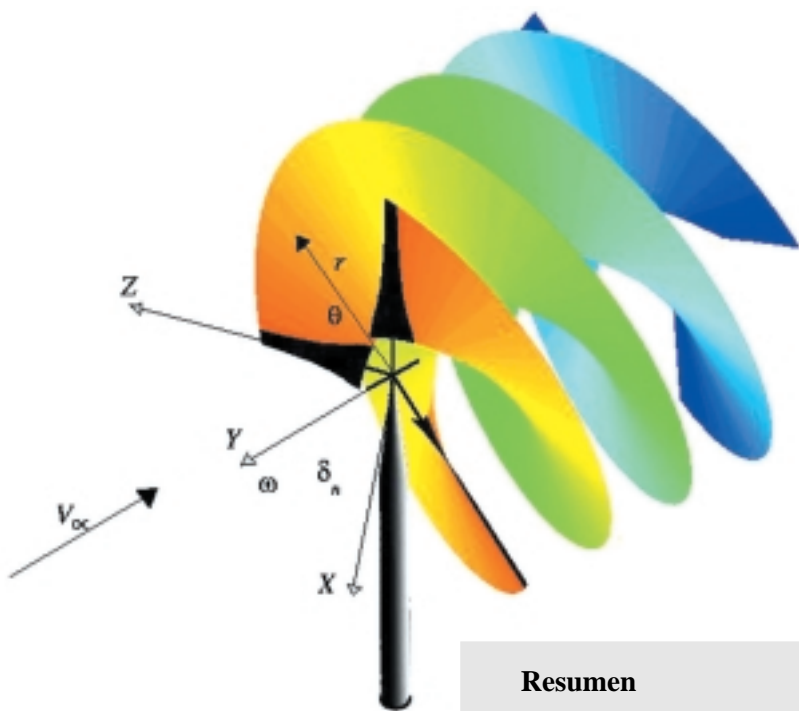


# Diseño aeromecánico de aerogeneradores eólicos de eje horizontal (HAWT's)

S. LAÍN,<sup>1</sup>  
H.E. JARAMILLO,<sup>2</sup>  
B. QUINTERO,<sup>3</sup> M. VALLE<sup>3</sup>



Visualización de la estela predefinida cilíndrica.

## Resumen

El presente trabajo propone una estrategia de cálculo aeromecánico de aerogeneradores de eje horizontal (HAWT) basada en la combinación de un módulo aerodinámico que proporciona la distribución de presiones tridimensional sobre las palas del HAWT y un módulo de cálculo estructural que utiliza las fuerzas generadas por dichas presiones para hallar la deformación de las palas y el correspondiente mapa de esfuerzos y tensiones.

El módulo aerodinámico integra en una tarea de cálculo la teoría de la superficie sustentadora, la cual proporciona la velocidad incidente efectiva y el ángulo de ataque en cada sección de la pala, y un método de paneles bidimensional con el objeto de obtener la distribución de presiones a lo largo de la pala.

Los datos de la distribución de presiones generada por el módulo anterior se utilizan como entrada del módulo estructural el cual consiste en un paquete de elementos finitos que calcula la deformación y los campos de esfuerzos y tensiones sobre la pala, así como la fatiga inducida en el material.

El objetivo final del presente estudio y desarrollo consiste en establecer una herramienta computacional susceptible de ser utilizada para la optimización del diseño de palas de aerogenerador, atendiendo a criterios de eficiencia energética (potencia aerodinámica máxima extraíble) y resistencia estructural.

## Palabras clave

Simulación numérica, aerogenerador, interacción fluido-estructura

1. Doctor en Ciencias Físicas, Universidad de Zaragoza (España). Docente del Departamento de Energética y Mecánica y Director Grupo de Investigación en Mecánica de Fluidos reconocido por Colciencias de la Universidad Autónoma de Occidente. E-mail: slain@cuao.edu.co
2. M.Sc. en Ingeniería Civil. Especialista en Estructuras. Universidad del Valle. Docente del Departamento de Energética y Mecánica. Grupo de Investigación Ciencia e Ingeniería de Materiales reconocido por Colciencias de la Universidad Autónoma de Occidente. E-mail: hejaramillo@cuao.edu.co
3. Estudiantes último semestre de Ingeniería Mecánica. Universidad Autónoma de Occidente.

## Abstract

An aeromechanical calculation of Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) strategy is proposed in the present paper. Such strategy is based on the combination of an aerodynamic module, which provides the three-dimensional pressure distribution on the HAWT's blades, and a structural module which uses such pressure forces as input data in order to compute both, blade deformation and strain and stress distributions over the blade.

The aerodynamic module combines the three-dimensional non-linear lifting surface theory approach, which provides the effective incident velocity and angle of attack at each blade section, and a two-dimensional panel method for steady axisymmetric flow in order to obtain the 3D pressure distribution on the blade.

Such pressure distribution constitutes the input data of the structural module, which consists of a finite element package whose output is the blade deformation and strain and stress distribution along the blade, as well as material induced fatigue.

The final goal of the present development is to build a computational tool being able to deal with the optimisation of a HAWT blade taking into account criteria of energy efficiency (maximum extracted aerodynamic power) and structural strength.

## Key words

Numerical simulation, wind turbine, fluid-structure interaction

## 1. Introducción

Las modernas palas de los aerogeneradores eólicos de eje horizontal consisten en delgadas estructuras de materiales compuestos con una distribución muy sofisticada de resinas laminadas a lo largo de la envergadura y la cuerda. La optimización del diseño mecánico de la pala se debe realizar modelándola como un conjunto de láminas delgadas más que con una aproximación mediante elementos viga.

