

PREDICCIONES DEL COMPORTAMIENTO AEROELÁSTICO NO-ESTACIONARIO Y NO-LINEAL DE GRANDES AEROGENERADORES DE EJE HORIZONTAL

Mauro S. Maza^{a,b,c}, Fernando G. Flores^{a,b} y Sergio Preidikman^{a,b}

^aCONICET - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

^bDepartamento de Estructuras, F. de C. E. F. y N., Univ. Nac. de Córdoba, Casilla de Correo 916, 5000 Córdoba, Argentina.

^cFacultad de Ingeniería, Univ. Nac. de Río Cuarto, Ruta Nacional 36 Km 601, 5800 Río Cuarto, Argentina.

Palabras Clave: Aeroelasticidad computacional, Aeroelasticidad no-lineal, Aeroelasticidad inestacionaria, Interacción fluido-estructura.

Resumen. En este trabajo se analizan las capacidades y limitaciones del análisis numérico del comportamiento aeroelástico no-estacionario y no-lineal de grandes turbinas eólicas de eje horizontal utilizando un esquema particionado de interacción débil. El problema de interacción fluido-estructura se aborda a través de la combinación del método de red de vórtices no-estacionario y no-lineal (NLUVLM) y del método de elementos finitos (FEM).

El NLUVLM es capaz de incluir varios cuerpos, captando la interferencia aerodinámica entre ellos, permite analizar movimientos con grandes deformaciones y grandes ángulos de ataque y no está limitado a movimientos periódicos de pequeñas amplitudes o de una sola frecuencia. Como solo son discretizadas las superficies de los sólidos inmersos en el fluido y las estelas, el NLUVLM permite realizar análisis de gran generalidad con un costo computacional moderado.

El modelo estructural es un sistema multicuerpo formado por elementos finitos de vigas con deformaciones finitas y cuerpos rígidos. Se utiliza un modelo de material anisótropo, viscoelástico, lineal. Esto permite incluir efectos de acople entre los diferentes comportamientos característicos de la viga (tracción/compresión, corte, flexión y torsión), habitualmente presentes en construcciones realizadas en materiales compuestos.

El esquema de interacción fue desarrollado específicamente para combinar los modelos citados. Se demuestra que el proceso de interacción conserva la energía total del sistema y las cantidades de movimiento lineal y angular. La integración en el tiempo se realiza con un esquema numérico explícito, lo cual provee un método para analizar comportamientos subcríticos, como así también críticos y supercríticos exclusivos de la dinámica no-lineal.

1. INTRODUCCIÓN

El tamaño de las turbinas eólicas de eje horizontal se ha incrementado dramáticamente en los últimos veinticinco años. Han evolucionado desde rotores de 15 m de diámetro y potencia nominal de 0,05 MW hasta las grandes turbinas eólicas de eje horizontal (LHAWT, del inglés Large Horizontal Axis Wind Turbine) comercialmente disponibles en la actualidad, con rotores de más de 120 m de diámetro y potencia nominal de aproximadamente 7,5 MW ([ENERCON Web Site, 2013](#)). Se espera que esta tendencia continúe hasta alcanzar turbinas con potencias instaladas del orden de entre 10 MW y 20 MW, lo que permitiría, por ejemplo, cubrir el 20 % de la demanda energética europea para 2020 y el 33 % para 2030 ([UpWind Project, 2011](#)).

La *teoría elemental de la cantidad de movimiento*, desarrollada por Betz entre 1922 y 1925, indica que la potencia máxima extraíble de una corriente de aire por un LHAWT aumenta con el cuadrado de la longitud de las palas ([Hau, 2005](#)). Por este motivo, la tendencia a nivel mundial es desarrollar aerogeneradores con palas cada vez más largas. Diseños con palas de gran alargamiento y esbeltez, altamente flexibles y construidas con materiales compuestos han obligado a modificar sustancialmente las técnicas de análisis. Es necesario utilizar métodos que permitan captar las características inestacionarias y las no linealidades típicas de estos fenómenos, representando relaciones constitutivas complejas, modelos de amortiguamiento estructural adecuado, problemas acoplados (multifísica), etc..

La precisión en la predicción de las cargas y la optimización del diseño que permita maximizar la extracción de energía son puntos cruciales para lograr una industria de aerogeneradores que sea competitiva económicamente con respecto a otras fuentes de energía. El conjunto de campos de la ingeniería mínimo necesario para realizar un análisis de este tipo incluye la dinámica estructural y la mecánica de los fluidos, conduciendo al estudio de fenómenos aeroelásticos (interacción fluido-estructura). El paso inmediatamente posterior es la inclusión de estrategias de control.

En la siguiente sección se describen: el modelo que permite determinar las cargas sobre la estructura, el modelo que permite predecir la respuesta de la estructura y el esquema que interrelaciona ambos. Luego se presenta la estrategia de simulación y se evalúan los resultados obtenidos. En la sección 4 se analiza la idoneidad del NLUVLM para el estudio del comportamiento aerodinámico de LHAWTs. Finalmente se resumen algunas conclusiones.

