



Universidad del
Rosario

Escuela de Ingeniería,
Ciencia y Tecnología

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ÁLABE PARA UN GENERADOR HORIZONTAL DE BAJA POTENCIA CON APLICACIÓN EN ZONAS NO INTERCONECTADAS DE COLOMBIA

Presentado para obtener el título de

MAGÍSTER EN ENERGÍAS RENOVABLES

David Felipe Olaya Jiménez

Oscar Orlando Rueda Orrego

Director:

Andrés Mauricio Pérez Gordillo

Universidad del Rosario

Escuela de Ingeniería, Ciencia y Tecnología

Maestría en Energías Renovables

Septiembre 2023

DEDICATORIA

Deseo expresar mi agradecimiento especial a Dios por otorgarme vida y salud, y por permitirme adquirir nuevos conocimientos y encontrar felicidad en aquello que siempre ha captado mi atención y que representa mi mayor interés, como lo son los temas relacionados con la energía y la academia en general. También, quiero extender mi más sincero agradecimiento a mi familia, quienes me han brindado un apoyo incondicional en este empeño.

Atte.: Oscar Orlando Rueda

Dedicatoria a Dios por que es el centro de mi vida, y quien guía cada parte de mi camino, a mi esposa, quien me brinda su amor incondicional, apoyo y comprensión; y a mi hijo que viene en camino, siendo su llegada un regalo maravilloso que me ilumina y llena de esperanza cada paso que doy

Atte.: David Felipe Olaya

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos especiales a la Universidad del Rosario, por la excelente calidad académica de sus programas; a la profesora María Fernanda Gómez Galindo, por su acompañamiento cercano; a nuestro director de Tesis, Andrés Mauricio Pérez Gordillo, por su apoyo y aportes al desarrollo de la presente investigación; y a todas las demás personas quienes nos apoyaron en el proceso.

ABSTRACT

Este documento se centra en el diseño y construcción de un prototipo de álabes para aerogeneradores de baja potencia, ya que los álabes desempeñan un papel fundamental en la eficiencia y rendimiento de las turbinas eólicas.

Uno de los desafíos abordados en este estudio es el problema de desprendimiento en la capa límite que afecta a los aerogeneradores de eje horizontal de baja potencia disponibles en el mercado. Mediante el análisis de los coeficientes de desempeño aerodinámico y el modelamiento en software especializado, se logró desarrollar un perfil aerodinámico optimizado de álabes que minimiza los problemas de desprendimiento y maximiza la generación de energía.

El presente estudio busca contribuir al avance de la tecnología eólica en zonas no interconectadas de Colombia, donde la falta de cobertura de la red eléctrica convencional ha impulsado la búsqueda de soluciones energéticas autónomas y sostenibles. La implementación de aerogeneradores de baja potencia con álabes optimizados podría ofrecer una alternativa viable para satisfacer las necesidades energéticas de estas comunidades.

En este trabajo de investigación, se realizó una revisión exhaustiva de referencias bibliográficas relevantes y se establecieron criterios de desempeño para la selección de los perfiles alares. Se identificaron perfiles como el Wortmann FX60-126, SG6043, SG6042, NACA 4415, NACA 0018, AF300, NACA 4412 y CLARK Y, los cuales demostraron un rendimiento destacado en términos de eficiencia aerodinámica, generación de sustentación y bajo arrastre. Estos perfiles fueron modelados en el software XFOIL/XFLR5, donde se evaluaron diferentes parámetros como el número de Reynolds, ángulo de ataque, número de paneles del perfil, enmallado y extrusión. Los resultados obtenidos permitieron seleccionar dos perfiles aerodinámicos optimizados (SG6043 20% / GOE300 80%), y crear a partir de ellos el perfil mixto denominado UR001 usando el módulo “Interpolate Foils”, Este nuevo perfil fue optimizado con el módulo “XFOIL Inverse Design”.

Para el nuevo perfil alar UR001 el coeficiente de sustentación C_l se vuelve positivo para un ángulo de ataque α negativo de -3° , y aumenta con pendiente constante hasta un $\alpha = 7^\circ$, $C_l=1,4$ (C_l aumenta en 0,14, por cada grado de aumento en el ángulo de ataque). Luego ésta pendiente baja en el rango de α entre 7° y 15° para luego disminuir (C_l aumenta desde 1,4 a 1,6 en 8° , aumento de 0.025 por grado). Este perfil, se determina como **optimizado** para la construcción del prototipo de turbina eólica de baja potencia, y se realiza su impresión en impresora 3D.

A partir de los resultados obtenidos con los perfiles alares, (ángulo de ataque fijo de 7° , $C_l/C_d = 56,293$, $C_{lmax} = 1,6253$), se calculó el coeficiente de potencia C_{pot} para un aerogenerador tipo de 3 álabes, con tip speed ratio λ de 3, radio de rotor R de 1 metro, asumiendo una velocidad promedio de viento de 5 m/s. Para estas condiciones, se obtuvo $C_{pot} = 0,533$, lo que nos da una potencia nominal de 125W, lo cual cubre el 50% de las necesidades de un hogar promedio ZNI, definidas en 208W. Los álabes se diseñaron con una longitud de 1 metro, divididos en 18 secciones con tamaños de cuerda que varían entre los 22 y 38 cms, y ángulos de torsión, entre los $12,3^\circ$ y $43,8^\circ$.

Finalmente se realiza una Simulación en SolidWorks CFD para estudiar el comportamiento del perfil en su exposición al viento (5 m/s). Se realiza una comparación con los datos obtenidos en XFLR5, teniendo una similitud alta, lo cual nos permite inferir que los resultados obtenidos inicialmente en XFLR5 son acordes a lo modelado.

This document focuses on the design and construction of a prototype blade for low-power wind turbines, as blades play a crucial role in the efficiency and performance of wind turbines. The main objective of this study is to analyze various aerodynamic profiles and optimize the blade design to maximize energy extraction by improving the lift-to-drag ratio.

One of the challenges addressed in this study is the problem of boundary layer separation that affects low-power horizontal-axis wind turbines available in the market. Through the analysis of aerodynamic performance coefficients and modeling in specialized software, an optimal blade profile was developed that minimizes separation issues and maximizes power generation.

This study aims to contribute to the advancement of wind technology in non-interconnected areas of Colombia, where the lack of coverage by the conventional electrical grid has driven the search for autonomous and sustainable energy solutions. The implementation of low-power wind turbines with optimized blades could offer a viable alternative to meet the energy needs of these communities.

In this research work, a comprehensive review of relevant literature references was conducted, and performance criteria were established for the selection of airfoil profiles. Profiles such as Wortmann FX60-126, SG6043, SG6042, NACA 4415, NACA 0018, AF300, NACA 4412, and CLARK Y were identified, demonstrating outstanding performance in terms of aerodynamic efficiency, lift generation, and low drag. These profiles were modeled in XFOIL/XFLR5 software, where different parameters such as Reynolds number, angle of attack, number of profile panels, meshing, and extrusion were evaluated. The obtained results allowed for the selection of two optimal profiles (SG6043 20% / GOE300 80%) and the creation of a mixed profile named UR001 using the "Interpolate Foils" module. This new profile was further optimized using the "XFOIL Inverse Design" module.

For the new UR001 airfoil profile, the lift coefficient C_l becomes positive for a negative angle of attack α of -3° and increases linearly with a constant slope up to $\alpha = 7^\circ$, reaching $C_l = 1.4$ (C_l increases by 0.14 for each degree increase in the angle of attack). Then, this slope decreases in the range of α between 7° and 15° and eventually decreases (C_l increases from 1.4 to 1.6 in 8° , with an increase of 0.025 per degree). This profile is determined as optimal for the construction of the low-power wind turbine prototype, and it is 3D printed.

Based on the results obtained with the airfoil profiles, (angle of attack = 7° , $C_l/C_d = 56.293$, $C_{lmax} = 1.6253$), the power coefficient C_{pot} was calculated for a 3-blade type wind turbine, with tip speed ratio $\lambda = 3$, rotor radius $R = 1$ meter, assuming an average wind speed = 5 m/s. For these conditions, $C_{pot} = 0.533$ was obtained, which gives us a nominal power of 125W. This covers 50% of the energy requirements for an average ZNI home, defined as 208W. The blades were designed with a length of 1 meter, divided into 18 sections with chord sizes that vary between 22 and 38 cm, and torsion angles, between 12.3° and 43.8° .

Finally, a simulation in SolidWorks CFD is performed to study the profile's behavior when exposed to wind (5 m/s). A comparison with the data obtained in XFLR5 shows a high similarity, allowing us to infer that the initially obtained results in XFLR5 are consistent with the modeled behavior.

