



Modelo matemático para el diseño aerodinámico de los álabes de una turbina eólica de eje horizontal (TEEH)

Mathematical Model for Blades Aerodynamic Design of a Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT)

Julio José-Chirinos García
Conrado-Moreno Figueredo
Joel-Morales Salas

Recibido: junio de 2015
Aprobado: septiembre de 2015

RESUMEN/ABSTRACT

El objetivo de esta investigación es elaborar un modelo matemático para el diseño aerodinámico de las palas de una turbina eólica de eje horizontal en forma rápida y confiable que facilite a construcción y comportamiento bajo diferentes condiciones. Este resultado se obtuvo por el método inductivo y deductivo partiendo de las teorías aerodinámicas de Glauert y otros introduciéndole modificaciones. Igualmente el desarrollo del modelo fue programado en una hoja de cálculo que permitió calcular el radio R del rotor, la distribución de la cuerda $c(r)$ y la variación del ángulo de torsión $\Theta(r)$ de forma automática. El desarrollo del modelo está estructurado de acuerdo a las siguientes etapas: identificación y definición, conceptualización, formulación e implementación y finalmente la validación del modelo. La validación del modelo fue hecha comparando la geometría de la pala y la potencia generada por el rotor con una familia de palas de fabricantes europeos.

Palabras clave: álabes, diseño aerodinámico, modelos matemáticos.

The research purpose is elaborate a mathematical model for blade aerodynamic designing of horizontal axis wind turbine in fast and reliable way to facilitate the construction and performance evaluation under different operational conditions. To reach the theoretical and empirical approach it was used induction and deduction method starting from aerodynamic theories of Glauert and other researchers, in which necessary modifications were introduced. Also, the development of the model was programmed in aspreadsheet which allows to calcula table de radio R , the distribution of chord $c(r)$, and the variation of twist angle or pitch $\Theta(r)$ in automatic way. The development of the model was structured according to the following stages: identification and definition, conceptualization, formulation and implementation and finally the validation of the model. The model validation was made comparing the blade geometry and generated power by the rotor with a blade family of European manufacturers.

Key words: blades, aerodynamic design mathematical models.

INTRODUCCIÓN

El diseño aerodinámico de los álabes de una turbina eólica de eje horizontal (TEEH) se viene desarrollando desde principios del siglo pasado.

Actualmente se continúan elaborando métodos apoyados en la computación que permiten realizar estos cálculos [1, 2, 3]. Los modelos de cálculo para el diseño aerodinámico de los álabes de las TEEH se pueden

clasificar en tres grupos [4, 5, 6]. Al primer grupo pertenecen los que emplean la diferencia finita y volumen finito en los cuales el modelo de flujo espacial y temporal continuo se sustituye por un modelo discreto compuesto por puntos en una celda y niveles de tiempo, haciendo discreto el dominio. Las ecuaciones que rigen el problema son la ecuación de continuidad, las de Navier-Stokes [7] y la ecuación de la energía se reemplazan por un grupo de ecuaciones algebraicas con los puntos de la celda y los niveles de tiempo como su dominio. Este primer modelo no es el más empleado por su complejidad, tamaño y el tiempo que se necesita para los cálculos computacionales [8, 9].

Al segundo grupo pertenecen los modelos que analizan la interacción entre los álabes de la turbina con el viento con ayuda de los vórtices discretos distribuidos en la superficie de los álabes. Los modelos de este grupo usualmente emplean el flujo ideal. El método de los vórtices libres (MVL) permite resolver cualquier problema complicado de la aerodinámica del álabes. Las limitaciones están en que considera con exactitud solo las fuerzas normales que actúan sobre los álabes. El cálculo de las fuerzas tangenciales es más difícil ya que se necesitan otras herramientas complementarias de la capa límite o correcciones empíricas para determinar la viscosidad del fluido [10, 11].

