

DISEÑO AERODINÁMICO DE UNA VAWT ADECUADA A LOS PERFILES DE VIENTO DE PARAGUANÁ MEDIANTE CFD

JOSUE BANEGA ¹, NATHALY MORENO SALAS ²

¹ Universidad Simón Bolívar, Laboratorio de Conversión de Energía Mecánica. e-mail: josue.samuel.21@gmail.com

² Universidad Simón Bolívar, Departamento de Conversión y Transporte de Energía. e-mail:nmoreno@usb.ve

Recibido: julio 2016

Aprobado para publicación: diciembre 2016

RESUMEN

El desarrollo de nuevas tecnologías orientadas al uso de energías renovables ha dado lugar al acelerado crecimiento en torno a la fuente eólica debido a su carácter de energía limpia, sustentable y de poca incidencia ambiental. Entre las zonas costeras de Venezuela, destaca la Península de Paraguaná por presentar velocidades superiores a los 5 m/s a 10 metros sobre el nivel del suelo como consecuencia de las brisas marinas, ofreciendo un potencial eólico viable para su aprovechamiento. Valiéndose de la omni-direccionalidad de las turbinas eólicas de eje vertical (VAWT), el presente trabajo aborda el diseño aerodinámico de un aerogenerador tipo Darrieus de perfiles rectos y simétricos, apoyado en la dinámica de fluidos computacional (CFD). Mediante un análisis estadístico y de probabilidad de una muestra de 8420 datos de las velocidades del viento registradas en la estación meteorológica de Punto Fijo, se determinó la velocidad de diseño y la longitud máxima de los álabes. Seguidamente, a través del *software* libre OpenFOAM, se elaboró un modelo computacional de la turbina en estudio bajo las simplificaciones de un rotor-estator bidimensional, interfaz de mallado rotativo y modelo de turbulencia $\kappa\omega$ -SST, para perfiles NACA0012, 0015 y 0018, identificando la configuración geométrica de mayor eficiencia de acuerdo a los coeficientes aerodinámicos y de potencia obtenidos.

Palabras clave: VAWT, darrieus, CFD, OpenFOAM, NACA

AERODYNAMICS DESIGN OF A VAWT SUITABLE TO WIND PROFILES OF PARAGUANÁ BY CFD

ABSTRACT

The development of new technologies for the use of renewable energy has allowed an accelerated growth of the wind power through its characteristics of clean energy, sustainable and low environmental impact. In the coastal area of Venezuela, Paraguana Peninsula stands out to present wind speeds over 5 m/s at 10 meters above ground level due to sea breezes, offering a wind potential feasible to exploit. Using the omni-directionality of vertical axis wind turbines (VAWT), this paper addresses an aerodynamic design of a Darrieus rotor with straight and symmetrical airfoils, supported by Computational Fluid Dynamics (CFD). Through a statistical and probability study of 8420 data of wind speed registered in Punto Fijo weather station, the design speed and the maximum length of the blades was determined. Then, with the free *software* OpenFOAM, a computational model of the turbine was developed under the simplifications of two-dimensional rotor-stator, rotating mesh interface and turbulence model $\kappa\omega$ -SST for NACA0012, 0015 and 0018, in order to obtain the optimal geometric configuration based in aerodynamic and power coefficients.

Keywords: VAWT, darrieus, CFD, OpenFOAM, NACA

INTRODUCCIÓN

Desde 1700, los combustibles fósiles como el carbón, petróleo y gas natural se han utilizado para impulsar el desarrollo industrial y las comodidades de la vida

moderna. Sin embargo, como todos los procesos de conversión de energía no son completamente eficientes, sus efectos colaterales de contaminación ambiental han despertado alarmas en el mundo, sobre todo en el ámbito del calentamiento global. Este escenario ha motivado el

establecimiento de políticas internacionales que favorezcan la sostenibilidad ambiental, mejoren las eficiencias de conversión y promuevan las tecnologías orientadas al uso de energías renovables, donde la fuente eólica se presenta como una de las vías más atractivas para las futuras instalaciones de generación eléctrica dada su acelerada implementación durante la primera década del siglo XXI, alcanzando una capacidad instalada mundial de 159.2 GW a finales de 2009, equivalente al 2% del consumo mundial de electricidad, con una tasa de crecimiento anual del 31.7% (González-Longatt, 2010).

