

TURBINAS EÓLICAS DE EJE HORIZONTAL: INTERACCIONES AERODINÁMICAS ROTOR – SUELO Y ROTOR – TORRE PORTANTE

Cristian Gebhardt^a, Sergio Preidikman^{a,b} y Julio Massa^a

^a *Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Casilla de Correo 916, 5000 Córdoba, Argentina, cgebhardt@efn.uncor.edu, <http://www.efn.uncor.edu>*

^b *CONICET - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Av. Rivadavia 1917, Buenos Aires, Argentina. <http://www.conicet.gov.ar>*

Palabras clave: Turbinas Eólicas, Aerodinámica, Simulaciones, Interacciones, Estelas.

Resumen: En este trabajo se simula numéricamente el comportamiento aerodinámico no-estacionario y no-lineal de un generador eólico de eje horizontal y de gran potencia. El problema abordado es un fenómeno de múltiples interacciones aerodinámicas y es atacado desde el enfoque provisto por el método de la red vórtices no-estacionaria y no-lineal. A manera de expansión del método utilizado se incorporan: (i) un modelo de capa límite terrestre, y (ii) una técnica de ruptura de las estelas vorticosas emitidas desde los bordes filosos de las palas del rotor de la turbina eólica. Esta técnica tiene por objetivo capturar la interacción aerodinámica que existe entre las estelas y la torre portante; esta interacción da origen al efecto conocido como ‘la sombra del viento’. Los resultados provenientes de las simulaciones numéricas ayudan a comprender como influyen en la eficiencia de una turbina y en las cargas sobre los dispositivos mecánicos, la presencia de la capa límite terrestre y la interacción de las estelas con la torre portante. Además, la ruptura periódica de las estelas repercute en las cargas aerodinámicas, siendo necesario analizarlas para determinar el impacto de las mismas sobre la estructura y los dispositivos de control.

1. INTRODUCCIÓN

Un aerogenerador obtiene su potencia de entrada convirtiendo la fuerza del viento en un par que actúa sobre el eje del rotor. La densidad del aire, el área de barrido del rotor y la velocidad del viento son los parámetros que determinan cuanta energía del viento está disponible para ser capturada por una turbina eólica. Por otro lado, la cantidad de energía que el rotor “*es capaz de capturar*” depende de su eficiencia aerodinámica. Por lo tanto es de vital importancia contar con una herramienta que permita evaluar en la etapa de diseño la eficiencia aerodinámica de las turbinas eólicas.

La aerodinámica asociada a las LHAWT es inherentemente no-lineal y no-estacionaria debido a la presencia de condiciones ambientales complejas, vientos de amplitud y dirección cambiante, existencia de la capa límite terrestre, interacción aerodinámica entre el rotor y la torre portante, deformaciones estáticas, y flujos dominados por vorticidad (Muljadi et al., 1997). El rango de velocidades de operación (subsónico bajo) se conjuga con las grandes dimensiones del equipo dando lugar a flujos incompresibles cuyos números de Reynolds son altos. Este hecho avala la hipótesis de que los efectos viscosos están confinados únicamente a las capas límite y a las estelas vorticosas emitidas desde los bordes filosos de las palas y permite estimar las cargas aerodinámicas mediante una conocida técnica de la dinámica de fluidos: el método de red de vórtices no-lineal y no-estacionario, o NLUVLM (Non Linear Unsteady Vortex-Lattice Method) (Gebhardt et al., 2008; Gebhardt et al., 2009a).

En el presente trabajo se simula numéricamente el comportamiento aerodinámico no-lineal y no-estacionario de una LHAWT completa, siguiendo una nueva metodología desarrollada para llevar a cabo el análisis aeroservoelástico de generadores eólicos de gran potencia y de eje horizontal (Gebhardt et al., 2009b). El seguimiento de la metodología anteriormente mencionada se debe a que el estudio aerodinámico representa un paso previo en el estudio aeroservoelástico de una LHAWT.

El problema aquí abordado es un fenómeno de múltiples interacciones aerodinámicas que se modelan mediante el NLUVLM. Se utiliza un modelo de capa límite terrestre (que en lo sucesivo denominaremos como CLT) basado en el Reglamento CIRSOC 102 (2005), y se incluye una técnica de ruptura de estela, cuyo objetivo es tener en cuenta la interacción entre las estelas emitidas desde los bordes filosos de las palas y la torre portante, dando origen al efecto conocido como “*la sombra del viento*”.

Los datos necesarios para poder llevar a cabo las simulaciones numéricas son: (1) la geometría de los componentes del equipo (modelados como una colección de cuerpos rígidos interconectados); (2) la cinemática del rotor/generador; y (3) el perfil del flujo incidente (esto es, el perfil de la capa límite terrestre) en función de la altura y de la rugosidad del terreno.

2. MODELO MATEMÁTICO

En el modelo estudiado se considera el flujo de un fluido incompresible caracterizado por un número de Reynolds muy elevado. La ecuación gobernante es la ecuación de continuidad para flujos incompresibles e irrotacionales conocida como ecuación de Laplace:

$$\nabla^2 \varphi(\vec{\mathbf{R}}, t) = 0 \quad (1)$$

donde $\varphi(\vec{\mathbf{R}}, t)$ es la función potencial de velocidad válida en todo el dominio donde el fluido

es irrotacional (fuera de las estelas y las capas límites). La dependencia explícita del tiempo en la ecuación de Laplace se introduce a través de las condiciones de contorno, (Preidikman, 1998; Preidikman y Mook, 2005).

Cuando existe velocidad relativa entre el rotor y el fluido, se genera vorticidad en el seno de las capas límites. Los efectos viscosos dan origen a las capas límites. Parte de esta vorticidad es emitida desde el borde de fuga y la puntera de las palas, es transportada por el fluido, y forma las estelas. El campo de velocidades asociado con toda esta vorticidad interactúa con la llamada corriente libre: mientras las condiciones de borde de no-penetración y no-deslizamiento son satisfechas sobre las superficies sólidas generadoras de vorticidad. La vorticidad en las estelas se mueve libremente en el fluido de forma tal que no se produzcan saltos de presión a través de las estelas.