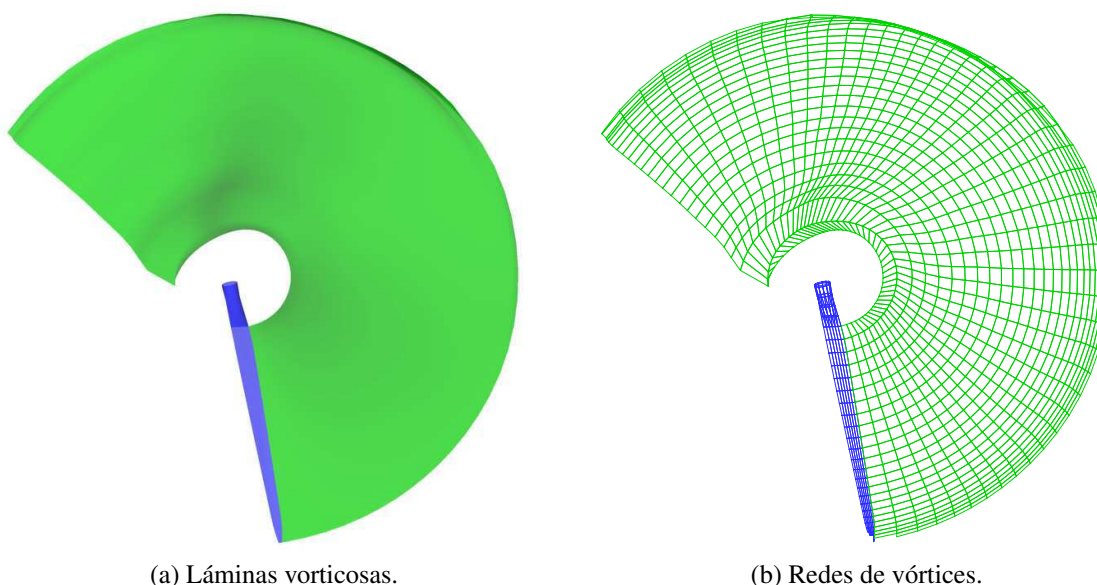
2. ABORDAJE DEL PROBLEMA AEROELÁSTICO

La principal dificultad en el campo de la aeroelasticidad computacional radica en que las acciones aerodinámicas sobre un cuerpo dependen de la forma, velocidad, y aceleración del mismo, mientras que estas tres dependen de las cargas aerodinámicas que el fluido ejerce sobre él. Muchos autores creen que el enfoque apropiado es el de plantear un esquema particionado ([Allen y Rendall, 2007](#); [Cebal y Löhner, 1997](#); [Chen y Jadic, 1998](#); [Farhat et al., 1998](#)).

En el esquema particionado, el fenómeno completo se divide en subproblemas de naturaleza diferente. Cada subproblema es abordado con el método de solución que mejor se adapte a él. Un método/esquema de interacción permite acoplar nuevamente los submodelos, reconstruyendo así el fenómeno original.

2.1. Modelo aerodinámico

El modelo aerodinámico permite determinar las cargas que el aire ejerce sobre las palas de la turbina, lo cual produce el movimiento rotacional de estas y constituye el mecanismo por el cual la energía mecánica del viento es transferida al aerogenerador. En este trabajo se utili-



(a) Láminas vorticosas.

(b) Redes de vórtices.

Figura 1: Representación de una pala y su estela en el NLUVLM.

za el método de red de vórtices inestacionario y no lineal (NLUVLM) (Preidikman, 1998). El NLUVLM posee un excelente balance entre generalidad y costo computacional. En particular se utiliza la implementación realizada específicamente para turbinas eólicas de eje horizontal, LHAWT/AC (Gebhardt, 2012). En el NLUVLM se considera flujo incompresible a alto número de Reynolds. Esto permite restringir toda la vorticidad a una zona pequeña del dominio compuesta por las capas límites y las estelas, mientras que se asume al resto del fluido como irrotacional.

Como una simplificación, se trata a la capa límite y a la estela como láminas o sábanas vorticosas. La capa límite es representada por una lámina vorticiosa adherida en todo momento a la superficie del cuerpo, moviéndose con este. Su posición está determinada por los desplazamientos y deformaciones de la estructura, por lo que representa un dato de entrada para el problema aerodinámico. Las estelas son representadas por láminas vorticosas libres y su posición no es especificada a priori. Las estelas son convectadas desde los bordes de fuga de los cuerpos a la velocidad local de las partículas de fluido, tomando posiciones de modo que no actúen fuerzas resultantes sobre las mismas. Los dos tipos de láminas vorticosas se unen en los bordes desde donde es convectada la estela. En la Figura 1a se observa la representación de una pala y la estela correspondiente.

Estas sábanas vorticosas son discretizadas, convirtiéndose en grillas aerodinámicas (GA) compuestas de segmentos vorticosos rectos de circulación Γ constante a lo largo de su longitud. En la Figura 1b se aprecia la discretización de las láminas vorticosas de la Figura 1a. Cada vórtice posee un campo de velocidades de perturbación asociado, que se obtiene a partir de la ley de Biot-Savart

$$\mathbf{v}(\mathbf{x}) = \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{\mathbf{L} \times \mathbf{r}_1}{\|\mathbf{L} \times \mathbf{r}_1\|^2} [\mathbf{L} \cdot (\hat{\mathbf{e}}_1 - \hat{\mathbf{e}}_2)] \quad (1)$$

donde

- Γ es la circulación alrededor de la línea vorticiosa;

- \mathbf{L} es el vector que representa al segmento vorticoso;
- \mathbf{r}_1 y \mathbf{r}_2 son vectores posición relativa del punto donde está siendo evaluada la velocidad, respecto de los nodos inicial y final del segmento vorticoso respectivamente; y
- $\hat{\mathbf{e}}_1$ y $\hat{\mathbf{e}}_2$ son versores unitarios con la dirección y el sentido de \mathbf{r}_1 y \mathbf{r}_2 respectivamente.

En la Figura 2 se indican todas las variables que intervienen en la ec. (1). En ella, P es el punto del espacio con posición \mathbf{x} , donde la velocidad está siendo evaluada. El campo de movimiento total se calcula como la suma de los correspondientes a todos los vórtices de la GA más la velocidad del flujo sin perturbar \mathbf{v}_∞ .

Las condiciones de borde del NLUVLM son dos: la condición de no penetración y la de regularidad en el infinito. La primera permite determinar la vorticidad de cada segmento. La segunda es cumplida implícitamente por la ec. (1).

LHAWT/AC soporta diferentes direcciones y velocidades de viento y simula el efecto de capa límite terrestre utilizando un perfil de velocidad según normas CIRSOC 102 (para terrenos con rugosidad tipo I).

2.2. Modelo estructural

El modelo estructural es el encargado de predecir la respuesta dinámica de la turbina a las cargas aerodinámicas es decir, la posición, la velocidad y la aceleración de las diferentes partes de la máquina a lo largo del tiempo. El modelo utilizado consta de un conjunto de elementos finitos de vigas, cuerpos rígidos y restricciones cinemáticas. Para ello se utiliza el código de propósito general Simpack (Flores, 2011) con integración explícita de las ecuaciones de movimiento.

Las propiedades mecánicas de las partes que componen la turbina tienen un papel importante en la definición de la malla estructural (ME): la góndola y el cubo se consideran como cuerpos rígidos, mientras que la torre y las palas se modelan como vigas. El centro de masas (CM) de la góndola se corresponde con el extremo superior de la torre y se conecta con el CM del cubo mediante una restricción que permite el giro del rotor. Las raíces de las palas se conectan al CM del cubo por medio de vínculos rígidos que no permiten desplazamientos ni giros relativos.

