

Perfiles de Microaerogeneradores HAWT a Bajo Número de REYNOLDS

(Low REYNOLDS Number Airfoils for Small Horizontal Axis Wind Turbine)

M. Julieta Ganiele,¹ Lucio Ponzoni,² Sara Montenegro,³ Paula Nicoletti,⁴ Sergio D. Lingeri,⁵ Andrea Villanueva⁶ & Daniel Anello⁷

Campo temático: Machine Learning.

Resumen

Este trabajo consiste en el estudio aerodinámico de 8 perfiles alares distintos; NACA 0012, NACA 4412, NREL S822, NREL S823, NREL S833, CLARK Y, SD7080 (9.2%), Wortmann FX 63-137 a bajo número de Reynolds. De manera de poder seleccionar el perfil ideal para el diseño de los álabes de un aerogenerador de baja potencia de ≈ 1 kW.

Mediante el software QBlade se han analizado los valores de los coeficientes adimensionales de sustentación (C_L) y arrastre (C_D) a un Reynolds de 109.007 y un rango de ángulos de ataque (α) de 0° a 20° . Mientras que utilizando el software SolidWorks® se ha simulado el comportamiento del flujo de aire alrededor de los perfiles bajo distintas condiciones de cálculo, variando el refinamiento en búsqueda de la convergencia de los resultados.

Finalmente, se realizó una comparación de los resultados de simulación numérica obtenidos con Flow Simulation con los del software QBlade®. De esta forma se

¹ Comisión Nacional de Energía Atómica/SABATO. mjganiele@gmail.com

² Comisión Nacional de Energía Atómica/Universidad Nacional de Tres de Febrero. lponzoni@untref.edu.ar

³ Comisión Nacional de Energía Atómica/SABATO. saraorismontenegro@gmail.com

⁴ Comisión Nacional de Energía Atómica/Universidad Nacional de Tres de Febrero. saraorismontenegro@gmail.com

⁵ Comisión Nacional de Energía Atómica/SABATO. lingeri@cnea.gov.ar

⁶ Comisión Nacional de Energía Atómica/Universidad Nacional de Tres de Febrero afvillanuevarivas@gmail.com

⁷ Comisión Nacional de Energía Atómica. afvillanuevarivas@gmail.com

pretende verificar las simulaciones obtenidas, a fin de seleccionar el perfil adecuado para las condiciones de estudio.

Palabras clave: perfil alar; sustentación; arrastre; simulación.

Abstract

This work consists in aerodynamic study of eight different low Reynolds number airfoils; NACA 0012, NACA 4412, NREL S822, NREL S823, NREL S833, CLARK Y, SD7080 (9.2%), Wortmann FX 63-137. In order to be able to select the ideal airfoil for 1 kW horizontal axis wind turbine blades design.

QBlade software has been used to obtain values of the lift (C_L) and drag (C_D) coefficient at the Reynolds number of 109.007 and the angles of attack (α) ranging from 0° to 20° . Moreover, SolidWorks® software allowed us simulate air flows around the airfoils to calculate its performance and capabilities. Meshing and refinement parameters was altered to obtain proper results.

In the end, the simulation data obtained by Flow Simulation was compared to the data obtained by QBlade®. Afterwards, the results were presented and their validity evaluated. Ultimately, it was determined that the software performs excellently as a faithfully tool that reproduce the physical phenomenon under study, and let us select the right airfoil.

Keywords: airfoil; lift; drag; simulation.

1. Introducción

Varios países de Latinoamérica y en particular Argentina, han suscripto a los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Por lo cual, fomentar la obtención de energía eléctrica a partir de fuentes renovables es una de las prioridades en la agenda gubernamental. Las perspectivas de Argentina en materia de energía eólica son francamente alentadoras. Existen numerosas regiones aptas en las provincias de Río Negro y Neuquén, así como también en varias zonas serranas y costeras de la provincia de Buenos Aires (Secretaría de Energía, 2008)

Hoy en día, el desarrollo de energías renovables a pequeña escala hace viable la generación de energía eléctrica en zonas alejadas de las grandes urbes. Las cuales por cuestiones económicas y geográficas no poseen una conexión a la red eléctrica, siendo la principal forma de generación de energía el uso de pequeños generadores eléctricos que usan combustibles fósiles para su funcionamiento.

La eficiencia de un aerogenerador depende de varios factores principalmente del diseño del mismo; el tipo de perfil alar, diámetro, altura, rotor; de acuerdo de las características del viento de la zona a instalar. Sin embargo, gran parte de los desarrollos nacionales de aerogeneradores no tienen en cuenta estos factores, utilizando réplicas de otros modelos comerciales de aerogeneradores que no son las óptimas para los vientos de estas latitudes. Esto se da como consecuencia a la falta de infraestructura muchas PyMES dedicadas al rubro y la complejidad ingenieril que requieren el desarrollo de este tipo de máquinas.

Una forma de mejorar la eficiencia de los aerogeneradores nacionales es crear un laboratorio de ensayos, para que los mismos fabricantes puedan probar y analizar diversos factores de diseño. En este sentido, el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) viene trabajando en la certificación de instaladores de aerogeneradores de baja potencia, y desarrollando un laboratorio a cielo abierto ubicado en la provincia de Neuquén para probar su funcionamiento con las curvas de vientos que se encuentran en la provincia de Neuquén.

Sin embargo, esto no es suficiente, ya que como se dijo anteriormente el diseño de un aerogenerador y su performance, depende básicamente de las características del viento de la zona a instalar, y actualmente no existe ningún laboratorio nacional que permita a los fabricantes nacionales/universidades o centros de investigación puedan probar sus diseños para diferentes condiciones eólicas.

Desde el laboratorio de “Perfil Alar”, se ha conformado un grupo de investigación, que se encuentra trabajando en un laboratorio de prueba de aerogeneradores de baja potencia, con el objetivo de llegar a ser un referente a nivel nacional para la prueba y desarrollo de aerogeneradores de baja potencia para la Argentina.

