

Estudio aerodinámico de aerogeneradores de eje horizontal de potencia nominal superior al Mw

Brian Quintero^{*a}, Hector Enrique Jaramillo^a, Santiago Lain^a

(a) *Universidad Autónoma de Occidente*

**bquintero@uao.edu.co*

(Recibido: Junio 30 de 2006 - Aceptado: Octubre 6 de 2006)

RESUMEN

La energía eólica se ha impuesto en el mundo como la fuente renovable más utilizada. Su uso en Colombia, sin embargo, es todavía muy incipiente. El rendimiento de los aerogeneradores viene determinado en gran medida por sus características aerodinámicas las cuales son a su vez influenciadas por la deformación de las palas debido a las solicitaciones aerodinámicas. La estrategia de cálculo aerodinámico adoptada en este trabajo está en línea con la presentada en Lain et al. (1995) [1] y Quintero et al. (2004) [2] donde se utilizaba, como compromiso entre precisión y costo computacional, una combinación del método tridimensional de la Superficie Sustentadora y un Método de Páneles 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.

PALABRAS CLAVE: Energía eólica, aerogenerador, método de paneles, superficie sustentadora

Aerodynamic study of horizontal axis aero-generators of nominal power above MW

ABSTRACT

Eolic energy throughout the world has become the most broadly source of renewable energy used. Its use in Colombia, however, is still rather incipient. The performance of aero-generators is determined in great part by their aerodynamic characteristics, which are then influenced by the deformation of the asps due to aerodynamic requirements. The strategy of the aerodynamic calculation adopted in this work is in line with that presented by Lain et al. (1995) [1] and Quintero et al. (2004) [2], where they used, as a compromise between precision and computational cost, a combination of the three-dimensional method of the Support Surface and a two-dimensional Panel Method. The first allows determining the incident velocity and its attack angle over each section of the asp, and the latter permits calculating the distribution of pressures upon it.

KEYWORDS: Eolic energy, aero-generator, method of panels, support surface

1. INTRODUCCIÓN

Desde hace unos años la escasez y el elevado precio de los combustibles fósiles, así como los altos niveles de contaminación en zonas fuertemente pobladas del planeta, ha motivado a que la atención del sector energético se haya dirigido hacia la consecución de energías alternativas limpias. Entre ellas, una de las que más auge ha experimentado en los últimos diez años es la energía eólica o del viento. En tan sólo una década se ha pasado de aerogeneradores capaces de producir una potencia útil de unos 100 Kw hasta las máquinas más actuales capaces de proporcionar varios Mw.

Entre los métodos simplificados de cálculo empleados se pueden citar desde la primitiva teoría del momento, basada en la hipótesis del disco actuador, la teoría de la línea sustentadora hasta la teoría de la superficie sustentadora. 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. No obstante, según varios autores [3], 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 [1] y [2] utilizando, 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. El conocimiento de la distribución de presiones proporciona el punto de partida para realizar el cálculo estructural.

2. CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA

Se considera un flujo estacionario y uniforme sobre una aeroturbina de eje horizontal. Ésta consta de K palas de radio R que rotan a una velocidad angular constante ω y enclavadas con un cierto ángulo de calaje o "pitch" α y alineadas con la velocidad de viento incidente V. 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.

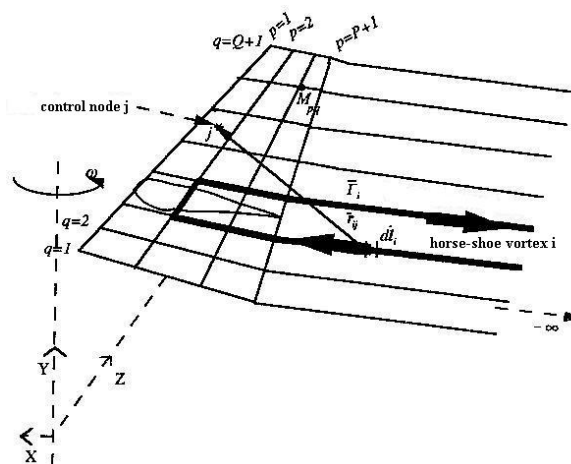


Figura 1. Definición de la superficie sustentadora y parámetros geométricos.