Para atacar el problema se modelan las superficies sustentadoras (palas del rotor) y las estelas como sábanas vorticosas adheridas y desprendidas, respectivamente. A través de las palas existe una discontinuidad en la componente tangencial de la velocidad relativa aire-pala, dando origen a las cargas aerodinámicas.

La ecuación que gobierna el problema es complementada con las siguientes condiciones de contorno:

- 1) *condición en el infinito*: las perturbaciones producidas por la presencia de las superficies sólidas decaen en el infinito;
- 2) *condición de no penetración*: la trayectoria de las partículas de fluido es tangente a las superficies sólidas;
- 3) *condición de estela libre de fuerzas*: la variación de presión es continua a través de la estela;
- 4) *condición de conservación de circulación*: el campo de vorticidad es solenoidal (Lugt, 1983), esto se satisface de manera automática debido a que las superficies sólidas y las estelas son modeladas como colecciones de anillos vorticosos cerrados; y
- 5) *condición de Kutta no-estacionaria*: las estelas son emitidas de manera suave desde los bordes filosos de las palas.

En el seno del fluido el campo de vorticidad $\vec{\Omega}$ coexiste con el campo de velocidad \vec{V} , y ambos campos están relacionados cinemáticamente por la siguiente expresión:

$$\vec{\Omega} = \nabla_{\vec{R}} \times \vec{V} \quad \text{donde:} \quad \nabla_{\vec{R}} \doteq \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right) \quad (2)$$

En el caso de un segmento vorticoso de longitud finita y circulación $\Gamma(t)$, la ley de Biot-Savart toma la forma:

$$\vec{V} = \frac{\Gamma(t)}{4\pi} \frac{\vec{L} \times \vec{r}_1}{|\vec{L} \times \vec{r}_1|^2} \left[\vec{L} \cdot \left(\frac{\vec{r}_1}{|\vec{r}_1|} - \frac{\vec{r}_2}{|\vec{r}_2|} \right) \right] \quad (3)$$

donde \vec{r}_1 y \vec{r}_2 son los vectores posición del punto donde se calcula la velocidad relativos a los extremos del segmento vorticoso de longitud finita, y $\vec{L} = \vec{r}_1 - \vec{r}_2$.

2.1 El método de red de vórtices inestacionario

En el método de red de vórtices inestacionario las sábanas vorticosas son reemplazadas por una red de segmentos vorticosos de circulación $\Gamma(t)$. Para conservar la circulación se utilizan anillos vorticosos cerrados de circulación $G(t)$, donde $\Gamma(t)$ es obtenida como suma vectorial de las circulaciones de los anillos adyacentes. Para obtener los valores de $G(t)$ se utilizan las condiciones de no-penetración:

$$\left(\vec{V}_\infty + \vec{V}_{adherida} + \vec{V}_{estela} - \vec{V}_{cuerpo} \right) \cdot \hat{n} = 0 \quad (4)$$

donde $\vec{V}_{adherida}$, \vec{V}_{estela} y \vec{V}_∞ son las velocidades asociadas a las sábanas vorticosas adheridas (capas límites), las sábanas vorticosas libres (estelas), y la corriente libre, respectivamente, \vec{V}_{cuerpo} es la velocidad de la superficie del sólido, y \hat{n} es un vector normal a dicha superficie. Idealmente, es preferible satisfacer la ecuación (4) en todos los puntos de la superficie sólida. Pero debido a que se ha discretizado la superficie en un número NP de elementos, sólo es posible imponer la condición de no penetración en un número finito de puntos, llamados puntos de control.

Hay un punto de control en el centroide de los nodos de cada elemento. Para aproximar \hat{n} , en cada elemento se utiliza el producto vectorial de sus dos vectores diagonales. Cuando se resuelve la ecuación (4), la estela, la corriente libre, y el movimiento de la superficie sustentadora son conocidos; se resuelve esta ecuación para encontrar $\vec{V}_{adherida}$ que viene expresada en términos de las incógnitas $G_i(t)$ y de los coeficientes de influencia aerodinámicos A_{ij} (Preidikman, 1998; Katz and Plotkin, 2001).

$$\sum_{j=1}^{NP} A_{ij} G_j(t) = - \left(\vec{V}_\infty + \vec{V}_{estela} - \vec{V}_{cuerpo} \right) \cdot \hat{n}_i \quad i = 1, 2, \dots, NP \quad (5)$$

Una vez calculadas las circulaciones $G_j(t)$ se “convectan” las estelas. Los nodos que definen los extremos de cada segmento vorticoso de las estelas son convectados con la velocidad local del fluido, y su nueva posición, $\vec{R}_{Nodo}(t+\Delta t)$, se determina de la siguiente manera (Preidikman y Mook, 2005; Konstandinopoulos et al., 1981):

$$\vec{R}_{Nodo}(t+\Delta t) = \vec{R}_{Nodo}(t) + \int_t^{t+\Delta t} \vec{V}_{Nodo}(\tau) d\tau \approx \vec{R}_{Nodo}(t) + \vec{V}_{Nodo}(t) \Delta t \quad (6)$$

donde $\vec{R}_{Nodo}(t)$ es la posición del nodo en el tiempo t y Δt es el incremento de tiempo.

2.2 Cálculo de las cargas aerodinámicas sobre cada elemento

A continuación se considera el cálculo de las cargas aerodinámicas sobre las superficies sustentadoras. Para cada elemento, primero se debe hallar la presión en el punto de control y luego multiplicarla por el área del elemento y por el vector unitario normal.

Finalmente, se suman vectorialmente las fuerzas y los momentos de dichas fuerzas sobre todos los elementos. La presión en el punto de control de cada elemento se calcula mediante la ecuación de Bernoulli para flujos inestacionarios:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\vec{V} \cdot \vec{V}}{2} + \frac{p}{\rho} = \frac{\vec{V}_\infty \cdot \vec{V}_\infty}{2} + \frac{p_\infty}{\rho} = \text{cte} \quad (7)$$

Los detalles sobre el tratamiento de los términos de la ecuación (7) pueden consultarse en Preidikman y Mook (2005) o Konstandinopoulos et al. (1981).

