

Simulaciones Numéricas de la Cinemática de Generadores Eólicos

Griselda Jeandrevin¹, Sergio Preidikman²

¹ Facultad de Ingeniería, Instituto Universitario Aeronáutico
Av. Fuerza Aérea Km 6 1/2 (5022) Córdoba, Argentina

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

RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolla una herramienta computacional que permiten analizar la cinemática de un generador eólico. Mediante las simulaciones numéricas es posible conocer la historia del movimiento descrito por cada una de las partes constitutivas del aerogenerador, independientemente de las fuerzas que lo provocan.

ABSTRACT

In the present work, a computational tool too perform numerical simulation, that allow the analysis of windmill's kinematics is developed. Theses numerical simulation make it possible to get information about the geometry of the motion described by each windmill's components without references to the forces that either cause the motion all are generated as a result of it.

INTRODUCCIÓN

El trabajo que se presenta en este artículo forma parte del proyecto PICT'99 No. 11-6515, titulado *Desarrollo de Tecnologías para Micro-Centrales Electro-Eólicas*. Este proyecto está financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica y se lleva a cabo en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Río Cuarto. La propuesta innovadora de este proyecto consiste en desarrollar modelos, técnicas y herramientas computacionales que permitan estudiar a las Micro-Centrales Electro-Eólicas (MiCEEs) de manera integral, considerando el flujo del aire, las estructuras, los dispositivos de control, y las cargas que consumen la energía generada, como un único sistema dinámico. Debido a su naturaleza multidisciplinaria, dicho proyecto ha sido organizado en módulos pertenecientes a dos líneas de trabajo: Electrónica y Control y Aeroservoelasticidad. Otra característica de gran importancia se relaciona con el desarrollo y transferencia al medio de nuevas tecnologías que permitan mejorar el diseño, la construcción, el control, y la operación de MiCEEs. El desarrollo de estas tecnologías requiere la integración de varias disciplinas de la ingeniería, tales como: aerodinámica, electrónica, mecánica estructural, control automático y métodos numéricos. La naturaleza multidisciplinaria del presente proyecto ha generado la necesidad de interacción entre grupos de trabajo localizados en diferentes instituciones de la provincia de Córdoba (Universidad Nacional de Río Cuarto, Universidad Nacional de Córdoba e Instituto Universitario Aeronáutico) y cada uno, con distintas líneas de trabajo. El tópico desarrollado en este documento pertenece a la segunda de las dos líneas de trabajo mencionadas, Aeroservoelasticidad, cuya misión es estudiar la interacción entre el aire, las turbinas, la estructura portante, y los mecanismos de control. En este artículo se describen técnicas que permiten llevar a cabo simulaciones numéricas de la cinemática de un aerogenerador típico. La descripción precisa de la cinemática es de vital importancia para la futura implementación numérica de los modelos aerodinámicos propuestos en el proyecto PICT'99. Los modelos aerodinámicos que se utilizarán para predecir las cargas, debidas al flujo de aire sobre el rotor y la estructura portante, están basados en dos conocidas técnicas de la dinámica de fluidos:

1. En los casos donde no existe separación, se empleará el método conocido como “*unsteady vortex-lattice*” (generalización de “*vortex-lattice method*”, ampliamente utilizado para el cálculo de flujos incompresibles y estacionarios).
2. En los casos de flujos con separación, las cargas aerodinámicas serán calculadas mediante la implementación de una técnica atribuida a A. J. Chorin y conocida como “*random walk*”.

Ambas técnicas tienen en cuenta las no-linealidades aerodinámicas asociadas con ángulos de ataque, deformaciones estáticas, flujos dominados por vorticidad, comportamiento no estacionario, y permiten incluir los efectos de interferencia aerodinámica entre los diversos componentes del sistema dinámico. Es decir, se incluyen las interferencias palas-palas, palas-estelas y estelas-estelas. Para implementar computacionalmente estas dos técnicas es necesario aplicar en cada instante de tiempo la condición de frontera comúnmente llamada *condición de no-penetración* (el fluido no puede penetrar al conjunto de sólidos inmersos en él). Matemáticamente, se traduce en hacer cero la componente normal de la velocidad relativa entre una partícula de fluido y la de las paredes que definen las fronteras de los cuerpos sólidos. Para poder aplicar esta condición de frontera es imprescindible conocer con exactitud la historia en el tiempo de la forma, posición y velocidad de cada uno de los sólidos sumergidos en la corriente de aire.

