

## **Simulaciones numéricas de la aerodinámica no estacionaria de generadores eólicos de eje horizontal y gran potencia**

Cristian Gebhardt<sup>(1)</sup>, Sergio Preidikman<sup>(1,2)</sup>, Julio Massa<sup>(1,2)</sup>, Guillermo Weber<sup>(3)</sup>

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

<sup>(2)</sup> *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto, Ruta Nacional 36 Km. 601, 5800 Río Cuarto, Argentina. e-mail: spreidikman@ing.unrc.edu.ar*

<sup>(3)</sup> *Department of Engineering, University of Texas at Brownsville. Brownsville, TX 78520, USA*

### **RESUMEN**

En el presente trabajo se simula numéricamente el comportamiento aerodinámico del rotor de un generador eólico de eje horizontal y de gran potencia. La presencia de vientos de amplitud y dirección cambiante, los efectos de la capa límite terrestre, las deformaciones estáticas, y los flujos dominados por vorticidad hacen que la aerodinámica asociada a estos sistemas de generación de energía sea inherentemente no-lineal y no-estacionaria.

El diseño, el análisis y las pruebas de una turbina eólica dependen de la habilidad que se posea para determinar en forma rápida, precisa y barata las cargas actuantes sobre el equipo y la performance del rotor. Por ende, para los productores y diseñadores de turbinas eólicas, es vital contar con una herramienta como la aquí presentada. Las variables de entrada del código computacional desarrollado son la cinemática del generador (modelado como una colección de cuerpos rígidos cuyo movimiento es conocido) y una corriente de aire que puede variar en el tiempo, tanto en magnitud como en dirección. Estos últimos datos pueden ser de origen sintético o experimental.

El rango de velocidades de operación correspondiente a un régimen subsónico bajo se conjuga con las grandes dimensiones del equipo provocando flujos incompresibles con números de Reynolds altos. Esto avala la hipótesis de que los efectos viscosos están confinados, únicamente, a la capa límite y las estelas vorticosas, y permite estimar las cargas aerodinámicas mediante el método de red de vórtices no-lineal y no-estacionario (NLUVLM). En este trabajo, utilizando el NLUVLM se estima la evolución temporal de las cargas aerodinámicas actuantes sobre cada pala, la distribución de vorticidad asociada a las sábanas vorticosas adheridas, la distribución e intensidad de vorticidad y forma de las estelas emitidas desde el borde de fuga y desde la puntera de de cada una de las palas, y las interacciones aerodinámicas palas-palas, palas-estelas, palas-cubo, cubo-estelas, y estelas-estelas.

**Palabras Claves:** generadores eólicos de eje horizontal, aerodinámica inestacionaria, método de red de vórtices no-lineal y no-estacionario.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Actualmente, las compañías de electricidad deben satisfacer demandas crecientes ya que los registros de consumo de energía se están incrementando continuamente. A escala mundial se espera un aumento mayor al 50 % en el consumo de energía en los próximos diez años. Las Energías renovables, como la eólica, la solar, y las provenientes de los recursos energéticos de las biomásas son una muy buena alternativa frente a los combustibles fósiles y a todo otro tipo de energía no renovable. La industria de grandes aerogeneradores (mayores a 100 KW de potencia) es la más dinámica entre las industrias productoras de grandes equipos para la generación eléctrica y dentro del conjunto de ramas industriales emergentes sólo es superada por la telefonía móvil.

Un aerogenerador obtiene su potencia transformando la fuerza del viento en un par actuando sobre el eje del rotor. Los parámetros que determinan cuanta energía del viento está disponible para ser capturada por una turbina eólica son, entre otros, la densidad del aire, el área de barrido del rotor y la velocidad del viento. Por otro lado, la cantidad de energía que el rotor “es capaz de capturar” depende exclusivamente de su eficiencia aerodinámica. Por lo tanto es crucial conocer la eficiencia de las turbinas eólicas y el diseño que determinará dicha eficiencia.

En el presente trabajo se simula numéricamente el comportamiento aerodinámico del rotor de un generador eólico de eje horizontal de gran potencia. La aerodinámica asociada a este sistema de generación de energía es inherentemente no-lineal e inestacionaria debido a la presencia de condiciones ambientales complejas, vientos de amplitud y dirección cambiante, existencia de la capa límite terrestre, deformaciones estáticas, y flujos dominados por vorticidad [1].

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, y permite estimar las cargas aerodinámicas mediante una conocida técnica de la dinámica de fluidos: el método de red de vórtices no-lineal e inestacionario (NLUVLM).

