

Diseño de palas de aerogeneradores de eje vertical con ángulo de ataque variable

¹Flavio Díaz Canul, ¹J.O. Aguilar, ¹J. Hernández R, ¹F. Chan, ¹G. Becerra, ²O.A. Jaramillo

¹Universidad de Quintana Roo, México

Blvd. Bahía s/n Esq. Ignacio Comonfort, Col Del Bosque, Chetumal Quintana Roo

Tel. 983-503-28. Email: 1518010@uqroo.mx, ovidio@uqroo.edu.mx

²Instituto de Energías Renovables, UNAM

Privada Xochicalco s/n col. Centro, Temixco, Mor. CP 62580

Resumen

Se presenta el diseño mecánico de palas de aerogenerador de eje vertical con perfil aerodinámico variable. Se presentan dos propuestas de diseño, la primera consiste en un tren de engranes de tres etapas y una cremallera, que dan movimiento a la cola del perfil aerodinámico, la segunda propuesta consiste en un tornillo sinfín y una tuerca. Se realizó un análisis cinemático para evaluar el desplazamiento angular necesario en el servomotor para mover la cola del perfil a cinco diferentes ángulos de ataque. Además, se determinaron los coeficientes de sustentación para diferentes ángulos de ataque, utilizando modelos 2D y 3D. Se encontró el coeficiente de sustentación máximo fue para un AoA de 10.05 y el mínimo para un AoA de 4.95°.

Abstract

The mechanical design of vertical axis wind turbine (VAWT) with variable aerodynamic profile is presented. Two proposal of airfoil design are presented, the first one use a three-stage gear train coupled a linear gear, which give movement to the tail of aerodynamic profile. The second one consist a worm and nut which provide similar linear movement that first proposal. A kinematic analysis was performed to evaluate the angular displacement necessary in the servomotor to move the tail of the profile, for five different angles of attack, AoA. The maximum lift coefficient was found for an AoA of 10.05° and the minimum for an AoA of -4.95°.

Palabras clave: aerogenerador de eje vertical, ángulo de ataque, dinámica de fluidos computacional, diseño mecánico, perfil aerodinámico.

Keywords: vertical axis wind turbine (VAWT); angle of attack; computational fluids dynamic; mechanical design; airfoil.

Introducción

De acuerdo con el balance nacional de energía 2017 de México [1], las energías renovables representaron el 9.5% de la producción de energía primaria, poco más de la sexta parte de la obtenida con petróleo crudo. Aunque México cuenta con zonas con buen recurso eólico (> 5 m/s) la energía eólica representa solo el 6.3% de las energías renovables. Lo anterior se debe a que la inversión inicial es muy grande, aunado a la carencia de terrenos para la instalación de los aerogeneradores.

Una forma de aprovechar la energía eólica, sin grandes inversiones, es utilizando aerogeneradores de eje vertical, que son idóneos para zonas con bajo recurso eólico, ya que pueden operar con velocidades de viento de 1 m/s, según su tipo.

Los aerogeneradores de eje vertical tipo Darrieus han ganado mucha popularidad en el mercado de la energía eólica debido a la reducida variación del coeficiente de potencia, bajas emisiones de ruido y alta confiabilidad [2]. Sin embargo, es necesario elegir el diseño y geometría adecuado de perfil aerodinámico de acuerdo con el recurso eólico disponible en el lugar donde se instalará, con el objetivo de aprovechar de forma óptima la potencia y maximizar la eficiencia del aerogenerador.

Cuando el aire incide en el perfil aerodinámico y se tiene un ángulo de ataque cercano a 0° , el aire pasa equidistante a la superficie del perfil, aumentando su velocidad en la parte superior y disminuyéndola en la parte inferior. La presión es inversamente proporcional a la velocidad, por tanto, la presión en la parte superior del perfil será menor que en la parte inferior. Esta diferencia de presiones ocasiona una fuerza ascendente, también llamada fuerza de sustentación, que es la que hace que los aviones se eleven y que las palas de los aerogeneradores giren para producir energía eléctrica.