La adecuada evaluación de las fuerzas interlaminares requiere un cálculo detallado del campo de fuerzas externo, es decir, del campo de presiones. Desafortunadamente, la máxima carga aplicada a las palas aparece en condiciones de alta velocidad, pérdidas, flujo turbulento y dirección del viento no perpendicular al plano del rotor. El cálculo del flujo en esas condiciones desfavorables está lejos de estar satisfactoriamente resuelto. Sin embargo, el estudio del flujo a velocidades de máxima eficiencia permite la optimización del grosor, los materiales, las secuencias de apilamiento y el análisis de la fatiga inducida por la rotación.

Por otro lado, el conocimiento del campo de presiones supone una mejor estimación de las actuaciones en servicio del rotor que las simplificadas teorías del momento, usando las fuerzas globales de sustentación y resistencia en cada sección. El cálculo de tales campos de presión sobre las palas de una aeroturbina, despreciando la acción de la viscosidad, se puede abordar mediante métodos de paneles tridimensionales o con la solución de las ecuaciones del flujo de Euler. Sin embargo, tales métodos son muy costosos computacionalmente y son todavía demasiado lentos para un diseño mecánico y aerodinámico interactivo. Además, los efectos viscosos en las capas de vorticidad y

en las zonas de pérdidas deben modelarse de alguna forma, introduciendo incertidumbres en aquellos métodos, inicialmente exactos. Así mismo, la solución de las ecuaciones de flujo de Euler precisan de un mallado tridimensional en el que las variables se calculan en cada nodo (Chaviaropoulos y Papaliou, 1988), mientras que los métodos de paneles sólo discretizan la superficie de vorticidad (Valarezzo y Liebeck, 1988) Por esta razón, los últimos se aplican en aerodinámica externa incompresible (ver, por ejemplo, Rawlinson-Smith y Hales (1990)).

Entre los métodos simplificados de cálculo empleados se pueden citar desde la primitiva teoría del momento, basada en la hipótesis del disco actuador (Wilson et al., 1976), la teoría de la línea sustentadora (Afjeh y Keith, 1986) hasta la teoría de la superficie sustentadora (Simoes y Graham, 1991). En estos métodos, diferentes versiones de la teoría del elemento de pala, se tratan de calcular las velocidades inducidas sobre secciones bidimensionales de la pala y el flujo tridimensional es aproximado como una secuencia de flujos bidimensionales sobre las secciones, a partir de velocidades y ángulos de ataque efectivos.

Todas estas estrategias requieren cálculos de la evolución de la estela. Incluso en condiciones de no desprendimiento donde la vorticidad se encuentra confinada en delgadas hojas helicoidales, hay una fuerte no linealidad pues el desconocimiento de la forma de la estela y su influencia en todo el campo del flujo impiden obtener directamente la solución del sistema. Se han propuesto diferentes técnicas para superar la indeterminación de la posición de la estela y las intensidades de los vórtices. Las alternativas se pueden citar siguiendo un orden decreciente de complejidad y costo computacional: estela libre (Sipic

y Morino, 1985), estela libre simplificada (Miller, 1988), estela predefinida (cilíndrica o tronco cónico) (Rawlinson-Smith y Hales, 1990) y estela predefinida simplificada (Hernández y Crespo, 1987). No obstante, según Simoes y Graham (1991), Gould y Fiddes (1991), Afjeh y Keith (1986), la geometría exacta de la estela demuestra tener sólo una pequeña influencia en los casos documentados.

La estrategia de cálculo aerodinámico adoptada en este trabajo está en línea con la presentada en Laín et al. (1995) donde se utilizaba, como compromiso entre precisión y costo computacional, una combinación del método tridimensional de la superficie sustentadora y un método de paneles bidimensional. El primero permite determinar la velocidad incidente y su ángulo de ataque sobre cada sección de la pala y el segundo calcular la distribución de presiones sobre ella.

No obstante, la acción de las fuerzas aerodinámicas induce una serie de deformaciones y esfuerzos en las palas que deben ser analizadas desde un punto de vista estructural con el objeto de estimar la fatiga y/o ruptura del material, así como también el optimizar la forma, ya que la relación peso-resistencia de las palas es un factor que define su diseño. Para realizar esta segunda parte del cálculo, se ha optado por utilizar paquetes de elementos finitos tales como SARAH o ANSYS, los cuales permiten calcular y analizar los esfuerzos y deformaciones producidos por la interacción entre el fluido y la estructura.

## **2. Descripción del procedimiento computacional**

### **2.1 Configuración geométrica**

Se considera un flujo estacionario uniforme sobre una aeroturbina de eje horizontal. Ésta consta de K

palas de radio R que rotan a una velocidad angular constante  $\omega$  y enclavadas con un cierto ángulo de calaje o “pitch”  $\alpha$  y alineadas con la velocidad de viento incidente  $V_\infty$ .

Las palas se modelan como superficies sustentadoras cuya geometría se corresponde con una superficie continua, curvada y alabeada construida a partir de una sucesión de líneas medias curvadas en cada perfil desde el borde de ataque al borde de fuga.

Se define un sistema de coordenadas cartesiano (X, Y, Z) relativo a la primera pala,  $n = 1$  (Figura 1). Las posiciones relativas a este sistema de coordenadas se denotan por  $r = (x, y, z)$ . El sistema de coordenadas de la superficie sustentadora se define en función de una coordenada en la dirección de la envergadura (líneas p) y otra coordenada en la dirección de la cuerda de cada perfil (líneas q). El vector vorticidad local sobre la hoja de vorticidad que representa la pala se proyecta sobre este sistema de coordenadas definiendo vórtices ligados a lo largo de las líneas p y vórtices libres desprendidos a lo largo de las líneas q.

Se considera un número finito de P vórtices ligados y Q+1 vórtices libres equivalente, para propósitos computacionales, a una discretización de la superficie sustentadora en  $m = P Q$  paneles de vorticidad en forma de cuadrilátero (Figura 2). La intersección de las líneas p y las líneas q en cada pala definen  $M_{pq}$  nodos. Los puntos de control, j, están localizados en los centros de los paneles correspondientes a las palas.