Aunque las raíces de las actuales turbinas eólicas nacen a finales del siglo XIX con la propuesta del científico danés Poul La Cour (1846-1908) de usar la energía mecánica del viento para generar corriente eléctrica, es a partir de los avances de la aeronáutica con la teoría de los perfiles alares por sustentación de Kutta-Joukovsky que se dio inicio al estudio de los aerogeneradores (Burton *et al.*, 2001), donde el ingeniero francés Georges Darrieus (1888-1979) ofreció una de las mayores contribuciones al campo con su diseño de turbina de eje vertical, también denominada VAWT por sus siglas en inglés (Villarubia, 2012). Su modelo de variación cíclica de incidencia, caracterizado por presentar un eje de rotación perpendicular al flujo de aire, destaca por su capacidad de operación con vientos procedentes de cualquier dirección, sencillez estructural y adaptabilidad en instalaciones domésticas ganando interés en el mercado energético de generación eléctrica (Paraschivoiu, 2002; Tong, 2010). Sin embargo, a expensas de sus favorables características, desarrollan un comportamiento aerodinámico de difícil descripción teórica motivado al cambio instantáneo del ángulo de ataque al que se ven sometidos los perfiles del rotor a lo largo de una rotación, produciendo variaciones significativas de presión y de turbulencias que inciden notablemente en el rendimiento de la máquina. Este fenómeno transitorio de desprendimiento de vórtices, conocido como “*pérdida dinámica*” (Dynamic Stall), es uno de los aspectos principales del modelaje de las VAWTs (Allet y Paraschivoiu, 1995; Masson *et al.*, 1998; Scheurich y Brown, 2011), donde las condiciones del flujo y la forma del rotor determinan el aprovechamiento de las fuerzas del viento para entregar una potencia útil. A pesar de que existen diferentes enfoques de análisis de las turbinas de eje vertical (Brahimi *et al.*, 1995), la dinámica de fluidos computacional o CFD, se presenta como una herramienta útil para el estudio y diseño de cualquier sistema energético en condiciones específicas de operación. Así, la presente investigación aborda el dimensionamiento de una VAWT tipo Darrieus adecuada a los perfiles de viento de la Península de Paraguaná, mediante el uso del mencionado método numérico.

RECURSO EÓLICO DISPONIBLE EN LA PENÍNSULA DE PARAGUANÁ

El viento como masa de aire en movimiento tiene su origen en la energía radiante proveniente del sol, la cual se convierte en energía térmica al ser absorbida por la superficie terrestre (Rosato, 1991). Con la desigual insolación en los diferentes puntos del planeta y las diferencias de calores específicos entre los océanos y la tierra, se generan gradientes de temperatura y densidad que ocasionan el movimiento convectivo de las corrientes de aire atmosférico (Carta *et al.*, 2009), condiciones acentuadas en las zonas costeras que dan lugar a las brisas marinas convenientes para la instalación de turbinas eólicas (Burton *et al.*, 2001).

Para Venezuela, país tropical situado en las costas del Mar Caribe de Suramérica, estudios realizados por la nacional petrolera PDVSA y confirmados por los registros tanto del programa “*NASA Earth Science Surface Meteorology and Solar Energy*” y el Servicio de Meteorología de la Fuerza Aérea Venezolana, revelan que las intensidades del viento en sus estados costeros son superiores a los 5 m/s (a 10 m sobre el nivel del suelo) con dirección noreste durante nueve meses consecutivos, donde Falcón llega alcanzar hasta 13 m/s entre los primeros meses del año (González-Longatt, 2010). Más aún, investigaciones han confirmado indicadores del tipo biológico y geomorfológico de la Península de Paraguaná (ubicada al norte del estado Falcón) que la convierten en la zona de mayor aprovechamiento eólico del territorio venezolano (Berrios, 1995; Hernández y Duarte, 2000).

Análisis estadístico de las velocidades del viento

Con la finalidad de evaluar la energía extraíble del viento, es habitual trabajar con funciones de densidad de probabilidad que se ajusten a los datos medidos por las estaciones meteorológicas (Carta *et al.*, 2009; Sathyajith *et al.*, 2011). Así, a pesar del comportamiento aleatorio y dependencia temporal de la velocidad del viento $u(t)$, su valor medio U se puede expresar mediante la ec. (1):

$$U = \int_0^{\infty} u(t) f(u) du \quad (1)$$

donde $f(u)$ describe una función densidad de probabilidad. La experiencia ha demostrado que las distribuciones reales del viento se ajustan de manera adecuada a la ley de Weibull (Burton *et al.*, 2001; Ramírez y Carta, 2005), descrita por la ec. (2), donde sus dos parámetros k y c pueden ser determinados mediante un ajuste por mínimos cuadrados (Villarubia, 2012):

$$f(u) = k \frac{u^{k-1}}{c^k} e^{-\left(\frac{u}{c}\right)^k} \quad (2)$$

Basado en una muestra de 8420 datos de las mediciones horarias del viento registradas en la estación meteorológica de Punto Fijo (localizada al suroeste de la Península de Paraganá en las coordenadas 11°39' latitud Norte, 70°3' longitud Oeste y 22 msnm) con un anemómetro de cazoletas a 10 metros sobre el nivel del suelo, se evaluó el potencial energético disponible en la región. Trabajando con 20 categorías para las velocidades del viento, la función de Weibull (con $k = 2.2758$ y $c = 7.1933$, obtenidos del ajuste por mínimos cuadrados presentado en la Figura 1), demuestra que alrededor de los 6 m/s se encuentra la mayor probabilidad de frecuencia con 12.9%, ilustrado en la Figura 2, resultado que asegura una velocidad mínima de arranque por encima de los 4 m/s, condición recomendable para la aplicación de turbinas eólicas (Pinilla, 1997).

