

Una técnica robusta para modelar el rompimiento de la estela vorticosa en generadores eólicos de gran potencia y eje horizontal.

Cynthia N. Gómez^{1,3}, Sergio Preidikman^{1,3}, Omar D. López Mejía² y Bruno A. Rocca^{1,3,4}

¹*Departamento de Estructuras; Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales; Universidad Nacional de Córdoba, Argentina*

²*Departamento de Ingeniería Mecánica; Facultad de Ingeniería; Universidad de los Andes; Colombia*

³*CONICET; Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas; Bs. As.; Argentina*

⁴*Departamento de Ciencias Básicas; Facultad de Ingeniería; Universidad Nacional de Río Cuarto; Argentina*

Fecha de recepción del manuscrito: 26/09/2015

Fecha de aceptación del manuscrito: 15/03/2016

Fecha de publicación: 30/09/2016

Resumen—Con el fin de aumentar el conocimiento del comportamiento aerodinámico de turbinas eólicas de eje horizontal y de gran potencia y lograr así un correcto diseño de las mismas, los estudios aerodinámicos, aeroelásticos y aeroservoelásticos de estos sistemas de generación de energías limpias han recobrado interés durante los últimos años. En este trabajo se presenta el desarrollo e implementación computacional de un nuevo método de simulación del fenómeno de ruptura de las estelas vorticosas generadas por las palas al impactar la torre portante; dicha componente influye de manera directa en el comportamiento de la potencia mecánica de la turbina. La nueva técnica numérica se implementó en un código computacional ya existente, basado en una versión modificada del método de red de vórtices no lineal y no estacionario. Con el objetivo de poner en evidencia la eficiencia y robustez del nuevo método de ruptura, se comparan los resultados numéricos con un esquema desarrollado con anterioridad. Además, se analiza cualitativamente la forma de la ruptura al variar el número de elementos aerodinámicos utilizados para discretizar las palas y la torre. Finalmente, para analizar cuantitativamente la influencia de la discretización aerodinámica de la pala en el modelo de ruptura, se calculan los tiempos dimensionales de comienzo y finalización de la primera ruptura de estela y se extraen conclusiones.

Palabras clave—Ruptura de estela, UVLM, Turbinas eólicas, Aerodinámica no-estacionaria.

Abstract—With the objective of increasing knowledge regarding the behavior of Large-Scale Horizontal-Axis Wind Turbines (LSHAWTs) and provide a correct design for them, during the last years, the aerodynamic, aeroelastic and aeroservoelastic studies have become of interest. In this paper, a new numerical method to simulate the wake rupture against the supporting tower is developed. This simulation scheme is implemented into an existing computational code and represents an improvement in the process of detecting wake vortex segments going through the body of the tower. The numerical tool is based on a modified version of the well-known unsteady vortex-lattice method. In order to validate the efficiency and robustness of the proposed wake rupture method, current numerical results are compared against results obtained using a numerical scheme developed previously. Moreover, a qualitative analysis of shape variations of the wake rupture as a function of the number of aerodynamic elements on both the blades and the tower is carried out. Finally, to analyze quantitatively the influence of aerodynamic discretization of the blade on the wake rupture model, the starting- and ending-time of the first rupture are computed. Conclusions are drawn.

Keywords— Wake rupture, UVLM, Wind turbines, Non-stationary Aerodynamics

INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de ampliar el conocimiento de la performance de las turbinas eólicas en los últimos años se ha incrementado los estudios tanto aerodinámicos, estructurales y aeroservoelásticos aplicados a este tipo de estructuras.

Las estelas vorticosas emitidas desde las palas durante la operación normal de la turbina es una temática de gran interés para investigadores y tecnólogos, ya que las mismas

influyen de manera notoria en el diseño de parques eólicos y en la potencia que pueden producir los aerogeneradores inmersos en flujos con altos niveles de turbulencia. Se han realizado numerosos estudios experimentales y simulaciones numéricas del comportamiento de las estelas en un HAWT, ya sea que los procedimientos experimentales se lleven a cabo en el lugar de operación de la turbina eólica (Abdelsalam et al., 2014) o sean modelos ensayados en túneles de viento (Lignarolo et al., 2014). Existen además algunos desarrollos computacionales que consideran para el análisis una estela prescrita (Grant et al., 2000) y otros desarrollos que forman la estela en cada paso de tiempo mediante convección de la vorticidad (Van Garrel, 2003), como se lleva a cabo en el trabajo aquí presentado.