En el tercer grupo se ubican los modelos más empleados en la resolución de los problemas prácticos de aerodinámicas de las turbinas eólicas. Se basan en la teoría de impulso de los rotores en que las fuerzas aerodinámicas que actúan en el rotor de la turbina se igualan a las pérdidas de impulso del flujo al pasar por el rotor. Estos modelos emplean las ecuaciones que relacionan la geometría de los álabes, con las características de su perfil y las velocidades inducidas. Con este método se pueden resolver tanto el problema directo como el indirecto. El método se presenta en este trabajo pertenece a este tercer grupo. En este sentido existen tres teorías clásicas que se emplean ampliamente: Froude, la del disco rotor y la de Glauert [7]. La teoría de conservación de la cantidad de movimiento de Froude es muy conservadora y no toma en cuenta la geometría de las palas, por lo que su aplicación para efectos de diseño es nula. Solo permite determinar la máxima potencia que puede extraerse del viento y permite establecer el valor máximo del parámetro de interferencia axial a . Por otra parte la teoría del disco rotor toma en consideración la variación de cantidad de movimiento angular generado por la rotación de la estela del rotor y de igual manera no considera la geometría de las palas. Su utilidad fue la de establecer el parámetro de interferencia radial a' . Sin embargo la combinación de ambas junto a la teoría del elemento de pala de Glauert permite obtener dos expresiones matemáticas que pueden usarse solo para efectos de evaluación de geometrías de alabes y no para efectos de diseño.

Desarrollo del modelo matemático

En esta sección se exponen las modificaciones y criterios asumidos por Eglestone y Stoddard (1987), [12], Burton (2001) [13] y otros a la teoría del elemento de pala de Glauert con la finalidad de seleccionar las ecuaciones que conformarán el modelo matemático que se propone como objetivo principal de este trabajo y que permitirá, diseñar los alabes de cualquier turbina eólica de eje horizontal. La parte final de este método, incluirá el cálculo de la potencia a extraer del viento, el coeficiente de potencia, y el cálculo de la fuerza de empuje axial.

Diseño del rotor sin los efectos de la resistencia aerodinámica

Tomando en consideración que el coeficiente de sustentación de cualquier perfil aerodinámico C_L es muy grande en comparación con el coeficiente de resistencia aerodinámica C_d , lo cual es equivalente decir que la razón C_L/C_d sea la mayor posible para un número de Reynolds y ángulo de ataque dados. Suponer C_d nulo, implica un error según Eglestone y Stoddard (1987), [2, 4, 5, 12], de casi 1 %, por lo que se usará esta simplificación para definir una geometría preliminar de la pala y luego realizar unos cálculos más detallados incluyéndolos efectos de C_d . La teoría del elemento de pala de Glauert divide al alabe o pala en n secciones de igual longitud Δx , y en cada una de estas, se calculan las fuerzas aerodinámicas consideradas aisladas del resto de la pala. Para realizar esto se requiere conocer el radio R (ver ecuación 1), de la pala como dato inicial [12, 13]:

$$\Delta X = \frac{R}{n} \quad (1)$$

Las fuerzas y pares aerodinámicos se calcularán en el punto medio de cada sección i de la pala. En la ecuación (2), se obtienen las coordenadas.

$$r_i = \left(\frac{2i-1}{2} \right) \Delta X \quad (2)$$

Para i variando entre 1 y n .

Eglestone y Stoddard (1987), citando a Miller y otros investigadores, proponen calcular el valor del parámetro de interferencia axial a_i (ecuación 3), [12], como una serie de potencias de x , siendo x la velocidad específica local en cada

sección i de la pala [2, 3, 4, 5, 7]:

$$a_i = \frac{1}{3} - \frac{2}{81x^2} + \frac{10}{724x^4} - \frac{418}{59049x^6} + \dots \quad (3)$$

Seguidamente, en la ecuación (4), se calcula el ángulo de incidencia corriente ϕ en función de a para cada sección de la pala:

$$\phi_i = \tan^{-1} \left[\frac{1}{a_i} \sqrt{(1-a)(1-3a_i)} \right] \quad (4)$$

Eggleston y Stoddard (1987) proponen la ecuación (5), que permite calcular la distribución de cuerdas preliminar de la pala, dada por [12, 13]:

$$c_i C_L = \left(\frac{8\pi V_0}{B\Omega} \right) \left(\frac{4a_i - 1}{1 - 2a_i} \right) \sqrt{(1-a_i)(1-3a_i)} \quad (5)$$

