

**FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA
Y URBANISMO**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
MECÁNICA ELÉCTRICA**

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

**ANÁLISIS DE PERFILES AERODINÁMICOS
PARA TURBINAS EÓLICAS DE PEQUEÑA
POTENCIA**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE
BACHILLER EN INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA**

Autor:

De Los Santos Mesarina Kevin Antonio

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3576-0330>

Asesor:

Mtro. Vives Garnique Juan Carlos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0988-9881>

Línea de Investigación

**Tecnología e Innovación en el Desarrollo de la Construcción
y la Industria en un Contexto de Sostenibilidad**

Sub línea de Investigación

**Innovación y Tecnificación en ciencia de los materiales, diseño e
infraestructura**

Pimentel – Perú

2024

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Quien(es) suscribe(n) la **DECLARACIÓN JURADA**, soy(somos) **egresado (s)** del Programa de Estudios de **Ingeniería Mecánica Eléctrica** de la Universidad Señor de Sipán S.A.C, declaro (amos) bajo juramento que soy (somos) autor(es) del trabajo titulado:

**ANÁLISIS DE PERFILES AERODINÁMICOS PARA TURBINAS EÓLICAS
DE PEQUEÑA POTENCIA**

El texto de mi trabajo de investigación responde y respeta lo indicado en el Código de Ética del Comité Institucional de Ética en Investigación de la Universidad Señor de Sipán (CIEI USS) conforme a los principios y lineamientos detallados en dicho documento, en relación a las citas y referencias bibliográficas, respetando al derecho de propiedad intelectual, por lo cual informo que la investigación cumple con ser inédito, original y autentico.

En virtud de lo antes mencionado, firman:

De Los Santos Mesarina Kevin Antonio	DNI: 70220685	
---	---------------	---

Pimentel, 27 de setiembre de 2024

Dedicatoria

Dedicado a mi familia que tanto quiero, por brindarme su apoyo incondicional e incentivarme a cumplir mis metas. A mis padres Gloria y Keibin por su paciencia y ánimo para seguir adelante. A mis abuelos Charo y Mario por siempre estar ahí en todo momento y brindarme sus consejos. Son ellos mi motivación para cumplir mis propósitos.

De Los Santos Mesarina Kevin Antonio

Agradecimiento

Agradecido con Dios por permitirme tener y disfrutar a mi familia, brindándome la voluntad de seguir adelante y no caer en la tentación del mal camino.

De Los Santos Mesarina Kevin Antonio

Índice:

Dedicatoria.....	3
Agradecimiento	4
Índice de tablas:	6
Resumen:	8
Abstract:	10
1.1. Realidad Problemática:.....	12
1.2. Formulación del Problema:	20
1.3. Hipótesis:	20
1.4. Objetivos:	20
1.5. Teorías Relacionadas al Tema:	21
II. Método de Investigación:	26
III. Resultados:	27
IV. Discusión y Conclusión	49
4.1. Discusión.....	49
4.2. Conclusiones.....	50
V. Referencias:.....	52
Anexos	54
Anexo 1	55
Anexo 2.....	56

Índice de tablas:

Tabla 1:	27
Tabla 2:	46

Índice de fórmulas:

Módulos de la fuerza de sustentación y arrastre	22
Régimen laminar:	25
Régimen turbulento :	25

Índice de figuras:

Fig 1: a) Fuerzas causadas por un fluido en movimiento sobre un perfil aerodinámico. b) Fuerzas causadas por un fluido en movimiento sobre una placa no aerodinámica	21
Fig 2: Nomenclatura básica usada en perfiles aerodinámicos	23
Fig 3: Perfiles aerodinámicos de un aspa.....	24
<i>Fig 4.</i> Perfil NACA 0012	29
<i>Fig 5.</i> Perfil SG6043.....	29
<i>Fig 6.</i> Perfil S809.	29
<i>Fig 7.</i> Perfil E231	29
Fig 8: Geometría del perfil NACA 0012. Software Qblade.....	30
Fig 9: C_l vs α del perfil NACA 0012. Software Qblade.	30

Fig 10: Cd vs α del perfil NACA 0012. Software Qblade.	31
Figura 7: $ClCd$ vs α del perfil NACA 0012. Software Qblade	31
Fig 11: $ClCd$ vs α del perfil NACA 0012. Software Qblade.	32
Fig 12: Cl vs Cd del perfil NACA 0012. Software Qblade	33
Fig 13: Geometría del perfil SG6043. Software Qblade.....	33
Fig 14: Cl vs α del perfil SG6043. Software Qblade.	34
Fig 15: Cd vs α del perfil SG6043. Software Qblade.	35
Fig 16: $ClCd$ vs α del perfil SG6043. Software Qblade.....	36
Fig 17: Cl vs Cd del perfil SG6043. Software Qblade	37
Fig 18: Geometría del perfil S809. Software Qblade.	37
Fig 19: Cl vs α del perfil S809. Software Qblade.....	38
Fig 20: Cd vs α del perfil S809. Software Qblade.....	39
Fig 21: $ClCd$ vs α del perfil S809. Software Qblad.....	40
Fig 22: Cl vs Cd del perfil S809. Software Qblade.....	41
Fig 23: Geometría del perfil E231. Software Qblade.	41
Fig 24: Cl vs α del perfil E231. Software Qblade.....	42
Fig 25: Cd vs α del perfil E231. Software Qblade.....	43
Fig 26: $ClCd$ vs α del perfil E231. Software Qblade.....	44
Fig 27: Cl vs Cd del perfil E231. Software Qblade.....	45

Resumen:

En esta investigación Analiza perfiles aerodinámicos para turbinas eólicas de pequeña potencia, tiene como objetivo evaluar las características aerodinámicas de los diferentes perfiles analizados.

La metodología empleada abarco un análisis de perfiles aerodinámicos, para lo cual se realizó una revisión literaria de los diferentes perfiles aerodinámicos utilizados en aerogeneradores de pequeña potencia. Los perfiles seleccionados para el análisis fueron bajo criterios y recomendaciones de cada autor de los artículos científicos consultados. En continuación se realizó una recopilación de los archivos data (coordenadas) de cada perfil aerodinámico, estos son conseguidos de la página airfoiltools.com. Se analizo los perfiles seleccionados utilizando el software Qblade para obtener sus coeficientes aerodinámicos, el análisis se desarrolló a distintos números de Reynolds (Re) de 100 000 – 500 000, esto con el objetivo examinar el comportamiento aerodinámico de los perfiles, obteniendo los coeficientes de sustentación (C_l), arrastre (C_d), el cociente de $\frac{C_l}{C_d}$ y el ángulo de diseño (α). Por último, se realizó una comparación de los perfiles analizados para seleccionar el más óptimos para ser utilizado en aerogeneradores de pequeña potencia.

Los resultados mostraron que el perfil aerodinámico SG6043, porque presenta los valores más altos en comparación de los demás perfiles, sus coeficientes de (C_l) es de 1.64 en un $Re = 10^5$ y $Re = 5 \times 10^5$ un $C_l = 1.72$, se observa que la variación de los valores es mínima a distintos Re y su ángulo de diseño α es de 7° según el cociente $\frac{C_l}{C_d}$, lo que es favorable ya que estos deben ser pequeños entre un intervalo de $6^\circ - 8^\circ$ ya que estos generan una sobre presión en la parte inferior del aspa y la vez una depresión por arriba. El perfil NACA 0012 siendo unos de los perfiles más mencionados en los artículos científicos muestra

valores $Re = 5 \times 10^5$ un $C_l = 1.25$ y en $Re = 10^5$ un $C_l = 0.96$, se observa un decaimiento en los valores de sustentación a Reynolds bajos lo que causaría una baja en la eficiencia si se desea fabricar un aerogenerador de pequeña potencia con este perfil.

Palabras claves: Perfil aerodinámico, coeficiente de sustentación (C_l), coeficiente de arrastre (C_d), aerogeneradores, aspa eólica, turbulencia, turbina eólica.

Abstract:

In this research, it analyzes aerodynamic profiles for small power wind turbines, its objective is to evaluate the aerodynamic characteristics of the different profiles analyzed.

The methodology used included an analysis of aerodynamic profiles, for which a literary review of the different aerodynamic profiles used in small power wind turbines was carried out. The profiles selected for the analysis were based on the criteria and recommendations of each author of the scientific articles consulted. Next, a compilation of the data files (coordinates) of each aerodynamic profile was made, these are obtained from the airfoiltools.com page. The selected profiles are analyzed using the Qblade software to obtain their aerodynamic coefficients, the analysis was developed at different Reynolds numbers (Re) de 100 000 – 500 000, this with the objective of examining the aerodynamic behavior of the profiles, obtaining the coefficients of lift (C_l), drag (C_d), the ratio of $\frac{C_l}{C_d}$ and the design angle (α). Finally, a comparison of the analyzed profiles was carried out to select the most optimal ones to be used in small power wind turbines.

The results showed that the SG6043 aerodynamic profile, because it presents the highest values compared to the other profiles, its coefficients (C_l) is 1.64 at $Re = 10^5$ and $Re = 5 \times 10^5$ at $C_l = 1.72$, it is observe that the variation C of the values is minimal at different Re and its design angle α is 7° according to the ratio $\frac{C_l}{C_d}$, which is favorable since these must be small between an interval of $6^\circ - 8^\circ$ since These generate an overpressure at the bottom of the blade and at the same time a depression at the top. The NACA 0012 profile, being one of the most mentioned profiles in scientific articles, shows values $Re = 5 \times 10^5$ a $C_l = 1.25$ and in

$Re = 10^5$ a $C_l = 0.96$, a decay is observed in the lift values at low Reynolds which would cause a drop in efficiency if a small power wind turbine with this profile is desired to be manufactured.

Keywords: Aerodynamic profile, lift coefficient (C_l), drag coefficient (C_d), wind turbines, wind Blade, turbulence, wind turbine.

I. Introducción:

1.1. Realidad Problemática:

Actualmente la energía eléctrica se volvió indispensable para la vida humana ya que esta es parte central de la mayoría de sus actividades y su creciente demanda ha causado serios efectos negativos al medio ambiente por el combustible de fósiles para generarla. El Ministerio de Energía y Minas (MINEM) resalta las Operaciones de las Centrales de Recursos Energéticos Renovables no convencionales, entre la que destaca la Energía Eólica, ya que esta no emite dióxido de carbono al ambiente, lo que contribuye a salvaguardar la salud de los peruanos [1].

Cuando hablamos de energía eólica surge la duda de cómo aprovechar este recurso, para ellos se utiliza máquinas capaces de transformar la energía del viento en energía eléctrica, estas máquinas o también llamados aerogeneradores consta de una serie de partes estructurales, así como elementos mecánicos. Nos centraremos en un elemento de suma importancia que es el aspa eólica ya que esta es responsable de hacer girar el rotor del aerogenerador [2]. La estructura de estas ha evolucionado en cuanto a su configuración estructural [3] Las aspas eólicas son diseñadas siguiendo la geometría de un perfil aerodinámico de forma que las fuerzas de sustentación y arrastre sean óptimas para que el aspa logre su máxima eficiencia, optimice la extracción de energía del viento y facilite la regulación y control de la turbina eólica [4]. Los perfiles aerodinámicos son geometrías complejas que consta de varios conceptos como como la cuerda, intradós, extradós, ángulo de ataque, curvatura media, curvatura máxima, etc.

Viendo este caso las turbinas eólicas representan una alternativa viable como un recurso renovable no contaminante. Las turbinas eólicas de pequeña potencia son utilizadas en zona urbanas o rurales, siendo este último el que más utiliza este tipo de energía renovable, las zonas rurales en su mayoría son de difícil acceso [5] y algunas de estas presentan condiciones de baja potencia eólica. Por ello nace la necesidad de diseñar

aerogeneradores que puedan trabajar bajo turbulencias altas, bajo número de Reynolds (R_e) y en condiciones de bajo potencial eólico. Los aerogeneradores pequeños o de mínima potencia son aquellos que se encuentran en un intervalo de potencia de 1 – 10kW, estos en su mayoría son utilizados para granjas, viviendas aisladas o bombeo [6]. La norma IEC 61400 – 2 (International Electrochnical Commission) para turbinas de pequeña escala menciona que dicha norma es aplicable para rotores con un área de barrido de $200 m^2$ [7], lo que indica que el radio de la turbina será como máximo de 8m. Estas son algunas formas de designar a un aerogenerador de pequeña potencia o mínima potencia. En el Perú las potencias más comunes de aerogeneradores pequeños que se pueden encontrar son de 1.5kw, 2.5kW, 3Kw y 5Kw esto dependiendo según el fabricante o la necesidad requerida [8].

Algunas investigaciones toman esta premisa de analizar los coeficientes aerodinámicos de distintos perfiles, pero bajo deferentes tipos potencia en aerogeneradores o la comparación de perfiles aerodinámicos diseñados por el hombre con perfiles hallados en las naturales que en este caso serías las alas de las aves e insectos. El estudio sobre el Análisis computacional de la influencia de la geometría en los coeficientes aerodinámicos del perfil aerodinámico CFJ, tiene como objetivo es examinar el impacto del perfil aerodinámico sobre un flujo (CFJ) en el coeficiente aerodinámico mediante análisis numérico, para ello se valieron de la ecuación de gobernabilidad continua y modelo de turbulencia y energía; el modelo de turbulencia es de Splarat Almarás y el análisis computacional es realizado en el software ANSYS. Para ello se proporcionó una condición límite de caudal másico de entrada ($1.5 \times 10^{-1} \text{ kg/s}$), ventilación de salida y campo lejano de presión a la inyección, la ranura de succión y el campo lejano de perfil aerodinámico CFJ. La geometría del perfil aerodinámico CFJ se caracteriza por la ubicación y altura de las ranuras de succión e inyección, el chorro de inyección es el factor más esencial para aumentar el coeficiente aerodinámico del perfil. Los resultados muestran, que la geometría del perfil aerodinámico CFJ, la posición y altura de las cavidades de succión e inyección definen la forma del perfil. La forma del perfil se puede alterar cambiando su ubicación y la altura de la cavidad de succión e inyección [9].

Otro ya se centre en la revisión de los perfiles aerodinámicos apropiados para turbinas eólicas de eje horizontal y de pequeña escala en zonas boscosas, en este se consideró el comportamiento aerodinámico del alabe, se delimita el estudio en turbinas de eje horizontal, esto a que presentan un C_p mayor; se basó en una revisión literario de diversas bases de datos como Scopus y Web of Science, su enfoque es solo para turbinas eólicas de pequeñas escalas, turbulencia, bajo número de Reynolds y condiciones de bajo potencial eólico. Los resultados muestran que los perfiles de uso frecuente son NACA0012, SG6043 y S809. El perfil SH3055 es usado en su mayoría para negocios de aerogeneradores de pequeña escala. El perfil FX63-137 es empleado en aerogeneradores que alcanzan un C_p max de 0.5, el perfil S822 posee un C_l max que no es afecto por el cambio de rugosidad [10]. Otro artículo científico nos presenta los efectos del perfil aerodinámico de una gaviota en el rendimiento aerodinámico de una pequeña turbina eólica, el objetivo es evaluar los efectos de un perfil aerodinámico de gaviota en el rendimiento aerodinámico de la turbina eólica Fase VI del Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL). Para ello se remplazo el perfil S809 con el perfil escaneado con láser del perfil de gaviota, el comportamiento aerodinámico es clave para la pala de turbina NREL, se simula numéricamente en un entorno tridimensional utilizando la dinámica de fluidos computacional (CFD) de ANSYS Fluent. Para ello se analiza el perfil mediante un análisis CFD tridimensional de alta resolución teniendo en cuenta las condiciones dinámicas del modelo de referencia, este proporcionara una predicción numérica confiable y precisa, para garantizar los resultados CFD del modelo se valida con los datos experimentales de fase, las características del aerogenerador NREL fase VI es dos palas de eje horizontal con un diámetro del rotor 10.058 m y una altura de buje de 12.192 m, perfil aerodinámico S809 compuesto de 26 secciones con varios ángulos de torsión. Los resultados mostraron que la simplicidad de la configuración de la prueba y las condiciones de la secuencia S del experimento han ayudado a lograr correctos resultados al evitar errores en el modelo. En el análisis del perfil fue inesperado ya que el modelo de la turbina implementado con el perfil aerodinámico de gaviota superó radicalmente el modelo de referencia a pesar de

que no estaba optimizado para la operación de la turbina eólica NREL Fase VI. Los resultados numéricos tanto del modelo inicial como del modelo modificado se compararon a cinco velocidades de entrada distintas bajo exactamente la misma configuración y condiciones de la secuencia de prueba y se validaron con los datos experimentales [11]. Otra investigación presenta un Estudio del modelo de turbulencias para el análisis aerodinámico del ala con protuberancias en el borde de ataque para flujos con bajo número de Reynolds. El objetivo del estudio es analizar el flujo alrededor del ala con protuberancia. En la metodología se analizaron cinco modelos de turbulencia para evaluar los coeficientes de fuerzas aerodinámicas y el mecanismo de flujo comparándolos con los resultados de la literatura existente. Los resultados mostraron que las fuerzas aerodinámicas, como la sustentación, la resistencia y el momento de cabeceo, se producen como resultado de la distribución de la presión y el esfuerzo cortante sobre la forma en planta del ala [12]. Ya algunas investigaciones observan las deformaciones del aspa con respecto a un perfil aerodinámico, se puede observar el rendimiento aerodinámico dinámico del perfil aerodinámico de una turbina eólica bajo una gran deformación de las palas, esta investigación observa la reflexión y deformación del diseño de las palas en movimiento. La simulación adopta un modelo bidimensional para simular la condición de flujo del perfil aerodinámico. Como el flujo turbulento se ve afectado principalmente por la superficie de la pared, existe un gradiente de velocidad alrededor de la superficie de la pared antideslizante. Los resultados mostraron que el movimiento horizontal causando por la desviación del eje de cabeceo desde el centro del perfil aerodinámico puede cambiar significativamente las características de pérdida del perfil aerodinámico [13].