3. MODELO DE RUPTURA DE LAS ESTELAS

Un aspecto importante a tener en cuenta en el estudio de la aerodinámica de LHAWTs es la ruptura que se produce en las estelas vorticosas cuando impactan sobre la torre portante. Este fenómeno da origen a cargas periódicas que deben ser tenidas en cuenta al diseñar la estructura del equipo y al evaluar el desempeño del mismo.

En un medio fluido, cuando la estela formada detrás de una superficie sustentadora es atravesada por un cuerpo sólido, se rompe o interrumpe. Para realizar simulaciones numéricas de este fenómeno es necesario disponer de una formulación matemática del fluido altamente compleja que sea capaz de capturar la interacción entre regiones del fluido dominadas por vorticidad y las fronteras de los cuerpos sólidos inmersos en el seno del fluido.

Las formulaciones basadas en el Método de Elementos Finitos (MEF) son muy efectivas como estrategia para abordar el problema, pero poseen la desventaja de su gran costo computacional. En el presente trabajo, el costo computacional es un parámetro sumamente importante, teniendo en cuenta que este esfuerzo constituye solo una etapa intermedia de un proyecto mayor cuyo objetivo es desarrollar simulaciones numéricas aeroelásticas basadas en un esquema de interacción fuerte entre el fluido, la estructura y el sistema de control. Por ello se descartada la posibilidad de utilizar formulaciones basadas en el MEF. No obstante hay que remarcar que a medida que las capacidades computacionales aumentan el estado del arte en la interacción fluido-estructura tiende a la utilización de formulaciones del tipo MEF, ya que estas técnicas poseen potenciales enormes y sólo es cuestión de tiempo para que alcancen la jerarquía de técnicas estándar.

El NLUVLM es una técnica muy flexible, pero posee limitaciones. El fenómeno de ruptura de estela no puede ser capturado con la versión clásica de esta técnica a menos que se incorpore un modelo de ruptura de estela que sea compatible con la física subyacente y con los aspectos referidos a la implementación del NLUVLM.

En el modelo aerodinámico utilizado la vorticidad sólo puede ser creada y destruida en la superficie del sólido. En todo otro punto del dominio el fluido es irrotacional e incompresible, y la vorticidad sólo puede ser transportada. Cuando las estelas impactan sobre la torre portante se rompen, porque no pueden penetrar la superficie de la torre (condición de no-penetración de las estelas en la superficie del sólido), siendo en la frontera del sólido donde se produce el reajuste de circulación de los segmentos vorticosos.

En el modelo de ruptura de las estelas aquí propuesto, se define una región de control que rodea al sólido sobre el cual las estelas van a impactar, en nuestro caso la torre. En cada paso de tiempo se verifica que los nodos pertenecientes a las estelas estén fuera de esta región. En el caso de que algún nodo se encuentre dentro (nodo penetrante), los segmentos vorticosos que estén asociados al nodo penetrante pasan a ser descartados. De esta manera en cada paso de tiempo sólo son excluidos algunos segmentos y la ruptura se torna un proceso gradual.

4. MODELO DE CAPA LÍMITE TERRESTRE (CLT)

En las regiones donde son emplazados los LHAWTs existen condiciones ambientales altamente complejas, tales condiciones se deben al carácter tridimensional y no-estacionario del flujo incidente. La interacción entre la corriente libre y el suelo da lugar a la existencia de la CLT. El desarrollo de esta capa límite es fuertemente influenciado por la rugosidad del suelo, la topología del terreno, y la velocidad del aire. La combinación de estos factores da lugar a un perfil de velocidades que varía en función de la altura.

En el modelo aerodinámico desarrollado en el presente trabajo se incluyó la presencia de la CLT, para ello se considera el perfil del viento en la capa límite terrestre incorporado en el regla-

mento CIRSOC 102. Este reglamento define el perfil de viento en términos de la variación de la presión dinámica en función de la altitud y de la rugosidad del terreno:

$$q_z = q_0 c_z c_d \quad (8)$$

donde q_z es la presión dinámica en función de la altura z , q_0 es la presión dinámica de referencia, c_z es un coeficiente adimensional que expresa la ley de variación de la presión con la altura tomando en consideración el tipo de rugosidad del terreno y c_d es el coeficiente adimensional de reducción que toma en consideración las dimensiones de la construcción. La expresión general del coeficiente c_z es:

$$c_z = \left[\frac{\ln(z/z_i)}{\ln(10/z_1)} \right]^2 \left(\frac{z_i}{z_1} \right)^{0,1412} \quad (9)$$

donde z es la altura del punto considerado respecto del nivel de referencia, z_i es un parámetro que depende del tipo de rugosidad ' $i = I, II, III$ ó IV ' del terreno y z_1 es el parámetro correspondiente a la rugosidad tipo I. En este trabajo se considera un coeficiente adimensional de reducción c_d igual a la unidad. Éste es el valor más desfavorable que puede tomar ya que no tiene en cuenta ningún tipo de reducción por las dimensiones de la construcción.

La presión dinámica puede escribirse como $q = \frac{1}{2} \rho v^2$ y combinarse con la expresión (9). Operando algebraicamente, se puede expresar el módulo de la velocidad en función de la altura y de la rugosidad como:

$$v_z = \left\{ \left[\frac{\ln(z/z_i)}{\ln(10/z_1)} \right] \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_z} \left(\frac{z_i}{z_1} \right)^{0,1412}} \right\} v_0 \quad (10)$$

donde v_0 es el módulo de la velocidad de referencia del lugar, ρ_z es la densidad del aire en el punto considerado y ρ_0 es la densidad del aire de referencia. En las simulaciones realizadas, la variación de densidad del aire en función de la altura se considera nula, ya que la altura del equipo se encuentra por debajo de los 120 metros y en esa diferencia de altitud las variaciones de densidad son despreciables. Los lugares donde se instalan estos equipos poseen características rurales: hay baja densidad de construcciones y predomina un perfil de terreno llano sin rugosidades importantes frente a las acciones de viento. Por lo tanto para el problema aquí estudiado se ha considerado una rugosidad de tipo I.

