



Estudio computacional de un rotor de tres palas tipo Savonius para uso en aerogeneradores de eje vertical

Computational study of a Savonius-type three bucket rotor for use in vertical axis wind turbines

■ Fechas de recepción: 01 de Mayo de 2015
 ■ Fecha de aprobación: 30 de julio de 2015



CESAR NIETO LONDOÑO.*
 ALEJANDRO MEJÍA GIRALDO **

Resumen

Los aerogeneradores de eje vertical tipo Savonius tienen varias configuraciones dadas por las variables de diseño, como el número de palas, el diámetro del rotor, el radio de las palas, la relación de traslapo y el espacio entre palas. Algunos estudios (Shaheen et al., 2014) han concluido que el espacio entre palas y la relación de traslapo afectan considerablemente el rendimiento del aerogenerador, por lo que su optimización puede resultar útil en el diseño de una turbina eólica. Este trabajo buscó analizar un rotor de tres palas con una relación de traslapo de 0.15 por medio de la herramienta de análisis computacional de fluidos Flunet, del software Ansys, para estudiar la interacción aerodinámica.

PALABRAS CLAVES: aerogenerador, CFD, espacio entre palas, relación de traslapo, savonius.

Abstract

Savonius vertical axis wind turbines have several configurations given by design variables such as number of buckets, rotor diameter, radius of the buckets, overlap ratio and space between the buckets. Some studies (Shaheen et al., 2014) have concluded that the space between buckets and the overlap ratio considerably affect the performance of wind turbines, so optimization could be useful in the design of a wind turbine. This study sought to analyze a three bucket rotor with an overlap ratio of 0.15 through FluNet, a tool for the computational analysis of fluids, and ANSYS, a software to study aerodynamic interactions.

Keywords: Wind turbine, CFD, blade gap width, overlap ratio, Savonius

*César Nieto Londoño, Ph.D. Ingeniero Mecánico (B.S.) Universidad Nacional de Colombia, Medellín 2007. Maestría en Ingeniería Energética (M.Eng.) Universidad de Antioquia, Medellín 2009. Doctorado en Ingeniería (Ph.D.) Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín 2012. Profesor Titular. Coordinador Doctorado en Ingeniería. Investigador Grupo de Investigación en Ingeniería Aeroespacial. Investigador Grupo de Energía y Termodinámica, Instituto de Energía, Materiales y Medio Ambiente, UPB. cesar.nieto@upb.edu.co

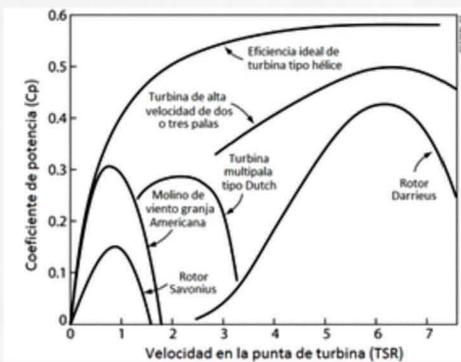
**Alejandro Mejía Giraldo. Ingeniero Aeronáutico (B.S.) Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín 2015. Estudiante Maestría en Ingeniería Aeroespacial (M.Sc. A.E), West Virginia University. Investigador Grupo de Investigación en Ingeniería Aeroespacial, UPB. alejandro.mejiagi@alfa.upb.co

Introducción

El uso de energías renovables, eólica, hídrica y solar, ha generado importantes desarrollos a nivel investigativo. En particular, la energía eólica representó un 32%, de acuerdo con el European Wind Energy Association (EWEA), de toda la energía generada disponible en Europa en 2013, solamente superado por la energía solar. Hay una tendencia global hacia el uso de estas energías limpias que reduzcan la necesidad de otras fuentes de energía más perjudiciales para el medio ambiente como el carbón y el petróleo.

Aunque las turbinas eólicas han sido empleadas históricamente para numerosas aplicaciones, la eficiencia aerodinámica limita la cantidad de energía extraída del viento. Para el caso de las turbinas de eje vertical (VAWT), la eficiencia es baja. Por esto se han buscado maneras de optimizar sus diseños y lograr una mayor eficiencia. Los aerogeneradores tipo Savonius, que emplean un sistema de rotación por medio de arrastre aerodinámico, son una de las configuraciones más simples, pero también menos eficientes (15-20%). En la figura 1 se muestra el límite de Betz que establece el coeficiente de potencia (C_p) máximo para diferentes tipos de aerogenerador y donde se observa que la configuración Savonius es la de menor C_p .