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN	1
Capítulo 2 OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo general.....	3
2.2 Objetivos específicos	3
Capítulo 3 PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	4
Capítulo 4 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	7
4.1 Definiciones referentes a turbinas / energía eólica	7
4.2 Antecedentes de investigación	27
4.3 Estado del Arte.....	30
Capítulo 5 METODOLOGÍA	32
5.1 Primera fase: Definición de zonas ZNI y potencia de generación objetivo.....	32
5.2 Segunda Fase: Selección de perfiles aerodinámicos para estudio	36
5.3 Tercera Fase: Modelación de perfiles alares en Software XFOIL/XFLR5	42
5.3.1 Importar y cargue del perfil en el software de modelación	42
5.3.2 Parámetros y criterios de evaluación de los perfiles alares seleccionados	43
5.3.2.1 Definición de Parámetros.....	43
5.3.2.2 Definición de Criterios de Evaluación.....	48
5.3.3 Análisis de los 8 perfiles aerodinámicos seleccionados con XFLR5	50
5.3.3.1 Análisis de perfiles de estudio en el Gráfico C_l vs α	50
5.3.3.2 Análisis de perfiles de estudio en el Gráfico C_d vs C_l	53
5.3.3.3 Análisis de perfiles de estudio en el Gráfico C_d vs C_l vs α	54
5.3.3.4 Análisis de perfiles de estudio respecto al Coeficiente de presiones (C_p)	57
5.3.4 Selección de 2 perfiles óptimos y su combinación para obtener perfil mixto final UR001	63
5.3.5 Análisis del perfil aerodinámico UR001 con SOLID WORKS.....	69
5.3.5.1 Fluid Simulation de SolidWorks (CFD) vs XFLR5	69
5.3.5.2 Definición de parámetros iniciales y fórmulas para cálculo de C_l y C_d	71
5.3.6 Impresión 3D del perfil aerodinámico UR001.....	73
Capítulo 6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	75
Capítulo 7 CONCLUSIONES	81
REFERENCIAS.....	84
APÉNDICES.....	86
Apéndice 1. Comportamiento de la velocidad del viento a diferentes ángulos de ataque del perfil UR001	86
Apéndice 2. Puntos X,Y,Z del perfil UR001	96
Apéndice 3. Cálculos de desviación estándar para resultados SolidWorks vs XFLR5 perfil UR001	102

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estimación de cargas en casa tipo ZNI.....	35
Tabla 2. Cálculo del ángulo de torsión óptimo y longitud de cuerda	44
Tabla 3. Cálculo de #Reynolds aplicables al álabe objetivo.....	45
Tabla 4. Número resultante de celdas después de varios niveles de refinamiento que actúan sobre una celda inicial.....	47
Tabla 5. Coeficientes de sustentación C_l máximos vs α	51
Tabla 6. Coeficientes de sustentación C_l positivos vs $\alpha = 0$	52
Tabla 7. Ángulos de ataque α en los que inicia capacidad de sustentación	53
Tabla 8. Coeficientes de sustentación C_l máx. vs Coeficientes de arrastre C_d min	54
Tabla 9. Obtención de C_l/C_d máximo para α óptimo	55
Tabla 10. C_l/C_d máximos a $\alpha=0$	56
Tabla 11. Ángulos de ataque α para C_l máx y C_l/C_d máx.....	57
Tabla 12. C_p mínimos y máximos a valores de α óptimos	61
Tabla 13. Comparativo de variables de perfiles preseleccionados vs perfil mixto.....	64
Tabla 14. Resultados Simulación CFD con SolidWorks	76
Tabla 15. Variables para cálculo de Coeficiente de potencia de aerogenerador	79
Tabla 16. Cálculo de coeficiente de potencia aerogenerador tipo	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localidades ZNI de Colombia identificadas por el IPSE y monitoreadas por el CNM.	5
Figura 2. Flujo idealizado a través de una turbina eólica representado en un disco actuador sin rotación.	11
Figura 3. Coeficientes de potencia y empuje en función del factor de inducción axial.	12
Figura 4. Geometría para el análisis del rotor.	14
Figura 5. Coeficiente de potencia máximo teórico como función de la tip speed ratio para una turbina ideal con y sin rotación de estela.	15
Figura 6. Esquema de los elementos del álabe (palas).	16
Figura 7. Geometría del álabe para el análisis de una turbina eólica de eje horizontal.	17
Figura 8. Esquema de variación del coeficiente de sustentación con el ángulo de ataque de un perfil aerodinámico.	24
Figura 9. Mapa interactivo Zonas No Interconectadas en su segundo capítulo de la sección #ColombiAprende. IPSE.	33
Figura 10. Atlas de viento y energía eólica Colombia. Promedio multianual.	34
Figura 11. Perfil de carga para una casa tipo zona ZNI.	35
Figura 12. Potencia disponible para diferentes radios de rotor R y coeficientes de potencia Cp.	36
Figura 13. Perfil de álabe a partir de 3 perfiles independientes.	38
Figura 14. Coeficientes de elevación y arrastre para varios perfiles aerodinámicos.	40
Figura 15. Perfiles aerodinámicos escogidos para estudio	42
Figura 16. Perfiles cargados en software XFLR5	43
Figura 17. Coeficiente de sustentación Cl para diferentes ángulos de ataque α	51
Figura 18. Coeficiente de sustentación Cl vs Coeficiente de arrastre Cd	54
Figura 19. Cl/Cd vs α	55
Figura 20. Gráfica Cp vs X, perfil Wortmann FX60-126	58
Figura 21. Gráfica Cp vs X, perfil SG6043	58
Figura 22. Gráfica Cp vs X, perfil SG6042	59
Figura 23. Gráfica Cp vs X, perfil NACA 4415	59
Figura 24. Gráfica Cp vs X, perfil NACA 0018	59
Figura 25. Gráfica Cp vs X, perfil GOE (AF300)	60
Figura 26. Gráfica Cp vs X, perfil NACA 4412	60
Figura 27. Gráfica Cp vs X, perfil CLARK Y	60
Figura 28. Variación de parámetros para optimización de perfil mixto UR001	65
Figura 29. Nuevo perfil optimizado UR001	66
Figura 30. Gráfica Cl/Cd vs α para el nuevo perfil optimizado UR001	66
Figura 31. Gráfica Cl vs α para el nuevo perfil optimizado UR001	67
Figura 32. Gráfica Cd vs Cl para el nuevo perfil optimizado UR001	67
Figura 33. Gráfica Cp vs X, perfil UR001	68
Figura 34. Impresión 3D de prototipo perfil aerodinámico UR001 en PLA	74
Figura 35. Gráfica Cl vs α del perfil UR001 con datos simulación SolidWorks	76
Figura 36. Gráfica Cl/Cd vs α del perfil UR001 con datos simulación SolidWorks	77
Figura 37. Velocidad del viento simulada en eje X SolidWorks perfil UR001 $\alpha = 0^\circ$	78

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

En un mundo cada vez más preocupado por el cambio climático y la necesidad de reducir la dependencia de los combustibles fósiles, los sistemas de generación de energía eléctrica basados en fuentes renovables no convencionales, han adquirido una importancia creciente. En este contexto, las turbinas eólicas se han destacado como una solución prometedora al aprovechar la energía cinética del viento para producir electricidad de manera sostenible.

El presente documento se centra en el diseño y construcción de un prototipo de álabe para aerogeneradores de baja potencia. Los álabes desempeñan un papel fundamental en la eficiencia y rendimiento de las turbinas eólicas, ya que son responsables de capturar la energía cinética del viento y convertirla en energía mecánica para su posterior conversión en electricidad. El objetivo principal de este estudio es analizar diversos perfiles aerodinámicos y optimizar el diseño del álabe para maximizar la extracción de energía a través de la mejora de la relación sustentación/arrastre.

Uno de los desafíos clave que se aborda en este estudio es el problema de desprendimiento en la capa límite que afecta a los aerogeneradores de eje horizontal de baja potencia disponibles en el mercado. Estos aerogeneradores, especialmente diseñados para funcionar a bajas velocidades de viento, presentan limitaciones en cuanto a su capacidad para aprovechar eficientemente la energía eólica disponible. Mediante el análisis de los coeficientes de desempeño aerodinámico y el modelamiento en software especializado para varios perfiles alares, se logró desarrollar un perfil aerodinámico optimizado de álabe que minimiza los problemas de desprendimiento y maximiza la generación de energía. Es de anotar, que el análisis realizado permitió establecer cada rendimiento individual, a partir de lo cual se rediseñó de manera continua el perfil óptimo que capaz de extraer la máxima cantidad de energía a partir de la maximización de la relación sustentación/arrastre

Al revisar la información que se obtuvo de los coeficientes de desempeño aerodinámicos, se analizó su forma geométrica para así realizar su modelamiento en el software XFOIL/XLRF5, permitiendo que su resultado lograra un diseño con buen rendimiento en función de la energía extraída. El diseño escogido final, se construyó a escala mediante impresión 3D, luego de ser modelado en SolidWorks, y se revisó su desempeño a través de túnel de viento, comparando estos resultados con la simulación inicial.

El presente estudio pretende como consecuencia de su desarrollo, contribuir al avance de la tecnología eólica en zonas no interconectadas de Colombia, las cuales representan una parte significativa del territorio del país y presentan desafíos particulares en términos de acceso a la electricidad de calidad. La falta de cobertura de la red eléctrica convencional en estas regiones ha impulsado la búsqueda de soluciones energéticas autónomas y sostenibles. En este sentido, la implementación de aerogeneradores de baja potencia con álabes optimizados podría ofrecer una alternativa viable para satisfacer las necesidades energéticas de estas comunidades.

Además, se busca diseñar el álabe utilizando materiales y recursos locales, con el fin de reducir los costos de implementación y promover la sustentabilidad económica de los proyectos. El acceso a energía eléctrica asequible y confiable puede tener un impacto transformador en la calidad de vida de las comunidades en zonas periféricas, cubriendo necesidades básicas y brindando oportunidades de desarrollo.

