrica a una carga (Steinbuch, 1989).

1.1. Modelos de SCEVV

Los modelos que se utilizan para los SCEVV son muy definidos. Esto se debe a que siempre los modelos tienen como base la Mecánica Newtoniana o los Métodos de Energía basados en la Teoría de Hamilton.

Considerando que la torre es un sistema de parámetros distribuidos espacialmente y que el estudio de la dinámica de pandeo o flexión ya está determinada, entonces se presentan los principales trabajos realizados en esta área:

Existen varios modelos posibles para realizar un estudio del pandeo de una torre. En Meirovich (2000) se menciona las dinámicas de cuerdas en vibración transversal, barras cilíndricas en vibración axial, barras en torsión y vigas en pandeo. Para todas ellas se propone un modelo discretizado o de masas discretas, que consiste básicamente en discretizar la estructura en n -tramos, y las uniones entre esos tramos son llamados nodos.

Las fuerzas se ejercen con una intensidad F_i sobre cada masa m_i en un tiempo determinado. El movimiento está gobernado por ecuaciones diferenciales ordinarias y cada ecuación es para una sola masa m_i . Aquellos se tratan en forma independiente y después se suman los efectos producidos por cada uno para producir el efecto total. La desventaja es el esfuerzo computacional debido a que si aumenta la cantidad de nodos más ecuaciones se deben resolver.

Otro caso para análisis de cuerdas en vibración transversal, barras cilíndricas en vibración axial, barras en torsión y vigas en pandeo, es el modelo de energía a través del planteamiento de una función Hamiltoniana por medio del principio extendido de Hamilton (Meirovich, 2000), el cual se apoya del concepto de trabajo virtual. La ventaja de este planteamiento es que no es necesario establecer la dirección de las fuerzas y como consecuencia, tampoco hay signos de convención que establecer para determinar la vibración transversal, axial, o la torsión y el pandeo de una viga.

También en Meirovich (2000) y en Timoshenko & Gere (1963) se presentan un modelo de parámetros distribuidos en donde el pandeo de una torre se soluciona como un problema de valor frontera para el caso estático y un problema de valor inicial y frontera para el caso

dinámico. Cabe notar que en el caso dinámico el problema a resolver es por medio de una ecuación de D'alembert, la cual incluye dinámica temporal como espacial.

Un modelo más simple consiste en una masa con resorte y amortiguación, (MCK), donde el principal efecto a analizar es la frecuencia y amplitud de oscilación de un sólido rígido.

Cualquiera de los modelos explicados anteriormente sirve para analizar la frecuencia y la amplitud de oscilación, sin embargo la principal diferencia entre ellos reside en la exactitud y complejidad del análisis. Como en este trabajo interesa estudiar el efecto de pandeo de una torre en la producción energética, cualquiera de los modelos anteriores explicados, sirve para el análisis, entonces para efecto de simplificar el trabajo y sin pérdida de generalidad, se aplica el modelo MCK.

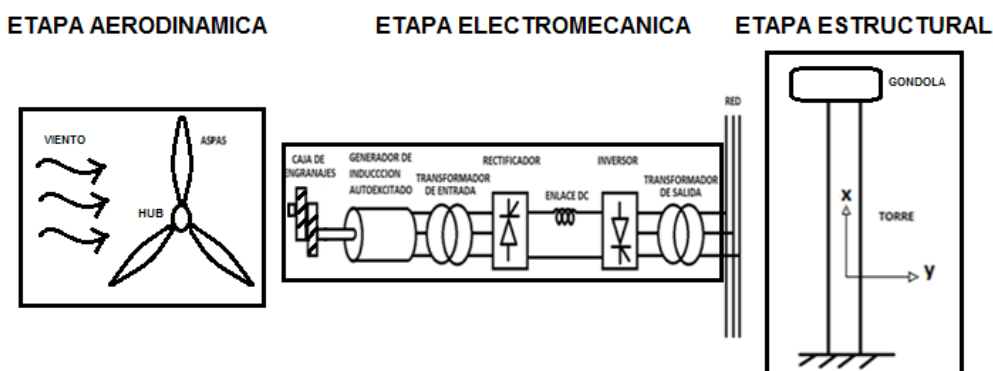
Para comprender el efecto del torque y fuerza de las aspas, ejercido sobre la góndola de un WECS, en Hansen (2008) y Burton (2001) se encuentra un exhaustivo análisis sobre la aerodinámica de aspas, los tipos de generadores comúnmente utilizados y las metodologías de control aplicadas sobre los SCEEVV, así también se estudian los efectos sobre el desempeño de los WECS debido a los fenómenos de sombra de las aspas, turbulencia y pandeo de las aspas. Los elementos que conforman la teoría de aspas de un SCEEVV son: Teoría de Momento de Elemento de Aspa (BEM), Teoría de Momento, Teoría de Elemento de Aspa y Teoría de Vortex entre otras. En particular el análisis en este trabajo es a través de la teoría del BEM en estado estacionario.