En este esfuerzo, mediante el uso del NLUVLM se estiman, en el dominio del tiempo, las cargas aerodinámicas actuantes sobre cada pala, la distribución de vorticidad en las sábanas vorticosas adheridas, la distribución e intensidad de la vorticidad y forma de las estelas emitidas desde el borde de fuga y desde la puntera de cada una de las palas que forman el rotor. La historia del movimiento se almacena en las estelas, lo que permite contemplar los efectos aerodinámicos de tipo histerético. Además se pueden tener en cuenta todas las posibles interferencias e interacciones aerodinámicas entre palas-palas, palas-estelas, palas-cubo, cubo-estelas, y estelas-estelas.

Los datos necesarios para realizar las simulaciones numéricas son: i) la cinemática del aerogenerador (modelado como una colección de cuerpos rígidos cuyo movimiento es conocido); y ii) la corriente de aire que puede variar en el tiempo, tanto en magnitud como en dirección. Los datos que caracterizan el flujo incidente pueden ser de origen sintético, o bien, pueden ser obtenidos experimentalmente a partir de mediciones de campo.

## 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:

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

donde  $\varphi(\vec{R}, t)$  es la función potencial de velocidad válida en todo el dominio irrotacional del fluido (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, [2] y [3].

Cuando existe velocidad relativa entre el rotor y el fluido, se genera vorticidad en el seno de las capas límites. Los efectos viscosos son los responsables de la existencia de las capas límites. Parte de esta vorticidad es emitida desde el borde de fuga y la punta 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 este 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 las cargas aerodinámicas.

La ecuación que gobierna el problema es complementada con las siguientes condiciones de contorno: i) *condición en el infinito*: las perturbaciones producidas por la presencia de las superficies sólidas decaen en el infinito; ii) *condición de no penetración*: la trayectoria de las partículas de fluido es tangente a las superficies sólidas; iii) *condición de estela libre de fuerzas*: la variación de presión es continua a través de la estela; iv) *condición de conservación de circulación*: el campo de vorticidad es solenoidal, [4], esto se satisface de manera automática debido a que las superficies sólidas y las estelas son modeladas como colecciones de anillos vorticosos cerrados; y v) *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:

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

Para el caso de segmentos vorticosos de longitud finita y circulación  $\Gamma(t)$ , la ley de Biot-Savart toma la siguiente 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  $\vec{L} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$ .

## 2.1. 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 utiliza la condición de no-penetración:

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

donde  $\vec{V}_{adherida}$ ,  $\vec{V}_{estelas}$ , y  $\vec{V}_{\infty}$  son las velocidades asociadas a las sábanas vorticosas adheridas (capas limites), 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  $A_{ij}$  ([2], [3], [5], [6]):

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

Una vez calculadas las circulaciones  $G_i(t)$ , 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 [3], [5]:

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

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

## 2.2. Cálculo de las cargas 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 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:

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

Más detalles sobre el tratamiento de cada uno de los términos que aparecen en la Ecuación (7) pueden encontrarse en las Referencias [3] y [5].

### 3. DESCRIPCIÓN CINEMÁTICA

Para determinar las cargas actuantes sobre el rotor en cada condición de operación es necesario conocer la cinemática del mismo, ya que las fuerzas aerodinámicas dependen de la posición, la velocidad y la aceleración de cada componente del equipo.

#### 3.1 Sistemas de coordenadas

En este trabajo el rotor es modelado como una colección de cuerpos rígidos. Para facilitar la descripción cinemática se introduce un conjunto de sistemas de referencia asociados a cada uno de los cuerpos que conforman el rotor.

En la Figura 1 se muestran los sistemas de referencia utilizados: N, A, C, D y E. El sistema de referencia N- $(\hat{n}_1, \hat{n}_2, \hat{n}_3)$  es un sistema fijo a tierra o Newtoniano. Sobre el cubo se encuentra un sistema de referencia rotante A- $(\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{a}_3)$ , cuyo origen coincide con el origen de N. El cubo rota, relativo al sistema N, con una velocidad angular  $\dot{q}_4(t)\hat{n}_1$ .