Capítulo 2

OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Diseñar y construir un prototipo de álabe, para un generador horizontal de baja potencia, que funcione con velocidades de viento dadas en zonas no interconectadas de Colombia.

2.2 Objetivos específicos

- Analizar las velocidades de viento, dadas en zonas no interconectadas de Colombia.
- Evaluar 8 diferentes perfiles alares que operen a bajas velocidades del viento, y que expresen un mejor comportamiento.
- Escoger dos perfiles alares y desarrollar un perfil nuevo combinado a partir de ellos, del cual se evaluará su eficiencia en términos de aprovechamiento del recurso eólico.
- Construir el prototipo de perfil aerodinámico en 3D.
- Realizar simulaciones en SOLIDWORKS y su herramienta Flow Simulation (CFD) con el fin de estimar la eficiencia del perfil alar construido en términos de coeficiente de sustentación y coeficiente de arrastre, emulando de forma parcial un túnel de viento real.

Capítulo 3

PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

En las zonas apartadas de Colombia, y alejadas del Sistema Interconectado Nacional (SIN), el acceso a la energía eléctrica de calidad, a bajo costo, y generada a partir de recursos renovables, representa una mejora de suma importancia en la calidad de vida de la población. Lo anterior, en conjunto con el acceso a comunicaciones (internet), representa un salto cualitativo para poder salir del ciclo de pobreza.

Estos problemas que se registran en de forma acentuada en las regiones denominadas como Zonas No Interconectadas (ZNI) del país, se han debido a la presencia de barreras sociales, políticas y técnicas, como la ausencia de un amplio conocimiento de soluciones energéticas de fuentes renovables, carencias de personal capacitado y falta de recursos económicos.

Lo anterior, justifica profundizar, en el diseño de perfiles alares para generadores horizontales de baja potencia, que puedan ser base para la implementación de estos a un bajo costo y con materiales locales; que además sean funcionales a las condiciones generalizadas de baja velocidad del viento en ZNI, permitiendo nuevos diseños de aerogeneradores que suplan las necesidades de las comunidades objetivo.

Dentro de las problemáticas más importantes para la población periférica en Colombia, se encuentra la falta de cobertura de la red eléctrica en varias regiones del país. Estas zonas son denominadas ZNI, representaban el 32% del área geográfica en el año 2016, con una población estimada de 2.5 millones de habitantes [1].

En el gráfico 2, se muestran con puntos de color verde, las localidades ZNI identificadas por el IPSE (Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas) y monitoreadas por el CNM (Centro Nacional de Monitoreo).



Figura 1. Localidades ZNI de Colombia identificadas por el IPSE y monitoreadas por el CNM. [1, p. 7]

Es importante destacar, que el potencial de recurso eólico en Colombia, si bien no es uno de los mejores, comparándolo con otros a nivel mundial, es favorecido con buenos vientos, catalogados entre los mejores de Sudamérica. Se estima que el país tiene un potencial de generación de alrededor de 20.000 MW en la Guajira, y otros 10.000MW en lugares como San Andrés y Providencia, Norte de Santander, Risaralda, Valle del Cauca y Huila. [2, p. 39]

El propósito de la presente investigación nace como un impulso en la búsqueda de alternativas de generación local en zonas no interconectadas (ZNI), teniendo en cuenta que el presente estudio pretende, contribuir a la construcción de aerogeneradores eficientes para bajas velocidades del viento en estas zonas geográficas, diseñando y construyendo un prototipo de álabes, para un generador horizontal de baja potencia.

Es de vital importancia que el sistema desarrollado es eficiente en términos de aprovechamiento del recurso eólico, y su construcción práctica, se realiza a partir de materiales y herramientas disponibles a nivel local. Es de tener en cuenta, que, en las ZNI, la generación de 1 Watt de potencia, puede cambiar la calidad de vida al cubrir necesidades básicas como refrigeración, comunicación e iluminación [3].

Capítulo 4

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

4.1 Definiciones referentes a turbinas / energía eólica

HAWT: "Horizontal Axis Wind Turbine" en español "Turbina Eólica de Eje Horizontal". Se refiere a un tipo de turbina eólica en el cual el eje de rotación de las palas (álabes) está dispuesto horizontalmente, es decir, paralelo al suelo. Las HAWTs son uno de los diseños más comunes de turbinas eólicas utilizadas para generar energía a partir del viento. El objetivo principal en el diseño de turbinas eólicas es maximizar la eficiencia aerodinámica o la energía extraída del viento. Sin embargo, los criterios de resistencia mecánica y los aspectos económicos también son igualmente importantes y, por lo tanto, deben tenerse en cuenta durante el diseño de las turbinas eólicas. El diseño de palas HAWT, para lograr un nivel satisfactorio de rendimiento; comienza con el conocimiento de las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre las palas. El diseño estructural de las palas HAWT también es tan importante como su diseño aerodinámico. Las cargas estructurales dinámicas que experimentará un rotor desempeñan un papel importante a la hora de determinar la vida útil del mismo. Obviamente, las cargas aerodinámicas son una fuente importante del comportamiento estructural dinámico y deben determinarse con precisión. Además, los parámetros de geometría de las palas son necesarios para el análisis de carga dinámica de los rotores de turbinas eólicas.

Alabes o palas (blades): La superficie aerodinámica que atrapa el viento.

Área de barrido (swept area): El área que cubre al girar el rotor de la turbina eólica, calculada con la fórmula $A = \pi R^2$, donde R es el radio del rotor.

Clasificación de potencia (rated output capacity): La potencia de salida de una turbina eólica operando a la velocidad de viento nominal.

Coefficiente de potencia (power coefficient): La razón de la potencia extraída del viento por una turbina eólica y la potencia disponible en la corriente de viento.

Curva de potencia (power curve): Una gráfica mostrando la potencia obtenida en una turbina eólica a través de un rango de velocidades.

Perfil aerodinámico (airfoil): La forma de la sección transversal de los alabes o palas, la cual, para las turbinas eólicas de eje horizontal más modernas, está diseñada para aumentar el empuje y mejorar el funcionamiento de las turbinas.

Razón de la velocidad de punta (tip speed ratio): La velocidad lineal a la que se mueve la punta del alabe dividida entre la velocidad del viento. Es por lo regular un requerimiento de diseño de la turbina eólica.

Rotación longitudinal (yaw): El movimiento de la parte superior de la torre que permite que la turbina eólica siempre esté de frente al viento.

Rotor: El componente rotativo de una turbina eólica, incluyendo ya sea a los alabes y su ensamble, o la porción rotatoria del generador.

Velocidad de arranque (cut-in wind speed): La velocidad del viento, para ser utilizada es necesario que alcance velocidades mínimas a las que generarán sustentación que dependen especialmente del tipo de aerogenerador y su rango oscila entre 3 y 4 m/s.

Velocidad de paro (cut-out wind speed): La velocidad del viento a la cual la turbina deja de generar electricidad, por protección de la misma.

Viento corriente abajo, sotavento (downwind): Es la ubicación de la turbina en posición contraria a la dirección del fluido, para este caso el viento, a lo cual su diseño contempla la generación de sustentación en este sentido.

Viento corriente arriba, barlovento (upwind): En el mismo lado de la dirección de donde el viento está soplando.

Ángulo de ataque α (Angle of Attack): El ángulo de ataque es el cual está formado entre la dirección del flujo de aire incidente y la línea de referencia de un cuerpo (cuerda) para este caso del perfil aerodinámico, por tanto, este parámetro influye decisivamente en la capacidad de generar sustentación a partir del fluido (aire) al que se encuentra expuesto, toda vez, que este se usa para la evaluación de perfiles aerodinámicos en pruebas experimentales determinando ángulos de ataque óptimo para cada aplicación particular. Es importante aclarar que cuando el ángulo de ataque es positivo, quiere decir que el flujo de aire incide desde abajo del perfil, y es negativo cuando el fluido de aire incide desde arriba del perfil. Este ángulo de ataque que se define en los perfiles alares tiene un rango de ataque nominal, es decir, es el ángulo de funcionamiento donde generan sustentación a condiciones del viento normal, sin embargo, actualmente los aerogeneradores usan controladores de sistema activo en cada alabe para ajustar los ángulos de ataque en tiempo real. Por ello es indispensable establecer límites inferiores y superiores de los ángulos de ataque a los que los alabes puedan ajustarse para optimizar su rendimiento [4].

Ángulo de Paso (Blade Pitch Angle) Θ : Se refiere al ángulo entre la cuerda de la pala de una turbina eólica y la dirección del flujo de viento incidente. Es un parámetro que puede ser ajustado en las palas de una turbina para controlar la captura de energía del viento y, por lo tanto, el rendimiento de la turbina. El ángulo de paso es específico para las palas de las turbinas eólicas y se relaciona con el control de su rendimiento, mientras que el ángulo de ataque es un concepto más amplio que se aplica a cualquier superficie aerodinámica y se relaciona con la interacción del flujo de aire con esa superficie. El ángulo de paso puede ajustarse para modificar el ángulo de ataque y, por lo tanto, influir en las fuerzas aerodinámicas generadas por la pala.