No obstante, en la gran cantidad de estudios relacionados con el análisis de perfiles aerodinámicos, no se observa estudios especializados en diseñar, analizar y buscar perfiles aerodinámicos para aerogeneradores de pequeña potencia, ya que estos estudios en su mayoría están centrados para aerogeneradores de grandes dimensiones un ejemplo es el estudio sobre las cargas ejercidas en un aspa, por utilizar un determinado perfil aerodinámico, esto bajo un análisis estructural estático.

Por último, la Investigación se justifica ya que la mayoría de los aerogeneradores fabricados presentan perfiles aerodinámicos pensados solo para ser utilizados en el campo de la aeronáutica [4] como por ejemplo la serie NACA con su perfil NACA 0012, este viene siendo unos de los perfiles aerodinámicos más mencionados en la literatura científica ya que presenta un coeficiente de sustentación (C_l) alto a Reynolds (Re) elevados, pero se reduce significativamente cuando baja el número de Reynolds (Re), lo que ocasionaría una ineficiencia si se pretende diseñar un aerogenerador de pequeña potencia con este perfil aerodinámico. Por tal razón la investigación aporta y tiene como objetivo evaluar las características de los diferentes perfiles aerodinámicos analizados, esto con el fin que se puedan usar para diseñar aerogeneradores de pequeña potencia funcionales que puedan trabajar en turbulencias elevadas, bajos números de Reynolds (Re) y en condiciones de baja potencia eólica.

Trabajos previos:

Vigneswaram, C; Vishnu, Kumar [9], se presenta un Análisis computacional de la influencia de la geometría en los coeficientes aerodinámicos del perfil aerodinámico CFJ, su objetivo es examinar el impacto del perfil aerodinámico sobre un flujo (CFJ) en el coeficiente aerodinámico mediante análisis numérico.

La metodología de análisis es bajo la ecuación de gobernabilidad y modelo de turbulencia; se utiliza la ecuación de gobernabilidad continua, momento y energía; el modelo de turbulencia es de Splarat Almarás y el análisis computacional es realizado en el software ANSYS. Para ello se proporcionó una condición límite de caudal másico de entrada (1.5×10^{-1} kg/s), ventilación de salida y campo lejano de presión a la inyección, la ranura de succión y el campo lejano de perfil aerodinámico CFJ. La geometría del perfil aerodinámico CFJ se caracteriza por la ubicación y altura de las ranuras de succión e inyección, el chorro de inyección es el factor más esencial para aumentar el coeficiente aerodinámico del perfil. El análisis de perfil aerodinámico está segmentado en un número finito de secciones, estando

las ranuras de succión e inyecciones divididas adecuadamente para capturar el contorno de velocidad y presión en regiones.

Los resultados muestran, que la geometría del perfil aerodinámico CFJ, la posición y altura de las cavidades de succión e inyección definen la forma del perfil. La forma del perfil se puede alterar cambiando su ubicación y la altura de la cavidad de succión e inyección.

Richmon, N. et al [10], presenta una revisión de los perfiles aerodinámicos apropiados para turbinas eólicas de eje horizontal y de pequeña escala en zonas boscosas, considerando el comportamiento aerodinámico del alabe, se delimita el estudio en turbinas de eje horizontal, esto a que presentan un C_p mayor.

El método de análisis se basa en la revisión literaria de diversas bases de datos como Scopus y Web of Science, su enfoque es solo para turbinas eólicas de pequeñas escalas, turbulencia, bajo número de Reynolds y condiciones de bajo potencial eólico. El tema es principalmente tratado en revistas de Energías, la selección de las investigaciones es a periodos de los últimos 20 años.

Los resultados muestran que los perfiles de uso frecuente son NACA0012, SG6043 y S809. El perfil SH3055 es usado en su mayoría para negocios de aerogeneradores de pequeña escala. El perfil FX63-137 es empleado en aerogeneradores que alcanzan un C_p max de 0.5, el perfil S822 posee un C_l max que no es afecto por el cambio de rugosidad.

Sesalim, Dean; Naser, Jamal [11], nos presenta los efectos del perfil aerodinámico de una gaviota en el rendimiento aerodinámico de una pequeña turbina eólica, el objetivo es evaluar los efectos de un perfil aerodinámico de gaviota en el rendimiento aerodinámico de la turbina eólica Fase VI del Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL). Se remplazo el perfil S809 con el perfil escaneado con laser del perfil de gaviota, el comportamiento aerodinámico es clave para la pala de turbina NREL, se simula numéricamente en un entorno tridimensional utilizando la dinámica de fluidos computacional (CFD) de ANSYS Fluent.

La metodología de análisis es mediante un análisis CFD tridimensional de alta resolución teniendo en cuenta las condiciones dinámicas del modelo de referencia, este proporcionara una predicción numérica confiable y precisa, para garantizar los resultados CFD del modelo se valida con los datos experimentales de fase, las características del aerogenerador NREL fase VI es dos palas de eje horizontal con un diámetro del rotor 10.058 m y una altura de buje de 12.192 m, perfil aerodinámico S809 compuesto de 26 secciones con varios ángulos de torsión. La secuencia S del experimento consistió en condiciones menos complejas con configuraciones rígidas contra el viento y sin fijación en la punta de la pala, las palas no se balanceo y los ángulos de inclinación se mantuvieron en 0°. El ángulo de paso de la punta a la pala es de 3° simplificando más la configuración, la velocidad de entrada es de 5, 10, 15, 20 y 25 m/s uniformemente a una velocidad de rotación constante de 72 RPM. Estas condiciones se asemejan a condiciones de flujo estacionario.

Los resultados mostraron que la simplicidad de la configuración de la prueba y las condiciones de la secuencia S del experimento han ayudado a lograr correctos resultados al evitar errores en el modelo. En el análisis del perfil fue inesperado ya que el modelo de la turbina implementado con el perfil aerodinámico de gaviota superó radicalmente el modelo de referencia a pesar de qye no estaba optimizado para la operación de la turbina eólica NREL Fase VI. Los resultados numéricos tanto del modelo inicial como del modelo modificado se compararon a cinco velocidades de entrada distintas bajo exactamente la misma configuración y condiciones de la secuencia de prueba y se validaron con los datos experimentales. Se logró un aumento en la salida de par de hasta 823 Nm a una velocidad de entrada de 20 m/s empleando únicamente el perfil aerodinámico de gaviota en las palas de la turbina de referencia. También se lograron aumentos considerables en la salida de par de 350, 539 y 577 Nm a velocidades de entrada de 10, 15 y 25 m/s, respectivamente

Intizar, Ali et al [12], se nos presenta un Estudio del modelo de turbulencias para el análisis aerodinámico del ala con protuberancias en el borde de ataque para flujos con bajo

número de Reynolds. El objetivo del estudio es analizar el flujo alrededor del ala con protuberancia.

En la metodología se analizaron cinco modelos de turbulencia para evaluar los coeficientes de fuerzas aerodinámicas y el mecanismo de flujo comparándolos con los resultados de la literatura existente. Los modelos seleccionados son realizables $k - \epsilon$, $k - \omega$ shear stress transport (SST), $(\gamma - Re\theta)$ modelo SST, modelo de transición $n k - kl - \omega$ y Stress - ω Reynolds stress model (RSM). Para ellos se desarrollo el modelo de alta TLE utilizando el perfil aerodinámico Naca 0021. El modelo del ala está diseñado con una longitud de onda de la protuberancia de $0.11c$ y una amplitud de $0.03c$. La simulación numérica se realizó con un número de Reynolds basado en cuerdas de $Rec = 120\ 000$.

Los resultados mostraron que las fuerzas aerodinámicas, como la sustentación, la resistencia y el momento de cabeceo, se producen como resultado de la distribución de la presión y el esfuerzo cortante sobre la forma en planta del ala. El modelo predijo el coeficiente de elevación más cercano al de los valores experimentales, seguido del modelo SST $k - \epsilon$, $(\gamma - Re\theta)$, el modelo SST $k - \omega$ y el modelo $k - kl - \omega$ realizables. Sin embargo, en el ángulo de ataque más alto (es decir, 16° y 20°), el coeficiente de sustentación del modelo $k - \omega$ SST es más cercano al de los valores experimentales.

Tiantian, Zhao; Haitao, Sun. [13], se presenta una Investigación sobre el rendimiento aerodinámico dinámico del perfil aerodinámico de una turbina eólica bajo una gran deformación de las palas, esta investigación observa la reflexión y deformación del diseño de las palas en movimiento.

En la metodología se utiliza el método CFD (Dinámica de fluidos computacional) para calcular las características aerodinámicas del perfil según requerimientos del tiempo. La simulación adopta un modelo bidimensional para simular la condición de flujo del perfil aerodinámico. Como el flujo turbulento se ve afectado principalmente por la superficie de la pared, existe un gradiente de velocidad alrededor de la superficie de la pared antideslizante.

Por lo tanto, es necesario considerar el efecto de la viscosidad de la superficie de la pared y resolver el problema de las variables que cambian rápidamente en la capa límite en la simulación numérica.

Los resultados mostraron que el movimiento horizontal causando por la desviación del eje de cabeceo desde el centro del perfil aerodinámico puede cambiar significativamente las características de pérdida del perfil aerodinámico. Con base en esto, se estudia los cambios en la carga de fatiga causados por cambios en las características dinámicas de perdidas en condiciones típicas de operación.

1.2. Formulación del Problema:

- . Que perfil aerodinámico será el adecuado para su uso en turbina eólicas de pequeñas potencias.

1.3. Hipótesis:

- . A través del análisis computacional podemos obtener un perfil aerodinámico óptimo para un aerogenerador de pequeña potencia.

1.4. Objetivos:

- Objetivo General:

- . Evaluar las características aerodinámico de los diferentes perfiles aerodinámicos analizados.

- Objetivos Específicos:

- . Revisión bibliográfica de los perfiles aerodinámicos más utilizados turbinas eólicas de pequeña potencia.
- . Selección de los perfiles aerodinámicos a analizar para nuestra investigación según recomendaciones de cada autor de los artículos científicos consultados.

. Recopilación de los archivos data (coordenadas) de los perfiles aerodinámicos de la página Airfoil Tools (<http://www.airfoiltools.com/>).

. Análisis de los perfiles aerodinámicos seleccionados utilizando el software Qblade para obtener sus coeficientes aerodinámicos.

. Comparación de los resultados obtenidos de cada perfil aerodinámico para seleccionar el más óptimo.

1.5. Teorías Relacionadas al Tema:

1.5.1. Aerodinámica de los Aerogeneradores:

Si un cuerpo está situado en el seno de un fluido en movimiento este experimentará dos fuerzas: una denominada fuerza de arrastre o resistencia drag (F_D) que es la fuerza que actúa en dirección del movimiento relativo del fluido respecto al objeto, la fuerza de sustentación o de empuje lift (F_L) que es la fuerza que actúa en dirección perpendicular a la fuerza drag. La fuerza total F es la suma vectorial de ambas componentes [4].

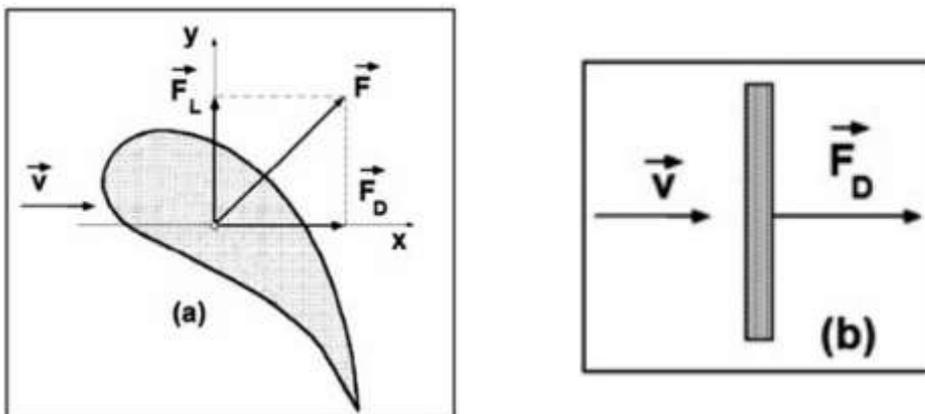


Fig 1: a) Fuerzas causadas por un fluido en movimiento sobre un perfil aerodinámico. b) Fuerzas causadas por un fluido en movimiento sobre una placa no aerodinámica [4].

La F_D tiene más importancia que la F_L en cuerpos geométricos no aerodinámicos, como por ejemplo una placa plana, mientras que la fuerza F_L tiene muchas más importancias sobre perfiles aerodinámicos. C_L y C_D son coeficientes de sustentación y de arrastre, estos dependen de la geometría del cuerpo, dirección de la velocidad relativa del fluido, ángulo de ataque respecto a la velocidad relativa del fluido, número de Reynol [4].

Los módulos de la fuerza de sustentación y arrastre son:

$$F_L = C_l \frac{\rho v^2}{2} A \quad (1)$$

$$F_D = C_d \frac{\rho v^2}{2} A \quad (2)$$

Donde C_d coeficiente de arrastre, ρ densidad del viento $\frac{kg}{m^3}$, A área característica del cuerpo, v velocidad del fluido [4].

1.5.2. Aspas de Turbinas Eólicas:

El elemento base de un aerogenerador es el rotor, está conformado por una o varias hélices o aspas, cada aspa tiene un perfil aerodinámico, este perfil tiene un extremo romo que es el borde de ataque, mientras que el otro extremo con forma afilada es el borde de salida. Los perfiles son denominados según su geometría y pueden ser: Biconvexos si el intradós y extrado son convexos, plano convexo si el extrado es convexo y el intradós plano y doble curvatura si el intradós y extradós son cóncavos [14].

1.5.3 Perfiles Aerodinámicos de Aspas Eólicas:

Las aspas o álabes son diseñados siguiendo perfiles aerodinámicos, de forma que la sustentación y arrastre sean los adecuados, esto ayudará a la extracción de energía de viento y facilitará la regulación y control de la turbina eólica [4].

Terminologías Empleadas en Aspas Eólicas:

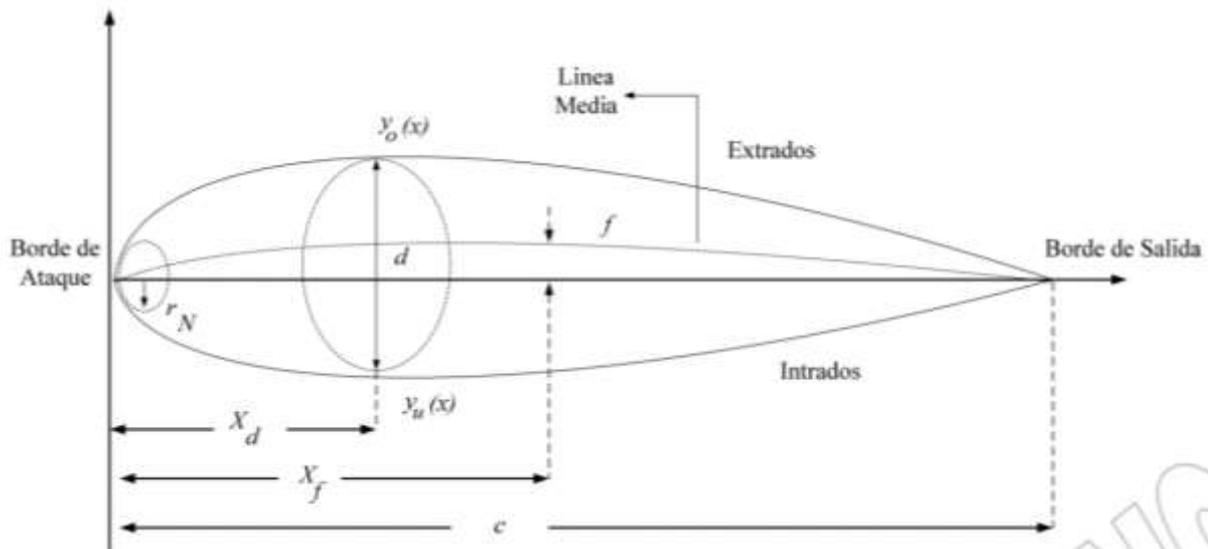


Fig 2: Nomenclatura básica usada en perfiles aerodinámicos [14].