Las propiedades de conservación de la vorticidad permiten representar la intensidad local de cualquier vórtice como una superposición de “vórtices de herradura” de intensidad constante  $\Gamma_i$  correspondiente a cada segmento de vorticidad ligado i,  $i = 1, 2, \dots, P Q$ .

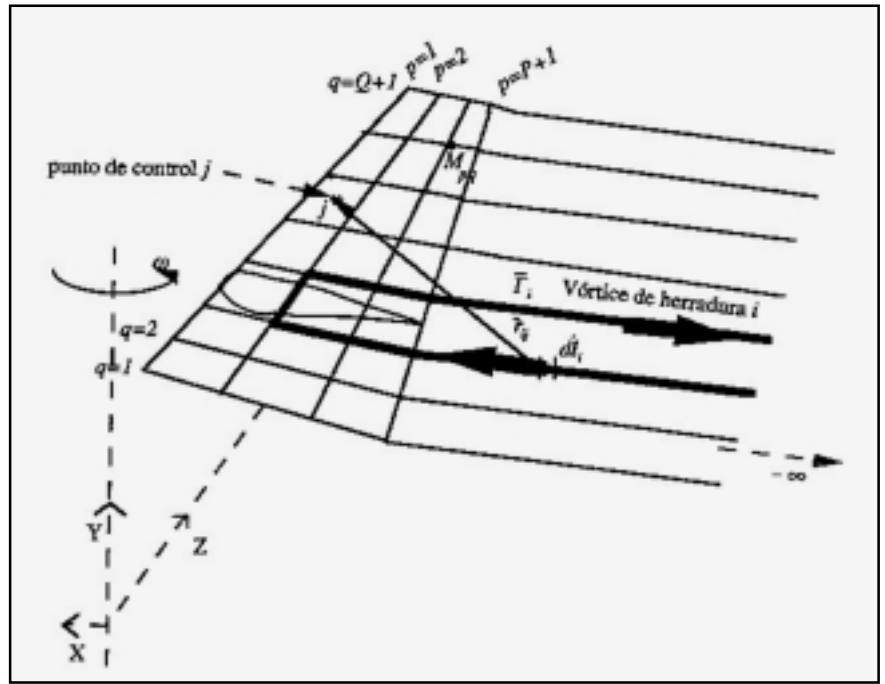


Figura 1. Definición de la superficie sustentadora y parámetros geométricos.

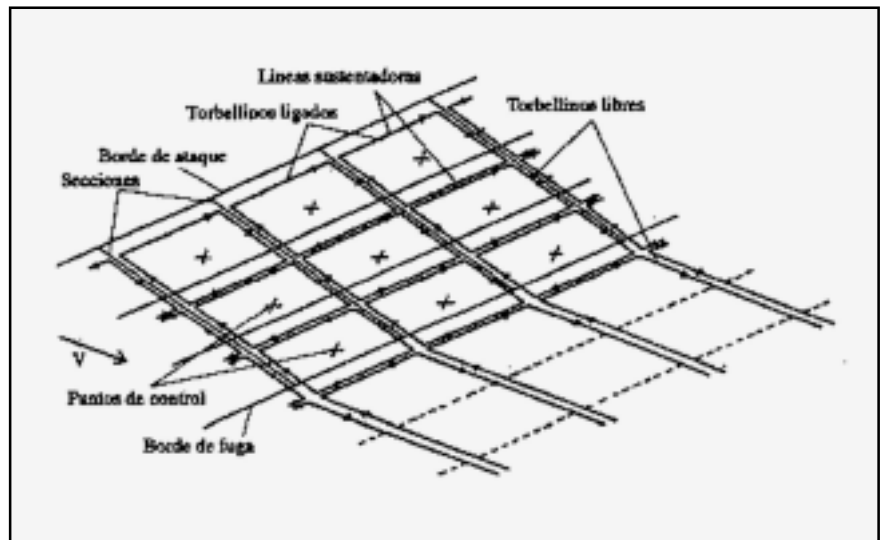


Figura 2. Visualización de los vórtices o torbellinos libres y ligados en la superficie de vorticidad.

Varios autores (Simoes y Graham (1991), Gould y Fiddes (1991), Afjeh y Keith (1986)), reportan que la geometría exacta de la estela demuestra tener tan sólo una pequeña influencia en los resultados sobre los casos documentados. Por tanto, se considerará que los vórtices libres viajeros siguen una trayectoria helicoidal cilíndrica prescrita después de abandonar la superficie sus-

tentadora. Las leyes de conservación de momento angular complementadas con la teoría del disco actuador (Horlock, 1978) permiten aproximar el paso de la hélice como:

$$V_{ax} = \frac{1}{\lambda} \left( 1 - \frac{C_T}{4} \right) \quad (1)$$

donde  $\lambda$  es la velocidad específica adimensional en punta de pala definida como:

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_\infty} \quad (2)$$

y  $C_T$  es el coeficiente de empuje adimensional definido a partir del empuje axial,  $T$ , el área barrida por las palas  $A$ , densidad del fluido,  $\rho$ , y la velocidad incidente en el infinito  $V_\infty$ :

$$C_T = \frac{2T}{\rho A V_\infty^2} \quad (3)$$

Como  $C_T$  depende de las fuerzas aerodinámicas globales que actúan sobre la pala, su valor final es una incógnita al comienzo del cálculo. Esto introduce una no linealidad intrínseca en el sistema la cual es resuelta permitiendo un relajamiento de la estela, a través de un procedimiento iterativo que comienza con una aproximación de  $C_T$ .