Dirección de contacto:

Cynthia N. Gómez, Avenida Vélez Sarsfield 1611 Ciudad Universitaria,
Teléfono: 5353800, Interno: 29071, cynthi_ng@hotmail.com

La presencia de la torre portante influye en las cargas aerodinámicas de la turbina eólica. Aunque cabe mencionar que la interacción pala-torre era un estudio limitado a turbinas de configuración downwind (Robinson *et al.*, 1999), a medida que el tamaño de los rotores fue en aumento, la interacción pala-torre se ha vuelto más importante y fue incluido en el estudio de turbinas de configuración upwind (Kim *et al.*, 2011).

Por lo tanto, para realizar un análisis aerodinámico lo más preciso posible conjugando los factores mencionados, es necesario considerar y modelar la ruptura de la estela debido a la presencia de la torre portante.

En el presente artículo se presenta la implementación de una nueva técnica numérica para la detección de la ruptura de estela contra la torre de una turbina eólica de gran potencia y de eje horizontal (LSHAWT). Se ha tomado como base un desarrollo computacional existente (Gebhardt *et al.*, 2009) implementado en FORTRAN, que permite el cálculo de las acciones aerodinámicas actuantes en una turbina eólica, mediante una versión extendida del método de red de vórtices no estacionario (Preidikman, 1998). En este método, abreviado por sus siglas en inglés UVLM, la capa límite se modela como una sábana vorticososa adherida y la estela como una sábana vorticososa libre, en esta última, no hay diferencia de presión a través de ella (Katz and Plotkin, 2001).

Cabe mencionar que la ruptura se materializa con la anulación o desaparición de los segmentos vorticosos que conforman la estela; de este modo, estos segmentos ya no intervienen en el cómputo de las acciones aerodinámicas.

La modificación realizada en este trabajo permite visualizar el rompimiento de la estela de manera gradual y con cortes no uniformes a su paso a través de la torre.

Se han comparado los resultados de la técnica de detección de ruptura propuesto en este trabajo, con los de la técnica desarrollada originalmente (Gebhardt *et al.*, 2009) y se han extraído conclusiones con base en los mismos. Además, se ha comparado la forma en la que se desarrolla la ruptura variando el número de paneles aerodinámicos pertenecientes tanto a las palas como a la torre del generador eólico.

MODELO COMPUTACIONAL

Geometría de la turbina eólica

En este trabajo se ha seleccionado para su simulación, una LSHAWT basado en un aspa SANDIA NATIONAL LABORATORIES de 100 metros de envergadura, cuyas características técnicas y distribución de perfiles se encuentran en el reporte del fabricante (Griffith and Ashwill, 2011). La geometría de las demás componentes de la estructura se han definido en correspondencia con la clasificación IB de la turbina en estudio (Spera, 2009). Algunas características geométricas del modelo de turbina simulado se presentan en la Tabla 1.

TABLA 1. Características geométricas de la turbina

LT	RTT	RBT	Φ	α	β	Ψ
[m]	[m]	[m]	[°]	[°]	[°]	[°]
135	3	5.5	-5	0	2.5	0

Donde LT es la altura de la torre, RTT y RBT son el radio de la torre en su sección superior e inferior, respectivamente (ver Fig. 1); Φ es el ángulo de inclinación del eje de la góndola con respecto al eje X (tilt angle), α es el ángulo de incidencia del vector velocidad del viento con respecto al eje X y está contenido en el plano XY, β es el ángulo de conicidad de las palas (cone angle) y ψ es el ángulo de guiñada del rotor (yaw angle).

Sistema de referencia

El desarrollo computacional aerodinámico realiza los cálculos utilizando coordenadas con respecto a un sistema de referencia newtoniano o inercial N dextrógiro, fijo al suelo y contenido en el plano de la sección inferior de la torre. El eje Z coincide con el eje de simetría de la torre portante (ver Fig. 1).

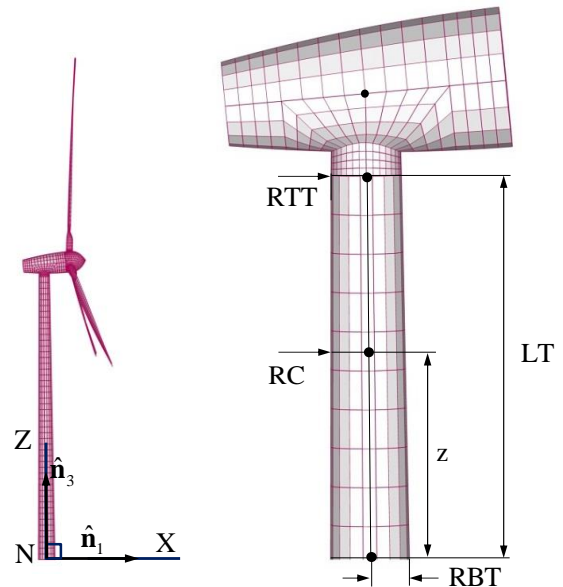


Fig. 1. Sistema de referencia y definiciones geométricas de la torre.

