



II CAIM 2010
Segundo Congreso Argentino
de Ingeniería Mecánica
San Juan - Noviembre 2010

Simulaciones numéricas del comportamiento dinámico no-lineal de un generador eólico sometido a cargas aerodinámicas inestacionarias

Jorge Muract⁽¹⁾, Sergio Preidikman^(1,2,3) y Julio Massa^(1,2)

⁽¹⁾ *Departamento de Estructuras, Facultad de C. E. F. y N., Universidad Nacional de Córdoba
Casilla de Correo 916, 5000 Córdoba, Argentina. e-mail: jmuract@efn.uncor.edu*

⁽²⁾ *Departamento de Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto
Ruta Nacional 36 Km. 601, 5800 Río Cuarto, Argentina*

⁽³⁾ *CONICET– Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Av. Rivadavia 1617,
1033 Buenos Aires, Argentina.*

RESUMEN

En este trabajo se presenta el desarrollo de simulaciones numéricas que permiten estudiar los aspectos que caracterizan la respuesta dinámica no-lineal de la estructura de una turbina eólica de eje horizontal y de gran potencia sometida a la acción de las cargas aerodinámicas inestacionarias sobre el rotor.

En la primera parte se desarrollan las ecuaciones de movimiento que gobiernan el sistema dinámico mediante el uso de las ecuaciones de Lagrange. En esas ecuaciones se consideran restricciones de tipo no-holonómica incluidas en forma de multiplicadores de Lagrange. El modelo numérico incluye: las palas que conforman el rotor de la turbina eólica, la barquilla y la torre portante. Las palas se consideran como un conjunto de múltiples cuerpos rígidos conectados perfectamente entre sí a través del cubo o nariz del rotor. La barquilla y la torre se modelan como dos cuerpos rígidos con parámetros concentrados, incluyendo la inercia rotacional.

En este esfuerzo se combina el modelo estructural arriba descrito con un modelo aerodinámico desarrollado en el grupo al que pertenecen los autores de este trabajo. Mediante el modelo aerodinámico se obtiene la variación espacio-temporal de la magnitud de las cargas aerodinámicas que actúan sobre cada una de las palas del rotor de la turbina. Estas cargas, de naturaleza no-lineal e inestacionaria, tienen en cuenta: la variación de la velocidad del viento incidente como consecuencia de la rugosidad del terreno (capa límite terrestre); y la ruptura de las estelas vorticosas proveniente de las palas al atravesar la torre.

Se estudia el comportamiento de la turbina eólica en todo su rango de funcionamiento realizando simulaciones para obtener la respuesta en régimen estacionario. Los resultados provenientes de las simulaciones numéricas son utilizados para cuantificar el efecto de considerar la dinámica de la torre en el cálculo de las cargas aerodinámicas sobre la respuesta del sistema.

Palabras Claves: Aerogeneradores, turbinas eólicas, aerodinámica, mecánica computacional.

1. INTRODUCCIÓN

Una parte significativa de la población rural de Sudamérica, no dispone ni dispondrá, en un corto plazo, de energía eléctrica. Esto se debe a la baja rentabilidad que poseen los sistemas de distribución convencionales en regiones de escasa densidad poblacional, de difícil acceso debido a las grandes distancias o accidentes geográficos, y a los bajos consumos de electricidad en las viviendas rurales. En las zonas donde se dispone de vientos regulares, una solución a este problema es la utilización de aerogeneradores [1, 2]. Es por ello que se ha fomentado la investigación y desarrollo de nuevas tecnologías destinadas a mejorar la calidad de los mismos y hacerlos económicamente competitivos como fuente de energía alternativa.

El presente trabajo es parte un proyecto que se esta desarrollando en forma conjunto por varias universidades del país y del extranjero, partiendo de una propuesta innovadora [3,4] orientada al desarrollo de modelos, técnicas y herramientas computacionales que permitan estudiar a los aerogeneradores de manera integral, considerando la interacción entre el aire, las turbinas, la estructura portante y los aspectos que caracterizan la respuesta dinámica no-lineal de un aerogenerador a cargas de origen aerodinámico, como un único sistema dinámico.

La estrategia para abordar el problema contempla elegir y desarrollar un modelo aerodinámico inestacionario y no-lineal [5], un modelo estructural híbrido multicuerpo [6,7], un sistema de control que permita optimizar la extracción de energía o que suprima las respuestas indeseadas, y un esquema de interacción que permita acoplar de manera fuerte todos los modelos propuestos, y finalmente integrar las ecuaciones gobernantes en el dominio del tiempo.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ESTUDIADO

En la Figura 1 se esquematizan las partes del aerogenerador y se especifican algunas hipótesis bajo las cuales se modeló el sistema estudiado.