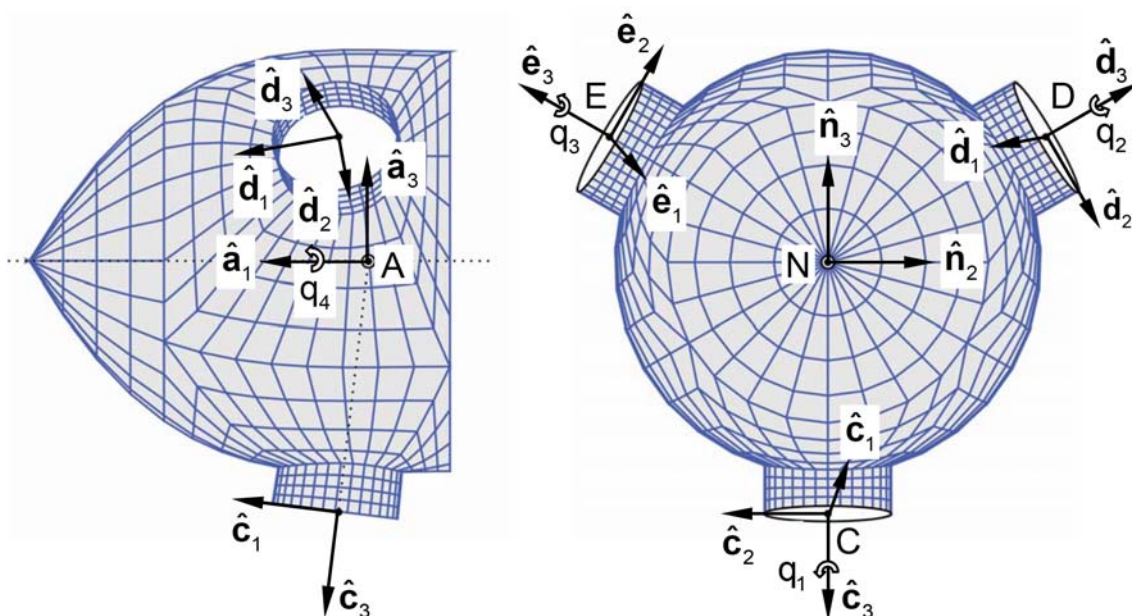


Figura 1: Sistemas de coordenadas – Cubo y palas

Los sistemas C, D, y E están fijos a cada una de las palas. En la Figura 2 se muestra la pala 1 y el sistema C- $(\hat{c}_1, \hat{c}_2, \hat{c}_3)$  ubicado en el origen de la misma. La pala 1 puede cambiar su ángulo de actitud  $q_1$  en función del tiempo. La actitud (ángulo de "pitch") de la pala 1 consiste en una rotación de la pala alrededor del eje  $\hat{c}_3$ . La pala 1 posee, además, una ley de distribución de alabeo geométrico representada por el ángulo  $\gamma$  que es variable a lo largo de la pala. Este ángulo se mide también respecto al eje  $\hat{c}_3$ . En la puntera de la pala el valor de  $\gamma$  es nulo, definiendo de esta manera una referencia para el ángulo de actitud  $q_1(t)$ . Las actitudes y alabeos de las palas 2 y 3 se describen de manera análoga a la utilizada en la pala 1. La conicidad de un rotor queda definida por medio del ángulo  $\zeta$ , que indica el ángulo existente entre el plano perpendicular al eje del rotor y el eje longitudinal de la pala.