La extracción de energía del generador eléctrico se simula utilizando amortiguamiento viscoso en el giro del rotor. Esto produce disipación de energía proporcional a la velocidad de

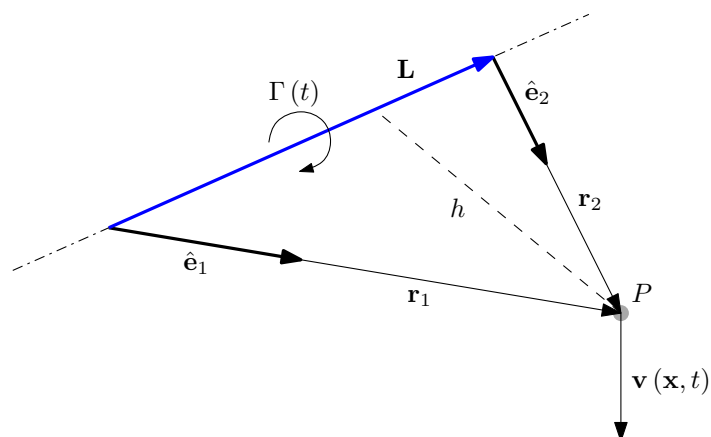


Figura 2: Variables que intervienen en la ley de Biot-Savart, ec. (1).

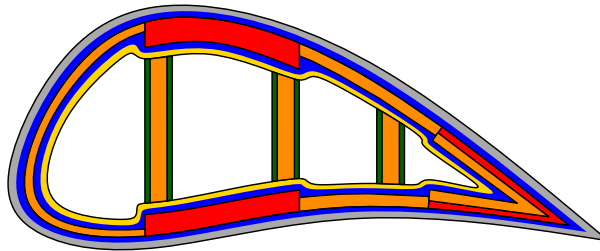


Figura 3: Esquema de laminación de una pala de aerogenerador.

giro. Se incluyen además las fuerzas gravitatorias, las cuales tienen carácter esencial y deben ser consideradas si se desea obtener resultados representativos de la realidad.

Actualmente, las palas de LHAWTs se construyen utilizando materiales compuestos reforzados con fibras. En la Figura 3 se observa el esquema de una sección típica de una pala de material compuesto. Cada color corresponde a un material diferente, con propiedades mecánicas y másicas que son, en general, muy disímiles.

El modelado de las palas como vigas equivalentes requiere reconocer que existen fenómenos de acoplamiento asociados no sólo al tipo de laminados utilizados, sino también a la sección de la pala y a la distribución de laminados en ella. Las características mecánicas de la viga equivalente deben calcularse como *rigideces* asociadas a cada esfuerzo (tracción/compresión, corte en dos direcciones, torsión y flexión en dos direcciones) y a los posibles acoplamientos entre ellos. En este trabajo se utilizó PreComp (Bir, 2005) para el cálculo de las rigideces mencionadas.

2.3. Método de interacción

La interacción entre el modelo aerodinámico y el estructural/dinámico se realiza al nivel de las condiciones de contorno, transfiriendo información entre la GA y la ME. Por un lado se utilizan los desplazamientos y velocidades calculados con el código estructural para actualizar las posiciones y velocidades de los nodos de la GA. La transferencia en el sentido inverso corresponde al cálculo de un *sistema de cargas equivalente* que actúe sobre la ME, obtenido a partir de las fuerzas que provee el NLUVLM.

El método consta de una etapa inicial en la que se determina, para cada nodo en la GA, n_a , un nodo estructural maestro, n_m . Además se calcula la posición relativa entre estos nodos, \mathbf{r} , la cual se mantendrá fija a lo largo de toda la simulación. Este procedimiento es similar al método de seguimiento de superficies (surface tracking) utilizado por Cebal y Löhner (1997). La relación que vincula las posiciones de ambos nodos es

$$\mathbf{x}_a(t) = \mathbf{x}_m(t) + \mathbf{r}(t) . \quad (2)$$

Derivando la expresión anterior respecto al tiempo se obtiene la relación que vincula las velocidades como

$$\mathbf{v}_a(t) = \mathbf{v}_m(t) + \boldsymbol{\omega}_m(t) \times \mathbf{r}_m(t) \quad (3)$$

siendo $\boldsymbol{\omega}_m(t)$ el vector velocidad angular del nodo estructural maestro.

Para determinar la relación entre las cargas se impone que el trabajo virtual realizado por el sistema de cargas sobre la GA sea igual al realizado por las cargas sobre la ME. De esta manera se asegura que el método no modifique artificialmente la cantidad de energía total del sistema. En este caso se obtienen dos relaciones, a saber

$$\mathbf{f}_m = \mathbf{f}_a , \quad \mathbf{m}_m = \mathbf{r}_m \times \mathbf{f}_a . \quad (4)$$

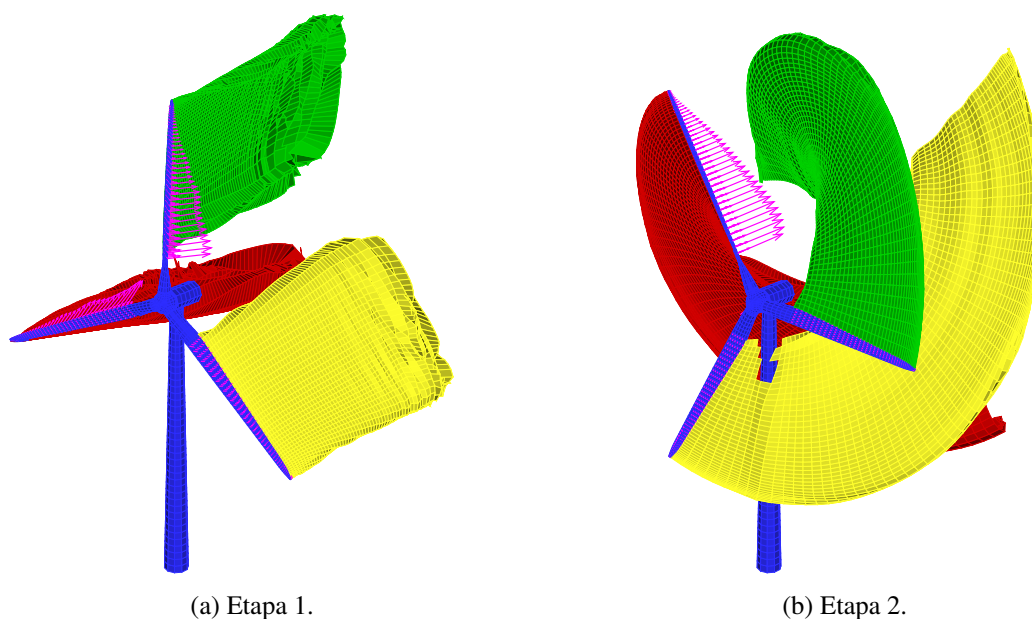


Figura 4: Grillas aerodinámicas en diferentes instantes del caso de estudio.

Es decir, una fuerza aplicada en n_a es equivalente a aplicar sobre n_m una fuerza igual y un momento que resulta de la traslación de la fuerza original.