## 2.2 Características aerodinámicas

El campo de velocidades no estacionario e irrotacional total se calcula en función de la velocidad en el infinito  $V_\infty$ , más una perturbación  $\mathbf{u}$  inducida por el campo de vorticidades. Las velocidades inducidas por el vórtice de herradura de intensidad unidad  $i$  sobre la pala  $n$  sobre el punto de control  $j$  situado en la primera pala,  $u_{ij}^n$ , viene dado por la ley de Biot-Savart como:

$$u_{ij}^n = \frac{1}{4\pi} \int_{V_i} \frac{dl_i^n \times r_{ij}^n}{|r_{ij}^n|^3} \quad (4)$$

donde  $r_{ij}^n$  representa la posición relativa del punto de control  $j$ , situado en la primera pala, respecto al elemento diferencial del vórtice de herradura  $i$  perteneciente a la pala  $n$  (Figura 1), y  $dl_i^n$  es el elemento de longitud diferencial de la línea de vórtice  $i$ .

Superponiendo las contribuciones debidas a todas las líneas de vórtices se obtiene una expresión pseudo-lineal (Baskin et al., 1976) que proporciona la velocidad de perturbación en los puntos de control  $j$ :

$$\begin{aligned} u_j &= \sum_{i=1}^m \sum_{n=1}^K u_{ij}^n \Gamma_i \\ v_j &= \sum_{i=1}^m \sum_{n=1}^K v_{ij}^n \Gamma_i \\ w_j &= \sum_{i=1}^m \sum_{n=1}^K w_{ij}^n \Gamma_i \end{aligned} \quad (5)$$

Este sistema no está determinado ya que no sólo las velocidades de perturbación  $\mathbf{u} = (u_j, v_j, w_j)$  son desconocidas, sino que también lo son las intensidades (circulación) de los vórtices  $\Gamma_i$ . Para resolver el sistema se deben imponer las condiciones cinemáticas de contorno en la superficie sustentadora, es decir, que la velocidad total en cada punto de control  $j$  debe ser tangente a dicha superficie. Esto proporciona un sistema de ecuaciones lineal para las  $\Gamma_i$ 's, cuyos coeficientes tan sólo dependen de la geometría de la superficie sustentadora y  $\lambda$  (Laín et al., 1995) el cual se resuelve directamente.

Una vez conocida la distribución de intensidades de los vórtices, el teorema de Kutta-Joukowski nos proporciona la fuerza total de sustentación por unidad de longitud,  $L^q$ , sobre cada sección de la pala comprendida entre las líneas  $q$  y  $q+1$ :

$$L^q = \sum_{j=q} W_j \Gamma_j \quad (6)$$

donde  $W_j$  es la velocidad total relativa al punto de control  $j$ , la cual es la suma vectorial de la velocidad incidente  $V_\infty$ , la componente debida a la rotación y la perturbación  $\mathbf{u}$ .

Esta fuerza de sustentación sobre cada sección de la pala puede proyectarse sobre el plano y el eje de rotación. Las fuerzas axial y tangencial resultantes se calculan entonces en cada sección de la pala, con el objeto de hallar el empuje axial y el torque. Si las características de resistencia aerodinámica del perfil son conocidas, los resultados anteriores se corrigen con esta fuerza de resistencia.

Conociendo el coeficiente de sustentación  $C_L(i)$ , siendo  $i$  el ángulo de ataque, para cada perfil específico, bien experimentalmente o bien mediante cálculos 2D, la velocidad efectiva incidente sobre cada sección  $q$  puede calcularse mediante el proceso iterativo descrito en Laín et al. (1995). Como resultado del proceso se obtiene consistentemente, para cada sección  $q$  de la pala, una velocidad incidente  $W^q$  y un ángulo de ataque  $i^q$  efectivos.

## 2.3 Distribución de presiones

La distribución de presiones sobre la pala, en condiciones de no desprendimiento de la capa límite, puede extraerse del conocimiento de los valores anteriores de  $W^q$  e  $i^q$  para cada sección por medio del análisis del flujo plano en cada sección a través de un método de paneles 2D (Moran, 1984).

Cada pala con sección de anchura finita se divide en  $N$  segmentos de vorticidad cuya circulación adimensional por unidad de longitud, la cual equivale a la velocidad local tangente, se denota por  $\gamma_j^q$ . Una nueva aplicación de la ley de Biot-Savart al flujo plano junto con la

condición de tangencia de las velocidades locales en los puntos medios de los segmentos de vorticidad permiten definir un sistema de  $N$  ecuaciones lineales con incógnitas  $\gamma_j^q$  en cada sección. Añadiendo la condición de Kutta-Joukowski expresada como:

$$\gamma^q = \gamma_N = C$$

Se encuentra un sistema de ecuaciones sobredeterminado:

$$\sum_{j=1}^N A_{ij}^q \gamma_j^q = b_i^q \quad i = 1, \dots, N+1$$

donde  $A_{ij}^q$  y  $b_i^q$  solo dependen de parámetros geométricos del perfil, la velocidad incidente  $W^q$  y el ángulo de ataque  $i^q$  sobre la sección. Dicho sistema se resuelve por medio de un procedimiento de mínimos cuadrados (Moran, 1984) obteniéndose los valores para  $\gamma_j^q$  los cuales, junto con los valores de  $W^q$ , permiten el cálculo del coeficiente de presión a lo largo del perfil de la pala  $q$

$$C_N = 1 - \left( \frac{\gamma_j^q}{W^q} \right)^2 \quad (7)$$

Un valor de presión para cada panel construido a mitad de camino entre nodos adyacentes, en la dirección de la cuerda del perfil y de la envergadura de la pala, se obtiene multiplicando la presión en el centro por el área de cada panel. La distribución de presiones resultante constituye el dato de entrada del paquete de elementos finitos.

#### 2.4 Cálculo estructural

Como ya se ha comentado en el epígrafe introductorio, las modernas palas de los aerogeneradores eólicos de eje horizontal consisten en delgadas estructuras de materiales compuestos con una distribución muy sofisticada de resinas laminadas a lo largo de la envergadura y la cuerda. La optimización del diseño mecánico de la pala se debe reali-

zar modelándola como un conjunto de láminas delgadas, más que con una aproximación mediante elementos viga. Además, la adecuada evaluación de las fuerzas interlaminares requiere un conocimiento detallado del campo de fuerzas externo, en nuestro caso, del campo de presiones sobre la pala el cual se determina siguiendo el proceso descrito anteriormente.

