

Diseño y Simulación de Perfiles de Aerogeneradores Horizontales a Bajo Número de Reynolds

Ganiele M., Nicoletti P., Villanueva A., Montenegro S., Lingeri S., Anello D., Ponzoni L., Melo M.

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 óptimo 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 (CL) y arrastre (CD) a un Reynolds cercano a 100.000 y un rango de ángulos de ataque (α) de 0° a 20° . Por otro lado, se usó el software SolidWorks® para simular 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®. con el fin de verificar las simulaciones obtenidas, y optimizar la selección del perfil adecuado para las condiciones de estudio.

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 (CL) and drag (CD) coefficient at the Reynolds number of 109.007 and the angles of attack (α) ranging from 0° to 20° . Moreover, SolidWorks® software allowed us to simulate air flows around the airfoils to calculate its performance and capabilities. Meshing and refinement parameters were 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.

PALABRAS CLAVE

Perfil alar, sustentación, arrastre, simulación.

KEY WORDS

Airfoil, lift, drag, simulation.

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 [1].

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 la Comisión Nacional de Energía Atómica “CNEA y la Universidad Nacional de Tres de Febrero “UNTREF”, 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:

1. Diseño y simulación asistida por computadora en Aerogeneradores.
2. Fabricación del modelo en escala mediante impresión 3D.
3. 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.

OBJETIVOS

Seleccionar los álabes de un aerogenerador de baja potencia de ≈ 1 kW, mediante el estudio de distintos perfiles alares a bajos números de Reynolds (≈ 100.000).

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 de CNEA, con el objetivo de seleccionar el perfil adecuado para las condiciones de estudio.

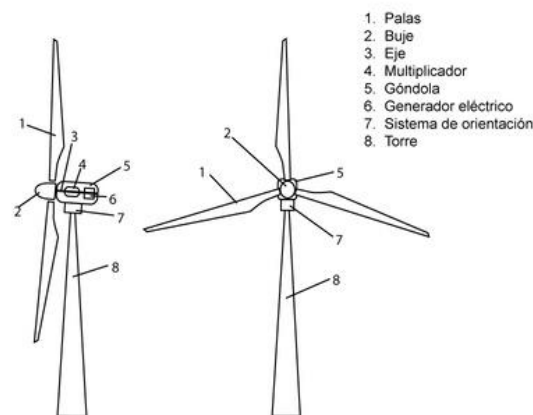
MARCO TEORICO

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 [2].

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 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Figura N°1: Partes de un aerogenerador de eje horizontal.



Fuente: Tecnología Julia Fernandez.

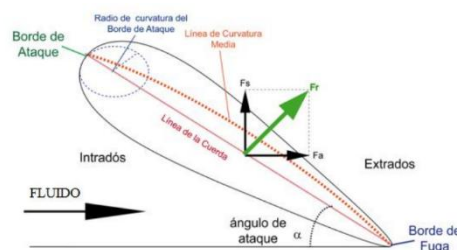
1. Palas/Álabes: capturan el viento y transmiten su potencia hacia el buje.
2. Buje: está acoplado al eje de baja velocidad del aerogenerador.
3. Eje: conecta el buje del rotor al multiplicador, lo que permite que gire aproximadamente a 1.500 revoluciones por minuto (r.p.m.), y de funcionamiento al generador 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.

Funcionamiento aerogenerador

El elemento encargado de convertir la energía cinética del viento en energía mecánica de rotación es el rotor, formado por varias palas 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 N°2: Fuerzas actuantes sobre un perfil aerodinámico.



Fuente: Manual de vuelo.

Así pues, cuando tenemos un fluido que pasa a través de un ala, 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 álabes crean una fuerza en el sentido positivo (opuesto al de la gravedad) ya que las partículas que pasan por debajo empujan hacia arriba el álabes, y las partículas que pasan por encima succionan el álabes 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.

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.

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

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

En donde,

- ρ es la densidad del aire, que es variable en función de la altura sobre el nivel del mar (presión), donde su valor estándar es de 1,225 kg/m³ y de la temperatura.
- A es la superficie del volumen de control considerado
- 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. Así como también que el área A es el área imaginaria del volumen de control considerado, que más tarde con la introducción del aerogenerador se convertirá en el área barrida por las palas, que es independiente del número de palas del aerogenerador [3].