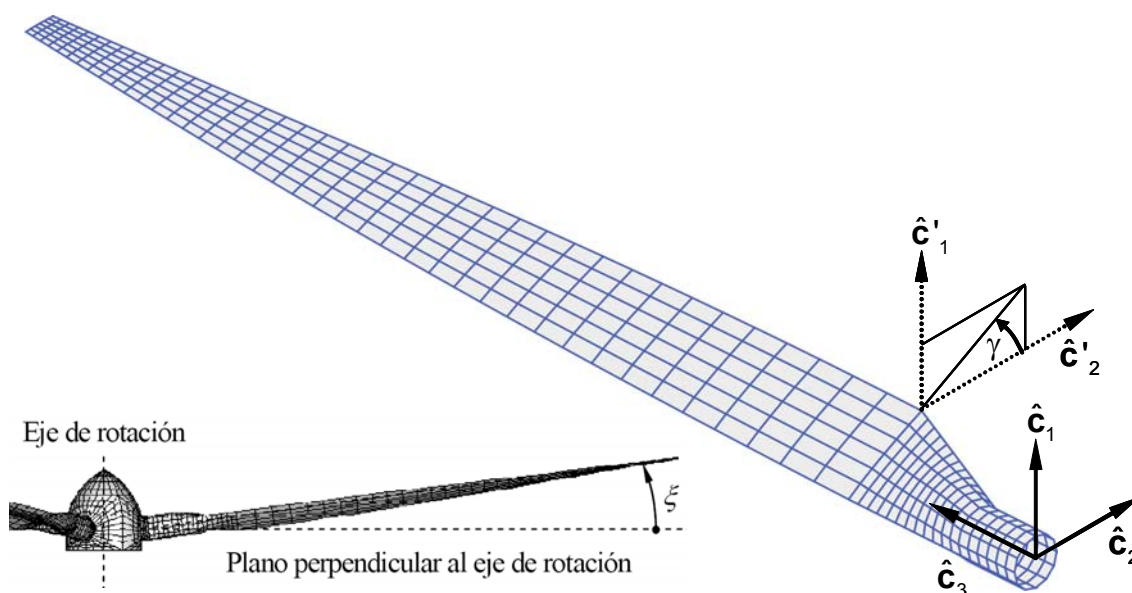


Figura 2: Sistemas de coordenadas asociados a la Pala 1

### 3.2 Posición y velocidad

A continuación se presentan los vectores posición y velocidad de cada componente del rotor.

#### 3.2.1 Cubo

Los vectores posición y velocidad de los puntos del cubo se obtienen como sigue:

$${}^N\vec{R}_{\text{Cubo}} = [T_{NA}] {}^A\vec{r}_{\text{Cubo}} \quad \rightarrow \quad {}^N\vec{V}_{\text{Cubo}} = \frac{d}{dt} {}^N\vec{R}_{\text{Cubo}} = [T_{NA}] \{ {}^N\vec{\omega}^A \times {}^A\vec{r}_{\text{Cubo}} \} \quad (8)$$

donde  ${}^N\vec{R}_{\text{Cubo}}$  es el vector posición respecto del sistema N de un punto arbitrario del cubo,  ${}^A\vec{r}_{\text{Cubo}}$  es el vector posición del mismo punto del cubo respecto del sistema A,  $[T_{NA}]$  es la matriz de rotación que define la orientación del sistema A respecto del sistema N,  ${}^N\vec{V}_{\text{Cubo}}$  es la velocidad del punto del cubo respecto del sistema N, y  ${}^N\vec{\omega}^A$  es la velocidad angular del sistema A respecto del sistema N.

#### 3.2.2 Pala 1

Los vectores posición y velocidad de los puntos de la pala 1 se obtienen de la siguiente manera:

$${}^N\vec{R}_{\text{Pala1}} = [T_{NA}] {}^A\vec{R}_{AC} + [T_{NC}] {}^C\vec{r}_{\text{Pala1}} \quad (9)$$

$${}^N\vec{V}_{\text{Pala1}} = \frac{d}{dt} {}^N\vec{R}_{\text{Pala1}} = [T_{NA}] \{ {}^N\vec{\omega}^A \times {}^A\vec{R}_{AC} \} + [T_{NC}] \{ {}^N\vec{\omega}^C \times {}^C\vec{r}_{\text{Pala1}} \}$$

donde  ${}^N\vec{R}_{\text{Pala1}}$  es la posición de un punto arbitrario perteneciente a la pala 1,  ${}^C\vec{r}_{\text{Pala1}}$  es la posición del mismo punto respecto del sistema C,  $[T_{NC}]$  es la matriz de rotación que define la orientación del sistema C respecto del sistema N,  ${}^N\vec{\omega}^C$  es la velocidad angular del sistema C respecto del sistema N, y  ${}^N\vec{V}_{\text{Pala1}}$  es la velocidad del punto en la pala 1 respecto al sistema N.

#### 3.2.3 Pala 2 y 3

Los vectores posición y velocidad de las palas 2 y 3 se obtienen de manera análoga a los de la pala 1.

#### 4. RESULTADOS

A continuación se presentan algunos resultados obtenidos con la herramienta computacional desarrollada en este trabajo. Se consideran dos condiciones para el viento actuante sobre un rotor de tres palas de 70 m de diámetro, con una conicidad  $\xi = 7^\circ$ , y rotando a 12 rpm. El viento tiene un perfil uniforme y su velocidad es de  $V_\infty = 20$  m/s.

##### 4.1. Caso 1 – Viento incidente en la dirección del eje del rotor

Este caso corresponde a la condición de generador con viento de frente. En la Figura 3 se presenta una imagen del rotor y su estela, donde se puede apreciar el enrollamiento del vórtice de puntera de cada pala; hecho que indica la existencia de fuerzas sustentadoras sobre las palas. En la Figura 4 se muestran las fuerzas y los momentos aerodinámicos actuantes sobre las palas y el rotor en función del ángulo de rotación. Cada columna corresponde a una dirección en el sistema N.