Para ello se está trabajando en un método novedoso para la prueba de aerogeneradores de baja potencia basado en las siguientes 3 etapas:

- Diseño y simulación asistida por computadora en Aerogeneradores.
- Fabricación del modelo en escala mediante impresión 3D.
- Simulación del modelo en un túnel de viento preparado para la prueba de modelos de aerogeneradores.

En este trabajo, se presenta el diseño de álabes para aerogeneradores de eje horizontal mediante el análisis de diversos perfiles alares, empleando dos softwares y la convergencia de resultados. En forma complementaria, se describirán los modelos impresos en 3D que serán ensayados en la etapa 3 de prueba en túnel de viento para ser contrastados con los resultados de simulación.

2. Objetivo

Diseño de los álabes de un aerogenerador de baja potencia de ≈ 1 kW, mediante el estudio de distintos perfiles alares a bajos números de Reynolds.

En el presente trabajo, se estudiarán diversos perfiles alares mediante la realización de simulaciones fluidodinámicas utilizando el software SolidWorks®. Los resultados de la simulación se contrastarán con valores obtenidos mediante el software QBlade® y con valores experimentales que serán obtenidos durante una serie de ensayos que se realizarán en el túnel de viento del laboratorio Perfil Alar, con el objetivo de seleccionar el perfil adecuado para las condiciones de estudio.

3. Introducción al funcionamiento de un aerogenerador de eje horizontal

Un aerogenerador es una máquina hidráulica empleada para transformar, con una determinada eficiencia, la energía cinética del viento en energía eléctrica. La fuerza del viento mueve las aspas del aerogenerador, la energía cinética del viento se convierte en energía mecánica del eje y este movimiento se transmite a un generador que produce la energía eléctrica (Carta González, Calero Pérez, Colmenar Santos, Castro Gil, & Collado Fernández, 2012).

Un aerogenerador de eje horizontal es aquel en que el eje de rotación es paralelo a la dirección del viento. El mismo se encuentra conformado por las siguientes partes, tal como se indica en la Figura 1.

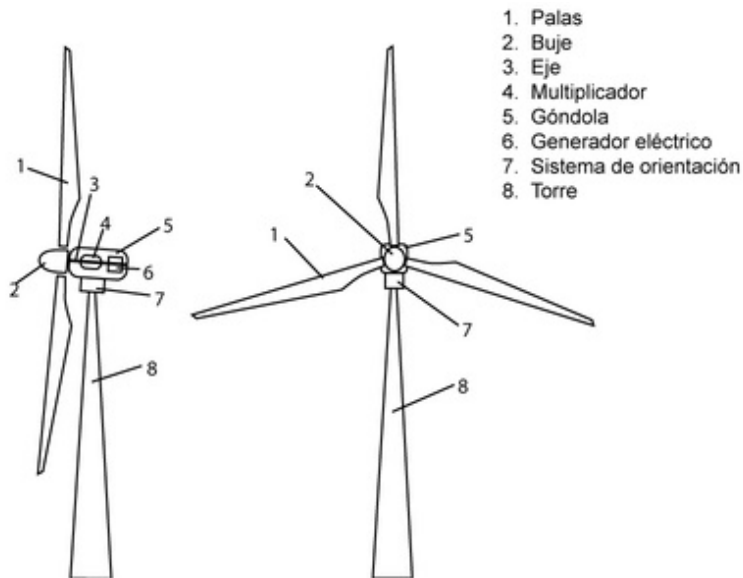


Figura 1 - Partes de un aerogenerador de eje horizontal

1. Palas/Álabes: capturan el viento y transmiten su potencia hacia el buje.
2. Buje: está acoplado al eje de baja velocidad del aerogenerador.
3. Eje: conecta el buje del rotor al multiplicador, lo que permite que gire aproximadamente a 1.500 revoluciones por minuto (r.p.m.), y de funcionamiento al generador eléctrico.
4. Multiplicador: Puede estar presente o no dependiendo del modelo. Transforman la baja velocidad del eje del rotor en alta velocidad de rotación en el eje del generador eléctrico.
5. Góndola: se trata de un cubículo que se podría decir que es la sala de máquinas del aerogenerador. En la góndola se encuentra la caja de cambios, el eje principal, los sistemas de control, el generador, los frenos y los mecanismos de giro.
6. Generador eléctrico: aparato que se utiliza para convertir la energía mecánica en eléctrica.
7. Sistema de orientación: permite a la góndola girar en torno a la torre para colocar la turbina mirando en dirección al viento.
8. Torre: ubica al generador a una mayor altura donde los vientos son de mayor intensidad y transmite las cargas del equipo al suelo.

3.1 Funcionamiento aerogenerador

El elemento encargado de convertir la energía cinética del viento en energía mecánica de rotación es el rotor, formado por varios álabes que se insertan en una pieza común denominada buje.

Los aerogeneradores extraen la energía del viento transfiriendo la fuerza de empuje del aire que pasa a través de la turbina a las palas del aerogenerador. Las palas actúan de manera similar a las alas de un avión, utilizando el denominado principio de sustentación.

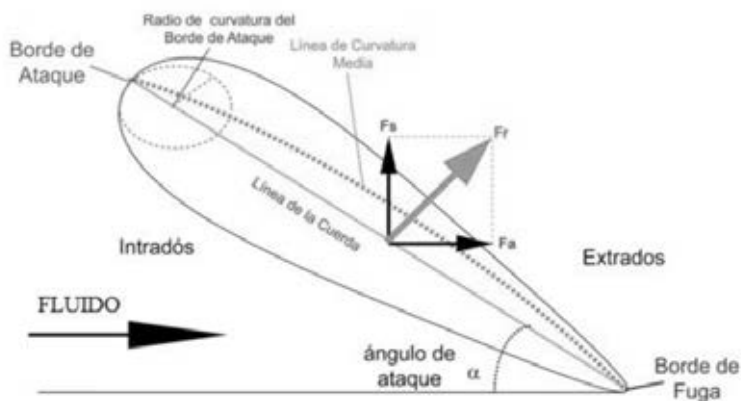


Figura 2 – Fuerzas actuantes sobre un perfil aerodinámico

Así pues, cuando tenemos un fluido que pasa a través de un álabe, las partículas de fluido se ven obligadas estrecharse en la parte superior del perfil (extradós), mientras que las partículas que viajan por la parte inferior del perfil (intradós) tienden a ensancharse. Esto conlleva a que en el extradós la velocidad aumente y la presión disminuya. Por el contrario, en el intradós, la velocidad disminuye y la presión aumenta. Esas dos presiones que aparecen sobre el álabe crean una fuerza en el sentido positivo (opuesto al de la gravedad) ya que las partículas que pasan por debajo empujan hacia arriba el ala, y las partículas que pasan por encima succionan al álabe también hacia arriba.