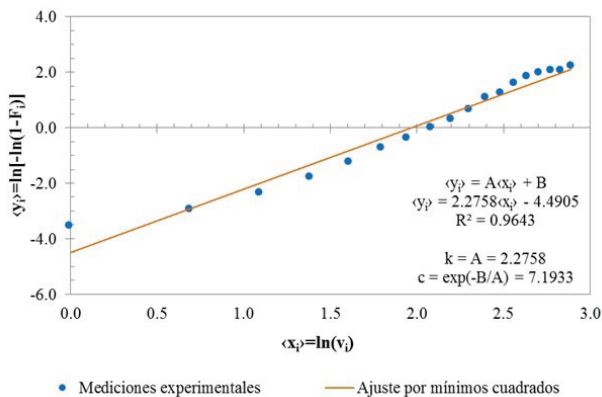


Figura 1. Determinación de parámetros de Weibull para la distribución de frecuencia de velocidades del viento de la Península de Paraganá

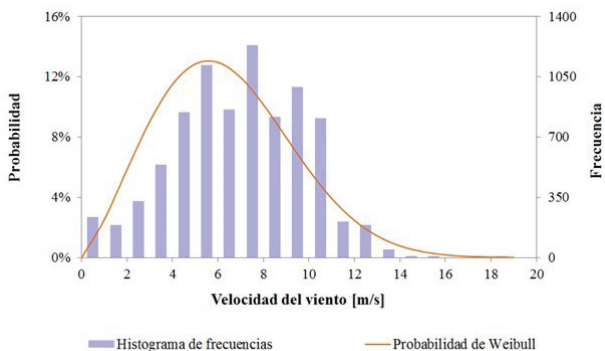


Figura 2. Distribución de frecuencias y de probabilidad de Weibull ($k = 2.2758$ y $c = 7.1933$) para las velocidades del viento de la Península de Paraganá

Caracterización del perfil de viento

Para un adecuado aprovechamiento del recurso eólico, es esencial caracterizar el comportamiento del viento. En este sentido, se ha comprobado que la velocidad media del aire atmosférico desarrolla un gradiente con la altura debido a la formación de una capa límite en la superficie terrestre. Aunque el modelaje de este fenómeno exige de tratamientos estadísticos más avanzados, la norma internacional IEC 61400-1 para el dimensionamiento de aerogeneradores (2005), propone el uso de una correlación práctica conocida como la “Ley potencial de Hellmann”, cuyo exponente β está tabulado para diferentes condiciones de terreno, que permite una estimación preliminar del perfil de viento, tal como se presenta en la Figura 3 para el caso de la Península de Paraganá.

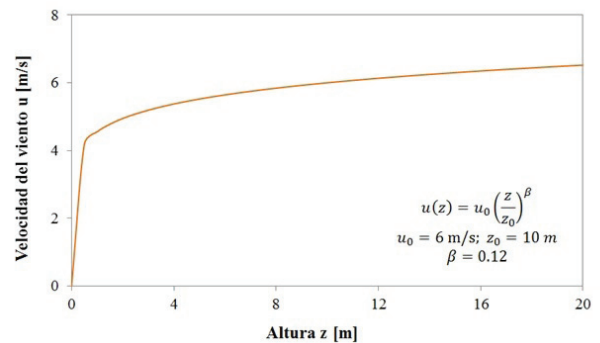


Figura 3. Perfil de velocidad del viento en la Península de Paraganá

De acuerdo al perfil de viento obtenido (con $\beta = 0.12$ en la función de Hellmann), para 9 y 11 metros de altura, las variaciones de velocidad en comparación al valor de diseño (6 m/s a 10 m) son de 1.33 y 1.15%, respectivamente. Estas características permiten limitar la longitud de las palas de una VAWT, instalada en la Península de Paraganá, a 2 metros si se desea disponer de un flujo uniforme en el rotor de la turbina ubicado a 10 metros sobre el nivel del suelo.

DISEÑO AERODINÁMICO

El desempeño de una turbina eólica depende principalmente de las actuaciones que ejerce el aire sobre los álabes del rotor, generadas por la distribución de presiones y esfuerzos cortantes desarrollados por el movimiento relativo fluido-sólido. En particular, dos son las fuerzas de interés: una de arrastre D paralela a la dirección del flujo; y una de sustentación L perpendicular a la velocidad de la corriente incidente, ambas dependientes de las condiciones del fluido y las características geométricas del cuerpo en estudio. Mencionadas fuerzas suelen expresarse en términos de

parámetros adimensionales conocidos como los coeficientes de arrastre C_D y de sustentación C_L , los cuales permiten expresar la efectividad de un sólido para producir fuerzas aerodinámicas.

Para el caso de las turbinas Darrieus que emplean perfiles alares, sólo cuando la componente de la sustentación proyectada en la dirección de la cuerda supera su contraparte del arrastre, se genera la suficiente fuerza tangencial o de empuje T responsable del torque aerodinámico M , condición que varía para cada posición azimutal θ según se evidencia en la Figura 4.

