

# **Estudio aerodinámico de los coeficientes de sustentación y arrastre para pequeños aerogeneradores.**

## **Aerodynamic study of sustentation and drag coefficients for small wind turbine**

**Ernesto Yoel Fariñas Wong\* , Sergio Jauregui Rigo\*.**

**\* Universidad Central de Las Villas, Centro de Estudios Energéticos y Tecnologías Ambientales CEETA. Carretera a Camajuaní km 5,5, Santa Clara, Villa Clara, Cuba, CP: 54830. Telf: 5342281194.**

**Palabras claves: Pequeños aerogeneradores, coeficientes aerodinámicos no lineales,**

**Key words: small wind turbine, nonlinear aerodynamic coefficients**

**\*[farinas@uclv.edu.cu](mailto:farinas@uclv.edu.cu)**

### **Resumen:**

En la presente investigación se realizó una valoración sobre los métodos para el análisis de los sistemas de orientación de en pequeñas aeroturbinas de eje horizontal, con la finalidad de mejorar la captación de la energía eólica actualizando los procedimiento metodológico para el desarrollo de los sistemas de orientación de estas máquinas, mediante la utilización de coeficientes de sustentación y arrastre de comportamiento variable en función de la razón de aspecto.

### **Abstract:**

In the present study was carried out an assessment of methods for the analysis of guidance systems in small horizontal axis wind turbines, in order to improve the capture of wind energy by updating the methodological approach for the development of guidance systems of these machines, using lift and drag coefficients of variable behavior depending on the aspect ratio.

## Introducción

Según Sagrillo (1997) el desarrollo de los pequeños aerogeneradores se ha visto limitado por la poca profundidad en el análisis de los fenómenos aerodinámicos, por lo que puntualiza la necesidad de un análisis específico sobre los sistemas de orientación y protección, los que han sido en general deficientes provocando problemas aeroelásticos en el rotor, la torre y el generador eléctrico, así como ruido aerodinámico, reflejo de las pérdidas en la captación de energía del viento.

Gipe (2000) planteó que para revertir la situación era necesario un estudio tanto analítico como experimental de los sistemas de orientación y protección utilizados en estas máquinas. En este marco Piggott (2001) propone la utilización del “sistema de orientación y protección por momento de cola” (*SOPMC*) en aerogeneradores de eje horizontal con rotor frente al viento, versiones de este sistema se estudiaron en diferentes prototipos por Corbus (2006) y Bikdash (2004); estos reportes concluyen que la utilización del sistema propuesto por Piggott (2001) era viable, sin embargo, para aumentar la eficiencia y atenuar los problemas aeroelásticos presentes en los prototipos ensayados era necesario el desarrollo de métodos que tuvieran en consideración la aerodinámica para el cálculo de la veleta de cola, debido a que esta se había convertido en un componente activo en la regulación y no solo como un elemento para la orientación o decorativo.

En la Mas y Batet (2006) publican un procedimiento para el cálculo y análisis de aerogeneradores con *SOPMC*, este tiene en consideración las recomendaciones antes expuestas, sin embargo, los coeficientes aerodinámicos de sustentación y arrastre que influyen sobre la veleta del sistema de orientación y protección son asumidos constantes para cualquier velocidad del viento y posición de la veleta, tratamiento que los autores consideran una limitación del procedimiento, debido a que el valor de los coeficientes influyen en el posicionamiento del rotor y la cola respecto al viento, el cual si es incorrecto provocará pérdidas en la captación de la energía del viento así como la ocurrencia de problemas aeroelásticos.

Los autores consideran que es posible modificar el procedimiento planteado por Mas y Batet (2006), mediante la utilización de coeficientes de sustentación y arrastre de comportamiento variable los cuales

deben mejorar el posicionamiento del rotor y la cola e influir positivamente en la eficiencia de la máquina por la reducción de los problemas aeroelásticos.

## Material y Método

La propuesta de Piggott (2001) como sistema de orientación y protección en pequeños aerogeneradores tropezó con la inexistencia de un aparato analítico para su desarrollo, condiciones que determinaron que el sistema fuera dimensionado mediante pruebas de campo por tanteo y error (Fariñas 2004) utilizando las dimensiones de otros sistemas, haciendo tedioso, impreciso y costoso llegar a configurar el sistema. En base a esta situación fue desarrollado el procedimiento de Mas y Batet (2006), dicho procedimiento se basa en determinar los ángulos formados entre el eje del rotor ( $\gamma$ ) y el de la cola ( $f$ ) para diferentes velocidades del viento a partir de las características geométricas de la aeroturbina, con el valor de estos ángulos se procede a determinar la curva de potencia de la máquina.