Como resultado, la fuerza resultante que actúa a una distancia de la raíz de la pala genera un par mecánico que es el responsable de la rotación del eje de la turbina. La potencia al eje se puede aprovechar de diferentes maneras, en el caso de un aerogenerador el eje está conectado con generador eléctrico para la producción de energía eléctrica.

3.2 Energía del viento

La energía que lleva el viento es energía cinética, causada por la masa de aire en movimiento. Su expresión es:

$$E = \frac{1}{2} mv^2 \quad (1)$$

donde m es la masa de aire y v es la velocidad del viento.

$$P = \frac{1}{2} \rho Av^3 \quad (2)$$

La potencia extraíble del viento, se puede determinar con la siguiente expresión:

En donde, ρ es la densidad del aire, A es la superficie del volumen de control considerado y v es la velocidad del viento.

Es importante observar que la potencia depende del cubo de la velocidad, lo cual implica que ligeros aumentos en la velocidad del viento provocan grandes aumentos en la potencia eólica (Mur Amada, 2001).

Sin embargo, solo una fracción de la potencia del viento es aprovechable, determinada por la siguiente expresión:

$$P_d = \frac{1}{2} \rho Av^3 C_p \quad (3)$$

El coeficiente se define como el coeficiente de potencia de un aerogenerador, y relaciona la potencia eólica aprovechable y la potencia eólica disponible. Es una medida de la eficiencia de la máquina (Mur Amada, 2001).

El máximo valor teórico que puede alcanzar el fue determinado por Betz, a partir de la aplicación de la ecuación de cantidad de movimiento. La ley de Betz dice que sólo puede convertirse menos de $16/27$ ($\approx 59\%$) de la energía cinética en energía mecánica usando un aerogenerador.

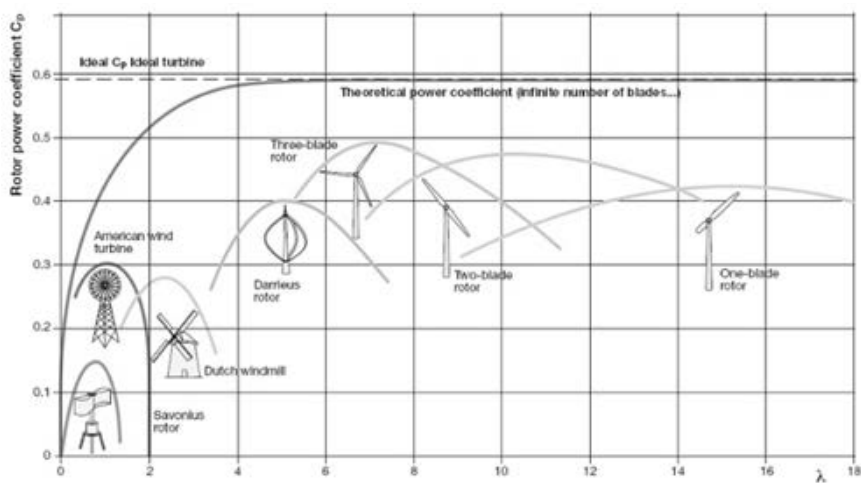


Figura 3 - Coeficiente de Potencia para diversos tipos de turbinas eólicas

4. Metodología

4.1 Obtención del Diseño del perfil a ensayar

Como punto de partida para el diseño de un aerogenerador se tienen en cuenta parámetros como el tamaño del aerogenerador (diámetro), la velocidad del viento de diseño y los perfiles aerodinámicos que serán utilizados en el diseño de los álabes. La primera etapa comienza con la recopilación de la información pertinente sobre los perfiles aerodinámicos que se pueden usar en un aerogenerador de baja potencia.

En este trabajo se estudian 8 perfiles aerodinámicos: NACA 0012, NACA 4412, NREL S822, NREL S823, NREL S833, CLARK Y, SD7080 (9.2%), Wortmann FX 63-137; los cuales se seleccionaron debido a su buen comportamiento para números de Reynolds por debajo de 500.000 y la utilización con anterioridad en estudios o trabajos relacionados con aerogeneradores de baja potencia.

Los perfiles NREL S823 y S822 están diseñados como una familia de perfiles para aerogeneradores de eje horizontal para bajos valores de Reynolds (National Renewable Energy Laboratory, 2005). El perfil aerodinámico Clark Y ha logrado gran difusión por sus bondades aerodinámicas, tales como su gran sustentación a bajas velocidades y su vientre plano, el cual facilita la construcción ya que sirve como plano de referencia (The UIUC Airfoil Data Site, 2020).

Otros perfiles que también han sido utilizados en aerogeneradores son SD7080 (9.2%) y Wortmann FX 63-137, este último ha sido utilizado con mucho éxito en Argentina, en la hélice de la Turbina Eólica Argentina de 10 kW y en el

aerogenerador INDAER de 1 kW. Sus características aerodinámicas son excelentes, si bien su construcción es laboriosa debido a la forma cóncava-convexa del vientre del perfil (Bastianon, 2008).

Por último, están los perfiles NACA que provienen de la industria aeronáutica, pero han sido utilizados con éxito en diversos aerogeneradores, específicamente en este caso analizaremos el NACA 0012 y NACA 4412.

En la figura 4 se muestran los perfiles seleccionados, los cuales serán el punto de partida para seleccionar el perfil con mejor desempeño aerodinámico que se utilizará para el diseño del álabe.