En la Figura 4a, correspondiente a la dirección  $\hat{n}_1$ , se observa que las fuerzas y momentos actuantes sobre las palas y el rotor son prácticamente constantes, excepto durante un transitorio. La resultante de la fuerza sobre el rotor en la dirección  $\hat{n}_1$  tiene el mismo sentido que la corriente de viento y representa el empuje actuante sobre el disco del rotor. La resultante del momento en esta dirección tiene el mismo sentido que la rotación del rotor; este hecho indica que el generador está tomando energía del viento.

En las Figuras 4b y 4c es posible apreciar que tanto en la dirección  $\hat{n}_2$  como en la  $\hat{n}_3$  las cargas actuantes sobre las palas son de tipo alternante y poseen un defasaje de  $120^\circ$ ; este defasaje coincide con el defasaje geométrico de las palas. En la última fila de las mismas figuras también se observa que las componentes en las direcciones  $\hat{n}_2$  y  $\hat{n}_3$  de la resultante de la fuerza aerodinámica actuante sobre el rotor son nulas.

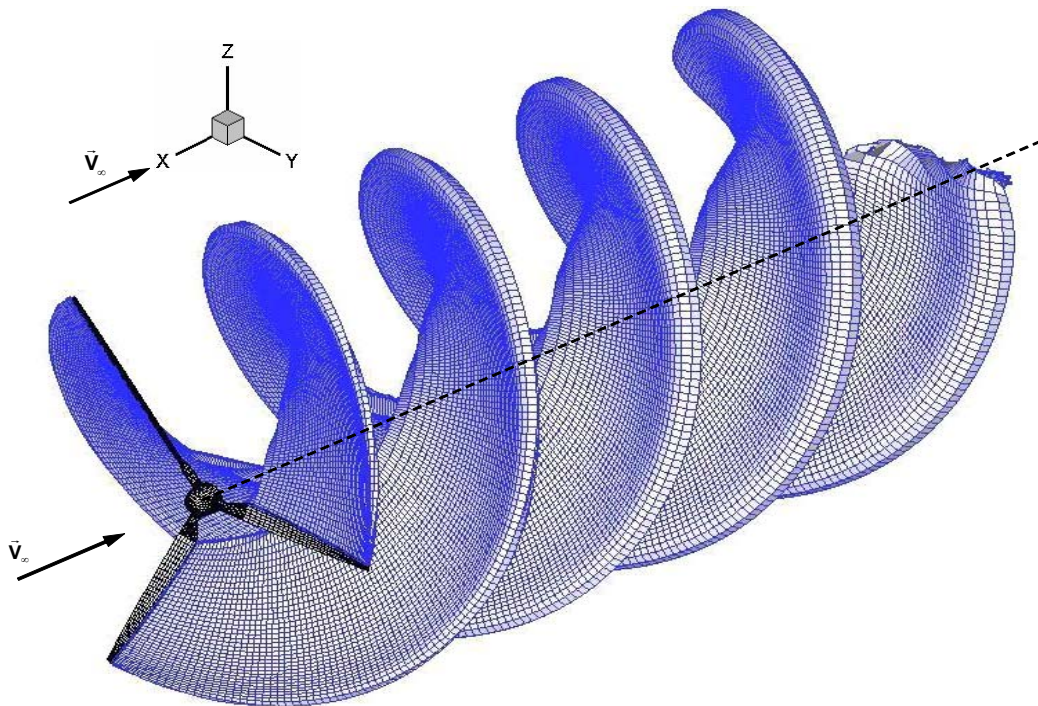


Figura 3: Rotor y estela - Caso 1 viento de frente