Teniendo en cuenta las consideraciones expuestas en los párrafos anteriores, el perfil de velocidad del viento debido a la presencia de la capa límite terrestre adopta la siguiente forma:

$$v_z = \left[\frac{\ln(z/z_1)}{\ln(10/z_1)} \right] v_0 \quad (11)$$

5. VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS

El software que está siendo desarrollado utiliza las capacidades de postprocesamiento de Tecplot 360[®] (software comercial ampliamente utilizado en mecánica computacional) [7]. Las visualizaciones juegan un papel importante en el análisis y ayudan a entender los diversos fenómenos aerodinámicos inestacionarios y no-lineales. En las Figuras 1 a 4 se presentan sólo algunas de las capacidades gráficas del software desarrollado. En las Figuras 1 y 2 se muestra la evolución temporal de las estelas vorticosas.

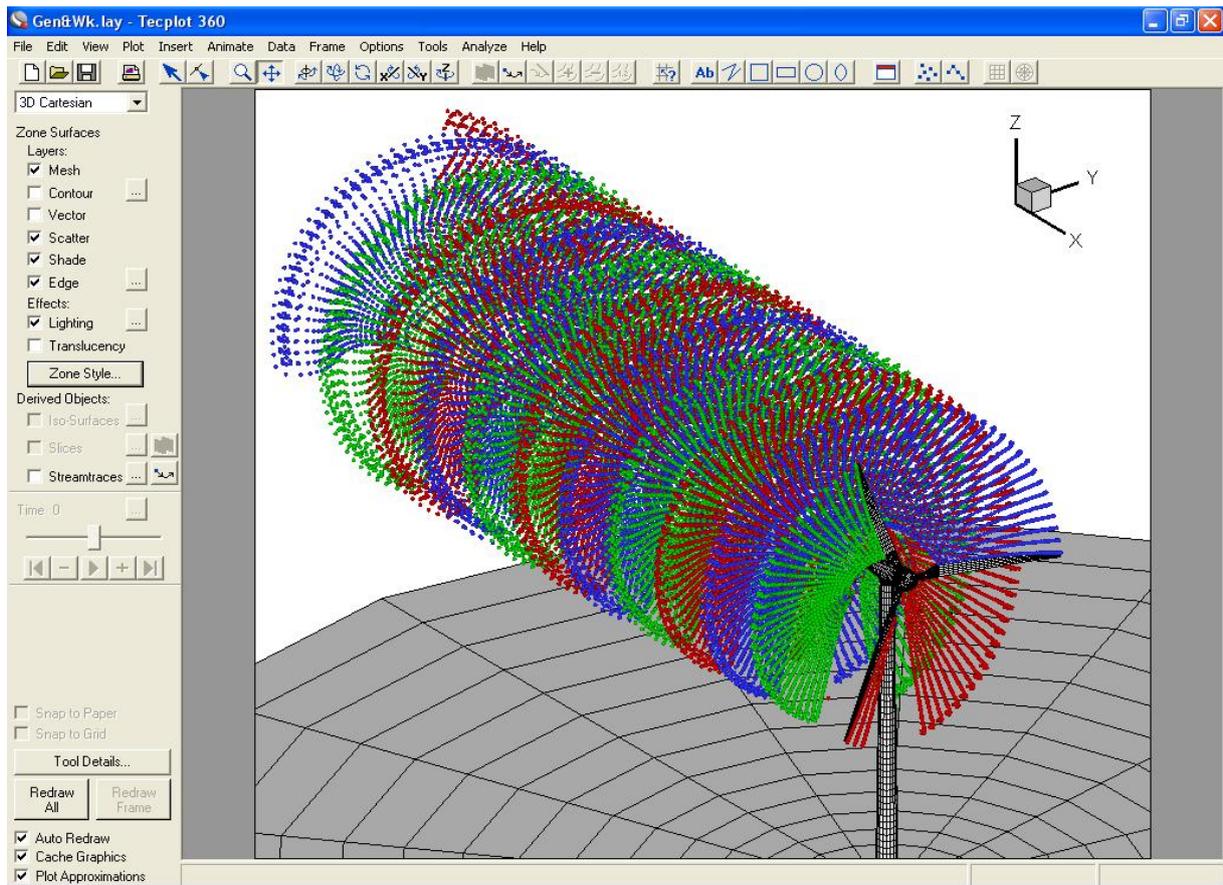


Figura 1: Visualización de las estelas.