Si bien es cierto, un fenómeno poco frecuente en los SCEEV es la fatiga estructural (Amirat, 2009; Arifujjaman, 2009), el efecto que ella produce en los SCEEV no ha sido investigado. Por lo tanto de acuerdo al estudio bibliográfico realizado, no se detectan investigaciones que busquen analizar el efecto de pandeo de una torre eólica, frente a la producción de potencia. De tal manera que el estudio a realizar tiene por objetivo principal, la evaluación de los efectos de pandeo de la torre del SCEEVV, en la producción de energía eléctrica.

2. Modelo del Sistema de Conversión de Energía Eólica de Velocidad Variable

En este trabajo se utiliza el sistema eólico con los siguientes componentes: Aspas, rotor de baja velocidad, caja multiplicadora, rotor de alta velocidad, generador de inducción autoexcitado, rectificador controlado, enlace DC, inversor, carga y torre; ver Figura 1.

Figura 1. Componentes sistema aerogenerador



2.1. Etapa Aerodinámica

Esta etapa se compone esencialmente de las aspas y el Hub -los datos se encuentran en Hansen (2008 página 59). Existen distintos tipos de análisis para estudiar los fenómenos

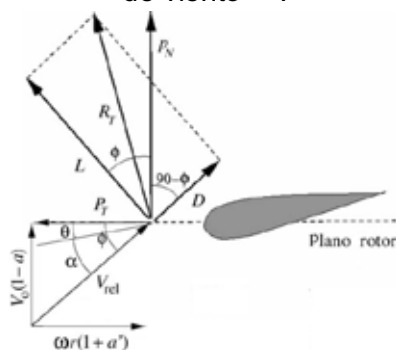
aerodinámicos en las turbinas eólicas, los cuales en general se clasifican según la zona de trabajo: a) Zona Local, se utiliza la Teoría de Momento de Elemento de Aspa (BEM), b) Zona Semi-Global, se utiliza la Teoría de Estela de Vórtices y c) Zona Global, se utiliza la Teoría de Navier-Stokes para dinámica de fluidos. En la Figura 2 se aprecian las zonas de trabajo y la teoría con la cual se analizan (Munduate, CENER, 2003).

El análisis aerodinámico aplicado en este trabajo está basado en la teoría del Momento de Elemento de Aspa –BEM en estado estacionario (Burton, 2001; Hansen, 2008). De esta Teoría es posible obtener el torque y la fuerza axial cuando el viento impacta con las aspas. Esto se logra por medio del conocimiento de los datos estructurales básicos del aspa (Hansen, 2008). Los datos estructurales básicos del aspa, son: cuerda, c , ángulo de flujo, ϕ , largo, R , coeficientes de elevación, C_L , y de arrastre C_D . La Teoría está basada en la resolución de un algoritmo iterativo que permite encontrar los valores de los factores de inducción axial y tangencial, ya que ellos es posible determinar el torque, la fuerza axial y el coeficiente de potencia de la turbina. Ver figura 3.

Figura 2. Zonas de trabajo para análisis aerodinámico de un aerogenerador



Figura 3. Diagrama de torque y fuerzas en un perfil estación de aspa sometido a un campo de viento V_0 .



La conexión existente entre la etapa aerodinámica y la etapa electromecánica es por medio del torque, la velocidad angular del eje de baja velocidad generados por la turbina, y el coeficiente de potencia de la turbina. La conexión que existente con la etapa estructural, es la fuerza axial total, $F_{x-total}$, ejercida por la turbina sobre la góndola. La fuerza axial total, $F_{x-total}$, está definida como la sumatoria de las fuerzas axiales, P_N , de cada estación de aspa (Burton, 2001). Ver figura 3.