Si el ángulo de ataque en el perfil es acusado, se genera turbulencia en la parte superior del perfil, generando una fuerza de arrastre que ocasiona una reducción de velocidad en el aerogenerador y, por tanto, una reducción en su potencia de salida. En la Figura 1 se puede observar el efecto que tiene el ángulo de ataque en los perfiles aerodinámicos de un aerogenerador [3].

Existen diversos trabajos reportados sobre el análisis aerodinámico de perfiles para aerogeneradores [4-6], en donde presentan los resultados numéricos y experimentales de coeficientes de sustentación, arrastre y potencia entre otros parámetros. Otros más, relacionados a esta investigación, presentan diseños con geometría variable del perfil aerodinámico, como el reportado por Escárpita y colaboradores [7]. En esta investigación proponen el diseño de un perfil aerodinámico con borde de salida flexible, que es actuado por cables de aleación de memoria de forma. Los resultados numéricos fueron validados con los experimentales. En otro trabajo similar, Elkhoury, Kiwiata y Aoun presentan el diseño de un aerogenerador de eje vertical con paso (pitch) variable [8], que fue evaluado en túnel de viento para determinar el efecto de la velocidad del viento, la forma del perfil aerodinámico y el mecanismo de paso variable, en el desempeño de la turbina.

Este trabajo se enfoca en diseñar un prototipo de pala de aerogenerador de eje vertical (VAWT por sus siglas en inglés) con ángulo de ataque variable. El perfil de la pala se seccionó en dos partes, una parte fija (frontal) y una parte móvil (cola). El centro de rotación está a 2/3 de la longitud de la cuerda, midiéndola de punta a cola. Se seleccionó el perfil FX63-137 para el diseño del perfil, ya que es el más utilizado en este tipo de dispositivos. La cuerda del perfil tiene 0.15 m.

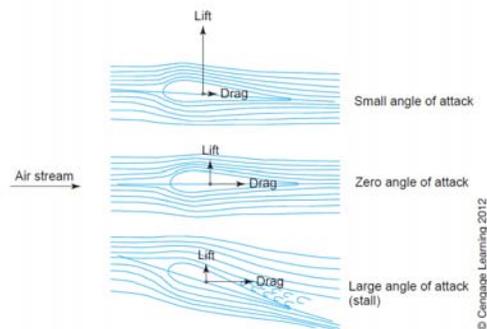


Figura 1.- Efecto del ángulo de ataque en las fuerzas de sustentación y arrastre de un perfil aerodinámico [3].

Desarrollo

Descripción del perfil aerodinámico

Debido a sus características, el perfil FX63-137 resulta adecuado para aplicaciones de aprovechamiento de energía en zonas con bajo recurso eólico, ya que presenta un mejor desempeño con bajo número de Reynolds. En la Figura 2 se muestran las características.

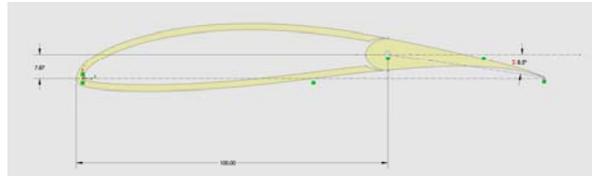


Fig. 2.- Perfil FX63-137 con mecanismo de movimiento en cola, cotas en mm.

Para el diseño de los mecanismos se propuso un desplazamiento máximo de -10 grados, se presentan dos propuestas que permiten el cambio de ángulo de ataque. Como se observa en la Figura 2, el ángulo de ataque (AoA) es de 0° con respecto a la punta de este, y de 8.5 grados con respecto al centro de rotación de la cola. Por tanto, un ángulo de ataque de 0° corresponde a un ángulo de -8.5° en la cola.

Modificación del ángulo de ataque

Debido al diseño del perfil seccionado en el cual el desplazamiento angular en la cola determina el ángulo de ataque es necesario relacionar este desplazamiento con el ángulo de ataque obtenido en el perfil.