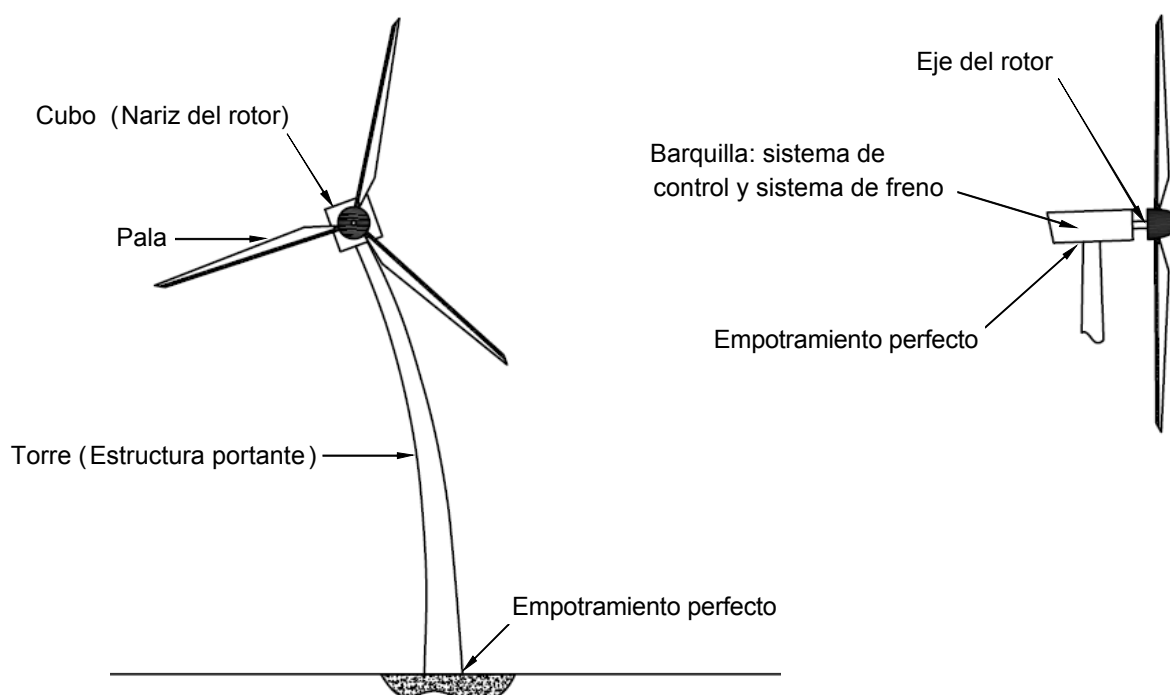


Figura 1: Esquema mostrando las componentes del sistema estudiado

El rotor está formado por tres palas perfectamente unidas entre sí a través del cubo o nariz del rotor. Las palas se consideran como un conjunto de múltiples cuerpos rígidos y tienen, en general, diferente envergadura, cuerda, momentos de inercia y masa, que son causadas por defectos de la fabricación y/o montaje, o por la ruptura repentina de una de las palas cuando el aerogenerador se encuentra en marcha.

La barquilla contiene el generador eléctrico, el sistema de frenado, el sistema de control y la caja multiplicadora de velocidades. La barquilla es el nexo estructural entre la torre y el rotor. A este conjunto de múltiples elementos se lo representa por medio de parámetros concentrados teniéndose en cuenta la inercia rotacional del mismo con respecto al eje del rotor. En cuanto al sistema de frenado se modela por medio de un amortiguador, el cual actúa entre el eje del rotor y la barquilla. El sistema de control se tiene en cuenta a través de un momento de control que actúa entre el eje del rotor y la barquilla. La respuesta del sistema de control frente a las cargas de origen aerodinámicas no se tiene en cuenta en este modelo numérico. Como trabajo futuro está previsto crear un modelo integral que relacione el sistema de control, con el modelo estructural aquí presentado y con el modelo aerodinámico antes mencionado.

En la primera parte del trabajo se obtienen las ecuaciones de movimiento a través de las ecuaciones de Lagrange. Este método permite trabajar en forma más sencilla las diferentes expresiones que describen el comportamiento del modelo estructural de una turbina eólica. Para un estudio detallado del modelo estructural del aerogenerador se imponen al mismo una serie de restricciones no-holonómicas que se introducen por medio de multiplicadores de Lagrange. Este método permite modelar adecuadamente el comportamiento de los diferentes grados de libertad y disminuir el tiempo insumido por las simulaciones [8].

Posteriormente, mediante un integrador desarrollado por Preidikman y Mook [9] se integran en el dominio del tiempo y de manera interactiva las ecuaciones de movimiento del sistema. Este integrador numérico posee, entre otras características, la propiedad de no introducir amortiguamiento de origen numérico. Además, con el fin de corroborar que las soluciones no dependen del método de integración utilizado, se realizan otras simulaciones utilizando el integrador numérico Runge Kutta de 4to orden [10].

3. ECUACIONES DE MOVIMIENTO

3.1. Generalidades

Para derivar las ecuaciones de movimiento se utilizan las Ecuaciones de Lagrange. Este método requiere las expresiones de las diferentes energías presentes en el sistema dinámico: energía cinética T , energía potencial V , y la energía disipada F . Por otro lado, es necesario calcular las expresiones de las diferentes cargas generalizadas Q , provenientes de las fuerzas externas no conservativas excepto las de origen viscoso.

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right] - \frac{\partial T}{\partial q_j} + \frac{\partial V}{\partial q_j} + \frac{\partial F}{\partial \dot{q}_j} = Q_j \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (1)$$

donde q_j denota la coordenada generalizada "j".

3.2. Modelado del sistema

En este trabajo se utiliza un modelo muy simplificado que sólo posee cuatro grados de libertad: el desplazamiento lateral de la torre $X(t)$, el desplazamiento vertical de la torre $Y(t)$, el giro del rotor con respecto a la barquilla $\theta(t)$, y giro de la barquilla con respecto a una horizontal $\alpha(t)$, causado por la flexión de la torre portante. En la Figura 2 se esquematiza este modelo y los sistemas de referencia.