Para determinar la geometría de las palas se pueden seguir dos caminos. En el primero, se puede seleccionar un perfil aerodinámico de cualquier base de datos [14], y obtener el valor de C_L [7, 14, 15], constante en cada sección de la pala, para un ángulo de ataque α , tal que C_L/C_d sea máximo; para un determinado número de Reynolds Re , y de la ecuación (5), calcular la cuerda en cada sección. En el segundo caso se puede asumir cuerda constante en toda la envergadura de la pala y calcular el valor de C_L para cada sección y luego seleccionar el perfil aerodinámico adecuado. Otra variante de cálculo la presenta Burton (2001) [13], y otros en [12, 14, 16]; aquí se toma el valor del parámetro a igual a $1/3$, constante en cada sección de la pala, lo que maximiza la extracción de potencia del aire; el valor del parámetro a'_i , se calcula de la ecuación (6):

$$a'_i = \frac{2/9}{\left(\frac{r_i}{R} \right)^2} \quad (6)$$

La solución genera la distribución de cuerda en porcentaje del radio total de la pala (c_i/R) dado por la siguiente ecuación (7):

$$\left(\frac{c_i}{R} \right) = \frac{4X \left(\frac{r_i}{R} \right)}{\left(\frac{BC_L}{2\pi} \right) + \sqrt{\left(\frac{2}{3} \right)^2 + X^1 \left(\frac{r_i}{R} \right)^2 (1+a'_i)^2}} \quad (7)$$

El ángulo de incidencia de la corriente ϕ en cada sección se calcula con la ecuación (8).

$$\phi_i = \tan^{-1} \left[\frac{1}{X \left(\frac{r_i}{R} \right) (1+a'_i)} \right] \quad (8)$$

Modelo del rotor con los efectos de la resistencia aerodinámica

Esta segunda parte toma en consideración los efectos de resistencia aerodinámica. Se selecciona el perfil aerodinámico que posea la mayor relación C_L/C_d , lo cual equivaldrá a decir C_d/C_L [7], mínimo. Tal como se establece en [13, 14], se propone calcular el parámetro de interferencia axial a_i y de interferencia radial a'_i reales de las ecuaciones (9 y 10):

$$a_i = \frac{k_i}{k_i + 1} \quad (9)$$

$$a'_i = \frac{s_i}{1-s_i} \quad (10)$$

Donde: k_i y s_i son respectivamente: Ver ecuación (11,12).

$$k_i = \frac{Bc_i}{8\pi r_i} \left[\frac{C_L \cos \varnothing - C_d \sin \varnothing_i}{\sin^2 \varnothing_i} \right] \quad (11)$$

$$s_i = \frac{Bc_i}{8\pi r_i} \left[\frac{C_L \sin \varnothing_i - C_d \cos \varnothing_i}{\sin \varnothing_i \cos \varnothing_i} \right] \quad (12)$$

Seguidamente se puede calcular el ángulo de incidencia de la corriente (ecuación 13), sobre el elemento de pala:

$$\varnothing_i = \tan^{-1} \left[\frac{1(1-a_i)}{x_i(1+a'_i)} \right] \quad (13)$$

Por último se calcula el Número de Reynolds Re : ver ecuación (14):

$$Re = \frac{\rho W_i c_i}{\mu} \quad (14)$$

En [7], se propone un método alternativo para el cálculo de a y a' basándose en la suposición de que el valor $\epsilon = C_d/C_L$ sea muy pequeño lo cual simplifica las ecuaciones de cálculo. El valor de a en cada sección se puede calcular de la ecuación (15):

$$\frac{1}{a} = 2 + \frac{(G + \sqrt{G + H^2})}{\cos \varnothing} \quad (15)$$

donde: ver ecuación (16,17):

$$G = \frac{\epsilon}{2 \cos \varnothing (\tan \varnothing - \epsilon)} \quad (16)$$

$$H = \frac{\tan \varnothing}{(\tan \varnothing - \epsilon)} \quad (17)$$

El valor de a' puede calcularse de la siguiente ecuación (18):

$$a' = \frac{a(\tan \varnothing - \epsilon)}{[(1-a)(\cot \varnothing + \epsilon) - a(\tan \varnothing - \epsilon)](1-a)} \quad (18)$$