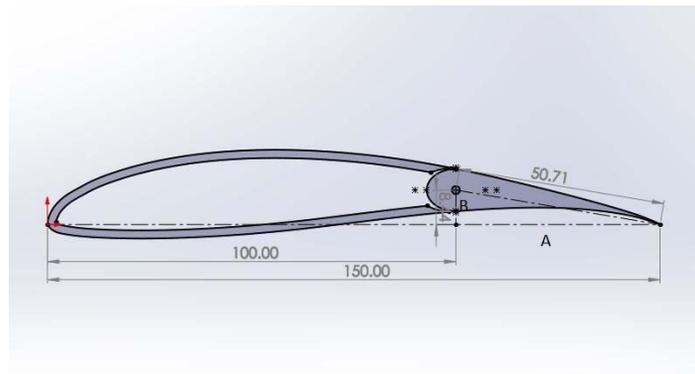


Fig. 3.- dimensiones del perfil, cotas en mm.

Considerando el triángulo rectángulo formado por el punto de rotación de la cola, el borde de salida del perfil y la recta vertical entre el punto de rotación y la cuerda del perfil, se pueden deducir las siguientes relaciones:

El ángulo interno inicial del triángulo en el vértice del punto de rotación es:

$$\beta = \tan^{-1} \frac{50}{8.44} = 80.4187^\circ$$

Con lo cual los catetos están definidos por:

$$A = 50.71 \sin(80.4187^\circ)$$

$$B = 50.71 \cos(80.4187^\circ)$$

La magnitud del cateto A representa la distancia entre el punto de rotación de la cola y el borde de salida del perfil en el eje x, de forma análoga, la magnitud del cateto B representa la distancia en el eje y entre estos puntos.

Considerando que la cola se desplaza angularmente una distancia ω desde el ángulo inicial β (positivo en el sentido horario), se reescriben las relaciones de tal forma que resulta:

$$A = 50.71 \sin(80.4187^\circ + \omega)$$

$$B = 50.71 \cos(80.4187^\circ + \omega)$$

Para obtener la distancia en x e y del borde de salida desde el borde de ataque se considera las coordenadas del punto de rotación de la cola C=(100,8.44) desde el borde de ataque, con lo cual se obtiene:

$$x = 100 + 50.71 \sin(80.4187^\circ + \omega)$$

$$y = -8.44 + 50.71 \cos(80.4187^\circ + \omega)$$

Finalmente el ángulo de ataque α se obtiene con la relación:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{-8.44 + 50.71 \cos(80.4187^\circ + \omega)}{100 + 50.71 \sin(80.4187^\circ + \omega)}$$

Para la simulación en Ansys Fluent se varió el ángulo ω con intervalos de 5° con lo cual se obtuvieron los siguientes valores de ángulo de ataque:

Desplazamiento angular en la cola β	Angulo de ataque del perfil α
-15	-5.023
-10	-3.345
-5	-1.67
0	0
5	1.662
10	3.312
15	4.949
20	6.568
25	8.165
30	9.738

Diseño mecánico, propuesta 1.

El primer mecanismo consiste en un servomotor acoplado a un tren de engranes, se decidió realizar este diseño con la finalidad de modificar la relación de velocidad, de tal forma que se reduzca el desplazamiento y velocidad a la salida y se obtenga un incremento en el torque, el tren de engranes se complementa con una cremallera que transmite el movimiento a la cola. Esta configuración ofrece la ventaja de un control más preciso, debido a la reducción del desplazamiento angular a la salida del tren de engranes. Para el diseño se consideró una reducción de 9:1, que corresponde con un desplazamiento de 180 grados del servomotor a la entrada y un desplazamiento de 20 grados a la salida. En la literatura se menciona que dos etapas pueden ofrecer una relación de hasta 100:1 [9], pero debido al reducido espacio en el interior de la pala se decidió usar tres etapas de tal forma que se reduzca el diámetro de los engranes, cada una de las etapas tiene una relación de reducción de velocidad de 2.08:1. Utilizando el software SolidWorks se diseñaron los engranes, utilizando un módulo $m=0.5$ y un número de dientes N_2 mínimo de 12 para los piñones de tal forma que se eviten problemas de interferencia, el diámetro d_2 del piñón se determinó de acuerdo a la ecuación 1.

$$D_2 = mN_2 \text{ (mm)} \quad (1)$$

Se obtuvo un valor de diámetro de piñón de 6 mm, considerando que cada etapa debe de tener una relación de velocidad RV de 2.08 y el engrane debe tener el mismo modulo m del piñón, utilizando la ecuación 2 es posible conocer el número de dientes del engrane N_3 .

$$N_3 = N_2RV \quad (2)$$

De esta forma se obtiene un valor de 25 dientes (valor redondeado) para los engranes, con un diámetro de 12.5 mm. En la Figura 3 se muestra el mecanismo de tren de engranes y cremallera.