Los valores de ángulo de paso en las palas de las turbinas eólicas pueden variar según el diseño de la turbina, las condiciones del viento y la estrategia de operación. Los

valores específicos de ángulo de paso pueden variar ampliamente entre diferentes tipos de turbinas y fabricantes. Sin embargo, a nivel general. Se pueden definir los siguientes rangos de ángulos de paso comunes: 1) Ángulos de paso para arranque y baja potencia: En condiciones de arranque y baja potencia, los ángulos de paso tienden a ser más altos, generalmente en el rango de 5 a 10 grados. Estos valores permiten que las palas capturen eficientemente la energía del viento incluso cuando las velocidades del viento son bajas; 2) Ángulos de paso para potencia nominal: En condiciones de operación a potencia nominal, los ángulos de paso suelen estar en un rango intermedio, alrededor de 0 a 5 grados. En este rango, las palas están optimizadas para extraer la máxima cantidad de energía del viento en condiciones normales de operación; 3) Ángulos de paso para vientos fuertes: En condiciones de vientos fuertes, los ángulos de paso tienden a ser negativos (hacia un plano de pala más plano), reduciendo la captura de energía para evitar daños en la turbina debido a cargas aerodinámicas excesivas. Los valores típicos en esta situación podrían estar en el rango de -1 a -5 grados; 4) Ángulos de paso variables: Muchas turbinas modernas cuentan con sistemas de control de ángulo de paso variables. Esto significa que el ángulo de paso de las palas puede ajustarse en tiempo real para optimizar la captura de energía en función de las condiciones del viento y la carga de la turbina.

Teoría del disco actuador y Ley de Betz: También conocida como el Teorema de Betz, establece un límite teórico máximo para la cantidad de energía que puede ser extraída de un flujo de aire por una turbina eólica. Fue formulada por el físico alemán Albert Betz en 1919 y es ampliamente utilizada en el diseño y análisis de turbinas eólicas. La Ley de Betz establece que la máxima eficiencia teórica que una turbina eólica puede alcanzar es del 59.3% del poder cinético disponible en el viento que atraviesa el área barrida por las palas de la turbina. En otras palabras, no es posible extraer más del 59.3% de la energía contenida en el viento [5].

A partir de la figura 2, y asumiendo que $U_2=U_3=U_R$; el flujo másico a través del disco: $m=\rho.A.U_R$; el empuje axial, $T=0,5.\rho.A.(U_\infty^2- U_w^2)$; la velocidad del viento en el rotor, $U_R=0,5.(U_\infty+U_w)$; y el factor de inducción axial $a = (U_\infty-U_R)/ U_\infty$; definido como el

decremento fraccional de la velocidad del viento entre la corriente libre y el plano del rotor, se deduce que la potencia de salida corresponde a la siguiente expresión:

$$P = 2 \cdot \rho \cdot A \cdot a \cdot (1-a)^2 \cdot U_{\infty}^3 ; C_{pot} = 4 \cdot a(1-a)^2 \quad (1)$$

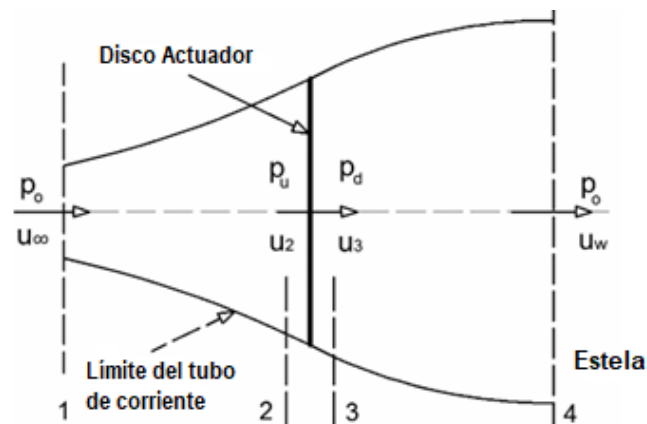


Figura 2. Flujo idealizado a través de una turbina eólica representado en un disco actuador sin rotación. [6, p. 648]

Los parámetros de rendimiento energético de una turbina eólica se pueden expresar de forma adimensional mediante el coeficiente de potencia C_{pot} . La fórmula matemática para calcular la máxima potencia teórica que una turbina eólica puede extraer, de acuerdo con la Ley de Betz, es la siguiente:

$$P_{max} = 0.5 \rho A V^3 C_{potmax} \quad (2)$$

Donde:

P_{max} es la máxima potencia teórica que puede ser extraída (en vatios).

ρ es la densidad del aire (en kg/m^3).

A es el área barrida por las palas de la turbina (en m^2).

V es la velocidad del viento (en m/s). (representada como U_{∞} en la figura 2).

C_{potmax} es el coeficiente de potencia máximo/máxima eficiencia teórica de la turbina eólica (adimensional).

C_{pot} , también puede definirse como: $C_{pot} = 4.a(1-a)^2$; de donde asumiendo $a = 1/3$ se obtiene que $C_{potmax} = 16/27 = 0,5926$ o fracción máxima posible de producción de energía. [6, p. 649]

El empuje axial sobre el disco planteado en la figura 2, se puede definir como $T=2.\rho.A.a.(1-a).U_{\infty}^2$. Definiendo $C_t = T / (0,5 \rho U_{\infty}^2.A)$, se obtiene que $C_t=4. a(1 - a)$.

El coeficiente de potencia C_{pot} , se relaciona con el coeficiente de empuje de la siguiente manera [6, p. 650]:

$$C_{pot} = \frac{P}{\frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot V^3} = 4 \cdot a(1 - a)^2 = C_t(1 - a) \quad (3)$$

C_t corresponde al coeficiente de empuje, que también puede ser escrito en términos del factor de inducción axial como: $C_t = 4.a(1-a)$. C_t tiene un máximo de 1,0 cuando $a=0,5$ y la velocidad aguas abajo (estela) es cero. A la máxima potencia de salida (cuando $a=1/3$), C_t tiene un valor de 8/9. (ver figura 3).

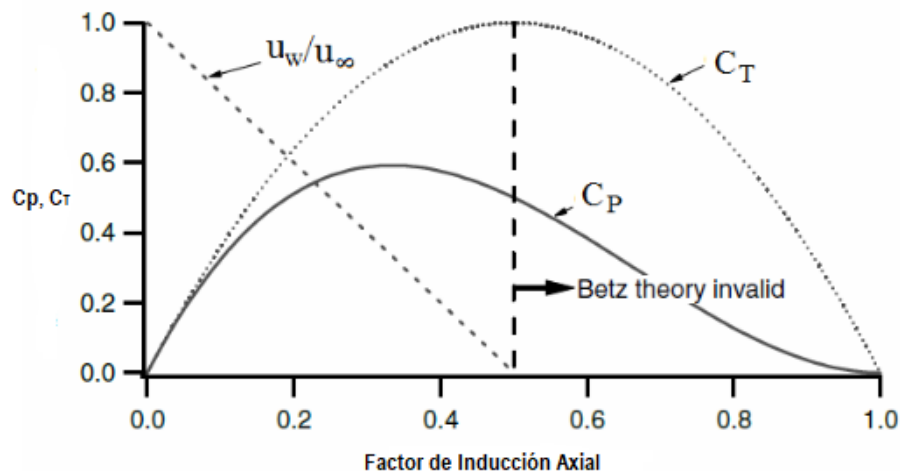


Figura 3. Coeficientes de potencia y empuje en función del factor de inducción axial. [6, p. 650]

Se debe tener en cuenta que la eficiencia general de una turbina es función tanto del coeficiente de potencia del rotor, como de la eficiencia mecánica (incluida la eléctrica); por lo tanto, la potencia máxima final se define como: $P_{max}=0.5 \rho A V^3 (\eta_{mec} \cdot C_{pot})$; donde η_{mec} , representa la eficiencia mecánica + eléctrica.

Teoría del momentum axial: Propuesta por primera vez por Rankine en 1865. Se plantea un disco actuador con un número de palas infinitas en una corriente de flujo de velocidad únicamente axial. Este disco actuador ideal, trabajando como turbina eólica, le extrae momentum y energía a la corriente de aire que pasa a través de él. La corriente de aire tiene en consecuencia una caída de presión y velocidad y por lo tanto el área de la corriente debe expandirse para que se cumpla la ley de conservación de masa [1, p. 14].

En el caso de un rotor de turbina eólica giratorio, el flujo detrás del rotor, gira en dirección opuesta al mismo, en reacción al par ejercido sobre él. La generación de energía cinética rotacional en la estela da como resultado una menor extracción de energía por parte del rotor de lo que se esperaría sin la rotación de la estela. En general, la energía cinética adicional en la estela de la turbina eólica será mayor si el par generado es mayor. Lo anterior implica que las turbinas eólicas de funcionamiento lento (con velocidad de rotación baja y par alto), experimentan más pérdidas de rotación de estela que las máquinas eólicas de alta velocidad con bajo par. [6, p. 4].

En la figura 4, se muestran los parámetros involucrados para el análisis de la teoría del momento axial. Si se supone que la velocidad angular impartida a la corriente de flujo ω , es pequeña en comparación con la velocidad angular Ω de la turbina eólica, entonces, también se puede suponer que la presión en la estela lejana es igual a la presión en la corriente de viento libre. El análisis se basa en el uso de un tubo de corriente anular de radio r y espesor dr , lo que da como resultado un área de sección transversal igual a $2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr$. La presión, rotación de estela y factores de inducción se asumen como función del radio.