Figura 1 - Límite de Betz



Fuente: Burton (2011).

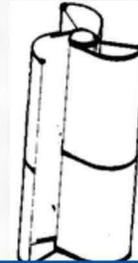
Las turbinas eólicas tipo Savonius se han empleado para microgeneración de energía eléctrica en aerogeneradores portátiles de baja escala, como por ejemplo los diseños de la empresa WindPax, que busca ofrecer pequeños aerogeneradores (Figura No. 2). La mayor desventaja de esta configuración es su baja relación de velocidad en la punta de la pala, (ec.1), que está limitada por ser de arrastre.

$$\lambda = \omega R / V_{\infty} \quad (1)$$

Donde:

- ω velocidad angular [rad/s]
- R radio del rotor del aerogenerador [m]
- V_{∞} radio del rotor del aerogenerador [m]

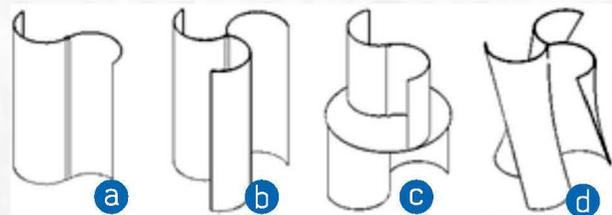
Figura 2 - Aerogenerador Wisp de WindPax



Fuente: Windpax <http://windpax.com>

Existen múltiples configuraciones de los aerogeneradores tipo Savonius. La muestra cuatro variaciones comúnmente usadas. Adicionalmente, hay algunos diseños que combinan los rotores Savonius y Darrieus. El rotor Darrieus se caracteriza por emplear perfiles aerodinámicos en las palas, lo que genera una fuerza de sustentación con el viento que hace que el aerogenerador gire.

Figura 3 - Aerogeneradores tipo Savonius



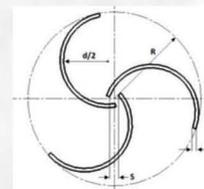
Fuente: Propia

Los aerogeneradores tipo Savonius con dos palas (a) tienen mejor desempeño aerodinámico que los de tres palas, los cuales pueden producir mayor torque y combinarse con una geometría en espiral tipo tornillo de Arquímedes (d). Existe también una variación que consiste en dos rotores de dos palas uno encima del otro (f.c) con un desfase de 90° que permite obtener una mejor eficiencia. En este trabajo se buscó analizar el efecto de relación de traslapo para un rotor de 3 palas, como el que se presenta en la b.

En la Figura 4 se pueden observar las variables geométricas de un rotor de tres palas, y debido a que solo se analizó el rotor en dos dimensiones la altura no es considerada. Los parámetros más importantes en este caso son el espacio entre las palas (S) y la relación de traslapo (e) dada por la ecuación (2), siendo d el diámetro de la pala.

$$e = S/d \quad (2)$$

Figura 4. Rotor Savonius de tres palas



Fuente: Propia

En la tabla están los parámetros del rotor que se analizó. Para este caso se tuvieron en cuenta valores correspondientes a un rotor de un aerogenerador de pequeña escala con una relación de traslapo de 0.15.

Tipo de turbina	Savonius
Número de palas	3
Diámetro del rotor (2R)	26[cm]
Diámetro de la pala (d)	12[cm]
Espesor de la pala (t)	0.1[cm]
Espacio entre palas (S)	1.8[cm]
Relación de traslapo ($e=S/d$)	0.15

Análisis computacional

Para analizar los efectos aerodinámicos sobre el rotor se hizo uso de herramientas computacionales especializadas en dinámica de fluidos: se empleó la herramienta Flunet del software Ansys 15.0. El proceso de análisis de dinámica de fluidos por computador (CFD) requiere un modelamiento del fluido y un posterior enmallado que permita generar nodos para evaluar las ecuaciones de mecánica de fluidos pertinentes. El proceso de enmallado es complejo y su apropiado uso permite obtener resultados confiables. El estudio realizado se hizo para el rotor en dos dimensiones, enfocándose en el efecto de espaciado entre palas y la relación de traslapo.