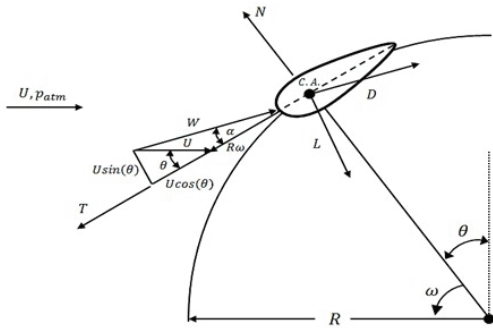


Figura 4. Triángulo de velocidad y diagrama de fuerzas de una VAWT Darrieus

Por su parte, el coeficiente de potencia C_p de una turbina eólica, se define como la relación entre la potencia mecánica extraída y la disponible en el viento, según se expresa en la ec. (3):

$$C_p(\theta) = \frac{M(\theta)\omega}{\frac{1}{2}\rho U^3 A} \quad (3)$$

siendo ω la velocidad rotacional de la turbina, ρ la densidad del aire, y A el área de barrido. Integrando el coeficiente de potencia sobre una revolución, indicado en la ec. (4), es posible obtener una medida de la eficiencia aerodinámica del rotor de la turbina:

$$\bar{C}_p = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} C_p(\theta) d\theta \quad (4)$$

Modelo de CFD

Es conocido que la técnica de CFD resuelve de manera aproximada las ecuaciones rectoras del movimiento de un fluido descritas por la formulación de Navier-Stokes, permitiendo obtener los campos de presión y velocidad del dominio en estudio (Versteeg y Malalasekera, 1995).

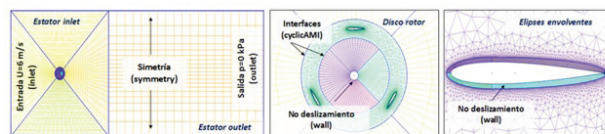
Numerosas investigaciones han demostrado las capacidades de este método numérico en la estimación del desempeño de las VAWT tipo Darrieus (Gosselin *et al.*, 2013; Ferrer y Montlaur, 2015), justificando el uso de perfiles simétricos NACA0012, 0015 y 0018 en los rotores comerciales (Paraschivoiu, 2002).

Apoiado en el *software* libre OpenFOAM, que ha extendido su aplicación en diferentes áreas de la ciencia e ingeniería, sobre todo en el campo de las turbomáquinas (Page y Beaudoin, 2007), se desarrolló un modelo computacional 2D de la turbina aprovechando la simetría axial de sus álabes rectos y el flujo uniforme del viento. La aplicación de las bibliotecas ofrecidas por el programa, permite determinar las fuerzas sobre las superficies de los álabes y en consecuencia los respectivos coeficientes aerodinámicos buscados.

Para la construcción del modelo se emplearon las siguientes hipótesis de trabajo: aire estándar como fluido de trabajo (densidad $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ y viscosidad cinemática $\nu = 1.5E-05 \text{ m}^2/\text{s}$); flujo incompresible, bidimensional, efectos gravitatorios despreciables y turbulento, para lo cual se usó la formulación κ - ω SST, con $\kappa = 0.24$ y $\omega = 1.78$, según los resultados positivos señalados por McLaren (2011), con funciones de pared sobre las superficies de los álabes y eje.

Generación del dominio computacional y condiciones de borde

El dominio computacional fue generado mediante el *software* libre Gmsh (Geuzaine y Remacle, 2009). Aprovechando la uniformidad de magnitud y dirección del perfil de viento analizado en Paraguaná, el dominio se caracterizó por un canal rectangular con cuatro zonas de interés parametrizadas: la región de entrada (estator inlet) y salida (estator outlet), el disco rotor; y elipses envolventes sobre los perfiles aerodinámicos para captar los efectos de desprendimiento de capa límite. En la Figura 5, se puede evidenciar el mallado híbrido del dominio (estructurado en los perfiles y el estator; y no estructurado en el disco rotor para facilitar la adaptación de las interfaces rotativas) junto a las correspondientes condiciones de borde empleadas.



* Condición 2D en OpenFOAM: empty para "Front and Back" del modelo.

Figura 5. Mallado y condiciones de borde del modelo computacional de la VAWT

Para el ajuste transitorio del movimiento rotor-estator, se emplearon las opciones de interfaz rotativo cyclicAMI (Arbitrary Mesh Interface), y pimpleDyMFOam (algoritmo basado en la combinación de los esquemas PISO y SIMPLE) para solucionar las ecuaciones rectoras de la dinámica de fluidos con OpenFOAM (Greenshields, 2015).

Validación del mallado

Para corroborar el sentido físico y garantizar la independencia de los resultados numéricos del mallado utilizado, se efectuó un análisis de convergencia. De esta manera, partiendo de las pruebas experimentales de VAWTs desarrolladas en Sandia Laboratories por Sheldahl *et al.* (1981), se reprodujeron numéricamente las condiciones de los ensayos hasta validar el coeficiente de sustentación de un perfil NACA0012 para un número de Reynolds de 40000 y un ángulo de ataque de 15° , como se observa en las Figuras 6 y 7.