Puede demostrarse además que el método conserva las cantidades de movimiento lineal y angular del sistema. Para más detalles pueden consultarse trabajos anteriores (Maza et al., 2010; Maza et al., 2012).

3. RESULTADOS

Los resultados presentados a continuación se obtuvieron utilizando el modelo de palas *SNL100-00* (Griffith y Ashwill, 2011). Se trata de palas de 100 m de longitud construidas enteramente en materiales compuestos.

3.1. Respuesta a un arranque impulsivo

A continuación se presentan resultados correspondientes a un caso de estudio, los cuales son representativos del comportamiento de la turbina dentro del régimen de operación previsto según Griffith y Ashwill (2011). El mismo se desarrolla en dos etapas:

- Etapa 1: se impide la rotación del rotor durante 10 s;
- Etapa 2: se libera el giro del rotor y se continúa la simulación hasta una duración total de 200 s.

Para todo instante $t < 0$, tanto las cargas por gravedad como la velocidad del viento son nulas. Al comienzo de la simulación, estas se activan con una función escalón, lo cual produce una respuesta dinámica que interfiere en el análisis que se desea realizar. Durante la primera etapa la estructura alcanza una posición de equilibrio estático y la estela se desarrolla hasta su longitud definitiva.

En las Figuras 4a y 4b se observan las grillas aerodinámicas en ambas etapas de las simulaciones: las grillas adheridas en azul y las grillas libres (estelas) en verde, amarillo y rojo. La

Figura 4a corresponde a la Etapa 1; en ella se aprecian los *vórtices de arranque* en los extremos posteriores de las estelas. En la Figura 4b se observan estelas helicoidales hacia el final de la Etapa 2, producto de la combinación de la velocidad del viento y la rotación de las palas. Se aprecia también el inicio de la ruptura de la estela amarilla, causada por su impacto con la torre. Los vectores color magenta representan las fuerzas aerodinámicas aplicadas sobre los paneles de las superficies sustentadoras.

La velocidad del viento es la nominal prevista para esta turbina, de $11,3 \text{ m/s}$, y no posee inclinación lateral respecto al eje de rotación del rotor. El coeficiente de amortiguamiento viscoso para la rotación del rotor es $c = 1 \times 10^7 \text{ kg m}^2/\text{rad s}$.

En la Figura 5 se observa la evolución temporal de variables asociadas a las palas y el cubo a lo largo de toda la simulación. El gráfico superior corresponde a la velocidad de giro del rotor (conjunto cubo+palas), la cual es nula durante los primeros 10 s y luego comienza a aumentar hasta alcanzar un valor medio constante $\omega_{eq} = 0,555 \text{ rad/s}$, con fluctuaciones cuya amplitud es menor al $0,2 \%$. Esta es la velocidad de régimen o equilibrio y su valor depende de varios factores, principalmente del ángulo de paso de las palas, de la velocidad de la corriente libre y de la extracción de energía en el generador. En la zona de régimen, el rotor tarda aproximadamente $11,31 \text{ s}$ en dar una vuelta.

En segundo lugar se observa la evolución del módulo de las cargas aerodinámicas totales actuando sobre las palas, F_1 , F_2 y F_3 . El modelo aerodinámico provee un conjunto de fuerzas, \mathbf{F}_i^j , aplicadas sobre las superficies sustentadoras de las palas. La resultante aerodinámica actuando sobre la pala i se calcula como $\mathbf{F}_i = \sum_{j=1}^{NP_{ss}} \mathbf{F}_i^j$, siendo NP_{ss} la cantidad de paneles correspondientes a cada superficie sustentadora.

El comportamiento de estas cargas en la Etapa 1 se caracteriza por un pico inicial (marcado con círculos sobre el eje de ordenadas), seguido por un descenso brusco y una serie de fluctuaciones que disminuyen en amplitud hasta alcanzar un valor de equilibrio. El alto valor inicial se debe a que se utiliza un arranque impulsivo, esto es, la velocidad del viento se describe como una función escalón, pasando de 0 m/s a $11,3 \text{ m/s}$ instantáneamente en $t = 0$. En ese momento la vorticidad está concentrada sobre la superficie de la turbina (no existe estela) y debe ser suficiente para determinar todo el campo de movimiento alrededor de ella de manera de cumplir con la condición de no penetración. En el instante posterior se convecta el vórtice de arranque y el valor de las cargas disminuye de manera significativa. Las fluctuaciones iniciales se deben a las vibraciones de las partes flexibles del sistema (palas y torre), causadas por la aplicación instantánea de las cargas gravitatorias y aerodinámicas. La utilización de amortiguamiento en esta etapa permite llegar rápidamente a un estado de equilibrio estático.

Durante la segunda etapa se observan fluctuaciones periódicas de las cargas alrededor de un valor medio, el cual aumenta desde que se libera el giro del rotor hasta un máximo y luego sufre una leve disminución alcanzando un valor constante. Las fluctuaciones son resultado de la excitación provocada por la interacción aerodinámica entre las palas y la torre. Cada vez que, debido al giro del rotor, una de las palas se acerca a la torre, el campo de velocidades de perturbación asociado a la vorticidad sobre la superficie de la torre hace disminuir las cargas aerodinámicas sobre ella.

El aumento y la posterior disminución del valor medio se deben a la variación de velocidad de rotación. El giro del rotor produce una distribución de velocidades \mathbf{v}_ω sobre las secciones de las palas, que aumenta en intensidad linealmente con el radio y está contenida en el plano de rotación de las mismas. La composición de esta velocidad con la de la corriente libre \mathbf{v}_∞ provee el campo de velocidades sin perturbar $\mathbf{v}_{sp} = \mathbf{v}_\omega + \mathbf{v}_\infty$ que ve cada sección de la pala. No sólo el módulo de \mathbf{v}_{sp} varía con el radio, sino también el ángulo de ataque geométrico, con el que

el aire llega a la pala. Todo esto tiene por consecuencia que la máxima carga aerodinámica se alcance para una determinada velocidad de rotación, que depende de la velocidad de la corriente libre y del ángulo de paso de las palas. Para velocidades de rotación mayores, la carga es menor.