Consideraciones Iniciales

El análisis computacional realizado corresponde a un flujo incompresible en el cual se discretizan y resuelven las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento lineal (ecuaciones de Navier-Stokes) y energía. Este análisis iterativo permite identificar las características del flujo alrededor del rotor del aerogenerador. Así pues, debido a que el flujo es turbulento se hace uso de modelos que permitan considerar los efectos de la energía cinética de turbulencia generada por el rotor.

El flujo que atraviesa el rotor de una turbina eólica tipo Savonius se caracteriza por ser turbulento y en estado transitorio. Debido a esto se requiere un apropiado criterio en el momento de construir el modelo para el análisis computacional. Para este estudio se realizó un análisis bidimensional del rotor del aerogenerador ya que la geometría no varía verticalmente. Esto permite reducir la carga computacional que implica un análisis en tres dimensiones y también refinar la malla 2D. Se hizo uso del software Ansys 15.0 que por medio de la herramienta Flunet permite resolver las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas, RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations) y las ecuaciones de masa y cantidad de movimiento.

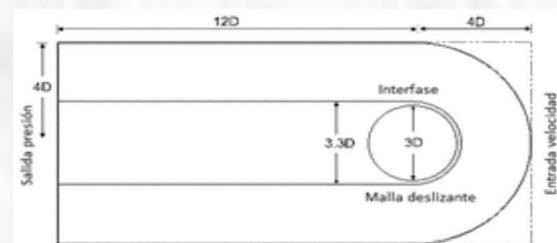
Usualmente los resultados de un análisis CFD se comparan con datos experimentales reportados por otros autores. Sin embargo, no hay suficiente información acerca de pruebas de rotores de tres palas y por lo tanto los resultados de este

estudio se validaron por medio de una investigación de independencia de malla y los resultados de un análisis computacional similar realizado para un rotor de dos palas (Shaheen et al., 2014), que a su vez se validó con resultados experimentales anteriores (Sheldahl et al., 1977). En estos estudios se trabajó con una relación de traslapo de 0.15 debido a que se concluyó que con este valor se presenta un máximo torque y coeficiente de potencia (Fujisawa y Gotoh, 1992).

Dominio Computacional

El dominio computacional, que representa el fluido por analizar, se generó usando el software de dibujo computarizado (CAD) Solid Edge ST5. En el análisis de un aerogenerador se trabaja con un flujo externo que requiere un dominio suficientemente grande para evitar efectos de bloqueo (Blockage effect) el cual ocurre para flujos internos, similar a un túnel de viento, que genera una aceleración del fluido debido a la interacción con algún objeto (Howell et al., 2010). Aunque existen diferentes recomendaciones y metodologías para dimensionar el dominio, se siguió el modelo utilizado por Echeverry y Molina (2013), que es basado en otros estudios similares (Simão Ferreira et al., 2007) y que permite obtener resultados precisos sin generar una malla demasiado grande. La muestra un dominio computacional que permite evitar efectos de aceleración del fluido sin aumentar demasiado el tamaño del mismo y por ende reducir el número de elementos al momento de hacer el mallado. Se siguió este dimensionamiento que está en función del diámetro del rotor.

Figura 5 - Dominio computacional



Fuente: Echeverry y Molina 2013

Modelo de Turbulencia

Para el análisis computacional, los modelos de turbulencia que mejor se adaptan al flujo rotatorio son de dos ecuaciones, como los modelos $k-\epsilon$ y $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport por sus siglas en inglés). El modelo de turbulencia $k-\omega$, desarrollado por Wilcox, es ideal para tener en cuenta la capa límite y predecir los efectos de gradiente de presión adversa (Menter, 1994). Los aerogeneradores trabajan normalmente en bajos regímenes de número de Reynolds y los efectos de compresibilidad son inexistentes para el rango de velocidad de operación.