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 $m = P \cdot Q$ paneles de vorticidad en forma de cuadrilátero.

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 Γ_i correspondiente a cada segmento de vorticidad ligado i , $i = 1, 2, \dots, PQ$.

De acuerdo con lo comentado en la introducción, 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 sustentadora. Las leyes de conservación de momento angular complementadas con la teoría del disco actuador permiten aproximar el paso de la hélice como:

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

donde λ 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, ρ , y la velocidad incidente en el infinito V_∞ :

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

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 .

El campo de velocidades no estacionario e irrotacional total se calcula en función de la velocidad en el infinito V_∞ , y la velocidad de rotación ($U = \omega \times r$) más una perturbación u inducida por el campo de vorticidad. (Figura 2)

$$W = V_\infty + u - U = W_\infty + u \quad (4)$$

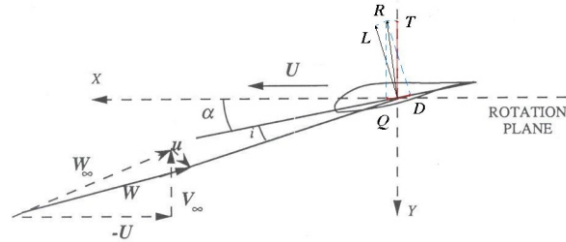


Figura 2. Triángulos de velocidades y fuerzas aerodinámicas actuando en una sección.

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:

$$u_{ij}^n = \frac{1}{4\pi} \int_{\Gamma_i} \frac{dl_i^n \times r_{ij}^n}{\|r_{ij}^n\|^3} \quad (5)$$

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 , 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 que proporciona la velocidad de perturbación en los puntos de control j :

$$u_j = \sum_{i=1}^m \sum_{n=1}^K u_{ij}^n \Gamma_i \quad v_j = \sum_{i=1}^m \sum_{n=1}^K v_{ij}^n \Gamma_i \quad w_j = \sum_{i=1}^m \sum_{n=1}^K w_{ij}^n \Gamma_i \quad (6)$$

Este sistema no está determinado ya que no sólo las velocidades de perturbación $u_j = (u_p, v_p, w_p)$ son desconocidas, sino que también lo son las intensidades (circulación) de los vórtices Γ_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 , W , debe ser tangente a dicha superficie. Esto proporciona un sistema de ecuaciones lineal para las Γ_i 's, cuyos coeficientes tan sólo dependen de la geometría de la superficie sustentadora y λ [1] el cual se resuelve directamente.

Una vez conocida la distribución de vorticidad, el campo de velocidades inducido se obtiene de (6) y la velocidad total en cada punto de control viene dada por (4). Esta información nos permite estimar la velocidad incidente W^q y el ángulo de ataque i^q efectivos en cada sección de la pala mediante el procedimiento descrito en [1].

3. CARACTERÍSTICAS AERODINÁMICAS

Una vez conocidas la velocidad incidente efectiva W^q y el ángulo de ataque i^q para cada sección de la pala, asumiendo flujo bidimensional irrotacional, la aero-dinámica experimental proporciona las expresiones para las fuerzas de sustentación y resistencia sobre cada perfil (Figura 2)

$$L^q = \frac{1}{2} \rho C_L W^{q^2} b^q \quad (7)$$

$$D^q = \frac{1}{2} \rho C_D W^{q^2} b^q \quad (8)$$

Si los coeficientes de sustentación, $C_L(i^q)$, y resistencia, $C_D(i^q)$, son conocidos para el perfil específico considerado, b^q representa la longitud de la cuerda del perfil.

