

Revisión de los perfiles aerodinámicos apropiados para turbinas eólicas de eje horizontal y de pequeña escala en zonas boscosas¹

Gustavo Richmond-Navarro², Mariana Montenegro-Montero³ y Carlos Otárola⁴

Resumen

Introducción: la energía eólica ha crecido de forma acelerada en los últimos 20 años y los sitios para instalar parques eólicos se empiezan a agotar. Las turbinas eólicas de pequeña escala representan una alternativa viable, en particular en zonas boscosas: de bajo potencial eólico y alta turbulencia. **Objetivo:** presentar una revisión de los perfiles aerodinámicos para aerogeneradores de pequeña escala, para determinar su posible aplicación en zonas boscosas. **Materiales y métodos:** se efectúa una revisión literaria en las bases de datos Web of Science y Scopus, sobre turbinas eólicas de pequeña escala de eje horizontal, en las revistas Energy, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Renewable and Sustainable Energy Reviews y Renewable Energy, entre otras. Se define una clasificación de tres grandes grupos para los perfiles aerodinámicos: de uso muy frecuente, de uso con frecuencia media y de uso con baja frecuencia.

Resultados: los perfiles de uso muy frecuente son el SG6043, S809 y NACA0012, siendo el primero de ellos el que presenta mejor desempeño aerodinámico. A pesar de esto, otros perfiles como el SH3055 son ampliamente usados en turbinas eólicas de pequeña escala. **Conclusiones:** un perfil adecuado para una turbina eólica de pequeña escala para zonas boscosas debe ser diseñado para regulación por pérdida (*stall*) y poseer una alta robustez ante cambios de rugosidad superficial. El perfil con mayor potencial, según la literatura para esta aplicación, es el SG6043, siendo 110 % y 85 % más eficiente que NACA0012 y S809, respectivamente, para un Re de 2×10^5 ; empero, se requiere más investigación en temas como desempeño aerodinámico de los perfiles ante altos niveles de turbulencia.

Palabras clave: turbina, energía eólica, aerodinámica, zona boscosa

1 Artículo original derivado del Proyecto de investigación "Optimización aerodinámica de una turbina eólica de eje horizontal para aplicaciones de pequeña escala en zonas boscosas", del Instituto Tecnológico de Costa Rica, ejecutado desde el 01 de enero de 2018 y aún en desarrollo; Laboratorio de Investigación en Energía Eólica; Financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica

2 Magíster en Ciencias de la Ingeniería Mecánica, Universidad de Chile, Licenciado en Ingeniería en Mantenimiento Industrial, Instituto Tecnológico de Costa Rica, docente-investigador del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Correo: grichmond@tec.ac.cr / ORCID: 0000-0001-5147-5952

3 Máster en Ciencias en Ingeniería Eólica, Universidad Técnica de Dinamarca, Licenciada en Ingeniería Mecánica, Universidad de Costa Rica, docente-investigadora del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Correo: mmontenegro@tec.ac.cr / ORCID: 0000-0002-1865-3021

4 Máster en Sistemas Modernos de Manufactura, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Bachiller en Ingeniería Mecánica, Universidad de Costa Rica, docente-investigador del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Correo: cotarola@tec.ac.cr / ORCID: 0000-0002-1827-788X

Autor para correspondencia: Gustavo Richmond-Navarro. Correo grichmond@tec.ac.cr

Recibido: 22/04/2019 Aceptado: 21/07/2020

A review of horizontal axis small wind turbine blades suitable for wooded areas

Abstract

Introduction: Wind energy has grown rapidly in the last 20 years and sites to install full-scale wind farms are starting to run out. Small-scale wind turbines represent a feasible alternative, particularly in forested areas of low wind potential and high turbulence. **Objective:** to present a review of the aerodynamic profiles for small-scale wind turbines, to determine their possible application in wooded areas. **Materials and methods:** a review of small-scale horizontal axis wind turbines is carried out using the Web of Science and Scopus databases mainly on the journals: Energy, Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Renewable and Sustainable Energy Reviews, and Renewable Energy. A classification of three large groups is defined for the aerodynamic profiles: very frequent use, medium frequency use and low frequency use. **Results:** the profiles of very frequent use are the SG6043, S809 and NACA0012, the first of them is the one having the best aerodynamic performance. Despite this, other profiles such as the SH3055 are widely used in the small-scale wind turbine field. **Conclusions:** a suitable profile for a small-scale wind turbine for forested areas should be designed for *stall* regulation and have low sensitivity against changes in surface roughness. The profile with the greatest potential, according to the literature for this application, is the SG6043, being 110% y 85% more efficient than NACA0012 and S809, respectively, for a Re of 2×10^5 ; however, more research is required on issues such as aerodynamic performance of the profiles at high levels of turbulence.

Keywords: turbine, wind energy, aerodynamics, wooded area

Revisão dos perfis aerodinâmicos apropriados para turbinas eólicas de eixo horizontal e pequena escala nas zonas arborizadas

Resumo

Introdução: a energia eólica há crescido de forma acelerada nos últimos 20 anos e os sítios para instalar parques eólicos começam a diminuir. As turbinas eólicas de pequena escala representam uma alternativa viável, em particular nas zonas arborizadas: de baixo potencial eólico e alta turbulência. **Objetivo:** apresentar uma revisão dos perfis aerodinâmicos para aerogeradores de pequena escala, para determinar uma possível aplicação nas zonas arborizadas. **Materiais e métodos:** efetuou-se uma revisão literária nas bases de dados Web of Science e Scopus, sobre turbinas eólicas de pequena escala de eixo horizontal, nos jornais Energy, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Renewable and Sustainable Energy Reviews e Renewable Energy, entre outras. Define-se uma classificação dos três grandes grupos para os perfis aerodinâmicos: de uso muito frequente, de uso com frequência meia e de uso com baixa frequência. **Resultados:** os perfis de uso muito frequente são o SG6043, S809 y NACA0012, sendo o primeiro deles o que apresenta melhor desempenho aerodinâmico. Apesar disso, os perfis como o SH3055 são amplamente usados nos negócios das turbinas eólicas. **Conclusões:** um perfil adequado para uma turbina eólica de pequena escala para zonas arborizadas deve ser projetado para regulação por *stall* e possuir uma alta robustez ante mudanças na rugosidade superficial. O perfil com maior potencial, segundo a literatura e para essa aplicação é o SG6043, sendo 110% e 85% mais eficiente que NACA0012 e S809, respectivamente, para um Re de 2×10^5 , no entanto, requiere mais investigação em temas

como o desempenho aerodinâmico dos perfis ante altos níveis de turbulência.

Palavras-chave: turbina, energia eólica, aerodinâmica, área arborizada

Introducción

La investigación, desarrollo y comercialización de las turbinas eólicas ha dado resultados muy notables en cuanto a producción energética en las últimas décadas, por ejemplo, entre 2001 y 2017 la capacidad instalada acumulada en el planeta pasó de 23 900 MW a 539 581 MW, lo que representa un 2258 % de aumento (Global Wind Energy Council [GWEC], 2018). No obstante, este crecimiento acelerado se ve limitado pues hay una disminución en la cantidad de posibles sitios en tierra para instalar grandes parques eólicos, por lo que se debe valorar la instalación de turbinas eólicas en sitios como bosques o zonas industriales, donde la rugosidad del terreno es moderada o alta (Mertens, 2006). En ese tipo de regiones, las turbinas eólicas de pequeña escala constituyen una fuente de energía confiable, incluso con valor socioeconómico en los países en desarrollo (Tummala et al., 2016).