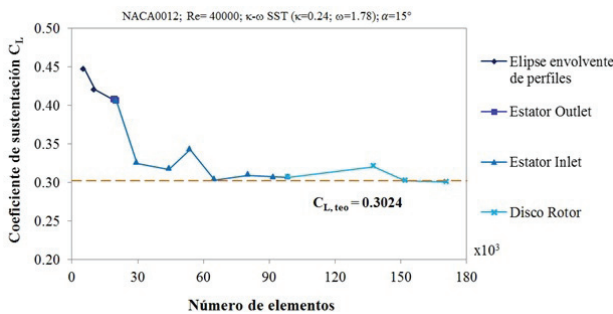


Figura 6. Análisis de convergencia del mallado

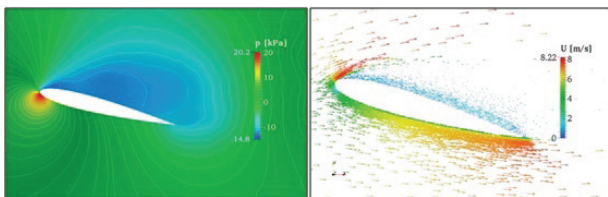


Figura 7. Campo de presión (izquierda) y de velocidad (derecha) del perfil aerodinámico NACA0012 para un ángulo de ataque de 15°

De los campos de flujo obtenidos, se revela como los gradientes de presión en las caras de los perfiles alares desarrollan sus mayores intensidades en el lado del intradós, favoreciendo a la fuerza de sustentación, responsable del torque aerodinámico de la VAWT.

Por su parte, la Figura 8 señala los campos de presión y velocidad de la turbina para diferentes posiciones azimutales, de la cual se refleja el cambio instantáneo del ángulo de ataque en los álabes. De este último gráfico,

se comprende la operación de la máquina en régimen turbulento con desprendimiento de vórtices, condición que afecta de manera adversa su desempeño. En particular la estela generada por el desprendimiento de la capa límite del perfil ubicado aguas arriba de la sección media del rotor para ángulos superiores a 15° , distorsiona el flujo incidente de los álabes localizados aguas abajo, generando un patrón aleatorio en las corrientes del fluido.

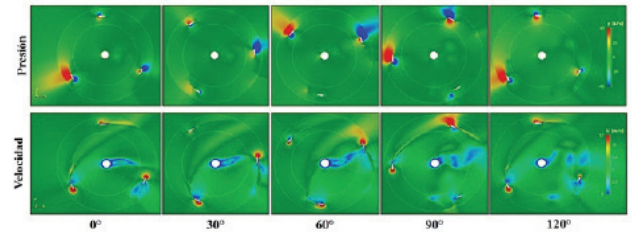


Figura 8. Campos de flujo sobre el rotor de la VAWT para diferentes posiciones azimutales

Más aún, durante el período de arranque de las simulaciones, el carácter transitorio del funcionamiento de la turbina incide notablemente sobre la resolución numérica de las ecuaciones gobernantes del modelo, debido a un flujo no completamente desarrollado alrededor de los perfiles alares. Mencionado efecto de la estela, llega a producir cambios en los campos de presión y velocidad del dominio computacional para lo cual los valores de los coeficientes aerodinámicos y de potencia varían ligeramente por cada vuelta del rotor. De esta manera, buscando predecir un comportamiento más preciso sobre el flujo alrededor de los perfiles alares a lo largo de una revolución, en que se atenuase las turbulencias propagadas durante el inicio de la simulación, se permitió que la VAWT alcanzara una condición pseudo-estacionaria. Así, como se refleja en la Figura 9, a partir de la tercera vuelta, el fenómeno transitorio se reduce lo suficiente (con un error menor a $1.00E-04$) para considerarse representativo de la operación de la máquina, dada las limitaciones de memoria computacional y tiempo de ensayo, seleccionándose para el reporte de los cálculos.

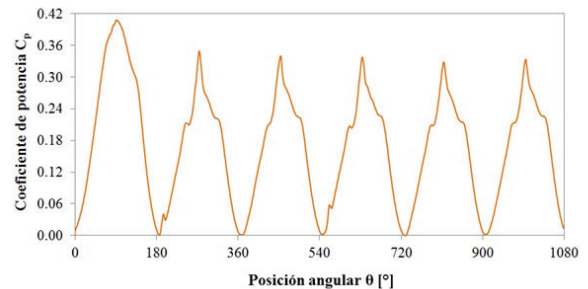


Figura 9. Carácter transitorio de la simulación sobre el movimiento rotor-estator de la VAWT

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Una vez calibrado el modelo bidimensional de CFD de la turbina H-Darrieus, se ejecutaron las simulaciones de la VAWT variando su tipo de perfil NACA y número de álabes para condiciones de operación estandarizadas como velocidad de giro de 120 rpm y ángulo de paso de 0° (Paraschivoiu, 2002; Tong, 2010), a fin de examinar la influencia de ambos parámetros en los coeficientes aerodinámicos y de potencia del rotor. Los resultados obtenidos del post-procesamiento son presentados a continuación.