Los perfiles aerodinámicos presentan una serie de conceptos [15].

- . Cuerda (c), es la línea recta que une al borde de ataque y al borde de salida (borde de fuga) del perfil aerodinámico. Las dimensiones de los perfiles se miden en cuerdas.
- . Línea de curvatura media, viene siendo la línea media entre el extrado e intradós.
- . Curvatura máxima, viene siendo la distancia máxima que hay entre la línea de curva media y la línea de cuerda.
- . Posición de la curvatura máxima X_f , con este factor se determina las características aerodinámicas del perfil.
- . Máximo espesor X_d , viene siendo la distancia máxima entre la superficie superior e inferior (extradós e intradós).
- . Borde de ataque: Parte delantera del perfil, esta puede variar desde cero (supersónicos afilados), hasta 2 por 100 (por cuerda), para perfiles achatados.

- . Borde de salida: Zona trasera del perfil también llamado borde de fuga.
- . Extradós: Zona superior del perfil en la que la comba es más pronunciada, aquí se genera la baja presión.
- . Intradós: Zona inferior del perfil en la que la comba es menor pronunciada, aquí se genera la alta presión.
- . Radio del borde de ataque r_N afilamiento de borde de ataque.
- . Coordenadas $y_0(x)$ y $y_u(x)$, indica coordenadas de los extradós e intradós.
- . Angulo de ataque (α), es el ángulo que forma la velocidad relativa del fluido respecto al cuerpo, se forma entre la cuerda del perfil aerodinámico y la dirección del viento.

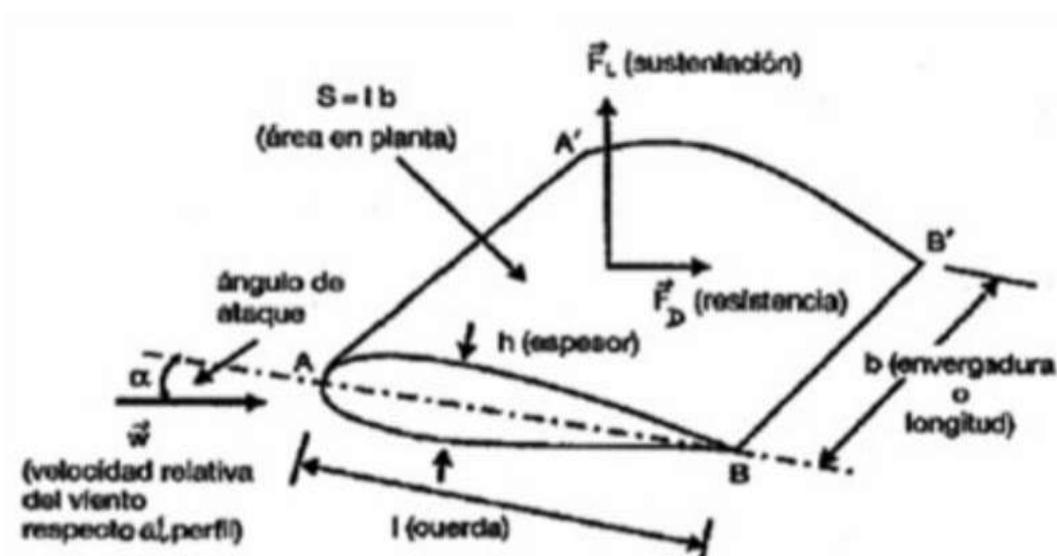


Fig 3: Perfiles aerodinámicos de un asa [4].

Variables Geométricas del Perfil Aerodinámico:

La geometría del perfil aerodinámicos viene definida por [4].

- . Configuración de la línea de curvatura media. El perfil es considerado simétrico si la línea de curvatura media coincide con la c.
- . Localización del espesor máximo y espesor mínimo.

. Curvatura o radio del borde de ataque.

Clasificación de los Perfiles Aerodinámicos:

Estos son definidos según el espesor / cuerda $\left(\frac{e}{c}\right)$ [4].

. Perfiles delgados: si el $\left(\frac{e}{c}\right) < 0.06$

. Perfiles semi - grueso: $0.06 < \left(\frac{e}{c}\right) < 0.12$

. Perfiles gruesos: $\left(\frac{e}{c}\right) > 0.12$

Número de Reynolds:

Al crecer el número de Reynolds (R_e), las fuerzas viscosas tienen una menor importancia, esto hace que mejorar el comportamiento del perfil, aumentando el cociente de $\frac{C_l}{C_d}$, C_{Lmin} , C_{Dmin} , la mejora se comporta asintóticamente. El R_e en perfiles aerodinámicos para palas de turbinas eólicas es relativamente bajo por lo que hay que tener en consideración su influencia para los análisis. Para perfiles planos (fijos) con una longitud determinada L paralelos a la velocidad v del viento, el valor del R_e es [16].

$$R_e = \frac{vL}{u} \quad (3)$$

Donde v es la velocidad características del fluido (m/s), L longitud del perfil con respecto al plano y u es la viscosidad cinemática del fluido $\left(\frac{m^2}{s}\right)$.

El coeficiente de resistencia (C_w) viene dado por los coeficientes [16].

$$\text{Régimen laminar: } C_w = \frac{1.328}{\sqrt{Re}} , R_e < 10^5 \quad (4)$$

$$\text{Régimen turbulento : } \begin{cases} C_w = \frac{0.074}{Re^{1/5}} ; 10^5 < R_e < 10^7 \\ C_w = \frac{0.455}{(\log Re)^{-2.58}} ; R_e > 10^7 \end{cases} \quad (5)(6)$$

II. Método de Investigación:

El tipo y diseño de investigación para el presente proyecto de “Análisis de Perfiles Aerodinámicos para Turbinas Eólicas de pequeña Potencia” esta investigación es del tipo Aplica / Tecnológica.

La investigación es de tipo aplicada, ya que para ellos haremos uso de conocimientos ya probados y adquiridos, para a su vez obtener un nuevo conocimiento, esto se refleja en la búsqueda de información respecto al tema de investigación, como por ejemplo las características aerodinámicas que influyen en cada perfil aerodinámico y su influencia geométrica. Este método se enfoca en lograr un objetivo específico y ponerlos en práctica, en el caso de nuestra investigación el objetivo vendría siendo el_Evaluar el rendimiento aerodinámico de los diferentes perfiles utilizados para aerogeneradores de pequeña potencia, en palabras prácticas evaluación de perfiles aerodinámicos. El sistema del tipo de investigación, es aplicada, ya que está basado en la investigación literaria, por el cual tendremos como base de nuestro proyecto a los artículos e investigaciones científicas.

El tipo de diseño de la investigación es cuasi experimental ya que no contamos con un grupo de control riguroso de las variables, ya que los diseños cuasi experimentales no se hablan de grupos de control si no de grupos de comparación, en nuestro caso la investigación tiene como uno de sus objetivos Evaluar el rendimiento aerodinámico de los diferentes perfiles utilizado en aerogeneradores de pequeña potencia, para ello realizaremos una revisión literaria de los diversos perfiles aerodinámicos utilizados en aerogeneradores de pequeña potencia y al final compararemos los resultados de cada perfil eligiendo el más optimo. En otra instancia la investigación tendrá su validación en el análisis computacional ya que se hará uso del software Qblade.

III. Resultados:

3.1. Revisión bibliográfica:

Se ofrece gran variedad de perfiles aerodinámicos adecuados para el uso de turbinas eólicas de mínima o pequeña potencia, algunos son mencionados con frecuencia en las investigaciones científicas, siempre teniendo como punto referencia que estos puedan trabajar en turbulencias altas, bajo número de Reynolds y en condiciones de bajo potencias eólico.

Tabla 1: *Perfiles aerodinámicos para turbinas eólicas de pequeñas potencias, búsqueda literaria.*

Perfil aerodinámico	Investigaciones donde se menciona los perfiles aerodinámicos para aerogeneradores de pequeña potencia.
S809	Sesalim et al.; Montenegro et al. [17]; Richmond et al [18]
S822	Benin et al. [19]; Sesalim et al. [20]
E231	Baker et al. [21]
SD2030	Baker et al. [21]
NACA2412	Devashish et al. [22]
NACA 0012	Montenegro et al. [17]; Richmond et al [18]
SG6043	Montenegro et al. [17]; Richmond et al [18]

3.2. Selección de los perfiles aerodinámicos a analizar:

En la *tabla 1* se aprecia algunos perfiles utilizados para aerogeneradores de mínima o pequeña potencia. Los perfiles seleccionados para nuestro análisis son: NACA0012, SG6043, S809, E231. Esto fueron seleccionado bajo las siguientes premisas:

. **NACA 0012:** Es uno de los perfiles más estudiados y populares en el campo de la aerodinámica [10] su uso se da en aerogeneradores de eje horizontal como de eje vertical; su C_l es elevado, pero disminuye al reducirse el número de Re lo que a su vez hace que el

arrastre aumenta, su relación de $\frac{C_l}{C_d}$ es moderada, pero cae abruptamente en Re bajos [17] [10].

. **SG6043:** Perfil aerodinámico usado en aspas de turbinas eólicas de eje horizontal y vertical. Su $\frac{C_l}{C_d}$ máximo de este perfil dependerá del número de Re y presenta valores moderados en caso de turbinas eólicas de pequeña escala [17] [10]. Perfil diseñado para ser usado a lo largo de toda el aspa de una turbina [10].

. **S809:** Perfil aerodinámico diseñado para operar en bajas velocidades de viento, presenta un C_l alto a un C_d con cambios superficiales en su rugosidad, desarrollado para aerogeneradores eólicos controlados por pérdida [20] [10]. Perfil ampliamente utilizado para la validación de códigos computacionales referidos al área de la aerodinámicos [10].

. **E231:** Perfil aerodinámico diseñado para planeadores, tiene una relación de espesor – cuerda del 12%, adecuado para un número de Re bajo, es principalmente usado en aerogeneradores eólicos de baja potencia de viento [21]. Presenta un $\frac{C_l}{C_d}$ alto, pero se ve reducido a bajos Re . Este perfil es utilizado en combinación de otros lo que ayuda a mejorar la eficiencia del aspa.

Se presenta una búsqueda literaria de perfiles aerodinámicos utilizados para aerogeneradores de pequeñas potencias. El interés de analizar estos perfiles nace ya que presentan un $\left(\frac{C_L}{C_D}\right)$ y C elevado, su CL no es sensible a cambio por rugosidad, pueden trabajar con un Reynolds elevado y bajo ($Re = 10^5 - 5 \times 10^5$), trabar con velocidades de viento bajos aproximado a 5m/s, algunos de estos perfiles están diseñados para poseer una alta robustez ante el cambio de rigidez y diseñados por regulación por pérdida (*Stall*).

3. Archivos data:

Se obtendrá datos (coordenadas) de cada perfil seleccionado para nuestro análisis para ellos se hará uso de la base de datos de perfiles aerodinámicos <http://www.airfoiltools.com/>, los perfiles son NACA0012, SG6043, S809, E231.

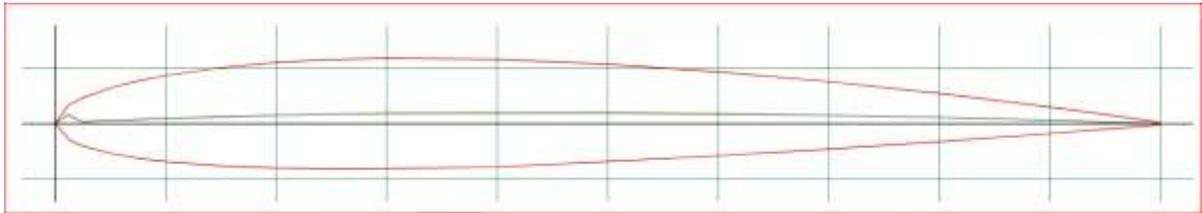


Fig 4. Perfil NACA 0012. *airfoiltools.com*

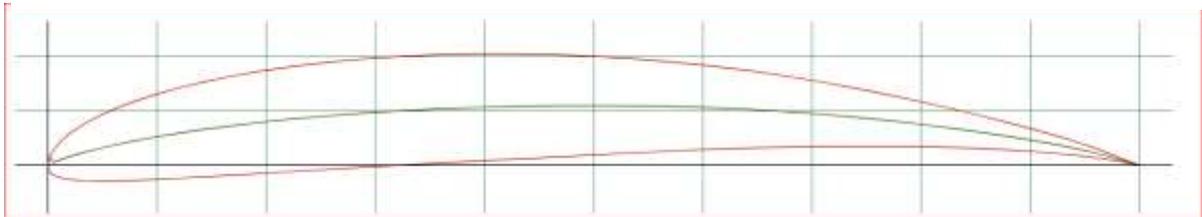


Fig 5. Perfil SG6043. *airfoiltools.com*

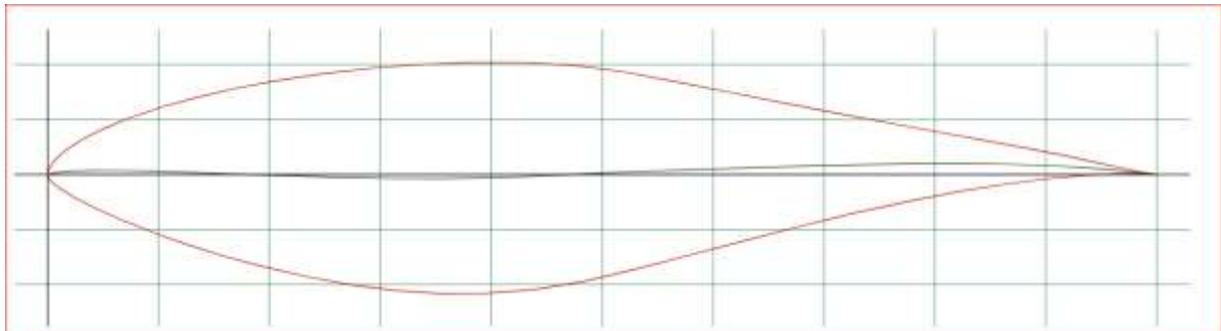


Fig 6. Perfil S809. *airfoiltools.com*

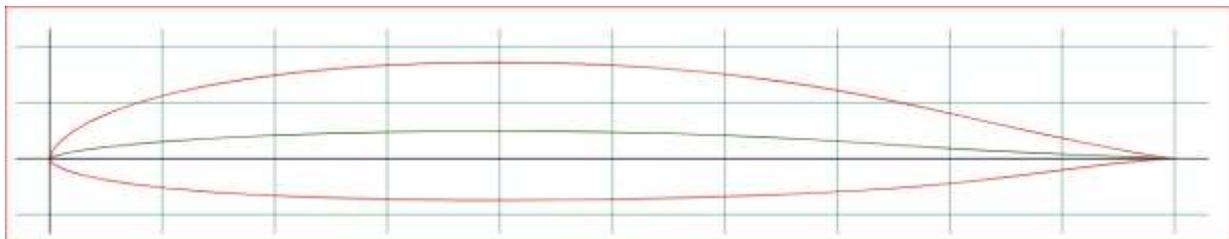


Fig 7. Perfil E231. *airfoiltools.com*

3.4. Análisis de los Perfiles Aerodinámicos:

Se determinará los coeficientes aerodinámicos de cada perfil, para identificar el coeficiente de sustentación (C_l), coeficiente de arrastre (C_d), ángulo de ataque (α) y el cociente de $\frac{C_l}{C_d}$, estos serán evaluados a distintos números de Reynolds (R_e) que van de 100 000 – 500 000 con un incremento de 50 000 R_e .

a) Perfil NACA 0012:

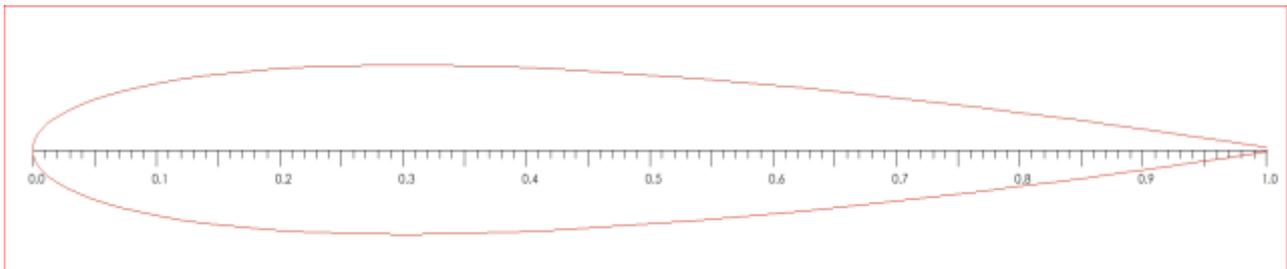


Fig 8: Geometría del perfil NACA 0012. Software Qblade.