La referencia [3], propone la ecuación (19), para el cálculo de la distribución cuerdas a lo largo de la pala:

$$\frac{BcC_L}{8\pi r} = \frac{asen\phi}{(1-a)(cot\phi + \epsilon)} \quad (19)$$

El análisis de ambos métodos mostró resultados muy similares. Es decir que pueden usarse indistintamente cualquiera de los dos procedimientos para el desarrollo del modelo matemático de diseño que se propone en esta investigación, sin embargo la sencillez en el cálculo dado en las ecuaciones (15, 18 y 19) facilita su automatización en una hoja de cálculo.

Modificaciones y cálculos finales

La geometría final del álabes o pala depende de las pérdidas en las puntas del alabe y en la zona cercana al encastre con el cubo del rotor. Para computar estas pérdidas, Burton (2001) y otros, proponen una expresión denominada factor de pérdida de Prandtl [13, 14], que está dada por la ecuación (20):

$$F = \left(\frac{2}{\pi}\right) \cos\phi^{-1} \left[e^{-f_t} \right] \quad (20)$$

El exponente f_t , se puede calcular de la ecuación (21):

$$f_t = -\frac{B\left(1 - \frac{r_i}{R}\right)}{2\left(\frac{r_i}{R}\right)} \sqrt{1 + \frac{x_i^2}{(1-a_i)^2}} \quad (21)$$

La referencia [7], propone sustituir el valor de $r = r_h$, correspondiente a la zona del encastre del cubo del rotor donde se estiman las pérdidas, por lo que se tiene la ecuación (22).

$$f_h = -\frac{B\left(\frac{r_i}{R} - \frac{r_h}{R}\right)}{2\left(\frac{r_i}{R}\right)} \sqrt{1 + \frac{x_i^2}{(1-a_i)^2}} \quad (22)$$

También en [1], se plantea englobar ambos factores de pérdida en un solo factor expresado por el producto de f_t y f_h dado por la ecuación (23):

$$F = f_t f_h \quad (23)$$

Finalmente se calcula el ángulo de incidencia de corriente modificado por el efecto de las pérdidas en el encastre y en la punta del alabe o pala (ecuación 24), mediante la modificación de la ecuación (13):

$$\phi_{Fi} = \tan^{-1} \left[\frac{1}{x_i} \frac{(1-a_i/F)}{(1+a_i'/F)} \right] \quad (24)$$

El modelo de diseño aerodinámico de los alabes propuesto en esta investigación, concluye con los cálculos de la fuerza de empuje axial (ecuación 25) y la potencia extraída del aire por la turbina (ecuación 26), estimando su coeficiente de potencia, es:

$$\Delta F_Q = \frac{1}{2} \rho W^2 BcC_x \Delta r \quad (25)$$

$$\Delta F_T = \frac{1}{2} \rho W^2 BcC_y \Delta r \quad (26)$$

En este caso C_x y C_y [4, 13], están dados respectivamente por las ecuaciones (27 y 28):

$$C_x = C_L \cos \varnothing_{Fi} + C_d \sin \varnothing_{Fi} \quad (27)$$

$$C_y = C_L \sin \varnothing_{Fi} + C_d \cos \varnothing_{Fi} \quad (28)$$

La potencia de empuje axial sobre el rotor (ecuación 29) y la fuerza de potencia extraída del aire por la turbina (ecuación 30), se calcula sumando la contribución de cada sección de las palas [14]:

$$P = \sum_{i=1}^N \Omega r \Delta F_Q \quad (29)$$

$$F_T = \sum_{i=1}^N \Delta F_T \quad (30)$$

El coeficiente de potencia se calcula de la ecuación (31):

$$C_p = \frac{\sum_{i=1}^N \Omega r \Delta F_Q}{\frac{1}{2} \rho V_0^3 \pi (R^2 - r_h^2)} \quad (31)$$