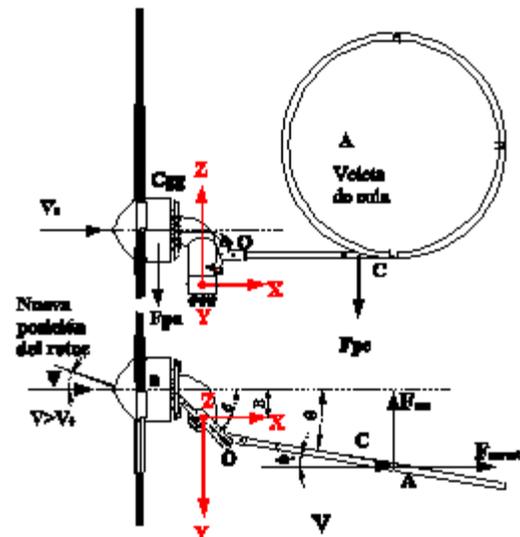


Figura 3 Esquema de fuerzas sobre la cola del aerogenerador *CEETA-01*.

Hasta la presentación de esta propuesta el procedimiento analítico aceptado para estos cálculos es el planteado por Mas y Batet (2006), e en opinión del autor dicho procedimiento presenta limitaciones relacionadas con el tratamiento aerodinámico de la veleta de cola, las cuales son corregibles mediante la utilización de métodos numéricos y coeficientes aerodinámicos variables. El procedimiento de Mas y Batet (2006) utiliza la teoría de Betz para el cálculo del rotor omitiendo de esa forma las características del rotor y su influencia sobre la corriente que toca la cola. En base a estas limitaciones se realiza un

estudio del comportamiento de los coeficientes aerodinámicos variables para su inclusión en el procedimiento.

Coeficiente aerodinámico de sustentación lineal  
Las veletas de cola de los sistemas de orientación y protección de pequeñas aeroturbinas generalmente poseen figuras geométricas conocidas con características aerodinámicas estudiadas en túneles de viento. Debido a la similitud y los análisis de placas planas realizados en experimentos de aerodinámica, en este trabajo se considera la veleta de cola del SOPMC como una placa plana inmersa en un fluido, extendiendo así la teoría a la aplicación práctica en el cálculo de aerogeneradores.

A principios del siglo pasado Ludwig Prandtl planteó (ecuación 1) como caracterizar el coeficiente de sustentación ( $C_L$ ) de una placa plana con  $AR < 3$  y flujo laminar.

$$C_L = \frac{C_{l\phi}}{1 + \frac{C_{l\phi}}{\pi AR}(1 + \tau)} \quad \text{donde: } \tau = 0 + 0,6 \quad C_{l\phi} = 2\pi$$

(1)

$$AR = \frac{L^2}{S_c} \quad (2)$$

$L$ : longitud característica  
 $S_c$ : área expuesta al flujo

Sobre este mismo tema Katz y Plotkin (2001) abordan el cálculo del coeficiente de sustentación estático, ecuación 3, para valores de  $AR \ll 1$  y ángulos de ataques  $f < 5^\circ$ .

$$C_L = \frac{\pi}{2} AR \phi \quad (3)$$

El autor considera que no es viable la utilización de estas teorías en el análisis del SOPMC, debido a que el ángulo  $\phi$  es por lo general mayor a cinco grados, el flujo está perturbado por la presencia del rotor y la torre, mientras que la razón de aspecto para el aerogenerador CEETA-01 varía de 3 a 9. Coeficiente de sustentación no lineal

En trabajos publicados en el siglo anterior por Bartlett y Vidal (1955), Polharmus (1966) y Lamar (1976) plantean distintos modelos matemáticos para describir la no linealidad del coeficiente de sustentación a través de la adición de términos relacionados con el ángulo de ataque.