Al mencionar turbinas eólicas de pequeña escala, se debe tener en cuenta que su definición no está estandarizada en la literatura (Kishore et al., 2013). A pesar que la norma de la International Electrotechnical Commission IEC 61400-2, para turbinas eólicas de pequeña escala, indica ser aplicable para rotores con un área de barrido de 200 m² o menos (International Electrotechnical Commission [IEC, 2013]), es decir, de menos de 8 metros de radio, otros autores proporcionan definiciones alternativas. Por ejemplo, Clausen y Wood (2000) establecen que las turbinas de pequeña escala poseen un radio de 5 metros o menos y a su vez se subdividen en mini, medio y micro: se propone en cada caso un rango de potencia, un máximo de velocidad angular, la posible aplicación y

el tipo de generador. Mientras que Tummala et al. (2016) también identifican las turbinas de pequeña escala como aquellas que poseen un radio menor a 5 metros, pero en este caso se subdividen en domésticas, mini y micro y se establece para cada categoría un rango de potencia estándar. Otros autores se limitan a definir la pequeña escala en función de la potencia (Surve, 2017) y en algunos estudios se asocian las turbinas de pequeña escala con un número de Reynolds (Re) por debajo de 500 000 (Singh et al., 2012). En este trabajo se adoptará la cota de 8 metros de radio de la norma IEC para referirse a turbinas de pequeña escala.

Existen en la literatura revisiones recientes sobre el tema de turbinas eólicas de pequeña escala (Tummala et al., 2016) y sobre las aspas de este tipo de turbinas (Karthikeyan et al., 2015), así como documentos de mayor antigüedad que establecen familias completas de perfiles aerodinámicos para las turbinas eólicas en función de su radio (Tangler y Somers, 1995). En estos y otros trabajos se mencionan pocas veces los efectos de la alta turbulencia en zonas boscosas.

Las fuerzas de sustentación y arrastre que experimenta un perfil aerodinámico son dependientes del ángulo de ataque, número de Reynolds y la fuerza aerodinámica creada por la geometría del perfil. En una geometría definida, se calculan los coeficientes de sustentación y arrastre, CL y CD respectivamente, de manera que se pueda contar con esos datos para definir la geometría adecuada para ciertas condiciones de viento dadas (Hansen, 2013).

Para condiciones turbulentas, con Reynolds bajos, la capa límite del flujo transiciona de

laminar a turbulenta en la zona cerca del borde de ataque del aspa, creando valores de sustentación bajos y de arrastre relativamente altos, por lo que una geometría adecuada es crítica.

La interacción entre el perfil aerodinámico y el fluido está directamente relacionada con la extracción de energía del fluido por parte de un aerogenerador, pues de acuerdo con la teoría BEM (del inglés *Blade Element Momentum theory*), el torque que recibe una turbina eólica es igual a la razón de cambio del momento angular del flujo que pasa por el área barrida por las aspas, a su vez, el torque es función, entre otras variables, de los valores de los coeficientes de sustentación y arrastre del perfil aerodinámico en cada elemento de aspa analizado (Richmond et al., 2017).

El objetivo de este trabajo es presentar una revisión de los distintos perfiles aerodinámicos en el campo de aerogeneradores de pequeña escala, considerando principalmente su comportamiento aerodinámico para determinar su posible aplicación en zonas boscosas. Se delimita el estudio a las turbinas de eje horizontal, debido a que usualmente presentan mayor coeficiente de potencia (Pourrajabian, Ebrahimi y Mirzaei, 2014; Shen, 2016).

Materiales y métodos

Se efectúa una revisión literaria en las bases de datos Web of Science y Scopus, enfocándose en el tema de turbinas eólicas de pequeña escala y temas afines como la alta turbulencia, bajo número de Reynolds y las condiciones de bajo potencial eólico. Restringiendo los resultados a turbinas eólicas de eje horizontal.

Las búsquedas se realizaron con las palabras clave: small wind turbine, wooded area, horizontal axis, turbulence, laminar separation bubble, low Re, low wind potential y small

scale. Estas fueron realizadas entre el 01 de enero de 2018 y el 01 de marzo de 2019.

Se identifica que el tema es tratado principalmente en las revistas Energy, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Renewable and Sustainable Energy Reviews y Renewable Energy. Posteriormente, se amplía la búsqueda a otras revistas dentro de las mismas bases de datos, así como congresos, pero únicamente en el caso que el trabajo sea relevante para esta revisión y a su vez cite publicaciones de alto impacto, de las cuatro revistas previamente indicadas.

Se seleccionan además las investigaciones de los últimos 20 años, salvo casos particulares de artículos de mayor antigüedad pero que son citados con mucha frecuencia en el resto de las publicaciones analizadas en esta revisión.

Se define una clasificación de tres grandes grupos para los perfiles aerodinámicos encontrados en la literatura:

1. De uso muy frecuente: estudiados por más de tres autores o centros de investigación.
2. De uso con frecuencia media: examinados en dos investigaciones dentro del grupo en estudio.
3. De uso con baja frecuencia: empleados en una investigación, donde se encuentran perfiles existentes (de la familia del National Advisory Committee for Aeronautics –NACA– por ejemplo) y perfiles dedicados (diseñados por el grupo investigador particular).

En cada categoría se dan detalles del desempeño de los principales perfiles,

prestando especial atención a un grupo selecto de cuerpos aerodinámicos que han sido estudiados de forma amplia en la literatura de turbinas eólicas, el NACA0012, SG6043 y S809, para los cuales se presenta su desempeño en diferentes condiciones de interés.

Resultados

Perfiles de uso muy frecuente. Mediante la revisión general de literatura descrita en la metodología, se muestra en la tabla 1, el listado de los perfiles aerodinámicos que aparecen con más frecuencia en las investigaciones consideradas en esta revisión, en el campo de turbinas eólicas de pequeña escala y conceptos asociados.

Tabla 1. Perfiles aerodinámicos de posible interés para turbinas eólicas en zonas boscosas

Perfil aerodinámico	Investigaciones donde se menciona el perfil aerodinámico
NACA0012	Tummala et al., 2016; Kishore et al., 2013; Shen et al., 2016; Rocha et al., 2016; Rocha et al., 2014; Akbari et al., 2003; Wood, 2001; Khalil et al., 2018; Wang et al., 2014; Vaz y Wood, 2016; Li et al., 2011
SG6043	Tummala et al., 2016; Shing et al., 2012; Pourrajabian, Ebrahimi y Mirzaei, 2014; Singh y Ahmed, 2013; Göçmen, T. y Özerdem, 2012; Giguere y Selig, 1998; Wood, 2004; Pourrajabian, Mirzaei et al., 2014; Pourrajabian et al., 2019; Akour et al., 2018; Sessarego y Wood, 2015
S809	Shen et al., 2016; Menegozzo et al., 2018; Gomes et al., 2014; Thumthae y Chitsomboon, 2009; Hu et al., 2006; Hassanzadeh et al., 2016; Du y Selig, 2000; Huang et al., 2011; Maldonado et al., 2015
FX63-137	Tummala et al., 2016; Shing et al., 2012; Singh y Ahmed, 2013; Göçmen, T. y Özerdem, 2012; Refan y Hangan, 2012
S822	Shing et al., 2012; Karthikeyan et al., 2015; Göçmen, T. y Özerdem, 2012; Kale y Varma, 2014; Robin et al., 2017
SH3055	Tummala et al., 2016; Shing et al., 2012; Singh y Ahmed, 2013; Göçmen, T. y Özerdem, 2012
SG6040	Tummala et al., 2016; Shing et al., 2012; Singh y Ahmed, 2013; Giguere y Selig, 1998
DU93-W-210	Khalil et al., 2018; Hjort y Larsen, 2014; Mayor et al., 2013
NACA4412	Rocha et al., 2016; Kale y Varma, 2014; Habali y Saleh, 1995
SD7062	Karthikeyan et al., 2015; Sessarego y Wood, 2015; Song y Lubitz, 2014
AF300	Tummala et al., 2016; Shing et al., 2012; Singh y Ahmed, 2013
E387	Tummala et al., 2016; Shing et al., 2012; Karthikeyan et al., 2015

Fuente: elaborada por los autores

De la tabla 1 se desprende que los perfiles de uso muy frecuente son el SG6043, S809 y NACA0012. A pesar de esto, cabe destacar que el perfil SH3055 es ampliamente usado en el negocio de las turbinas eólicas de pequeña escala debido al éxito en cuanto a satisfacción de los consumidores, según afirman Göçmen y Özerdem (2012). Por otra parte, de acuerdo con los resultados que presenta Karthikeyan et

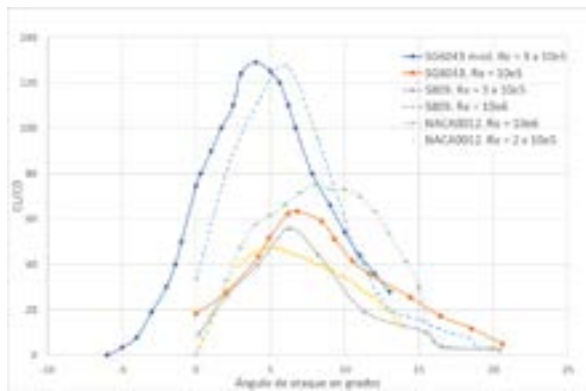
al. (2015), destaca el perfil E387 por presentar un $(CL/CD)_{\text{máx}} = 81,70$.