En la tabla 1, se presentan un resumen de las dos metodologías analizadas en este trabajo en sus aspectos básicos sin tomar en cuenta la parte final, idéntica en ambas, las cuales por facilidad se llamaran metodología 1 y metodología 2. La metodología 1 incluye un mayor número de ecuaciones y la necesidad de calcular en la parte 1 el ángulo de incidencia del viento \varnothing y la distribución cuerdas c , necesarias en la parte 2, sin embargo facilita el proceso de convergencia para el cálculo definitivo de a y a' de la parte 2. La metodología 2 elimina la necesidad de realizar un cálculo preliminar de la distribución de cuerda c , y solo es necesaria la estimación del ángulo de incidencia del viento \varnothing . La ventaja es su sencillez y la eliminación de imprecisiones dadas en aproximaciones por serie y en los procesos de aproximaciones sucesivas para los parámetros a y a' . Esto facilita la automatización en una hoja de cálculo y evita la programación complejidades para realizar el proceso de aproximaciones sucesivas. Por estas razones se selecciona a la metodología 2.

Tabla 1. Resumen de las metodologías de cálculo analizadas

Metodología 1	Metodología 2
1. Resistencia nula $C_d = 0$	1. Resistencia nula $C_d = 0$
Ecuación (3)	Ecuación (6)
Ecuación (4)	Ecuación (8)
2. Resistencia aerodinámica C_d diferente de cero	2. Resistencia aerodinámica C_d diferente de cero
Ecuación (11)	Ecuación (16)
Ecuación (12)	Ecuación (17)
Ecuación (9)	Ecuación (15)
Ecuación (10)	Ecuación (18)
Ecuación (19)	Ecuación (19)

Sistematización del modelo propuesto

En esta parte del trabajo se describen en detalle las etapas seguidas para la sistematización y programación del modelo matemático para el diseño aerodinámico de los alabes de turbinas eólicas de eje horizontal, basándose en la metodología propuesta por Wu (1994), modificadas y adaptadas en este modelo, que incluyen las siguientes etapas[16]:

- Identificación y definición del sistema de estudio.
- Conceptualización del modelo.
- Algoritmo de cálculo.
- Programación del modelo.

Los datos de entrada necesarios son: radio de la pala, velocidad de rotación, altitud sobre el nivel del mar, temperatura ambiente, velocidad media anual del viento, nombre y código del perfil seleccionado, coeficiente de sustentación del perfil para cl/cd , coeficiente de resistencia del perfil para cl/cd máximo.

En el programa se realizan los cálculos previos como son la velocidad de giro Ω , el radio del cubo Rh , la densidad ρ , la viscosidad dinámica μ , la razón ϵ , el área de barrido S y la potencia ideal P_i .

La sistematización del modelo matemático para el diseño aerodinámico de los alabes de turbinas eólicas de eje horizontal, permite una eficaz interacción con el usuario, facilitando las tareas de diseño y análisis de actuaciones. Por otra parte da la flexibilidad de poder modificar algunos o todos los parámetros de diseño y adecuar el mismo a diferentes condiciones de altitud y velocidad del viento en un tiempo relativamente corto. Los valores o parámetros geométricos obtenidos del diseño, pueden exportarse directamente de la hoja de cálculo a un software de diseño mecánico para modelar la pala en tres dimensiones y efectuar análisis de resistencia estructural.

Validación del modelo

El siguiente paso tiene como propósito validar el modelo matemático para el diseño aerodinámico de los alabes de turbinas eólicas de eje horizontal. Para lograrlo se compara la geometría y potencia obtenidas mediante el modelo con los datos de cuatro aerogeneradores comerciales, ubicados en las categorías de baja, mediana, alta potencia y multimega watts.