La fuerza aerodinámica resultante R^q es la suma vectorial de la sustentación L^q y la resistencia D^q . La proyección de R^q sobre el eje de rotación proporciona la contribución al empuje axial T^q , y la proyección sobre el plano de rotación, la contribución tangencial correspondiente, Q^q . Éstas se expresan como:

$$\begin{aligned} T^q &= -L^q \cos(\alpha^q + i^q) - D^q \sin(\alpha^q + i^q) \\ Q^q &= L^q \sin(\alpha^q + i^q) - D^q \cos(\alpha^q + i^q) \end{aligned} \quad (9)$$

donde α^q es el ángulo de calaje de la sección correspondiente.

El valor total del empuje axial, T , y el torque, M , son, portanto:

$$T = K \sum_{q=1}^Q T^q, \quad M = K \sum_{q=1}^Q Q^q r^q \quad (10)$$

donde r^q es la distancia del eje de rotación a la sección considerada. Los coeficientes de empuje axial, torque y potencia correspondientes se definen como:

$$\begin{aligned} C_T &= \frac{2T}{\rho A V_\infty^2}, \quad C_M = \frac{2M}{\rho A R V_\infty^2}, \\ C_P &= C_M \lambda = \frac{2P}{\rho A V_\infty^3} \end{aligned} \quad (11)$$

La validación de la estrategia de cálculo aerodinámica ha sido presentada anteriormente en [1] y [2], por lo que no será repetida y directamente se aplicará al caso de los grandes aerogeneradores de potencia nominal superior al megavatio.

4. AERODINÁMICA DE GRANDES AEROGENERADORES

Por gran aerogenerador entendemos aquel cuya potencia nominal supera el Mw. La figura 3 muestra, a modo de ilustración, la dependencia del diámetro del rotor con la potencia generada. Un elemento clave en su construcción es el peso de la estructura, el cual redunda en el costo de fabricación, y también las dificultades que aparecen para su transporte.

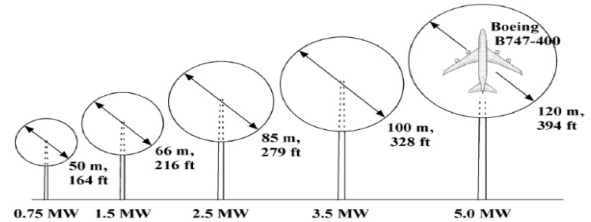


Figura 3. Dependencia del radio del rotor con la potencia generada.

En el rango de los grandes aerogeneradores actuales, con palas desde 30 a 70 metros de longitud, el peso de éstas crece como el cubo de la longitud, mientras que el rendimiento económico es inversamente proporcional al peso específico, el cual se define como el peso de la pala sobre el área barrida (kg m^{-2}). Según el reporte del Laboratorio estadounidense SANDIA (report SAND 2004-0074) [4], una herramienta para disminuir el peso, y por tanto el costo de la

pala es ensanchar la sección de los perfiles aerodinámicos. Como resultado del citado estudio, al comparar los comportamientos aerodinámico y estructural, se concluyó que las secciones más cercanas a la raíz de la pala deberían diseñarse para mejorar el rendimiento estructural, mientras que las más alejadas deben tender a mejorar el rendimiento aerodinámico. Tales resultados se basaron en una configuración de pala de 50 m de longitud para una potencia nominal de 3.0 Mw.

Sin embargo, aunque [4] proporciona datos sobre la cuerda y el ángulo de calaje en un número suficiente de secciones a lo largo de la envergadura de la pala, no proporciona ni la geometría de los perfiles ensanchados y truncados ni tampoco sus características aerodinámicas (coeficientes de sustentación y resistencia frente a ángulo de ataque). De hecho, durante el transcurso de este trabajo, se contactó al Sandia National Laboratories para tratar de averiguar tales datos y su respuesta fue que éstos eran información reservada. Lo mismo sucede en otros laboratorios dedicados al desarrollo de la energía eólica como el NREL en Estados Unidos y el Risø en Dinamarca. Por otro lado, los fabricantes de aeroturbinas apenas proporcionan unos pocos parámetros básicos y la curva potencia velocidad del aerogenerador. Por consiguiente, una comparación cuantitativa detallada de los resultados obtenidos en el presente trabajo con otros de la literatura es realmente difícil, pues siempre algún tipo de información básica no se encuentra disponible. Debido a ello se ha optado por la alternativa siguiente: dado que la estrategia de cálculo aerodinámica ha demostrado su adecuación en turbinas pequeñas y medianas, para una determinado diámetro de rotor se han probado varios diseños de la pala, variando perfiles (con coeficientes aerodinámicos conocidos), cuerdas y ángulos de calaje para obtener una buena comparación con la curva potencia velocidad de viento incidente.