El perfil FX63-137 ha sido empleado en turbinas que alcanzan un coeficiente de potencia máximo de 0,5 (Tummala et al., 2016). Por su parte el S822 es identificado como un perfil que posee un CL máximo que no es sensible a cambios en la rugosidad, por lo que resulta

adecuado para turbinas reguladas por pérdida (*stall*) (Karthikeyan et al., 2015). El SG6040 pertenece a la familia de cuerpos aerodinámicos diseñados específicamente para turbinas eólicas de pequeña escala propuestos por Giguere y Selig (1998). El perfil AF300, además de ser diseñado para turbinas pequeñas, tiene la particularidad de considerar también un bajo número de Reynolds (Singh et al., 2012).

En la figura 1 se muestra el desempeño aerodinámico comparativo de los tres perfiles principales identificados en la tabla 1, según la literatura, para varios números de Reynolds (Re).

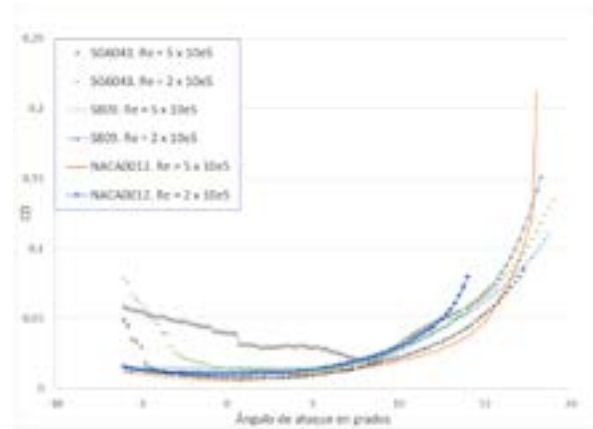
Figura 1. Relación CL/CD para los perfiles SG6043, S809 y NACA0012.



Fuente: elaborada por los autores con datos de varias fuentes (Airfoil Tools, s.f.a.; Göçmen y Özerdem, 2012; Shen et al., 2016; Singh et al., 2012; Thumthae y Chitsomboon, 2009).

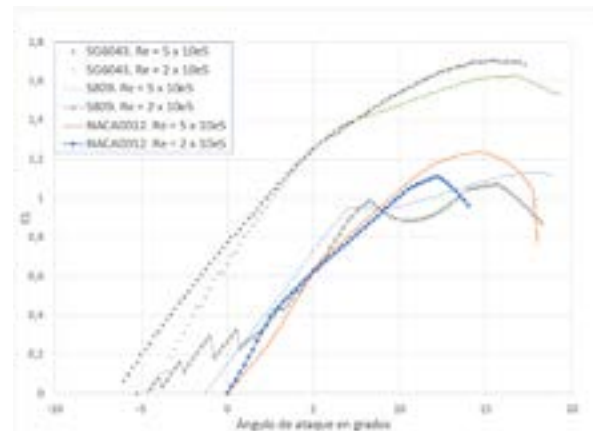
Para conocer el desempeño de estos tres perfiles con mayor detalle, se presenta en las figuras 2, 3 y 4 las curvas de CD, CL y CL/CD en función del ángulo de ataque, para dos valores de número de Reynolds donde ocurre separación laminar de la capa límite, lo cual es de interés en el campo de estudio de esta investigación (Singh y Ahmed, 2013).

Figura 2. Coeficiente de arrastre para los perfiles SG6043, S809 y NACA0012.



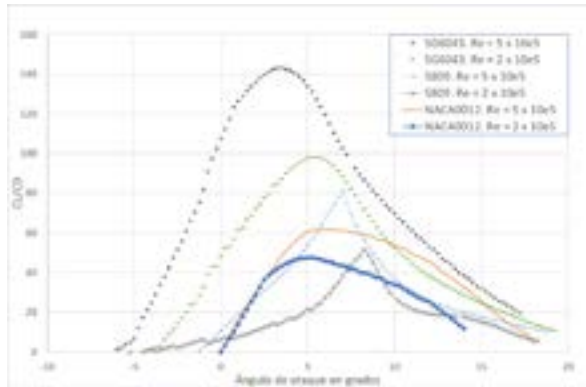
Fuente: elaborada por los autores con datos de varias fuentes (Airfoil Tools, s.f.a; Airfoil Tools, s.f.b; Airfoil Tools, s.f.c).

Figura 3. Coeficiente de sustentación para los perfiles SG6043, S809 y NACA0012.



Fuente: elaborada por los autores con datos de varias fuentes (Airfoil Tools, s.f.a; Airfoil Tools, s.f.b; Airfoil Tools, s.f.c).

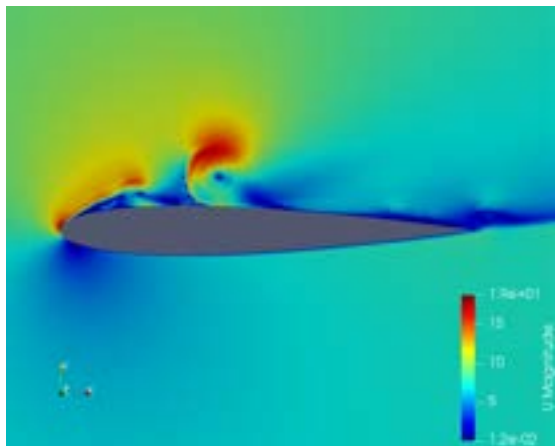
Figura 4. CL/CD para los perfiles SG6043, S809 y NACA0012.



Fuente: elaborada por los autores con datos de varias fuentes (Airfoil Tools, s.f.a; Airfoil Tools, s.f.b; Airfoil Tools, s.f.c).

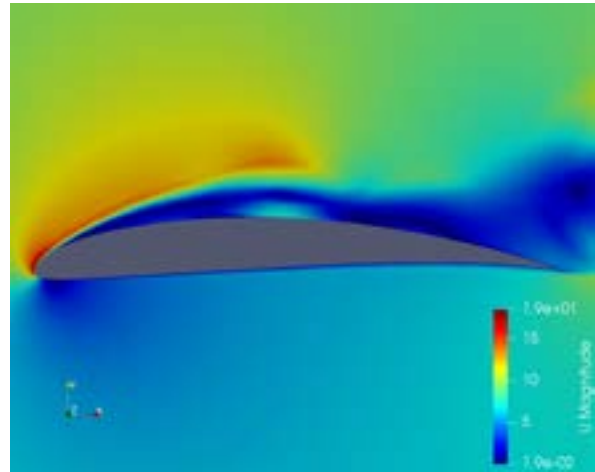
Una visualización de la velocidad del flujo en un ambiente a $Re = 5 \times 10^5$, con un ángulo de ataque de 15° se muestra en las figuras 5, 6 y 7, para NACA 0012, SG6043 y S809, respectivamente. En ellas se puede observar los efectos de la geometría de cada perfil sobre el flujo.

Figura 5. Velocidad del flujo en m/s, de un perfil NACA0012 para $Re = 5 \times 10^5$.