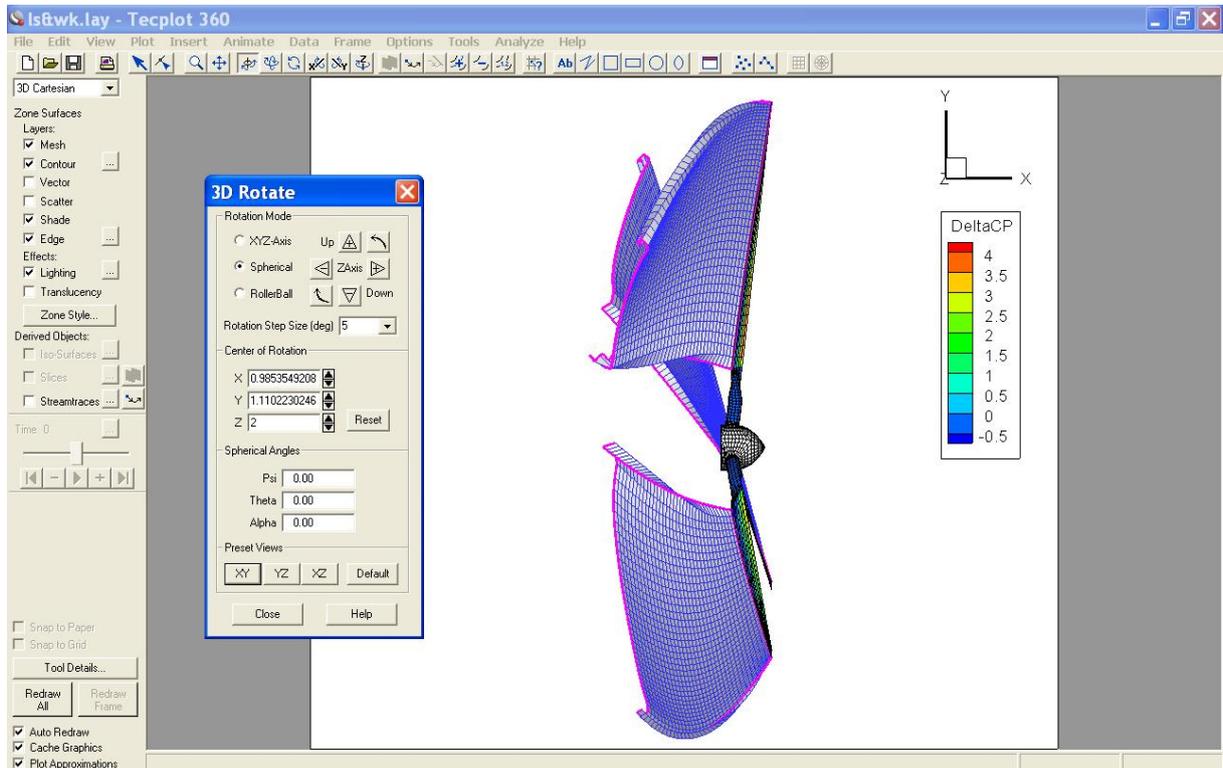


Figura 2: Visualización de evolución de las estelas en el tiempo.

La Figura 3 muestra como el modelo del sistema rotor-palas puede ser observado desde una perspectiva particular, algo muy útil cuando se desean entender diversos aspectos en el análisis. La Figura 4 muestra la distribución de la diferencia de presiones sobre las palas del rotor.

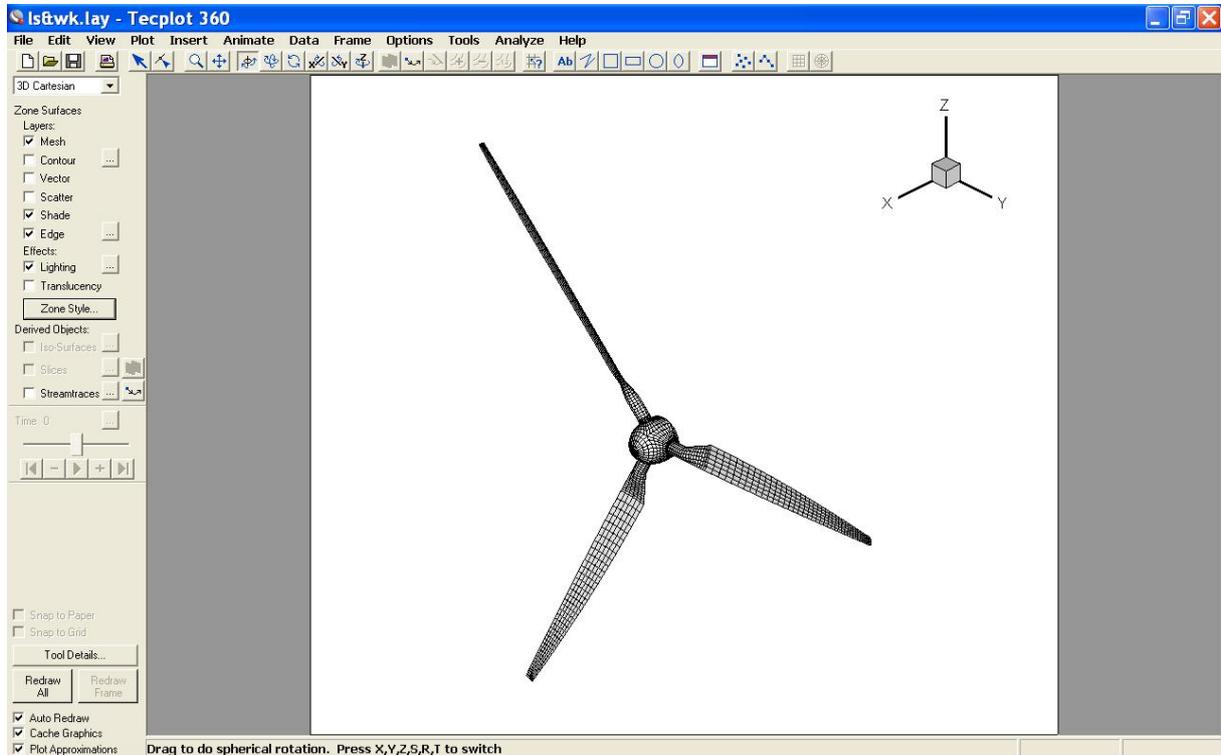


Figura 3: Visualización del mallado del sistema rotor-palas.