La acción de las fuerzas aerodinámicas inducirá una serie de deformaciones y esfuerzos en las palas que deben ser analizadas desde un punto de vista estructural, con el objeto de estimar la fatiga y/o ruptura del material, así como también el optimizar la forma, ya que la relación peso-resistencia de las palas es un factor que define su diseño.

En este momento la geometría de la pala y dicho campo de presiones son los datos introducidos en el paquete de elementos finitos que realizará el cálculo estructural. Aquí se han considerado dos paquetes comerciales: SARAH y ANSYS. Sin embargo, dado que el trabajo presentado en este artículo está todavía en proceso de desarrollo, tan solo se mostrarán resultados obtenidos con el primero de ellos, mientras se sigue trabajando en el segundo.

El objetivo final del presente estudio y desarrollo consiste en establecer una herramienta computacional susceptible de ser utilizada para la optimización del diseño de palas de aerogenerador atendiendo a criterios de eficiencia energética (potencia aerodinámica máxima extraíble) y resistencia estructural.

### 3. Resultados

La validación de la estrategia de cálculo aerodinámica mixta superficie sustentadora - método de paneles bidimensional ha sido presentada en Laín et al. (1995). Por consiguiente, aquí sólo presentaremos

un resumen de los resultados más relevantes alcanzados con ella.

En lo que respecta a parámetros globales que caracterizan la aeroturbina, los fabricantes proporcionan habitualmente la curva coeficiente de potencia frente a velocidad específica en punta de pala  $\lambda$ . El coeficiente de potencia se define como:

$$C_p = \frac{2P}{\rho AV_\infty^3} \quad (8)$$

donde se ha utilizado la misma variable que para el coeficiente de presión; no obstante, el contexto clarificará a cuál de los dos coeficientes, potencia o presión, nos estamos refiriendo.

La Figura 3 muestra las curvas  $C_p(\lambda)$  para dos aeroturbinas comer-

ciales: HOWDEN NEL 15m/60Kw y ECOTECNIA 20m/150Kw.

En esta figura se muestran los datos del fabricante (círculos huecos) con los obtenidos mediante la estrategia de cálculo de la superficie sustentadora —método de paneles 2D (líneas a trazos)— y los obtenidos aplicando la teoría simplificada de Glauert, tal y como se encuentra presentada en Le Gourieres (1982) (líneas de ejes). En ambos casos la estrategia propuesta en este artículo captura muy bien los puntos experimentales cerca del punto de diseño del aerogenerador (máximo de la curva) mientras que se separan de ellos conforme la velocidad incidente  $V_\infty$  aumenta. Las discrepancias en estos puntos se deben a que para velocidades incidentes elevadas se alcanzan situaciones donde algunas secciones de la pala trabajan en con-

diciones de altos ángulos de ataque y por tanto de pérdida (debido al desprendimiento de la capa límite), las cuales están más allá del rango de validez del modelo. Adicionalmente, el modelo se comporta mejor que la teoría de Glauert, como también era de esperar, ya que este último desprecia la resistencia aerodinámica frente a la sustentación.

Los resultados obtenidos para el campo de presiones sobre la pala se presentan en la Figura 4, en comparación con las medidas experimentales de Ronsten et al. (1989) realizadas sobre un rotor de 5.35 m de diámetro y 7 Kw de potencia nominal en el China Aerodynamic Research and Development Center (CARDIC), a una velocidad específica en punta de pala  $\lambda = 7.4$ .

En la sucesión de Gráficas 4 (a) - (e) se presenta el coeficiente de presión (7) a lo largo de la cuerda del perfil de la sección (expresada en tanto por ciento), tanto para el intradós como para el extradós. En ellas se observa que el coeficiente de presión es positivo para el intradós (curva inferior) y negativo para el extradós (curva superior), lo cual nos indica que en este último aparece una succión o depresión neta que, en módulo, es mayor que la sobrepresión experimentada por el intradós. Cabe destacar que el acuerdo con las medidas experimentales es excelente para las secciones más cercanas a punta de pala, mientras que unas pequeñas discrepancias pueden observarse en el extradós en la sección más cercana a la raíz, debidas a que posiblemente esa sección trabaje en situación de pérdida incipiente en las condiciones particulares del experimento.

Dichas curvas de coeficientes de presión en las diferentes secciones se sintetizan en la Figura 5, permitiendo observar la tendencia global de dichos coeficientes en un solo gráfico.