2.2. Etapa Electromecánica

Esta etapa está encargada de percibir el movimiento del eje desde la caja de engranajes y por medio de inducción magnética se logra la generación de electricidad de amplitud y frecuencia variable. Posteriormente la energía pasa a través de un transformador de

reducción con relación de transformación $1:n$, con $n < 1$, donde n es la relación de vueltas del transformador. Más tarde se rectifica esta señal por medio de un puente de tiristores. A la salida del puente se conecta una etapa rectificadora de corriente, cuya conexión es dada por una bobina y una resistencia en serie la cual recibe la señal y la envía suavizada a la etapa inversora de corriente. Después esta señal es amplificada por medio de un transformador de elevación con relación $n:1$ y finalmente se conecta a la red.

2.3. Etapa Estructural

En la figura 1 se muestra el esquema de la etapa estructural. Para comprender el fenómeno de pandeo producido en la torre de un aerogenerador, se remitirá a la Figura 4. De acuerdo a ello, si se sitúa una referencia X-Y en la base de la torre el pandeo se produce de la siguiente manera: Cuando existe un campo de viento, $v(t)$, que atraviesa una estructura de tipo columna vertical (torre), y a las aspas de una turbina eólica se produce una fuerza, $F(t)$, sobre la góndola y esta arrastra a la torre. Dependiendo del viento y de los parámetros estructurales de la torre, se pandeará con respecto a su eje (eje paralelo a la torre) en un cierto ángulo de desplazamiento $\psi(t)$. El modelo más simple a considerar consiste en una masa con resorte y amortiguación, (MCK), ver Figura 5.

Figura 4. Pandeo de la torre

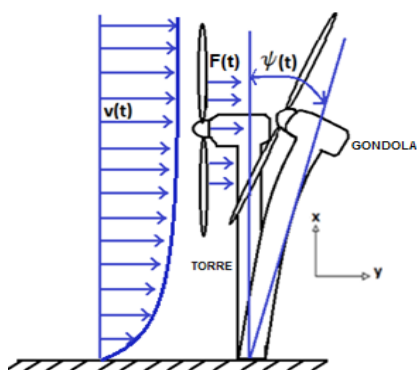
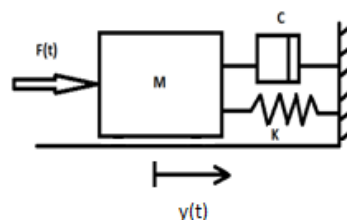


Figura 5. Modelo del Pandeo de la torre



A la luz del acontecimiento de pandeo en el sistema de conversión eólico, se puede analizar las oscilaciones de la torre como un sistema masa-resorte-amortiguador, el cual proviene del planteamiento de la mecánica clásica de Newton.

2.4. Modelo No lineal del sistema de conversión eólico

$$\sigma_{r_i} = \frac{Bc_{r_i}}{2\pi r_i} \quad (1)$$

$$\phi_{r_i} = \tan^{-1} \left(\frac{1 - a_{r_i}}{(1 + a'_{r_i}) \lambda_{r_i}} \right) \quad (2)$$

$$\alpha_{r_i} = \phi_{r_i} - \beta_{r_i} + \psi_{r_i}(t) \quad (3)$$

$$C_{n,r_i} = C_{L,r_i} \cos \phi_{r_i} + C_{D,r_i} \sin \phi_{r_i} \quad (4)$$

$$C_{t,r_i} = C_{L,r_i} \sin \phi_{r_i} - C_{D,r_i} \cos \phi_{r_i} \quad (5)$$

$$a_{r_i} = \frac{1}{\frac{4 \text{sen}^2 \phi_{r_i}}{\sigma_{r_i} C_{n,r_i}} + 1} \quad (6)$$

$$a'_r = \frac{1}{\frac{4 \cos \phi_r \operatorname{sen} \phi_r}{\sigma_r C_{L,r_i}} - 1} \quad (7)$$

$$V_{rel,r_i} = \frac{V(1-a_r)}{\sin \phi_r} \quad (8)$$

$$L_{r_i} = \frac{1}{2} \rho V_{rel,r_i}^2 c_r C_{L,r_i}(\alpha_r) \quad (9)$$

$$D_{r_i} = \frac{1}{2} \rho V_{rel,r_i}^2 c_r C_{D,r_i}(\alpha_r) \quad (10)$$

$$p_{T,r_i} = L_{r_i} \sin \phi_r - D_{r_i} \cos \phi_r \quad (11)$$

$$p_{N,r_i} = L_{r_i} \cos \phi_r + D_{r_i} \sin \phi_r \quad (12)$$

$$A_i = \frac{p_{T,r_{i+1}} - p_{T,r_i}}{r_{i+1} - r_i} \quad (13)$$

$$B_i = \frac{p_{T,r_i} r_{i+1} - p_{T,r_{i+1}} r_i}{r_{i+1} - r_i} \quad (14)$$

$$T_{i,i+1} = \frac{1}{3} A_i (r_{i+1}^3 - r_i^3) + \frac{1}{2} B_i (r_{i+1}^2 - r_i^2) \quad (15)$$