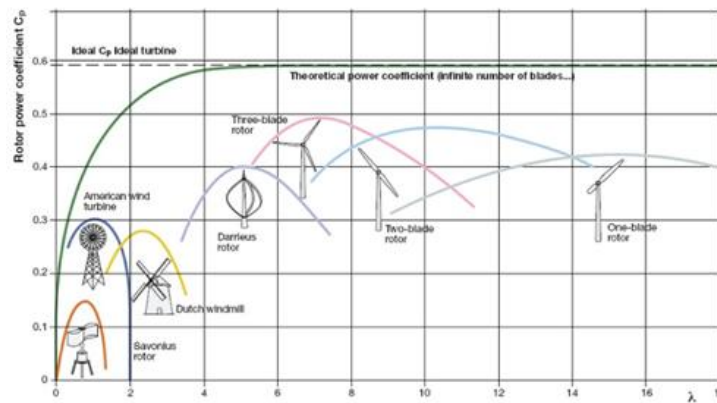
Sin embargo, solo una fracción de la potencia del viento es aprovechable, determinada por la siguiente expresión:

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

El coeficiente C_p 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 [3].

El máximo valor teórico que puede alcanzar el C_p 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 N°3: Coeficiente de Potencia para diversos tipos de turbinas eólicas.



Fuente: Energy Hunters.

METODOLOGIA

Estudio 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 tanto sobre el método de diseño como 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.

Algunos de los perfiles están diseñados en familias y son recomendados para distintas secciones en el álabes para su mejor aprovechamiento. Es el caso de los perfiles NREL S823 y S822 diseñados como una familia de perfiles para aerogeneradores de eje horizontal para bajos valores de Reynolds [4]. También está el perfil aerodinámico Clark Y que 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 [5].

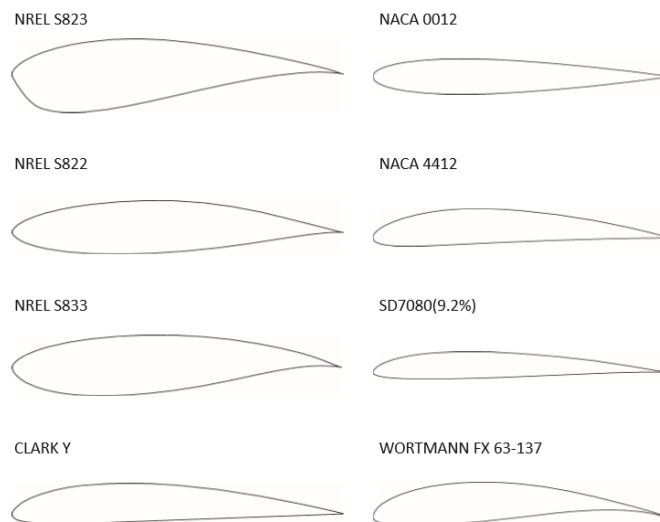
Otros perfiles que también han sido utilizados en aerogeneradores son SD7080 (9.2%) y Wortmann FX 63-137, este último utilizado con mucho éxito en Argentina, en la hélice de la Turbina Eólica Argentina de 10 kW y en el aerogenerador INDAER de 1 kW. Sus caracte-

terísticas aerodinámicas son excelentes, aunque su construcción es laboriosa debido a la forma cóncava-convexa del vientre del perfil [6].

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. Para llevar a cabo esta selección se evaluó el comportamiento de los perfiles, mediante el uso del software QBlade y el software de simulación CFD SolidWorks Flow Simulation.

Figura N°4: Perfiles aerodinámicos seleccionados.



Fuente: elaboración propia.

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 / XFLR5 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 [7].

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 fue-

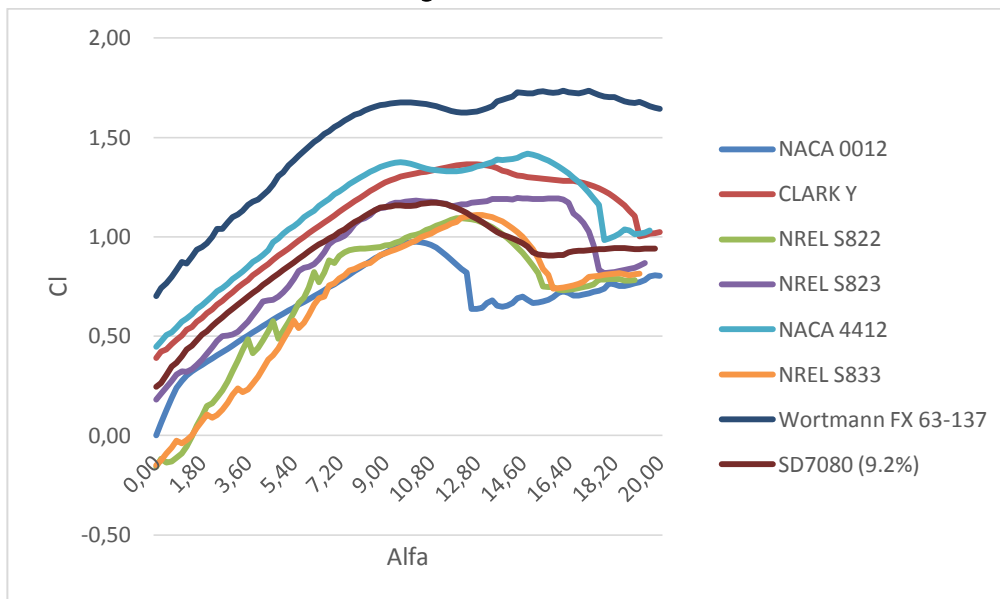
ron comparados entre ellos en función del coeficiente de sustentación, el coeficiente de arrastre y del cociente sustentación-arrastre.