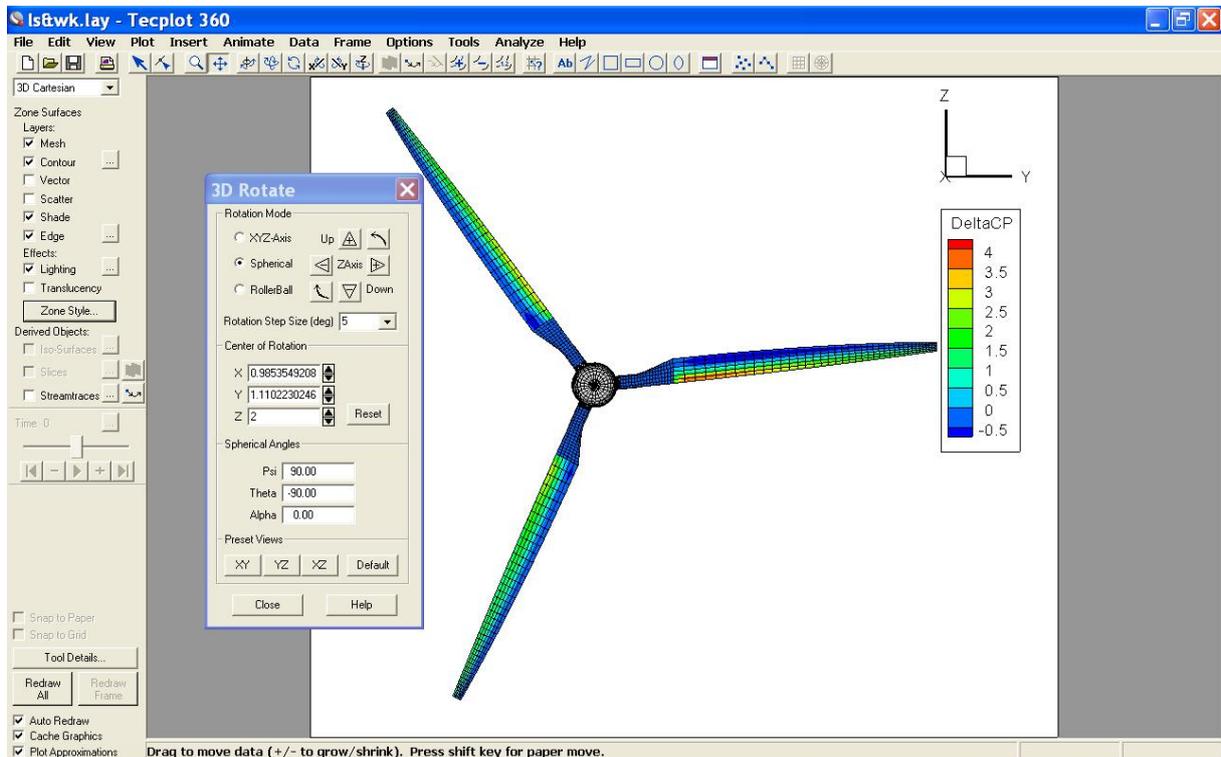


Figura 4: Visualización de la distribución de diferencia de presión sobre las palas.

6. RESULTADOS

A continuación se presentan resultados obtenidos con la herramienta computacional en desarrollo. En las simulaciones se consideró un rotor de tres palas de 70 m de diámetro rotando a 12 rpm y viento de frente con una velocidad de 20 m/s que se aplica sobre el rotor de manera impulsiva. El mismo rotor fue utilizado anteriormente por Gebhardt et al. (2008; 2009a) para estudiar la incidencia de la velocidad y dirección del viento y de la conicidad de las palas, sobre la potencia obtenida.

6.1 Incidencia de la presencia de la torre portante

En la Figura 5 se presentan visualizaciones de la evolución en el tiempo de las estelas ignorando y considerando la presencia de la torre portante. En la Figura 5-b es posible observar como las estelas se rompen cuando atraviesan la torre. Tanto en el caso (a) como en el (b) se ha considerado un perfil de viento variable en altura debido a la capa límite terrestre.

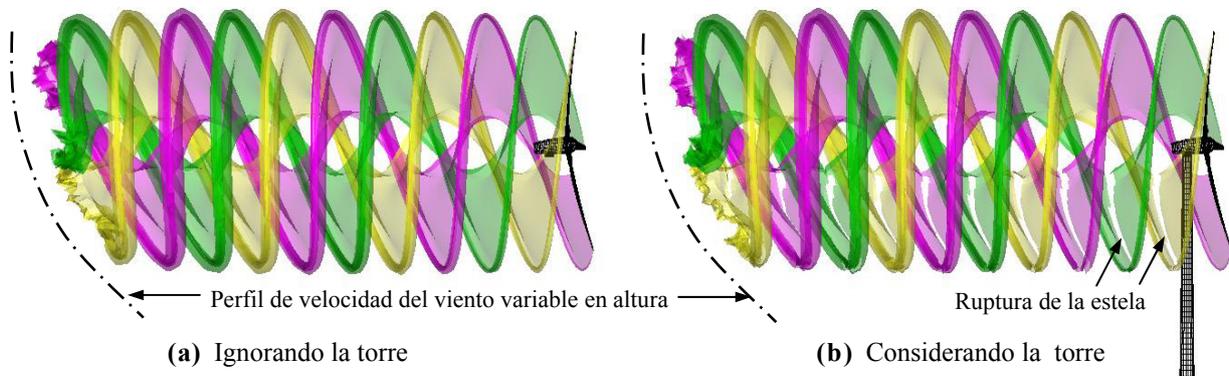


Figura 5: Influencia de la presencia de la torre portante de la turbina eólica sobre las estelas.

En la Figura 6 muestran varias etapas de la rotura de una estela. Al modelar la ruptura de la forma propuesta en este trabajo se evitan discontinuidades numéricas fuertes que originarían saltos abruptos en las cargas aerodinámicas.

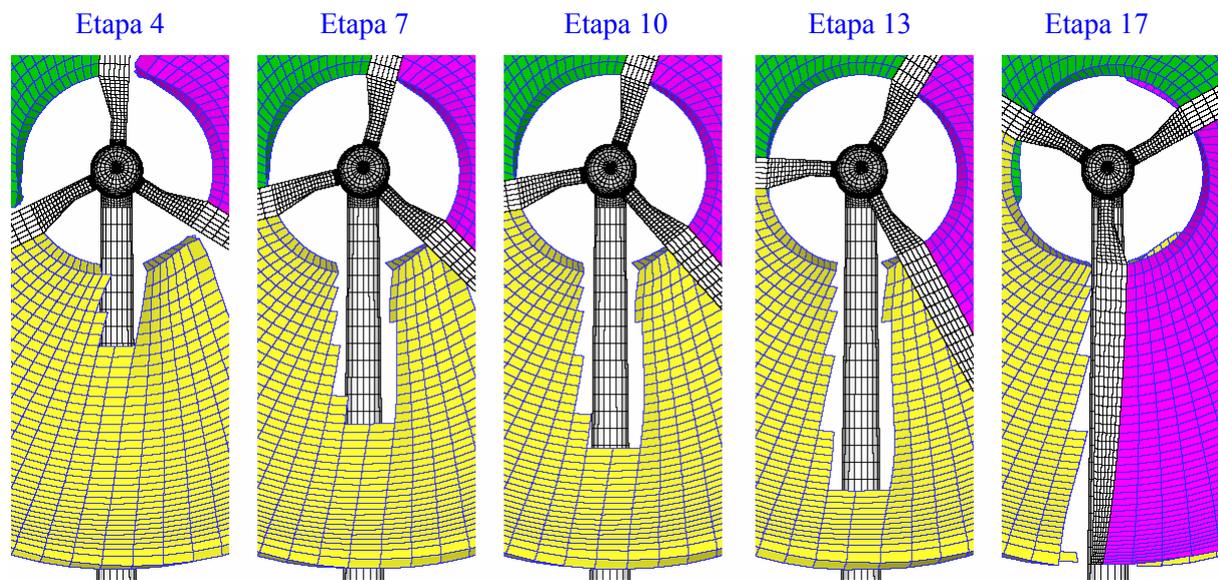


Figura 6: Secuencia del proceso gradual de ruptura de una estela.