$$T_{i-total} = B \sum_{i=1}^{N-1} T_{i,i+1} \quad (16)$$

$$C_{r_i} = \frac{p_{N,r_{i+1}} - p_{N,r_i}}{r_{i+1} - r_i} \quad (17)$$

$$D_i = \frac{p_{N,r_i} r_{i+1} - p_{N,r_{i+1}} r_i}{r_{i+1} - r_i} \quad (18)$$

$$F_{x_{r_i},r_{i+1}} = \frac{1}{2} C_{r_i} (r_{i+1}^2 - r_i^2) + \frac{1}{2} D_{r_i} (r_{i+1} - r_i) \quad (19)$$

$$F_{x-total} = B \sum_{i=1}^{N-1} F_{x_{r_i},r_{i+1}} \quad (20)$$

$$C_p(\lambda_r, \beta_r) = \frac{8}{\lambda^2} \int_{\lambda_{hub}}^{\lambda} Q_{r_i} \lambda_r^3 a'_r (1-a_r) \left[1 - \frac{C_{D,r_i}}{C_{L,r_i}} \tan \beta_r \right] d\lambda_r \quad (21)$$

$$p^2 y_i(t) = -\frac{k}{M} p y_i(t) - \frac{c}{M} y_i(t) + \frac{1}{M} F_{x-total} \quad (22)$$

$$M = M_{GONDOLA} + M_{TORRE} \quad (23)$$

$$M_{TORRE} = \rho_{acero} \pi \left(\left(\frac{D_e}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_i}{2} \right)^2 \right) L \quad (24)$$

$$k = \frac{3EI}{L^3} \quad (25)$$

$$\psi(t) = \tan^{-1} \left(\frac{y(t)}{L} \right) \quad (26)$$

$$p \omega_g = \frac{1}{J_g} \left[-f_m \omega_g + P T_{i-total} + T_e \right] \quad (27)$$

$$T_e = \frac{3}{2} P^2 L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (28)$$

$$p v_{ds} = \frac{1}{C_0} \left[i_{ds} - \frac{2\sqrt{3} n I_{dc} \cos \alpha_r}{\pi} \right] \quad (29)$$

$$pI_{dc} = \frac{1}{L_{dc}} \left[-R_{dc} I_{dc} + \frac{3\sqrt{3}nv_{ds} \cos \alpha_r}{\pi} + \frac{3\sqrt{3}v_{inv} \cos \alpha_l}{\pi} - \frac{3x_{ci} I_{dc}}{\pi} \right] \quad (30)$$

$$pi_{qs} = -R_s A_1 i_{qs} - \left(\frac{1}{C_0 v_{ds}} \left[i_{qs} + \frac{2\sqrt{3}nI_{dc} \sin \alpha_r}{\pi} \right] + A_2 \omega_g L_m \right) i_{ds} + R_r A_2 i_{qr} - A_1 \omega_g L_m i_{dr} \quad (31)$$

$$pi_{ds} = \left(\frac{1}{C_0 v_{ds}} \left[i_{qs} + \frac{2\sqrt{3}nI_{dc} \sin \alpha_r}{\pi} \right] + A_2 \omega_g L_m \right) i_{qs} - R_r A_1 i_{ds} + R_r A_2 i_{dr} + A_1 \omega_g L_m i_{qr} - A_1 v_{ds} \quad (32)$$

$$pi_{qr} = R_s A_2 i_{qs} + A_2 \omega_g L_s i_{ds} - A_3 i_{qr} + \left(\frac{1}{C_0 v_{ds}} \left[i_{qs} + \frac{2\sqrt{3}nI_{dc} \sin \alpha_r}{\pi} \right] + A_1 \omega_g L_m \right) i_{dr} \quad (33)$$

$$pi_{dr} = -A_2 \omega_g L_s i_{qs} + R_s A_2 i_{ds} - A_3 i_{dr} + A_2 v_{ds} + \left(\frac{1}{C_0 v_{ds}} \left[i_{qs} + \frac{2\sqrt{3}nI_{dc} \sin \alpha_r}{\pi} \right] - A_1 \omega_g L_s \right) i_{qr} \quad (34)$$

$$A_1 = \frac{L_r}{L_s L_r - L_m^2} \quad (35)$$

$$A_2 = \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} \quad (36)$$

$$A_3 = \frac{R_r (1 + A_2 L_m)}{L_r} \quad (37)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, 17$

En la Tabla 1 se definen las variables consideradas; en la Tabla 2 se indican los parámetros y en la Tabla 3 las entradas y salidas.