Se define un factor de inducción angular como $a' = \omega / (2\Omega)$. El empuje resultante en el elemento anular dT , se puede definir de la siguiente manera [6, p. 650]:

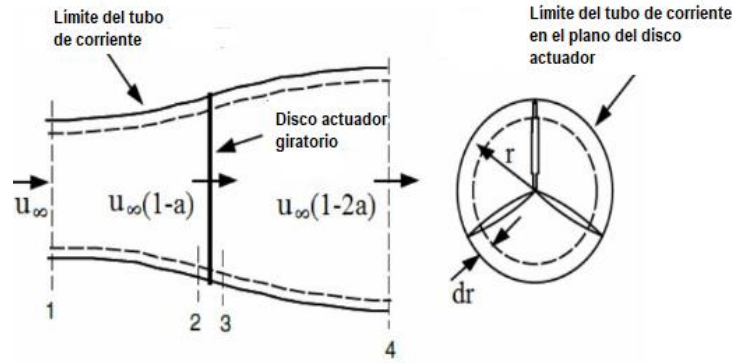


Figura 4. Geometría para el análisis del rotor. [6, p. 650]

$$dT = (P_2 - P_3)dA = \left[\rho \left(\Omega + \frac{1}{2} \omega \right) \cdot \omega \cdot r^2 \right] \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \quad (4)$$

Incluyendo el factor de inducción angular, la expresión se transforma en la siguiente: (se muestra también la equivalencia en términos del factor de inducción axial que se define como: $a = (U_\infty - U_R) / U_\infty$) (5).

$$dT = 4 \cdot a' \cdot (1 + a') \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \Omega^2 \cdot r^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr = 4 \cdot a \cdot (1 - a) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_\infty^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \quad (6)$$

A partir de estas dos ecuaciones, se determina el valor adimensional denominado “local tip speed ratio” λ_r (relación de velocidad de punta local del álabe, la cual corresponde a la relación entre la velocidad tangencial en un punto específico de la pala de la turbina y la velocidad del viento incidente en ese mismo punto).

$$\frac{a \cdot (1 - a)}{a' \cdot (1 + a')} = \frac{\Omega^2 \cdot r^2}{U_\infty^2} = \lambda_r^2 \quad (7)$$

En la punta del álabe, $r = R$, por lo que se define $\lambda = \Omega \cdot R / U_\infty$ (8). En cualquier punto r del álabe, se define entonces $\lambda_r = \Omega \cdot r / U_\infty = \lambda \cdot r / R$ (9).

Derivando una expresión para el par sobre el rotor (Q), aplicando la conservación del momento angular, tenemos:

$$dQ = 4 \cdot a' \cdot (1 - a) \cdot \frac{1}{2} \cdot U_{\infty} \cdot \Omega \cdot r^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \quad (10)$$

Y definiendo la potencia generada por cada elemento: $dP = \Omega \cdot dQ$ (11); podemos generar dos expresiones para dP y dC_{pot} , en función de λ_r , λ , a y a' (relaciones de velocidad de punta tip speed ratio y factores de inducción axial y angular).

$$dP = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U_{\infty}^3 \cdot \left[\frac{8}{\lambda^2} \cdot a' \cdot (1 - a) \cdot \lambda_r^3 \cdot d\lambda_r \right] \quad (12)$$

La contribución incremental en el coeficiente de potencia C_{pot} , de cada anillo, viene dada por [6, p. 651]:

$$dC_{pot} = \frac{dP}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U_{\infty}^3} ; \text{ luego } C_{pot} = \frac{8}{\lambda^2} \cdot \int_0^{\lambda} a' \cdot (1 - a) \cdot \lambda_r^3 \cdot d\lambda_r \quad (13)$$

El resultado de la teoría general del momento se representa gráficamente en la figura 5. Se muestran los valores numéricos de C_{pot} en función de λ , con los valores correspondientes para el factor de inducción axial en la punta a_2 .

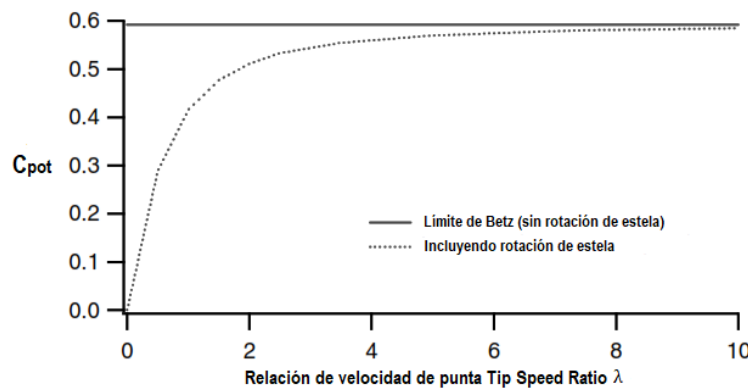


Figura 5. Coeficiente de potencia máximo teórico como función de la tip speed ratio para una turbina ideal con y sin rotación de estela. [6, p. 652]

Teoría del elemento del aspa (BEM): Esta teoría utiliza 2 suposiciones para analizar los aerogeneradores. La primera es que, al igual que la teoría del momentum lineal, el flujo se asume en un tubo de corriente que pasa a través del área disponible. Además, no existirá ninguna interferencia entre elementos infinitesimales del aspa adyacente (anillos) a un radio cualquiera a lo largo de la envergadura del aspa. La segunda suposición es asumir que una distribución de presión a lo largo de los elementos adyacentes de espesor infinitesimal, se comportan de igual manera que un perfil bi-dimensional. De esta manera, la distribución de fuerzas de un elemento puede ser calculada a través de las características de un perfil bi-dimensional con características como la longitud de cuerda (c), coeficientes aerodinámicos (C_l y C_d) y un ángulo de ataque (α) [1, p. 15].

Cómo se muestra en la figura 6, para el análisis dentro de la teoría BEM, se supone que el álabe se divide en N secciones o elementos, y la fuerza aerodinámica que actúa sobre cada uno de ellos se puede estimar a través de las fuerzas que actúan sobre la sección transversal adoptada para el perfil aerodinámico.

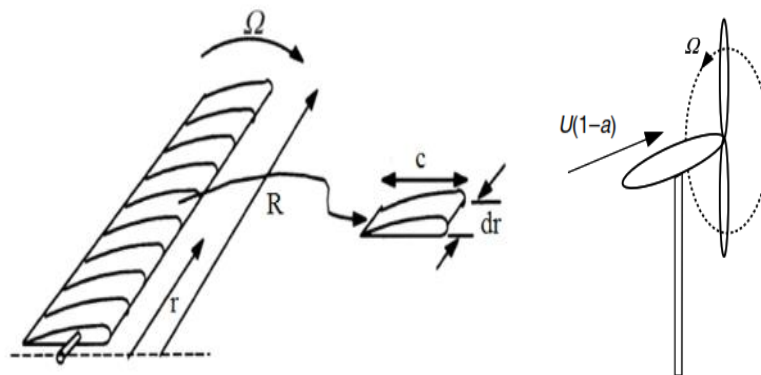


Figura 6. Esquema de los elementos del álabe (palas). [6, p. 652]

Suponiendo que cada elemento no se ve afectado por los elementos adyacentes, la fuerza sobre el álabe puede ser derivada de la suma de las contribuciones de todos los elementos a lo largo del mismo. En la figura 7, se puede observar un diagrama que muestra el elemento transversal del álabe desarrollado en el radio r , y las velocidades y fuerzas que actúan sobre éste. La velocidad relativa del viento U_{rel} , es la suma vectorial de la velocidad del viento en el rotor $U_{\infty} \cdot (1 - a)$, (correspondiente a la suma vectorial de la velocidad del

viento de la corriente libre U_∞ , y la velocidad axial inducida $-a \cdot U_\infty$; y la velocidad del viento debida a la rotación del álabe. Este componente rotacional es la suma vectorial de la velocidad de la sección $\Omega \cdot R$, y la velocidad angular inducida $a' \cdot \Omega \cdot R$. Por lo tanto, la velocidad relativa del viento, será la que se muestra en el diagrama de velocidad de la figura 7 como U_{rel} . El signo negativo en el término $U_\infty \cdot (1 - a)$, es debido al retardo del flujo que se produce mientras el aire se acerca al rotor; y el signo positivo en el término $\Omega \cdot r(1 + a')$, se debe al flujo de aire en la dirección inversa de rotación de las aspas después de que las partículas de aire las golpean y por tanto generan torsión. A partir de lo anterior, se pueden establecer las siguientes relaciones [6, p. 652]:

$$\varphi = \Theta_p + \alpha \quad (14)$$

$$U_{rel} = \frac{U_\infty \cdot (1 - a)}{\text{Sen}(\varphi)} \quad (15)$$

$$\tan(\varphi) = \frac{U_\infty \cdot (1 - a)}{\Omega \cdot r \cdot (1 + a')} = \frac{(1 - a)}{(1 + a') \cdot \lambda_r} \quad (16)$$