Los resultados obtenidos se ilustran en caso del rotor denominado W15S de potencia nominal 3000 Kw y diámetro de rotor 102 m. el cual es la configuración referida en [4]. Dado que el uso de los perfiles originales en la simulación aerodinámica no es posible se optó por la solución de realizar semejanza cinemática con la pala del aerogenerador ECOTECNIA 20/150 evaluado en [1]. Esta pala posee un buen desempeño aerodinámico, por lo cual es un buen candidato para incorporar en un gran aerogenerador.

En el diseño de la pala se realizó en principio semejanza geométrica multiplicando por 5 (puesto que la pala original, o modelo, tiene 10 m y el prototipo 50 m) todas las dimensiones de longitud (longitud y cuerdas de los perfiles) y manteniendo los ángulos de calaje. Adicionalmente, la semejanza cinemática requiere que se modifique la velocidad de rotación de las palas para mantener en cada sección el mismo triángulo de velocidades, lo cual garantiza la misma velocidad efectiva incidente entre el modelo y el prototipo. Como resultado, la curva coeficiente de potencia frente a velocidad específica en punta de pala $C_p(\lambda)$, es la misma para el modelo y el prototipo, de donde, multiplicando por las variables dimensionales correspondientes, se obtiene la curva potencia velocidad del prototipo. El diseño básico del prototipo se muestra en la tabla 1. No obstante, dado que el rendimiento aerodinámico depende de los perfiles utilizados, a través de sus coeficientes aerodinámicos de sustentación y resistencia, así como de sus características geométricas se han realizado varias pruebas variando la longitud de la cuerda, ángulos de calaje, tipos de perfil empleados y velocidad de rotación de las palas, definiéndose los casos de estudio mostrados en la tabla 2.

Tabla 1. Diseño básico del prototipo W15S. Velocidad de rotación $\omega = 1.07$ rad/s.

Radio [m]	Calaje [grados]	Cuerda [m]	Perfil
11.20	14.000	5.450	Naca63221
18.75	6.270	4.825	Naca63221
26.05	2.220	4.225	Naca63221
32.75	0.690	3.670	Naca63218
38.65	0.170	3.185	Naca63218
43.45	0.030	2.790	Naca63215
47.08	0.000	2.495	Naca63215
49.25	0.000	2.310	Naca63215
50.00	0.000	2.250	Naca63215

Tabla 2. Definición de los casos de estudio para la aeroturbina W15S

Caso	ω [rad/s]	Distribución de Cuerda [m]	Perfiles
Básico	1.07	Tabla 8	Naca632XX
Básico Glauert	1.07	Tabla 8	Naca632XX
Caso 1	1.45	Tabla 8	Naca632XX
Caso 2	1.07	Tabla 10	Naca632XX
Caso 3	1.07	Tabla 8	Naca634XX
Caso 4	1.07	Tabla 8	Naca44XX

El caso básico considera los datos mostrados en la tabla 1 utilizando el método de la superficie sustentadora, mientras que el caso básico Glauert considera los mismos datos geométricos pero la metodología de cálculo está basada en la teoría simplificada de Glauert [5]. El caso 1 tiene en cuenta una velocidad de rotación más elevada, mientras que el caso 2 considera la distribución de cuerdas sugerida en [4], la cual se muestra en la tabla 3. Los casos 3 y 4 consideran diferentes series de perfiles NACA, aunque manteniendo la distribución de anchuras, NACA634XX en el caso 3 y NACA44XX en el caso 4.