Tabla 1. Variables del SCEEVV

Símbolo	Variable
$T_{T_r, \eta+1}$	Torque, generado por la r i-esima estación de un aspa
$T_{t-total}$	Torque total, generado por todas las aspas
$F_{x_{T_r, \eta+1}}$	Fuerza axial, generado por la r i-esima estación de un aspa
$F_{x-total}$	Fuerza axial total, generado por todas las aspas
$C_p(\lambda_{r_i}, \beta_{r_i})$	Coficiente de potencia de la turbina
P_{T, r_i}	Fuerza tangencial en la r i-esima estación de un aspa
P_{N, r_i}	Fuerza Normal en la r i-esima estación de un aspa
L_{r_i}	Fuerza de elevación en la r i-esima estación de un aspa
D_{r_i}	Fuerza de arrastre en la r i-esima estación de un aspa
λ_{r_i}	Razón de velocidad para la r i-esima estación de un aspa
λ	Razón de velocidad en la punta de un aspa
β_{r_i}	Angulo de pitch en la r i-esima estación de un aspa
β	Angulo de pitch en la punta de un aspa
α_{r_i}	Angulo de ataque en la r i-esima estación de un aspa
α	Angulo de ataque en la punta de un aspa
ϕ_{r_i}	Angulo de flujo del viento para la r i-esima estación de un aspa
ϕ	Angulo de flujo del viento en la punta de un aspa

a_{r_i}	Factor de inducción axial en la r i-esima estación de un aspa
a'_{r_i}	Factor de inducción tangencial en la r i-esima estación de un aspa
V_{rel,r_i}	Velocidad relativa del viento que ve la r i-esima estación de un aspa
$y_t(t)$	Posición de la torre
$\psi(t)$	Angulo de flexión de la torre
ω_g	Velocidad del generador
i_{ds}, i_{qs}	Corrientes del estator en ejes d-q
i_{dr}, i_{qr}	Corrientes del rotor en ejes d-q
v_{ds}	Voltaje del estator en el eje d
I_{dc}	Corriente del enlace DC
α_r, α_i	Ángulos de disparo del Rectificador y el inversor
v_{inv}	Voltaje de salida del inversor
T_e	Torque eléctrico
P_0	Potencia eléctrica generada
p	Operador derivada

Tabla 2. Parámetros del SCEVV

Símbolo	Parámetro
r_i	Distancia r i-esima de una estación de aspa al hub
R	Largo de un aspa
c_{r_i}	Cuerda de la r i-esima estación de aspa
σ_{r_i}	Angulo de solidez para la r i-esima estación de aspa
ρ	Densidad del viento
N	Número de estaciones del aspa
B	Numero de aspas
h	Altura torre
Q_{r_i}	Factor de corrección de glauert para la r i-esima estación de aspa
C_{D,r_i}	Coefficiente de arrastre de la estación r i-esima de una estación de aspa
C_{L,r_i}	Coefficiente de elevación de la estación r i-esima de una estación de aspa
M	Masa del cuerpo
k	Constante del resorte
c	Constante de amortiguación viscosa
E	Modulo de Young de la torre
I	Momento de Inercia del área de la sección transversal de la torre
L	Altura de la torre
η	Relación de transformación de la caja de engranajes
n	Relación de transformación del transformador
J_g	Inercia del eje de alta velocidad
P	Numero de pares de polos
R_s, R_r	Resistencias del estator y rotor respectivamente

L_s, L_r, L_m	Inductancias del estator, rotor y magnetización
C_0	Capacitancia de autoexcitación por fase
f	Coficiente de fricción
x_{ci}	Reactancia de conmutación del inversor
L_{dc}	Inductancia del enlace DC
R_{dc}	Resistencia del enlace DC

Tabla 3. Entradas y salidas del SCEVV

Entradas	Salidas
Angulo de Pitch	Posición de la torre
Angulo disparo rectificador	Velocidad generador
Angulo disparo inversor	Potencia eléctrica generada
Velocidad del Viento	Corriente estator eje q
Voltaje del Inversor	Corriente estator eje d
	Corriente rotor eje q
	Corriente rotor eje d
	Torque eléctrico
	Corriente enlace DC

En las Figuras 6 y 7 se muestra la interacción entre las etapas y la configuración de entrada-salida del sistema de conversión eólico.