Selección del tipo de perfil

De la Figura 10, puede evidenciarse que independientemente del tipo de perfil NACA, la turbina Darrieus es incapaz de auto-arrancar debido a la insuficiente sustentación, presentando valores negativos entre 0 y 75° (al inicio de toda revolución), donde solo un sistema externo (como un motor de arranque) le puede permitir alcanzar una primera velocidad de operación. Así mismo, una comparativa entre los perfiles, revela que tanto los NACA0015 como 0018 ofrecen las mejores características de sustentación, destacándose este último por exhibir mayores coeficientes de arrastre entre 0-60° y 180-240° (por ser el perfil de mayor espesor).

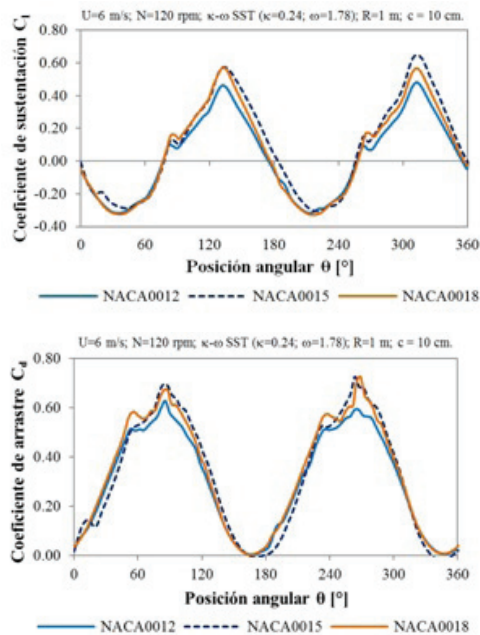


Figura 10. Coeficientes aerodinámicos (sustentación C_l a la izquierda y arrastre C_d a la derecha) en función de la posición angular θ para diferentes perfiles NACA en un rotor de 2 álabes

En términos de la curva de potencia, ofrecida en la Figura 11 y Tabla 1, se observa que el perfil simétrico NACA0018 ostenta la mejor eficiencia ($\overline{C_p} = 0.2118$) dada su favorable relación aerodinámica (sustentación/arrastre) en una revolución, seleccionándose para el diseño de la turbina.

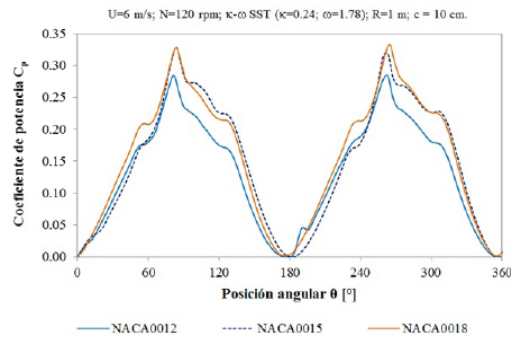


Figura 11. Coeficientes aerodinámicos (sustentación C_l a la izquierda y arrastre C_d a la derecha) en función de la posición angular θ para diferentes perfiles NACA en un rotor de 2 álabes

Tabla 1. Coeficientes de potencia promedio para perfiles ensayados

Tipo de perfil	$\overline{C_p}$
NACA0012	0.1811
NACA0015	0.2096
NACA0018	0.2118

Selección del número de álabes óptimo

Como se refleja en la Figura 12, el incremento del número de álabes uniformiza los coeficientes aerodinámicos del rotor de la VAWT. Considerando el caso ideal de una turbina de “infinitos álabes”, se tendría un cilindro sólido cuya sustentación y arrastre serían constantes en toda una revolución para condiciones geométricas, de flujo y velocidad de giro dadas (White, 2008). A su vez, las curvas aerodinámicas obtenidas demuestran que para un perfil NACA0018 con 4 álabes, aumenta la sustentación entre 0-60°, 120-180° y 240-300°, a diferencia de 3 álabes donde sólo brinda una mejora entre 60-120° y 180-240° en una revolución. Sin embargo, un estudio del arrastre verifica su incremento con la adición de álabes (y por lo tanto de un área de incidencia mayor). Sólo el rotor de 3 perfiles alares ofrece un coeficiente de arrastre esencialmente constante, favorable para las condiciones de diseño de una turbina Darrieus. En el caso de 2 álabes, el comportamiento armónico de la turbina ofrece una mayor amplitud, pero los cambios en la sustentación son muy pronunciados, llegando a alcanzar valores negativos.