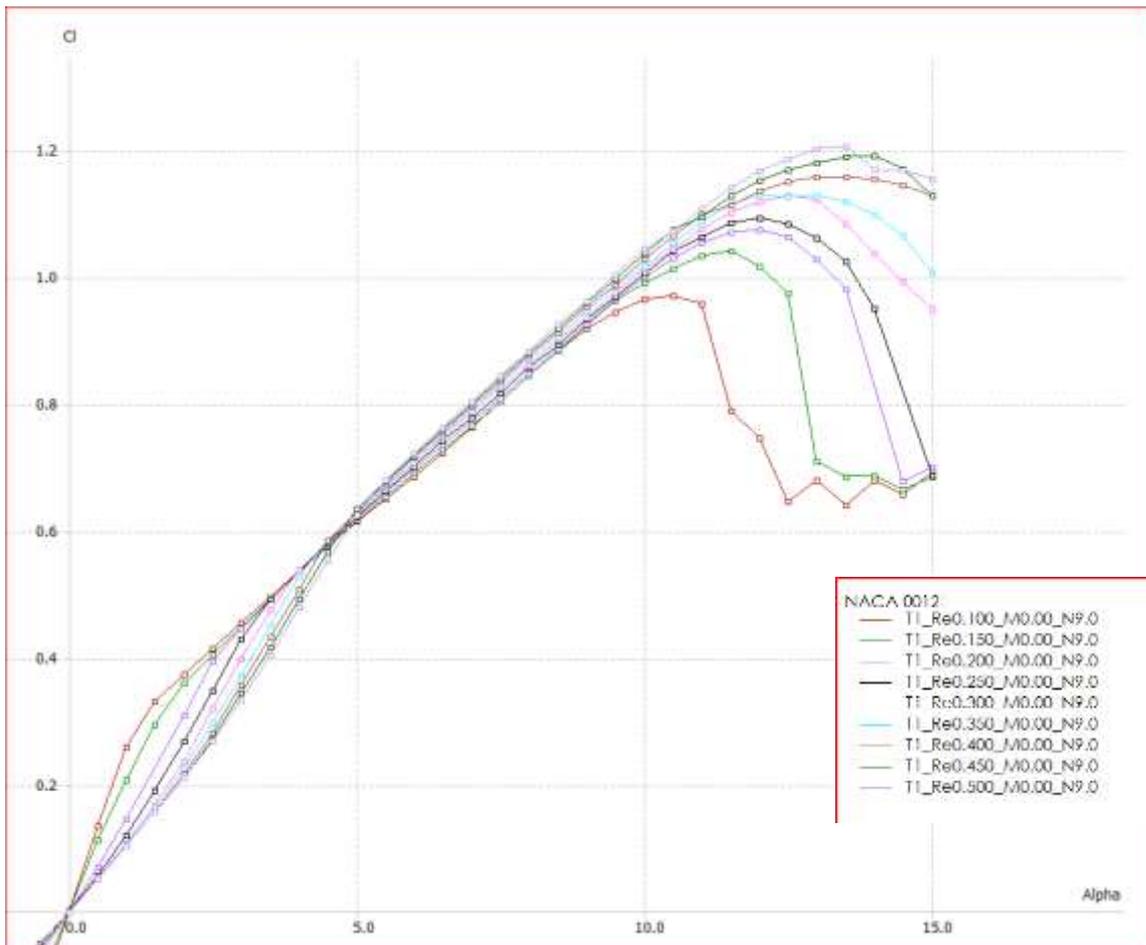


Fig 9: C_l vs α del perfil NACA 0012. Software Qblade.

. Se obtuvo a un $Re = 5 \times 10^5$ un $C_l = 1.25$ a un ángulo de $\alpha = 13$, en un $Re = 10^5$ un $C_l = 0.96$ a un ángulo de $\alpha = 10$. Se aprecia que el perfil entra en pérdida de sustentación cuando se reduce el número de Reynolds lo que implicaría un aumento en el arrastre.

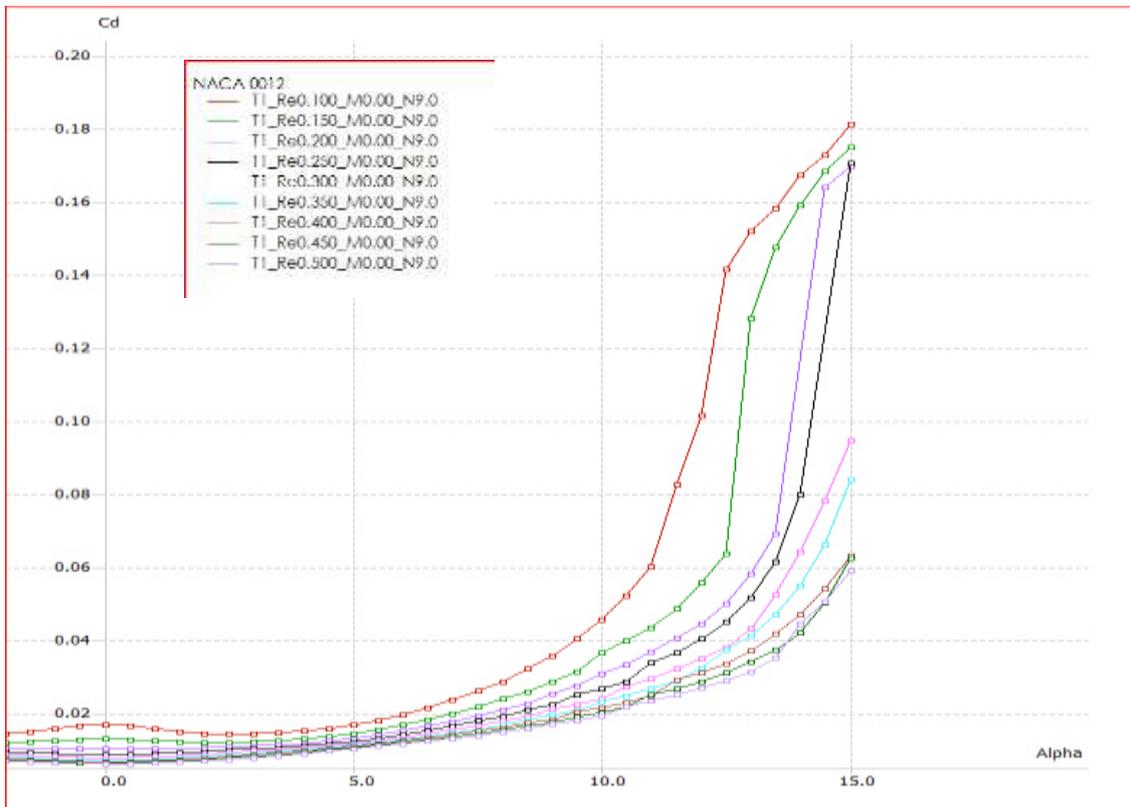


Fig 10: C_d vs α del perfil NACA 0012. Software Qblade.

. Se obtuvo a un $Re = 5 \times 10^5$ un $C_d = 0.058$ a un ángulo de $\alpha = 15$, en un $Re = 10^5$ un $C_d = 0.18$ a un ángulo de $\alpha = 14.5$. Se aprecia en la imagen un elevado incremento en el arrastre y una disminución en el ángulo de ataque cuando se reduce el número de Reynolds.

Este dato afecta de manera desfavorable en la relación $\frac{C_l}{C_d}$.

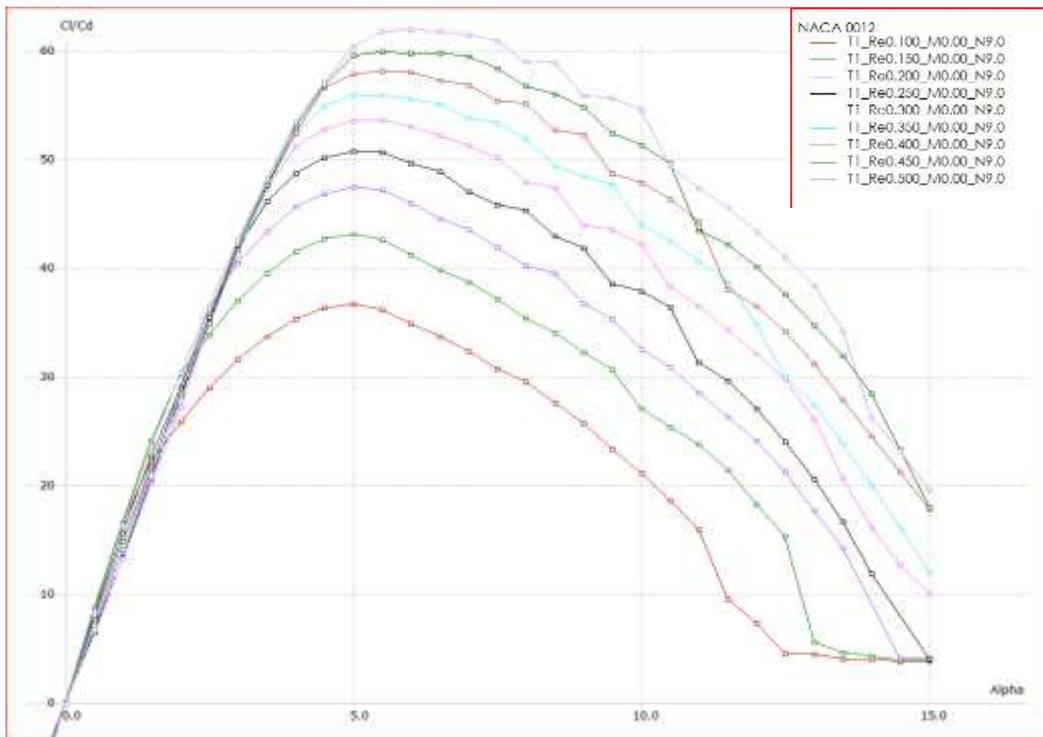


Fig 11: $\frac{C_L}{C_D}$ vs α del perfil

NACA 0012. Software Qblade.

. Se obtuvo a un $Re = 5 \times 10^5$ un $\frac{C_L}{C_D} = 61.5$ a un ángulo de $\alpha = 6$, en un $Re = 10^5$ un $\frac{C_L}{C_D} = 36.5$ a un ángulo de $\alpha = 5$. En esta gráfica podemos obtener el ángulo de ataque óptimo, ya que el cociente $\frac{C_L}{C_D}$ nos representa la máxima sustentación en un mínimo arrastre. Se observa que este valor disminuye a menor número de Reynolds lo que implica que habrá menos sustentación y más arrastre en el perfil aerodinámico, lo que causaría una ineficiencia en el aspa.

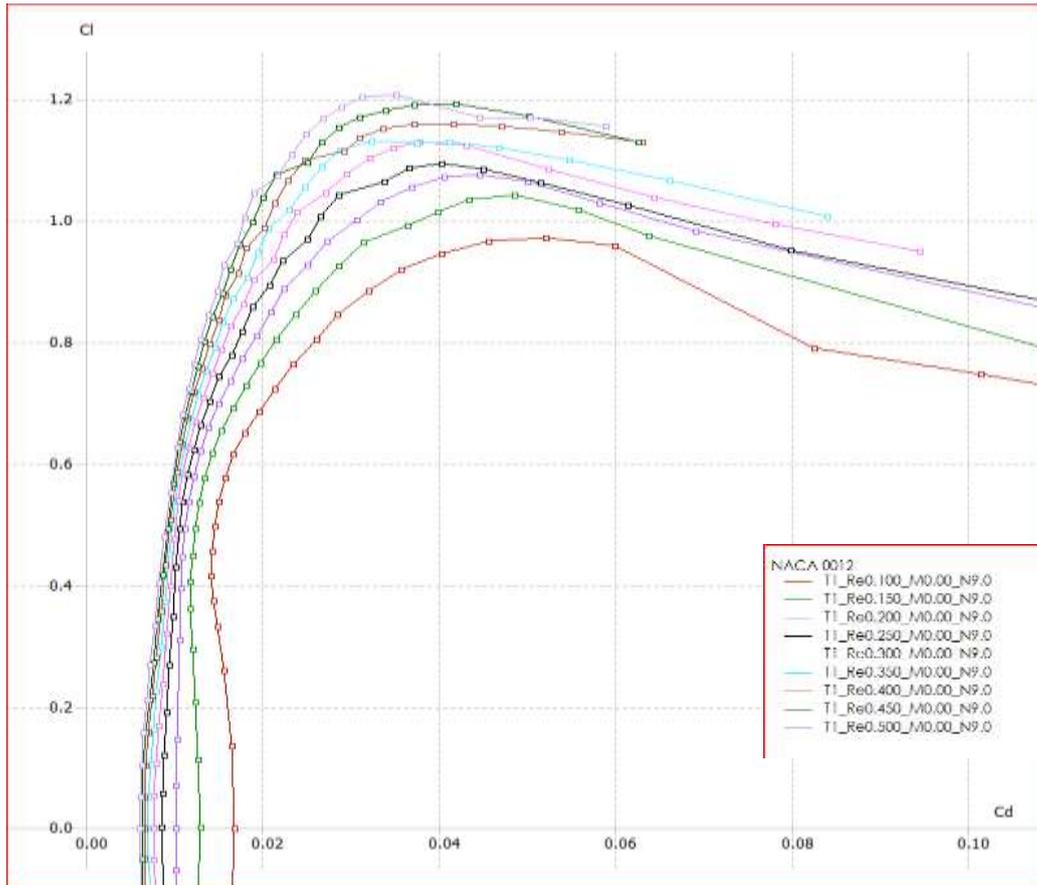


Fig 12: C_l vs C_d del perfil NACA 0012. Software Qblade

. Se obtuvo a un $Re = 5 \times 10^5$ un C_l vs $C_d = (1.2, 0.058)$; en un $Re = 10^5$ un C_l vs $C_d = (0.97, 0.18)$.

Perfil SG6043:

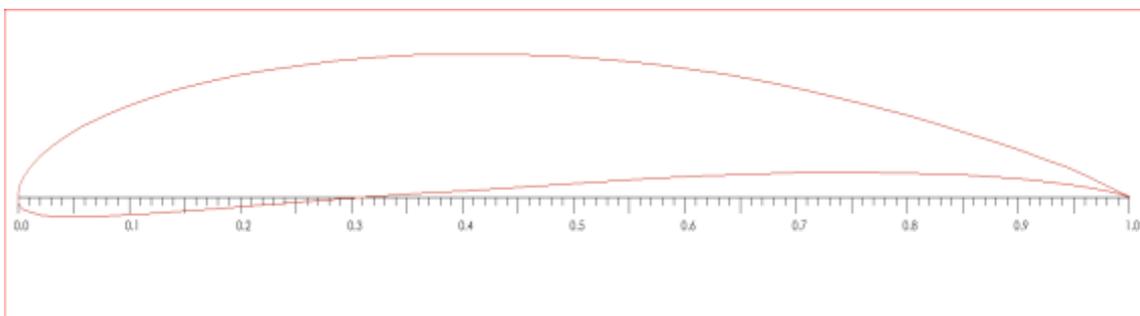


Fig 13: Geometría del perfil SG6043. Software Qblade.

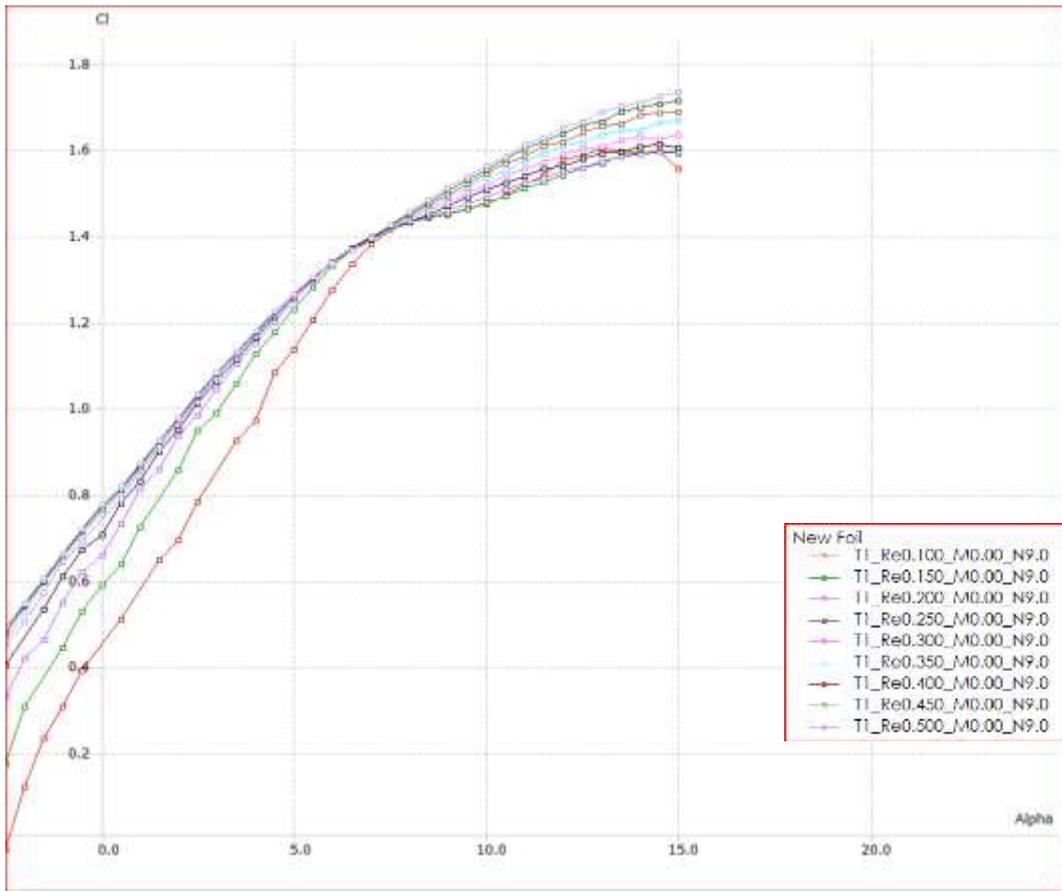


Fig 14: C_l vs α del perfil SG6043. Software Qblade.