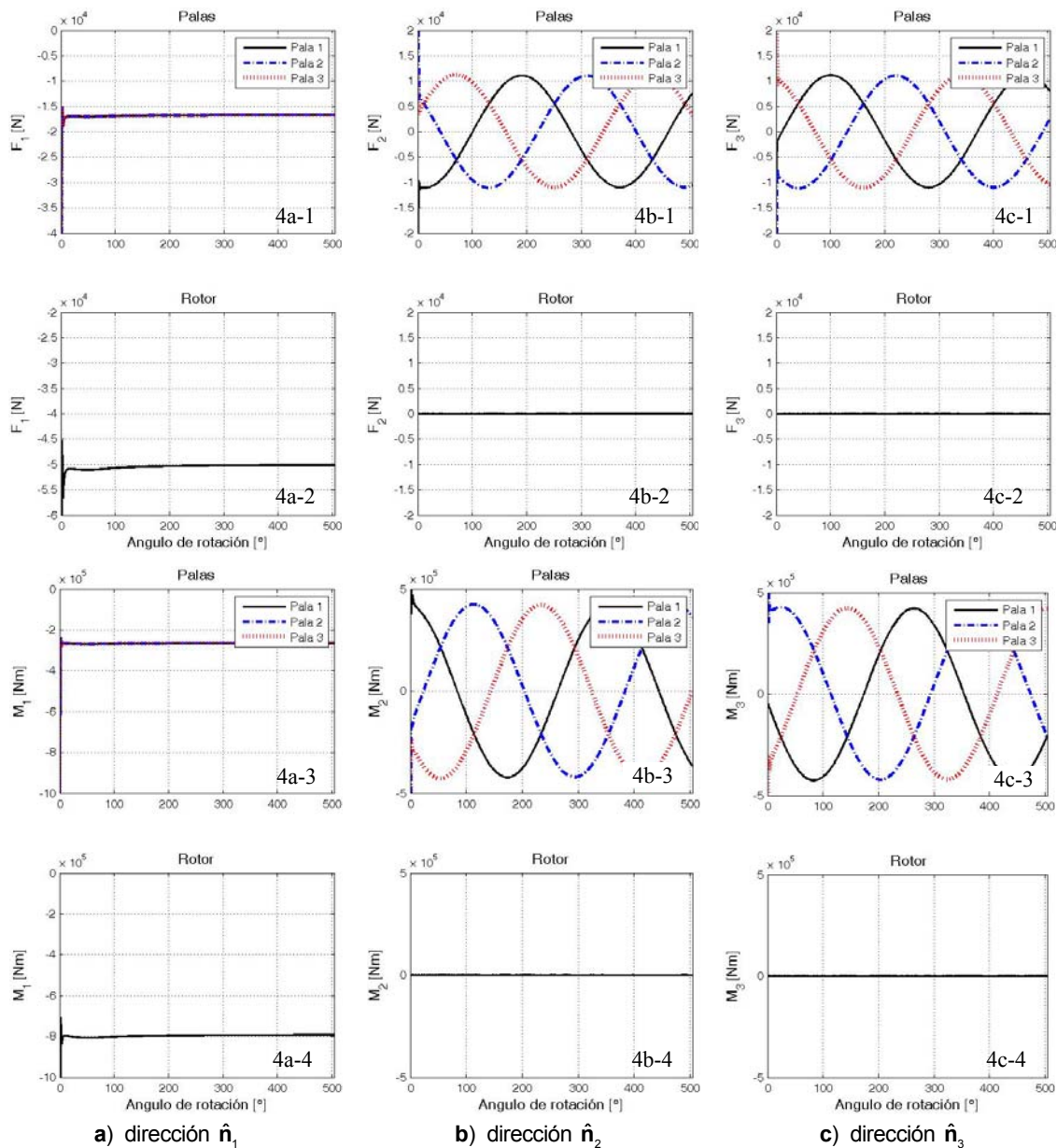


Figura 4: Fuerzas y momentos sobre las palas y el rotor - Caso 1 viento de frente

#### 4.2. Caso 2 – Viento incidente inclinado respecto al eje del rotor

Este caso corresponde a la condición de un generador sobre el que actúa un viento inclinado  $30^\circ$  con respecto al eje del rotor. En la Figura 5 se presenta una imagen del rotor y su estela donde se observa claramente como la estela tiende a alinearse con la dirección de la corriente y no en la dirección del eje del rotor.

En la Figura 6, se muestran las fuerzas y los momentos aerodinámicos actuantes sobre las palas y el rotor en función del ángulo de rotación. Cada columna corresponde a una dirección en el sistema N. En Figura 6a, correspondiente a la dirección  $\hat{n}_1$ , se observa que las cargas actuantes sobre cada pala presentan pequeñas oscilaciones alrededor de un valor de la carga que es igual para las tres palas. La evolución de las resultantes de fuerzas y momentos sobre el rotor indica que estas tienden hacia un valor constante cuyo signo es consistente con la dirección del viento incidente y el sentido de giro del rotor.