Figura 6. Relación entre las variables de entrada y salida del SCEVV

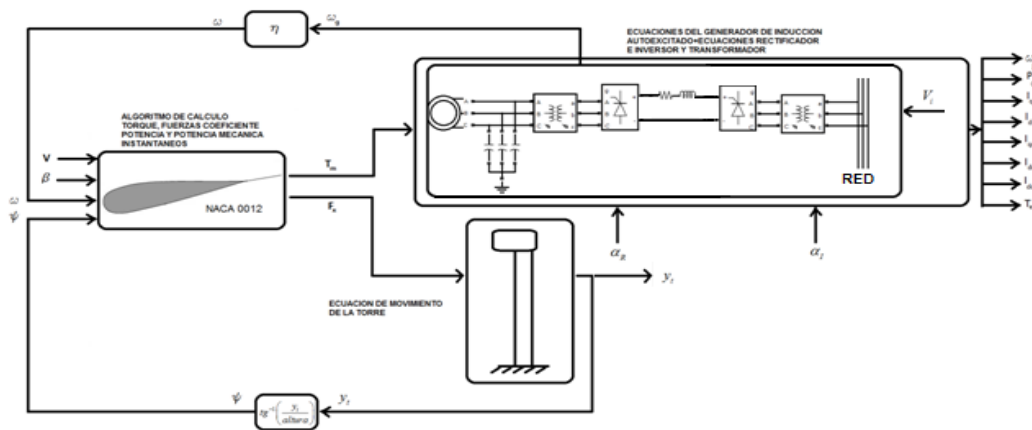
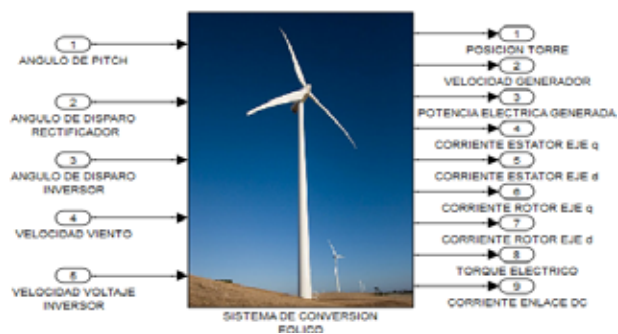


Figura 7. Representación entrada-salida del SCEVV



Se realizan los siguientes supuestos en cada una de las etapas del sistema de conversión eólico:

- 1°. En la etapa aerodinámica se considera: (i) La pala utilizada es un modelo tipo NACA numero 0012; (ii) El factor de corrección de glauert, Q , es igual a 1; (iii) Los valores del factor de inducción axial "a" se encuentra entre 0 y 0.5 y el factor de inducción tangencial "a'" está entre 0 y -10. Con esos valores se puede aplicar la teoría del Momento de Elemento de Aspa; y (iv) El coeficiente de arrastre, C_d , entre el campo de viento que impacta a las aspas, es nula en cada una las aspas.
- 2°. En la etapa Electromecánica se considera: (i) No hay pérdidas por roce en los engranajes; y (ii) No hay pérdidas por conmutación en los tiristores de rectificación e inversión de señal.
- 3°. En la etapa Estructural se considera: (i) La torre solo se mueve en dos dimensiones, paralelo al flujo de viento que impacta a las aspas; (ii) El material de la torre, se asume como acero; (iii) La base de la torre está totalmente compacta y rígida. No hay dinámicas en la base; y (iv) El material de la torre, posee una composición suficientemente rígida para evaluar los efectos de pandeo de la torre.

2.5. Caracterización del modelo no lineal por un modelo de Hammerstein

Dado que: (i) La Etapa aerodinámica es no lineal y estática en el tiempo; (ii) La Etapa Electromecánica es no lineal e invariante en el tiempo; y (iii) La Etapa estructural es Lineal e invariante en el tiempo; el modelo del sistema de conversión eólico puede ser representado bajo una estructura del tipo Hammerstein, en donde los componentes principales son una función de entrada no lineal estática y un modelo lineal dinámico (Sáez, 2000).