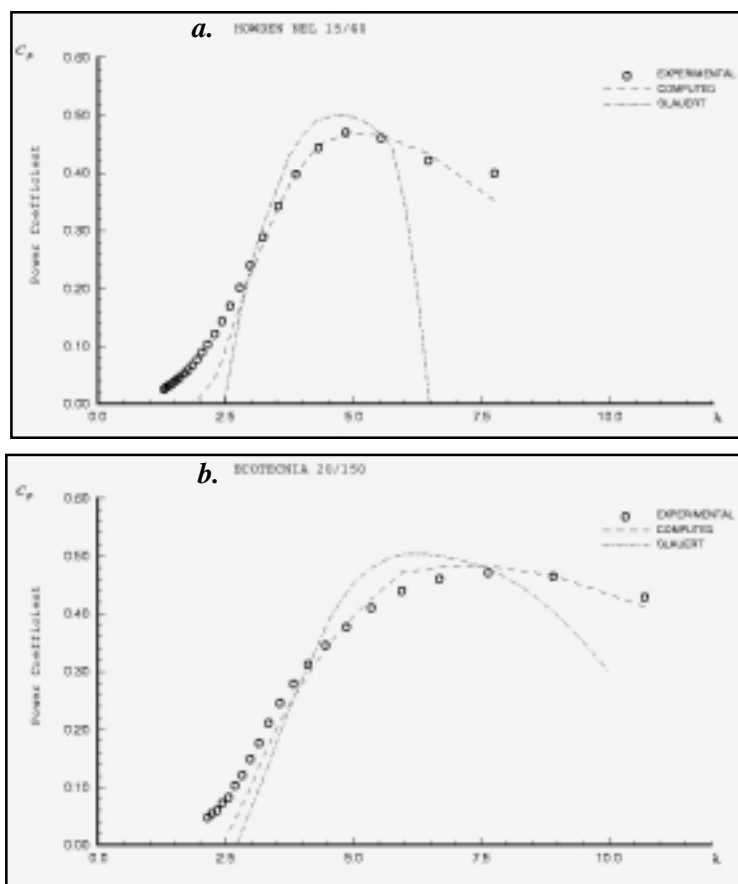
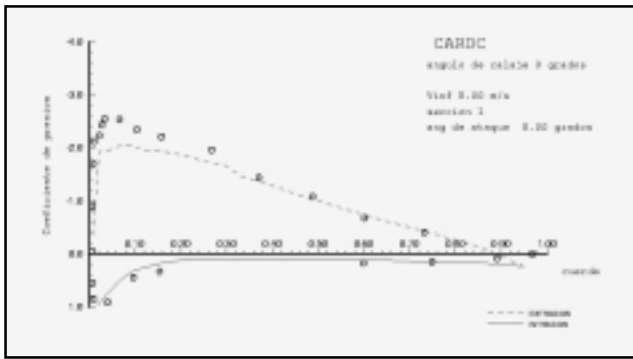
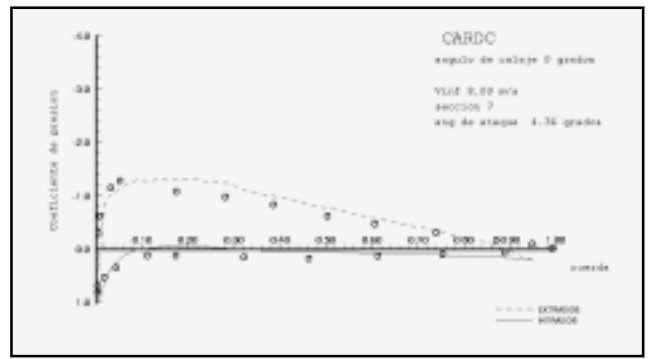


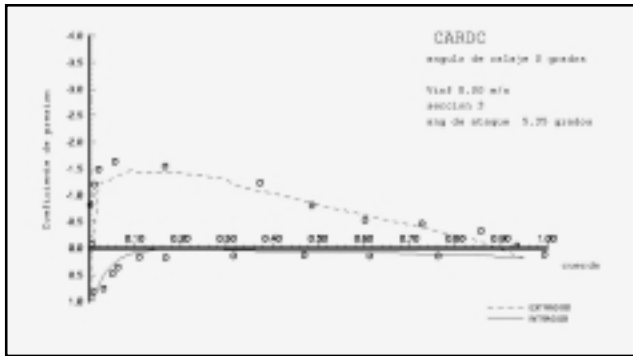
Figura 3. Comparación de coeficientes de potencia frente a velocidad específica para dos aeroturbinas: (a) Howden Nel 15m/60Kw y (b) Ecotecnia 20m/150Kw. Los resultados obtenidos utilizando el método simplificado de Glauert se presentan como comparación.



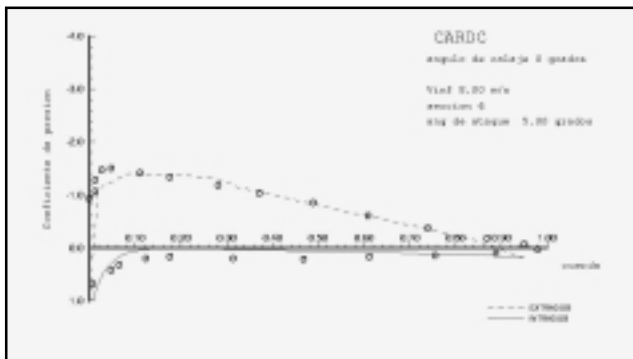
**Figura 4a.** Coeficientes de presión para el rotor Cardc frente al porcentaje de la cuerda del perfil. Resultados para la sección situada al 30% de la envergadura de la pala.



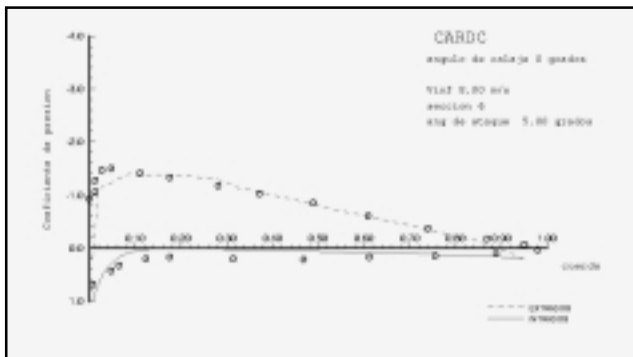
**Figura 4e.** Coeficientes de presión para el rotor CARDC frente al porcentaje de la cuerda del perfil. Resultados para la sección situada al 95% de la envergadura de la pala.



**Figura 4b.** Coeficientes de presión para el rotor Cardc frente al porcentaje de la cuerda del perfil. Resultados para la sección situada al 55% de la envergadura de la pala.



**Figura 4c.** Coeficientes de presión para el rotor Cardc frente al porcentaje de la cuerda del perfil. Resultados para la sección situada al 75% de la envergadura de la pala.