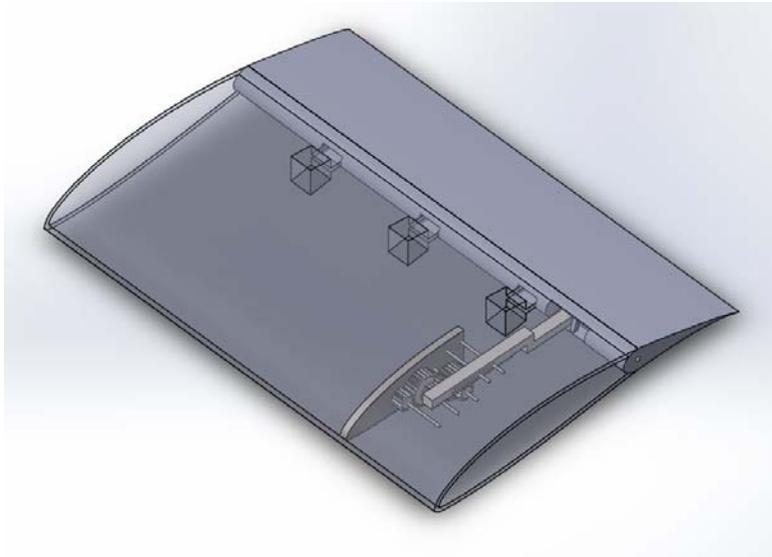


Fig. 3.- Pala de aerogenerador con mecanismo de tren de engranes.

La distancia L recorrida por la cremallera está en función del diámetro del piñón d_2 al cual se encuentra acoplado y el desplazamiento angular del engrame de salida β , puede ser determinada por la ecuación:

$$L = \beta d_1 (mm) \quad (3)$$

Considerando la relación de velocidad entre la entrada y la salida del tren de engranes, el desplazamiento lineal de la cremallera se puede escribir en términos del desplazamiento angular α en la entrada del tren de engranes.

$$L = \frac{1}{9} \alpha d_2 (mm) \quad (4)$$

Diseño mecánico, propuesta 2.

El segundo mecanismo diseñado consiste en un tornillo sinfín acoplado a una tuerca que transmite el movimiento a la cola, el tornillo tiene un diámetro de 2 mm con un paso de 0.4 mm que corresponde a la designación M2 de rosca métrica ISO DIM 13. De acuerdo con las características de esta estandarización por cada revolución de motor acoplado al tornillo se generará un desplazamiento lineal de 0.4 mm. En la Figura 4 se muestra el mecanismo de tornillo sinfín, que es un diseño simple, pero requiere un espacio mayor para el desplazamiento lineal.



Fig. 4.- Pala de aerogenerador con mecanismo de tornillo sinfín.

Análisis CFD del perfil aerodinámico

Una vez obtenido el diseño del mecanismo, se realizó un análisis de dinámica de fluidos computacional para determinar los coeficientes de sustentación y arrastre del perfil utilizado. Las dimensiones del volumen de control utilizado para el análisis de fluidos fueron las siguientes: longitud de 2.5 m (coordenada X), altura de 2 m (coordenada Y) y ancho de 0.01 m (coordenada Z). El análisis se realizó en el software ANSYS Fluent 2019 usando dos modelos, 2D y 3D. Se utilizó un Reynolds de 100,000 y con los datos de densidad y viscosidad del aire, así como de la geometría del perfil, se obtiene una velocidad del viento de 9.74 m/s, que fue el parámetro de entrada del modelo numérico. Se utilizó control de malla equidistante de tres capas en el perfil aerodinámico para obtener mejores resultados. El coeficiente de sustentación se determinó en función de la fuerza de sustentación evaluada en el modelo numérico de acuerdo con la ecuación (5):

$$C_L = \frac{2F_L}{\rho v^2 s l} \quad (5)$$

En donde F_L es la fuerza de sustentación en newtons; ρ la densidad del aire (1.225 kg/m^3); v la velocidad del viento (9.74 m/s); s es el ancho de cara (0.001 m) y l es la cuerda del perfil (0.15 m).