Método de red de vórtices no estacionario-UVLM

Es posible aplicar esta metodología ya que en este tipo de sistemas en estudio, el Número de Reynolds es alto y además el rango de velocidades de operación es subsónico. Por lo tanto, el fluido se considera incompresible, homogéneo y el elevado Número de Reynolds permite confinar los efectos viscosos a las capas límites y a las estelas, fuera de estas zonas el flujo es irrotacional. Más detalles del método es posible encontrar en la bibliografía (Preidikman, 1998).

La discretización aerodinámica consiste en la división en elementos rectangulares de área (Preidikman, 1998), de cada una de las superficies de las componentes de la turbina. Estos elementos de área son denominados paneles aerodinámicos y están formados por cuatro segmentos vorticosos. Los segmentos vorticosos se unen a otros mediante sus nodos extremos, también llamados nodos aerodinámicos.

Técnica de detección de ruptura de estela

La técnica computacional implementada originalmente (Gebhardt *et al.*, 2009), que modela la ruptura de estela, consiste en una subrutina cuyas variables de ingreso son las

coordenadas (x,y,z) del nodo que define el segmento vorticoso de estela; en tanto que la variable de salida es un identificador que determina, según el valor que tome, si el nodo ha impactado o no con el cuerpo de la torre portante. Este coeficiente es denominado bandera y tiene como valores posibles: 0 y 1.

La torre es la componente que soporta al rotor propiamente dicho y a la góndola y posee una forma troncocónica. La geometría adoptada para la torre portante, facilita el cálculo de la variación del radio de la misma en función de la altura correspondiente z, dicho radio se denomina radio de control RC, dado por:

$$RC = \frac{RTT}{LT}z + \frac{LT-z}{LT}RBT \quad (1)$$

donde cada una de las cantidades expresadas en la ec. (1) se describen luego de la Tabla 1 y además se pueden observar en la Fig. 1.

Cabe aclarar además que las dimensiones geométricas necesarias para calcular el radio de control deben estar adimensionalizadas con respecto a la longitud de referencia L_{ref} cuyo origen es puramente aerodinámico. Luego, la modelación de ruptura está dada, por la verificación del traspaso del nodo aerodinámico de la estela a la estructura de la torre, mediante el cumplimiento de las dos condiciones de la ec. (2).

$$\begin{aligned} 1) \quad & x^2 + y^2 \leq RC, \\ 2) \quad & z \leq LT \end{aligned} \quad (2)$$

Si se cumplen las condiciones dadas en la ec. (2), entonces, la bandera asociada a ese nodo adopta el valor 0. Por lo tanto si un segmento de estela posee uno de sus nodos extremos con bandera 0 asociada, el segmento en cuestión desaparece. Aquella desaparición se evidencia numéricamente al anular su intensidad vorticosa y además deja de considerarse en el post-procesamiento realizado en el software de visualización.

La nueva técnica de detección y simulación de ruptura desarrollada, se ha implementado mediante subrutinas embebidas al código computacional original. Dicha técnica contempla y tiene en cuenta casos que escapaban del alcance de la versión inicial, ya que hay segmentos vorticosos de estela cuyos nodos extremos no están situados en el interior de la malla aerodinámica de la torre, no obstante, el segmento sí atraviesa la superficie de la misma.

Las subrutinas propias del nuevo aporte tienen como variable de ingreso, las coordenadas de los nodos que definen el segmento de estela, luego a partir de los mismos se calculan las coordenadas del centroide del segmento en cuestión; y se verifica el traspaso a través del cuerpo de la torre, de los nodos extremos del segmento vorticoso y también del centroide, mediante las condiciones expresadas en la ec. (2).

Cómputo de la Potencia

El desarrollo computacional encargado de resolver la aerodinámica inestacionaria de una turbina eólica de eje horizontal tiene como resultado, las acciones que actúan en cada paso de tiempo, sobre estos aerogeneradores. La potencia mecánica que produce la turbina se puede calcular conociendo la velocidad rotacional y la componente del

momento o torque, en la dirección del eje de rotación (Schaffarczyk, 2014).