Bartlett y Vidal (1955) refieren la ecuación 4 para lograr la curva de  $C_L$  vs  $f$  mediante una aproximación polinómica de segundo orden, la cual puede ser empleada en geometrías tan disímiles como alas deltas, placas rectangulares y alas rectangulares delgadas, presenta como restricción valores de  $AR < 3$  y números de Reynolds por debajo de  $10^4$ .

$$C_L = C_{L\phi} \phi + C_{DC} \phi^2 \quad (4)$$

La restricción viene dada por la determinación de la constante independiente  $C_{L\phi}$  pendiente de la curva de sustentación y se determina mediante la ecuación 5, mientras que el coeficiente de flujo cruzado  $C_{DC}$  se determina por la ecuación 6, este último no presenta restricciones en cuanto a la razón de aspecto y número de Reynolds.

$$C_{L\phi} = 1,97 AR^{0,72} \quad (5)$$

$$C_{DC} = 2,82 AR^{-0,98} \quad (6)$$

Polhamus (1966) utiliza para el cálculo del coeficiente de sustentación en placas rectangulares, circulares y ... ecuación 7, donde  $K_p$  es el coeficiente potencial de sustentación, el cual es función de  $AR$  y la forma del borde de ataque,  $K_v$  que es el coeficiente de vórtice de sustentación.

$$C_L = K_p \text{sen} \phi \cos^2 \phi + K_v \cos \phi \text{sen}^2 \phi \quad (7)$$

Cuando se desprecia la acción del arrastre por fricción el coeficiente de arrastre ( $C_{D0}$ ) producto de esta consideración puede ser calculado en la ecuación 8:

$$C_{D0} = C_L \tan \phi \quad (8)$$

Para los cuales Polhamus (1966) definió los términos  $K_p$  y  $K_v$  en función de la razón de aspecto, en las ecuaciones 9 y 10.

$$K_p = 0,0051 AR^2 + 0,2406 AR + 1,31 \quad (9)$$

$$K_v = 3,41 e^{0,034 AR} \quad (10)$$

Lamar (1976) extiende los trabajos de Polhamus (1966) a otras geometrías y a bordes laterales, los

vórtices de sustentación en los bordes laterales se estiman de la misma manera que los de succión en el borde de ataque, expresándose el coeficiente de sustentación mediante la ecuación 11.

$$C_L = K_p \sin \phi \cos^2 \phi + (K_{v,le} + K_{v,se}) \cos \phi \sin^2 \phi \quad (11)$$

El término  $K_{v,le}$  es igual a  $K_v$  de la ecuación 7, que representa la sustentación generada por el borde de ataque y  $K_{v,se}$  es la parte del vórtice de sustentación generado por el borde lateral.

La utilización de la ecuación 11 tiene la dificultad que los coeficientes  $K_{v,le}$  y  $K_{v,se}$  aún se encuentran poco caracterizados y sus valores difieren considerablemente de un reporte a otro, por lo que los autores no recomienda aún la utilización de dicha ecuación, propone utilizar en el análisis de la cola de los pequeños aerogeneradores la ecuación 7 de Polhamus (1966), la cual está mejor caracterizada y ha sido empleada por varios autores (Wood, 1991; Prado, 2007) en otras ramas de la ingeniería para el cálculo de los coeficientes de sustentación con buenos resultados.

**Coeficiente de arrastre en función de la sustentación**  
La razón del coeficiente de arrastre y el de sustentación en la cola del aerogenerador es fundamental para que exista un buen control sobre la posición de la máquina. El arrastre está compuesto por el arrastre parásito y el arrastre inducido. El arrastre parásito es generado por la fricción superficial, la cual es despreciable en superficies pulidas (Prado, 2007) <sup>6</sup>, mientras que el arrastre de forma o arrastre de presión se convierte en una función del ángulo de ataque y del área expuesta al fluido. El cálculo del arrastre inducido si es derivado de la teoría del comportamiento lineal de la sustentación puede obtenerse mediante la ecuación 12.

$$C_D = \frac{C_L^2}{\pi(AR)\tau} \quad (12)$$

Siendo comúnmente expresada la relación entre los coeficientes de sustentación y el de arrastre por la polar de arrastre en la forma de la ecuación 13

$$C_D = C_{D0} + DiC_L^2 \quad (13)$$

$C_{D0}$  es determinado por la ecuación 8 y el parámetro  $Di$  factor de arrastre inducido, ecuación 14, el cual depende del factor de eficiencia  $t$ .