Resultados y Discusión

Desplazamiento angular del perfil aerodinámico

La simulación de movimiento de la cola se realizó con la herramienta de análisis de movimiento de SolidWorks, para lo cual, en el caso del primer diseño, se configuró un motor a la entrada del tren de engranes, con el cual se obtuvieron

los datos del desplazamiento de la cola, el desplazamiento angular total necesario para generar un cambio de 20 grados en la cola es de 49 grados. Con las ecuaciones 3 y 4 es posible obtener el desplazamiento lineal de cada mecanismo. En la Figura 5 se muestra el desplazamiento angular del tren de engranes respecto al desplazamiento angular de la cola del álab.

Se observa que el mecanismo de engranes requiere menos desplazamiento angular, por tanto, menos desplazamiento lineal que el mecanismo sinfín, lo cual indica que se puede obtener un diseño más compacto, que es lo que se requiere en este caso.

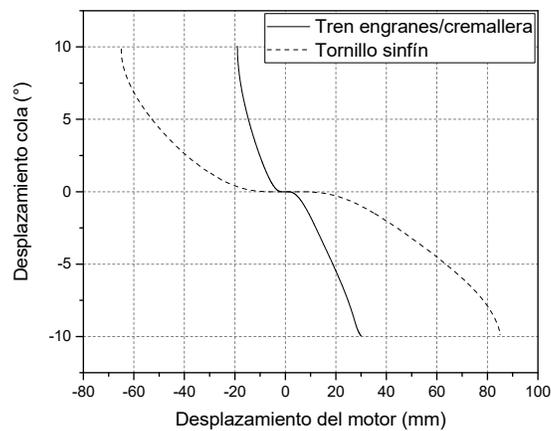


Fig 5. Desplazamiento angular de la cola del perfil, respecto al desplazamiento angular del servomotor que mueve los mecanismos.

Coefficiente de sustentación y arrastre

En la Figura 6 se muestran los coeficientes de sustentación, numéricos y experimental [5] del perfil FX63137. El coeficiente de sustentación presentado por Selig [10] muestra un incremento progresivo de -5.05° a 12.96° , con cambio brusco en 3.45° . Los resultados numéricos 3D obtenidos en este trabajo muestran una tendencia ascendente hasta los 5° , después baja ligeramente pero a partir de 5° , el coeficiente de sustentación tiende a bajar, 0.25° menos que el valor experimental. Se compararon los resultados con los obtenidos por Xfoil, los cuales presentan la misma tendencia ascendente. Finalmente, se presentan los resultados numéricos en 2D, que tienen una pendiente menor que los resultados en 3D, dado que un análisis 2D no representa adecuadamente el fenómeno físico estudiado. Por lo anterior, se tienen resultados satisfactorios que permiten evaluar el comportamiento aerodinámico del perfil diseñado.

En la Figura se muestra la distribución de presiones y velocidades en el perfil en tres de los ángulos analizados, -1.67° , 0° , 1.67° , 4.95° y 10.05° . Los resultados muestran una correspondencia entre la velocidad del viento sobre el perfil con la presión en la misma zona. No se observa un efecto negativo en la sustentación debido a la discontinuidad del perfil, entre las partes fija y móvil (cola) del perfil aerodinámico.