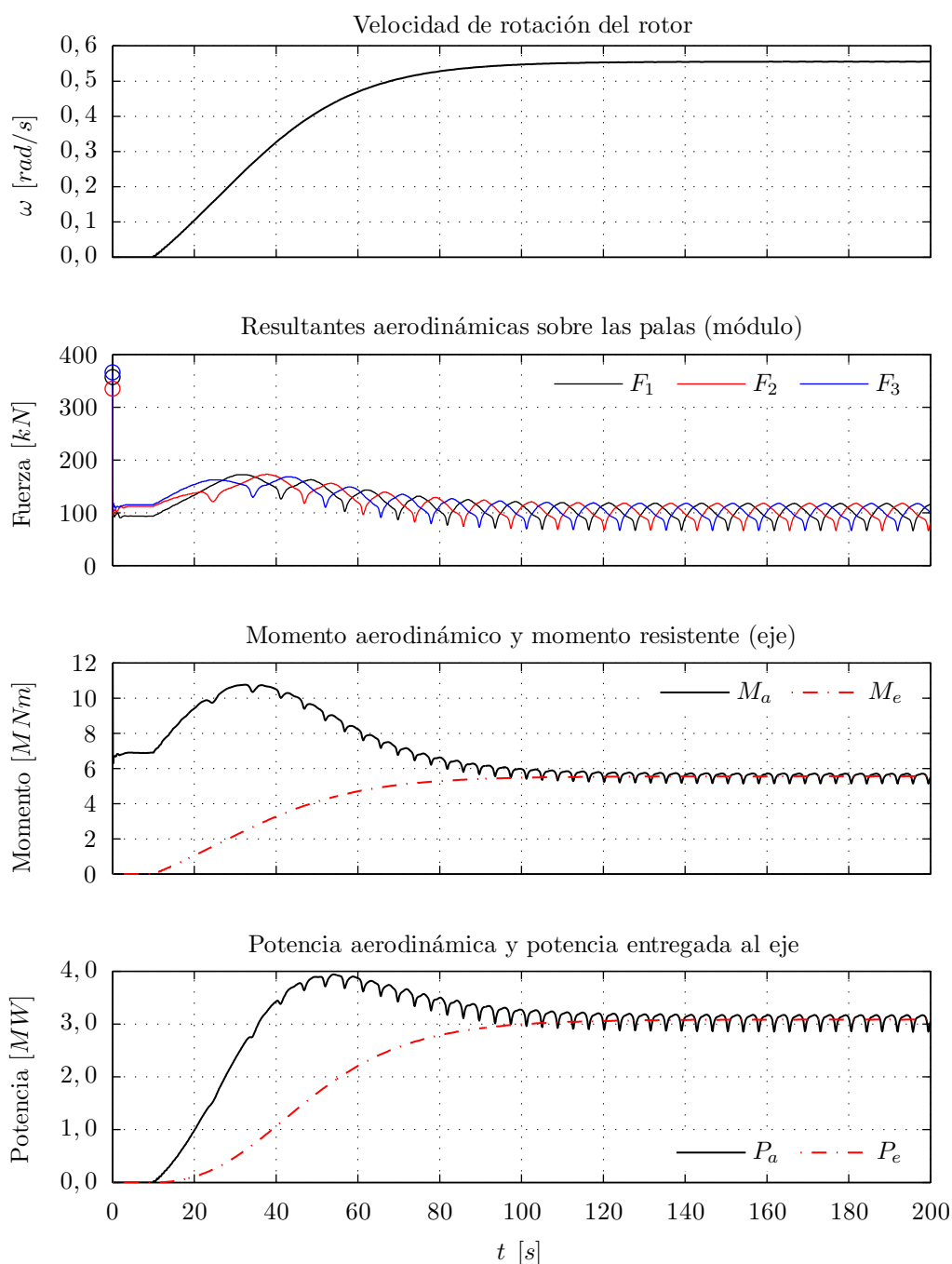


Figura 5: Comportamiento global de la turbina.

En tercer lugar se observa la evolución de las magnitudes del momento aerodinámico M_a y del momento resistente M_e . Para determinar M_a se consideran los momentos M_a^j que cada una de las fuerzas F_i^j producen respecto al centro de masas del cubo. El momento graficado es la

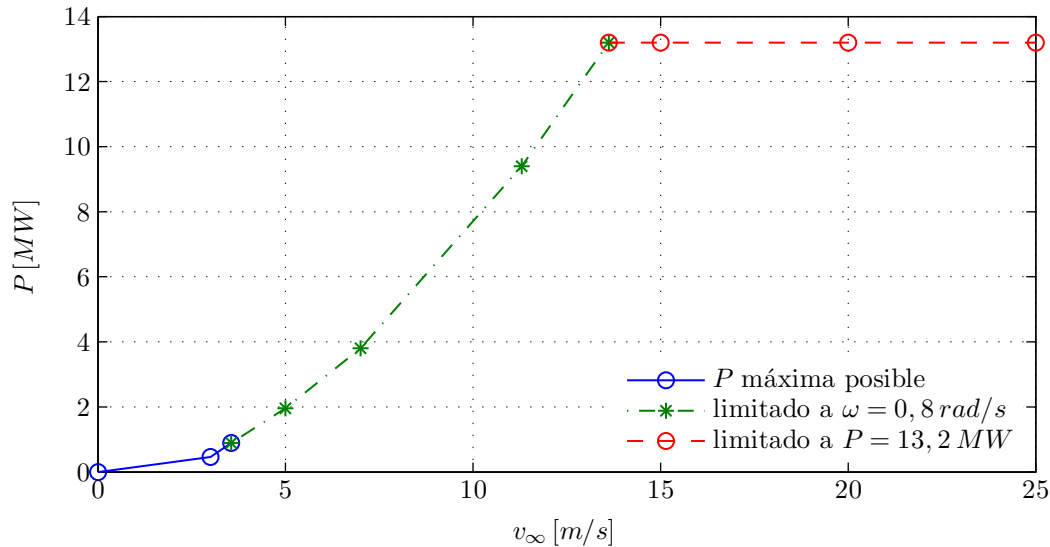


Figura 6: Curva de máxima potencia en función de la velocidad de viento.

proyección sobre el eje del rotor de la sumatoria de los momentos individuales

$$M_a = \mathbf{t}_r \cdot \sum_{j=1}^{3NP_{ss}} \mathbf{M}_a^j \quad (5)$$

siendo \mathbf{t}_r el versor coincidente con el eje del rotor. La evolución temporal de M_a es totalmente dependiente de la de las cargas sobre las palas, por lo que se observan las mismas tendencias generales.

El momento resistente M_e es el que debería oponer el generador eléctrico en el eje del rotor. En este caso depende linealmente de la velocidad de rotación como $M_e = c\omega$, por lo que su evolución es la misma que la de la velocidad del rotor. La diferencia entre M_a y M_e durante la aceleración del rotor desde $\omega = 0 \text{ rad/s}$ hasta ω_{eq} se corresponde con el momento necesario para producir dicho cambio de velocidad en el conjunto cubo+palas.