La metodología a seguir para la validación del modelo propuesto en este trabajo se hace mediante un análisis comparativo en lo referente a la geometría y la potencia generada, para aerogeneradores de 1 MW y 3 MW. Fueron seleccionados los aerogeneradores de la empresa alemana Euros1, modelos EU 53.1400.1-B y el EU 100.2300-B. Se tomaron los de los alabes de estos aerogeneradores y se seccionaron en 21 secciones y se tomaron mediciones de las cuerdas, para luego proceder a dividir las por la envergadura indicada en el esquema. Estas razones de c/R se multiplicaron luego por el radio real de cada pala y así obtener una distribución aproximada de cuerda.

Se puede observar del gráfico de distribución de cuerdas de la figura1, que las cuerdas de la pala ER-1-2009 hasta la décima estación son mucho mayores que las correspondientes al modelo comercial y, a partir de ahí, las cuerdas del ER-1-2009 son menores. La razón de esta diferencia puede deberse al tipo de perfil aerodinámico empleado en ambos modelos y a los errores de medición en el esquema del alabe comercial. Sin embargo la mayor diferencia se encuentra en la zona cercana al encastramiento con el cubo del rotor. En los modelos comerciales es común observar que una distribución de cuerdas de menores dimensiones en la zona cercana al encastramiento del alabe, se debe a los siguientes aspectos:

- No hay un aporte significativo a la rigidez estructural.
- El aporte a la potencia total generada es muy bajo.
- Una distribución de cuerdas de acuerdo a los diseños con modelos teóricos, aumentaría el peso lo cual aumentaría las fuerzas de inercia centrífugas, sometiendo la pala a esfuerzos axiales mayores.

En el figura 2, se puede observar el mismo comportamiento para el modelo ER-2-2009 y el correspondiente al alabe comercial EU 100.2300-B, para las distribuciones de cuerdas respectivas. Las razones expuestas, inducen a los fabricantes a modificar la geometría de los álabes o palas, linealizando y disminuyendo el ancho de las cuerdas en una zona cercana al encastramiento entre un 10 y un 20 % en porcentaje del radio total de la pala. En otros casos se seleccionan formas en planta trapezoidales ajustando una distribución de cuerdas menor en la primera mitad y luego mayor desde la mitad hacia las puntas.

Las comparaciones de distribución de cuerda entre las turbinas comerciales y las diseñadas con el modelo propuesto, muestran una diferencia aceptable con pequeñas discrepancias básicamente en la zona de la raíz del alabe, debido

¹ EUROS fue fundado en 1996 en Berlín, Alemania, como un departamento de desarrollo para las palas de aerogeneradores. En el 1999 la primera empresa de producción fue fundada y en 2008 se fundó la segunda en el sur de Polonia.

posiblemente al uso de perfiles aerodinámicos más eficientes en las comerciales. Las curvas de potencia muestran un comportamiento similar a cualquier turbina comercial y los valores del coeficiente de potencia están dentro de límites aceptables oscilando en promedio alrededor del 0,37. El modelo modificado permite evaluar otras configuraciones o distribuciones de cuerda, con el propósito de optimizar el diseño y reducir las cargas inerciales y reducir el peso de las mismas.