El número de Reynolds utilizado se calculó utilizando la ecuación (4) y considerando:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot c}{\mu} \quad (4)$$

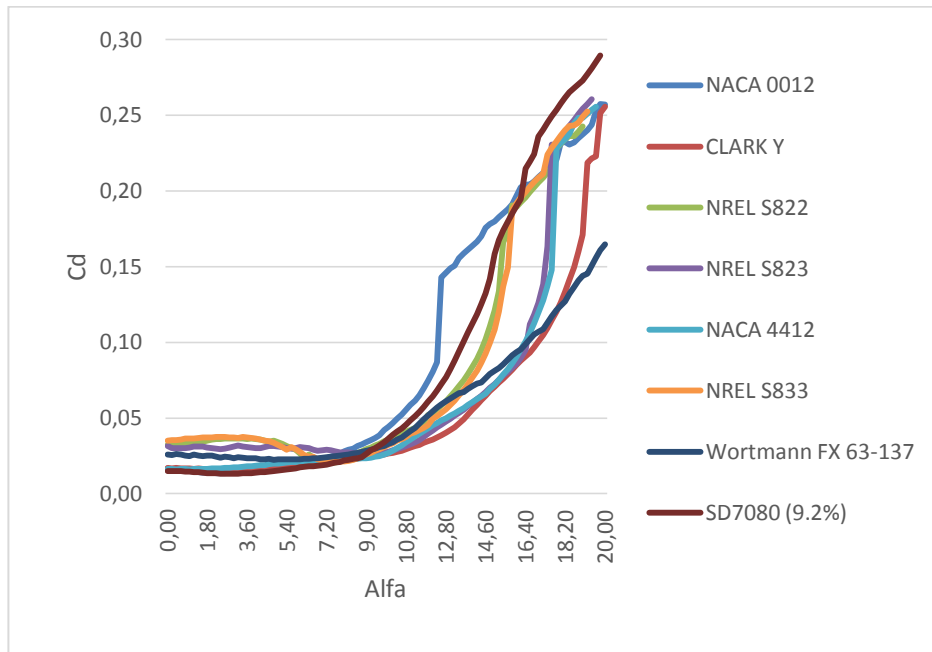
- ρ (aire a 300K): 1,1774 kg/m³
- v : 12 m/s
- c : 0,145 m
- μ (aire a 300K): 1,8794x10⁻⁵ N. s/m²

Figura N°5: CL vs . α .



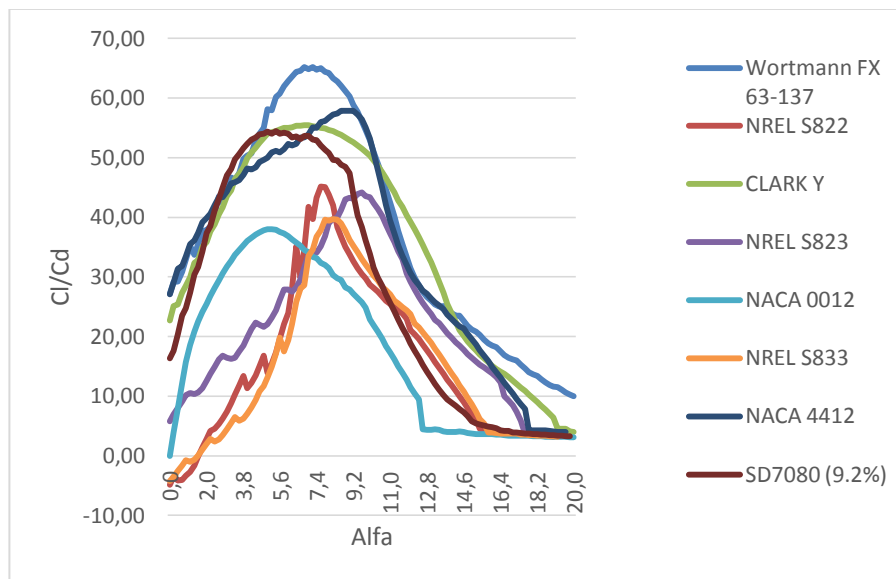
Fuente: elaboración propia.