En este trabajo se calcula la potencia que genera la turbina con y sin la presencia de la torre; la comparación entre ambos resultados permitirá conocer la influencia de esta componente estructural en el cálculo de la potencia.

Influencia de la discretización aerodinámica en la ruptura de estela

Las simulaciones realizadas teniendo en cuenta un cambio de discretización no hace referencia a una modificación en la forma geométrica de los paneles, sino a la cantidad de ellos que conforman las mallas o grillas aerodinámicas.

En este trabajo, se realizaron simulaciones de la ruptura de estela, cambiando la discretización aerodinámica de las palas, así como también de la torre portante. Se establecieron dos grupos de simulaciones.

El Grupo #1 busca analizar cualitativamente la forma y desarrollo de la ruptura de estela con el aumento en el número de paneles en la dirección del eje longitudinal de la torre.

El Grupo #2 permite realizar un análisis cuantitativo según la discretización aerodinámica de la pala y su influencia en los tiempos de comienzo y finalización de la primera ruptura de estela. Una vez conocido aquellos tiempos, se procede a calcular el tiempo de duración de la ruptura y la comparación de los mismos para cada caso ensayado.

Para que la comparación de los tiempos de duración de ruptura entre las distintas discretizaciones se pueda llevar a cabo, se requiere la conversión del tiempo a una cantidad dimensional.

La herramienta computacional procesa la información y realiza los cálculos mediante cantidades adimensionales, por lo tanto, la transformación del tiempo adimensional a unidades dimensionales se logra a través de la ec (3).

$$t_{dim} = n \Delta t_{adim} \frac{L_{ref}}{V_{ref}} \quad (3)$$

donde Δt_{adim} es el paso de tiempo unitario adimensional utilizado en el proceso inestacionario del UVLM, L_{ref} es la longitud de referencia calculada a partir del área de los paneles pertenecientes a la superficie sustentadora de la pala, V_{ref} se denomina velocidad de referencia y es la magnitud absoluta del vector velocidad del viento, por último, n es el tiempo adimensional.

RESULTADOS

Los resultados de las simulaciones que muestran el desarrollo de las estelas vorticosas para los casos con y sin presencia de la torre portante, se pueden observar en la Fig. 2.

Es posible simular el quiebre y posterior desaparición de los paneles aerodinámicos cuando impactan con la torre. Esa ruptura de estela se produce gradualmente en el tiempo y de manera no uniforme.

La evolución del valor de la potencia en función del ángulo azimutal se puede visualizar en la Fig. 3, en la misma se presenta el comportamiento de la potencia

considerando la torre y sin considerarla. Se observa el desarrollo periódico del valor de la potencia, debido al paso de cada una de las palas por delante de la torre en cada revolución del rotor. Estos pulsos de potencia se traducen en esfuerzos transmitidos al eje de rotación. En tanto que en ausencia de la torre, la potencia no presenta comportamiento periódico.

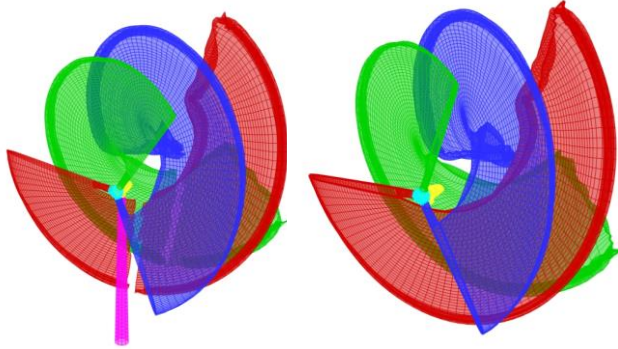


Fig. 2. Desarrollo de la estela con y sin presencia de la torre portante.

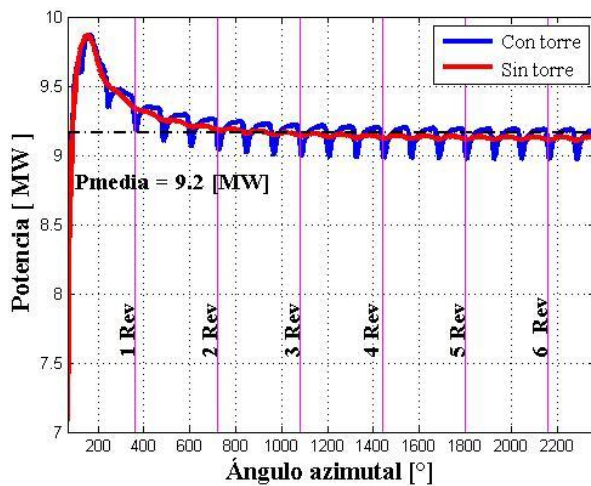


Fig. 3. Potencia vs. Ángulo azimutal.