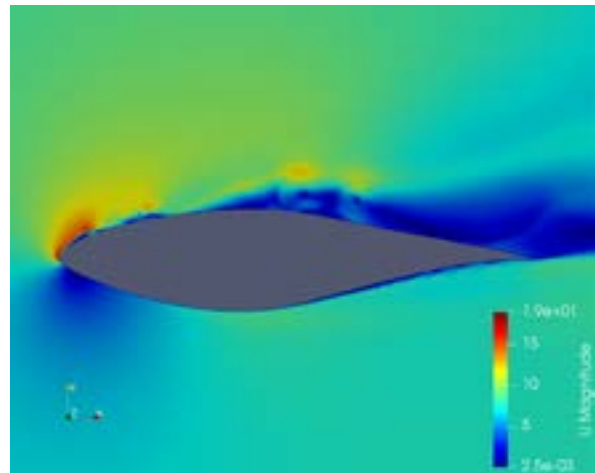
Fuente: elaborada por los autores.

Figura 6. Velocidad del flujo en m/s, de un perfil SG6043 a $Re = 5 \times 10^5$.



Fuente: elaborada por los autores.

Figura 7. Velocidad del flujo en m/s, de un perfil S809 a $Re = 5 \times 10^5$.



Fuente: elaborada por los autores.

A continuación, se brindan algunos detalles específicos de cada uno de estos tres perfiles aerodinámicos, por ser de gran interés según la literatura de turbinas eólicas de pequeña escala.

NACA 0012. El perfil simétrico NACA 0012 es uno de los cuerpos aerodinámicos más estudiados y populares en el campo de las turbinas eólicas (Khalil et al., 2018), tanto de eje horizontal como de eje vertical (Tummala,

2016). Su desempeño aerodinámico es ampliamente conocido (Khalil et al., 2018).

Kishore et al. (2013) mencionan que el coeficiente de sustentación máximo decrece al reducir el número de Reynolds, a la vez que el arrastre se incrementa. Esto implica que la relación CL/CD cae abruptamente para números de Reynolds bajos, lo cual se ilustra en la figura 1. Por otra parte, Vaz y Wood (2016) indican que el NACA0012 fue elegido en esa investigación por tener una relación CL/CD moderada.

SG6043. El perfil SG6043 fue diseñado por Giguere y Selig (1998) como parte de un grupo de cuerpos aerodinámicos que podrían ser usados a lo largo de toda el aspa para turbinas eólicas de eje horizontal y velocidad variable.

Las dos curvas mostradas en la figura 1 para este perfil, comparan el caso de la geometría base en un $Re = 10^5$ con una geometría optimizada por Göçmen y Özerdem, 2012 y en un $Re = 3 \times 10^5$. El máximo CL/CD para este perfil tiene una importante dependencia proporcional con el número de Reynolds. Al pasar el Re de 10^5 a 3×10^5 el CL/CD máximo se duplica, aun en el caso sin optimizar la relación CL/CD ronda el valor de 120. Wood (2004) y Pourrajabian et al. (2014) indican que para $Re = 2,20 \times 10^5$ el máximo CL es de 1,22 para un ángulo de ataque de 5° .

Este perfil es empleado por Sessarego y Wood (2015) para fabricar varias aspas optimizadas, de diferentes materiales, donde

se obtiene que resulta adecuado para tres de los cuatro materiales utilizados, además, se afirma que el SG6043 tiene el mejor CL/CD conocido, para valores de Reynolds típicos en el caso de turbinas eólicas de pequeña escala. Adicionalmente, los mismos autores presenta un gráfico que muestra la superioridad de este perfil, en cuanto a CL/CD, sobre otro grupo de perfiles aerodinámicos.

S809. Este perfil, diseñado para operar a bajas velocidades (Gomes et al., 2014), fue empleado en la turbina NREL Fase VI (Menegozzo et al., 2018), la cual ha sido utilizada ampliamente en la literatura para validación de códigos computacionales.

Otras características importantes del S809 es que fue desarrollado para rotores de turbina eólica controlados por pérdida, además, fue diseñado para lograr mantener un alto coeficiente de sustentación aun con cambios en la rugosidad superficial del aspa.

Perfiles de uso con frecuencia media. De acuerdo con la metodología, se obtienen perfiles que han sido mencionados en solamente dos estudios, los cuales se presentan en la tabla 2. Distintas publicaciones de un mismo grupo de autores, sobre un mismo perfil y en un mismo laboratorio, se consideran como un mismo estudio y no como dos independientes.

Tabla 2. Perfiles aerodinámicos empleados con frecuencia media en estudios de turbinas eólicas de pequeña escala y afines

Perfil aerodinámico	Investigaciones donde se menciona el perfil aerodinámico
A18 y BW-3	Karthikeyan et al., 2015; Akour et al., 2018
FX66-S-196	Tummala, 2016; Habali y Saleh, 1995
Tipo MEL	Ohya et al., 2012; Göltenbott et al., 2017
NACA0015	Wood, 2001; MacPhee y Beyene, 2019
NACA2404	Tummala, 2016; Kishore et al., 2013
NACA4415	Tummala, 2016; Wood, 2001

Perfil aerodinámico	Investigaciones donde se menciona el perfil aerodinámico
NACA63-212	Habali y Saleh, 1995; Ohya et al., 2012
NACA6515	Tummala, 2016; Refan y Hangan, 2012
NACA654-421	Sicot et al., 2008; Devinant et al., 2002
S823	Karthikeyan et al., 2015; Robin et al., 2017
S834	Sing et al., 2012, Göçmen y Özerdem, 2012
SD7037	Tummala, 2016); Karthikeyan et al., 2015
Aguila, S1210 y S1223	Tummala, 2016; Sing et al., 2012

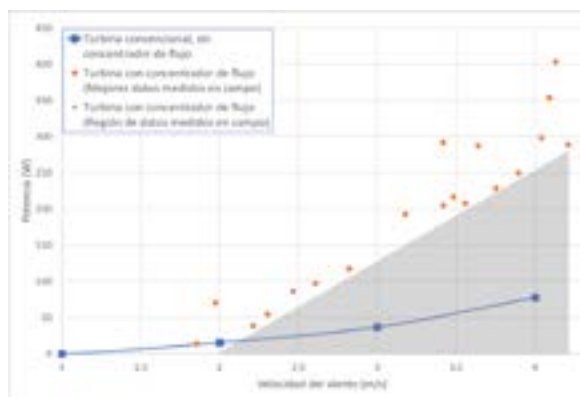
Fuente: elaborada por los autores

En su mayoría, los perfiles aerodinámicos de la tabla 2 corresponden a la familia NACA, muy pocos de ellos han sido diseñados de forma específica para turbinas pequeñas, sino que se han seleccionado en cada experimento por cumplir con algún requisito según las condiciones de interés, como lo puede ser la rigidez en la sección de la raíz del asa, cerca del eje, o bien aspectos como facilidad de manufactura o resistencia estructural.

De acuerdo con los parámetros de desempeño que presentan Karthikeyan et al. (2015), destaca el perfil A18 por presentar $(CL/CD)_{\text{máx}} = 79,60$. Por otra parte, el uso de concentradores de flujo, empleando una combinación de perfiles tipo MEL, permite obtener una potencia de salida mucho mayor que la de una turbina convencional. Por ejemplo, las mediciones de campo de la figura 8, del estudio de una turbina de 2,5 metros de diámetro con un concentrando de flujo (Ohya y Karasudani, 2012), indican que para velocidades de 4 m/s es posible obtener más de 400 W.

Para destacar la importancia del efecto de los concentradores de flujo, se muestra a manera de ejemplo, que en una zona boscosa las velocidades encontradas con mayor frecuencia corresponden con el rango mostrado en la figura 8, según mediciones propias de los autores de esta investigación, empleando una torre meteorológica dentro de una zona boscosa como se ilustra en la figura 9.

Figura 8. Potencia de una turbina eólica convencional con y sin concentrador de flujo, en rangos de baja velocidad de viento.



Fuente: Elaborada por los autores con datos de Ohya y Karasudani (2010).