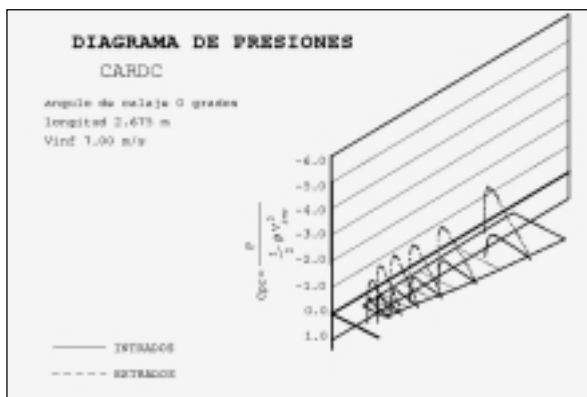


**Figura 4d.** Coeficientes de presión para el rotor Cardc frente al porcentaje de la cuerda del perfil. Resultados para la sección situada al 85% de la envergadura de la pala.

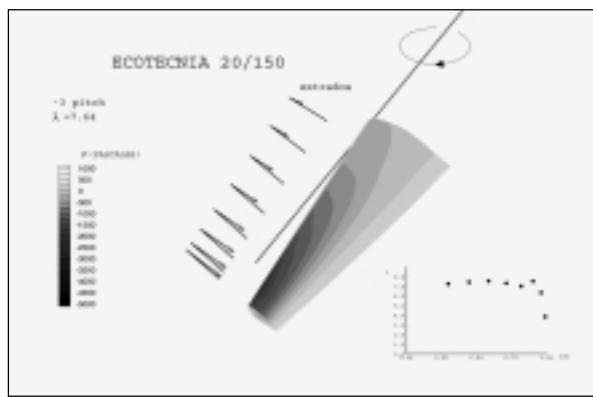
Como ilustración de las capacidades de análisis del módulo aerodinámico, la *Figura 6* muestra la distribución de presiones sobre el extradós de la pala de la aeroturbina ECOTECNIA para diferentes ángulos de calaje o pitch  $\alpha = -3, 0$  y  $3$  grados. En ella se muestra no sólo la variación de la distribución de presiones sino también la distribución de ángulos de ataque  $i$  a lo largo de la envergadura de la pala. Se observa inmediatamente que tanto la succión como el ángulo de ataque decrecen al aumentar el ángulo de pitch.

Una vez conocida tanto la geometría (según datos del fabricante o el diseño que el usuario quiera probar) como la distribución de presiones a lo largo de la envergadura de la pala, se realiza la traducción del formato de salida del módulo aerodinámico al formato de entrada requerido por el paquete estructural. Dicho formato de entrada depende del programa a usar y por tanto, el software encargado de la traducción de los datos debe modificarse cuando se vaya a cambiar el código de elementos finitos.

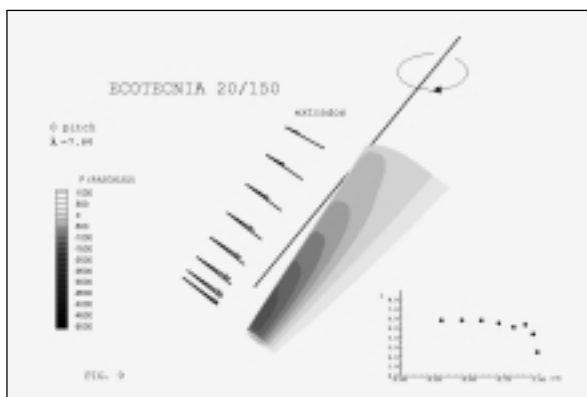
En lo que respecta al modelamiento estructural de la pala, éste se ha realizado superponiendo hasta diez capas de tres materiales compuestos distintos, variando tanto el tipo de material como el ángulo de



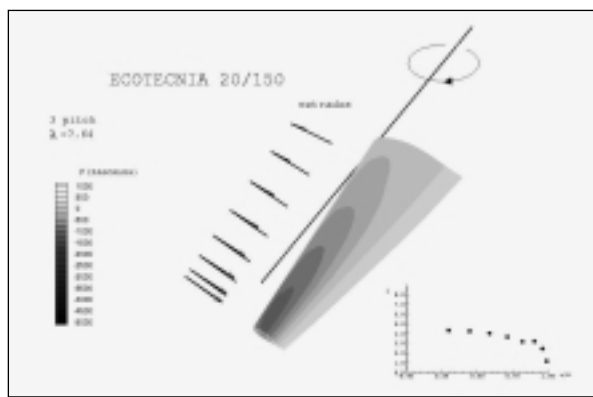
**Figura 5.** Variación de los coeficientes de presión frente a la cuerda y la envergadura para la aeroturbina Cardc.



**Figura 6a.** Distribución de presiones y ángulos de ataque para la pala del aerogenerador Ecotecnia, girando a la velocidad angular nominal de 5.35 rad/s. Ángulo de pitch -3 grados.



**Figura 6b.** Distribución de presiones y ángulos de ataque para la pala del aerogenerador Ecotecnia, girando a la velocidad angular nominal de 5.35 rad/s. Ángulo de pitch 0 grados.



**Figura 6c.** Distribución de presiones y ángulos de ataque para la pala del aerogenerador Ecotecnia, girando a la velocidad angular nominal de 5.35 rad/s. Ángulo de pitch +3 grados.

colocación. Todo con el objeto de optimizar la relación resistencia - peso de la pala.

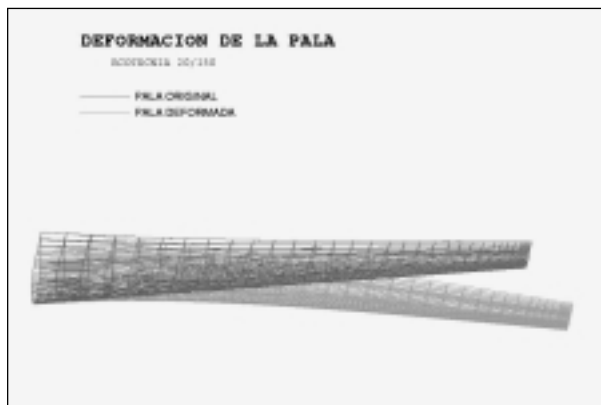
En lo que sigue se observan los resultados preliminares obtenidos con el paquete SARAH para la pala de la aeroturbina ECOTECNIA 20/150.