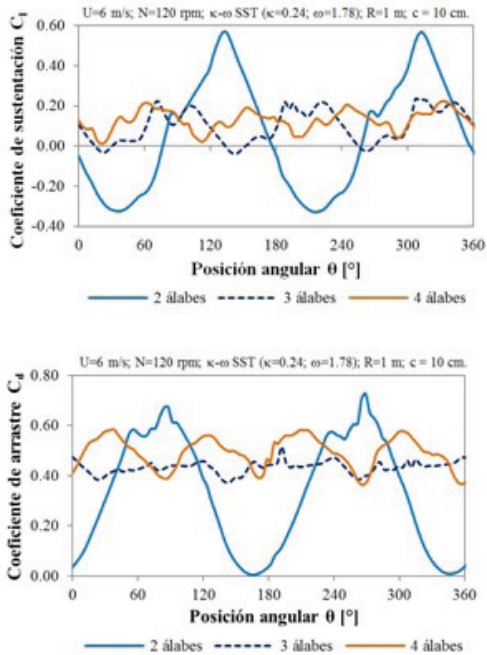


Figura 12. Coeficientes aerodinámicos (sustentación C_l a la izquierda y arrastre C_d a la derecha) en función de la posición angular θ para diferentes números de álabes en un rotor de perfiles NACA0018

Al igual como sucede con los coeficientes aerodinámicos, la eficiencia de la turbina se uniformiza con el aumento del número de álabes, presentado en la Figura 13. Basado en los coeficientes de potencia obtenidos para los números de álabes ensayados, según se observa en la Tabla 2, se evidencia que con 4 palas por rotor se obtiene el mayor rendimiento ($\overline{C_p} = 0.2250$). Sin embargo, su incremento es menor al 0.85% en relación con 3 álabes ($\overline{C_p} = 0.2232$), no justificando la elevación de costos de fabricación para una poca ganancia. De este modo, el rotor de 3 perfiles alares NACA0018 garantiza la mejor relación costo/beneficio para la turbina modelada.

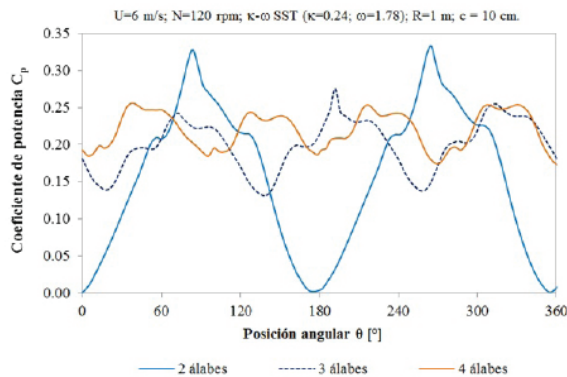


Figura 13. Coeficientes de potencia C_p en función de la posición angular θ para diferentes números de álabes con perfiles NACA0018

Tabla 2. Coeficientes de potencia promedio para número de álabes ensayados con el perfil NACA0018.

Número de álabes	$\overline{C_p}$
2	0.2118
3	0.2232
4	0.2250

CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS

En la presente investigación, un modelo 2D de CFD de una turbina eólica de eje vertical tipo H-Darrieus fue propuesto, evaluando el desempeño aerodinámico de su rotor frente a las condiciones ofrecidas por los perfiles de viento de la Península de Paraguaná, zona costera de mayor potencial eólico disponible en Venezuela. Apoyándose en los *software* libres de Gmsh y OpenFOAM se logró el planteamiento del dominio computacional rotor-estator con interfaz rotativo y modelo de turbulencia κ - ω SST.

La turbina en estudio fue simulada con diferentes geometrías variando el tipo de perfil y el número de álabes, como los parámetros más influyentes en la eficiencia energética del sistema.

Los resultados obtenidos demuestran que tanto los perfiles NACA0015 como 0018 ofrecen las mejores características para el diseño. En términos de la curva de potencia, el modelo NACA0018 es más conveniente por su relación sustentación/arrastre, desempeñando un papel favorable en el arranque de la turbina debido a su sustentación negativa (para un ángulo de paso de 0°) en el inicio de su revolución, requiriendo de un agente externo para su accionamiento.

Por su parte, a partir de 3 perfiles por rotor, no se genera un incremento apreciable en el coeficiente de potencia (menor al 1%), donde para los modelos ensayados de 2 y 4 álabes se evidenciaron cambios importantes en el arrastre aerodinámico.

Estas características identificadas permiten señalar que la mejor opción para el diseño aerodinámico de una VAWT Darrieus, adecuada a los perfiles de viento de Paraguaná, debe apuntar hacia un rotor de 3 álabes con perfiles NACA0018.

Se proyecta que en futuros trabajos, se construya la curva característica de la turbina propuesta especificando puntos de operación de diseño y estudiando la sensibilidad del coeficiente de potencia con el ángulo de paso a miras de favorecer la sustentación en el arranque del sistema. Otros

aspectos de interés a desarrollar son la construcción de un modelo tridimensional que permita conocer los efectos de borde de los álabes en la eficiencia del rotor, así como la propuesta de arreglos de turbinas que evalúen la posibilidad de implementación de una granja eólica en la Península de Paraguaná.

AGRADECIMIENTOS

Para la ejecución del modelaje computacional propuesto, ambos autores agradecen el apoyo tecnológico brindado por el Laboratorio de Conversión de Energía Mecánica y del Prof. Ramón Dárias del Departamento de Física de la Universidad Simón Bolívar.