CINEMÁTICA DEL AEROGENERADOR

1.1. Geometría de un Aerogenerador

La herramienta discutida en el presente artículo fue desarrollada con el fin de llevar a cabo simulaciones numéricas de la cinemática de aerogeneradores de tres palas. El aerogenerador se considera formado por un conjunto de sólidos rígidos. Cada uno de estos sólidos sirve para modelar la estructura portante, la barquilla, el cono y cubo, y las tres palas, que, junto con el cono y el cubo forman la hélice.

1.2. Sistemas de Referencia

Con la finalidad de facilitar la descripción geométrica y la historia del movimiento de cada uno de los componentes, un sistema de referencia convenientemente elegido es asociado a cada una de las partes. Estos sistemas de referencia se describen a continuación:

Sistemas de Referencia Principales:

1. *Sistema N*: sistema Newtoniano, fijo a la tierra y considerado como sistema inercial.
2. *Sistema B*: sistema vinculado a la barquilla.
3. *Sistema A*: sistema vinculado al cono y cubo de la hélice.
4. *Sistema C*: sistema vinculado a la pala 1.
5. *Sistema D*: sistema vinculado a la pala 2.
6. *Sistema E*: sistema vinculado a la pala 3.

Sistemas de Referencia Auxiliares

7. *Sistema B'*: sistema vinculado a la barquilla.
8. *Sistema A'*: sistema vinculado al cono y cubo.
9. *Sistema A''*: sistema vinculado al cono y cubo.

Cada uno de estos sistemas tiene asociada una base de vectores unitarios y destrógiros. En la *Figura 1* se ilustran algunos de los sistemas de referencia citados.

Relación entre los sistemas de referencia

Para llevar a cabo simulaciones numéricas que permiten la visualización y el análisis de la cinemática de aerogeneradores, y para realizar simulaciones aerodinámicas y aeroelásticas es necesario expresar, con respecto a un sistema inercial o fijo a la tierra, las coordenadas, la velocidad y la aceleración de cada punto material. El sistema de referencia *N*, mencionado, se asumirá como tal sistema inercial y será referenciado como el sistema global.

Por otro lado, para facilitar la descripción de la geometría, los campos de velocidades y de aceleraciones asociados con cada una de las partes componentes, conviene definir sistemas de referencia locales. Cada uno de estos sistemas locales está asociado a una parte componente del aerogenerador. Es decir, hay un sistema de referencia local para la torre, otro para el cono, otro para la pala 1, etc.

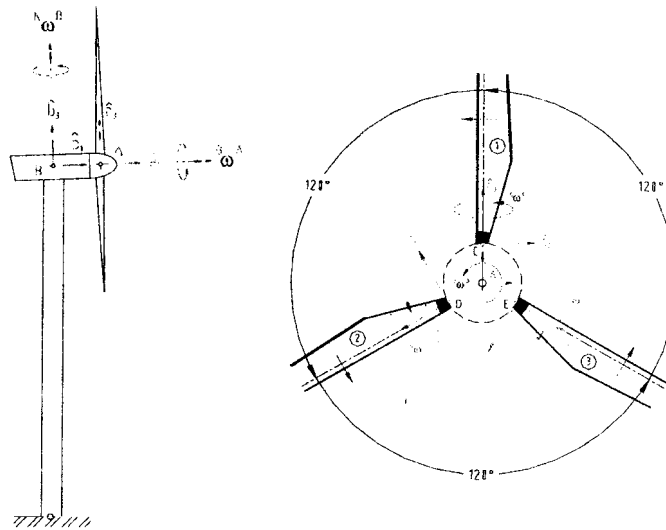


Figura 1: Sistemas de Referencia asociados a la torre, la barquilla, al cono-cubo y a las palas.

Con el fin de compatibilizar las descripciones realizadas en cada uno de los sistemas locales con una única descripción realizada en el sistema de referencia global, deben definirse respectivas relaciones que permitan la interconexión entre los sistemas locales antes mencionados y entre los sistemas locales y el sistema global.