Además, en dicha figura se presenta la potencia media (P_{media}) de la turbina con torre, cuyo valor es menor a la potencia nominal informada por el fabricante (Griffith and Ashwill, 2011).

A partir del valor de la P_{media} que se obtuvo en la presente formulación, se procede a calcular el coeficiente de potencia C_p , dada por:

$$C_p = \frac{P}{P_{avil}} \quad (4)$$

donde P es la potencia producida, en este caso se considera la P_{media} y P_{avil} es la potencia disponible; que para un modelo simple unidimensional de un rotor ideal se puede expresar como:

$$P_{avil} = \frac{1}{2} \rho V_{eff}^3 A_{eff} \quad (5)$$

donde ρ es la densidad del aire según la Atmósfera Estándar Internacional (ISA), V_{eff} es la magnitud absoluta

de la velocidad efectiva del aire que enfrenta al plano de rotación y A_{eff} es el área efectiva barrida por el rotor.

Para más detalles de las ecuaciones (4) y (5), ver referencia (Hansen, 2008).

Reemplazando los valores de las características geométricas, entre otros, en las ecuaciones (5) y (4), se calcula el valor de C_p .

$$C_p \approx 0.13 \quad (6)$$

Cuyo valor se ha comparado con el valor de C_p calculado con otra metodología, donde $C_p \approx 0.11$, para la misma turbina en estudio (Maza *et al.*, 2014). Poniendo en evidencia que la diferencia entre ambos valores no es significativa.

Los resultados de las simulaciones de cada uno de los casos de estudio; para la técnica de detección de ruptura original (TRO) y para la técnica propuesta (TRP), se visualizan en la Fig. 4 y Fig. 5, respectivamente.

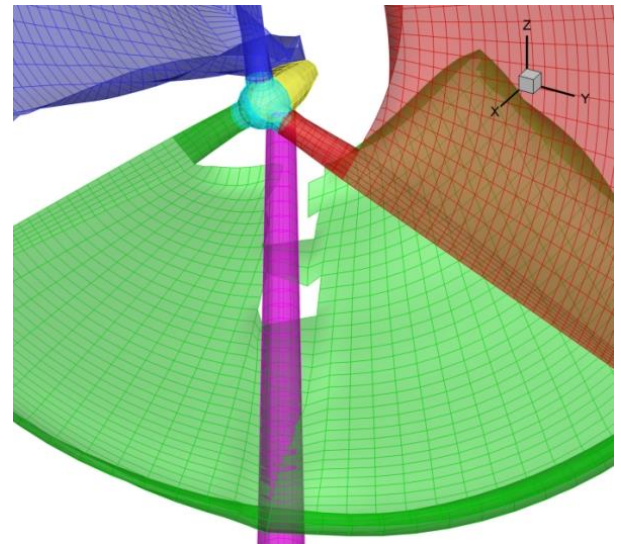


Fig. 4. Simulación con TRO.

Cabe mencionar que para que sea válida la comparación entre un resultado y otro, los parámetros de simulación y características geométricas deben ser iguales en ambas simulaciones (ver Tabla 2).

TABLA 2. Datos de simulación del SNL-100 metros

NS	NSA	q [°]	V [m/s]	Ω [rpm]
600	620	180	15	7

Donde NS corresponde al número máximo de pasos de tiempo simulados, NSA es el número mínimo de pasos de tiempo a partir de la cual se realiza el recorte de estela, q es el ángulo de incidencia o pitch de cada una de las palas, V es la magnitud absoluta de la velocidad del viento y Ω es la magnitud de la velocidad de rotación del rotor.

Se puede visualizar en la Fig. 4 la falencia que presenta la TRO, ya que en la simulación de ruptura hay segmentos vorticosos de estela que atraviesan a la torre y aun así, no han sido detectados por la técnica de control. Ese segmento que no fue anulado, se convecta aguas abajo de la corriente

fluida y su desaparición solo es posible como consecuencia de un posterior recorte de estela.