Finalmente se observan las potencias P_a y P_e , calculadas a partir de M_a , M_e y ω . La potencia aerodinámica, P_a , es una primera aproximación a la potencia extraída de la corriente de aire. Es importante destacar que su valor máximo ocurre, en general, a velocidades de rotación mayores que las correspondientes a valores máximos de M_a (lo cual debe ser considerado para desarrollar estrategias de control que maximicen la eficiencia de la turbina). P_e representa la potencia eléctrica generada (suponiendo rendimientos unitarios para transmisión de potencia y la generación en sí misma). Para este caso y en estado de régimen toma un valor de 3,1 MW, lo que representa menos de la mitad de la potencia nominal de diseño de esta turbina (Griffith y Ashwill, 2011).

3.2. Curva de máxima potencia

En la Figura 6 se observa la máxima potencia extraíble en función de la velocidad del viento. Para su trazado se utilizaron los datos obtenidos de más de 50 casos de estudio, incluyendo el analizado en el punto 3.1. En ellos se simuló el comportamiento de la turbina modificando el ángulo de paso de las palas y la velocidad del viento.

La curva consta de tres partes:

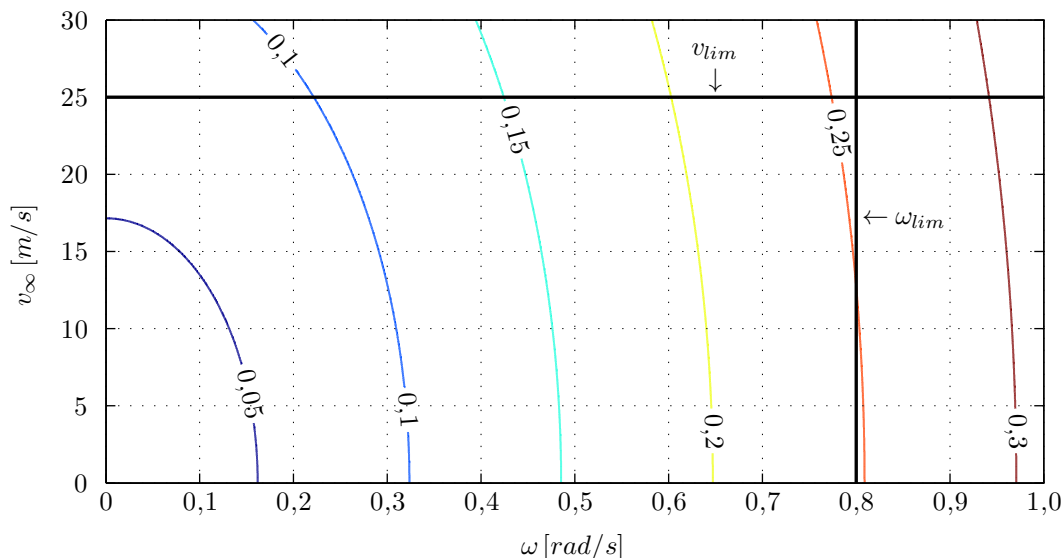


Figura 7: Número de Mach en la puntera de las palas para diferentes condiciones de operación de la turbina.

- $0 \text{ m/s} \leq v_{\infty} \leq 3,5 \text{ m/s}$: máxima potencia que puede obtenerse de la corriente de aire - se logra a velocidades de giro crecientes a medida que aumenta v_{∞} ;
- $3,5 \text{ m/s} \leq v_{\infty} \leq 13,6 \text{ m/s}$: potencia extraíble a la máxima velocidad de giro admisible - cuando $v_{\infty} > 3,5 \text{ m/s}$, la máxima potencia se logra a $\omega > 0,8 \text{ rad/s}$, por lo que $P_a|_{max}$ se ve limitada por la velocidad de giro del rotor; y
- $13,6 \text{ m/s} \leq v_{\infty} \leq 25 \text{ m/s}$: potencia nominal - para $v_{\infty} > 13,6 \text{ m/s}$, la potencia extraíble a $\omega = 0,8 \text{ rad/s}$ es mayor que la máxima admisible y la limitación está dada directamente por la potencia generada.

A cada punto de la curva $P_a|_{max}$ vs. v_{∞} le corresponden, además, una velocidad de giro ω y un ángulo de paso de las palas ϕ .

4. CONDICIONES DE APLICABILIDAD DEL MODELO AERODINÁMICO

El NLUVLM se encuadra dentro del conjunto de técnicas de CFD basadas en la distribución de singularidades. Un rasgo común en estas técnicas es que se consideran despreciables los efectos de compresibilidad y viscosos. A continuación se analiza la importancia de estos fenómenos en el comportamiento de aerogeneradores de eje horizontal.

4.1. Compresibilidad

La importancia de los efectos de compresibilidad puede considerarse utilizando el número de Mach, el cual se define como el cociente entre la velocidad local, v , y la velocidad del sonido en el medio en cuestión, a , es decir

$$M = \frac{v}{a}. \quad (6)$$

En el caso de turbinas eólicas de eje horizontal, la máxima velocidad se da en la puntera de las palas, ya que la velocidad relativa surge de la suma vectorial de la velocidad de la corriente libre, v_{∞} , y de la velocidad de traslación de la puntera debida a la rotación del rotor, $\mathbf{v}_{\omega p} = R\omega$,

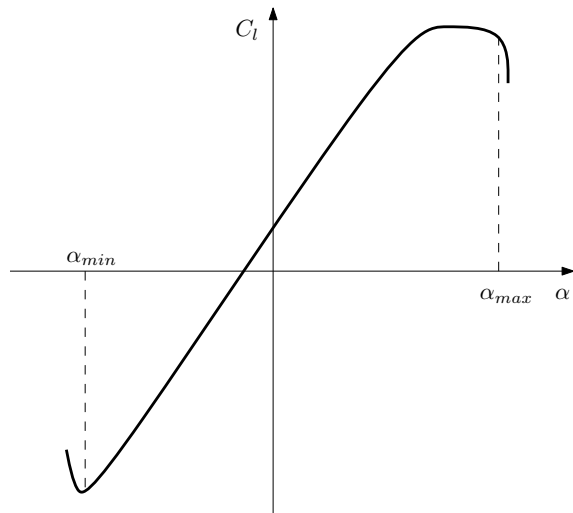


Figura 8: Curva C_l vs. α típica para perfiles empleados en grandes turbinas eólicas.