. Se obtuvo a un $Re = 5 \times 10^5$ un $C_l = 1.72$ a un ángulo de $\alpha = 14$, en un $Re = 10^5$ un $C_l = 1.64$ a un ángulo de $\alpha = 13$. Se aprecia en la imagen que el perfil presenta valores de sustentación altos y no presentan gran pérdida cuando disminuye los valores de Reynolds, se concluye que el perfil no entrara en pérdidas de sustentación.

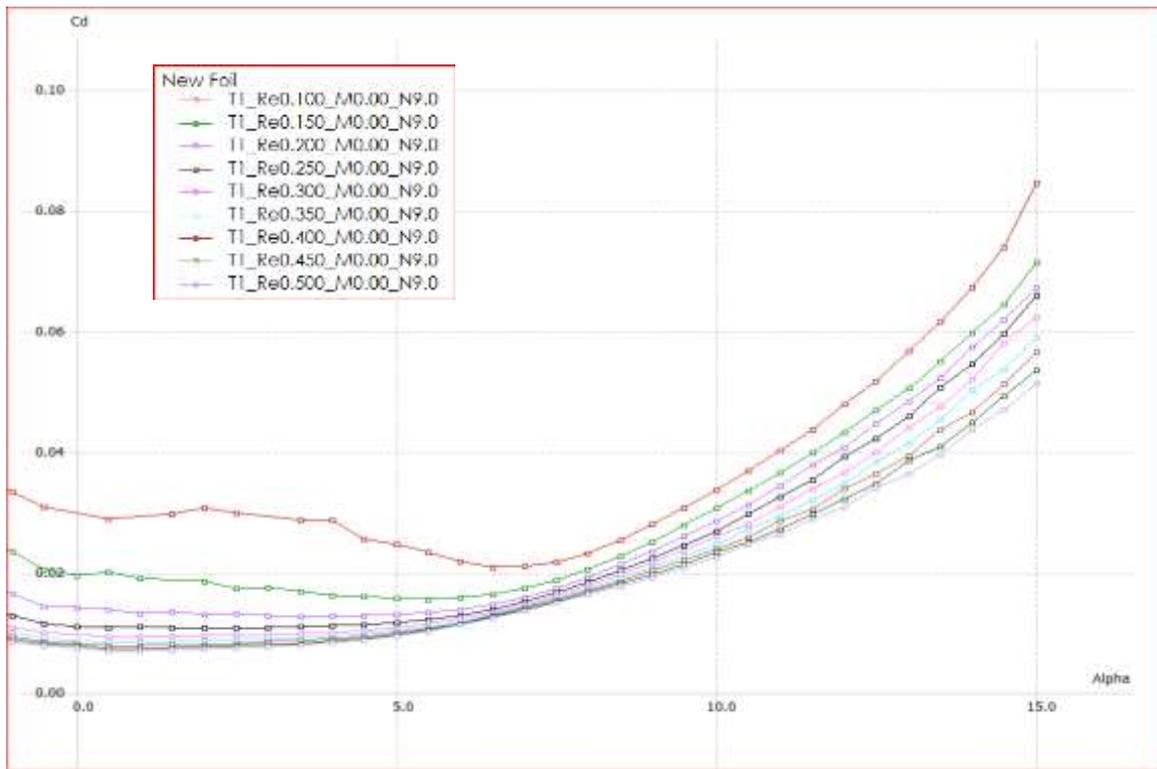


Fig 15: C_d vs α del perfil SG6043. Software Qblade.

. Se obtuvo a un $Re = 5 \times 10^5$ un $C_d = 0.05$ a un ángulo de $\alpha = 15$, en un $Re = 10^5$ un $C_d = 0.08$ a un ángulo de $\alpha = 15$. Se aprecia en la imagen un leve incremento en el arrastre, pero se mantiene el ángulo de ataque cuando se disminuye el número de Reynolds. Este dato afecta de manera favorable a la relación $\frac{C_l}{C_d}$.

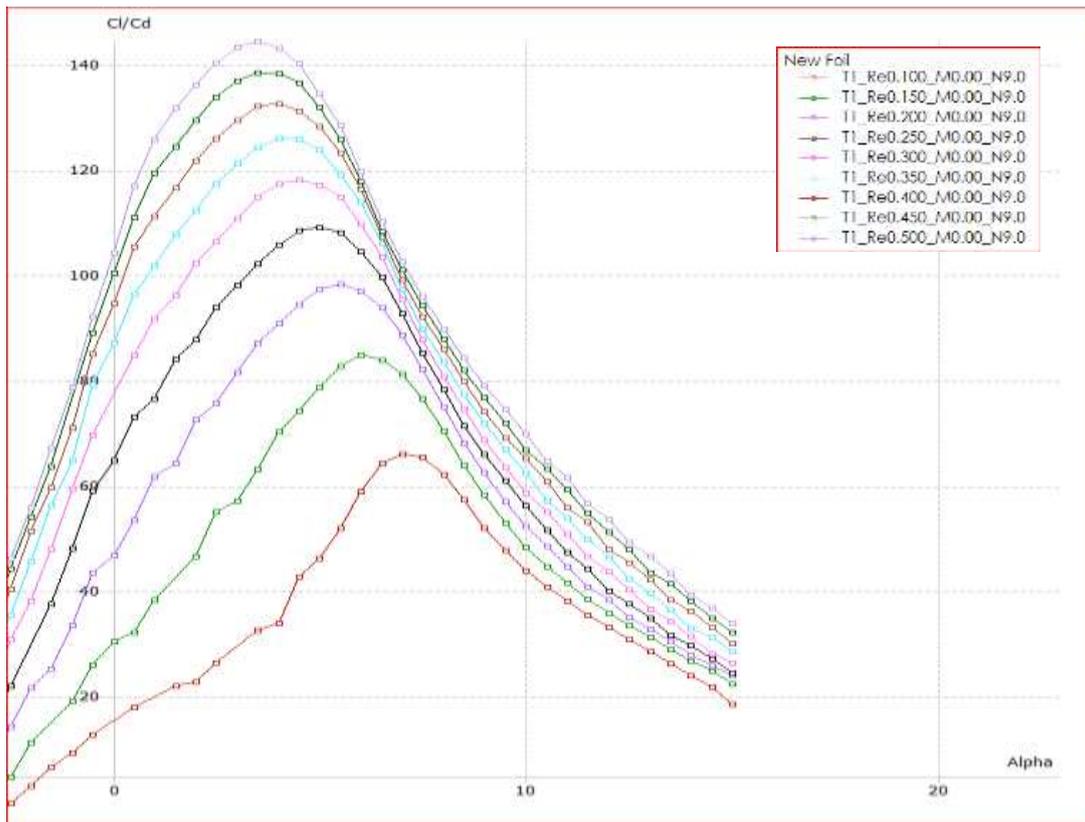


Fig 16: $\frac{C_l}{C_d}$ vs α del perfil SG6043. Software Qblade.

. Se obtuvo a un $Re = 5 \times 10^5$ un $\frac{C_l}{C_d} = 144$ a un ángulo de $\alpha = 3.5$, en un $Re = 10^5$ un

$\frac{C_l}{C_d} = 65.85$ a un ángulo de $\alpha = 7$. Obtenemos el ángulo de ataque óptimo, ya que el cociente

$\frac{C_l}{C_d}$ nos representa la máxima sustentación en un mínimo arrastre. Se observa que este valor

disminuye a menor número de Reynolds lo que implica que habrá menos sustentación y más arrastre en el perfil aerodinámico, pero siendo valores altos la eficiencia del aspa no vendría siendo muy afectada.

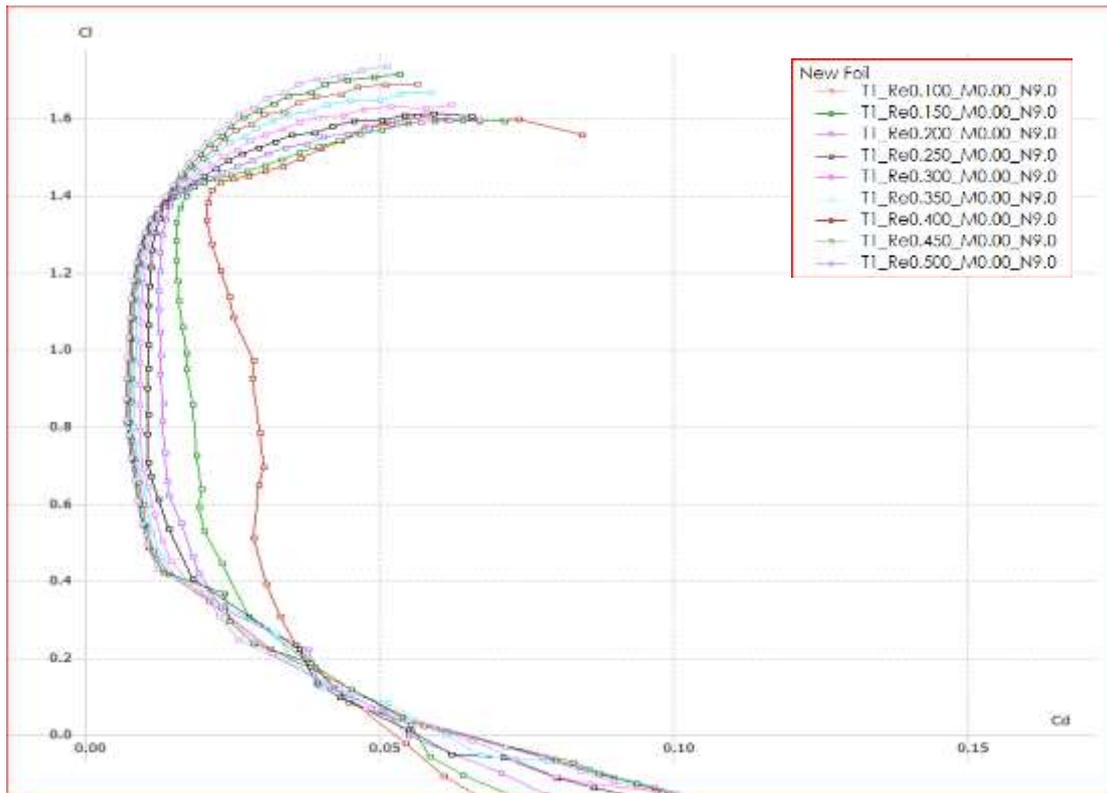


Fig 17: C_l vs C_d del perfil SG6043. Software Qblade

. Se obtuvo a un $Re = 5 \times 10^5$ un C_l vs $C_d = (1.73, 0.05)$; en un $Re = 10^5$ un C_l vs $C_d = (1.65, 0.08)$.

Perfil S809:

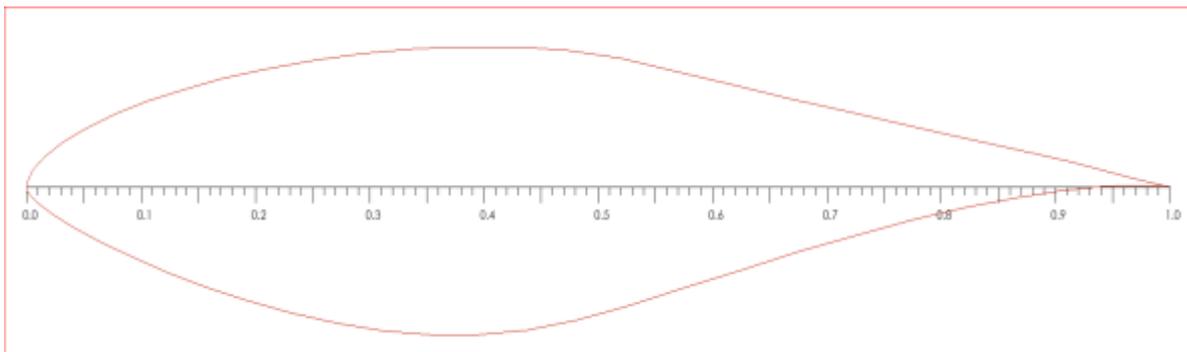


Fig 18: Geometría del perfil S809. Software Qblade.

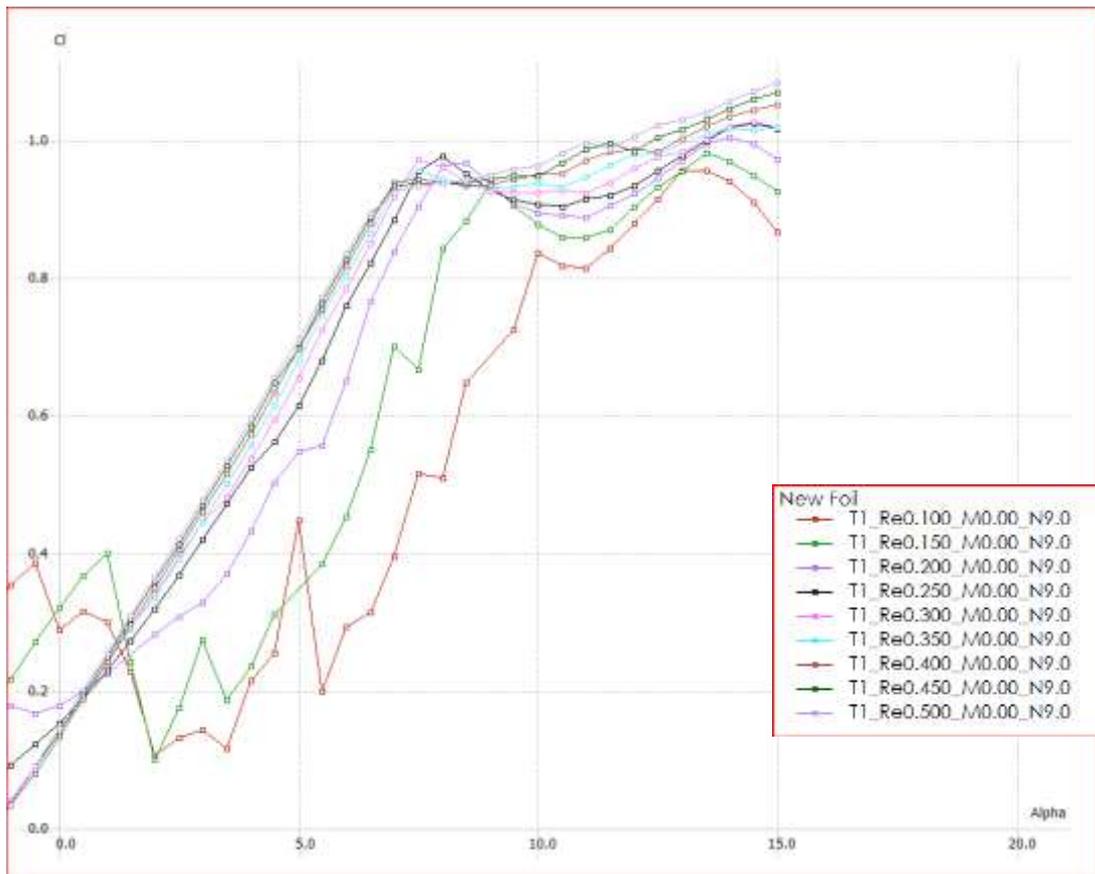


Fig 19: C_l vs α del perfil S809. Software Qblade.

. Se obtuvo a un $Re = 5 \times 10^5$ un $C_l = 1.05$ a un ángulo de $\alpha = 14$, en un $Re = 10^5$ un $C_l = 0.95$ a un ángulo de $\alpha = 13$. Se aprecia en la imagen que el perfil presenta una sustentación moderada, y no tiene grandes pérdidas de sustentación cuando se reduce los números de Reynolds. Presenta algunas irregularidades en la gráfica cuando disminuye el número de Reynolds, esto podría traer algunas deficiencias en el aspa.