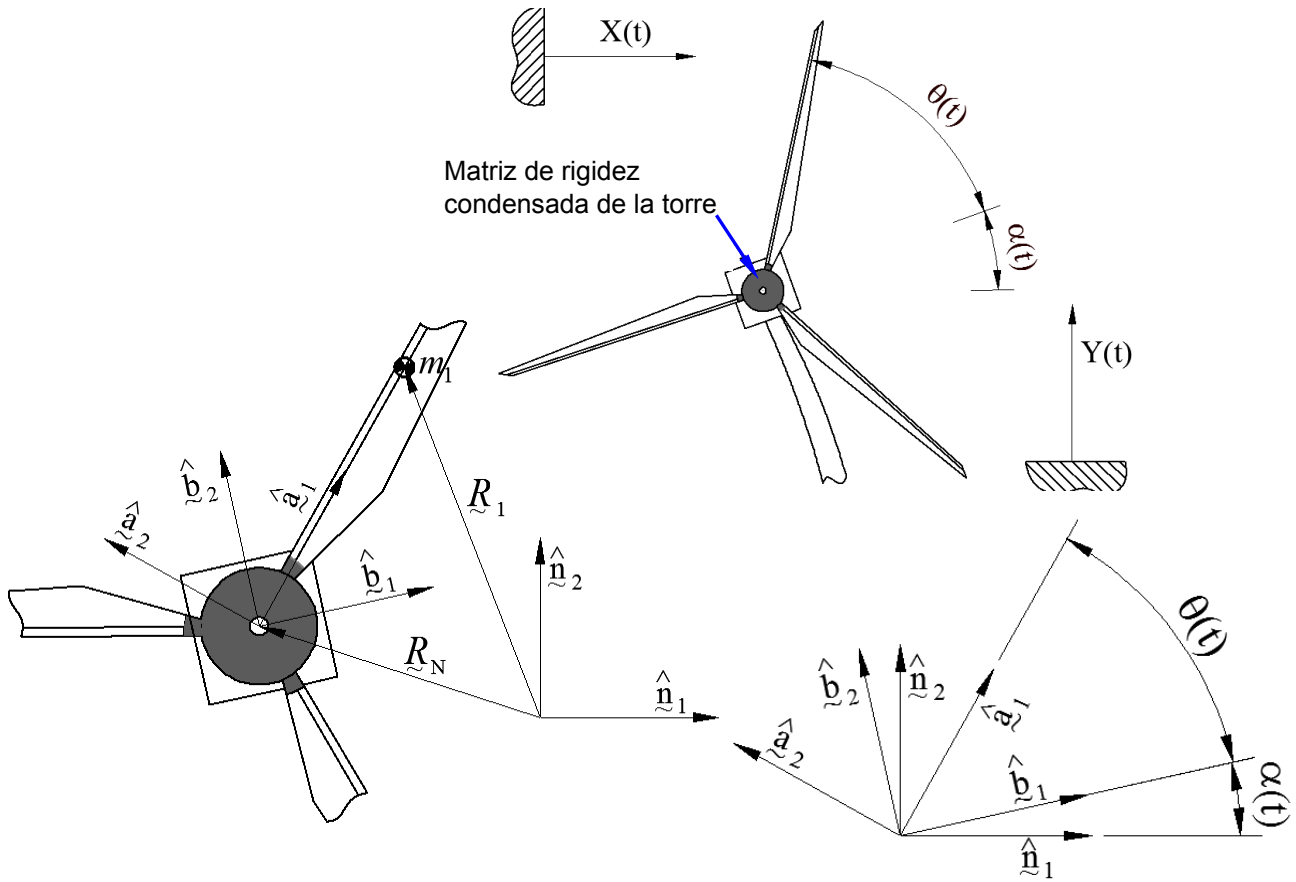


Figura 2: (a) Modelo estructural del aerogenerador. (b) y (c) Sistemas de referencia

3.3. Energía Cinética del sistema

El rotor está formado por tres palas perfectamente unidas entre sí a través del cubo o nariz del rotor. Estas se consideran como un conjunto de múltiples cuerpos rígidos los cuales poseen diferente envergadura (L_i), cuerda (c_i), masa (m_i), distancia desde el eje del rotor al centro de masa de la pala (r_i) e inercia másica rotacional respecto del eje del rotor ($I_i = m_i r_i^2$), que son causadas por efectos de la fabricación, por el mal montaje o por la ruptura repentina de una de las palas cuando el aerogenerador se encuentra en marcha. Por este motivo, la energía cinética y potencial que aporta cada una de las palas es diferente. M y J indican respectivamente la masa y el momento de inercia másico de la barquilla. Las ecuaciones 2 a 5 representan la energía cinética de los elementos del modelo.

$$T_{\text{pala } 1} = \frac{1}{2} m_1 (\dot{X}^2 + \dot{Y}^2) + \frac{1}{2} I_1 (\dot{\theta} + \dot{\alpha})^2 + m_1 [r_1 (\dot{\theta} + \dot{\alpha})] [\dot{Y} \cos(\theta + \alpha) - \dot{X} \sin(\theta + \alpha)] \quad (2)$$

$$T_{\text{Pala } 2} = \frac{1}{2} m_2 (\dot{X}^2 + \dot{Y}^2) + \frac{1}{2} I_2 (\dot{\theta} + \dot{\alpha})^2 + m_2 [r_2 (\dot{\theta} + \dot{\alpha})] [\dot{Y} \cos(\theta + \alpha + 2\pi/3) - \dot{X} \sin(\theta + \alpha + 2\pi/3)] \quad (3)$$

$$T_{\text{Pala } 3} = \frac{1}{2} m_3 (\dot{X}^2 + \dot{Y}^2) + \frac{1}{2} I_3 (\dot{\theta} + \dot{\alpha})^2 + m_3 [r_3 (\dot{\theta} + \dot{\alpha})] [\dot{Y} \cos(\theta + \alpha + 4\pi/3) - \dot{X} \sin(\theta + \alpha + 4\pi/3)] \quad (4)$$

$$T_{\text{Barquilla}} = \frac{1}{2} M (\dot{X}^2 + \dot{Y}^2) + \frac{1}{2} J \dot{\alpha}^2 \quad (5)$$

La energía cinética total de este modelo estructural se obtiene sumando las contribuciones de los elementos

$$T = T_{\text{Pala } 1} + T_{\text{Pala } 2} + T_{\text{Pala } 3} + T_{\text{Barquilla}} \quad (6)$$

3.4. Cálculo de la energía potencial

La energía potencial gravitatoria del sistema, V_g , es:

$$V_g = Y(M + m_1 + m_2 + m_3)g + m_1 r_1 \sin(\theta + \alpha)g + m_2 r_2 \sin(\theta + \alpha + 2\pi/3)g + m_3 r_3 \sin(\theta + \alpha + 4\pi/3)g \quad (7)$$

donde g es la aceleración de la gravedad. Como se mencionó anteriormente, la torre se modela como un cuerpo flexible con parámetros concentrados con tres grados de libertad (X, Y, α). La matriz de rigidez se condensa en el eje del rotor (centro de la barquilla). Las palas no contribuyen a la energía potencial elástica V_e del sistema; la misma se origina de la elasticidad de la torre y está dada por:

$$V_e = \frac{1}{2} \{ X \ Y \ \alpha \} \underbrace{\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix}}_{\text{Matriz de Rigidez de la torre}} \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ \alpha \end{Bmatrix} \quad (8)$$

3.5. Ecuaciones de movimiento

Introduciendo las expresiones de las energías calculadas anteriormente en las ecuaciones de Lagrange, se obtiene el siguiente sistema acoplado de ecuaciones diferenciales de movimiento.