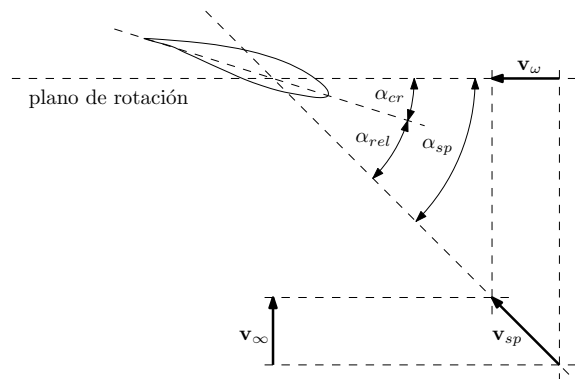


Figura 9: Ángulo de ataque en una sección de la pala.

siendo R el radio del rotor. El número de Mach en la puntera sin considerar las velocidades inducidas resulta así

$$M_p = \frac{\sqrt{v_\infty^2 + (R\omega)^2}}{a} \quad (7)$$

En la Figura 7 se observan las líneas de M_p constante para diferentes combinaciones de velocidades de viento y de rotación del rotor para el modelo presentado por Griffith y Ashwill (2011). Para realizar los cálculos se utilizaron los siguientes valores: $R = 106 \text{ m}$ y $a = 343 \text{ m/s}$. Se indican también dos rectas que representan las velocidades de viento y de rotación límites según el diseño de la turbina. Claramente, las limitaciones de velocidad de viento y de giro mantienen a $M_p \leq 0,25$ en casi todo el rango de operación de la turbina, por lo que se trata de flujo bajo subsónico y los efectos de compresibilidad son despreciables (Karamcheti, 1980).

4.2. Ángulo de ataque

En la Figura 8 se representa esquemáticamente el comportamiento del coeficiente de sustentación en función del ángulo de ataque para un perfil utilizado típicamente en palas de grandes aerogeneradores (Timmer, 2009). Nótese la aparición del fenómeno de pérdida de sustentación para ángulos de ataque límites, tanto positivos como negativos. En turbinas eólicas es importante el comportamiento de C_l más allá del límite de proporcionalidad. Los perfiles utilizados son capaces de mantener un cierto nivel de sustentación, cercano al máximo, aún para ángulos de ataque positivos elevados (de alrededor de 20°). Esto mejora la envolvente de máxima potencia generada. Así mismo, para ángulos de ataque negativos la pérdida ocurre bruscamente. Debido a que el NLUVLM no es capaz de captar la pérdida, resulta importante estimar el ángulo de ataque de trabajo de los perfiles a lo largo de las palas para las diferentes condiciones de servicio de la turbina.

Suponiendo una pala rígida y despreciando los efectos del campo de movimiento tridimensional, se puede determinar el ángulo de ataque en cada sección de la superficie sustentadora con relaciones geométricas simples. Como se observa en la Figura 9, la cuerda de referencia del

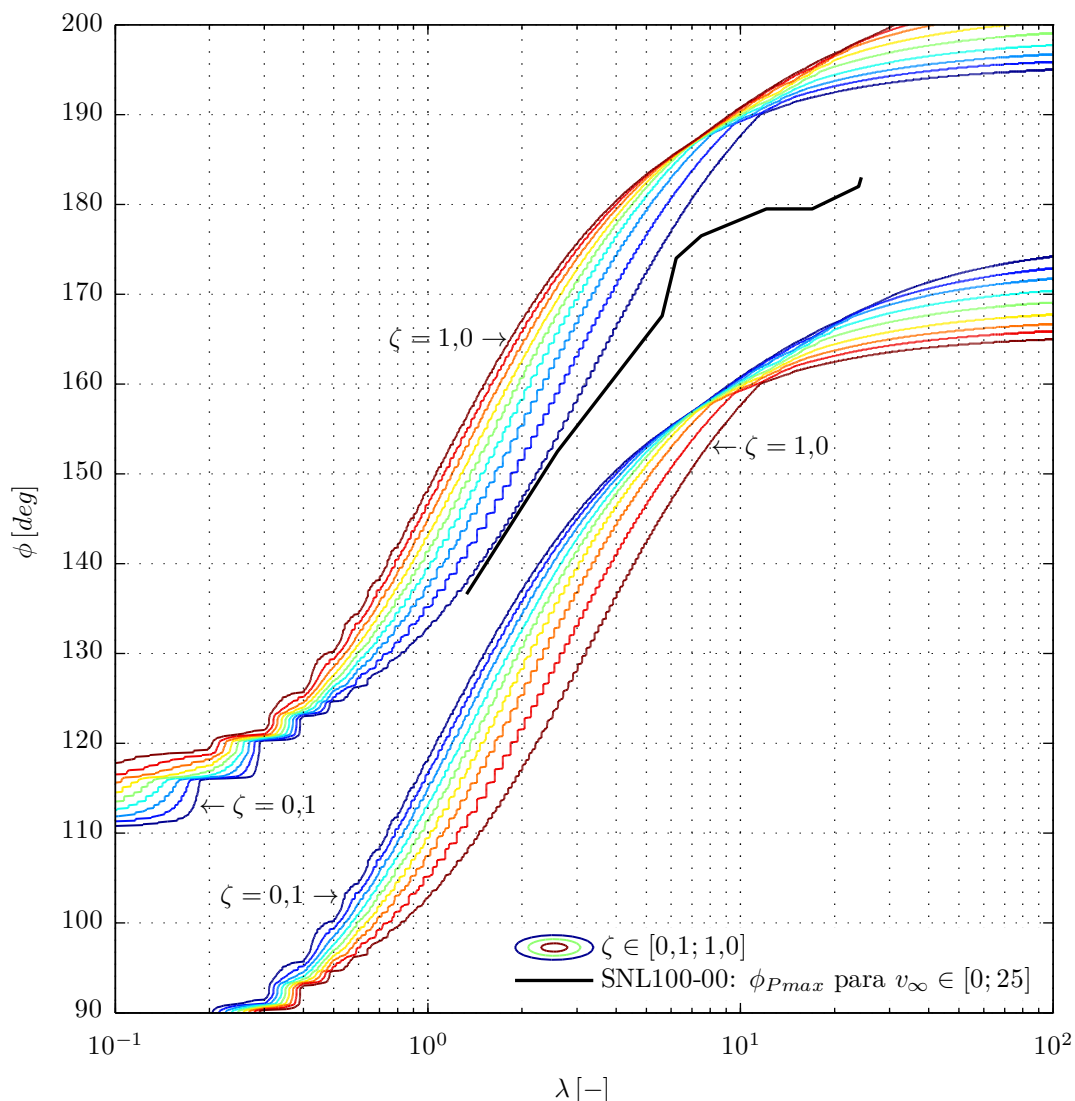


Figura 10: Ángulo de paso, ϕ , vs. coeficiente de avance, λ . Curvas de ζ constante y de potencia máxima para el diseño SNL100-00.

perfil forma un ángulo α_{cr} con el plano de rotación, el cual es diferente para cada sección de la pala y depende del ángulo de paso y del alabeo geométrico. Por otro lado, la velocidad \mathbf{v}_{sp} (que ve el perfil) forma un ángulo α_{sp} con el plano de rotación. \mathbf{v}_{sp} resulta de la composición de la velocidad del viento, \mathbf{v}_∞ , y de la velocidad de traslación de la sección de la pala debida a la rotación, \mathbf{v}_ω , y por lo tanto su magnitud y dirección dependen de la sección que se considere. Finalmente, el ángulo de ataque que determina el coeficiente de sustentación en el perfil es $\alpha_{rel} = \alpha_{sp} - \alpha_{cr}$.