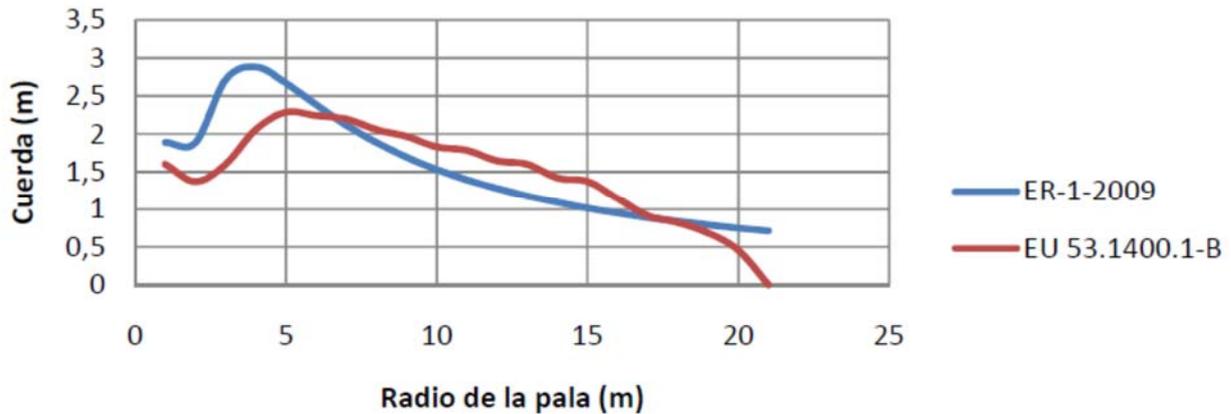


Fig. 1. Distribución de cuerdas de los modelos ER-1 y EU 53.1400.1-B

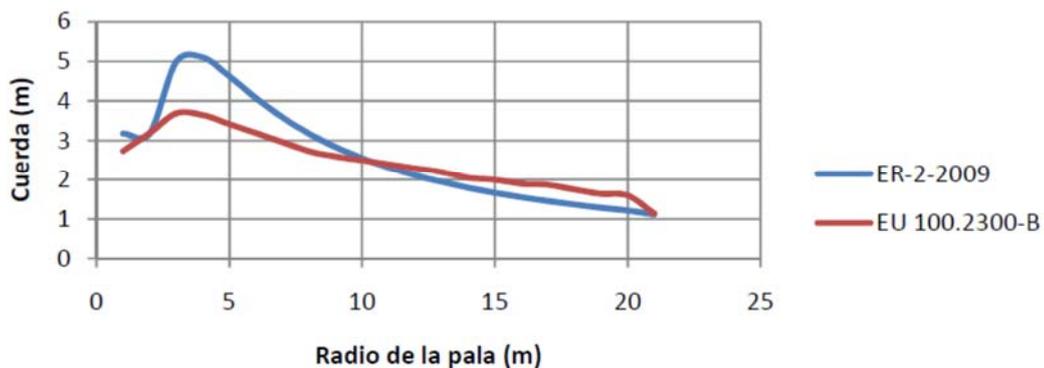


Fig. 2. Distribución de cuerdas de los modelos ER-2 y E100.2300-B

CONCLUSIONES GENERALES

- La elaboración de un modelo matemático a partir de modelos propuestos por otros investigadores, ha permitido conformar un programa de computación, que diseña aerodinámicamente los álabes de las turbinas eólicas de eje horizontal de cualquier capacidad, en el menor tiempo y de una manera más sencilla. Esto se demuestra en las comparaciones hechas con álabes diseñados por firmas comerciales reconocidas empleando paquetes informáticos actuales.
- El cálculo de las curvas de potencia empleando el modelo propuesto en el trabajo, conllevó a resultados satisfactorios, visto esto en los valores de los coeficientes de potencia resultantes, que se encuentra en el rango de los alcanzados en las turbinas más modernas.
- El modelo puede ser empleado para el diseño y cálculo de las curvas de potencia para pequeños y grandes aerogeneradores, lo que se demuestra en las aplicaciones hechas en el trabajo para una pequeña turbina de 1 kW y una mega turbina de 3 MW.
- El programa para el cálculo de las curvas de potencia es flexible por cuanto permite introducir distribuciones de cuerdas, otros tipos de perfiles aerodinámicos y evaluar su comportamiento.

REFERENCIAS

- [1]. Schubel Peter J., Crossley Richard J. Wind Turbine Blade Design, Energies. Energies. 2012;5:3425-3449. ISSN 1996-1073. DOI 10.3390/en5093425.