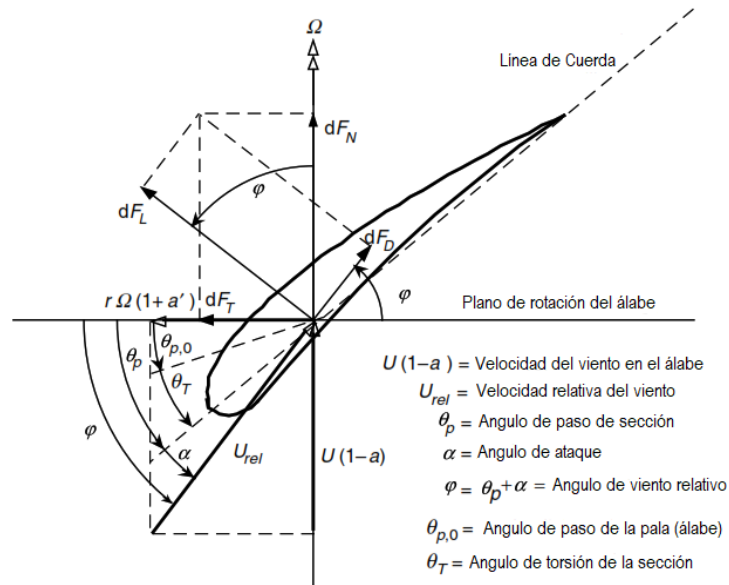


Figura 7. Geometría del álabe para el análisis de una turbina eólica de eje horizontal. [6, p. 652]

$$dF_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_{rel}^2 \cdot cdr \quad (17)$$

$$dF_L = C_L \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_{rel}^2 \cdot cdr \quad (18)$$

$$dT = dF_L \cdot \cos(\varphi) + dF_D \cdot \sin(\varphi) \quad (19)$$

$$dL = dF_L \cdot \sin(\varphi) - dF_D \cdot \cos(\varphi) \quad (20)$$

Donde: la variable dF_L , corresponde a la fuerza incremental de sustentación; dF_D , la fuerza incremental de arrastre; dF_N es la fuerza incremental normal al plano de rotación (que contribuye al empuje); y dF_T , la fuerza incremental tangencial al círculo barrido por el rotor (crea un par útil). Si el rotor tiene un número B de álabes, el empuje total normal (dT) y la fuerza tangencial (dL), pueden escribirse de la siguiente manera:

$$dT = B \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_{rel}^2 \cdot (C_L \cdot \cos(\varphi) + C_D \cdot \sin(\varphi)) \cdot c \cdot d \cdot r \quad (21)$$

$$dL = B \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_{rel}^2 \cdot (C_L \cdot \sin(\varphi) - C_D \cdot \cos(\varphi)) \cdot c \cdot d \cdot r \quad (22)$$

El par elemental debido a las fuerzas tangenciales dL , operando a una distancia L , está dado por $dQ = r \cdot dL$; Luego tenemos:

$$dQ = B \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_{rel}^2 \cdot (C_L \cdot \sin(\varphi) - C_D \cdot \cos(\varphi)) \cdot c \cdot r \cdot dr \quad (23)$$

Definiendo la ratio de solidez (solidity ratio: relación entre el área total de las palas de la turbina y el área del círculo que sería formado por las puntas de las palas cuando están en rotación) como: $\sigma = Bc / (2 \cdot \pi \cdot r)$, podemos formular finalmente las ecuaciones generales de empuje (dT) y torsión (dQ) como sigue:

$$dT = \sigma \cdot \pi \cdot \rho \cdot \frac{U_{\infty}^2 \cdot (1 - a)^2}{\sin^2(\varphi)} \cdot (C_L \cdot \cos(\varphi) + C_D \cdot \sin(\varphi)) \cdot r \cdot dr \quad (24)$$

$$dQ = \sigma \cdot \pi \cdot \rho \cdot \frac{U_{\infty}^2 \cdot (1 - a)^2}{\sin^2(\varphi)} \cdot (C_L \cdot \sin(\varphi) - C_D \cdot \cos(\varphi)) \cdot r^2 \cdot dr \quad (25)$$

Combinando las ecuaciones de la teoría general del momento axial, y teoría del elemento de aspas (BEM), podemos obtener las siguientes relaciones:

$$\frac{a}{(1-a)} = (\sigma \cdot C_L) \cdot \frac{\cos(\varphi)}{4 \cdot \sin^2(\varphi)} \cdot \left[1 + \left(\frac{C_D}{C_L} \right) \cdot \tan(\varphi) \right] \quad (26)$$

$$\frac{a'}{(1-a)} = \frac{(\sigma \cdot C_L)}{4 \cdot \lambda_r \cdot \sin(\varphi)} \cdot \left[1 - \left(\frac{C_D}{C_L} \right) \cdot \cot(\varphi) \right] \quad (27)$$

Reacomodando la anterior ecuación (27), tenemos:

$$\frac{a'}{(1+a')} = \frac{(\sigma \cdot C_L)}{4 \cdot \cos(\varphi)} \cdot \left[1 - \left(\frac{C_D}{C_L} \right) \cdot \cot(\varphi) \right] \quad (28)$$

Desarrollando el coeficiente de potencia general del rotor C_{pot} a partir de las ecuaciones (8), (10) y (22), tenemos [6, p. 654]:

$$C_{pot} = \frac{2}{\lambda^2} \cdot \int \sigma \cdot C_L \cdot \frac{(1-a)}{\sin(\varphi)} \cdot \left[1 - \left(\frac{C_D}{C_L} \right) \cdot \cot(\varphi) \right] \cdot \lambda_r^2 \cdot d\lambda_r \quad (29)$$

$$C_{pot} = \frac{8}{\lambda^2} \cdot \int_{\lambda_h}^{\lambda} \lambda_r^3 \cdot a' \cdot (1-a) \cdot \left[1 - \left(\frac{C_D}{C_L} \right) \cdot \cot(\varphi) \right] \cdot d\lambda_r \quad (30)$$

Donde λ_h al tip speed ratio en el centro de la turbina (hub). Nótese que para $C_D \approx 0$, la ecuación (30), se convierte en la ecuación integral (13).

Tip loss factor: Factor de pérdida en la punta. Se refiere a una corrección que se aplica para tener en cuenta la disminución en la eficiencia de las palas de una turbina eólica en su extremo o punta debido a efectos aerodinámicos. En las ecuaciones descritas para la teoría BEM, se supuso que el rotor contenía un número infinito de álabes, y como consecuencia la velocidad radial de flujo a través del plano del rotor y en la estela, se asumió despreciable. Sin embargo, cerca del límite de la estela, el aire tiende a fluir a través de los bordes de las puntas de los álabes, y adquiere una velocidad radial importante. Debido a que la presión en el lado de succión de un álabe es menor que en el lado de

presión, se causa que el aire fluya alrededor de la punta, desde la superficie inferior a la superior, lo que reduce la sustentación y la producción de energía cerca de la punta. Se han sugerido diversos métodos para incluir este efecto de pérdida, como por ejemplo el de L. Prandtl, mostrada en la siguiente expresión [6, p. 654]:

$$F = \frac{2}{\pi} \cdot \cos^{-1} \left[e^{\left[\frac{-\frac{B}{2} \left[1 - \frac{r}{2} \right]}{r \cdot \sin(\varphi)} \right]} \right] \quad (31)$$

La aplicación de este factor, corrige las ecuaciones (6) y (10) mostradas en este documento, quedando de la siguiente manera:

$$dT = 4 \cdot F \cdot a \cdot (1 - a) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U_{\infty}^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \quad (32)$$

$$dQ = 4 \cdot F \cdot a' \cdot (1 - a) \cdot \frac{1}{2} \cdot U_{\infty} \cdot \Omega \cdot r^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \quad (33)$$

De lo anterior se deduce, que el efecto de pérdida de punta (tip loss factor) reduce ligeramente el empuje y el par aportados por los elementos cercanos a las puntas de los álabes.

Desarrollando la ecuación (30) e incluyendo F, el coeficiente de potencia se puede expresar de la siguiente forma [6, p. 654]:

$$C_{pot} = \frac{8}{\lambda^2} \cdot \int_{\lambda_h}^{\lambda} \left[F \cdot \sin^2(\varphi) \cdot [(\cos(\varphi) - \lambda_r \cdot \sin(\varphi)) \cdot [\sin(\varphi) + \lambda_r \cdot \cos(\varphi)]] \cdot \left[1 - \left(\frac{C_D}{C_L} \right) \cdot \cot(\varphi) \right] \cdot \lambda_r^2 \right] \cdot d\lambda_r \quad (34)$$

Selección de perfil aerodinámico en el diseño de álabes HAWT: El diseño de un álabe HAWT, depende del conocimiento sobre las propiedades de los perfiles aerodinámicos. El factor de flujo más significativo en el comportamiento de los perfiles aerodinámicos es la viscosidad, la cual es caracterizada a través del número de Reynolds.

Los perfiles aerodinámicos utilizados en las turbinas eólicas modernas, varían en tamaño, desde aproximadamente 0,3 metros en turbinas de pequeña escala, hasta 2 metros, en un rotor en escala de megavatios. Las velocidades de las puntas pueden oscilar entre 45 y 90 m/s. Luego, el número de Reynolds oscila entre aproximadamente 500.000 y 10.000.000. Las características de sustentación y resistencia de los perfiles aerodinámicos, también muestran una dependencia significativa de la relación de aspecto (relación entre la envergadura y la cuerda del perfil), en ángulos de ataque mayores a 30 grados. Sin embargo, en la región donde una HAWT está operando en estado de molino de viento (windmill - situación en la que una turbina eólica no está generando electricidad de manera activa debido a velocidades de viento bajas o insuficientes, y las palas de la turbina suelen estar estacionarias o girar lentamente), ésta no se ve muy afectada por la relación de aspecto, por lo que se pueden usar datos bidimensionales (es decir relación de aspecto infinita), en el diseño de álabes con ángulos de ataque bajos. Sin embargo, cuando se realice esta simplificación, debe agregarse el factor de pérdida de punta definido en la ecuación (31).