A continuación se describen las transformaciones que se necesitan llevar a cabo con el fin de relacionar cada uno de los sistemas de referencia local con el sistema de referencia global:

1. Para relacionar los Sistemas de Referencia N y B , se efectúa la siguiente composición de transformaciones: $B \rightarrow B' \rightarrow N$
2. Para relacionar los Sistemas de Referencia N y A , se efectúa la siguiente composición de transformaciones: $A \rightarrow B \rightarrow N$
3. Para relacionar los Sistemas de Referencia N y C , se efectúa la siguiente composición de transformaciones: $C \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow N$
4. Para relacionar los Sistemas de Referencia N y D , se efectúa la siguiente composición de transformaciones: $D \rightarrow A' \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow N$
5. Para relacionar los Sistemas de Referencia N y E , se efectúa la siguiente composición de transformaciones: $E \rightarrow A'' \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow N$

Como ejemplo ilustrativo, se desarrolla en detalle el procedimiento necesario para relacionar los sistemas de referencia N y D (Caso 4).

La matriz de rotación que relaciona los sistemas de referencia N y D resulta de la composición de las rotaciones que se muestran a continuación:

- Primero se realiza una *3-rotación* de magnitud μ_2 alrededor de un eje a lo largo del vector unitario \hat{a}'_3 . Esta rotación se denominará $R_3(\mu_2)$. La forma explícita de ésta es,

$$\{\hat{d}\} = [R_3(\mu_2)]\{\hat{a}'\} \Rightarrow \begin{cases} \hat{d}_1 \\ \hat{d}_2 \\ \hat{d}_3 \end{cases} = \begin{bmatrix} \cos \mu_2 & \text{sen } \mu_2 & 0 \\ -\text{sen } \mu_2 & \cos \mu_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{cases} \hat{a}'_1 \\ \hat{a}'_2 \\ \hat{a}'_3 \end{cases} \quad (1)$$

- En segundo lugar, realiza una *1-rotación* de magnitud $2/3\pi$ alrededor de un eje a lo largo del vector unitario \hat{a}'_1 . Esta rotación se denominará $R_1(2/3\pi)$. La forma explícita de ésta es,

$$\{\hat{a}'\} = [R_1(2/3\pi)]\{\hat{a}\} \quad (2)$$

Para obtener la relación entre los vectores $\{\hat{d}\}$ y $\{\hat{a}\}$ se componen las dos rotaciones mostradas anteriormente. Reemplazando la expresión para $\{\hat{a}'\}$ dada por la ecuación (2), en la ecuación (1), se obtiene,

$$\{\hat{d}\} = [R_3(\mu_2)][R_1(2/3\pi)]\{\hat{a}\} \quad (3)$$

Denominando $[T_{DA}]$ al producto de matrices de rotación $[R_3(\mu_2)]$ y $[R_1(2/3\pi)]$, la ecuación anterior puede escribirse como se indica a continuación,

$$\{\hat{d}\} = [T_{DA}]\{\hat{a}\} \quad (4)$$

- En tercer lugar, se realiza una *1-rotación* de magnitud θ alrededor de un eje a lo largo del vector unitario \hat{b}'_1 . Esta rotación se denominará $R_1(\theta)$. La forma explícita de ésta es,

$$\{\hat{a}\} = [R_1(\theta)]\{\hat{b}\} \quad (5)$$

Denominando $[T_{AB}]$ a la matriz que “realiza” la rotación $R_1(\theta)$, la ecuación anterior puede escribirse como se indica a continuación,

$$\{\hat{a}\} = [T_{AB}]\{\hat{b}\} \quad (6)$$

Reemplazando la ecuación anterior en la expresión de $\{\hat{d}\}$ dada por la ecuación (4), se obtiene la siguiente relación entre el conjunto de vectores unitarios $\{\hat{b}\}$ y $\{\hat{d}\}$,

$$\{\hat{d}\} = [T_{DA}][T_{AB}]\{\hat{b}\} = [T_{DB}]\{\hat{b}\} \quad (7)$$

- En cuarto lugar, se realiza una *2-rotación* de magnitud $-\alpha$ alrededor de un eje a lo largo del vector unitario \hat{b}'_2 . Esta rotación se denominará $R_2(-\alpha)$. La forma explícita de ésta es,

$$\{\hat{b}\} = [R_2(-\alpha)]\{\hat{b}'\} \quad (8)$$

- Finalmente, se realiza una *3-rotación* de magnitud β alrededor de un eje a lo largo del vector unitario \hat{n}_3 . Esta rotación se denominará $R_3(\beta)$. La forma explícita de ésta es,

$$\{\hat{b}'\} = [R_3(\beta)]\{\hat{n}\} \quad (9)$$

Para obtener la relación entre los vectores $\{\hat{b}\}$ y $\{\hat{n}\}$ se componen las rotaciones $R_2(-\alpha)$ y $R_3(\beta)$,

$$\{\hat{b}\} = [R_2(-\alpha)][R_3(\beta)]\{\hat{n}\} = [T_{BN}]\{\hat{n}\} \quad (10)$$