La figura 4 muestra la comparación de las curvas potencia velocidad (arriba) y coeficiente de potencia velocidad específica en punta de pala (abajo) para el caso básico de la turbina W15S, básico Glauert y los casos 1 y 2. Los puntos corresponden a los cálculos presentados en [4], utilizando el código denominado PROP el cual está basado en la combinación de la teoría de Glauert y la teoría del elemento de pala [5].

En tales cálculos se asumió que la turbina tenía 102 m de diámetro, una potencia nominal de 3 Mw y una regulación activa de potencia. Esta última es la razón por la cual la potencia se mantiene constante después del valor de velocidad incidente de 12 m/s en la curva potencia velocidad. Sin embargo, en los cálculos presentados la regulación de potencia se debe a la pérdida aerodinámica, por lo cual las curvas potencia velocidad muestran un máximo absoluto en vez de una potencia máxima constante.

Tabla 3. Parámetros geométricos de la pala W15S según [4].

Radio [m]	Calaje [grados]	Cuerda [m]
7.80	19.500	4.030
13.00	13.000	4.472
18.20	8.800	3.939
23.40	6.200	3.452
28.60	4.400	2.986
33.80	3.100	2.534
39.00	1.900	2.092
44.20	0.800	1.659
49.40	0.000	1.233

Como se puede comprobar en la figura 4, el caso básico Glauert proporciona resultados muy similares a los obtenidos por el código PROP, a pesar de las diferencias en los parámetros geométricos. Ello se debe a que en la teoría de Glauert la influencia de la geometría del perfil es muy reducida. Por otro lado, la teoría de la superficie sustentadora en la configuración básica alcanza la potencia nominal de 3 Mw para un valor ligeramente superior de la velocidad incidente y el valor máximo del coeficiente de potencia es ligeramente inferior al proporcionado por la teoría de Glauert. Esto último es consistente pues los supuestos en los que se basa la teoría de la superficie sustentadora son menos ideales que en el caso de la teoría de Glauert. En ambos casos la potencia se encuentra limitada por la pérdida aerodinámica. Si se aumenta la velocidad de rotación, caso 1, la potencia disponible en eje tenderá a incrementarse, lo cual se observa en la línea punteada de la parte izquierda de la figura 4 con lo que, además, el riesgo de que la turbina se embale se incrementa notablemente.

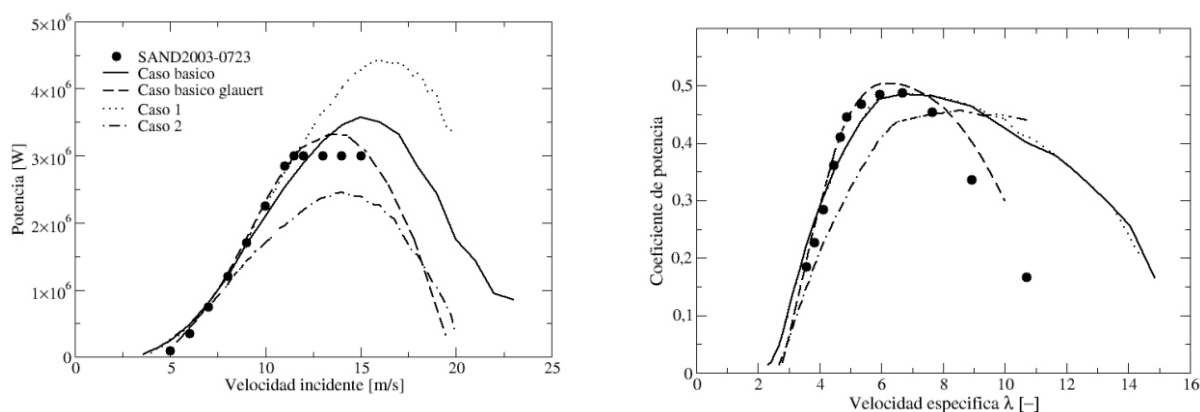


Figura 4. Comparación de las curvas potencia velocidad (izquierda) y coeficiente de potencia velocidad específica en punta de pala (derecha) para el caso básico de la turbina W15S y los casos 1 y 2, referidos en la tabla 2.