Figura 9. Torre de medición de la velocidad y dirección del viento a diferentes alturas en una zona boscosa en Cartago, Costa Rica.



Fuente: Colaboración de UASTECC: Laboratorio de Fotogrametría del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Perfiles de uso con baja frecuencia y perfiles dedicados. Se definen los perfiles como de uso particular en los casos que solamente han sido empleados en una investigación o bien en varias, pero por el mismo grupo y en el mismo laboratorio, siendo perfiles existentes como los de la familia NACA, por ejemplo. Por otra parte, los perfiles dedicados son aquellos diseñados específicamente por los investigadores y presentados en una publicación particular.

En la revisión de Karthikeyan et al. (2015) se mencionan los perfiles Clark-Y, Go471a, NACA2414, RG15, S6062, S7012, SD7032 y SD6060 de los cuales el perfil Go471a presenta un $(CL/CD)_{\text{máx}} = 82,30$.

El perfil SD2030 es modificado por Göçmen y Özerdem (2012) con el objetivo de optimizar su desempeño y a la vez resolver el problema del ruido aerodinámico, con lo que se logra un perfil con un $(CL/CD)_{\text{máx}} = 95$ para un ángulo de ataque de 3° .

Un perfil dedicado es el SD8000, desarrollado por Lee et al. (2016) para una turbina eólica de pequeña escala de eje horizontal. Entre el grupo de aspas código SG, los modelos SG6041 y SG6042, propuestos de manera específica también para turbinas eólicas de pequeña escala por Giguere y Selig (1998), han sido menos estudiados que el SG6043, el cual se ubica en la categoría principal según esta revisión de literatura.

El perfil UMY02-T01-26 creado por Li et al. (2016), se emplea para un estudio de visualización de flujos turbulentos incidentes en una turbina eólica. Por otra parte, los perfiles diseñados por Birajdar et al. (2015), codificados como IND 15045 e IND 09848 son también dedicados para turbinas de pequeña escala y permiten obtener un coeficiente de potencia de 0,50.

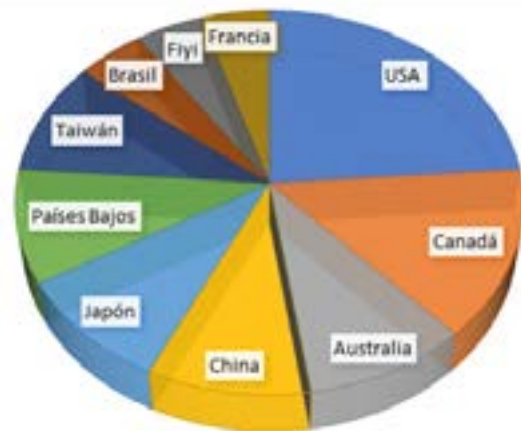
En otras investigaciones que se emplean difusores, se pueden encontrar perfiles de la

familia NACA como el 2207 y el 63-210, esto en Vaz y Wood (2016) y Kosasih y Tondelli (2012) respectivamente.

Discusión

Las turbinas eólicas de pequeña escala son un tema de interés en distintos laboratorios alrededor del mundo. En la figura 10 se presenta un gráfico de distribución de los laboratorios, por país, que realizan experimentación con perfiles aerodinámicos para turbinas de pequeña escala y temas afines, según las investigaciones consideradas en esta revisión.

Figura 10. Distribución de laboratorios por país que experimentan con perfiles de turbinas eólicas de pequeña escala.



Fuente: elaborada por los autores.

Cabe destacar que la distribución geográfica de la muestra de laboratorios de la figura 10 abarca todo el mundo, salvo el continente africano, siendo mayoritariamente el hemisferio norte donde existen más laboratorios que estudian el tema.

La necesidad de realizar investigación en el campo de turbinas eólicas de pequeña escala se debe a que aún muchos fabricantes utilizan perfiles existentes, diseñados inicialmente

para aeronaves, a pesar que los entornos de operación son muy distintos, por lo que es necesario diseñar y desarrollar cuerpos aerodinámicos específicamente para turbinas que operen a bajas velocidades de viento (Nikhade et al., 2017). A pesar de esto, son pocos los estudios reportados en la literatura relacionados a turbinas de menos de 1 metro de diámetro, diseñadas para velocidades de viento menores a 10 m/s (Kishore et al., 2013). Un caso de particular interés para zonas boscosas lo presentan Abrar et al. (2014), donde se emplea el término *aspa indígena*, para resaltar el motivo de su diseño y utilización.

Por otra parte, un ejemplo de un perfil ampliamente usado en turbinas pequeñas, sin ser diseñado para ese fin, es el NACA0012. Kishore et al. (2013) mencionan que el coeficiente de sustentación máximo para este perfil decrece al reducir el número de Reynolds, a la vez que el arrastre se incrementa. Esto implica que la relación CL/CD cae abruptamente para números de Reynolds bajos, tal como se ilustra en las figuras 1 y 2. Por esta razón se esperaría un desempeño bajo en turbinas eólicas de pequeña escala construidas con este conocido perfil.

Por lo anterior, se puede afirmar que, el análisis necesario para seleccionar un perfil aerodinámico no puede limitarse al valor máximo de la relación CL/CD , estudiar el comportamiento de la curva de arrastre y el punto de sustentación máxima también es importante, Thumthae y Chitsomboon (2009) sugieren definir el punto óptimo de operación para un ángulo de ataque que esté entre el ángulo para máximo CL/CD y el ángulo para máximo CL .

Según los resultados de la investigación realizada, se afirma que el análisis de las curvas de desempeño, presentadas en las figuras de la 1 a la 4, para buscar la máxima eficiencia aerodinámica, no es suficiente para establecer que un perfil aerodinámico

sea apropiado o no para la construcción de una turbina eólica para zonas boscosas, sino que es necesario tomar en cuenta los aspectos que se detallan a continuación.

Mecanismo de control o regulación.

Los dos principales mecanismos de control o regulación son la pérdida y el *pitch*. La pérdida es el fenómeno en el que el aspa pierde sustentación a la vez que se aumenta el arrastre y en muchos casos se generan vibraciones indeseadas en la turbina. Se debe evitar que el perfil tenga un comportamiento de pérdida agresivo, ya que este conlleva a problemas de cargas en el aspa y otros componentes de la turbina (Greenblatt y Wygnanski, 2003). La regulación por pérdida, de tipo pasivo, consiste en diseñar el perfil aerodinámico para que, al operar a una velocidad rotacional casi constante e incrementando el ángulo de ataque con la velocidad del viento, se mantenga la eficiencia aerodinámica (Hansen, 2013), a la vez que la pérdida de sustentación detiene un aumento indeseado de la fuerza sobre el rotor, cuando la velocidad del viento incidente sobrepasa un valor previamente definido en el diseño.

El control por *pitch*, de tipo activo, consiste en regular el ángulo de ataque mediante la rotación del aspa sobre su propio eje y así gobernar el ángulo de ataque sobre el perfil para cada velocidad del viento. Para obtener el ángulo de ataque óptimo instantáneo se debe diseñar e implementar un sistema móvil de las aspas. Este mecanismo permite también perder sustentación girando el aspa cuando el valor de velocidad del viento excede un valor previamente definido, para evitar sobrecarga en la turbina eólica.

Las turbinas eólicas de pequeña escala usualmente son reguladas por pérdida, dado que los beneficios del control por *pitch* conllevan un alto costo, mantenimiento y complejidad (Chen y Shiah, 2016), que solo se justifica en

turbinas de alta potencia (Grasso et al., 2016). Por lo que la mayoría de las turbinas eólicas de pequeña escala no tienen ajuste de *pitch* en sus aspas (Vaz et al., 2018), principalmente por su alto costo (Pourrajabian et al., 2014).

Considerando que la pérdida sucede cerca de la eficiencia aerodinámica máxima, el diseño del perfil se vuelve más complicado, ya que hay un margen de error pequeño para poder tener una eficiencia óptima, por razones como estas es que construir un aspa de turbina eólica es más difícil que fabricar un ala de avión (Thumthae y Chitsomboon, 2009).