Figura N°6: C_D vs. α .



Fuente: elaboración propia.

Figura N°7: C_L/C_D vs. α .



Fuente: elaboración propia.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, 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 $C_{Lmáx}$, en cada uno de los perfiles, tal como se indica en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Tabla N°1: CL máx. obtenido para cada uno de los perfiles.

	C_L 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

Fuente: elaboración propia.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, 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 $(C_L/C_D)_{máx.}$ para cada uno de los perfiles, tal como se indica en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**.

Tabla N°2: (C_L/C_D) máx. obtenido para cada uno de los perfiles.

	$(C_L/C_D)_{máx.}$	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

Fuente: elaboración propia.

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 [8].

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 AIR-FOIL PERFORMANCE CHARACTERISTICS IN LOW REYNOLDS NUMBER FLOWS” de Joseph Scott Wallace [9] para determinar las condiciones iniciales, opciones de control de cálculo y selección de objetivos.

Cabe aclarar que las metas seleccionadas nos obtener las fuerzas en las direcciones $\langle x \rangle$ e $\langle y \rangle$, sin embargo, para obtener los coeficientes de sustentación y arrastre 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 fueron analizados y discutidos.

RESULTADOS Y DISCUSION

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

Tabla N°3: Resultados obtenidos mediante QBlade y SolidWorks.

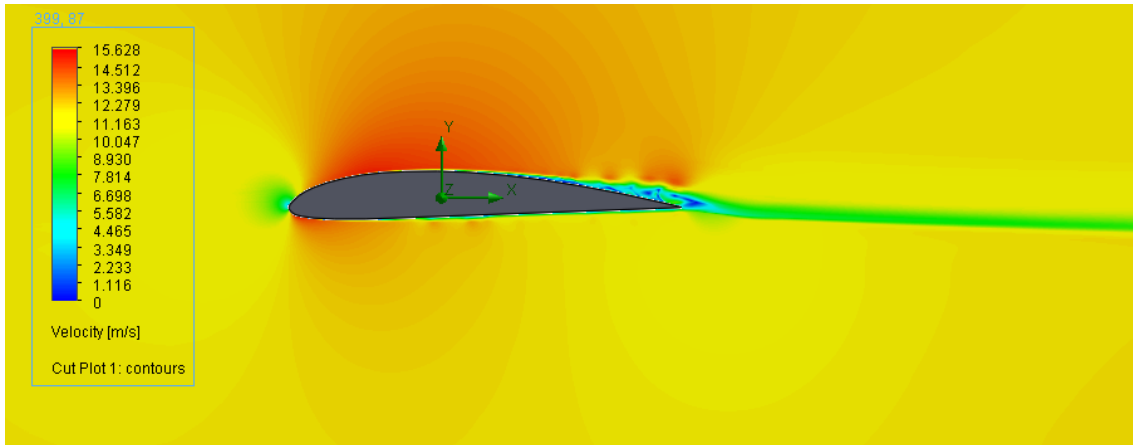
Perfiles	QBlade		SOLIDWORKS	
	C_L	C_D	C_L	C_D
NACA 0012	0.804	0.257	0.641	0.049
NACA 4412	1.032	0.256	0.869	0.048
NREL S822	0.942	0.025	0.779	-0.183
NREL S823	1.171	0.027	1.008	-0,181
NREL S833	0.888	0.024	0.725	-0.184
CLARK Y	1.063	0.019	0.941	-0.189
SD7080 (9.2%)	0.738	0.014	0.575	-0.194
Wortmann FX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

Fuente: elaboración propia

El perfil con mejor eficiencia aerodinámica en las condiciones de estudio es el Clark Y, a pesar de que no presenta un $(C_L/C_D)_{m\acute{a}x.}$, 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° .