Reemplazando esta última ecuación en la expresión para $\{\hat{a}\}$ dada por la ecuación (7), se obtiene la siguiente relación entre el conjunto de vectores unitarios $\{\hat{a}\}$ y $\{\hat{n}\}$,

$$\{\hat{a}\} = [T_{DB}][T_{BN}]\{\hat{n}\} \quad \{\hat{a}\} = [T_{DN}]\{\hat{n}\} \quad (11)$$

La matriz $[T_{DN}]$ puede pensarse como una matriz de rotación que “lee” $\{\hat{n}\}$ y “devuelve” $\{\hat{a}\}$.

Consideremos a continuación un punto material arbitrario P con coordenadas (P_1^D, P_2^D, P_3^D) en el sistema de referencia D y con coordenadas (P_1^N, P_2^N, P_3^N) en el sistema de referencia N . Sean $(0,0,H)$ las coordenadas del origen del sistema de referencia B expresadas en el sistema de referencia N , donde H representa la altura de la torre. Sean $(R_{BA},0,0)$ las coordenadas del origen del sistema A expresadas en el sistema de referencia B , donde R_{BA} representa la distancia entre los orígenes de los sistemas A y B . Finalmente, sean $(0,0,R_{AD})$ las coordenadas del origen del sistema D expresadas en el sistema A , donde R_{AD} representa la distancia entre los orígenes de los sistemas D y A , llevando a cabo la sucesión de transformaciones descritas, se obtiene la siguiente relación entre las coordenadas (P_1^D, P_2^D, P_3^D) y (P_1^N, P_2^N, P_3^N) del punto material P :

$$\begin{Bmatrix} P_1^N \\ P_2^N \\ P_3^N \end{Bmatrix} = [T_{ND}] \begin{Bmatrix} P_1^D \\ P_2^D \\ P_3^D \end{Bmatrix} + [T_{NA}] \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ R_{AD} \end{Bmatrix} + [T_{NB}] \begin{Bmatrix} R_{BA} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ H \end{Bmatrix} \quad (12)$$

1.3. Desarrollo del Simulador mediante el uso de Mechanical Desktop®, Tecplot®, y MATLAB®

Las simulaciones cinemáticas del aerogenerador se visualizan mediante el uso de Tecplot®. Para utilizar este programa se necesita generar un conjunto de mallas que representen las superficies de los diversos componentes del aerogenerador. Cada malla está definida por un conjunto de nodos y conectividades que deben ingresarse al programa mediante una estructura de datos perfectamente predefinida. Esta estructura de datos debe codificarse en un archivo con formato ASCII en el que se especifican, entre otros, el número de nodos y de elementos, las coordenadas de cada nodo, y las conectividades correspondientes a cada uno de los elementos que forman la malla. Esta estructura de datos define, en el “dominio computacional”, la configuración del aerogenerador en un instante de tiempo arbitrario que se define como “el tiempo cero”. Una vez obtenida esta configuración, la que se considera como configuración inicial o de referencia, y mediante el uso de las transformaciones descritas anteriormente puede obtenerse la descripción en el tiempo de la configuración o, en el caso necesario, el estado (configuración y campo de velocidades) del aerogenerador. A continuación, se describen cada una de estas etapas:

Uso de Mechanical Desktop®: Como primer paso, se divide el conjunto (aerogenerador) en una serie de subconjuntos distintos. Estos son: subconjunto torre, subconjunto barquilla, subconjunto cono y subconjunto pala-1. A continuación, se modela cada subconjunto mediante el uso de Mechanical Desktop®. Las superficies que definen cada subconjunto, o parte componente del aerogenerador, se representan mediante mallas formadas por elementos cuadrados. El número de elementos que componen cada malla es arbitrario y depende del grado de detalle que se desea modelar. Un modelo típico es mostrado en la Figura 2.

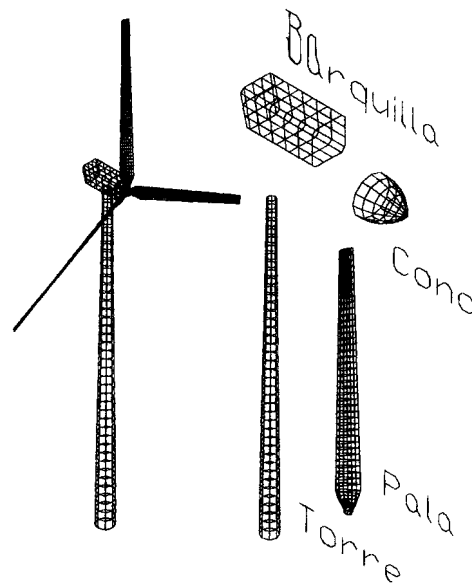


Figura 2: Mallas representativas del conjunto completo y subconjuntos componentes.