La *Figura 7* muestra la deformación de la pala debida a las cargas aerodinámicas en el punto nominal de funcionamiento del aerogenerador. La distancia entre los extremos de las palas original y deformada era, en este caso, algo superior a un metro.

La *Figura 8* muestra el valor absoluto de las tensiones a lo largo de la envergadura de la pala. El color rojo indica valores elevados mientras que el azul valores bajos de tal variable. Como es de esperar, las tensiones son más elevadas en las cercanías de la raíz, disminuyendo gradualmente hacia la punta de la pala.

#### 4. Conclusiones y trabajo futuro

El presente artículo describe una estrategia de cálculo aeromecánico para palas de aerogenerador eólico de eje horizontal, la cual es susceptible de ser utilizada como instrumento de diseño y optimización de la geometría y características estructurales de dichas palas. El módulo de cálculo aerodinámico



**Figura 7.** Comparación de la geometría de la pala original y la deformada por las cargas aerodinámicas, en el caso de la turbina Ecotecnia, en las condiciones de su punto de funcionamiento óptimo.



**Figura 8.** Mapa de tensiones absolutas sobre la pala del rotor Ecotecnia 20/150 en el punto de funcionamiento óptimo. Cabe notar cómo las tensiones aumentan al acercarnos a la raíz de la pala.

co combina la teoría de superficie sustentadora con un método de paneles bidimensional con el objeto de proporcionar la distribución de presiones que actúa sobre la pala. Estas fuerzas aerodinámicas, junto con la geometría de la pala, constituyen los datos de entrada para el módulo estructural, el cual consiste en un paquete estándar de elementos finitos, posiblemente comercial, encargado de proporcionar tanto la deformación como el mapa de esfuerzos y tensiones sobre la pala.

La capacidad predictiva del módulo aerodinámico se ha contrastado frente a medidas realizadas en un rotor de laboratorio en el China Aerodynamic Research and Development Center, obteniéndose un excelente acuerdo entre los resultados del modelo y los puntos experimentales para condiciones de flujo estacionario, irrotacional y donde las palas no presentan desprendimiento de la capa límite en ninguna de sus secciones, el cual constituye el rango de validez del modelo.

También se han presentado resultados, todavía preliminares, del cálculo estructural obtenido con el paquete de elementos finitos SA-

RAH que muestra tanto la deformación como el mapa de tensiones absolutas de la pala del aerogenerador ECOTECNIA 20/150 con un comportamiento cualitativo suficientemente satisfactorio.

El trabajo en progreso se centra en utilizar el paquete ANSYS para realizar el cálculo estructural con hincapié en la elaboración de un entorno gráfico ergonómico que le permita al usuario tanto la elección de los materiales como el establecimiento de la estructura de las palas. ❁

## Referencias

- A.A. Afjeh y T.G. Keith Jr., A simplified free wake method for HAWT prediction, *Transaction of the ASME*, 108 (1986), pp. 400-406.
- V.E. Baskin, L.S. Vildgrube y Y.E. Vozhdayev, *Theory of lifting air-screw*. NASA report TTF 823, 1976.
- P. Chaviaropoulos y K.D. Papailiou, A full potential prediction of a HAWT rotor performance, *European Wind Energy Conference, EWEC, Herning 1988*, pp. 258-264.
- J. Gould y S.P. Fiddes, *Computational methods for the performance prediction of HAWTS*. *European Wind Energy Conference, EWEC, Amsterdam, 1991*, pp. 29-33.
- D. le Gourières, *Energie eolienne*. Eyrolles, París, 1982.

J. Hernández y A. Crespo, Aerodynamic calculation of the performance of HAWT's and comparison with experimental results, *Wind Engineering*, 11 (1987), pp 177-187.

J.H. Horlock, *Actuator disk theory*. McGraw Hill, 1978.

S. Laín, J.A. García y R. Aliod, Development of a lifting surface - 2D panel method to compute the three-dimensional pressure distribution over the blade of a HAWT, *Wind Engineering*, 19, (1995), pp. 21-40.

R.H. Miller, The aerodynamics and dynamic analysis of HAWT's, *J. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 15 (1988), pp. 329-340.

J. Moran, *An introduction to theoretical and computational aerodynamics*. Jhon Wiley & Sons, New York, 1984.

R.I. Rawlinson-Smith y R.L. Hales, Computational study of stalled rotor performance, *British Wind Energy Association Conference, 1990*, pp. 145-151.

G. Ronsten, J.A. Dahlberg y S. Meijer, Pressure measurements on a 5.35 m HAWT in CARDC 12 x 16 m<sup>2</sup> wind tunnel compared to theoretical pressure distributions. *European Wind Energy Conference, EWEC, Glasgow, 1989*.

F.J. Simoes y J.M.R. Graham, Application of a free vortex wake model to a HAWT. *European Wind Energy Conference, EWEC, Amsterdam, 1991*, pp. 46-50.

S.R. Sipcic y L. Morino, Wake dynamics for incompressible and compressible flows, *Computational Methods in Potential Aerodynamics*, Springer-Verlar, 1985, pp. 679-699.

W. Valarezzo y R. Liebeck, Three-Dimensional calculation of Windmill surface pressures, *AIAA paper 88-2533*, 1988.

R.E. Wilson, P.B.S. Lissaman y S.N. Walker, Aerodynamic performance of wind turbines. *RANN National Science Foundation NSF/RA-760228*, pp. 38-40, June 1976.