El $k-\epsilon$ es uno de los modelos de turbulencia más utilizados para el análisis CFD que por medio de dos variables k y ϵ determina la energía cinética de turbulencia y la tasa de disipación de energía, respectivamente. Aunque existen

variaciones, el modelo estándar $k-\varepsilon$, el cual es una simplificación del modelo original, se representa mediante las siguientes expresiones matemáticas (ec. 3 y 4).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - Y_M + S_k \quad (3)$$

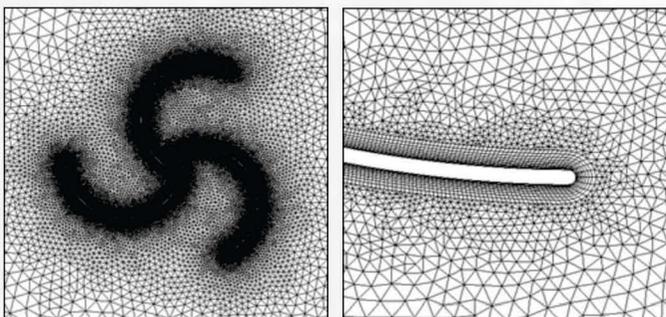
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}} - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (4)$$

Para estas ecuaciones G_k es la generación de energía cinética de turbulencia debido a los gradientes de velocidad, G_ε es la generación de energía cinética de turbulencia debido a la flotación, y Y_M es el efecto de la fluctuación de dilatación en turbulencia compresible sobre la tasa de disipación total. C_1 y C_2 son las constantes que han sido determinadas de forma experimental y se usan sus valores por defecto α_k y α_ε son los números de turbulencia de Prandtl para k y ε , respectivamente, S_k y S_ε son términos fuente definidos por el usuario.

Mallado

Usando la herramienta para mallado de Ansys se obtuvo una malla no estructurada que por medio de una inflación generó una capa de diez niveles de nodos cuadrangulares en la zona equivalente a la capa límite de las palas (Figura 6); de esta manera se buscó obtener un valor de Y^+ menor a 20 y con un tasa de crecimiento (growth rate) por defecto de 1,2. Por fuera de esta zona se generaron elementos triangulares con un refinamiento general, sobre todo el dominio para analizar la estela turbulenta que se crea durante la simulación.

Figura 6 - Refinamiento de la malla



Fuente: Propia

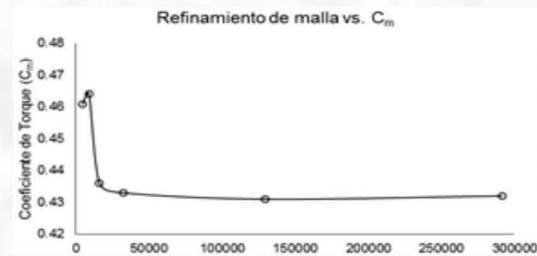
La malla se refinó hasta alcanzar una independencia en los resultados, lo cual de acuerdo con la es después de los 100,000 nodos (f.b). Los datos estadísticos de la malla que se usó están en la con valores de referencia que indican una buena calidad de la malla. De acuerdo con estos datos la malla generada es aceptable para la solución numérica.

Así mismo, se crearon las fronteras en el dominio computacional equivalentes a la entrada de velocidad y salida de presión necesarias para simular el flujo de aire. También se creó la frontera de pared del rotor y un interfaz entre la zona estática de la malla y la zona móvil que simula la rotación del rotor y área circundante.

Tabla No 2. Estadísticas de la malla

Propiedad	Valor	Recomendado
#Nodos	113,964	>100,000
#Elementos	166,741	-
Calidad de elementos	0.867	1
Relación de aspecto	1.689	<20
Oblicuidad	0.0494	0
Y^+	1.2	<5

Figura 7 - Refinamiento de la malla



Fuente: Propia

La Y^+ indica que el resultado de la simulación no varía de manera significativa a partir de los 50,000 nodos para un análisis estático. Esto permite concluir que la simulación no requiere un mayor refinamiento de la malla y así se evita una alta carga computacional. Aunque es posible tener una mayor precisión, por cuestiones de tiempo y capacidad de procesamiento de los equipos es más práctico trabajar con una malla con menos nodos. Las áreas de simulación más importantes del modelo corresponden a la zona próxima a la pala (capa límite) y la estela turbulenta creada. Es por esto que el refinamiento se concentra en estas zonas para optimizar el número de elementos totales de la malla.

Con esta malla de 113,964 nodos se procedió a realizar las simulaciones del rotor para una velocidad de viento de 5 m/s.