Cada uno de los subconjuntos debe ser dibujado en su sistema de referencia local; es decir, la torre se describe en el sistema de referencia N , la barquilla en el sistema de referencia B , el cono en el sistema de referencia A y la pala-1 en el sistema de referencia C .

Interface Mechanical Desktop®-Tecplot®: Para transformar el modelo geométrico de cada uno de los subconjuntos, generado por Mechanical Desktop® en una estructura de datos susceptible de ser procesable mediante Tecplot®, se desarrolló una interface entre los dos programas. Esta interface se codificó utilizando Matlab®. La misma "lee" las coordenadas y conectividades de los elementos que forman las mallas de cada subconjunto de un archivo con formato ".dxf", generado por Mechanical Desktop®, además son necesarias las distancias entre los orígenes de los sistemas de referencia en que se dibujaron los distintos componentes, y "entrega" un archivo ASCII con el formato requerido por Tecplot®.

Desarrollo de Simulaciones usando MATLAB®: Para reproducir el movimiento del aerogenerador deben conocerse: la geometría que define el estado de referencia y las historias en el tiempo de cada uno de los ángulos que aparecen como argumentos en las transformaciones ya descritas. Un código escrito en MATLAB® permite, dados los datos antes mencionados, obtener la configuración y/o el estado del aerogenerador en cada instante de tiempo. La evolución en el tiempo de cada uno de los ángulos puede introducirse al código, en forma analítica o bien en forma de una tabla resultado de mediciones realizadas en un aerogenerador real.

RESULTADOS

Utilizando la herramienta descrita anteriormente se realizaron simulaciones numéricas que permiten visualizar el movimiento de cada componente del generador eólico. A continuación se muestran resultados de algunas simulaciones típicas. En los mismos se hace especial énfasis en las distintas posiciones que ocupan los subconjuntos a medida que transcurre el tiempo.

Movimiento de Rotación de las Palas

La historia en el tiempo del movimiento de rotación de las palas queda unívocamente determinada si se conoce la variación en el tiempo del ángulo θ . En la Figura 3 se muestran resultados de una simulación numérica típica.

Movimiento de "Guiñada"

En los aerogeneradores, el movimiento de guiñada está asociado a los cambios de dirección del viento incidente. En las simulaciones numéricas, este movimiento está unívocamente determinado si se conoce la evolución en el tiempo del ángulo β . En la *Figura 4* se muestran resultados de una simulación numérica típica.

Movimiento de Cambio de Paso de las Palas

Con el fin de optimizar la extracción de energía del flujo de aire, o bien, con el fin de evitar velocidades de rotación de las palas que pongan en peligro su integridad estructural. Algunos modelos de aerogeneradores medianos y grandes tienen implementado sistemas de control que permiten modificar el ángulo de ataque de las palas. Este ajuste del ángulo de ataque es comúnmente denominado "cambio o variación de paso". En las simulaciones numéricas, el movimiento asociado al cambio de paso de las palas queda unívocamente determinado por la variación en el tiempo de los ángulos μ_1 , μ_2 y μ_3 . Cada uno de estos ángulos está asociado con el paso de una pala en particular, esto es, μ_1 asociado con la pala-1, μ_2 con la pala-2 y μ_3 con la pala-3, respectivamente. En la *Figura 5* se muestran resultados de una simulación numérica típica.

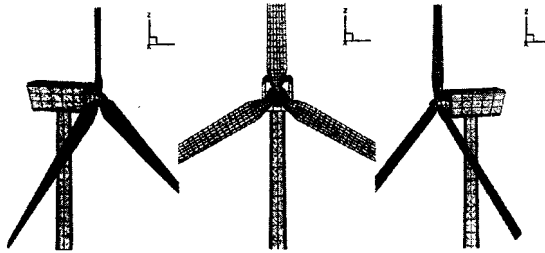


Figura 3: Visualización de los resultados de una simulación del movimiento de rotación de las palas.