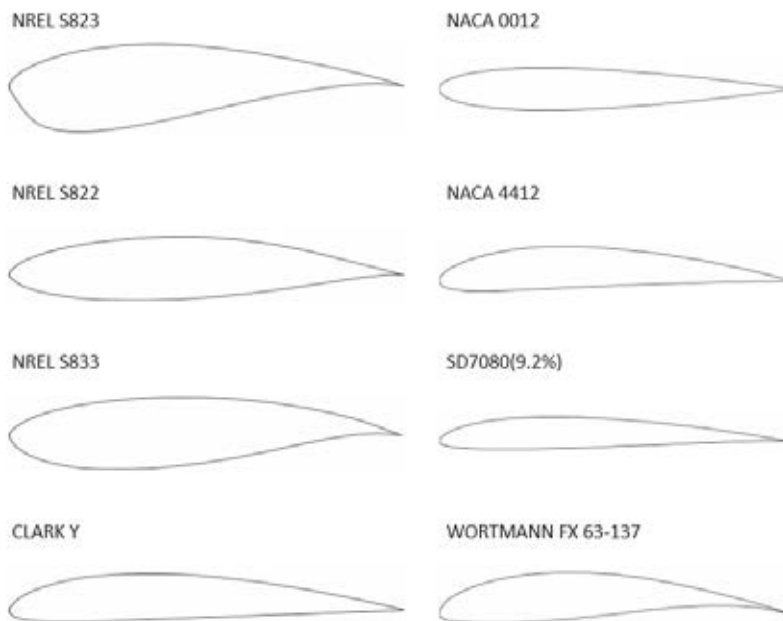


Figura 4 - Perfiles aerodinámicos seleccionados

4.2 Simulación mediante QBlade® y Flow Simulation

QBlade® es un software libre desarrollado por Hermann Föttinger Institute of TU Berlín, que permite realizar los cálculos necesarios para el desarrollo de un aerogenerador. La integración de la funcionalidad XFOIL permite al usuario diseñar rápidamente perfiles aerodinámicos personalizados y calcular sus polares de rendimiento e integrarlos directamente en el diseño y simulación del rotor de un aerogenerador (HFI TU Berlin, 2020).

El software QBlade® fue usado para testear los perfiles seleccionados para un número de Reynolds de 109.007 y un rango de ángulos de ataque (α) de 0° a 20°

con incrementos de 2°. Los resultados obtenidos se muestran en las Figuras 5, 6 y 7. Los perfiles seleccionados son comparados entre ellos en función del coeficiente de sustentación, el coeficiente de arrastre y del cociente sustentación-arrastre.