Las Figuras 7 y 9 contienen gráficas que muestran la variación de la fuerza axial y de la potencia producida en función del ángulo que forma una pala de referencia respecto de un plano horizontal. Para los casos aquí presentados la posición inicial de esta pala es igual a 60° . En el momento en que esta pala de referencia se encuentra frente de la torre forma un ángulo de 90° con el plano horizontal. Esta situación, que ocurre cada vez que el rotor completa una vuelta, se indica mediante la línea roja de trazos vertical. La fuerza axial es la componente de la fuerza aerodinámica resultante que actúa sobre el eje del rotor; dicha fuerza genera la flexión de la torre hacia adelante y atrás. La potencia producida, es aquella que es extraída del viento y que está disponible para ser transformada en potencia eléctrica en forma de torque sobre el eje del rotor.

En la Figura 7-a se graficó la variación de la fuerza axial. La presencia de la torre portante genera una variación alterna de la fuerza axial (curva azul a trazos) respecto al caso donde se ignora su presencia (curva negra continua). Para ambas curvas, una vez superado el transitorio, el valor de la fuerza axial se estabiliza. Cuando se tiene en cuenta la presencia de la torre la alternancia alcanza 3 periodos cada 360° de giro del rotor porque las palas pasan frente a la torre 3 veces por cada vuelta.

En la Figura 7-b se presenta una gráfica de la potencia producida, ocurre una situación similar a la mencionada en el párrafo anterior respecto de la fuerza axial. Si bien las variaciones producidas por la presencia de la torre no modifican notablemente el valor medio de la potencia, la componente alterna de la carga puede eventualmente sufrir amplificación dinámica en proximidades de resonancia dando lugar a una situación perjudicial desde el punto de vista de la fatiga de los elementos estructurales.

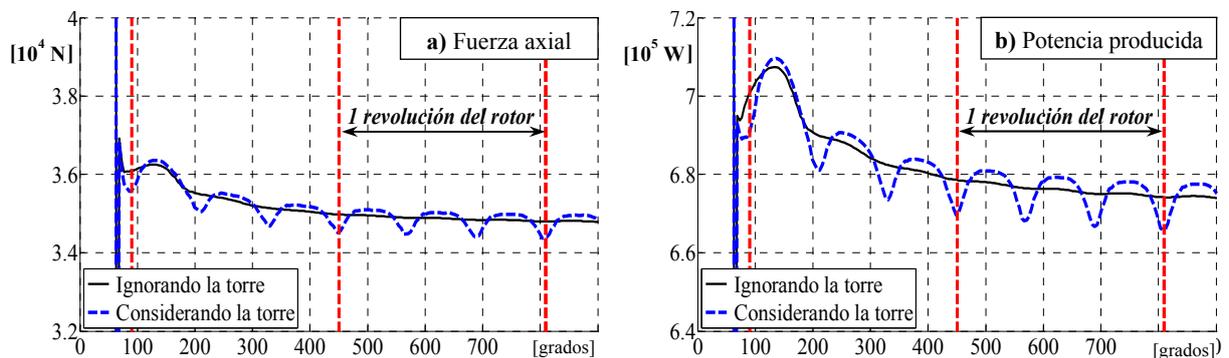


Figura 7: Incidencia de la presencia de la torre sobre la fuerza axial y sobre la potencia producida.

6.2 Incidencia de la existencia de la capa límite terrestre

En las Figura 8 se muestran visualizaciones del desarrollo de las estelas ignorando y considerando la existencia de la CLT. Se aprecian diferencias entre las Figura 8-a y 8-b en cuanto a la forma que toman las estelas. Cuando se ignora la CLT la estela avanza de manera casi uniforme, mientras que al considerar su presencia la estela se va deformando; la forma que adquiere se debe al perfil de velocidades asociado a la capa límite. Notar que en ambos casos se ha considerado la presencia de la torre.

En la Figura 9-a se ha graficado la fuerza axial. La existencia de la CLT produce una disminución de la fuerza axial (curva azul a trazo) respecto al caso donde se la ignora (curva negra continua). Una vez alcanzado el régimen estacionario la disminución en la fuerza axial es del orden del 3%. En la Figura 9-b se ha graficado la potencia producida. Se repite una situación similar a la comentada en la oración anterior relativa a la fuerza axial. Una vez alcanzado el régimen estacionario la disminución en la potencia producida es de alrededor del 2%. En las curvas se aprecian, además, las variaciones originadas por la presencia de la torre.