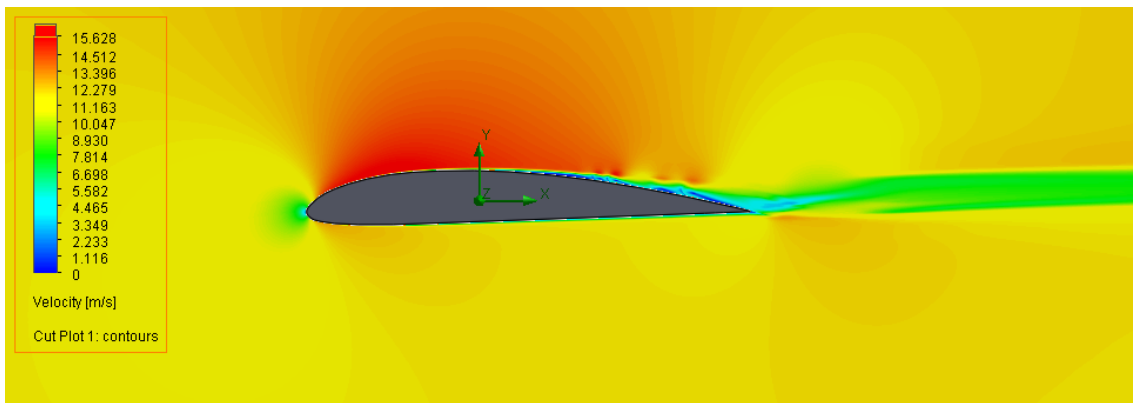
A continuación, se observan las simulaciones y gráficos más relevantes que nos permitieron analizar y contrastar los valores obtenidos mediante ambos softwares. En las simulaciones del perfil a diferente ángulo de ataque podemos apreciar cómo cambia la separación de la capa límite a medida que aumentamos 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 N°8: Simulación Perfil Clark Y: $\alpha = 0^\circ$ y $Re = 109.007$.