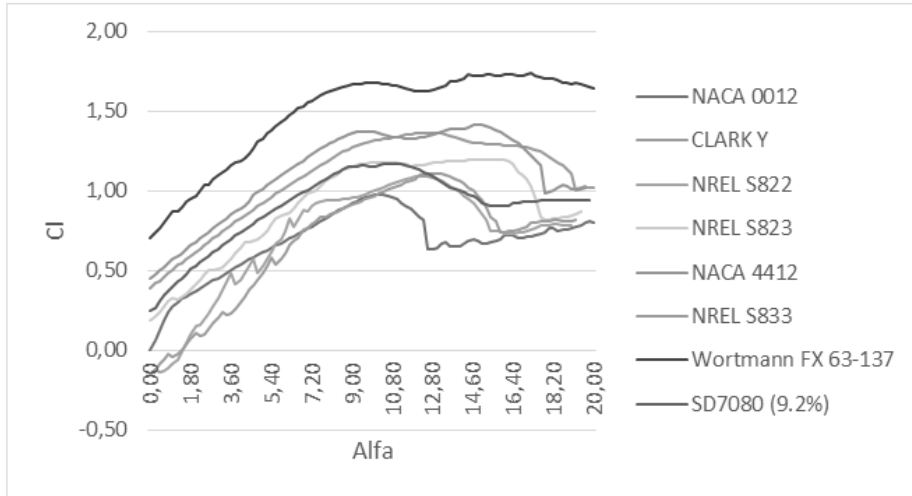


Figura 5 – C_l vs α

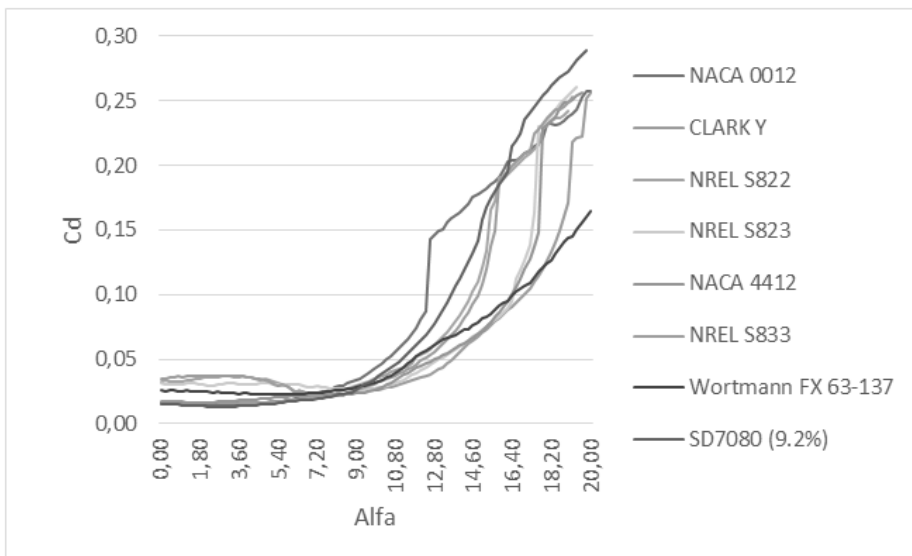


Figura 6 – C_d vs α

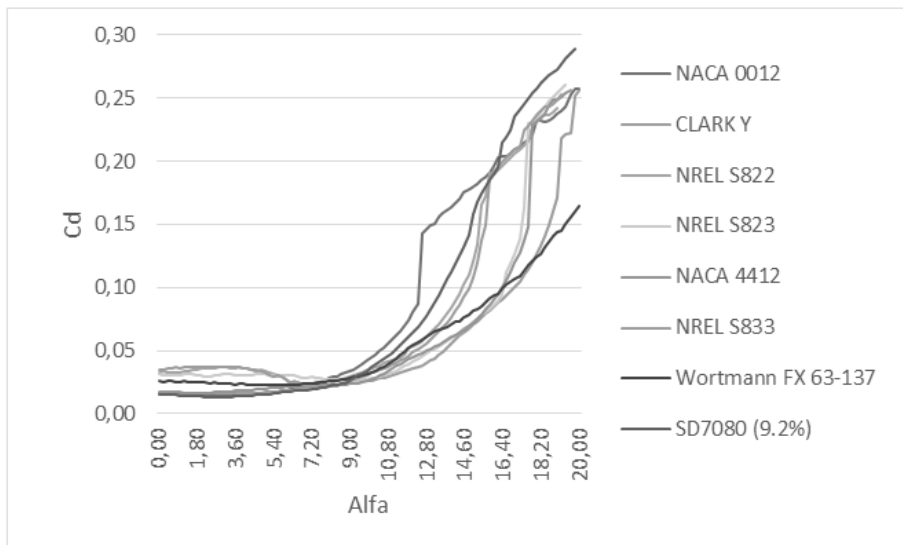


Figura 7 – C_L/C_D vs α

La Figura 5, muestra la variación del coeficiente de sustentación (C_L) respecto a los distintos ángulos de ataque para los perfiles seleccionados a $Re=109.007$. Podemos observar la gran influencia del ángulo de ataque sobre el coeficiente de sustentación e identificar donde aparecen los $C_{L\text{máx}}$ en cada uno de los perfiles, tal como se indica en la Tabla 1.

	$C_{L\text{máx}}$	α
NACA 0012	0.87	8.5 – 10.1
NACA 4412	1.40	13
NREL S822	1.09	12
NREL S823	1.2	13 – 16
NREL S833	1.08	12
CLARK Y	1.36	11.8 – 13
SD7080 (9.2%)	1.2	9.8 – 12.2
Wortmann FX 63-137	1.74	13.5

Tabla 1 - C_L máx. obtenido para cada uno de los perfiles

La Figura 7, muestra la variación del cociente sustentación-arrastre (C_L/C_D) para los diferentes perfiles a $Re=109.007$. Podemos observar que los valores de C_L/C_D varían respecto a los distintos ángulos de ataque (α) e identificar los $(C_L/C_D)_{\text{máx}}$ para cada uno de los perfiles, tal como se indica en la Tabla 2.

	$(C_L/C_D)_{\text{máx.}}$	α
NACA 0012	38	4 – 6
NACA 4412	58	8.6 – 9.2
NREL S822	45	8.2 – 8.4
NREL S823	44.2	9.4
NREL S833	39.5	8 – 8.6
CLARK Y	55.5	5 – 8
SD7080 (9.2%)	54	4.5 - 6
Wortmann FX 63-137	65	6.5 - 8

Tabla 2- $(C_L/C_D)_{\text{máx.}}$ obtenido para cada uno de los perfiles.

Con el objetivo de contrastar los datos obtenidos mediante QBlade® se realizó la simulación en Flow Simulation de cada uno de los perfiles seleccionados, considerando el ángulo de ataque óptimo para caso. La figura 7, nos permite obtener el ángulo de ataque óptimo para cada perfil, que es aquel que hace máximo el cociente C_L/C_D y con el que se consigue una mejor relación entre sustentación y empuje, es decir una mejor eficiencia aerodinámica (Heras Jiménez, 2012).

Flow Simulation es un complemento del software SolidWorks® que permite simular flujos de fluidos alrededor de un perfil aerodinámico para conocer su comportamiento y capacidades. Es decir, crea un túnel de viento virtual que opera más rápido y a menor costo que un túnel real.

Al momento de realizar las simulaciones se tomó como referencia el trabajo “Investigation of SolidWorks Flow Simulation as a valid tool for analyzing airfoil performance characteristics in low reynolds number flows” de Joseph Scott Wallace (WALLACE, 2019) para determinar las condiciones iniciales, opciones de control de cálculo y selección de objetivos.

Cabe aclarar que las metas seleccionadas nos van permitir obtener las fuerzas en las direcciones $\langle x \rangle$ e $\langle y \rangle$, sin embargo, para obtener los coeficientes de sustentación y arrastre que estamos interesados en calcular, es necesario realizar una corrección en las fuerzas respecto al ángulo de ataque. Esto se logra con las siguientes ecuaciones.

$$L = F_y \cos \alpha + F_x \sin \alpha \quad (5)$$

$$D = F_x \cos \alpha - F_y \sin \alpha \quad (6)$$

Sin esta corrección, las fuerzas de sustentación y arrastre no serían respectivamente perpendiculares y paralelas a la cuerda del perfil como indican sus definiciones.

$$C_L = \frac{F_y \cos \alpha + F_x \sin \alpha}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A} \quad (7)$$

$$C_D = \frac{F_x \cos \alpha - F_y \sin \alpha}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A} \quad (8)$$

Para cada simulación, los datos obtenidos fueron contrastados con los resultados del QBlade®, analizando cualitativamente las características del flujo, a fin de realizar o no ajustes en las opciones de cálculo de las próximas simulaciones. Completadas las simulaciones, los resultados serán analizados y discutidos.

5. Resultados y discusiones

Los parámetros a comparar son los coeficientes de sustentación y arrastre obtenidos mediante QBlade® y Flow Simulation, que serán medidos luego empíricamente en un túnel del viento. En la tabla 3 se encuentran los valores hallados en ambos softwares para los perfiles seleccionados.

Perfiles	QBlade		SOLIDWORKS	
	C_L	C_D	C_L	C_D
NACA 0012	0.804	0.257	0.641	0.049
NACA 4412	1.032	0.256	0.869	0.048
NREL S822	0.942	0.025	0.779	-0.183
NREL S823	1.171	0.027	1.008	-0,181
NREL S833	0.888	0.024	0.725	-0.184
CLARK Y	1.063	0.019	0.941	-0.189
SD7080 (9.2%)	0.738	0.014	0.575	-0.194
Wortmann FX 63-137	1.673	0.035	1,53	-0.173

Tabla 3 – Resultados obtenidos mediante QBlade y SolidWorks

El perfil con mejor eficiencia aerodinámica en las condiciones de estudio es el Clark Y, a pesar de que no presenta un $(C_L/C_D)_{\max.}$, como se puede observar en la Figura 7, presenta el mayor rango de estabilidad del coeficiente C_L/C_D . Por lo tanto, se realizó un análisis específico del mismo para un Reynolds de 109.007 y un rango de ángulos de ataque (α) de -2° a 10° .