$$\begin{cases} (m+M)\ddot{X} - A(\ddot{\theta} + \ddot{\alpha}) - B(\dot{\theta} + \dot{\alpha})^2 + K_{11}X + K_{21}Y + K_{13}\alpha = Q_x \\ (m+M)\ddot{Y} + B(\ddot{\theta} + \ddot{\alpha}) - A(\dot{\theta} + \dot{\alpha})^2 + K_{22}Y + K_{21}X + K_{23}\alpha = Q_y - g(m+M) \\ -A\ddot{X} + B\ddot{Y} + (I+J)\ddot{\alpha} + I\ddot{\theta} + K_{33}\alpha + K_{13}X + K_{23}Y = Q_\alpha - gB \\ -A\ddot{X} + B\ddot{Y} + I(\ddot{\theta} + \ddot{\alpha}) + C\dot{\theta} = Q_\theta - gB \end{cases} \quad (9)$$

donde Q_j son cargas generalizadas, C es el factor de amortiguamiento utilizado para modelar el sistema de freno, además:

$$\begin{aligned} I &= I_1 + I_2 + I_3 & A &= m_1 r_1 \sin(\theta + \alpha) + m_2 r_2 \sin(\theta + \alpha + 2\pi/3) + m_3 r_3 \sin(\theta + \alpha + 4\pi/3) \\ m &= m_1 + m_2 + m_3 & B &= m_1 r_1 \cos(\theta + \alpha) + m_2 r_2 \cos(\theta + \alpha + 2\pi/3) + m_3 r_3 \cos(\theta + \alpha + 4\pi/3) \end{aligned}$$

Para comenzar a estudiar el comportamiento no-lineal, se supone que todas las palas tienen la misma cuerda, envergadura y masa. Bajo estas hipótesis, las ecuaciones de movimiento se reducen a:

$$\begin{cases} (m+M)\ddot{X} + K_{11}X + K_{21}Y + K_{31}\alpha = Q_x \\ (m+M)\ddot{Y} + K_{22}Y + K_{21}X + K_{32}\alpha = Q_y \\ (I+J)\ddot{\alpha} + I\ddot{\theta} + K_{33}\alpha + K_{13}X + K_{23}Y = Q_\alpha \\ I(\ddot{\theta} + \ddot{\alpha}) + C\dot{\theta} = Q_\theta \end{cases} \quad (10)$$

4. CARGAS AERODINÁMICAS

En este trabajo se utiliza una herramienta computacional que simula numéricamente el comportamiento aerodinámico inestacionario y no-lineal de una turbina eólica de eje horizontal y de gran potencia (Large Horizontal-Axis Wind Turbines o LHAWT) desarrollada por Gebhardt y otros [5]. Esa herramienta permite analizar, entre otras, las interacciones asociadas a la existencia de la capa límite terrestre y a la ruptura de las estelas vorticosas cuando impactan sobre la torre. El fenómeno aerodinámico fue modelado mediante

una versión modificada y ampliada de la técnica de red de vórtices no-lineal e inestacionaria, que permite determinar la evolución en el tiempo y en el espacio de las cargas aerodinámicas que actúan sobre las palas. En la Figura 3 se muestra la evolución de la estela cuando se ignora la influencia de la torre (a) y cuando se la considera (b), en este caso último se puede observar la ruptura de la estela al atravesar la torre.

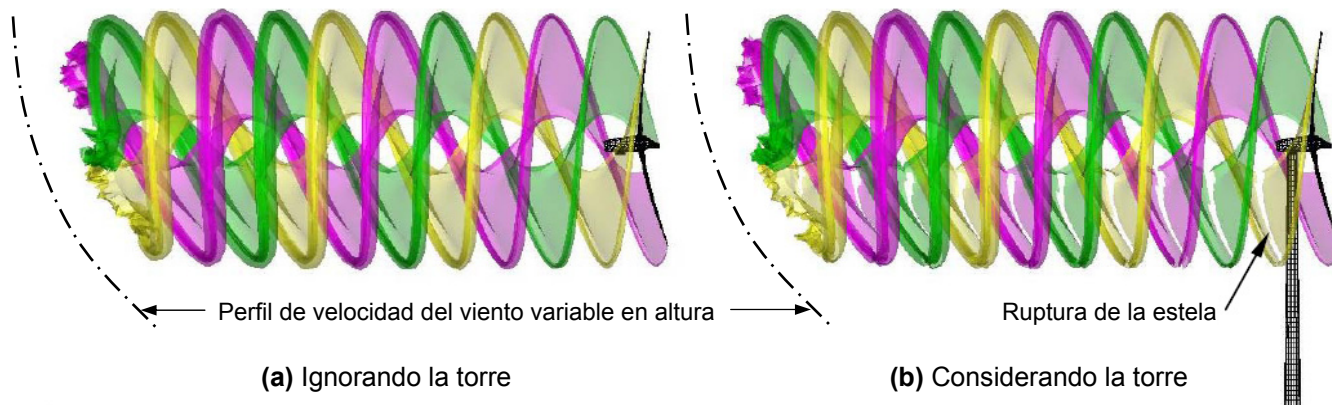


Figura 3: Influencia de la presencia de la torre portante del aerogenerador sobre las estelas [5]

El código aerodinámico entrega como salida, entre otros datos, el momento resultante sobre el eje del rotor. La evolución de este momento en función del ángulo de giro del rotor se muestra en la Figura 4 para un arranque del aerogenerador partiendo de la posición de reposo. El gráfico en línea llena tiene en cuenta el efecto de la torre, mientras que la línea de puntos lo ignora. Como se puede observar, luego de aproximadamente 90° el generador alcanza el estado de régimen con una velocidad de giro de 15 rpm. La incidencia de la interacción con la torre (línea llena en azul) es la aparición de una carga alterna con frecuencia triple de la de rotación del rotor; eso se debe a que pasan frente a la torre tres palas por cada vuelta. También, puede observarse que el valor medio del momento aerodinámico no se ve afectado por la interacción entre las estelas y la torre. La pequeña alternancia que se observa en el caso donde se ignora la interacción con la torre se debe al perfil de velocidad del viento que es variable en altura.