Configuración de la Simulación

Se configuró Fluent para resolver el modelo planteado con un método basado a presión con una formulación de velocidad absoluta, debido al tamaño del rotor respecto al dominio

computacional. Esta configuración se usa cuando se pretende estudiar el flujo externo que circula al rotor. Así mismo, se dejaron las condiciones de aire atmosférico estándar a nivel del mar. El análisis estático se simuló con una configuración en estado estacionario.

El algoritmo usado por defecto para resolver las ecuaciones es el Simple (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations). Adicionalmente, se crearon durante el mallado dos zonas para permitir una malla deslizante que permita rotar la zona del rotor para un modelamiento en estado transitorio.

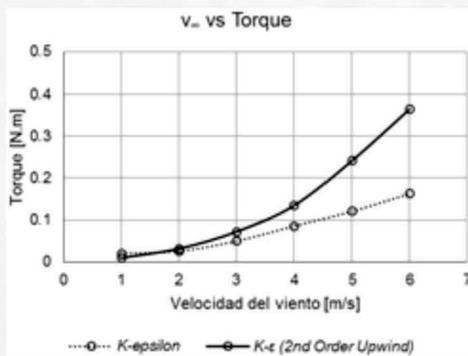
Resultados

Se realizó un primer análisis para observar el torque generado por el rotor para diferentes velocidades del viento con un mismo modelo de turbulencia, pero variando el método de solución para la energía cinética turbulenta; también se modificó el método usado por el software para poder analizar los efectos de la estela turbulenta creada.

En la se observa que el método 2nd Order Upwind produce una curva con una tendencia exponencial, mientras que la configuración estándar se asemeja a una tendencia exponencial casi lineal. Para una velocidad de viento de 5 m s, se obtiene un torque de 1,2 N m con el método de solución por defecto, mientras que al cambiar al método 2nd Order Upwind el resultado de torque para una misma velocidad es el doble. Esta diferencia entre los resultados demuestra que la configuración del método de solución puede generar resultados con un porcentaje de error significativo.

Otros estudios (Shaheen et al., 2014) también utilizaron el algoritmo 2nd Order Upwind en el Setup de Fluent para las ecuaciones de presión, movimiento lineal y turbulencia (energía cinética turbulenta y la tasa de disipación turbulenta) basado en estudios previos (Zhou y Rempfer, 2013).

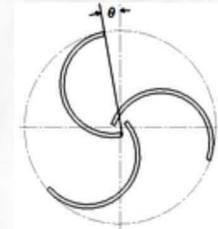
Figura 8 - Resultado de torque para diferentes velocidades de viento



Fuente: Propia

Adicionalmente, se simuló el rotor para diferentes posiciones del ángulo (θ), que corresponde al desplazamiento angular del rotor con respecto a una posición inicial de referencia en la cual una de las palas recibe el flujo de aire de manera perpendicular a su movimiento (Figura 9).

Figura 9 - Posición angular rotor (θ)

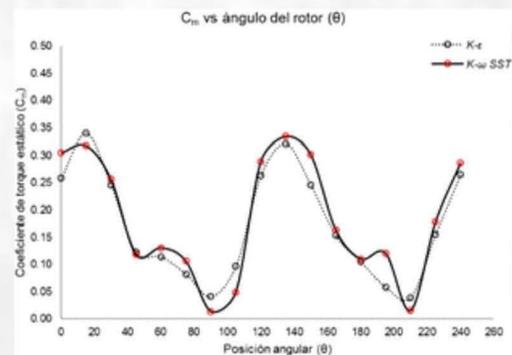


Fuente: Propia

La figura 10 muestra el resultado de esta simulación con dos modelos viscosos que son el modelo k-ε y k-ω. En ambas simulaciones se evidencia un máximo y un mínimo del coeficiente de torque estático (Cms) que se calcula mediante la ecuación (5).