Es importante advertir que el generador, en condición de viento inclinado, produce en el eje un par menor que el producido con viento de frente de igual magnitud. Se observa una reducción de potencia del orden del 26 % cuando el viento actúa con una inclinación del  $30^\circ$  respecto al eje del rotor. Similar reducción se observa en todas las variables de la Figura 6 cuando se las compara con los valores correspondientes en la Figura 4.

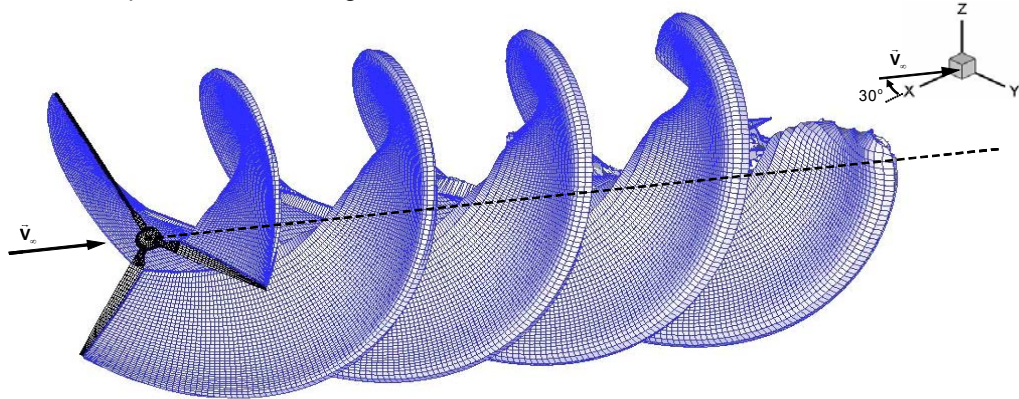


Figura 5: Rotor y estela - Caso 2 viento inclinado a  $30^\circ$

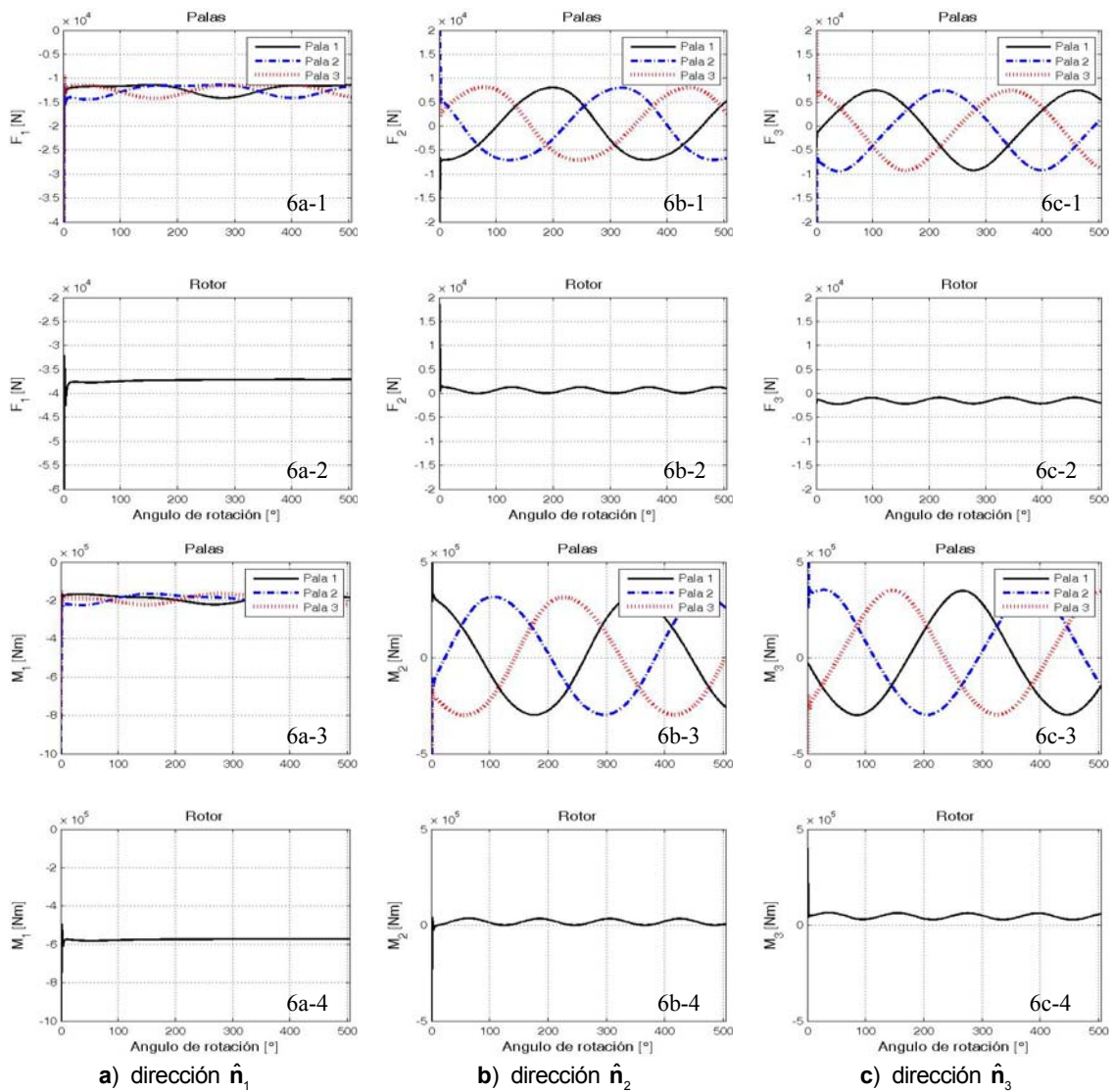


Figura 6: Fuerzas y momentos sobre las palas y el rotor - Caso 2 viento inclinado a  $30^\circ$

En las Figuras 6b y 6c se muestran las cargas aerodinámicas actuantes en las direcciones  $\hat{n}_2$  y  $\hat{n}_3$ . Aquí se observa que las cargas resultantes no son nulas, quedando evidenciada la influencia de la distribución de alabeo a lo largo de las palas y del ángulo de conicidad del rotor sobre el comportamiento aerodinámico del rotor. Los estudios hasta ahora realizados no son suficientes para inferir cuantitativamente la influencia de tales parámetros geométricos sobre la aerodinámica de un rotor como el aquí estudiado.

## 7. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentaron y analizaron los resultados obtenidos con una herramienta computacional que esta siendo actualmente desarrollada, y que tiene como objetivo estimar la evolución temporal de las cargas aerodinámicas que actúan sobre rotores de generadores eólicos de eje horizontal y de gran potencia. La herramienta esta basada en el método de red de vórtices no-lineal e inestacionario.