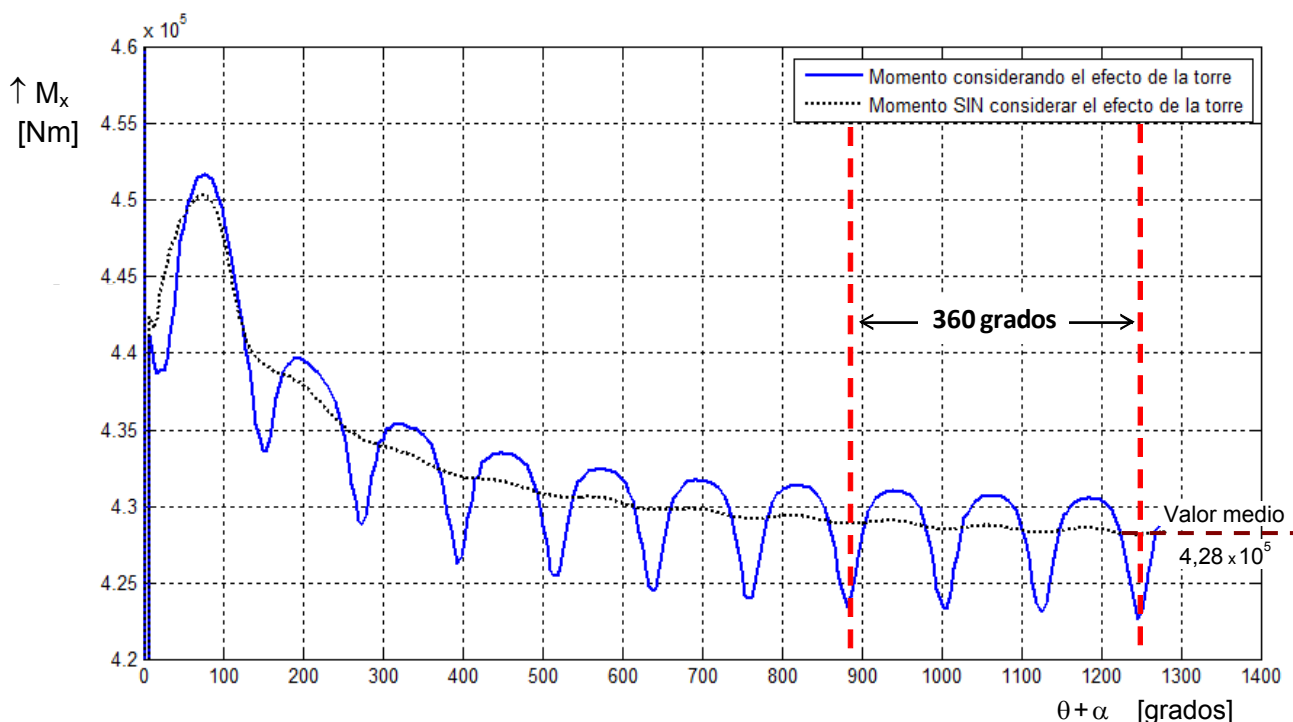


Figura 4: Momento sobre el eje del rotor [5]

A los fines de incorporar las cargas aerodinámicas calculadas en el citado trabajo, se interpoló por medio de una serie de Fourier el momento en régimen estacionario correspondientes a una vuelta del rotor y se utilizaron los primeros 10 armónicos. La ecuación utilizada para interpolar el momento aerodinámico, es:

$$M_x(\theta, \alpha) = a_0 + \sum_{n=1}^{10} \{ a_n \sin[n(\theta + \alpha)] + b_n \cos[n(\theta + \alpha)] \} \quad (11)$$

donde los coeficientes a_n y b_n se presentan en la Tabla 1. Notar que la armónica fundamental corresponde a $n = 3$ porque por cada vuelta del rotor pasan frente a la torre tres palas. De las restantes armónicas sólo tienen importancia la sexta y la novena, las otras resultan insignificantes y fueron ignoradas en la Tabla 1.

Tabla 1: Coeficientes de la Ecuación 11 para los dos casos estudiados

n	Considerando la interacción con la torre				Ignorando la interacción con la torre			
	a_0	a_n	b_n	$\sqrt{a_n^2 + b_n^2}$	a_0	a_n	b_n	$\sqrt{a_n^2 + b_n^2}$
3	428350	-2602,0	1778,3	3151,6	428390	-182,1	54,3	190,0
6		1245,3	457,8	1326,8		-6,9	18,7	19,9
9		-170,2	-445,2	476,6		13,2	-2,8	13,5

En la Figura 5 se comparan las magnitudes de los coeficientes de Fourier de la Tabla 1 correspondientes a los dos casos mostrados en la Figura 4 (ignorando y considerando el efecto de la interacción con la torre). Como se observa, el contenido en frecuencias hasta la décima armónica de ambas señales es el mismo, sin embargo la magnitud de los coeficientes de Fourier es muy diferente. Notar que el valor medio dado por a_0 es prácticamente el mismo en los dos casos (la diferencia es menor al 0,01 %).