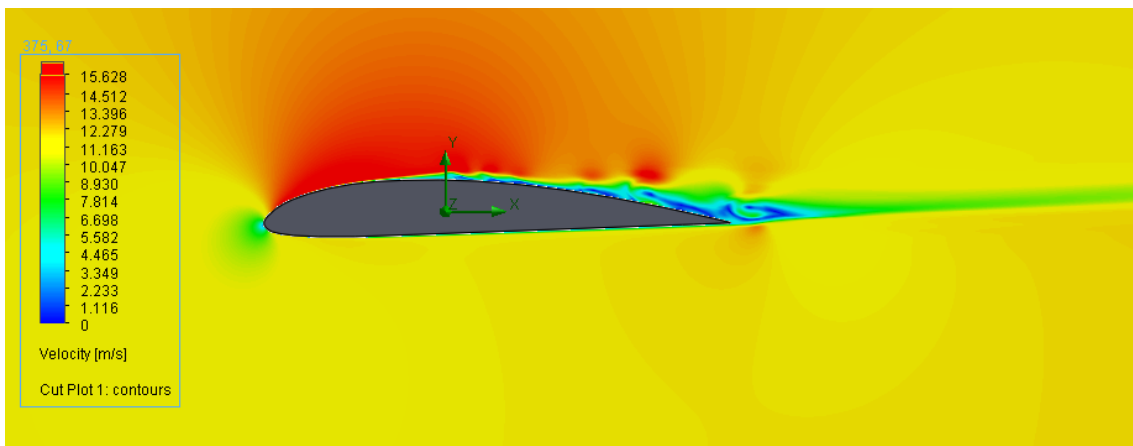
Fuente: SolidWorks®

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



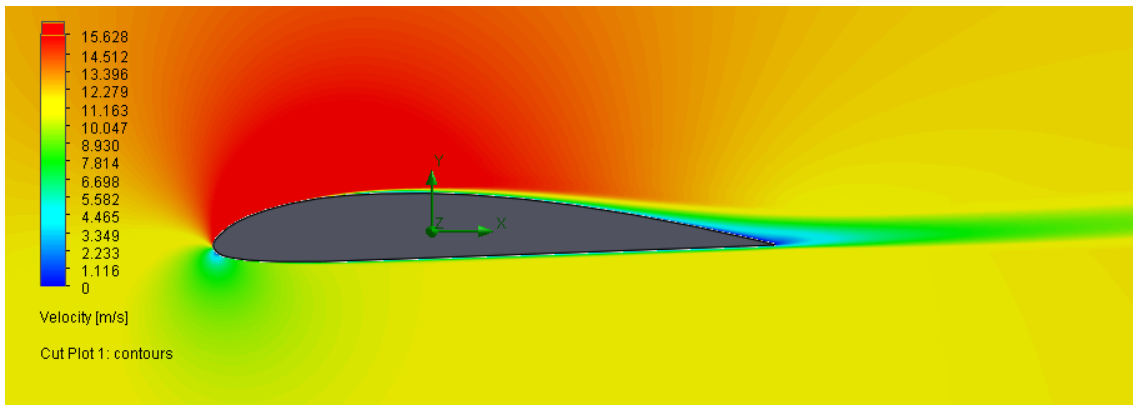
Fuente: SolidWorks®

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



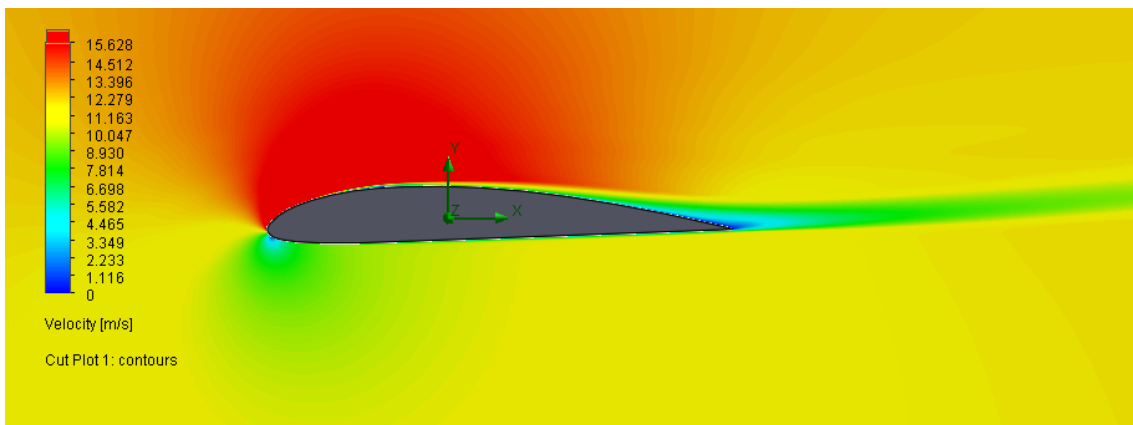
Fuente: SolidWorks®

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



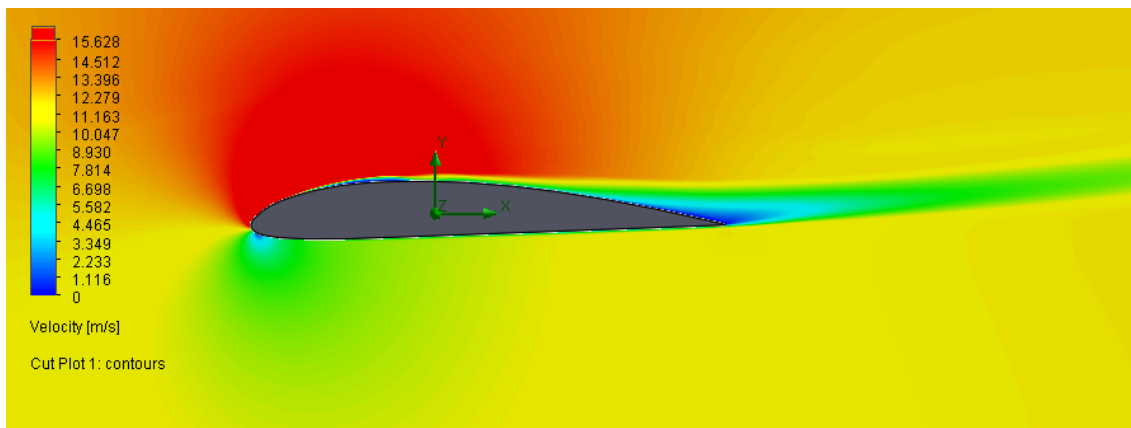
Fuente: SolidWorks®

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



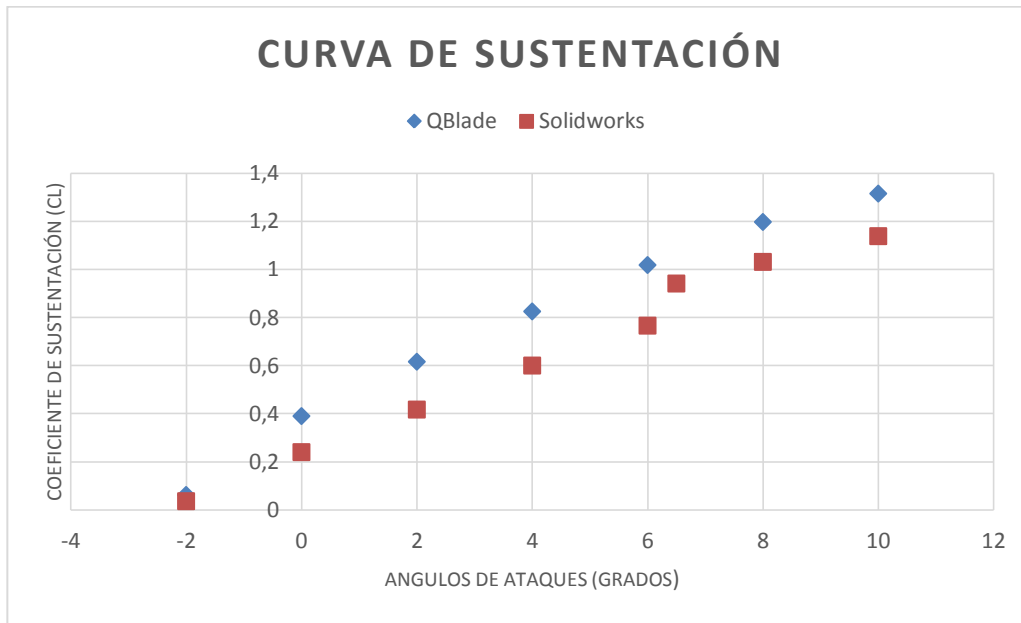
Fuente: SolidWorks®

Figura N°8: Simulación Perfil Clark Y: $\alpha = 10^\circ$ y $Re = 109.007$.