Existen diversos requisitos de ingeniería referentes a la selección del perfil aerodinámico de una turbina eólica, los cuales incluyen: rendimiento, capacidad estructural, resistencia y rigidez, capacidad de fabricación y mantenibilidad. Habitualmente se supone que la alta sustentación y baja resistencia son deseables para un perfil aerodinámico. La relación de arrastre a sustentación (drag to lift ratio) denominada relación de planeo (glide ratio) $\gamma = C_D/C_L$ (35), es una consideración crítica, al igual que la relación contraria, relación sustentación-arrastre C_L/C_D (lift to drag ratio) (36).

Diseñar una forma de álabe a partir de un perfil aerodinámico, de forma óptima, significa determinar los parámetros de forma del álabe: distribución de la longitud de la cuerda y distribución de la torsión a lo largo de la longitud del mismo para una determinada relación de velocidad de punta λ_r , de relación de planeo γ , y el factor de pérdida de punta F . Para obtener el valor de C_{pot} máximo, es necesario hacer que el coeficiente de potencia elemental sea máximo para cada elemento del álabe; es decir que cada término en la

integral de la ecuación (34), debe ser máximo. Cómo se puede observar en esta ecuación, C_{pot} depende de (φ) , λ_r , C_D/C_L , y F .

Con el fin de obtener una relación de planeo C_D/C_L mínima, se puede establecer una relación entre (φ) y λ_r , que permita determinar el ángulo de viento relativo óptimo (φ) , para una determinada relación de velocidad de punta local λ_r . Esto se puede realizar optimizando el siguiente término [6, p. 656]:

$$\varphi_{\text{optimo}} = \text{Maximizar} \left\{ F \cdot \text{sen}^2(\varphi) \cdot [(\cos(\varphi) - \lambda_r \cdot \text{sen}(\varphi)) \cdot [\text{sen}(\varphi) + \lambda_r \cdot \cos(\varphi)]] \cdot \left[1 - \left(\frac{C_D}{C_L} \right) \cdot \cot(\varphi) \right] \right\} \quad (37)$$

Cuando se trazan los valores óptimos de (φ) , respecto a λ_r , en los cuales C_{pot} para cada elemento es máximo, para una amplia gama de valores de C_D/C_L , se ha descubierto que la relación es casi independiente de C_D/C_L y F . Luego la ecuación (37) se puede reescribir como:

$$\varphi_{\text{optimo}} = \text{Maximizar} \{ F \cdot \text{sen}^2(\varphi) \cdot [(\cos(\varphi) - \lambda_r \cdot \text{sen}(\varphi)) \cdot [\text{sen}(\varphi) + \lambda_r \cdot \cos(\varphi)]] \} \quad (38)$$

Derivando parcialmente respecto a (φ) , se obtiene el siguiente resultado :

$$\varphi_{\text{optimo}} = \frac{2}{3} \tan^{-1} \left(\frac{1}{\lambda_r} \right) \quad (39)$$

El procedimiento para el diseño de un álabe, comienza dividiendo la longitud del mismo en un número N de elementos. El λ_r local para cada uno de esos elementos puede ser calculado como: $\lambda_{r,i} = \lambda \cdot (r_i/R)$ (37), y el ángulo óptimo relativo del viento de cada elemento:

$$\varphi_{\text{optimo},i} = \frac{2}{3} \tan^{-1} \left(\frac{1}{\lambda_{r,i}} \right) \quad (40)$$

El tip loss factor para cada elemento, se calcula como sigue:

$$F_i = \frac{2}{\pi} \cdot \cos^{-1} \left[e^{\left[\frac{-\frac{B}{2} \left[1 - \frac{r_i}{2} \right]}{r_i \cdot \text{sen}(\varphi_{\text{opt},i})} \right]} \right] \quad (41)$$

La distribución de la longitud de la cuerda, puede ser calculada, para cada elemento del álabe mediante la siguiente ecuación:

$$c_i = \frac{8 \cdot \pi \cdot r_i \cdot F_i \cdot \text{sen}(\varphi)_{\text{opt},i}}{B \cdot C_{L \text{ diseño}}} \cdot \frac{\cos(\varphi)_{\text{opt},i} - \lambda_{r,i} \cdot \text{sen}(\varphi)_{\text{opt},i}}{\text{sen}(\varphi)_{\text{opt},i} + \lambda_{r,i} \cdot \cos(\varphi)_{\text{opt},i}} \quad (42)$$

Donde $C_{L \text{ diseño}}$, se elige cuando la relación de planeo (glide ratio) γ , es mínima en cada elemento del álabe (o donde C_L/C_D es máximo).

La ratio de solidez (solidity ratio) σ , puede ser calculada como: $\sigma_i = Bc_i / (2 \cdot \pi \cdot r_i)$ (43), para cada elemento del álabe; mientras que la distribución de torsión τ , (cambio en el ángulo de torsión a lo largo de la envergadura del perfil aerodinámico, el cual corresponde a la diferencia en el ángulo de ataque α , entre la raíz y la punta del mismo), puede ser derivado del ángulo de velocidad relativa del viento como sigue: $\tau_i = \varphi_{\text{opt},i} - \alpha_{\text{diseño}}$, (44) donde $\alpha_{\text{diseño}}$, es el ángulo de ataque correspondiente al $C_{L \text{ diseño}}$.

Finalmente, C_{pot} puede ser calculado resolviendo la integral de la ecuación (34), quedando la siguiente sumatoria (para cada elemento en que se dividió el álabe inicialmente) [6, p. 657]:

$$C_{\text{pot}} = \sum_{i=1}^N \left[\frac{8 \cdot \Delta \cdot \lambda_r}{\lambda^2} \cdot \left[F_i \cdot \text{sen}^2(\varphi)_{\text{opt},i} \cdot \left[(\cos(\varphi)_{\text{opt},i} - \lambda_{r,i} \cdot \text{sen}(\varphi)_{\text{opt},i}) \dots \cdot \left[\text{sen}(\varphi)_{\text{opt},i} + \lambda_{r,i} \cdot \cos(\varphi)_{\text{opt},i} \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{C_D}{C_L} \right) \cdot \cot(\varphi)_{\text{opt},i} \right] \cdot \lambda_{r,i}^2 \right] \right] \right] \quad (45)$$

Con la anterior formulación matemática, para un perfil aerodinámico seleccionado, una relación punta velocidad y longitud de pala específicas, la forma del álabe puede diseñarse de forma óptima, a partir de maximizar el coeficiente de potencia C_{pot} , el cual nos indica la potencia máxima que se puede extraer a partir de cualquier velocidad del viento promedio encontrada.

Selección de valores para la tip speed ratio λ_r : Este valor, se escoge de acuerdo al tipo de aplicación. Por ejemplo, cuando se requieren torques grandes (bombeo de agua por molino), se usa $1 < \lambda < 3$; mientras que para generación eléctrica, se usa generalmente $4 < \lambda < 10$.

El número de álabes de un aerogenerador, se sugiere dependiendo de λ ; así: $\lambda = 1$, $B = 8$ a 24 ; $\lambda = 2$, $B = 6$ a 12 ; $\lambda = 3$, $B = 3$ a 6 ; $\lambda = 4$, $B = 3$ a 4 ; $\lambda > 4$, $B = 1$ a 3 . [7, p. 134]

Coefficiente de Sustentación (Cl - Lift): Es una magnitud adimensional, que se utiliza en aerodinámica con el fin de describir la capacidad de un objeto, para generar sustentación en un flujo de aire; esta sustentación es la fuerza aerodinámica perpendicular al flujo de aire que actúa sobre el objeto en movimiento.

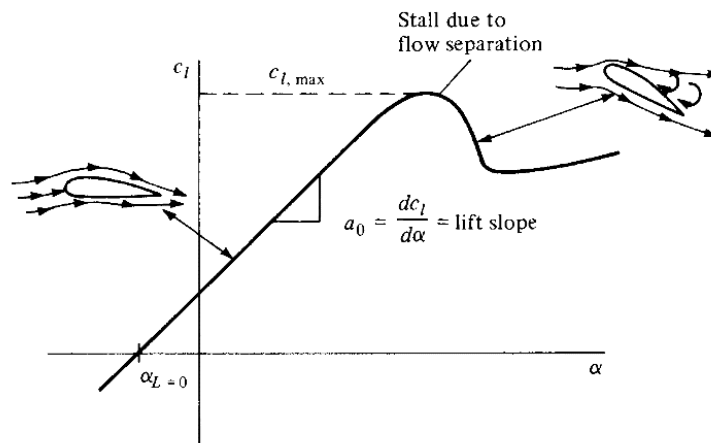


Figura 8. Esquema de variación del coeficiente de sustentación con el ángulo de ataque de un perfil aerodinámico. [4, p. 47]

Este coeficiente se denota en generalmente como C_l , e incluso en el software de modelación usado en el desarrollo de este trabajo; por lo que un C_l más alto indica una mayor capacidad de generación de sustentación, sin embargo, este depende del ángulo de ataque, la dirección del flujo de aire y la cuerda del perfil alar, toda vez que, existen valores en el análisis de los perfiles que se consideran óptimos para maximizar la sustentación antes de alcanzar el punto de pérdida también denominado “stall” [4]. En la figura 8, se observa la variación típica del coeficiente de sustentación con el ángulo de ataque en un perfil aerodinámico.