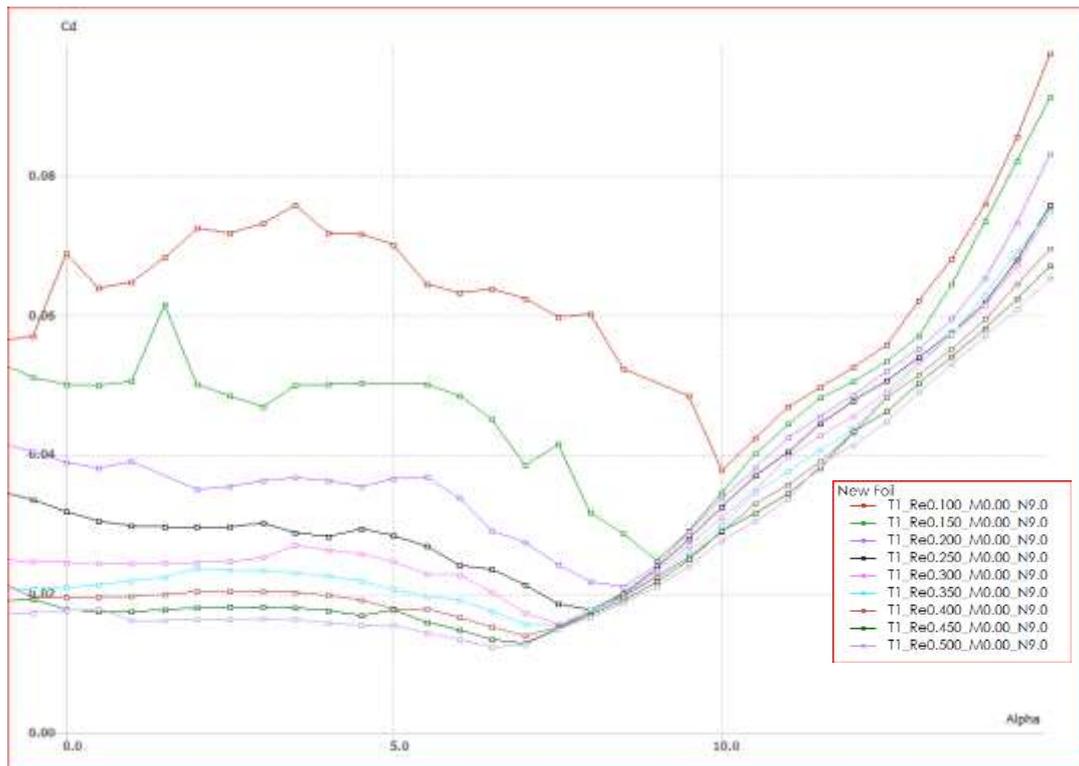


Fig 20: C_d vs α del perfil S809. Software Qblade.

. Se obtuvo a un $Re = 5 \times 10^5$ un $C_d = 0.05$ a un ángulo de $\alpha = 15$, en un $Re = 10^5$ un $C_d = 0.098$ a un ángulo de $\alpha = 15$. Se aprecia en la imagen un incremento en el arrastre, pero se mantiene el ángulo de ataque cuando se disminuye el número de Reynolds. La figura presenta algunas precipitaciones en números de Reynolds bajos. Lo que indicaría algunas deficiencias en el perfil. Este dato afecta de manera favorable a la relación $\frac{C_l}{C_d}$.

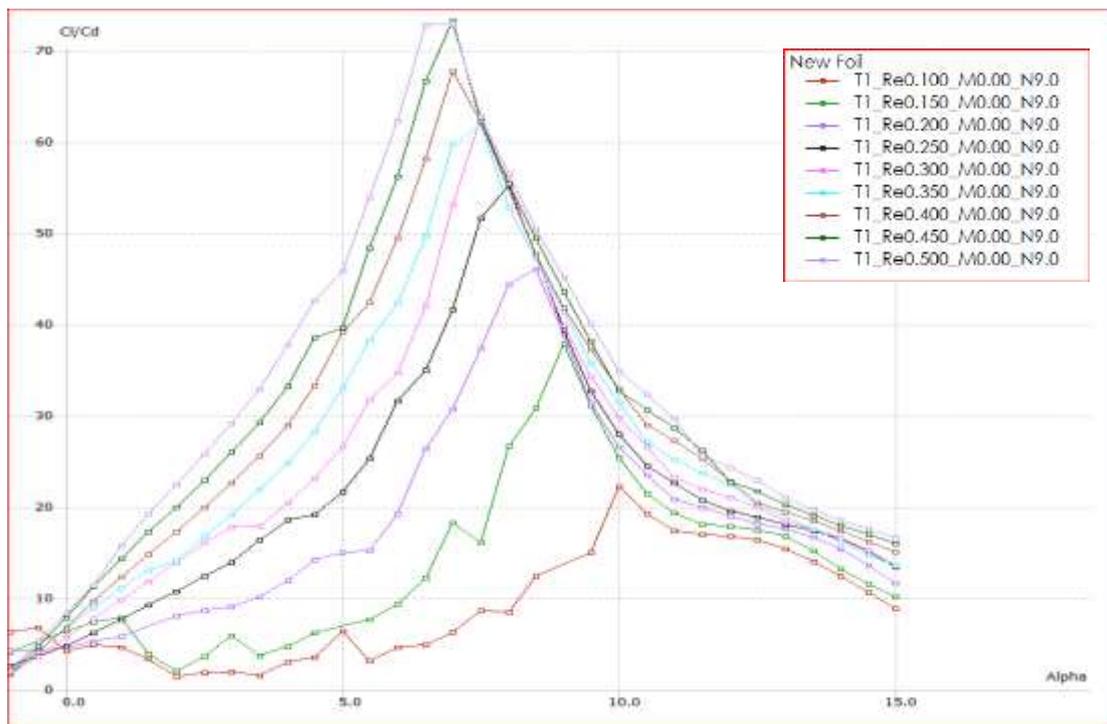


Fig 21: $\frac{C_l}{C_d}$ vs α del perfil S809. Software Qblad.

. Se obtuvo a un $Re = 5 \times 10^5$ un $\frac{C_l}{C_d} = 72.8$ a un ángulo de $\alpha = 7$, en un $Re = 10^5$ un

$\frac{C_l}{C_d} = 22$ a un ángulo de $\alpha = 10$. Obtenemos el ángulo de ataque óptimo, ya que el cociente

$\frac{C_l}{C_d}$ nos representa la máxima sustentación en un mínimo arrastre. Se observa que este valor

disminuye precipitadamente a menor número de Reynolds lo que implica que habrá menos sustentación y más arrastre en el perfil aerodinámico, se presenta valores bajos en cocinando

$\frac{C_l}{C_d}$ lo que conduciría a una reducción en la sustentación.

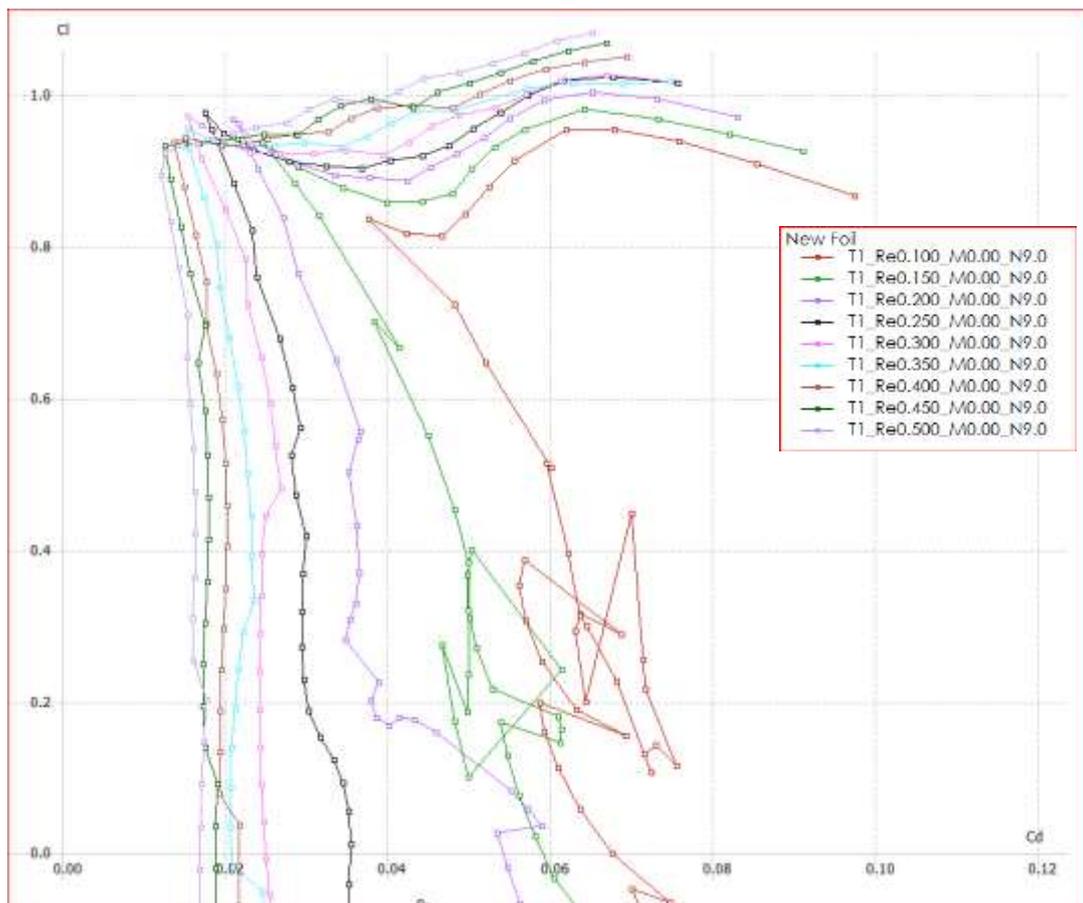


Fig 22: C_l vs C_d del perfil S809. Software Qblade.

. Se obtuvo a un $Re = 5 \times 10^5$ un C_l vs $C_d = (1.05, 0.6)$; en un $Re = 10^5$ un C_l vs $C_d = (0.95, 0.098)$.

Perfil E231:

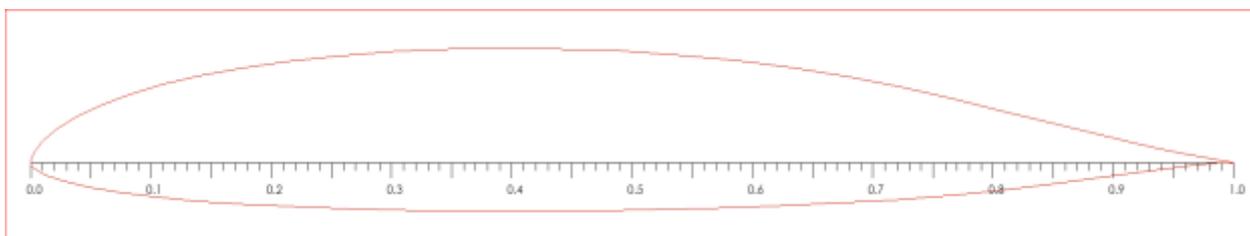


Fig 23: Geometría del perfil E231. Software Qblade.

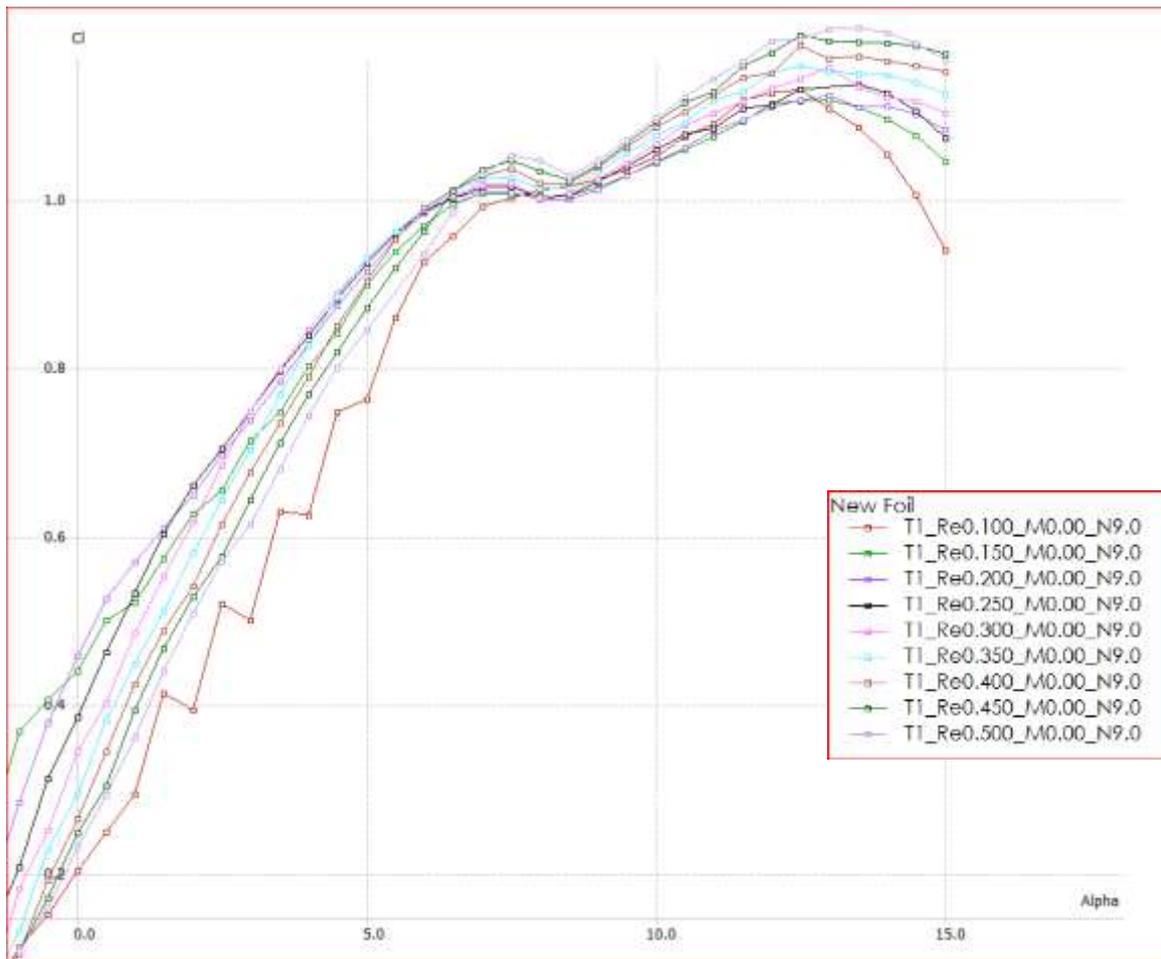


Fig 24: C_l vs α del perfil E231. Software Qblade.

. Se obtuvo a un $Re = 5 \times 10^5$ un $C_l = 1.2$ a un ángulo de $\alpha = 13$, en un $Re = 10^5$ un $C_l = 1.13$ a un ángulo de $\alpha = 12$. Se aprecia en la imagen que el perfil presenta valores de sustentación altos y no presentan gran pérdida cuando disminuye los valores de Reynolds, se concluye que el perfil no entrara en pérdidas de sustentación.

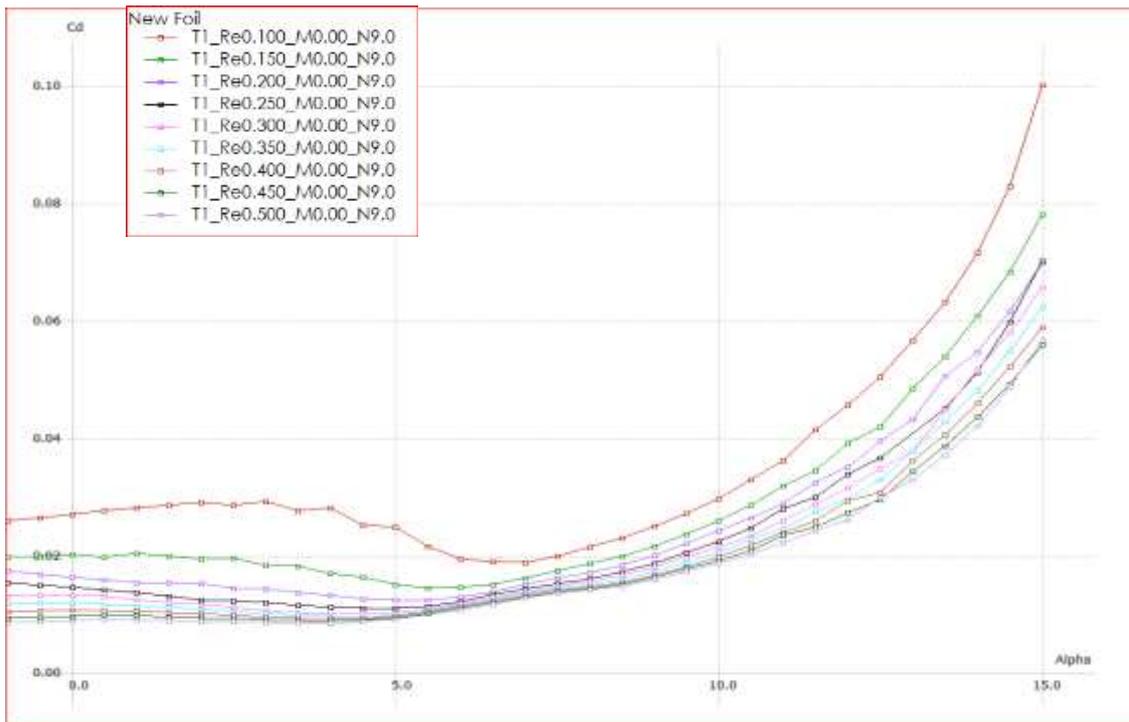


Fig 25: C_d vs α del perfil E231. Software Qblade.