A continuación, se observan las simulaciones y gráficos más relevantes que nos

permitirán analizar y contrastar los valores obtenidos mediante ambos softwares. En las simulaciones del perfil a diferente ángulo de ataque podemos apreciar cómo cambia la separación de la capa límite a medida que aumentamos el ángulo, así como también la estela que se genera. La tabla ubicada a la izquierda de cada simulación nos permite correlacionar la variación de colores con la variación de velocidad alrededor del perfil.

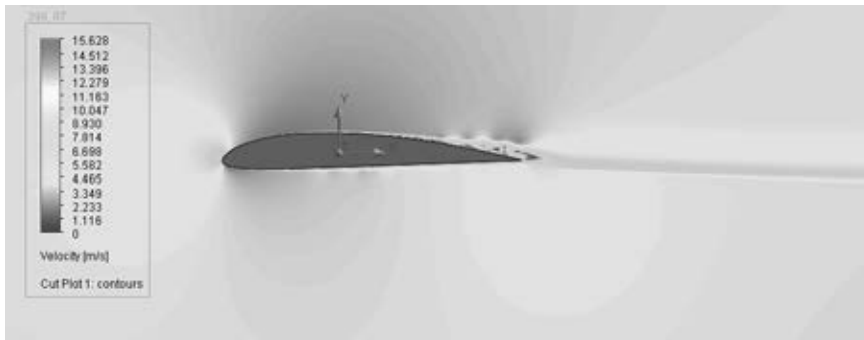


Figura 8 – Simulación Perfil Clark Y: $\alpha = 0^\circ$ y $Re = 109.007$

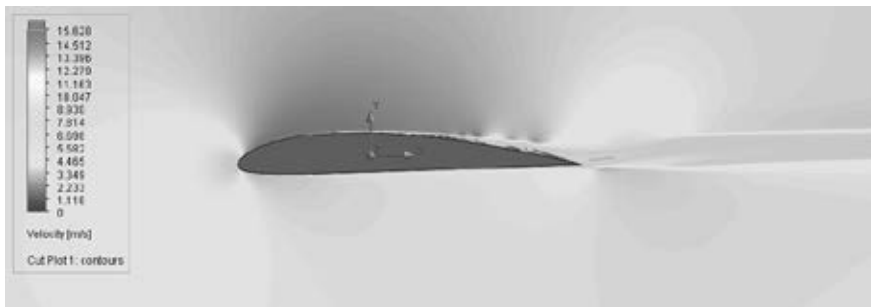


Figura 9- Simulación Perfil Clark Y: $\alpha = 2^\circ$ y $Re = 109.007$

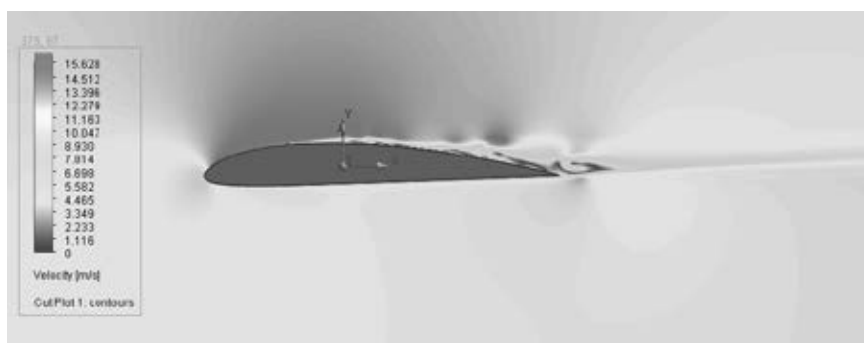


Figura 10 - Simulación Perfil Clark Y: $\alpha = 4^\circ$ y $Re = 109.007$