Nótese cómo en este caso la curva de coeficiente de potencia versus velocidad específica es la misma que en el caso básico, pues se mantiene la semejanza cinemática. Por último, el caso 2 considera la reducción de la longitud de la cuerda en cada sección de la pala (tabla 3), lo cual implica la reducción del área neta de la pala y, por tanto, la disminución del par que el viento genera sobre ella.

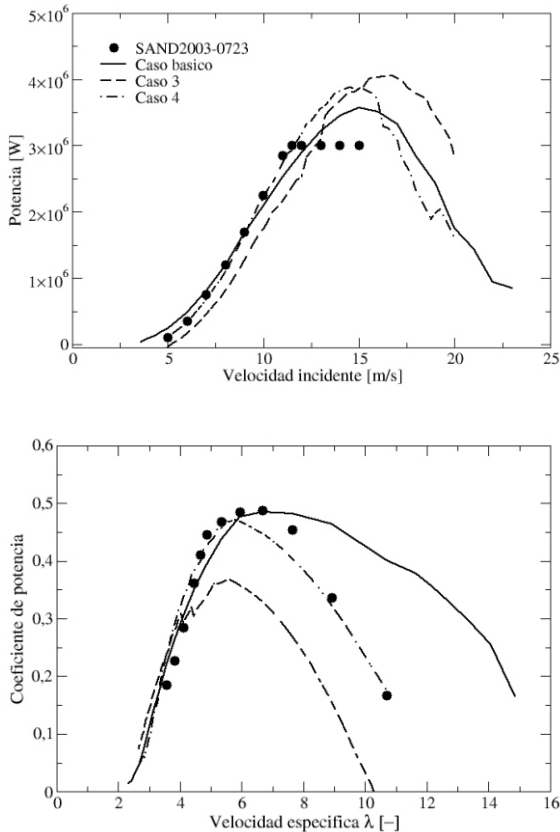


Figura 5. Comparación de las curvas potencia velocidad (arriba) y coeficiente de potencia velocidad específica en punta de pala (abajo) para el caso básico de la turbina W15S y los casos 3 y 4, referidos en la tabla 2.

El resultado final es la reducción significativa de la potencia generada por el aerogenerador y una disminución significativa de su rendimiento. Es necesario recalcar que no necesariamente mayor potencia generada implica mayor rendimiento (es decir mayor coeficiente de potencia), puesto que la velocidad específica en punta de pala está en relación inversa a la velocidad del viento incidente (compárense, por ejemplo, los casos básico y básico Glauert).

En la figura 5 se comparan las curvas potencia velocidad (arriba) y coeficiente de potencia velocidad específica en punta de pala (abajo), entre el caso básico de la turbina W15S y los casos 3 y 4, donde se varían los perfiles aerodinámicos, aunque manteniendo su distribución de anchuras. Como ya se ha mencionado, aunque tanto el caso 3 (NACA634XX) como el 4 (NACA44XX), presentan mayores picos de potencia generada, su rendimiento es inferior al del caso básico. Es interesante señalar que la potencia generada por la pala construida con los perfiles NACA44XX compara muy bien con los datos extraídos de [4] hasta la potencia nominal. No obstante, su rendimiento es ligeramente inferior al logrado en el caso básico.