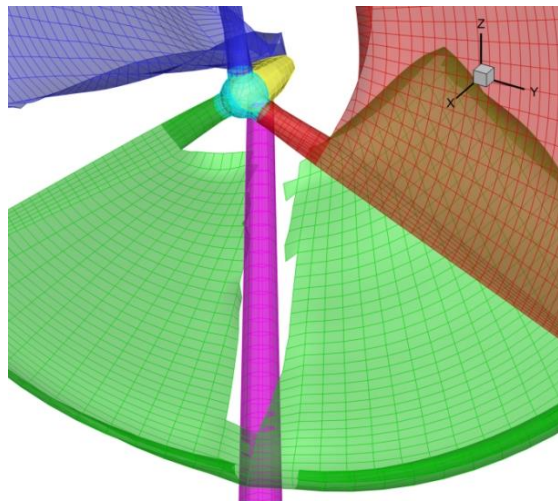


Fig. 5. Simulación con TRP.

En la Fig. 5 se muestran los resultados teniendo en cuenta la TRP y se puede observar que los segmentos se quiebran al impactar la torre. Por lo tanto se concluye que el reajuste computacional implementado es más representativo de la realidad.

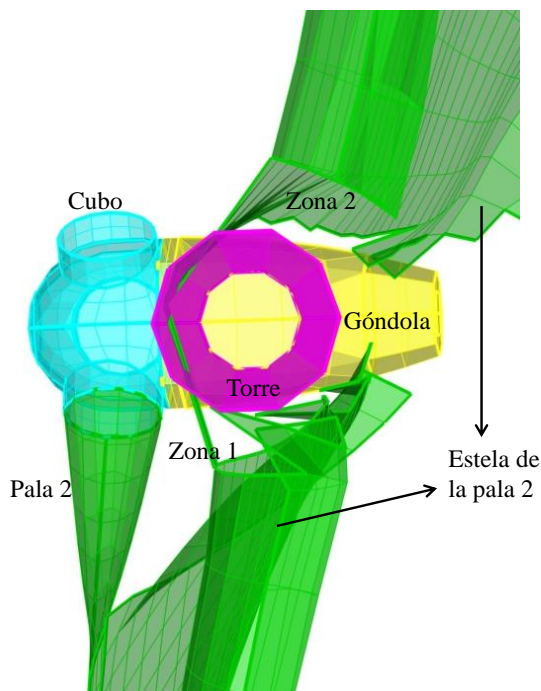


Fig. 6. Estela de la pala 2. Caso no contemplado por la TRP.

El alcance de la TRP es limitada y admite mejoras. La limitación está dada en casos donde los segmentos vorticosos no traspasen a la torre en ninguno de sus nodos extremos ni en tramos donde el centroide quede situado en el interior de la torre; no obstante ello, se produce el cruce en otro tramo del segmento. Esto se puede apreciar en la Fig. 6, consistente con una vista hacia el rotor, desde la sección inferior de la torre; se observa en las zonas 1 y 2, segmentos de la estela que convecta la vorticidad de la pala 2, que traspasan la torre y han pasado el control planteado

con la TRP sin ser detectados, aunque dichos segmentos desaparecen al ser convectados posteriormente. Además, en la zona 2 se observa el pliegue de los paneles aerodinámicos de estela como consecuencia de la fuerte interacción vorticiosa, dada la cercanía entre los segmentos de estela y la torre.

Los resultados del Grupo #1 permiten analizar cualitativamente la forma de la ruptura de estela; se puede visualizar en la Fig. 7 que el quiebre de la estela no cambia apreciablemente con el aumento del número de paneles en la dirección longitudinal de la torre.

En el Grupo #2 se han ensayado casos donde se ha aumentado el número de paneles distribuidos a lo largo de la cuerda, como así también, a lo largo de la envergadura de la pala. Este tipo de discretización se realiza de manera tal que los paneles resultantes mantengan su forma rectangular; donde las longitudes de los lados no difieran significativamente en su magnitud.