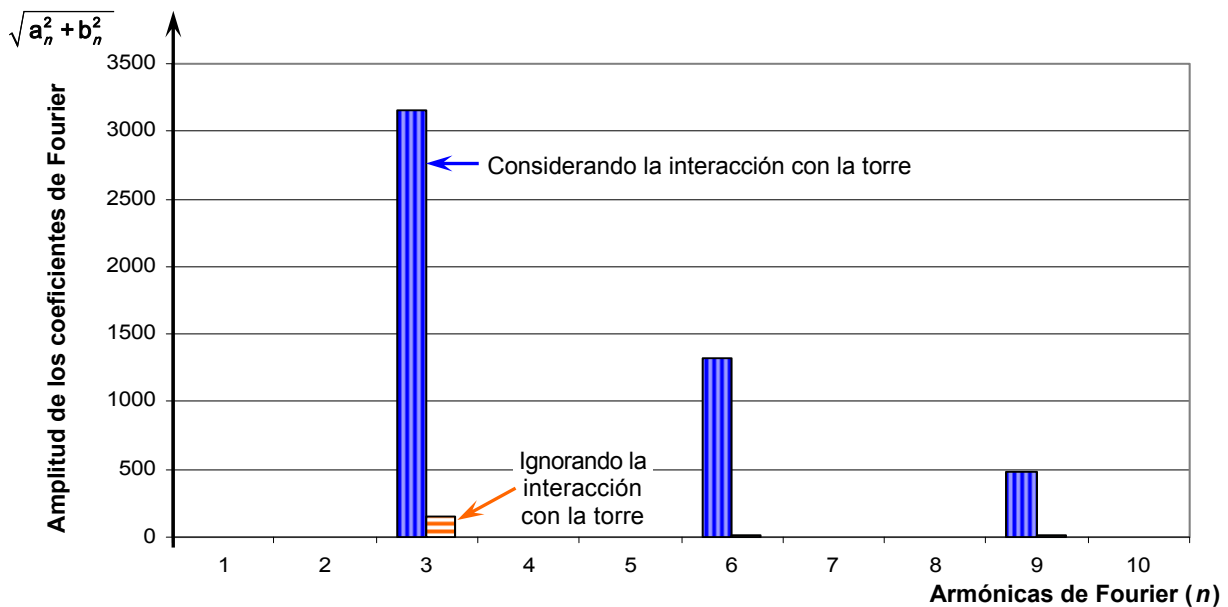


Figura 5: Magnitud de los coeficientes de la serie de Fourier

En la Figura 6 se compara la función interpolada con serie de Fourier en régimen estacionario y la obtenida mediante simulación numérica por [5] considerando el efecto de la torre. En la Figura 7 se muestran los mismos resultados de la Figura 6 cuando no se considera el efecto de interacción aerodinámica con la torre. Comparando las Figuras 6 y 7 se observa que la presencia de la torre introduce una carga alterna de valor no despreciable.

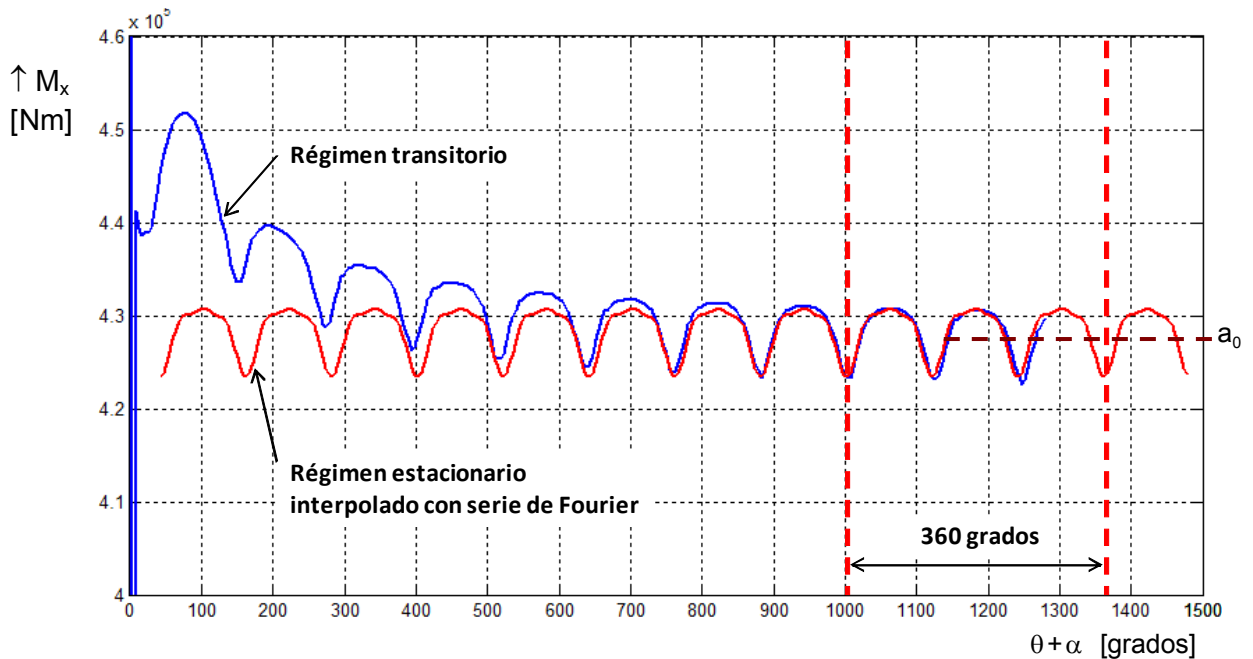


Figura 6: Interpolación por serie de Fourier del Momento sobre el eje del rotor considerando el efecto de la torre

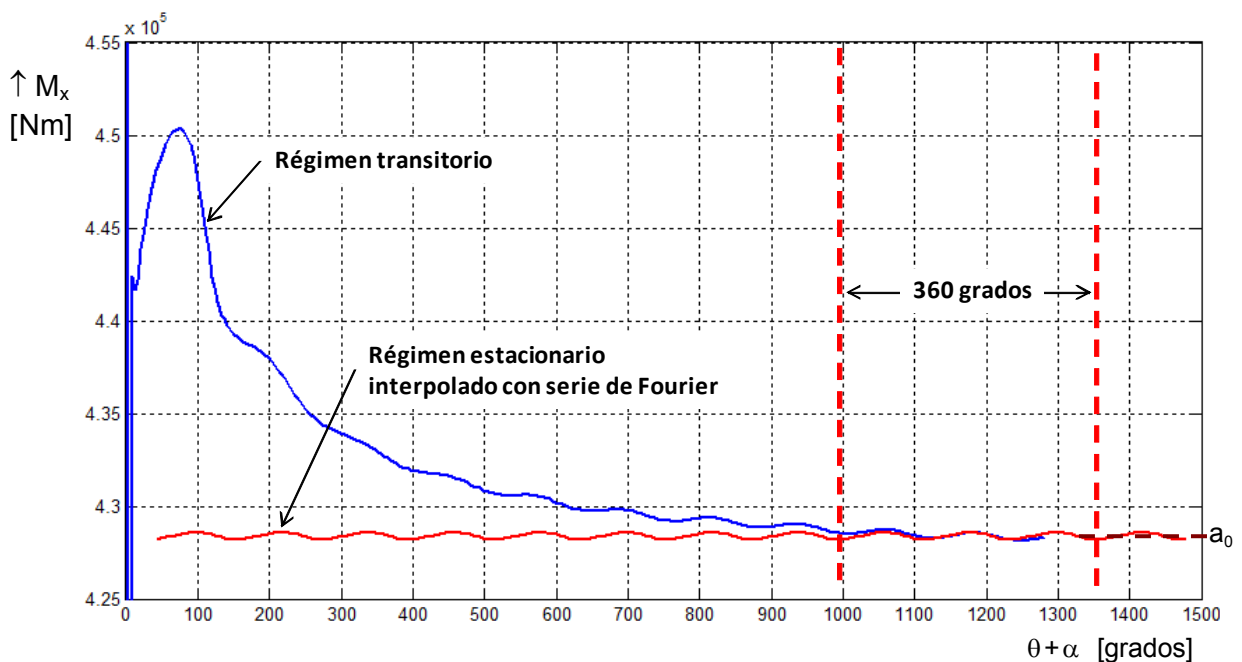


Figura 7: Interpolación por serie de Fourier del Momento sobre el eje del rotor ignorando el efecto de la torre