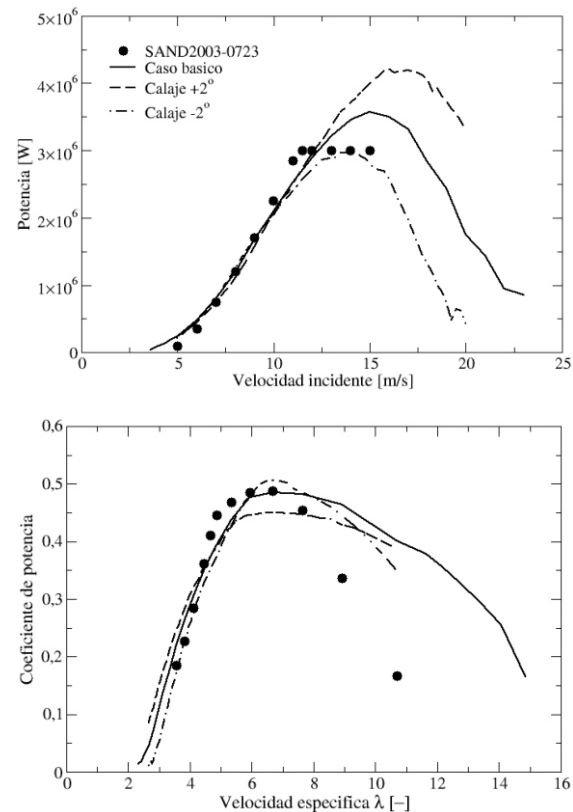


Figura 6. Comparación de las curvas potencia velocidad (arriba) y coeficiente de potencia velocidad específica en punta de pala (abajo) para el caso básico de la turbina W15S y dos casos variando el ángulo de calaje global de toda la pala entre -2° y 2°.

La figura 6 muestra el efecto de variar el ángulo de calaje global de la pala. En dicha figura se ilustran dos casos con calajes globales de +2° y -2°. Se observa cómo en el primero de ellos se incrementa la potencia máxima generada

respecto al caso básico, aunque disminuyendo su rendimiento, mientras que en el segundo la potencia máxima generada coincide casi exactamente con la potencia nominal del aerogenerador y su coeficiente de potencia óptimo se incrementa ligeramente respecto a la configuración básica. En este sentido, rotar la pala como un todo -2° optimizaría el rendimiento aerodinámico de ésta.

Sin embargo, aunque la configuración básica tiene un buen comportamiento aerodinámico posee el inconveniente de que la cuerda en cada sección es muy larga, por lo que tanto la cantidad de material necesario, como su peso final, no la hacen muy recomendable para su empleo en la construcción de grandes aerogeneradores donde, como ya hemos mencionado, se busca un compromiso entre potencia generada y costo de fabricación, pues el rendimiento económico es inversamente proporcional al peso específico.

5. CONCLUSIONES

Se ha realizado el cálculo aerodinámico de la pala denominada W15S, de potencia nominal 3000 Kw y diámetro de rotor 102 m., la cual es la configuración referida en [4]. Sin embargo, aunque la configuración básica tiene un buen comportamiento aerodinámico posee el inconveniente de que la cuerda en cada sección es muy larga, por lo que tanto la cantidad de material necesario como su peso final no la hacen muy recomendable para su empleo en la construcción de grandes aerogeneradores.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Vicerrectoría de Investigaciones de la UAO su apoyo por la financiación para realizar este trabajo a través del proyecto "Evaluación aerodinámica y estructural del aerogeneradores de eje horizontal de potencia nominal superior al megavatio".

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] S. Laín, J.A. García, 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, pp.21-40, 1995.

[2] B. Quintero, M. F. Valle, H. E. Jaramillo, S. Laín, *Aeromechanical study of horizontal axis wind turbines*, in *Conf. CIUREE Int. Conf. Communications*, pp. 6369, 2004.

[3] J. Gould, S. P. Fiddes, *Computational methods for the performance prediction of HAWT's*, in *Conf. EWEC Communications*, pp. 2933, 1991

[4] Report SAND2004-0074, *Innovative design approaches for large wind turbine blades*. Sandia National Laboratories Albuquerque NM, (U S A), 2 0 0 4 . d i s p o n i b l e e n : <http://www.sandia.gov/wind/other/040074.pdf>

[5] Le Gourieres D., *Energie eolienne*, Ed. Eyrolles, 1982.