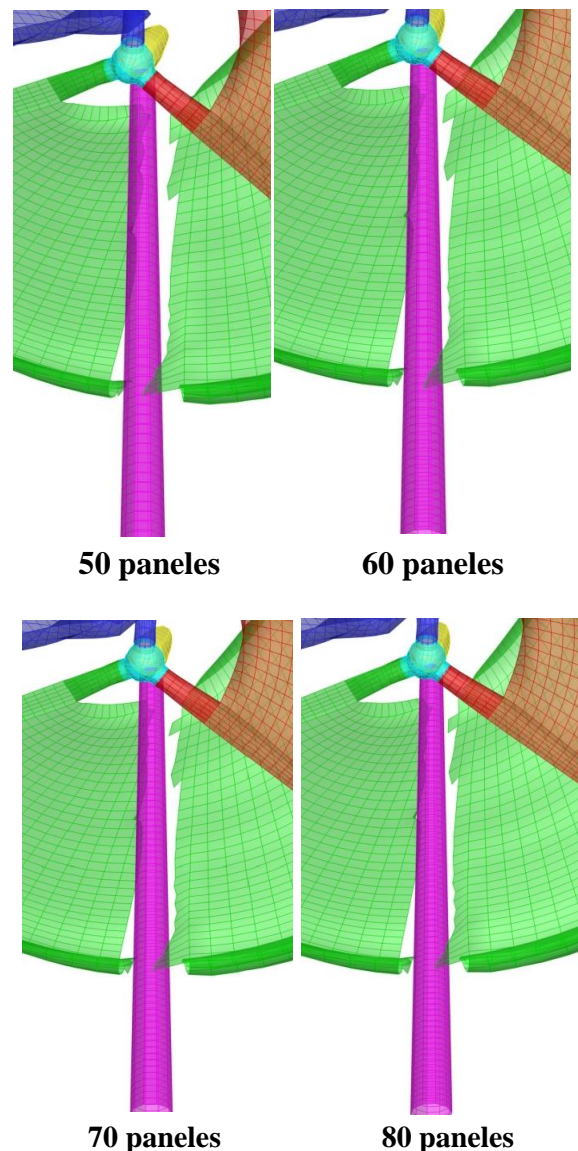


Fig. 7. Ruptura para distinto número de paneles en la dirección longitudinal de la torre.

En la Tabla 3 se pueden ver los resultados de las simulaciones del Grupo #2. Los valores de los tiempos calculados corresponden con la estela de la Pala 2, que es la primera estela que se encuentra, durante su convección, con la presencia de la torre. La numeración de las columnas de la Tabla 3 es de izquierda a derecha; la primera columna es el número total de paneles de la pala (NPP), la segunda columna es la longitud de referencia L_{ref} , la tercera es el tiempo dimensional del comienzo de la ruptura (CR), la cuarta columna es el tiempo dimensional de finalización de la ruptura (FR), y la última columna es la diferencia entre la cuarta y la tercera.

Por simplicidad en la presentación de datos, los valores de los tiempos en la Tabla 3 se muestran con sólo dos cifras decimales, no obstante, en el cálculo se consideran todas las cifras que la máquina de cómputo es capaz de almacenar.

TABLA 3. Resultados de las simulaciones del Grupo #2.

NPP	L_{ref} [m]	t_{dim} de CR [s]	t_{dim} de FR [s]	t_{dim} de FR-CR [s]
324	1.37	2.01	3.02	1.01
396	1.23	1.96	3.03	1.06
432	1.19	1.98	2.77	0.79
468	1.12	1.94	2.84	0.90
540	1.04	1.93	2.90	0.97
624	0.97	1.93	2.91	0.97
720	0.90	1.86	2.87	0.97
832	0.84	2.02	3.14	1.02
864	0.82	2.02	3.11	1.09
928	0.79	1.95	3.06	1.11
1024	0.75	1.90	3.10	1.20

Analizando la Tabla 3 se puede concluir que los valores de los tiempos presentados en las columnas 3 y 4, no muestran una tendencia con el aumento de paneles aerodinámicos que discretizan las palas. Estos valores presentan dispersión poniendo en evidencia: *i*) una sensibilidad hacia la discretización y, *ii*) una fuerte dependencia de la capacidad de detección de la técnica de ruptura; ya que la técnica de detección es la encargada de verificar el impacto con la superficie de la torre del primer y último segmento de estela.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha puesto en evidencia el efecto de la presencia de la torre portante en el análisis aerodinámico de un generador eólico de eje horizontal. La torre como componente soporte de la turbina, genera un comportamiento periódico de la potencia con el giro del rotor, que se traducen en cargas alternantes sobre el eje principal y la cadena de transmisión; dichas cargas son de importancia en el diseño de estos elementos mecánicos.

Se ha comparado el valor del coeficiente de potencia C_p calculado a partir de la presente formulación con otro resultado de C_p , presentado en la referencia para dicha turbina eólica en estudio y bajo ciertos parámetros de simulación. Como resultado de esa comparación se puede concluir que la diferencia entre ambos valores no es significativa.