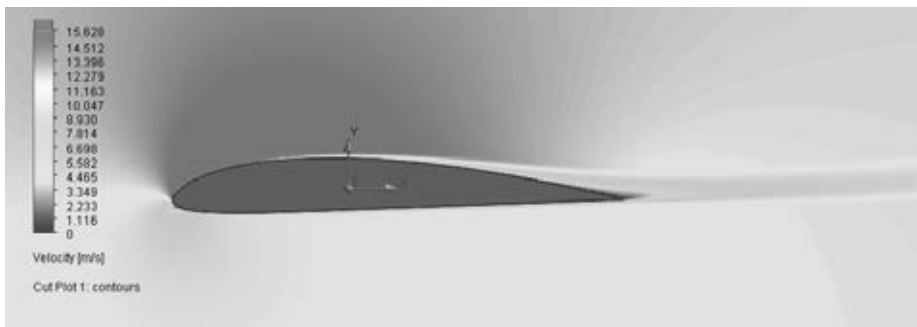


Figura 11 - Simulación Perfil Clark Y: $\alpha = 6,5^\circ$ y $Re = 109.007$

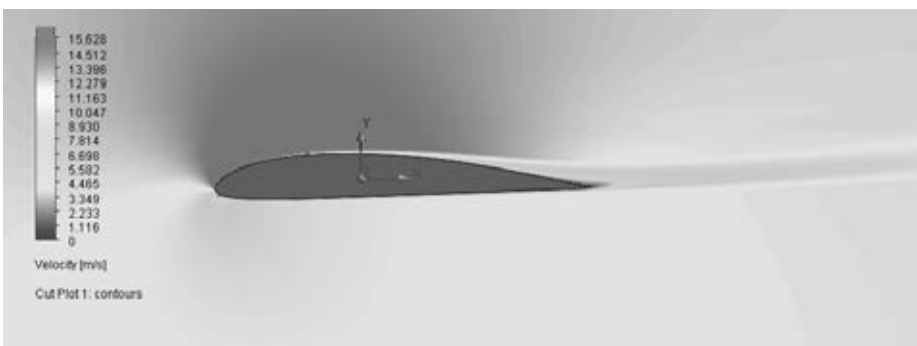


Figura 12 - Simulación Perfil Clark Y: $\alpha = 8^\circ$ y $Re = 109.007$

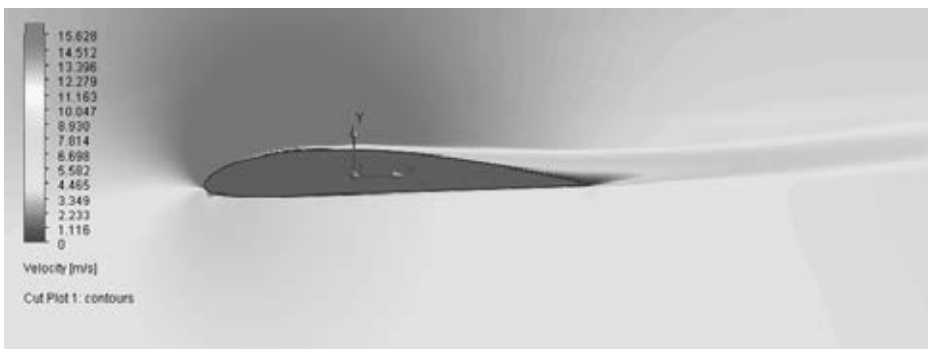


Figura 13 - Simulación Perfil Clark Y: $\alpha = 10^\circ$ y $Re = 109.007$

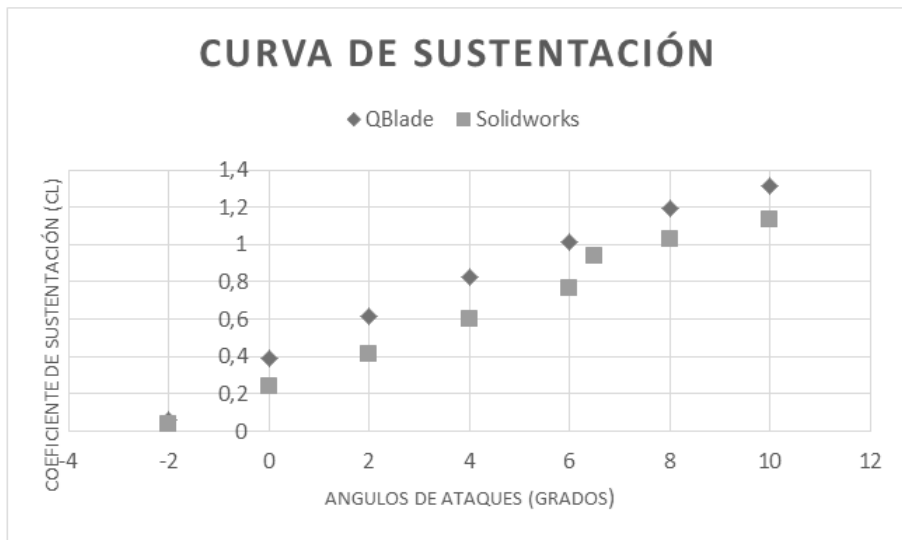


Figura 14 - Curva de sustentación Clark Y, Re: 109.007

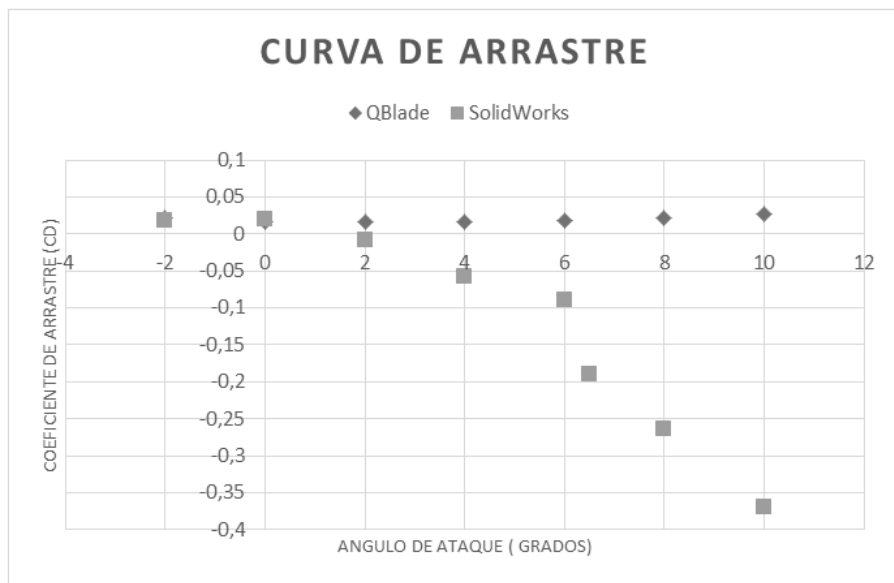


Figura 15 – Curva de arrastre Clark Y, Re: 109.007

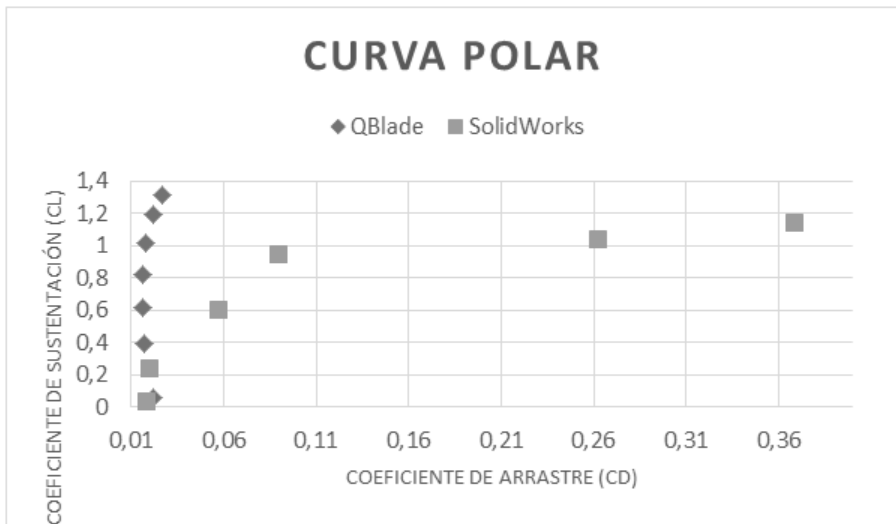


Figura 16 - Curva Polar Clark Y, Re: 109.007

Construcción de los perfiles alares mediante impresión 3D

En la segunda etapa del proceso, se realizó la impresión a escala de los 8 perfiles estudiados para luego realizar la simulación de los mismos en el túnel del viento.