Donde, esquemáticamente se tiene:

$$u(t) \rightarrow \boxed{f(u(t))} \rightarrow x(t) \rightarrow \boxed{\frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}} \rightarrow y(t)$$

en este caso: $y(t) = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} x(t)$ $x(t) = f(u(t))$

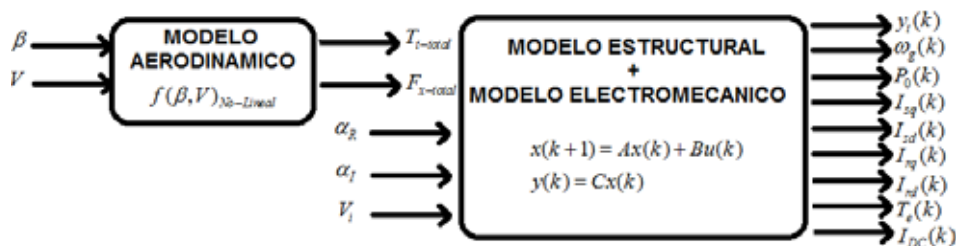
Con $A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{n_y} q^{-n_y}$ $B(q^{-1}) = b_1 q^{-1} + \dots + b_{n_u} q^{-n_u}$

Donde $x(t)$ es una variable interna no medible y f es una función estática no lineal, que

puede ser aproximada por el siguiente polinomio de orden finito: $x(t) = \sum_{i=0}^N \gamma_i u^i(t)$

donde N es el grado del polinomio el cual da la exactitud de la aproximación y γ_i es un coeficiente. Por lo tanto el modelo del sistema de conversión eólico puede quedar expresado como la Figura 8, el cual posee una estructura del tipo Hammerstein.

Figura 8. Modelo sistema de conversión eólico como un modelo de Hammerstein



3. Resultados

Los valores de operación nominal del sistema eólico estudiado están indicados en las Tabla 4 y 5.

Tabla 4. Características de Operación Nominal para las entradas

Entradas	Rango de Trabajo	Punto de Operación (P.O)	Elevación escalón respecto del P.O.
Angulo de pitch [°]	≥ -10 , ≤ 10	0	15 [%]
Angulo disparo rectificador [°]	≥ 0 , ≤ 90	0	15 [%]
Angulo disparo inversor [°]	≥ 90 , ≤ 180	90	20 [%]
Velocidad del Viento [m/s]	≥ 3 , ≤ 20	16	20 [%]
Tensión de Salida Inversor [V]	cualquiera	200	20 [%]

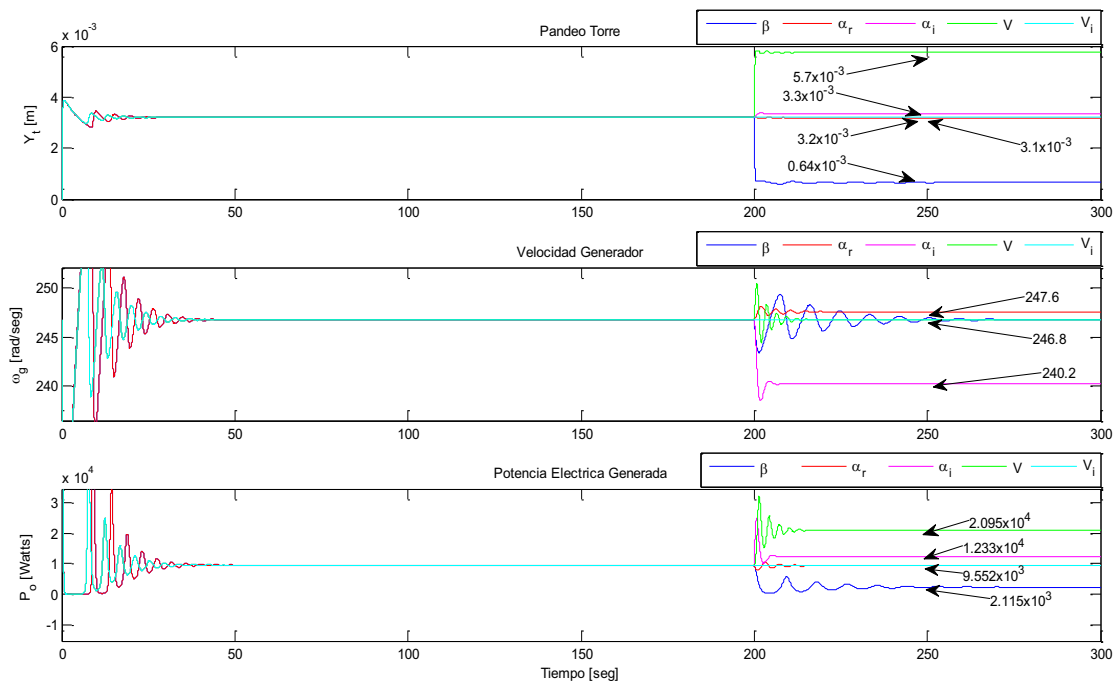
Tabla 5. Características de Operación Nominal para las salidas