Se ha desarrollado e implementado una nueva técnica computacional (TRP) que simula la ruptura de segmentos vorticosos de estela al impactar contra la torre portante y se ha comparado ésta técnica con la implementada originalmente (TRO). El mecanismo de simulación propuesto contempla casos que el original no lo hacía, logrando de esta manera, la implementación de un desarrollo computacional robusto y eficiente que permite simular las estelas generadas por un generador eólico de eje horizontal incluyendo la torre.

Se ha presentado el tipo de falencia de la metodología propuesta, admitiendo futuras modificaciones a expensas de un aumento en el tiempo de cómputo.

Además, realizando un análisis cualitativo de los resultados de las simulaciones del Grupo #1, se puede concluir que la forma de la ruptura de estela no cambia significativamente con el aumento en el número de paneles en la dirección longitudinal de la torre.

Finalmente, los resultados de las simulaciones que pertenecen al Grupo #2 permiten realizar un análisis cuantitativo de la discretización aerodinámica de la pala, en la ruptura de la estela. Para ello se calcularon los tiempos de inicio y finalización de la primera ruptura llevada a cabo.

Los valores de los tiempos calculados no muestran una tendencia a medida que disminuye el tamaño de la malla aerodinámica; aunque sí presentan dispersión. Esta dispersión proviene de la discretización aerodinámica de la pala y de la capacidad que posee la técnica de ruptura en la detección de los segmentos vorticosos que impactan contra la torre portante.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen al Programa Pablo Neruda y a la colaboración del Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

REFERENCIAS

- [1] Abdelsalam A. M., Boopathi K., Gomathinayagam S., Hari Krisnan Kumar S. S. and Velraj Ramalingam (2014), "Experimental and numerical studies on the wake behavior of a horizontal axis wind turbine", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 128:54-65.
- [2] Gebhardt C. G., Preidikman S. and Massa J. C. (2009), "Numerical simulations of the aerodynamic behavior of large horizontal-axis wind turbines", *International Journal of Hydrogen Energy*, pp. 6005-6011.
- [3] Grant I., Mo M., Pan X., Parkin P., Powell J., Reinecke H., Shuang K., Coton F. and Lee D. (2000), "An experimental and numerical study of the vortex filaments in the wake of an operational, horizontal-axis, wind turbine", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 85:177-189.
- [4] Griffith D. T. y Ashwill T. D. (2011), "The Sandia 100-meter All-glass Baseline Wind Turbine Blade: SNL100-00", *SANDIA REPORT*, California.
- [5] Hansen M. O. L. (2008), "Aerodynamics of Wind Turbines", Earthscan, UK and EE. UU.
- [6] Katz J. and Plotkin A. (2001), "Low-speed Aerodynamics", Cambridge University, EE. UU.
- [7] Kim H., Lee S. and Lee S. (2011), "Influence of blade-tower interaction in upwind-type horizontal axis wind turbines on aerodynamics", *Journal of Mechanical Science and Technology*, 25(5)1351-1360.
- [8] Lignarolo L. E. M., Ragni D., Krishnaswami C., Chen Q., Simão Ferreira C. J. and Van Bussel G. J. W. (2014), "Experimental

- analysis of the wake of a horizontal-axis wind-turbine model”, *Renewable Energy*, 70:31-46.
- [9] Maza M. S., Flores F. G., Preidikman S. and Forchetti D. G. (2014), “Inclusión de un módulo de control en el abordaje multifísico del comportamiento de grandes turbinas eólicas de eje horizontal”, *Congreso de Mecánica Computacional*, Vol. XXXIII, 2217-2229.
- [10] Preidikman S. (1998), “Numerical Simulations of Interactions Among Aerodynamics, Structural Dynamics and Control Systems”, *PhD thesis*.
- [11] Robinson M. C., Hand M. M., Simms D. A. and Schreck S. J. (1999), “Horizontal Axis Wind Turbine Aerodynamics: Three-Dimensional, Unsteady, and Separated Flow Influences”, *3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference*, NREL/CP-500-26337, EE.UU.
- [12] Schaffarczyk A. P. (2014), “Introduction to Wind Turbine Aerodynamics”, Springer, Germany.
- [13] Spera D. A. (2009), “Wind Turbine Technology. Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering”, ESME, Nueva York.
- [14] Van Garrel A. (2003), “Development of a wind turbine aerodynamics simulation module”, ECN-C-03-079.