$$C_{ms} = \frac{T_s}{0.5\rho V_{\infty}^2 R A_s} \quad (5)$$

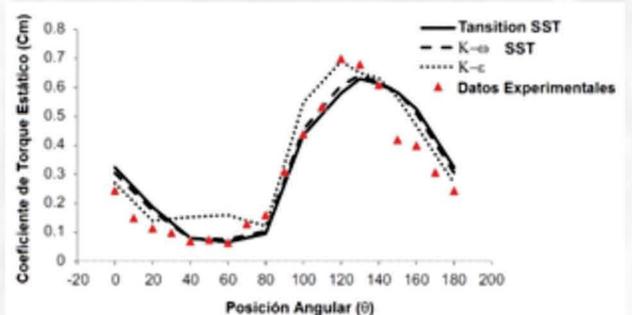
Figura 10 - Coeficiente de momento estático (Cms)



Fuente: Propia

Estos resultados se comparan con otro estudio similar realizado para un rotor Savonius de dos palas (Shaheen et al, 2014). En ese estudio igualmente se presentó un pico alto y bajo para el Cm, como se observa en la figura 11.

Figura 11 - Coeficiente de momento estático para un rotor Savonius de dos palas



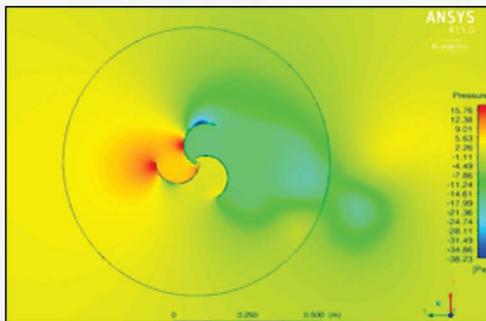
Fuente: Propia

Estos resultados con tres modelos diferentes se compararon con resultados experimentales, donde los modelos $k-\omega$ y Transition SST tienen mayor relación.

Las figuras anteriores muestran los picos del $C_{m,s}$ para cada rotor. En el de dos palas se observa un pico máximo por cada 180° , mientras que para el rotor de tres palas el pico máximo se da aproximadamente cada 120° . Esto se debe a que el rotor genera un mayor torque en la posición en la cual una de las palas enfrenta el flujo de aire, y por el desfase geométrico entre las tres palas de 120° existen tres picos por cada vuelta completa del rotor.

Adicionalmente, se realizó un análisis posterior para observar los contornos de presión y velocidad con el fin de cualitativamente estudiar los fenómenos aerodinámicos en el rotor. En el caso del contorno de presiones (Figura 12), se pueden identificar los puntos de estancamiento en las palas convexas que enfrentan al flujo.

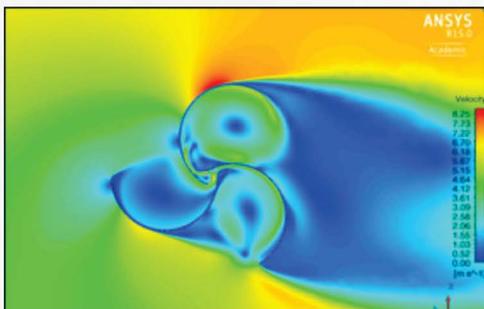
Figura 12 - Contorno de presiones sobre el rotor ($\theta=0^\circ$)



Fuente: Propia

En el contorno de velocidad (Figura 13) se observa la recirculación de aire en el interior del rotor debido al espacio entre las palas (relación de traslape). Igualmente, se observa un incremento en la velocidad en los extremos del rotor.

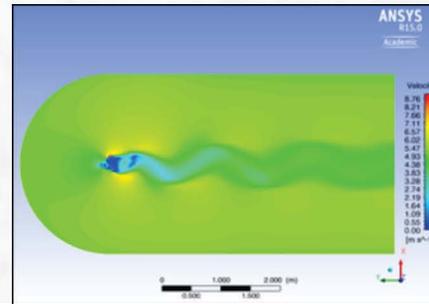
Figura 13 - Contorno de velocidad ($\theta=0^\circ$)



Fuente: Propia

Observando el contorno de velocidad de todo el dominio computacional se puede identificar la estela turbulenta (Figura 14) que se genera posterior al rotor. Esta estela se caracteriza por su comportamiento oscilante y fluctuante propio de un flujo con vórtices de von Kármán.