$$Di = \frac{1}{\pi(AR)\tau} \quad (14)$$

Para cuerpos simétricos, el segundo término de la ecuación 13 es el mismo que el de la ecuación 12, pero la constante  $Di$  incluye la contribución del arrastre parásito y del arrastre inducido. La ecuación 13 es utilizada para aproximar el arrastre. Mediante el análisis realizado es posible determinar los coeficientes de sustentación y de arrastre con un comportamiento no lineal para diferentes ángulos de ataques en base a una geometría predeterminada y número de Reynolds calculado en función de la velocidad y la magnitud característica de la veleta de cola, siendo viable su introducción en el procedimiento de cálculo desarrollada por Mas y Batet (2006) para el desarrollo de sistemas de orientación en pequeños aerogeneradores, cálculo que debe redundar en el mejoramiento de las condiciones aeroelásticas de las pequeñas turbinas eólicas

### Conclusiones

El análisis de los sistemas de orientación se ha basado fundamentalmente en ensayos de campo por tanteo y error, mientras que los procedimientos metodológicos desarrollados para su análisis presentan limitaciones con la aerodinámica de la veleta de cola y con el análisis del rotor.

Es necesario reducir los problemas aerodinámicos de los sistemas de orientación expuestos en esta investigación por las simulaciones numéricas, debido a que estos favorecen el incorrecto posicionamiento del rotor y la cola respecto a la dirección del viento contribuyendo a la baja eficiencia de los pequeños aerogeneradores.

El procedimiento metodológico planteado por Mas y Batet para el análisis de los pequeños aerogeneradores con SOPMC presenta limitaciones debido al empleo de coeficientes aerodinámicos de valor constante para el análisis de la cola, dichos coeficientes en opinión del autor deben ser variables en función de la razón de aspecto de la veleta.

### Bibliografía

1. Bartlett, G.E. y Vidal, R.J., (1955) "Experimental investigation of influence of Edge Shape on The

- Aerodynamic Characteristics of Low Aspect Ratio  
..... *Journal of the Aeronautical Sciences*, 34, pp 34-41. ISSN: 0022-4650
2. Bikdash, M.; Chen, D. A. y Harb, M., (2004) "A Hybrid Model of a Small Autofurling Wind Turbine", *Journal of Vibration and Control*, Vol. 7, pp.127-148. ISSN: 1392-2114
3. Corbus, D.; Meadors, M., (2006) "Small Wind Research Turbine", October 2006, Final Report Technical Report NREL/TP-500-38550, <http://www.osti.gov/bridge>,
4. Fariñas, E., (2004) "Generador de imanes permanentes para aplicaciones industriales". Revista Centroazucar, No 4, 2004, Universidad Central de las Villas, Santa Clara, Cuba. 2004, pp 46-50. ISBN: 02535757
5. Gipe, P., (2000) "Noise from Small Wind Turbines: An Unaddressed Issue", en Chelsea Green
6. Katz, J.; Plotkin, A., (2001.) *Low-Speed Aerodynamics*, Second Edition, Editorial Cambridge
7. University Press, Cambridge. Pp. 243 ISBN: 978-0-521-87144-0
8. Lamar, J.E., (1976) "Prediction of vortex flow characteristics of wings at subsonic and supersonic speeds". *Journal of Aircraft*. 21, pp 56-79. ISSN: 0002-2667
9. Mas, V.E. y Batet, L.I.M., (2006.) Estudio mecánico del aerogenerador T 100.
10. Piggott, H., (2001) *Cómo construir un generador eólico*, traducción al castellano, Editorial Scoring Wind, United Kingdom, pp. 73-108. ISBN: 9780975197059
11. Polhamus, E.C., (1966.) "A concept of the vortex lift of sharp-edge delta wings based on a leading-edge suction analogy", NASA TN D-3767
12. Prado, R. A., (2007) *Development of a code for the viscous-inviscid interaction oriented to turbomachinery*, Tesis de Doctorado de la Universidad de Buenos Aires, Área Ingeniería, Argentina.
13. Sagrillo, M., (1997) "Small Wind Generators and Noise", *Windletter*, February/March 1997. ISSN: 0036-8075
14. Wood D.H. (1991) A three-dimensional analysis of stall-delay on a horizontal-axis wind turbine.
15. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 37, pp.1-14. ISBN: 89-97782-58-9.