SALIDAS	Punto de Operación
Posición de la torre [m]	0.0032
Velocidad generador [rad / seg]	249.27
Potencia eléctrica generada [KW]	9.55
Corriente estator eje q [A]	114.60
Corriente estator eje d [A]	2.41
Corriente rotor eje q [A]	62.36
Corriente rotor eje d [A]	-5.06
Torque eléctrico [Nm]	-1017
Corriente enlace DC [A]	43.73

Básicamente de los resultados encontrados en las respuestas del SCEVV, se desprende que existe una dependencia de las oscilaciones de la torre debido a las variables aerodinámicas de entrada y a los parámetros de rigidez que posee la torre. Los fenómenos oscilatorios en la velocidad del generador, producen un torque oscilatorio que desgasta al sistema mecánico y ocurren por un tiempo relativamente largo. Lo anterior se debe principalmente a las variables aerodinámicas ya que hay una fuerte dependencia del torque mecánico con los ejes de alta y de baja velocidad. También las fuerzas generadas por las aspas son principalmente axiales dependiendo del ángulo de pitch que tengan las aspas. Entonces cuando el ángulo de pitch es mínimo, es decir 0, entonces se genera una fuerza axial máxima, y esto implica que la torre se pandea más que cuando el ángulo de pitch se aleja del máximo, lo cual genera un enderezamiento de la torre, o más bien una reducción del ángulo $\psi(t)$.

Las consecuencias sobre la generación de potencia eléctrica se pueden visualizar desde la Figura 9. Si bien es cierto, lo que se espera siempre es que la torre del SCEVV se mantenga en una posición vertical fija para lograr una transferencia de potencia que dependa solo de actuaciones del ángulo de pitch y/o de Yaw en otras ocasiones, lo que vemos en la Figura 9 es insólito, puesto que a medida que la torre tiene un ángulo de pandeo menor o se endereza, la producción de potencia eléctrica disminuye, mientras que si no se hubiese movido la torre, entonces la potencia eléctrica no varía debido a que la velocidad y el torque, mecánico y eléctrico no han variado.

Figura 9. Respuesta a escalón de la posición, velocidad y potencia eléctrica generada.



4. Conclusiones

De lo anterior expuesto se puede concluir que el modelo propuesto permite evaluar los sistemas de generación eólica fácilmente, de modo de utilizar este modelo como un benchmark en el estudio de estrategias de control. La incidencia de la dinámica y parámetros estructurales de la torre sobre la producción de energía eléctrica, es fuerte y no trivial, a pesar de que no sea común ese fenómeno según Amirat (2009) y Arifujjaman (2009). Si bien es cierto, el pandeo es muy pequeño en comparación a la altura de la torre, la variación que se produce en la potencia eléctrica es apreciable. Los resultados arrojan que las oscilaciones eléctricas debido a las oscilaciones estructurales pasan primero por la etapa aerodinámica por medio de la velocidad del eje de alta y baja velocidad. Este hecho, permite presumir de que la etapa aerodinámica no es ni una especie de filtro en un caso y ni en otro caso es un amplificador, ya que las oscilaciones estructurales tienen mucha correlación con las oscilaciones eléctricas, a pesar de que no existe conexión directa entre la etapa estructural y la etapa aerodinámica, según se aprecia en la Figura 6. Por último es necesario agregar que no existen estudios realizados en literatura para contractar, evaluar o validar los resultados obtenidos. Como trabajo futuro se propone como método de validación del modelo, utilizar un modelo de aerogenerador real y con distinto modelo aerodinámico, mecánico y eléctrico, para comparar los resultados de mediciones de variables con la teoría propuesta, de esta forma se puede tener información mas sólida, respecto del funcionamiento de esta teoría.

Correspondencia:

M. Sc. Nelson Aros Oñate.

e-mail: naros@ufro.cl

Teléfono: 0056.45. 32 55 47, Fax: 0056.45. 32 55 50