A través de SolidWorks® se dibujaron los distintos perfiles, los cuales se escalaron de acuerdo al túnel del viento del laboratorio Perfil Alar. Debido a la sección útil de la cámara de muestra del túnel la envergadura (b) de los perfiles será de 100 mm, construida a partir de 5 secciones de 20 mm cada una, con una cuerda (c) de 145mm.

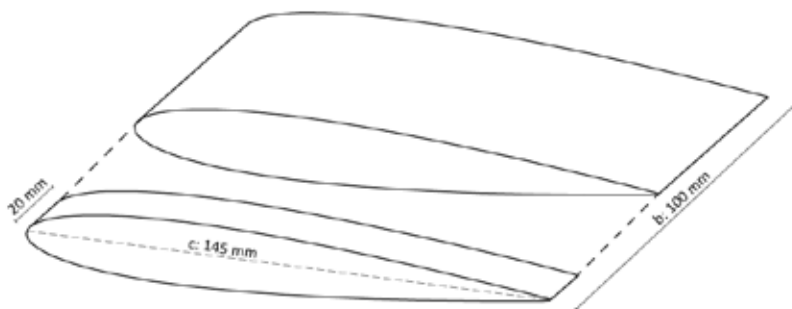


Figura 17 - Dibujo perfil NACA 0012

Al momento de realizar las impresiones de los perfiles se utilizó el software Cura®, el cual permite modificar los parámetros de impresión y transformarlos a código G (Ultimaker, 2020). A partir de los mismos se realizaron las impresiones en la impresora 3D EXO FAB10 con un filamento plástico de PLA.

Obtenidos los perfiles alares mediante la impresión 3D, en la tercera etapa del proyecto, se realizará la simulación del modelo en el túnel de viento preparado para la prueba de modelos aerodinámicos. Actualmente el túnel de viento del laboratorio Perfil Alar se encuentra en una etapa construcción, por lo que esta etapa quedara como trabajo a futuro.

7. Conclusiones

De acuerdo a los estudios realizados se establecen las siguientes conclusiones:

El perfil con mejor eficiencia aerodinámica en las condiciones de estudio es el Clark Y, a pesar de que no presenta un $(C_L/C_D)_{\text{máx}}$, ya que muestra el mayor rango de estabilidad del coeficiente C_L/C_D , con un valor de 55.5 entre los ángulos α : 5 – 8°.

Se ha podido realizar una comparación entre los resultados obtenidos mediante XFOIL y los resultados alcanzados en este trabajo mediante la simulación.

Esta comparación ha resultado satisfactoria al momento de analizar el coeficiente de sustentación (C_L). Debido a que a pesar que los resultados obtenidos, por ambos métodos, no coinciden con total exactitud de forma cuantitativa presentan una misma tendencia cualitativa. Por tanto, se puede concluir que la simulación realizada es correcta y que los resultados alcanzados simulan los fenómenos de estudio.

Sin embargo, a lo largo de las simulaciones se demostró que los resultados obtenidos para el coeficiente de arrastre (C_D) presentan una menor precisión. Se estima que esto se debe al fenómeno de separación de la capa límite. Tal como se puede observar en las simulaciones, al aumentar el ángulo de ataque aumenta esta separación y se aleja el valor de C_D .

Debido a lo expresado con anterioridad, al observar la curva polar, podemos notar que los primeros puntos de ambos métodos se correlacionan, pero al aumentar el ángulo de ataque comienzan a alejarse. Esto se debe justamente al fenómeno de separación de la capa límite que ya hemos mencionado.

Finalmente, este trabajo pretende servir como base para futuros trabajos que se quieran desarrollar sobre el tema.

8. Bibliografía

Bastianon, R. A. (2008). *Cálculo y diseño de la hélice óptima para turbinas eólicas*.

Bayati, I., Belloli, M., Bernini, L., & Zasso, A. (2007). *Aerodynamic design methodology for wind tunnel tests of wind turbine rotors*. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics.

Carta González, J. A., Calero Pérez, R., Colmenar Santos, A., Castro Gil, M.,

- & Collado Fernández, E. (2012). *Centrales de Energías Renovables*. España: Pearson.
- Fondevilla, M. M., & Scarpellini, S. (2013). *Guía de mercados energéticos*. Zaragoza: Prensas de la Universidad de Zaragoza.
- Heras Jiménez, S. (2012). *Mecánica de fluidos en Ingeniería*. Catalunya: Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica.
- HFI TU Berlin. (15 de Abril de 2020). *Qblade*. Obtenido de <http://www.q-blade.org/#welcome>
- Mur Amada, J. (2001). *Curso de energía eólica*. Zaragoza: Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Zaragoza.
- National Renewable Energy Laboratory . (2005). *The S822 and S823 Airfoils* . Pennsylvania: NREL.
- Rajakumar, S., & Suresh, A. (2019). *Design of small horizontal axis wind turbine for low wind speed rural applications*.
- Secretaria de Energia. (2008). Obtenido de http://www.energia.gob.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro_energia_biomasa.pdf
- The UIUC Airfoil Data Site . (2020). *Airfoil Tools*. Obtenido de <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=clarky-il>
- Ultimaker. (2020). Obtenido de <https://ultimaker.com/es/software/ultimaker-cura>
- Wallace, J. S. (2019). Investigation of solidworks flow simulation as a valid tool for analyzing airfoil performance characteristics in low reynolds number flows. Stillwater, Oklahoma , Estados Unidos: Oklahoma State University .