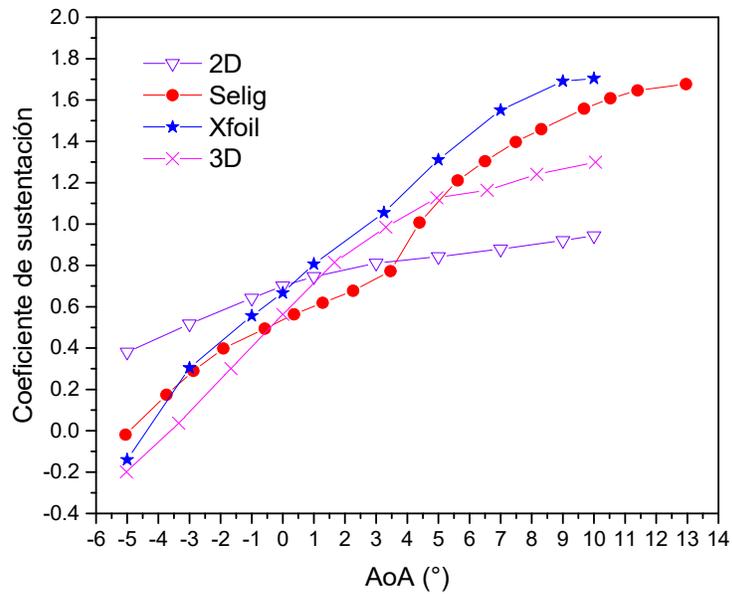


Fig 6. Coeficiente de sustentación del perfil FX63-137 para un Re de 100,000.

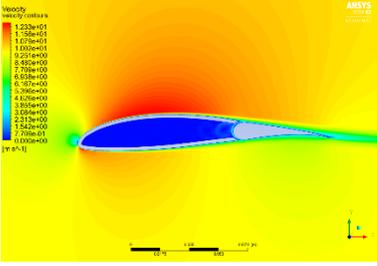
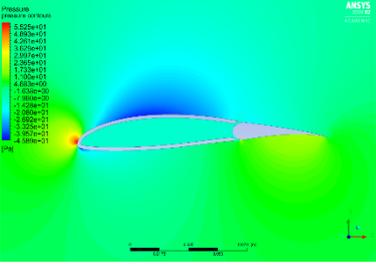
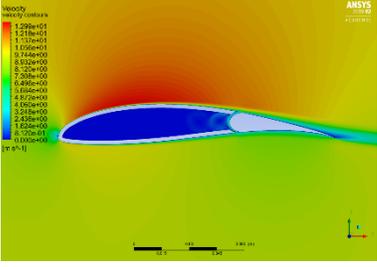
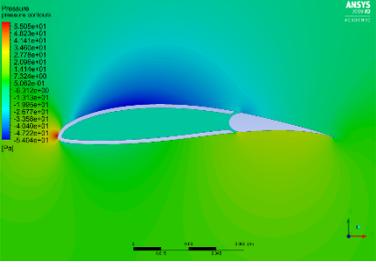
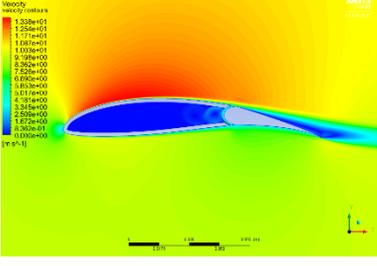
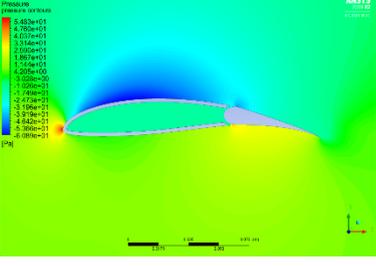
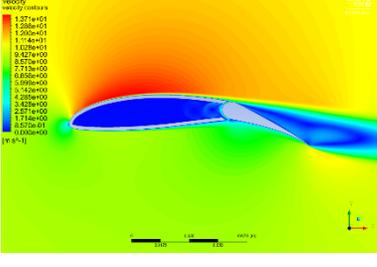
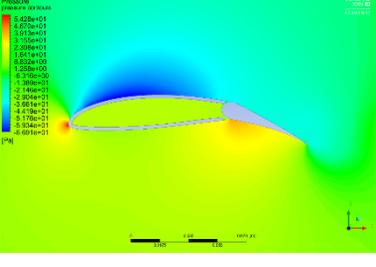
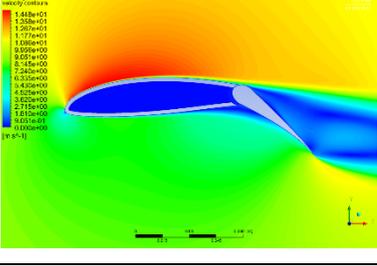
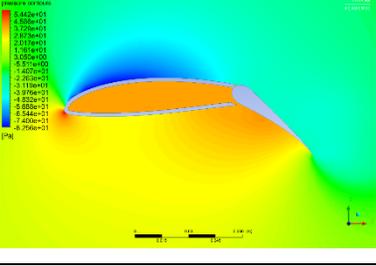
Velocidad (m/s)	Presión (Pa)	AoA (°)
		-1.67
		0
		1.67
		4.95
		10.05