Los perfiles de uso frecuente en turbinas eólicas de pequeña escala deben presentar un comportamiento de CL/CD tal que se puede trabajar en un rango de ángulo de ataque sin entrar en pérdida. Por ejemplo, en la figura 1 se puede apreciar que la curva de CL/CD para el perfil S809, llega al valor máximo con una pendiente suave, lo que respalda la afirmación de que ha sido diseñado para rotores controlados por pérdida.

Número de Reynolds. Cabe mencionar que en la mayoría de los textos mencionados la selección de perfiles se centra en la relación CL/CD, y el comportamiento para número de Reynolds bajo no es una prioridad de diseño. De acuerdo con Singh y Ahmed (2013), para $Re = 5 \times 10^5$ ocurren altos gradientes adversos en los cuerpos aerodinámicos, que causan la aparición de burbujas de separación laminar, aunque otros indican que este valor es aproximado y depende de cada aspa.

En el caso de zonas boscosas, y para turbinas de la escala propuesta en esta investigación, el número de Reynolds está en el rango de 5×10^4 y 10^6 , por lo que toma mayor importancia y se debe realizar el estudio para comparar los comportamientos de los perfiles de uso frecuente.

En la figura 2 se muestra que el coeficiente de arrastre aumenta en todos los casos al disminuir el número de Reynolds, el efecto es menor para el perfil SG6043. De la figura 3 se extrae que el coeficiente de sustentación presenta el comportamiento opuesto, crece con el número de Reynolds, para los tres perfiles seleccionados.

Al combinarse estas dos tendencias en el CL/CD, se obtiene la figura 4 que exhibe un aumento de este valioso parámetro, al aumentar en número de Reynolds, a la vez que muestra un máximo con cambios muy bruscos en su vecindad, para el perfil S809, un bajo desempeño para el perfil NACA0012 y un comportamiento sumamente deseable para el caso del SG6043. Esto en el rango de número de Reynolds seleccionados para esas tres figuras.

Intensidad de turbulencia. La intensidad de turbulencia (IT) es un parámetro de sumo interés, que refleja la variabilidad de la magnitud de la velocidad del viento, pues expresa cuánto cambia la velocidad del viento en un plazo definido, con respecto al valor medio. Una intensidad de turbulencia alta indica que el viento cambia mucho de magnitud, con valores alejados del promedio. Si es baja, representa que la velocidad del viento es estable, con poca variación. Esto sin dar información alguna de si el viento tiene alta o baja velocidad, pues es un parámetro que expresa únicamente la variabilidad.

Con frecuencia la IT no es reportada en las investigaciones. O bien, se indica un valor mínimo, correspondiente al valor usual de los túneles de viento para investigación. Esos valores bajos de IT no corresponden con los entornos usuales de turbinas eólicas de pequeña escala, particularmente en zonas boscosas, donde se registra alta turbulencia generada por los árboles, que en muchos casos pueden tener la misma altura que la del eje de rotación de las turbinas eólicas que estén en las zonas circundantes.

Li et al. (2016) tratan el tema de evaluar el desempeño de aspas para diferentes niveles de IT. Un resultado de interés es que la burbuja de separación laminar no está presente para IT de 5 % y 13,90 %. Lo cual es respaldado por Chu y Chiang (2014) y Lubitz (2014) pues indican un ligero aumento en la producción de energía de una turbina al aumentar la turbulencia a bajas velocidades de viento; a nivel de perfil aerodinámico Devinant et al. (2002) reportan un aumento en el CL conforme aumenta el nivel de turbulencia, llegando hasta el 16 %.

Para el caso concreto del perfil S809, Maldonado et al. (2015) presentan resultados en los que la turbulencia disminuye el CL en algunos casos, pero en otros lo aumenta significativamente, ubicar esos casos y sacar ventaja de ellos será crucial en el diseño de un aspa para turbina eólica en zonas boscosas.

Un caso de interés es presentado por Li et al. (2011) que insiste en el efecto de la IT en los coeficientes CL y CD, pero realiza el estudio para $Re = 5300$, situación que difícilmente corresponde con el número de Reynolds en el cual operaría una turbina eólica de pequeña escala.

Para estudios numéricos de este fenómeno, Lin y Sarlak (2016) muestran la necesidad de emplear modelos de transición para capturar adecuadamente los fenómenos que causan el cambio de las fuerzas aerodinámicas al variar la turbulencia.

Efectos de la rugosidad de la superficie del aspa. Un aspa de turbina eólica para zonas boscosas debe tener una alta robustez ante cambios de rugosidad. La contaminación causada por ejemplo por mosquitos, usuales en zonas boscosas, puede afectar de forma severa la producción anual de energía, en caso que el coeficiente de sustentación sea muy sensible ante un aumento en la rugosidad (Grasso et al., 2016).

En algunas aspas para estas aplicaciones se agregan elementos que aumentan la rugosidad deliberadamente, conocidos como *turbulators*, para evitar las burbujas de separación laminar, que son responsables del aumento del arrastre y disminución de la sustentación (Tummala, 2016).

Otros aspectos relevantes. Muchos otros aspectos referentes al aspa se deben considerar para obtener un perfil adecuado para zonas boscosas, por ejemplo, el tipo de material (Pourrajabian, 2019; Sessarego y Wood, 2015) y el espesor del aspa (Kale y Verma, 2014).

Estos se deben combinar con características propias de las turbinas para regiones de bajo potencial eólico, que de acuerdo con Karthikeyan et al. (2015) son: simplicidad, bajo costo, facilidad de transporte, que generen poco ruido y que requieran el menor mantenimiento posible. Algunos de estos aspectos se alcanzan con la regulación por pérdida en lugar del control por *pitch*; pues se evitan algunos componentes que añaden peso y requerirán mantenimiento, de modo que una turbina regulada por pérdida es más simple en cuanto a componentes, pero más complejo el diseño de sus aspas.

En cuanto al ruido, el uso de difusores puede representar una reducción significativa, a la vez que aumenta la potencia para una misma área de barrido (Ohya et al., 2012; Ohya et al., 2017; Ohya y Karasudani, 2012)

Finalmente, el torque resistivo del generador y todo el mecanismo de transmisión debe ser lo menor posible para que la turbina pueda iniciar su funcionamiento a bajas velocidades de viento (Kale y Verma, 2014; Pourrajabian et al., 2014; Vaz et al., 2018), que es crucial en zonas boscosas donde es frecuente que el viento se detenga y luego vuelva a soplar.

Conclusiones

Al analizar la principal literatura sobre perfiles aerodinámicos que pueden ser apropiados para turbinas eólicas de pequeña escala y de eje horizontal, en aplicaciones de baja velocidad de viento y alta turbulencia como lo son las zonas boscosas, se concluye que un perfil adecuado para estas condiciones debe ser diseñado para regulación por pérdida y poseer una alta robustez ante cambios de rugosidad superficial. Los perfiles con mayor potencial para su uso en las condiciones de interés son el SG6043, S809 y NACA0012, siendo el SG6043 el que presenta un mejor desempeño. Este último logra una eficiencia máxima a un ángulo de ataque de $5,4^\circ$, exhibiendo CL/CD hasta 85 % y 110 % mayores al S809 y NACA0012 en sus respectivos puntos máximos, para $Re = 2 \times 10^5$. Esta diferencia incluso aumenta a 130 % con respecto al SG6043 para $Re = 5 \times 10^5$, aunque el pico ocurre a un ángulo de ataque menor, de $3,5^\circ$.

Existen otros perfiles en la literatura, que han sido diseñados y propuestos de forma específica para turbinas eólicas de pequeña escala, como el IND 15045, sobre los cuales se requiere más investigación y validación, por distintos autores, para que algunos de ellos eventualmente se consoliden y compitan con los perfiles más establecidos y citados de la literatura. El campo de investigación está abierto en temas como el desempeño aerodinámico de los perfiles ante altos niveles de turbulencia y cambios en la rugosidad superficial.