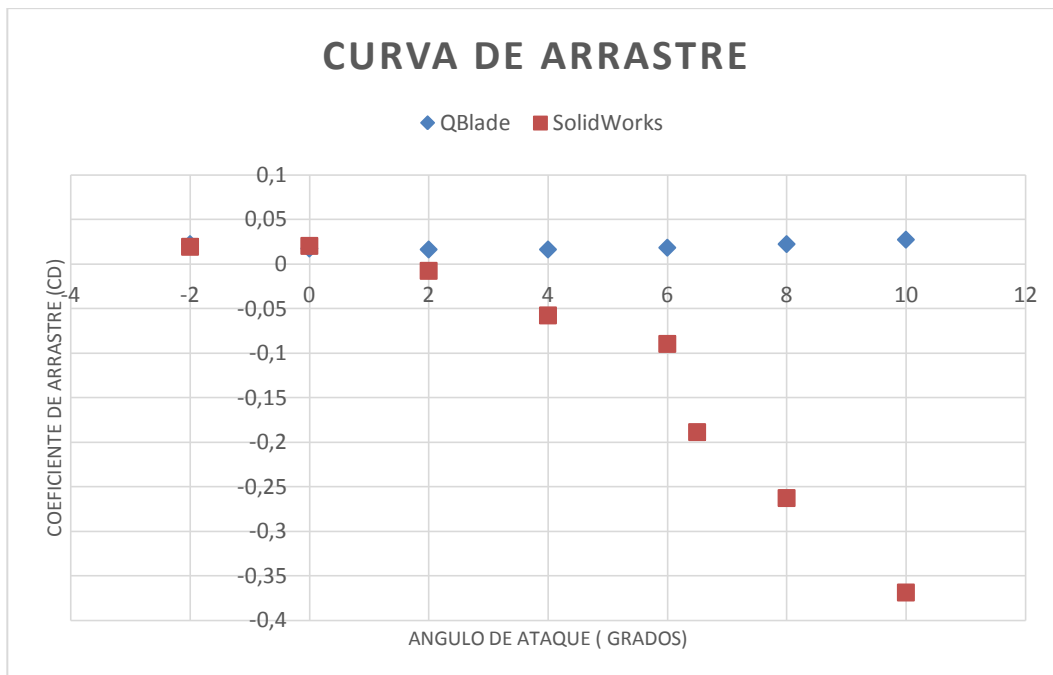
Fuente: SolidWorks®

Figura N°9: Curva de sustentación Clark Y, Re: 109.007.



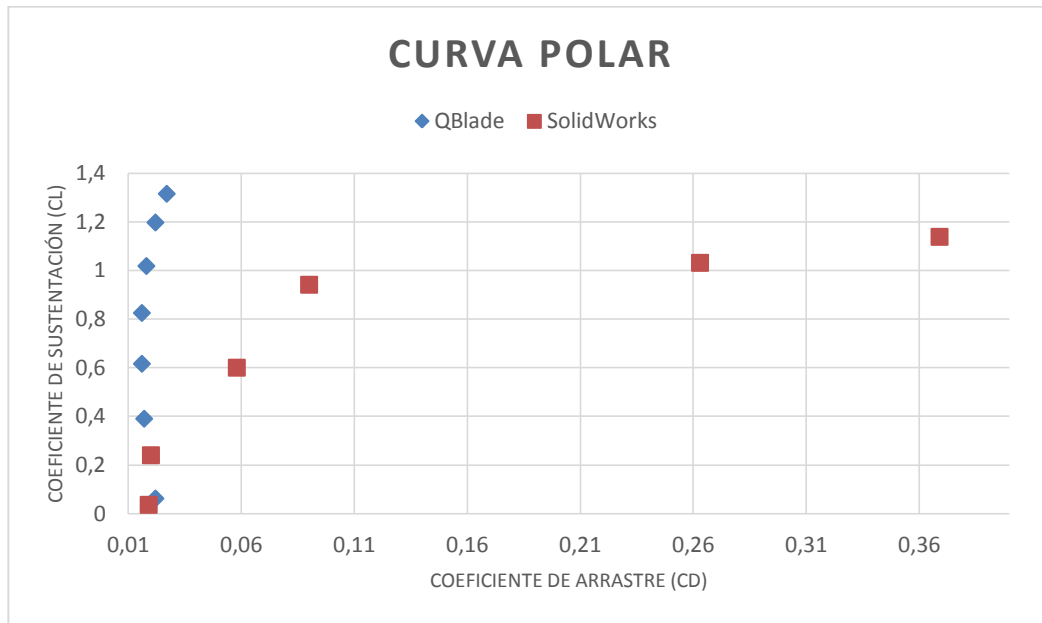
Fuente: elaboración propia.