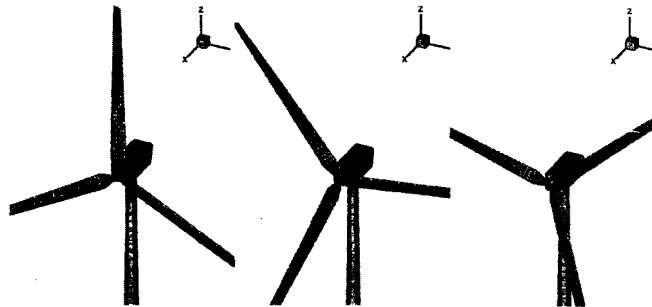


Figura 4: Visualización de los resultados de una simulación del movimiento de guiñada.

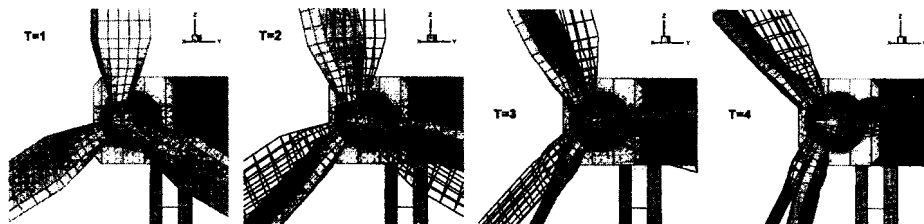


Figura 5: Visualización de los resultados de una simulación del movimiento de cambio de paso de las palas.

Composición de Movimientos

En la Figura 6 se muestran los resultados de una simulación numérica en la que se incluyen variaciones en el tiempo de todos los ángulos anteriormente citados.

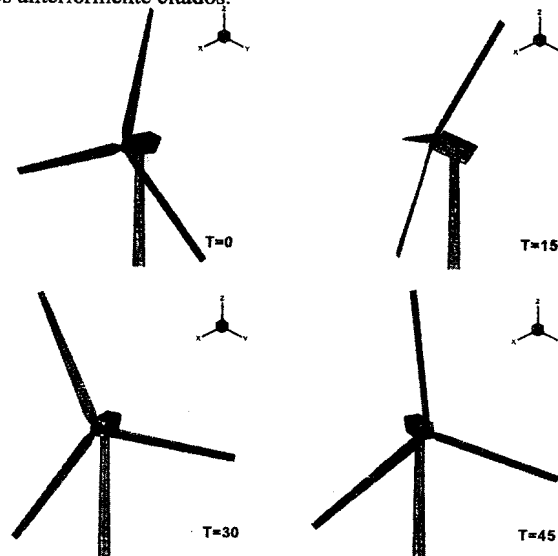


Figura 6: Visualización de los resultados de una simulación que incluye movimientos de rotación de las palas, de guiñada y de cambio de paso.

CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado una herramienta que permite realizar simulaciones numéricas de la cinemática de generadores eólicos. La herramienta ha sido desarrollada mediante el uso de "software" comúnmente encontrado en nuestro medio. Esta herramienta es lo suficientemente general como para posibilitar el análisis de todos los movimientos posibles de un aerogenerador conformado de partes móviles no flexibles. Por otro lado, esta herramienta es utilizada como parte de un programa más general, desarrollado en la Universidad Nacional de Río Cuarto, que permite realizar análisis aerodinámico y aeroelástico de aerogeneradores.

REFERENCIAS

- [1] H.Baruh, *Analytical Dynamics*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1999.
- [2] L.Meirovitch, *Methods of Analytical Dynamics*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1970.
- [3] H. Lo, *A Non-Linear Problem in the Bending Vibration of a Rotating Beam*, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 19, pp.461, 1946.
- [4] M.J.Schilhansl, *Bending Frequency of a Rotating Cantilever Beam*, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 24, pp.28, 1958.
- [5] R.M.Laurenson, *Modal Analysis of Rotating Flexibles Structures*, *AIAA Journal*, 14, 10, pp.1444-1450, 1976.
- [6] L.Meirovitch, *Principles and Techniques of Vibrations*, Prentice Hall, Inc, New Jersey, 1997.
- [7] J.S.Rao and W.Carnegie, *Non-Linear Vibration of Rotating Cantilever Blades Treated by the Ritz Averaging Process*, *The Aeronautical Journal*, September, pp. 566-569, 1972.
- [8] L.Meirovitch, *Introduction to Dynamics and Control*, John Wiley & Sons, New York, 1985.
- [9] L.Meirovitch, *Dynamics and Control of Structures*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1990.