. Se obtuvo a un $Re = 5 \times 10^5$ un $C_d = 0.055$ a un ángulo de $\alpha = 15$, en un $Re = 10^5$ un $C_d = 0.10$ a un ángulo de $\alpha = 15$. Se aprecia en la imagen un incremento en el arrastre, pero se mantiene el ángulo de ataque cuando se disminuye el número de Reynolds. Este dato afecta la relación $\frac{C_l}{C_d}$.

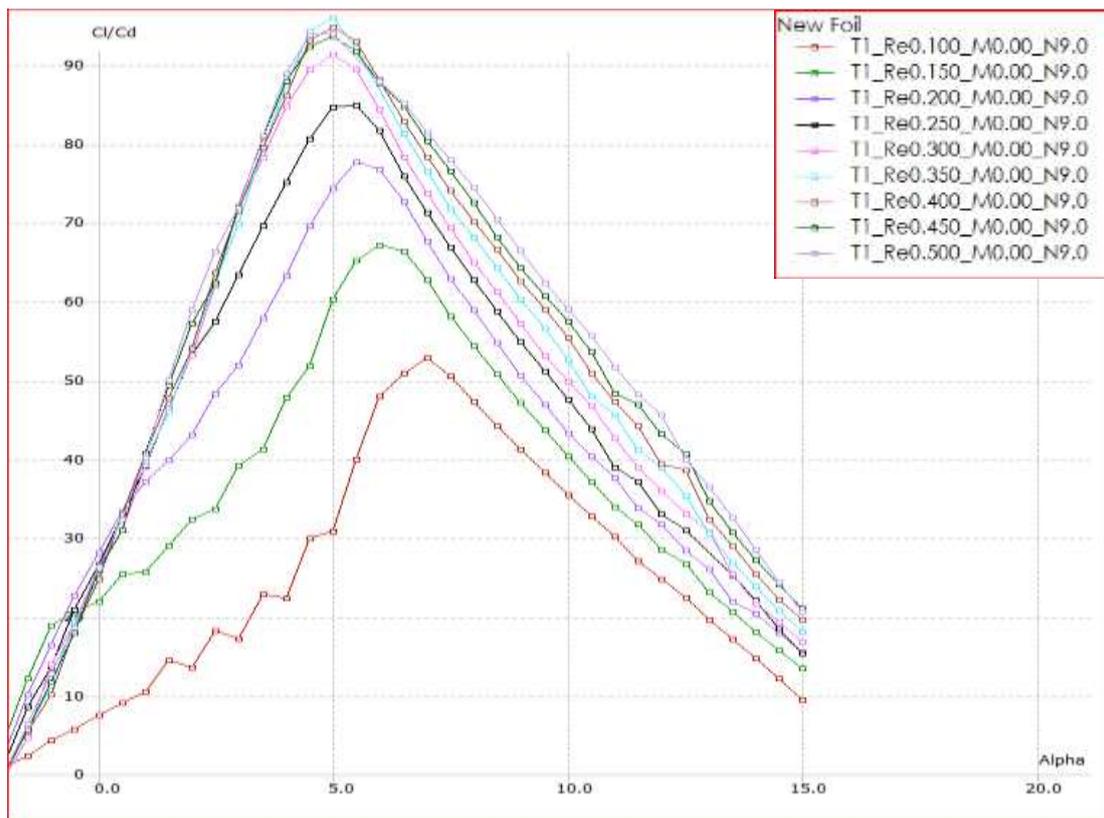


Fig 26: $\frac{C_l}{C_d}$ vs α del perfil E231. Software Qblade.

. Se obtuvo a un $Re = 5 \times 10^5$ un $\frac{C_l}{C_d} = 93.8$ a un ángulo de $\alpha = 5$, en un $Re = 10^5$ un

$\frac{C_l}{C_d} = 52.5$ a un ángulo de $\alpha = 7$. Obtenemos el ángulo de ataque óptimo, ya que el cociente

$\frac{C_l}{C_d}$ nos representa la máxima sustentación en un mínimo arrastre. Se observa que este valor

disminuye a menor número de Reynolds lo que implica que habrá menos sustentación y más

arrastre en el perfil aerodinámico, los puntos de $Re = [5 \times 10^5 - 3 \times 10^5]$ presentan valores casi

parecidos los que representa una buena sustentación. La ineficiencia aparece en Reynolds

bajos.

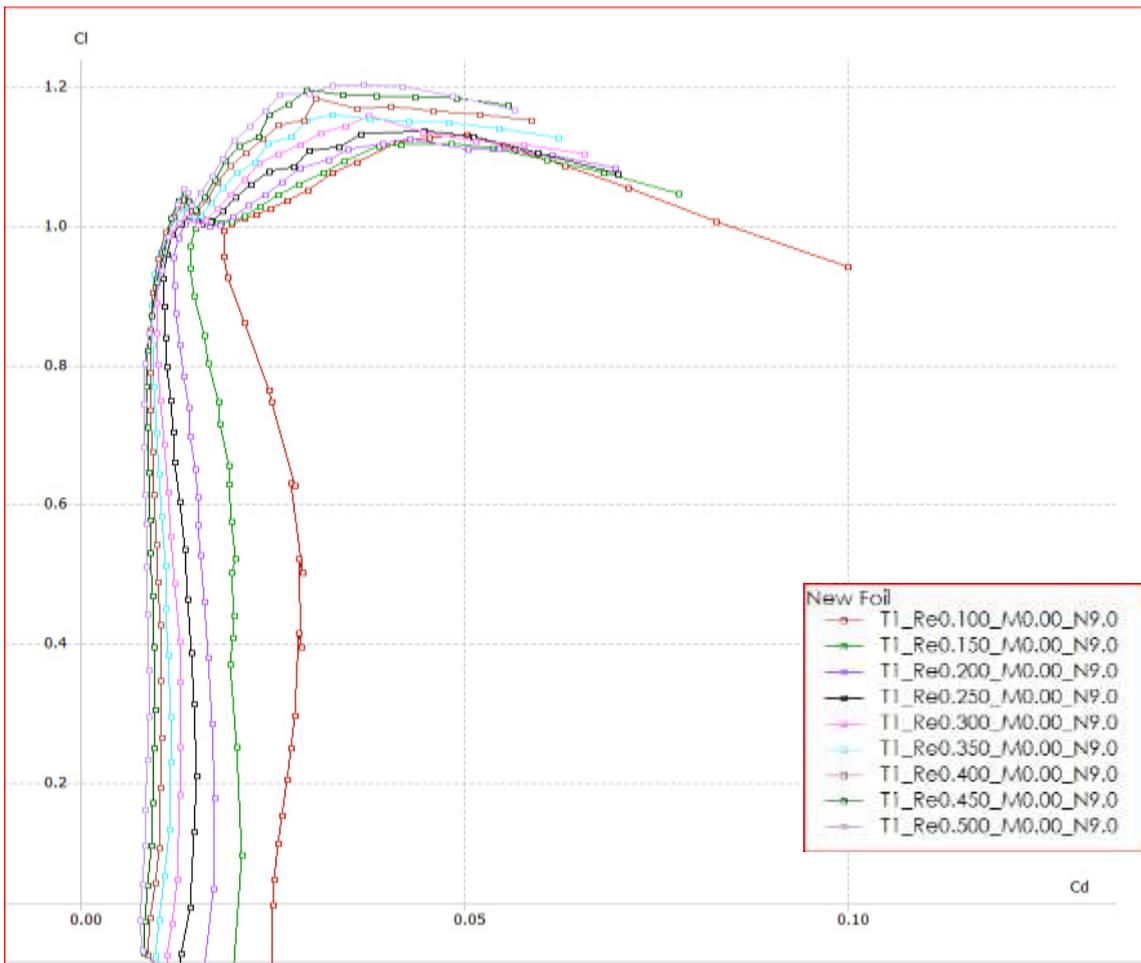


Fig 27: C_l vs C_d del perfil E231. Software Qblade.

. Se obtuvo a un $Re = 5 \times 10^5$ un C_l vs $C_d = (1.2, 0.055)$; en un $Re = 10^5$ un C_l vs $C_d = (1.13, 0.10)$.

3.5. Comparación de los resultados:

Comparación de los resultados de cada perfil aerodinámico, de los números de Reynolds (Re) de 100 000 y 500 000, se observa en estos valores de número de Reynolds (Re) para analizar las variaciones de los coeficientes aerodinámicos de cada perfil, un punto importante de esta comparación es ver el ángulo de diseño (α) de cada perfil aerodinámico que nos brinda el cociente de $\frac{C_l}{C_d}$, el ángulo de diseño es un dato de importancia para la fabricación de aspa eólicas.

Tabla 2: Cuadro comparativo de las Característica más importante de cada perfil.

Perfil	Características Aerodinámicas
<p>NACA 0012</p>	<p>. $Re = 5 \times 10^5$ un $C_l = 1.25$ a un ángulo de $\alpha = 13$; $Re = 10^5$ un $C_l = 0.96$ a un ángulo de $\alpha = 10$. El perfil entra en pérdida de sustentación cuando se reduce el número Re lo que implica un aumento en el arrastre.</p> <p>. $Re = 5 \times 10^5$ un $C_d = 0.058$ a un ángulo de $\alpha = 15$; $Re = 10^5$ un $C_d = 0.18$ a un ángulo de $\alpha = 14.5$. Hay un incremento en el arrastre y una disminución en ángulo de ataque cuando se reduce el número de Re, este dato afectara de manera desfavorable a la relación $\frac{C_l}{C_d}$.</p> <p>. $Re = 5 \times 10^5$ un $\frac{C_l}{C_d} = 61.5$ a un ángulo de $\alpha = 6$; $Re = 10^5$ un $\frac{C_l}{C_d} = 36.5$ a un ángulo de $\alpha = 5$. Es factor nos representa la máxima sustentación al mínimo arrastre, podemos obtener el ángulo óptimo de diseño, se aprecia una disminución del valor a menor Re lo que implica que habrá menos sustentación y más arrastre.</p>
<p>SG6043</p>	<p>. $Re = 5 \times 10^5$ un $C_l = 1.72$ a un ángulo de $\alpha = 14$; $Re = 10^5$ un $C_l = 1.64$ a un ángulo de $\alpha = 13$. Se aprecia que valores de sustentación altos y no presentan gran pérdida cuando disminuye los valores de Reynolds, se concluye que el perfil no entrara en pérdidas de sustentación.</p> <p>. $Re = 5 \times 10^5$ un $C_d = 0.05$ a un ángulo de $\alpha = 15$; $Re = 10^5$ un $C_d = 0.08$ a un ángulo de $\alpha = 15$. Se aprecia un leve incremento en al arrastre, pero se mantiene el</p>

	<p>ángulo de ataque cuando se disminuye el Re. Este dato afecta de manera favorable a la relación $\frac{C_l}{C_d}$.</p> <p>. $Re = 5 \times 10^5$ un $\frac{C_l}{C_d} = 144$ a un ángulo de $\alpha = 3.5$; $Re = 10^5$ un $\frac{C_l}{C_d} = 65.85$ a un ángulo de $\alpha = 7$. Se observa que este valor disminuye a menor Re lo que implica que habrá menos sustentación y más arrastre en el perfil aerodinámico, pero siendo valores altos la eficiencia del aspa no vendría siendo muy afectada.</p>
<p>S809</p>	<p>. $Re = 5 \times 10^5$ un $C_l = 1.05$ a un ángulo de $\alpha = 14$; $Re = 10^5$ un $C_l = 0.95$ a un ángulo de $\alpha = 13$. Se aprecia una sustentación moderada y no se tiene grandes pérdidas de sustentación cuando se reduce el número de Reynolds. En la figura se observa algunas irregularidades cuando disminuye el Re, esto podría traer algunas deficiencias en el aspa.</p> <p>. $Re = 5 \times 10^5$ un $C_d = 0.05$ a un ángulo de $\alpha = 15$; $Re = 10^5$ un $C_d = 0.098$ a un ángulo de $\alpha = 15$. Se observa un incremento en el arrastre, pero se mantiene el ángulo de ataque cuando se disminuye el número de Re. La figura presenta algunas precipitaciones en Re bajos. Lo que indicaría alguna deficiencia en el perfil. Este dato afecta de manera favorable a la relación $\frac{C_l}{C_d}$.</p> <p>. $Re = 5 \times 10^5$ un $\frac{C_l}{C_d} = 72.8$ a un ángulo de $\alpha = 7$; $Re = 10^5$ un $\frac{C_l}{C_d} = 22$ a un ángulo de $\alpha = 10$. Obtenemos el ángulo de ataque óptimo, ya que el cociente $\frac{C_l}{C_d}$ nos representa la máxima sustentación en un mínimo arrastre. Se observa que este valor disminuye precipitadamente a menor Re lo que implica que habrá menos sustentación y más arrastre en el perfil aerodinámico, se presenta valores bajos en cocientes $\frac{C_l}{C_d}$ lo que conducirá a una reducción en la sustentación.</p>
<p>E231</p>	<p>. $Re = 5 \times 10^5$ un $C_l = 1.2$ a un ángulo de $\alpha = 13$; $Re = 10^5$ un $C_l = 1.13$ a un ángulo de $\alpha = 12$. Se aprecia que el perfil presenta valores de sustentación altos y no presentan gran pérdida cuando disminuye los valores de Reynolds, se concluye que el perfil no entrara en pérdidas de sustentación.</p> <p>. $Re = 5 \times 10^5$ un $C_d = 0.055$ a un ángulo de $\alpha = 15$; $Re = 10^5$ un $C_d = 0.10$ a un ángulo de $\alpha = 15$. Se observa un incremento en el arrastre, pero se mantiene el ángulo de ataque cuando se disminuye el número de Reynolds. Este dato afecta la relación $\frac{C_l}{C_d}$.</p>

. $Re = 5 \times 10^5$ un $\frac{C_l}{C_d} = 93.8$ a un ángulo de $\alpha = 5$; $Re = 10^5$ un $\frac{C_l}{C_d} = 52.5$ a un ángulo de $\alpha = 7$. Se obtiene el ángulo de ataque óptimo, ya que el cociente $\frac{C_l}{C_d}$ nos representa la máxima sustentación en un mínimo arrastre. Se observa que este valor disminuye a menor número de Reynolds lo que implica que habrá menos sustentación y más arrastre en el perfil aerodinámico, los puntos de $Re = [5 \times 10^5 - 3 \times 10^5]$ presentan valores casi parecidos los que representa una buena sustentación. La ineficiencia aparece en Reynolds bajos.

. Dado los resultados seleccionaremos el perfil aerodinámico SG6043, porque presenta los valores más altos en comparación de los demás perfiles, sus coeficientes de (C_l) es de 1.64 en un $Re = 10^5$ y $Re = 5 \times 10^5$ un $C_l = 1.72$, se observa que la variación de los valores es mínima a distintos Re y su ángulo de diseño α es de 7° según él cociente $\frac{C_l}{C_d}$, lo que es favorable ya que estos deben ser pequeños entre un intervalo de $6^\circ - 8^\circ$ ya que estos generan una sobre presión en la parte inferior del aspa y la vez una depresión por arriba. El perfil NACA 0012 siendo unos de los perfiles más mencionados en los artículos científicos muestra valores $Re = 5 \times 10^5$ un $C_l = 1.25$ y en $Re = 10^5$ un $C_l = 0.96$, se observa un decaimiento en los valores de sustentación a Reynolds bajos los que causaría una baja en la eficiencia si se desea fabricar un aerogenerador de pequeña potencia con este perfil. En el anexo 1 podemos observar un cuadro con todos los valores del análisis de los perfiles aerodinámicos.

IV. Discusión y Conclusión

4.1. Discusión.

La necesidad de la investigación perfiles aerodinámicos para turbinas eólicas de mínima o pequeña potencia nace porque muchos fabricantes de aerogeneradores eólicos diseñan con perfiles aerodinámicos pensados para aeronaves, a pesar que las condiciones de trabajo son distintas [10], por lo que es necesario ver otras alternativas de perfiles aerodinámicos que trabajen en condiciones de baja potencia eólica.

. Los perfiles NACA (National Advisory Committee of Aeronautics) pensados solo para ser utilizados en el campo de la aeronáutica, aunque algunos de estos perfiles por su grosor en la parte inferior son utilizados para turbinas eólicas [4] no presentan propiedades de sustentación altas para ser utilizadas en perfiles aerodinámicos de pequeña potencia; el perfil NACA 0012 siendo uno de los perfiles más mencionados en la literatura científica, en el análisis presenta un C_l alto a Re elevados pero se reduce significativamente cuando baja el Re , lo que implica un aumento en el arrastre y en la relación $\frac{C_l}{C_d}$ estos ocasionaría una ineficiencia si se pretende diseñar un aerogenerador de pequeña potencia con este perfil aerodinámico.