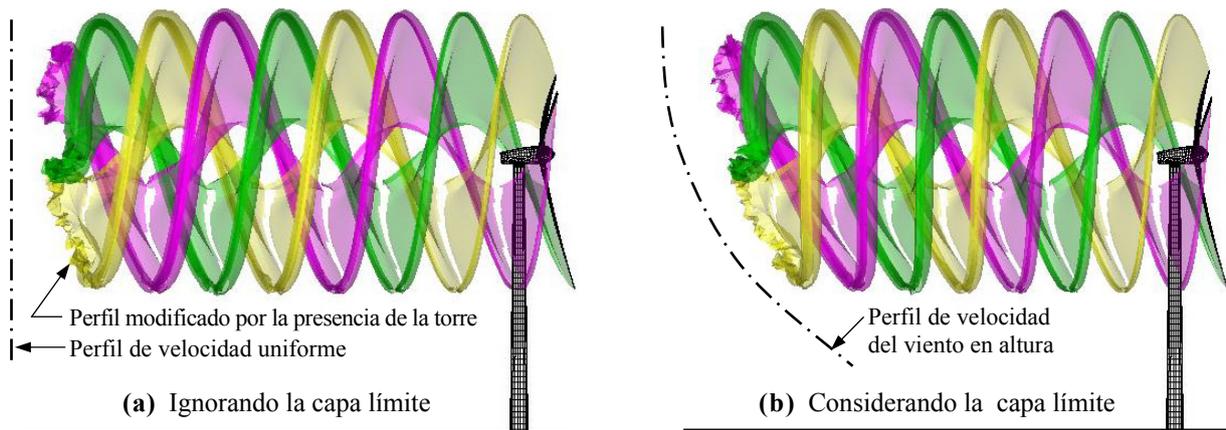


Figura 8: Influencia de la capa límite terrestre. (a) Ignorando la capa límite. (b) Considerando la capa límite.

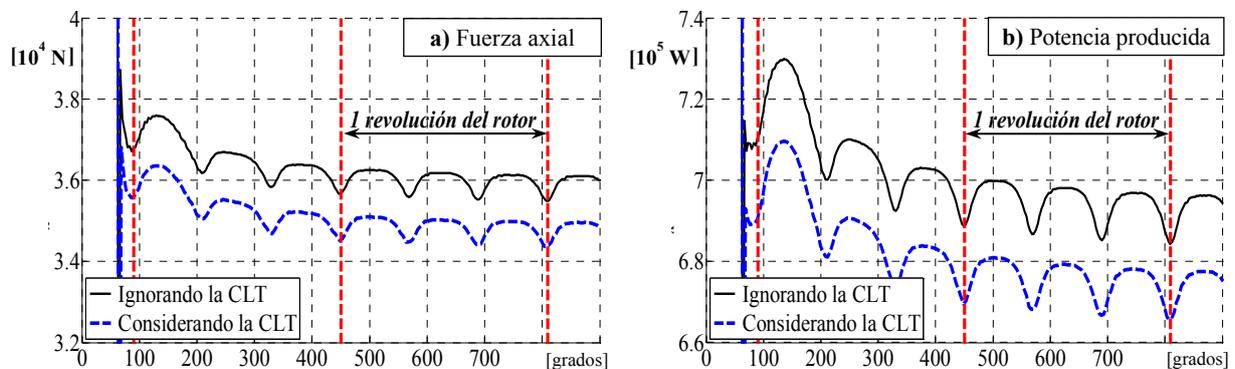


Figura 9: Gráficas de la fuerza axial y la potencia producida en función del ángulo girado por el rotor.

7. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron y analizaron resultados obtenidos con una herramienta computacional que está siendo desarrollada para predecir, en el dominio del tiempo, el comportamiento aerodinámico no-estacionario y no-lineal de generadores eólicos de eje horizontal y de gran potencia. Los resultados obtenidos ayudan a comprender el comportamiento aerodinámico asociado a los grandes aerogeneradores, cuya complejidad es bien reconocida pero no entendida totalmente.

El efecto producido por la presencia de la torre portante ha sido capturado de manera muy satisfactoria. Si bien esta interacción no repercute en gran manera sobre la potencia media producida, da origen a cargas alternantes que deben ser tenidas en cuenta al dimensionar los componentes estructurales, ya que estas variaciones pueden producir problemas de amplificación dinámica en proximidades de resonancia, fallas de las componentes por fatiga, o efectos dinámicos de inestabilidad. La incidencia de la presencia de la capa límite terrestre sobre la potencia producida también ha sido capturado de manera satisfactoria. La existencia de la capa límite reduce la eficiencia del equipo respecto a lo que se obtendría con un viento de perfil constante.

Queda pendiente para un trabajo futuro realizar un estudio más general de tipo paramétrico que tenga en cuenta: la combinación de otras características geométricas del rotor (por ejemplo: las distribuciones de perfiles, de ahusamiento, y de alabeo a lo largo de la pala); la

relación entre el diámetro de la torre y el diámetro del rotor (presencia de la torre); y, la relación entre el diámetro de rotor y la distancia mínima al piso (incidencia del suelo), 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: 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.

REFERENCIAS

- Gebhardt C., Preidikman S., Massa J. y Weber G., Comportamiento aerodinámico y aeroelástico de rotores de generadores eólicos de eje horizontal y de gran potencia. *Mecánica Computacional*, 27:519-539, 2008.
- Gebhardt C., Preidikman S., Massa J., Simulaciones numéricas del comportamiento aerodinámico de generadores eólicos de eje horizontal y de gran potencia. *Memorias del Segundo Congreso Iberoamericano Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía*. San Juan, Argentina, 2009a.
- Gebhardt C., Preidikman S., Massa J., Análisis aeroservoelástico de generadores eólicos de gran potencia y de eje horizontal: Una nueva metodología. *Memorias del Segundo Congreso Iberoamericano Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía*, San Juan, Argentina, 2009b.
- Katz J. and Plotkin A., Low-speed aerodynamics, *Cambridge University Press*, 2001.
- Konstandinopoulos P., Mook D.T. and A.H. Nayfeh A.H., A numerical method for general, unsteady aerodynamics, *AIAA-81-1877*, 1981.
- Lugt H., Vortex flow in nature and technology, *John Wiley & Sons*, 1983.
- Muljadi E., C.P. Butterfield C.P. and Jul M.L. Jr.: Effect of turbulence on power generation for variable speed wind turbines, *ASME Wind Energy Symposium*, 1997.
- Preidikman S. y Mook D.T., Modelado de fenómenos aeroelásticos lineales y no-lineales: los modelos aerodinámico y estructural, *Modelización aplicada a la ingeniería*, I:365-388, 2005.
- Preidikman S., Numerical simulations of interactions among aerodynamics, structural dynamics, and control systems, Ph.D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998.
- Reglamento CIRSOC 102, Reglamento argentino de acción del viento sobre las construcciones, 2005.