Los resultados obtenidos permiten realizar algunas conclusiones en pos de comprender el comportamiento de la aerodinámica asociada a rotores, cuya complejidad ha sido evidenciada mediante los resultados aquí expuestos. Es posible afirmar que las cargas aerodinámicas son fuertemente dependientes de la dirección de la corriente de viento. En esta instancia no ha sido posible explicar como algunas características geométricas del rotor (por ejemplo: la distribución de alabeo a lo largo de las palas y el ángulo de conicidad del rotor) afectan el comportamiento aerodinámico del rotor; tal estudio será el objetivo de trabajos posteriores.

Si bien la herramienta aquí presentada representa un buen punto de partida para lograr la comprensión cabal del comportamiento aerodinámico de generadores eólicos de gran potencia, en el futuro será necesario llevar a cabo simulaciones que incluyan el modelo completo del aerogenerador, y que además tengan en cuenta 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] E. Muljadi, C.P. Butterfield and M.L. Jul Jr., Effect of Turbulence on Power Generation for Variable Speed Wind Turbines, *ASME Wind Energy Symposium*, Houston, TX, 1997.
- [2] S. Preidikman, Numerical Simulations of Interactions Among Aerodynamics, Structural Dynamics, and Control Systems, Ph.D. Dissertation, Department of Engineering Science and Mechanics, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, 1998.
- [3] S. Preidikman y D.T. Mook, Modelado de Fenómenos Aeroelásticos Lineales y No-lineales - Parte 1: Los Modelos Aerodinámico y Estructural, Modelización Aplicada a la Ingeniería - Volumen I, Regional Bs. As de la UTN, ISBN: 950-42-0057-5, Argentina, pp. 365-388, 2005.
- [4] H. Lugt, *Vortex Flow in Nature and Technology*, John Wiley & Sons, Maryland, 1983.
- [5] P. Konstandinopoulos, D.T. Mook, and A.H. Nayfeh, A Numerical Method for General, Unsteady Aerodynamics, *AIAA-81-1877*, New Mexico, 1981.
- [6] J. Katz and A. Plotkin, *Low-Speed Aerodynamics*, Cambridge University Press, UK, 2001.