5. RESTRICCIONES NO-HOLONÓMICAS

Para simplificar el problema sin dejar de poner énfasis en el estudio de las no-linealidades, al modelo de la ecuación (10) se le agregaron restricciones de naturaleza no-holonómica. Para acelerar el proceso de integración, al grado de libertad vertical $Y(t)$ se le impuso una restricción de desplazamiento nulo de naturaleza no-holonómica ya que este grado de libertad no incide en el comportamiento no-lineal de los restantes grados de libertad. Las restricciones impuestas son las siguientes.

$$\forall t \geq 0 \quad \Rightarrow \quad Y(t) = 0, \quad \dot{Y}(t) = 0, \quad \ddot{Y}(t) = 0 \quad (12)$$

Este tipo de restricciones permite, de manera simple, simular situaciones particulares y tener control sobre

ciertos grados de libertad. En adición, se impusieron al grado de libertad $\theta(t)$ las siguientes restricciones.

$$\begin{aligned} \theta(t) &= f(t) = \text{Prescripto } \forall t \geq 0 \\ \dot{\theta}(t) &= \dot{f}(t), \quad \forall t \geq 0, \\ \ddot{\theta}(t) &= \ddot{f}(t), \quad \forall t \geq 0, \end{aligned} \quad (13)$$

Utilizando la técnica de los multiplicadores de Lagrange para imponer estas restricciones al sistema de ecuaciones, se obtiene:

$$\begin{cases} (m+M)\ddot{X} + K_{11}X + K_{13}\alpha = 0 \\ (I+J)\ddot{\alpha} + K_{33}\alpha + K_{13}X = a_0 + \sum_{n=1}^{10} a_n \sin[n(f+\alpha)] + b_n \cos[n(f+\alpha)] - \ddot{f} I_0 \end{cases} \quad (14)$$

Notar que en la ecuación (14), la no-linealidad es introducida por los términos $\sin[n(f+\alpha)]$ y $\cos[n(f+\alpha)]$.

6. SIMULACIONES

Para cuantificar el efecto de considerar la torre en el cálculo de las cargas aerodinámicas, se realizaron simulaciones en régimen estacionario utilizando las cargas aerodinámicas interpoladas con series de Fourier para los dos estados de carga descritos anteriormente: (i) considerando el efecto de la torre y (ii) no considerando el efecto de la torre. Se utilizaron los datos presentados en la sección 6.1.

6.1. Datos

Los datos utilizados en las simulaciones se detallan en las tablas siguientes (Tablas 2, 3, 4 y 5).

Tabla 2: Datos estimados de la góndola

Momento de Inercia de la barquilla (J)	411359 kgm ²
Masa de la barquilla (M)	50000 kg

Tabla 3: Datos estimados de la torre

Altura de la torre	80 m
Rigidez de la torre K_{11}	$7,19 \times 10^5$ Kg/m
Rigidez de la torre K_{33}	$1,54 \times 10^9$ Kg-m/rad
Rigidez de la torre K_{13} (igual a K_{31})	$-2,88 \times 10^7$ Kg/rad

Tabla 4: Datos estimados del rotor

Diámetro del rotor	78 m
Masa de todas las palas (m)	68600 kg
Inercia rotacional de las 3 palas (I)	6564890 kgm ²

Tabla 5: Condiciones de funcionamiento

Velocidad del viento a los 10 m de altura	10 m/s
Velocidad angular de rotación	15 rpm (1,57 rad/seg)

6.2. Amplitud de la respuesta en función de las rpm

A los fines de estudiar el comportamiento del aerogenerador en todo su rango de funcionamiento, entre 5 y 25 rpm, se realizaron simulaciones en régimen estacionario para velocidades de giro a intervalos de 2 rpm para los dos estados de cargas mencionados anteriormente. Concretamente se consideró $\dot{f}(t)$ constante en la Ecuación (14). La Figura 9 compara los resultados correspondientes a la amplitud del grado de libertad X para las dos hipótesis de carga. Como se puede observar, los valores mayores corresponden al caso de la carga que tiene en cuenta la interacción con la torre, siendo máxima la diferencia (4,1 %) cuando la velocidad del rotor es igual a 19 rpm. Esto indica que es importante tener en cuenta la interacción aerodinámica con la torre portante durante el diseño de la turbina eólica a los fines de predecir correctamente las deformaciones laterales del sistema.