Fig. 7. Distribución de presión y velocidad en el perfil FX63-137 para un Re de 100,000.

Conclusiones

Se presentan dos propuestas de mecanismos para el cambio del ángulo de ataque en el perfil FX63-137 utilizado en un aerogenerador de eje vertical. De las dos propuestas de mecanismos, se eligió la de tren de engranes, dado que se puede obtener un diseño más compacto, a pesar de que puede resultar más costosa debido a que cuenta con más elementos mecánicos móviles.

Se realizó un análisis por dinámica de fluidos computacional para determinar el coeficiente de sustentación para diez ángulos de ataque. Los resultados muestran similitud con los resultados experimentales reportados en la literatura. Se encontró que a partir de un ángulo de ataque de 5°, el coeficiente de sustentación del perfil aerodinámico se reduce ligeramente respecto al mismo ángulo de los resultados experimentales. Lo anterior se puede atribuir a la deformación que sufre el perfil, cuando la cola forma un ángulo cercano a los 120° respecto al cuerpo del perfil, como se puede observar en la Figura 7, ángulo de ataque de 10.05°.

Agradecimientos

Los autores agradecen por el apoyo brindado al proyecto CONACYT-SENER: Consolidación del LENERSE, clave: 254667, subproyecto: Energía Eólica. Agradecen también al proyecto

Referencias

- [1] Balance Nacional de Energía 2017
- [2] Balduzzi, F., Bianchini, A., Maleci, R., Ferrara, G., & Ferrari, L. (2014). Blade Design Criteria to Compensate the Flow Curvature Effects in H-Darrieus Wind Turbines. *Journal of Turbomachinery*, 137(January), 1–10. <https://doi.org/10.1115/1.4028245>
- [3] Ahmad Hemami, *Wind Turbine Technology*, CENGAGE Learning, 2012. ISBN-13: 978-1-4354-8646-1.
- [4] Michael S. Selig and Bryan D. McGranahan, *Wind tunnel aerodynamic tests of six airfoils for use on small turbines*, Subcontractor report, National Renewable Energy Laboratory NREL, 2003.
- [5] Alejandro J. Carantoña O. Francisco M. Gonzalez-Longatt, *Análisis del comportamiento de perfiles empleados en aerogeneradores de baja potencia*, informe técnico, 2009, disponible en <http://fglongatt.org/OLD/Reportes/FGLONGATT-R-2009-12.pdf>

- [6] Travis J. Carrigan, Brian H. Dennis, Zhen X. Han and Bo P. Wang, Aerodynamic shape optimization of a vertical-axis wind turbine using differential evolution, International Scholarly Research Network, 2012, article ID 528418.
- [7] Alejandro A Escárpita, Oscar Martínez, Hugo Elizalde, Ricardo A. Ramírez, Prototipo de perfil aerodinámico de geometría variable mediante actuador de aleación con memoria de forma, Memorias del 14 Congreso Internacional Anual de la SOMIM, 2018, Puebla, México.
- [8] M. Elkhouryu, T. Kiwata and E. Aoun, Experimental and numerical investigation of a three-dimensional vertical-axis wind turbine with variable-pitch, Journal of Wind Energy and Industrial Aerodynamics, 139 (2015)111.
- [9] Richard G. Budynas, J. Keith Nisbett. Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, 012. ISBN 978-607-15-0771-6
- [10] Michael S. Selig, James J. Guglielmo, Andy P. Broeren and Philippe, Summary of low-speed airfoil data, Department of Aeronautical and Astronautical Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1995.