En cuanto a la turbina propiamente para las regiones de interés, debe ser portable, liviana, de una construcción simple, que genere poco ruido y libre de mantenimiento.

Como comentario final, en el diseño de un aerogenerador para una zona puntual se deben considerar muchos otros aspectos, que exceden

el objetivo de esta investigación, como lo son los esfuerzos mecánicos, el tipo de generador, el eventual acople con la red o el método de almacenamiento de la energía y las particularidades de la demanda de los usuarios finales.

Agradecimientos

Al Instituto Tecnológico de Costa Rica y a su Vicerrectoría de Investigación y Extensión por el financiamiento parcial para esta investigación, mediante el proyecto 1341-015 y al LIENE: Laboratorio de Investigación en Energía Eólica del TEC, particularmente al asistente Samuel Murillo.

Referencias

- Abrar, M. A., Mahbub, A. I. y Mamun, M. (2014). Design optimization of a horizontal axis micro wind turbine through development of CFD model and experimentation. *Procedia Engineering*, 90, 333-338. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.858>
- Airfoil Tools. (s.f.a). NACA 0012 AIRFOILS (n0012-il). Recuperado de <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=n0012-il>
- Airfoil Tools. (s.f.b). NREL's S809 Airfoil (s809-nr). Recuperado de <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=s809-nr>
- Airfoil Tools. (s.f.c). SG6043 (sg6043-il). Recuperado de <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=sg6043-il>
- Akbari, M. H. y Price, S. J. (2003). Simulation of dynamic stall for a NACA 0012 airfoil using a vortex method. *Journal of fluids and structures*, 17(6), 855-874. [https://doi.org/10.1016/S0889-9746\(03\)00018-5](https://doi.org/10.1016/S0889-9746(03)00018-5)

- Akour, S. N., Al-Heymari, M., Ahmed, T. y Khalil, K. A. (2018). Experimental and theoretical investigation of micro wind turbine for low wind speed regions. *Renewable energy*, 116, 215-223. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.09.076>
- Birajdar, M., Kale, S. y Sapali, S. N. (2015). Effects of Design Parameters on Aerodynamic Performance of New Profile Small Wind Turbine Blades. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (Vol. 57472, p. V07BT09A049). American Society of Mechanical Engineers. <https://doi.org/10.1115/IMECE2015-51681>
- Chen, Y. J. y Shiah, Y. C. (2016). Experiments on the performance of small horizontal axis wind turbine with passive pitch control by disk pulley. *Energies*, 9(5), 353. <https://doi.org/10.3390/en9050353>
- Chu, C. R. y Chiang, P. H. (2014). Turbulence effects on the wake flow and power production of a horizontal-axis wind turbine. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 124, 82-89. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.11.001>
- Clausen, P. D. y Wood, D. H. (2000). Recent advances in small wind turbine technology. *Wind Engineering*, 24(3), 189-201. <https://doi.org/10.1260/0309524001495558>
- Devinant, P., Laverne, T. y Hureau, J. (2002). Experimental study of wind-turbine airfoil aerodynamics in high turbulence. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90(6), 689-707. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(02\)00162-9](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(02)00162-9)
- Du, Z. y Selig, M. S. (2000). The effect of rotation on the boundary layer of a wind turbine blade. *Renewable Energy*, 20(2), 167-181. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(99\)00109-3](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(99)00109-3)
- Giguere, P. y Selig, M. S. (1998). New airfoils for small horizontal axis wind turbines. *Journal of Solar Energy Engineering*, 120(2), 108-114. <https://doi.org/10.1115/1.2888052>
- Global Wind Energy Council (2018). *Global Wind Statistics 2017*. https://gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC_PRstats2017_EN-003_FINAL.pdf
- Göçmen, T. y Özerdem, B. (2012). Airfoil optimization for noise emission problem and aerodynamic performance criterion on small scale wind turbines. *Energy*, 46(1), 62-71. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.05.036>
- Göltenbott, U., Ohya, Y., Yoshida, S. y Jamieson, P. (2017). Aerodynamic interaction of diffuser augmented wind turbines in multi-rotor systems. *Renewable Energy*, 112, 25-34. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.014>
- Gomes, A. O., Brito, R. F., Rosa, H. M. P., Campos, J. C. C., Tibiriça, A. M. B. y Treto, P. C. (2014). Experimental Analysis of an S809 Airfoil. *Revista de Engenharia Térmica*, 13(2), 28-32. <http://dx.doi.org/10.5380/reterm.v13i2.62091>
- Grasso, F., Coiro, D. P., Bizzarrini, N. y Calise, G. (2016). Design of advanced airfoil for stall-regulated wind turbines. *Journal of Physics: Conference Series*, 753, 022008. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/753/2/022008>
- Greenblatt, D. y Wygnanski, I. (2003). Effect of leading-edge curvature on airfoil separation control. *Journal of Aircraft*, 40(3), 473-481. <https://doi.org/10.2514/2.3142>

- Habali, S. M. y Saleh, I. A. (1995). Design and testing of small mixed airfoil wind turbine blades. *Renewable energy*, 6(2), 161-169. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(94\)00065-E](https://doi.org/10.1016/0960-1481(94)00065-E)
- Hansen, M. O. (2013). *Aerodynamics of wind turbines*. (2^a ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781849770408>
- Hassanzadeh, A., Hassanabad, A. H. y Dadvand, A. (2016). Aerodynamic shape optimization and analysis of small wind turbine blades employing the Viterna approach for post-stall region. *Alexandria Engineering Journal*, 55(3), 2035-2043. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.07.008>
- Hjort, S. y Larsen, H. (2014). A multi-element diffuser augmented wind turbine. *Energies*, 7(5), 3256-3281. <https://doi.org/10.3390/en7053256>
- Hu, D., Hua, O. y Du, Z. (2006). A study on stall-delay for horizontal axis wind turbine. *Renewable Energy*, 31(6), 821-836. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.05.002>
- Huang, C., Yang, K., Liu, Q., Zhang, L., Bai, J. y Xu, J. (2011). A study on performance influences of airfoil aerodynamic parameters and evaluation indicators for the roughness sensitivity on wind turbine blade. *Science China Technological Sciences*, 54(11), 2993-2998. <https://doi.org/10.1007/s11431-011-4557-z>
- International Electrotechnical Commission. (2013). *IEC 61400-2: Wind turbines—part 2: small wind turbines*.
- Kale, S. A. y Varma, R. N. (2014). Aerodynamic design of a horizontal axis micro wind turbine blade using NACA 4412 profile. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 4(1), 69-72. <https://www.ijrer.org/ijrer/index.php/ijrer/article/view/1011>
- Karthikeyan, N., Murugavel, K. K., Kumar, S. A. y Rajakumar, S. (2015). Review of aerodynamic developments on small horizontal axis wind turbine blade. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 801-822. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.086>
- Khalil, Y., Tenghiri, L., Abdi, F. y Bentamy, A. (2018). *Efficiency of a small wind turbine using BEM and CFD*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, (REEE '2017), 161, 1755-1315. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/161/1/012028>
- Kishore, R. A., Coudron, T. y Priya, S. (2013). Small-scale wind energy portable turbine (SWEPT). *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 116, 21-31. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.01.010>
- Kosasih, B. y Tondelli, A. (2012). Experimental study of shrouded micro-wind turbine. *Procedia Engineering*, 49, 92-98. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.10.116>
- Lee, M. H., Shiah, Y. C. y Bai, C. J. (2016). Experiments and numerical simulations of the rotor-blade performance for a small-scale horizontal axis wind turbine. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 149, 17-29. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.12.002>
- Li, Q., Kamada, Y., Maeda, T., Murata, J. y Nishida, Y. (2016). Visualization of the flow field and aerodynamic force on a Horizontal Axis Wind Turbine in turbulent inflows. *Energy*, 111, 57-67. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.098>