. El seleccionar un perfil aerodinámico óptimo no debe delimitarse a solo el cociente de $\frac{C_l}{C_d}$, ya que las gráficas de C_l y C_d nos puede brindar información relevante del perfil aerodinámico, se recomienda que para seleccionar un ángulo de ataque óptimo se tiene que observar el punto de máximo de C_l y el cociente $\frac{C_l}{C_d}$, teniendo en cuenta que la eficiencia de un perfil aerodinámico radica en que se debe tener un mínimo C_d .

4.2. Conclusiones

Teniendo en cuenta los criterios de análisis utilizados en la tesis es posible concluir que:

. La selección de un perfil aerodinámico se basa en la teoría de elementos de palas en donde tenemos como base el análisis de sus coeficientes de sustentación (C_l), coeficiente de arrastre (C_d) y ángulo de ataque, estos estudiados bajo distintos R_e (Número de Reynolds). En el caso de nuestra tesis se buscaron perfiles aerodinámicos para aerogeneradores de pequeña potencia, para ello se realizó una revisión literaria en donde tuvimos en consideración las opiniones de cada autor para la selección de los perfiles analizados. Un punto importante en destacar es que estos perfiles pueden trabajar en turbulencias altas, bajos R_e y en condiciones de baja potencia.

. Para la selección del perfil aerodinámico óptimo para nuestra aspa eólica se tiene que considerar el cociente $\frac{C_l}{C_d}$, este debe presentar valores altos ya que esto representa la máxima sustentación en un mínimo arrastre, también nos brinda el ángulo de ataque de diseño óptimo para nuestra aspa; el valor de C_l debe ser relativamente alto en comparación C_d y sus valores no deben presentar mucha variación cuando se analizan en distintos R_e , las relaciones de estos coeficientes influyen directamente en el coeficiente de potencia C_p que a su vez es un dato que directamente influye en el diseño final del aspa por ejemplo en el radio de este.

. El perfil aerodinámico SG6043 presenta valores altos en comparación de los demás perfiles, su C_l es elevado y su C_d es relativamente bajo, estos coeficientes no presentan variaciones significativas cuando se le es analizado a distintos R_e , lo que implicaría que el aspa no presentará pérdidas de sustentación a R_e bajos. El ángulo de ataque de diseño óptimo es 7° (Anexo 2) lo que es favorable ya que estos deben ser pequeños entre un intervalo de $6^\circ - 8^\circ$ ya que estos generan una sobre presión en la

parte inferior del aspa y a la vez una depresión por arriba, al suceder esto una fuerza tiende a elevarla lo que vendría siendo la sustentación. Si el ángulo es relativamente grande genera una sobre presión en la parte delantera del aspa provocando vientos turbulentos, esto debido a la depresión en la parte superior del aspa.

V. Referencias:

- [1] C. S. Montalvo, *Proyecto de ley que declara de necesidad pública y referente interés nacional, social y económico la construcción de microparques de energía eólica para la generación de energía renovable en beneficio de los centros poblados y caseríos, pequeñas y*, Lima: Juan Santos Atahualpa, 2022, p. 19.
- [2] J. Días Pacheco, I. Hernández Arriaga, A. González Canales, I. Alvarado Medrano y G. Muñoz Hernández, «Diseño y validación de aspas para aerogeneradores de pequeña y mediana capacidad,» SOMIM, Mexico, 2020.
- [3] G. Abderraouf, «A Study of Wind Turbine Blade Structure Based on Cellulose Fibers Composite Material,» *GEEE*, vol. 38, p. 7, 2018.
- [4] M. Villarrubia, *Ingeniería de la Energía Eólica*, México : Alfaomega, 2013, p. 278.
- [5] M. d. E. y. M. d. Perú, «Vortex,» 2016. [En línea]. Available: <https://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/cg00367.pdf>. [Último acceso: 15 Julio 2024].
- [6] S. García García, «Estudio de Viabilidad de Sistema de Aprovechamiento Eólico Urbano,» 2019.
- [7] IEC 61400 - 2, «UEC Webstore,» 2013. [En línea]. Available: <https://webstore.iec.ch/publication/5433>. [Último acceso: 30 04 2024].
- [8] R. Llacza y F. Hugo, «Aerogeneradores de baja potencia para electrificar pueblos alejados (Provincia de Huarochirí - Lima),» Lima , 2014.
- [9] C. Vigneswaran y K. Vishnu, «Computational analysis of influence of geometry on cfj airfoil aerodynamic coefficients,» *IOPSCIENCE*, vol. 2484, p. 8, 2023.
- [10] G. Richmond, M. Montenegro y C. Otárola, «Revisión de los Perfiles aerodinámicos apropiados para turbinas de eje horizontal y de pequeña escala en zonas boscosas.,» *Lasallista*, vol. 17, nº 1, p. 19, 2020.
- [11] S. Dean y N. Jamal, «The Effects of a Seagull Airfoil on the Aerodynamic Performance of a Small Wind Turbine,» *Scopus*, vol. 17, nº 11, p. 17, 2024.
- [12] A. Intizar, H. Tanweer, U. Imran Nazir y L. Kumar, «Turbulence model study for aerodynamic analysis of the leading edge tubercle wing for low Reynolds number flows,» *ScienceDirect*, vol. 10, nº 11, p. 17, 2024.
- [13] Z. Tiantian y S. Haitao, «Research on dynamic aerodynamic performance of wind turbine airfoil under large blade deformation,» *OIPSCIENCE*, p. 12, 2022.
- [14] L. F. Gonzáles, «Perfiles Aerodinámicos empleados en Turbinas de Viento,» 2006.

- [15] A. Carantoña, «Análisis del Comportamiento Aerodinámico de Perfiles empleados en Aerogeneradores de Baja Potencia.,» 2009.
- [16] B. Chavez y S. Cotrina, «Dinámica de Gases / Perfiles Aerodinámicos,» Lambayeque, 2020.
- [17] M. Mariana y R. Gustavo, «Simulación del desempeño de tres perfiles aerodinámicos en flujo turbulento,» *UNEXPO*, p. 13, 2021.
- [18] N. Richmond, M. Montenegro y C. Otárola, «Revisión de los perfiles aerodinámicos apropiados para turbinas eólicas de eje horizontal y de pequeña escala en zonas boscosas.,» *EBSCO*, vol. 17, nº 1, p. 19, 2020.
- [19] C. Ali, D. Michael y B. Pfeiffelmann, «Aerodynamic optimization of airfoil profiles for small horizontal axis wind turbines,» *Scopus*, vol. 6, p. 19, 2018.
- [20] D. Sesalim y N. Jamal, «Airfoil Control of Small Wind Turbines,» *Scopus*, vol. 17, p. 19, 2024.
- [21] A. Esam, S. Iskandar, M. Tholudin, T. Mohamed y B. Abul, «Aerodynamic Performance Investigation of a Small Horizontal Axis Wind Turbine with Multi-Airfoil Blade Profiles of SD2030 and E231 Using Wind Tunnel Experiments and BEM Theory Method,» *SEMARAK ILMU*, vol. 103, nº 1, p. 15, 2023.
- [22] J. Devashish y S. Saket, «NACA2412 airfoil based method for design and aerodynamic analysis of small HAWT using modified BEM approach,» vol. 78, p. 11, 2022.
- [23] N. Richmond, M. Montenegro y C. Otárola, «Revisión de los perfiles aerodinámicos apropiados para turbinas eólicas de eje horizontal y de pequeña escala en zonas boscosas.,» *EBSCO*, vol. 17, p. 19, 2020.
- [24] B. IO, m. I y B. S, «Horizontal-Axis Wind Turbine Blades Manufacture,» *IOPSCIENCE*, vol. 916, p. 8, 2020.

Anexos

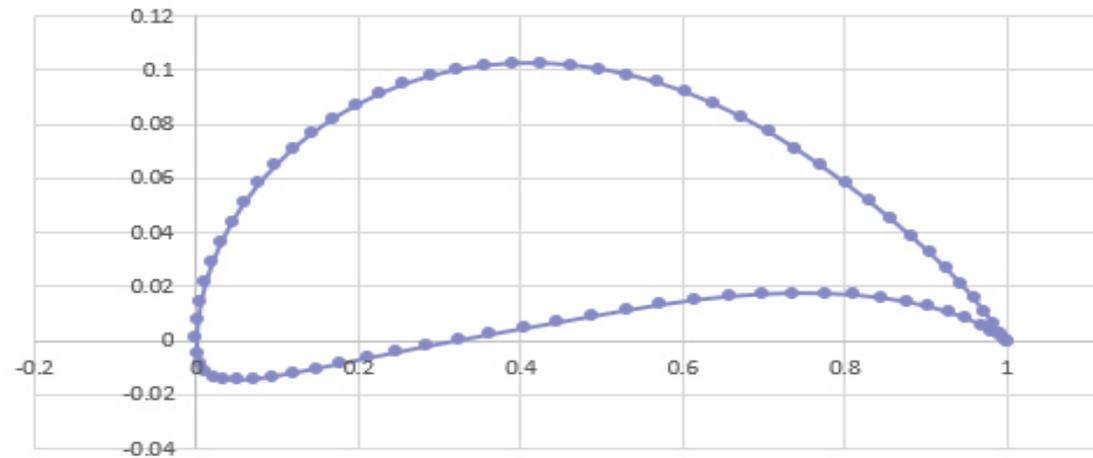
Anexo 1: Valores de todos los perfiles aerodinámicos analizados.

PERF	Coeficientes	Números de Reynolds (Re)								
		10^5	1.5×10^5	2×10^5	2.5×10^5	3×10^5	3.5×10^5	4×10^5	4.5×10^5	5×10^5
NACA0012	C_l vs α	0.96, 10	1.04, 11.5	1.07, 12	1.092, 12	1.128, 12.5	1.13, 12	1.157, 13.2	1.19, 14	1.25, 13
	C_d vs α	0.18, 14.5	0.175, 15	0.17, 15	0.171, 15	0.094, 15	0.084, 15	0.063, 15	0.063, 15	0.058, 15
	$\frac{C_l}{C_d}$ vs α	36.5, 5	43, 5	47.4, 5	50.7, 5	53.5, 5.5	55.89, 5	58, 5.5	59.88, 5.5	61.5, 6
	C_l vs C_d	0.97, 0.18	1.04, 0.175	1.07, 0.17	1.092, 0.171	1.128, 0.094	1.13, 0.084	1.157, 0.063	1.19, 0.063	1.2, 0.058
SG6043	C_l vs α	1.64, 13	1.594, 14.4	1.595, 15	1.61, 14.5	1.635, 15	1.665, 15	1.688, 15	1.713, 15	1.72, 14
	C_d vs α	0.08, 15	0.07, 15	0.068, 15	0.067, 15	0.063, 15	0.059, 15	0.057, 15	0.053, 15	0.05, 15
	$\frac{C_l}{C_d}$ vs α	65.85, 7	84.6, 6	98, 5.5	109, 5	118, 4.5	125.9, 4	132.5, 4	138.5, 3.5	144, 3.5
	C_l vs C_d	1.65, 0.08	1.597, 0.07	1.595, 0.068	1.61, 0.067	1.635, 0.063	1.665, 0.059	1.688, 0.057	1.713, 0.053	1.73, 0.05
S809	C_l vs α	0.95, 13	0.98, 13.5	1, 14	1.02, 14.5	1.025, 14.5	1.01, 15	1.05, 15	1.068, 15	1.05, 14
	C_d vs α	0.098, 15	0.09, 15	0.083, 15	0.075, 15	0.074, 15	0.074, 15	0.069, 15	0.067, 15	0.05, 15
	$\frac{C_l}{C_d}$ vs α	22, 10	37.8, 9	46, 8.5	55.27, 8	62.5, 7.5	61.9, 7.5	67.7, 7	73.2, 7	72.8, 7
	C_l vs C_d	0.95, 0.098	0.98, 0.09	1.14, 0.083	1.02, 0.075	1.025, 0.074	1.01, 0.074	1.05, 0.069	1.068, 0.067	1.05, 0.06
E231	C_l vs α	1.13, 12	1.117, 13	1.123, 13	1.135, 13.5	1.156, 13	1.158, 12.5	1.18, 12.5	1.194, 12.5	1.2, 13
	C_d vs α	0.10, 15	0.078, 15	0.07, 15	0.07, 15	0.065, 15	0.063, 15	0.059, 15	0.056, 15	0.055, 15
	$\frac{C_l}{C_d}$ vs α	52.5, 7	67, 6	77.6, 5.5	84.8, 5.5	91.27, 5	95.88, 5	94.7, 5	93.65, 5	93.8, 5
	C_l vs C_d	1.13, 0.10	1.117, 0.078	1.123, 0.07	1.135, 0.07	1.156, 0.065	1.158, 0.063	1.18, 0.059	1.194, 0.056	1.2, 0.055

Anexo 2: Características aerodinámicas de diseño del perfil SG6043. Extraídas del análisis de Qblade.

Características aerodinámicas									
Coeficientes				$C_{L\ max}$	$C_{D\ max}$	$C_{L/C_{Dopt}}$	α_{opt}	$C_{L\ opt}$	
α	C_L	C_D	C_L/C_D						
-20	-0.4614	0.23337	-1.9771179	1.6045	0.23337	65.864374	7	1.3792	
-19.5	-0.4485	0.22817	-1.9656397						
-19	-0.4357	0.22336	-1.9506626						
-18.5	-0.4232	0.21934	-1.9294246						
-18	-0.4119	0.21655	-1.9021011						
-17.5	-0.4028	0.21411	-1.881276						
-17	-0.3955	0.21157	-1.8693577						
-16.5	-0.3895	0.2088	-1.8654215						
-16	-0.3847	0.20576	-1.869654						
-15.5	-0.3802	0.20222	-1.8801306						
-15	-0.3733	0.19747	-1.8904137						
-14.5	-0.343	0.1782	-1.9248036						
-14	-0.3307	0.1715	-1.9282799						
-13.5	-0.3216	0.16614	-1.9357169						
-13	-0.3143	0.16117	-1.9501148						
-12.5	-0.3087	0.15644	-1.9732805						
-12	-0.3048	0.15192	-2.0063191						
-11.5	-0.3031	0.14774	-2.0515771						
-11	-0.3058	0.1446	-2.1147994						
-10.5	-0.3179	0.14364	-2.2131718						
-10	-0.3334	0.14274	-2.3357153						
-9.5	-0.3469	0.14085	-2.4629038						
-9	-0.3604	0.13838	-2.6044226						
-8.5	-0.3741	0.13555	-2.7598672						
-8	-0.3522	0.12129	-2.9037843						
-7.5	-0.3551	0.11696	-3.0360807						
-7	-0.3652	0.11345	-3.2190392						
-6.5	-0.3813	0.11034	-3.4556824						
-6	-0.4042	0.10764	-3.7551096						
-5.5	-0.3582	0.10226	-3.5028359						
-5	-0.3303	0.09035	-3.6557831						

PERFIL AERODINÁMICO SG6043



NOMBRE DEL TRABAJO

ANÁLISIS DE PERFILES AERODINÁMICOS PARA TURBINAS EÓLICAS DE PEQUEÑA POTENCIA

AUTOR

KEVIN ANTONIO DE LOS SANTOS MESA RINA

RECUENTO DE PALABRAS

7317 Words

RECUENTO DE CARACTERES

37119 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

40 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

1.2MB

FECHA DE ENTREGA

Sep 29, 2024 1:04 AM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Sep 29, 2024 1:05 AM GMT-5**● 11% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 8% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 5% Base de datos de trabajos entregados
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Coincidencia baja (menos de 8 palabras)
- Material citado



**ACTA DE CONTROL DE REVISIÓN DE
SIMILITUD DE LA INVESTIGACIÓN**

Código:	F3.PP2-PR.02
Versión:	02
Fecha:	18/04/2024
Hoja:	1 de 1

Yo, **Silvia Yvone Gastiaturú Morales**, Coordinadora de Investigación del Programa de Estudios de Ingeniería Mecánica Eléctrica, he realizado el control de originalidad de la investigación, el mismo que está dentro de los porcentajes establecidos para el nivel de Pregrado, según la Directiva de similitud vigente en USS; además certifico que la versión que hace entrega es la versión final de la Trabajo de Investigación titulado: **ANÁLISIS DE PERFILES AERODINÁMICOS PARA TURBINAS EÓLICAS DE PEQUEÑA POTENCIA** elaborado por el (los) Bachiller(es):

DE LOS SANTOS MESARINA KEVIN ANTONIO

Se deja constancia que la investigación antes indicada tiene un índice de similitud del **11%**, verificable en el reporte final del análisis de originalidad mediante el software de similitud TURNITIN.

Por lo que se concluye que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio y cumple con lo establecido en la Directiva sobre índice de similitud de los productos académicos y de investigación vigente.

Pimentel, 28 de setiembre de 2024

Dra. Gastiaturú Morales Silvia Yvone

Coordinador de Investigación

DNI N° 16481433