Figura 14 - Formación de estela turbulenta



Fuente: Propia

Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos, el rotor analizado presenta un torque relativamente bajo de $2 \text{ [N} \cdot \text{m]}$ para un viento de 5 [m/s] , lo que implica que su uso como aerogenerador eléctrico se limita a generación eléctrica de pequeña escala. Esto se conocía de antemano, pues la configuración tipo Savonius, que funciona mediante el arrastre producido por sus palas, es una disposición poco eficiente. Sin embargo, este tipo de rotor puede ser útil para aerogeneradores de baja escala, especialmente aquellos portátiles diseñados para suministro de energía a equipos de comunicación y otros similares.

Aunque este rotor puede alcanzar una mayor entrega de potencia por encima de la velocidad del estudio de 5 m/s , esta es poco común en la mayoría de las ubicaciones geográficas donde podría usarse, y realmente son velocidades de viento exclusivas de pocas zonas. Es por esto que la velocidad elegida para el análisis corresponde a datos que se pueden encontrar típicamente en muchas regiones.

De la figura 11, del coeficiente de momento estático, se encontró que el rotor genera un mayor torque de arranque cuando su posición angular está 20° después de que una de las palas pasa por el eje paralelo al flujo del viento. Esta posición coincide con el instante en el cual una pala se encuentra por detrás de las otras dos y cuando el rotor de tres palas más se asemeja a un rotor de dos. Igualmente, se presentó un menor torque cuando tiene un valor de 90° , momento en el cual el viento impactó en su mayoría la parte convexa del rotor, lo que hace que el coeficiente de arrastre aumente en el sentido opuesto al de rotación.

Uno de los fenómenos que no se percibe en este análisis debido a las simulaciones en estado estacionario es el efecto Magnus, que se produce cuando un objeto circular rota inmerso en un fluido.

Este efecto genera una fuerza aerodinámica de "sustentación" perpendicular a la dirección del viento y según la orientación de la rotación del objeto. Para un aerogenerador en funcionamiento este efecto puede crear una componente de fuerza adicional sobre su eje.

Referencias

- Akwa, J. U., Junior, G.A. y Petry, A. P. (2011). Discussion on the verification of the overlap ratio influence on performance coefficients of a Savonius wind rotor using computational fluid dynamics. *Renewable Energy*, 38(2012), 141-149.
- Bin HJ, N.A. (2013). Simulation study on the performance of vertical axis wind turbine. UTHO, Malaysia.
- Bhutta, M. M. A., Hayat, N., Farooq, A.U., Ali, Z. et al. (2012). Vertical axis wind turbine. A review of various configurations and design techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(2012), 1926-1939.
- Debnath, P. y Rajat. G. (2013). Flow physics analysis of three-bucket helical Savonius rotor at 90° twist angle using. *International Journal of Modern Engineering Research*, (2013), 739-746.
- Echeverry, S. y Molina, M. (2013). Diseño de un aerogenerador portátil de eje vertical. Universidad Pontificia Bolivariana.
- European Wind Energy Association [EWEA]. Wind in power: 2013 European statistics. Recuperado de [http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/EWEA Annual Statistics 2013.pdf](http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/EWEA%20Annual%20Statistics%202013.pdf)
- Fujisawa, N. y Gotoh, F. (1992). Visualization study of the flow in and around a Savonius rotor. *Experiments in Fluids*, 12, 407-412.
- Howell, R., Qin, N., Edwards, J. y Durrani, N. (2010). Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine. *Renewable Energy*, 35(2), 412-422.
- Malael, I. y Dumitrescu, H. (2014). Numerical simulation of UAWT flow using Fluent. *U.P.B. Sci. Bull.*, 76(1).
- Menter, F. R. (1994). Two equation eddy viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 32, 8.
- Shaheen, M., El-Sayed, M. y Shaaban, A. (2014). Numerical study of two-bucket Savonius wind turbine cluster. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 137(2015), 78-89.
- Sheldahl, R. E., Blackwell, B. F. y Feltz, L.U. (1977). Wind tunnel performance data for two- and three-bucket Savonius rotors. Sandia Report SAND, 77-0131.
- Simão Ferreira, C.J., Bijl, H., van Bussel, G. y van Kuik, G. (2007). Simulating dynamic stall in a 2D UAWT: modeling strategy, verification and validation with particle image velocimetry data. *Journal of Physics: Conference Series*, 75(2007) 012023.
- Tamayo, J. M. (2013). Optimización aerodinámica y estructural de un generador eólico de eje vertical. Universidad Pontificia Bolivariana.