- Li, S. W., Wang, S., Wang, J. P. y Mi, J. C. (2011). Effect of turbulence intensity on airfoil flow: Numerical simulations and experimental measurements. *Applied Mathematics and Mechanics*, 32(8), 1029. <https://doi.org/10.1007/s10483-011-1478-8>
- Lin, M. y Sarlak, H. (2016). A comparative study on the flow over an airfoil using transitional turbulence models. *AIP Conference Proceedings*, 1783(1), 030050. AIP Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/1.4951806>
- Lubitz, W. D. (2014). Impact of ambient turbulence on performance of a small wind turbine. *Renewable Energy*, 61, 69-73. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.08.015>
- MacPhee, D. W. y Beyene, A. (2019). Performance analysis of a small wind turbine equipped with flexible blades. *Renewable Energy*, 132, 497-508. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.014>
- Maldonado, V., Castillo, L., Thormann, A. y Meneveau, C. (2015). The role of free stream turbulence with large integral scale on the aerodynamic performance of an experimental low Reynolds number S809 wind turbine blade. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 142, 246-257. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.03.010>
- Mayor, G. S., Moreira, A. B. B. y Muñoz, H. C. (2013). *Influence of roughness in protective strips of leading edge for generating wind profiles*. 22nd International Congress of Mechanical Engineering, COBEM (Vol. 2013), Ribeirão Preto, SP, Brazil. https://www.academia.edu/download/38959614/Influence_of_roughness_in_protective_strips_of_leading_edge_for_generating_wind.pdf
- Menegozzo, L., Dal Monte, A., Benini, E. y Benato, A. (2018). Small wind turbines: A numerical study for aerodynamic performance assessment under gust conditions. *Renewable energy*, 121, 123-132. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.086>
- Mertens, S. (2006) *Wind Energy in the Built Environment Concentrator Effects of Buildings* [Tesis de Doctorado, Universidad Tecnológica de Delft]. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:959694f4-6666-488a-8754-6c58124f4a10>
- Nikhade, S. D., Kongare, S. C. y Kale, S. A. (2017). Design of an airfoil for low wind horizontal axis micro wind turbine. *2017 2nd International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, 850-853. IEEE. <https://doi.org/10.1109/I2CT.2017.8226249>
- Ohya, Y. y Karasudani, T. (2010). A shrouded wind turbine generating high output power with wind-lens technology. *Energies*, 3(4), 634-649. <https://doi.org/10.3390/en3040634>
- Ohya, Y., Miyazaki, J., Göltzenbott, U. y Watanabe, K. (2017). Power augmentation of shrouded wind turbines in a multirotor system. *Journal of Energy Resources Technology*, 139(5). <https://doi.org/10.1115/1.4035754>
- Ohya, Y., Uchida, T., Karasudani, T., Hasegawa, M. y Kume, H. (2012). Numerical studies of flow around a wind turbine equipped with a flanged-diffuser shroud using an actuator-disk model. *Wind Engineering*, 36(4), 455-472. <https://doi.org/10.1260/0309-524X.36.4.455>
- Pourrajabian, A., Dehghan, M., Javed, A. y Wood, D. (2019). Choosing an appropriate timber for a small wind turbine blade: A comparative study. *Renewable and*

- Sustainable Energy Reviews*, 100, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.010>
- Pourrajabian, A., Ebrahimi, R. y Mirzaei, M. (2014). Applying micro scales of horizontal axis wind turbines for operation in low wind speed regions. *Energy conversion and management*, 87, 119-127. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.07.003>
- Pourrajabian, A., Mirzaei, M., Ebrahimi, R. y Wood, D. (2014). Effect of air density on the performance of a small wind turbine blade: A case study in Iran. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 126, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.01.001>
- Refan, M. y Hangan, H. (2012). Aerodynamic performance of a small horizontal axis wind turbine. *Journal of solar energy engineering*, 134(2), 021013-1 – 021013-7. <https://doi.org/10.1115/1.4005751>
- Richmond-Navarro, G., Calderón-Munoz, W. R., LeBoeuf, R. y Castillo, P. (2017). A Magnus wind turbine power model based on direct solutions using the Blade Element Momentum Theory and symbolic regression. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 8(1), 425-430. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2016.2604082>
- Robin J. K., Solomon, D. y Suresh, C. (2017). Design Optimization and Aerodynamic Performance Analysis of a Small Wind Turbine Blade. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 44(1), 32-41. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V44P207>
- Rocha, P. C., Rocha, H. B., Carneiro, F. M., da Silva, M. V. y de Andrade, C. F. (2016). A case study on the calibration of the $k-\omega$ SST (shear stress transport) turbulence model for small scale wind turbines designed with cambered and symmetrical airfoils. *Energy*, 97, 144-150. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.081>
- Rocha, P. C., Rocha, H. B., Carneiro, F. M., da Silva, M. V. y Bueno, A. V. (2014). $k-\omega$ SST (shear stress transport) turbulence model calibration: A case study on a small scale horizontal axis wind turbine. *Energy*, 65, 412-418. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.11.050>
- Sessarego, M. y Wood, D. (2015). Multi-dimensional optimization of small wind turbine blades. *Renewables: Wind, Water, and Solar*, 2(1), 1-11. <https://doi.org/10.1186/s40807-015-0009-x>
- Shen, X., Yang, H., Chen, J., Zhu, X. y Du, Z. (2016). Aerodynamic shape optimization of non-straight small wind turbine blades. *Energy Conversion and Management*, 119, 266-278. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.008>
- Sicot, C., Devinant, P., Loyer, S. y Hureau, J. (2008). Rotational and turbulence effects on a wind turbine blade. Investigation of the stall mechanisms. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 96(8-9), 1320-1331. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.01.013>
- Singh, R. K. y Ahmed, M. R. (2013). Blade design and performance testing of a small wind turbine rotor for low wind speed applications. *Renewable Energy*, 50, 812-819. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.08.021>
- Singh, R. K., Ahmed, M. R., Zullah, M. A. y Lee, Y. H. (2012). Design of a low Reynolds number airfoil for small horizontal axis wind turbines. *Renewable*

- energy*, 42, 66-76. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.09.014>
- Song, Q. y Lubitz, W. D. (2014). Design and testing of a new small wind turbine blade. *Journal of solar energy engineering*, 136(3), 034502-1 – 034502-4. <https://doi.org/10.1115/1.4026464>
- Surve, M. L. (2017). A Comprehensive Review of Developing Horizontal Axis Wind Turbine Rotor Blade for Domestic Applications. *Int. Res. J. Eng. Technol.*, 4(6), 984-990. <http://www.academia.edu/download/53811771/IRJET-V4I6183.pdf>
- Tangler, J. L. y Somers, D. M. (1995). *NREL airfoil families for HAWTs (No. NREL/TP-442-7109)*. National Renewable Energy Lab., Golden, CO (United States). <https://doi.org/10.2172/10106095>
- Thumthae, C. y Chitsomboon, T. (2009). Optimal angle of attack for untwisted blade wind turbine. *Renewable energy*, 34(5), 1279-1284. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.09.017>
- Tummala, A., Velamati, R. K., Sinha, D. K., Indraja, V. y Krishna, V. H. (2016). A review on small scale wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 1351-1371. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.027>
- Vaz, J. R. y Wood, D. H. (2016). Aerodynamic optimization of the blades of diffuser-augmented wind turbines. *Energy Conversion and Management*, 123, 35-45. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.06.015>
- Vaz, J. R., Wood, D. H., Bhattacharjee, D. y Lins, E. F. (2018). Drivetrain resistance and starting performance of a small wind turbine. *Renewable energy*, 117, 509-519. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.071>
- Wang, S., Zhou, Y., Alam, M. M. y Yang, H. (2014). Turbulent intensity and Reynolds number effects on an airfoil at low Reynolds numbers. *Physics of Fluids*, 26(11), 115107. <https://doi.org/10.1063/1.4901969>
- Wood, D. H. (2001). A blade element estimation of the cut-in wind speed of a small turbine. *Wind Engineering*, 25(2), 125-130. <https://doi.org/10.1260/0309524011495926>
- Wood, D. H. (2004). Dual purpose design of small wind turbine blades. *Wind Engineering*, 28(5), 511-527. <https://doi.org/10.1260/0309524043028037>