Figura N°10: Curva de arrastre Clark Y, Re: 109.007.



Fuente: elaboración propia

Figura N°11: Curva Polar Clark Y, Re: 109.007.



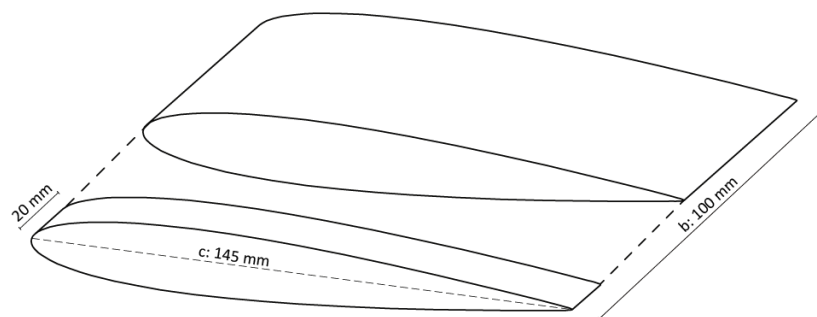
Fuente: elaboración propia.

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 N°12: Dibujo perfil NACA 0012.



Fuente: elaboración propia.

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 [10]. A partir

de los mismos se realizaron las impresiones en la impresora 3D EXO FAB10 con un filamento plástico de PLA, tal como se observa en la Figura N° 13

Figura N°13: Fotografías del Laboratorio Perfil Alar.



Fuente: elaboración propia.

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.

CONCLUSIONES

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

El perfil con mejor eficiencia aerodinámica en las condiciones de estudio fue el Clark Y, a pesar de que no presenta un (C_L/C_D) 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 / XFLR5 y los resultados alcanzados en este trabajo mediante la simulación.

Esta comparación, como se ve en la figura 14, ha resultado satisfactoria al momento de analizar el coeficiente de sustentación (C_L) ya 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 (CD) presentan una menor precisión que los obtenidos para el coeficiente de sustentación (CL). Se estima que esto se debe al fenómeno de separación de la capa límite. Tal como se puede observar en las simulaciones, presentes en las figuras 8 a la 13, al aumentar el ángulo de ataque aumentó esta separación y se aleja el valor de CD, como se puede observar en la figura 15. Es importante remarcar que en todos los casos los valores de CD obtenidos presentan una sub valoración.

Debido a lo expresado con anterioridad, al observar la curva polar, figura 16, 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.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Secretaria de Energía. (2008). Obtenido de http://www.energia.gob.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro_energia_biomasa.pdf
- [2] Carta González, J. A., Calero Pérez, R., Colmenar Santos, A., Castro Gil, M., & Collado Fernández, E. (2012). Centrales de Energías Renovables. España: Pearson.
- [3] Mur Amada, J. (2001). Curso de energía eólica. Zaragoza: Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Zaragoza.
- [4] National Renewable Energy Laboratory . (2005). The S822 and S823 Airfoils . Pennsylvania: NREL.
- [5] The UIUC Airfoil Data Site . (2020). Airfoil Tools. Obtenido de <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=clarky-il>
- [6] Bastianon, R. A. (2008). Cálculo y diseño de la hélice óptima para turbinas eólicas.
- [7] HFI TU Berlin. (15 de Abril de 2020). Qblade. Obtenido de <http://www.qblade.org/#welcome>

- [8] Heras Jiménez, S. (2012). Mecánica de fluidos en Ingeniería. Catalunya: Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica.
- [9] 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 .
- [10] Ultimaker. (2020). Obtenido de <https://ultimaker.com/es/software/ultimaker-cura>
- [11] Asociación danesa de la industria eólica. (10 de Mayo de 2003). Obtenido de <http://www.windpower.org/es/tour/wtrb/comp/index.htm>.
- [12] 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.
- [13] Fondevilla, M. M., & Scarpellini, S. (2013). Guía de mercados energéticos. Zaragoza: Prensas de la Universidad de Zaragoza.
- [14] Rajakumar, S., & Suresh, A. (2019). Design of small horizontal axis wind turbine for low wind speed rural applications.