En particular, α_{sp} puede ponerse en función del coeficiente de avance λ , con lo cual se logra independizar el análisis de las condiciones de trabajo específicas de la turbina. Recordando la definición

$$\lambda = \frac{v_\omega}{v_\infty} = \frac{R\omega}{v_\infty} \quad (8)$$

siendo R el radio del rotor, y notando que

$$\alpha_{sp} = \arctan \left(\frac{v_{\infty}}{v_{\omega}} \right), \quad (9)$$

puede expresarse

$$\alpha_{sp} = \arctan \left(\frac{1}{\bar{r} \lambda} \right) \quad (10)$$

donde $\bar{r} = r/R$ representa la posición de la sección analizada, r , relativa al radio del rotor.

Luego, puede determinarse para diferentes combinaciones de coeficiente de avance, λ , y de ángulo de paso, ϕ , la relación

$$\zeta = \frac{L_{p\acute{e}rdida}}{L_{ss}}. \quad (11)$$

Esta representa la fracción de la longitud de la superficie sustentadora, L_{ss} , que posee un ángulo de ataque tal que $\alpha_{rel} \notin [\alpha_{min}; \alpha_{max}]$. En la Figura 10 se muestran las curvas de ζ constante en un grafico ϕ vs. λ . Para los cálculos se utilizó $|\alpha_{min}| = \alpha_{max} = 15^\circ$. Se presenta además la curva correspondiente a las condiciones de máxima potencia extraíble, que se corresponde con la curva en la Figura 6. Se observa cómo en las condiciones de funcionamiento de la turbina, más del 90 % de la longitud de la superficie sustentadora se encuentra en todo momento dentro de los límites adecuados de ángulo de ataque.

5. CONCLUSIONES

Se desarrolló un esquema de interacción que permite acoplar el *método de red de vórtices no estacionario y no lineal* con el *método de elementos finitos*, en particular, utilizando *elementos de viga no lineal con deformaciones finitas*. Esto permite estudiar el comportamiento aeroelástico no estacionario y no lineal de grandes aerogeneradores de eje horizontal.

El método logra captar adecuadamente los principales fenómenos de interacción fluido-estructura. A nivel global, esto incluye predecir la evolución de parámetros esenciales como la velocidad de rotación de las palas y la potencia eléctrica generada. Es posible captar las variaciones de las cargas sobre las palas debidas a la interacción aerodinámica entre estas y la torre. Las predicciones de momento y potencia aerodinámicos permiten evaluar el comportamiento global en régimen de trabajo.

Se estudiaron los principales puntos débiles del modelo aerodinámico: la suposición de que los efectos de compresibilidad son despreciables y la incapacidad de captar el fenómeno de pérdida de sustentación. Se concluyó que para las condiciones de diseño de la turbina analizada no representan limitaciones a la aplicabilidad del método.

REFERENCIAS

- Allen C. y Rendall T. Unified approach to CFD-CSD interpolation and mesh motion using radial basis functions. En *25th AIAA Applied Aerodynamics Conference*. 2007.
- Bir G.S. *Users Guide to PreComp (Pre-Processor for Computing Composite Blade Properties)*. National Renewable Energy Laboratory, 1617, Cole Blvd, Golden, CO 80401, 2005.
- Cebal J. y Löhner R. Conservative load projection and tracking for fluid-structure problems. *AIAA Journal*, 35(4):687–692, 1997.

- Chen P. y Jadic I. Interfacing of fluid and structural models via innovative structural boundary element method. *AIAA Journal*, 36 (2):282–286, 1998.
- ENERCON Web Site. E-126 / 7,580 kw. <http://www.enercon.de/en-en/66.htm>, 2013.
- Farhat C., Lesoinne M., y Le Tallec P. Load and motion transfer algorithms for fluid-structure interaction problems with non-matching discrete interfaces: Momentum and energy conservation, optimal discretization, and application to aeroelasticity. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 157:95–114, 1998.
- Flores F.G. *SIMPACT, An Explicit Finite Element Program*. Departamento de Estructuras, U.N.C., 2011.
- Gebhardt C.G. *Desarrollo de simulaciones numéricas del comportamiento aeroelástico de grandes turbinas eólicas de eje horizontal*. Tesis de Doctorado, Departamento de Estructuras, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, 2012.
- Griffith D.T. y Ashwill T.D. The sandia 100-meter all-glass baseline wind turbine blade: SNL100-00. Informe Técnico, Sandia National Laboratories, 2011.
- Hau E. *Wind Turbines - Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. Springer Berlin Heidelberg New York, 2nd ed. edición, 2005. ISBN-13: 978-3540242406.
- Karamcheti K. *Principles of ideal-fluid aerodynamics*. Krieger Pub Co, 1980.
- Maza M.S., Flores F.G., y Preidikman S. Interacción fluido-estructura, no-estacionaria y no-lineal, con modelos de flujo potencial y estructuras de vigas. *Mecánica Computacional*, XXXI:771–795, 2012.
- Maza M.S., Preidikman S., y Flores F.G. Algoritmos para transferir datos entre grillas aerodinámicas y mallas estructurales: una revisión de las diferentes alternativas para la aeroelasticidad computacional. *Mecánica Computacional*, XXIX:1257–1273, 2010.
- Preidikman S. *Numerical Simulations of Interactions Among Aerodynamics, Structural Dynamics, and Control Systems*. Tesis de Doctorado, Department of Engineering Science and Mechanics, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, 1998.
- Timmer W.A. An overview of NACA 6-digit airfoil series characteristics with reference to airfoils for large wind turbine blades. En *Proceedings of AIAA 47th aerospace sciences meeting*, volumen 268. Orlando, Florida., 2009.
- UpWind Project. UpWind - design limits and solutions for very large wind turbines - a 20 MW turbine is feasible. 2011. Supported by: The Sixth Framework Programme for Research and Development of the European Commission (FP6).