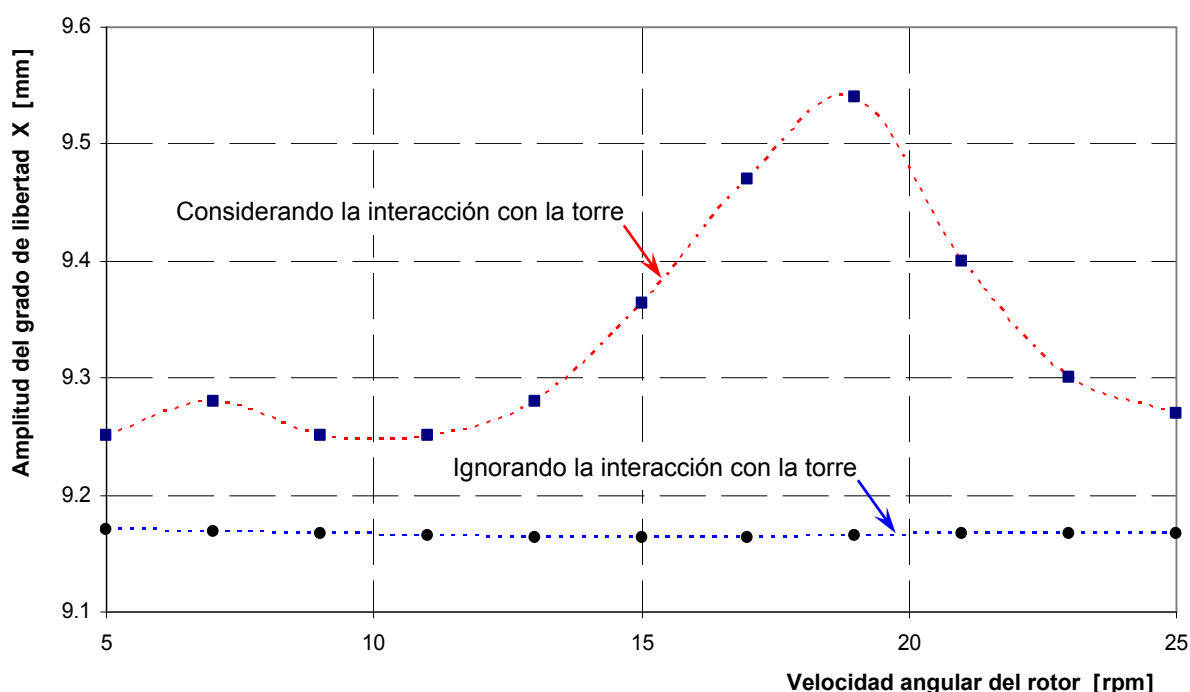


Figura 9: Amplitud del grado de libertad X en función de la velocidad del rotor para los dos estados de carga estudiados

7. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron y analizaron resultados obtenidos con una herramienta computacional desarrollada para predecir, en el dominio del tiempo, el comportamiento aerodinámico inestacionario y no-lineal de turbinas eólicas de eje horizontal y de gran potencia. Se determinó la respuesta de un modelo estructural a partir de las cargas provistas por el modelo aerodinámico antes mencionado. Los resultados obtenidos ayudan a comprender el comportamiento aerodinámico asociado a los grandes aerogeneradores, cuya complejidad es bien reconocida, pero no entendida totalmente.

Se estudió el comportamiento de la turbina eólica en todo su rango de funcionamiento realizando simulaciones en régimen estacionario para cada una de las velocidades de giro a intervalos de 2 rpm, considerando e ignorando el efecto de la presencia de la torre y se compararon los resultados para cuantificar el efecto sobre la respuesta de considerar o no la torre en el cálculo de las cargas aerodinámicas.

El modelo utilizado para el cálculo de las cargas aerodinámicas tiene en cuenta el efecto producido por la presencia de la torre portante y permitió demostrar que la interacción da origen a componentes de carga alternantes, las cuales deben ser tenidas en cuenta a la hora de dimensionar los componentes estructurales, ya que estas variaciones pueden producir problemas de resonancia, fatiga o efectos de inestabilidad dinámica.

Para un trabajo futuro queda pendiente realizar un estudio más general de tipo paramétrico que tenga en cuenta la relación entre el diámetro de la torre y el diámetro del rotor (presencia de la torre) y también la relación entre el diámetro de rotor y la distancia mínima al piso (incidencia de la capa límite terrestre), donde además podrían tenerse en cuenta condiciones con viento cruzado y la presencia de ráfagas. Si bien la herramienta aquí presentada es un buen punto de partida para lograr la comprensión cabal del comportamiento aerodinámico de los grandes aerogeneradores, en el futuro será necesario llevar a cabo simulaciones que incluyan: una interacción más fuerte entre el modelo de cargas aerodinámicas y la dinámica estructural, los sistemas de control y las condiciones ambientales altamente complejas que tienen lugar en las zonas donde normalmente se emplazan estos equipos.

8. REFERENCIAS

- [1] J.A. González, *Importancia de la energía eólica en el desarrollo*, Portal energético internacional, Octubre, 2005.
- [2] IMPSA WIND, *Tecnología nacional en energías renovables a gran escala*, Industrias Metalúrgicas Pescarmona S.A.I.C. & F., Mendoza, Argentina, 1998.
- [3] C. Gebhardt, S. Preidikman y J. Massa, *Análisis aeroservoelástico de generadores eólicos de gran potencia y eje horizontal: Una nueva metodología*, Segundo Congreso Iberoamericano "Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía", HYFUSEN 2009, San Juan, Argentina, Junio de 2009.
- [4] S. Preidikman, C. Gebhardt, A. Brewer and B. Rocca, *Aeroservoelastic analysis of large horizontal-axis wind turbines: A new methodology*, 11th Pan American Congress of Applied Mechanics, PACAM XI, Foz do Iguacu, Paraná, Brazil, January 2010.
- [5] C. Gebhardt, S. Preidikman, J. Massa y A. Della Barca, *Interacciones aerodinámicas no-lineales e inestacionarias en turbinas eólicas de eje horizontal y de gran potencia*, *Mecánica Computacional*, Vol. 28, pp. 1489-1505, ISSN 1666-6070, 2009.
- [6] J. Muract, G. Jeandrevín, and S. Preidikman. *Simulaciones numéricas del comportamiento dinámico no-lineal de un generador eólico*, XII Congreso Sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones, ENIEF 2001, Córdoba, Argentina, 2001.
- [7] C. Gebhardt, B. Veluri, S. Preidikman, H. Jensen and J. Massa, *Numerical simulations of the aeroelastic behavior of large horizontal-axis wind turbines: The drivetrain case*, XXXI Congreso Ibero-Latino-Americano de Métodos Computacionales en la Ingeniería, CILAMCE 2010, Buenos Aires, 2010.
- [8] A.D. Garrad and D.C. Quarton, *Symbolic computing as a tool in wind turbine dynamic*, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 109, n. 1, pp. 65-78, 1986.
- [9] S. Preidikman and D.T. Mook, *Time-domain simulations of linear and nonlinear aeroelastic behavior*. *Journal of Vibration and Control*, Vol. 6, n. 8, pp. 1135-1175, 2000.
- [10] K.K. Gupta, *Formulation of numerical procedures for dynamic analysis of spinning structures*, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 23, n. 10, pp. 2347-2357, 1986.