- [2]. B. Chi-Jeng, W. Wei-Cheng, Ch. Po-Wei. System Integration of the Horizontal-Axis Wind Turbine: The Design of Turbine Blades with an Axial-Flux Permanent Magnet Generator. *Energies*. 2014;7(11):7773-7793. ISSN 1996-1073. DOI 10.3390/en7117773.
- [3]. M. Baldomero P. Análisis de diferentes álabes de un aerogenerador para oxigenar estanques de peces. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 2012;3(4):617-623. ISSN 2007-9230.
- [4]. C. Xin, Z. Jie, P. Pan, et al. Estructural Optimization Design of Horizontal-Axis Wind Turbine Blades Using a Particular Swarm Optimization Algorithm and Finite Element Method. *Energies*. 2012;5. ISSN 1996-1073.
- [5]. B. Chi-Jeng, W. Win-Cheng, Ch. Po-Wei, et al. The Performance Test of Three Different Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) Blade Shapes Using Experimental and Numerical Methods. *Energies*. 2013;6(6):2784-2803. ISSN 1996-1073. DOI 10.3390/en6062784.
- [6]. E. Kulunk., Yilmaz N. HAWT Rotor Design and Performance Analysis. En: *ASME 3rd International Conference on Energy Sustainability*. San Francisco, CA, USA. ASME. p. 1019-1029. ISBN 978-0-7918-4890-6. DOI 10.1115/ES2009-90441.
- [7]. Manwell J.F., J.G. McGowan, A.L. Roger. *Aerodynamics of Wind Turbines, Wind Energy Explained: Theory, Design and Application*. 2nd edition ed. Great Britain: JOHN WILEY & SONS, LTD; 2010. pp. 83-138. ISBN 0 471 49972 2.
- [8]. Yang J., Peng C., Xiao J., et al. Application of videometric technique to deformation measurement for large-scale composite wind turbine blade. *Applied Energy*. 2012;98:292-300. ISSN 03062619 (ISSN). DOI 10.1016/j.apenergy.2012.03.040.
- [9]. Ward Alan, Jorba Josep. Harmonic buffeting in a high-altitude ridge-mounted triblade Horizontal Axis Wind Turbine. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2013;121(0):106-115. ISSN 0167-6105. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jweia.2013.08.004>.
- [10]. Rolland S., Newton W., Williams A. J., et al. Simulations technique for the design of a vertical axis wind turbine device with experimental validation. *Applied Energy*. 2013;111(0):1195-1203. ISSN 0306-2619. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.04.026>.
- [11]. Korobenko A., Hsu M. C., Akkerman I., et al. Aerodynamic Simulation of Vertical-Axis Wind Turbines. *Journal of Applied Mechanics*. 2013;81(2):021011-021016. ISSN 0021-8936. DOI 10.1115/1.4024415.
- [12]. Eggleston David M, Stoddard Forrest. *Wind turbine engineering design*. 1st ed 1987. ISBN 978-0442221959
- [13]. Burton Tony, Jenkins Nick, Sharpe David, et al. *Wind Energy Handbook*: John Wiley & Sons, Ltd; 2011. 728 p. ISBN 9781119992714.
- [14]. Bertagnolio Franck, Sørensen Niels N, Johansen Jeppe, et al. *Wind turbine airfoil catalogue*. 2001.
- [15]. Singh Ronit K., Ahmed M. Rafiuddin. Blade design and performance testing of a small wind turbine rotor for low wind speed applications. *Renewable Energy*. 2013;50(0):812-819. ISSN 0960-1481. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2012.08.021>.
- [16]. Fischer Gunter Reinald, Kipouros Timoleon, Savill Anthony Mark. Multi-objective optimisation of horizontal axis wind turbine structure and energy production using aerofoil and blade properties as design variables. *Renewable Energy*. 2014;62(0):506-515. ISSN 0960-1481. DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2013.08.009>.

AUTORES

Julio José Chirinos García

Ingeniero Aeronáutico, Máster en Ingeniería Mecánica Mención Fuentes Renovables de Energía Universidad Nacional Experimental (UNEFM), Complejo Académico El Sabino, Área de Tecnología, Punto Fijo, Estado de Falcón, República Bolivariana de Venezuela.

e-mail: jchirinos20@gmail.com

Conrado Moreno Figueredo

Ingeniero Mecánico, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables, CETER, Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría, Cujae. La Habana, Cuba.

e-mail: conrado@ceter.cujae.edu.cu

Joel Morales Salas

Ingeniero Mecánico, Master en Ciencias, Profesor Auxiliar, Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables, CETER, Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría, Cujae. La Habana, Cuba.

e-mail: jmorales@ceter.cujae.edu.cu