REFERENCIAS

- ALLET, A., PARASCHIVOIU, I. (1995). Viscous Flow and Dynamic Stall Effects on Vertical-Axis Wind Turbines. *International Journal of Rotating Machinery*, 2(1), pp. 1-14.
- BRAHIMI, M., ALLET, A., PARASCHIVOIU, I. (1995). Aerodynamic Analysis Models for Vertical-Axis Wind Turbines. *International Journal of Rotating Machinery*, 2(1), pp. 15-21.
- BERRIOS, R. (1995). *Evaluación Numérica del Potencial Eólico en Zonas Costeras Venezolanas*. Trabajo Especial de Grado presentado ante la Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- BURTON, T., SHARPE, D., JENKINS, N., BOSSANYI, E. (2001). *Wind Energy Handbook*. Great Britain: John Wiley & Sons.
- CARTA, J., CALERO, R., COLMENAR, A., CASTRO, M. (2009). Centrales de Energías Renovables. Generación eléctrica con energías renovables. UNED, Madrid, España: Pearson Prentice Hall. 2: 47-48, 3: 88, 7: 333-412.
- FERRER, E., MONTLAUR, A. (2015). CFD for Wind and Tidal Offshore Turbines. Springer Tracts Tracts in Mechanical Engineering, Switzerland.
- GEUZAIN, C., REMACLE, J. (2009). Gmsh: a Three-Dimensional Finite Element Mesh Generator with Built-in Pre- and Post-processing Facilities. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 79, n. 11, pp. 1309-1331.
- GONZÁLEZ-LONGATT, F. (2010). Aspectos Fundamentales de la Energía Eólica: Venezuela y el Mundo. XI Congreso de Estudiantes de Ingeniería IEEE, UNEFA, Táchira, Venezuela.
- GOSSELIN, R., DUMAS, G., BOUDREAU, M. (2013). Parametric Study of H-Darrieus Vertical-axis Turbines Using Urans Simulations. 21st Annual Conference of the CFD Society of Canada, Sherbrooke, Canada.
- GREENSHIELDS, C. (2015). OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox, User Guide, CFD Direct Ltd & OpenFOAM Foundation Ltd.
- HERNÁNDEZ, G., DUARTE, R. (2000). Estudio de factibilidad para la instalación de una central eólica a un desarrollo turístico ubicado en Paraguaná. Trabajo Especial de Grado presentado ante la Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- INTERNATIONAL STANDARD IEC 61400-1 (2005). Wind Turbines: Design requirements.
- MASSON, C., LECLERC, C., PARASCHIVOIU, I. (1998). Appropriate Dynamic-Stall Models for Performance Predictions of VAWTs with NLF Blades. *International Journal of Rotating Machinery*, vol. 4, n. 2, pp. 129-139.
- MCLAREN, K. (2011). A Numerical and Experimental Study of Unsteady Loading of High Solidity Vertical Axis Wind Turbines. Open Access Dissertations and Theses McMaster University, Paper 6091, Canada.
- PAGE, M., BEAUDOIN, M. (2007). Adapting OpenFOAM for Turbomachinery Applications. Second OpenFOAM Workshop, IREQ, Hydro-Québec's Research Institute, Zagreb, Croatia.
- PARASCHIVOIU, I. (2002). Wind Turbine Design with Emphasis on Darrieus Concept. Canada: Polytechnic International Press.
- PINILLA, A. (1997). Manual de aplicación de la energía eólica. Ministerio de Minas y Energía, Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas, Colombia.
- RAMÍREZ, P., CARTA, J. (2005). Influence of the data sampling interval in the estimation of the parameters of the Weibull wind power probability density distribution: a case study. *Energy Conversion and Management*, vol. 46, pp. 2419-2438.

- ROSATO, M. (1991). *Diseño de máquinas eólicas de pequeña potencia*. España: Progresa.
- SATHYAJITH, M., GEETHA, S., CHEE, M. (2011). *Analysis of Wind Regimen and Performance of Wind Turbines*. Berlin Heidelberg, Germany: Springer Verlag.
- SCHEURICH, F., BROWN, R. (2011). Effect of Dynamic Stall on the Aerodynamic of Vertical-Axis Wind Turbines, *AIAA Journal*, 49(11), pp. 2511-2521.
- SHELDAHL, R., KLIMAS, P. (1981). Aerodynamic Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil Sections Through 180-Degree Angle of Attack for Use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines. SAND80-2144. Albuquerque, USA: Sandia Laboratories.
- TONG, W. (2010). *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*. United Kingdom: WIT Press, Southampton, Kollmorgen Corp.
- VERSTEEG, H., MALALASEKERA, W. (1995). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics. The Finite Volume Method*. USA: Longman Scientific & Technical.
- VILLARUBIA, M. (2012). *Ingeniería de la energía eólica*. España: Marcombo Ediciones Técnicas.
- WHITE, F. (2008). *Mecánica de fluidos*. México: McGraw Hill.