Coeficiente de arrastre o resistencia (C_d - Drag): Es una medida adimensional, que se usa para cuantificar el arrastre o resistencia aerodinámica experimentada por un objeto en un flujo de aire, por tanto esta fuerza aerodinámica es la que actúa en dirección opuesta al flujo de aire, que se basa en la fricción y en la formación de vórtices en el flujo, este coeficiente se denota generalmente como C_d , por tanto, un C_d más bajo indica una menor resistencia aerodinámica, es decir, se busca la minimización del coeficiente de resistencia para reducir las pérdidas de energía, y mejorar la eficiencia del objeto en movimiento. Este se usa en conjunto con el coeficiente de sustentación (C_l) para comprender el rendimiento aerodinámico global cuando se expone a diferentes flujos de aire. Por tanto, para examinar el gráfico extraído de cada perfil alar, y su comportamiento general, se debe evaluar cómo cambia el coeficiente de resistencia a medida que varía la variable independiente siendo una función del ángulo de ataque, el número de Reynolds, u otro parámetro; si el C_d se mantiene constante, aumenta o disminuye a medida que la variable independiente cambia, esto indica la influencia de la variable independiente en la resistencia aerodinámica, por ende, se busca los puntos notables en los gráficos, como picos o puntos de inflexión, que pueden llegar a indicar transiciones en el flujo, cambios significativos en la geometría o comportamientos relevantes asociados a la resistencia aerodinámica [4].

Número de Reynolds (Re): El número de Reynolds se utiliza para evaluar el comportamiento de un perfil alar, definiendo la relación entre las fuerzas inerciales y las

fuerzas viscosas en un flujo de fluido alrededor de un objeto, para determinar su comportamiento en diferentes velocidades de viento, viscosidad cinemática del fluido y longitud característica, este parámetro se usa como un análisis de resistencia aerodinámica, por ello, podemos dos tipos de flujos de fluido: laminar y turbulento, el flujo laminar se caracteriza por un movimiento ordenado de partículas del fluido, como si fueran laminas paralelas, entre sí, y sin entremezclarse , por otro lado o contrario encontramos el flujo turbulento donde las partículas del fluido se describen por medio de un movimiento caótico y aleatorio [7]; donde se define por la siguiente ecuación [8], [6, p. 655]:

$$Re = \frac{\rho \cdot U_{rel} \cdot c}{\mu} = \frac{U_{rel} \cdot c}{\vartheta} \quad (46)$$

Donde: U_{rel} = Velocidad relativa del viento (ver ecuación (15)).

c = Ancho de cuerda de una superficie de sustentación -airfoil

ρ = Densidad del fluido

μ = Viscosidad dinámica del fluido

ϑ = Viscosidad cinemática del fluido

Dicha clasificación se cataloga en los siguientes valores para los flujos turbulentos y laminares

Si $Re \leq 500.000$; se considera flujo laminar

Si $Re > 500.000$, se considera un flujo turbulento

Para los perfiles alares que se evalúan en su operación, se considera un número bajo de Reynolds el rango de valores entre 10.000 y 100.000. Cuando el flujo de aire se mueve sobre una superficie, como la superficie de un ala de avión o una pala de turbina eólica, se forma lo que se llama una "capa límite". Esta capa límite puede ser laminar o turbulenta, dependiendo de la velocidad del flujo y de otros factores. La capa límite laminar es más

delgada y el flujo se mueve de manera suave y ordenada, mientras que la capa límite turbulenta es más gruesa y el flujo contiene vórtices y fluctuaciones.

A medida que el flujo de aire avanza a lo largo del perfil, la capa límite tiende a volverse más gruesa y turbulenta debido a la interacción con factores como la rugosidad de la superficie, las perturbaciones en el flujo y la presión del aire circundante. La transición de una capa límite laminar a una capa límite turbulenta puede afectar significativamente las propiedades aerodinámicas del perfil, como la resistencia y la sustentación. [4].

Coefficiente de presión (C_p): Este coeficiente se define como la relación entre la presión local en un punto y la presión de atmosférica de referencia. Este coeficiente de presión se utiliza para visualizar y analizar la distribución de las presiones en diferentes ubicaciones y comprender cómo el flujo de fluido interactúa con el objeto o superficie en estudio. Un perfil aerodinámico típicamente exhibe una distribución de coeficiente de presión a lo largo de su superficie [4].

Cabe notar, que en las gráficas resultantes de los estudios de coeficientes de presión en los diferentes softwares de simulación explican en el eje Y (C_p) valores positivos que representan presiones superiores a la presión atmosférica de referencia, mientras que valores negativos representan presiones inferiores a la presión atmosférica de referencia, es decir, que los valores más negativos indican presiones más bajas lo que genera una succión más fuerte y se asocia a una mayor sustentación y en valores positivos indican presiones superiores y se relacionan a una mayor resistencia [4].

4.2 Antecedentes de investigación

Dada la gran problemática presentada por la falta de energía eléctrica, a lo largo del territorio colombiano en sus zonas más alejadas, que no se encuentran conectadas al Sistema Interconectado Nacional (SIN) y son descritas como Zonas No Interconectadas

(ZNI), el gobierno nacional colombiano, ha expedido leyes que fomentan la inversión de proyectos que permitan solventar estas necesidades básicas en todas las poblaciones afectadas. Es el caso de la ley 2099 de 2021, por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético, la reactivación económica del país y se dictan otras disposiciones; en la cual se determina la creación de un Fondo de apoyo financiero para la energización de las Zonas No Interconectadas (FAZNI), y además es enfática en proponer solventar esta problemática mediante el uso generadores que operen con fuentes de energías renovables; por lo anterior, es indispensable que el desarrollo propuesto en la presente investigación, se apoye desde la academia.

Teniendo en cuenta que según las bases de la Unidad de Planeación Minero energética UPME, las velocidades de viento promedio en las ZNI de Colombia no alcanzan el rango nominal de operación de los aerogeneradores de alta potencia, que se encuentran en el mercado, este trabajo se centra en el diseño y construcción de un prototipo de álabe para un generador horizontal de baja potencia con aplicación en las ZNI, en respuesta al fortalecimiento de los conocimientos actuales en el desarrollo de la energía eólica. Entendiendo que es un tema sobre el cual está creciendo el interés muy rápido, es importante mantenerse actualizado sobre los cambios que ocurren a nivel de mercado [9, p. 34].

La generación de energía eléctrica a partir de la velocidad del viento, requiere un rotor conectado a un generador eléctrico, esta operación aprovecha la energía cinética del viento, en la variación de su velocidad y su exposición a este fluido. Este rotor está compuesto por el cubo y los alabes que son las partes de mayor importancia para el aerogenerador. Su eficiencia depende de varios factores como el perfil aerodinámico, el tamaño de la cuerda, el ángulo de ataque o de giro o la velocidad de giro, que son elementos que deben ser evaluados con respecto al recurso eólico que se obtenga, por esto es de vital importancia este diseño del perfil aerodinámico y su ángulo de ataque, que permite

establecer la relación entre la sustentación y arrastre para cada perfil, donde se tiene su propio ángulo de ataque óptimo donde se encuentra su mejor rendimiento [10].

Es por las razones expuestas, que las turbinas de pequeños tamaños para usos en zonas residenciales y baja velocidad de viento, (parámetros de los ambientes en los que funcionan microturbinas), presentan obstáculos aerodinámicos para garantizar su eficiencia, como lo son, por ejemplo, la separación de la capa límite y el aumento del arrastre [11]. Es importante el uso de diferentes tipos de software que permitan la evaluación y desempeño aerodinámico. Una de estas herramientas es el software XFOIL [12], por intermedio del cual se obtiene información sobre los perfiles; sobre su rendimiento, comportamiento, función geométrica, y análisis de las fuerzas que se ejercen en una sección del asa, permitiendo así lograr simular la cantidad de energía que se puede extraer calculando el coeficiente de potencia [10]. Por lo anterior, la utilización de diferentes alabes, diseñados con diferentes perfiles alares, permite pronosticar buenos rendimientos, con elementos que tengan la capacidad de trabajar con parámetros bajos en cuanto a recurso eólico y su geometría reducida. Esto también permitiría la utilización de menos material para la estructura, lo cual minimizaría los esfuerzos sobre los alabes. y sus costos de construcción, permitiendo la accesibilidad a las poblaciones objeto de este estudio y respondiendo a sus problemáticas actuales.

Teniendo en cuenta que los costos actuales de la tecnología de aerogeneradores terrestres de gran potencia, que se encuentran de manera comercial, dependen de muchos factores, y hacen inviables proyectos donde el recurso eólico no se encuentra entre sus estándares de operación, los cuales corresponden a altas velocidades de viento por encima de 8 m/s. [13]. Es por la problemática planteada anteriormente, que se hace necesario impulsar la amplitud de estudios e investigaciones que permitan solventar las carencias y necesidades identificadas, con el fin de potenciar la generación de nuevos conocimientos en estos campos.

4.3 Estado del Arte

Se llevó a cabo una revisión exhaustiva de referencias bibliográficas relevantes en el campo de la aerodinámica y turbinas eólicas, con el objetivo de identificar perfiles que funcionen de manera óptima a las velocidades registradas en las zonas no interconectadas de Colombia. Los estudios más relevantes para la presente investigación, respecto al análisis de perfiles alares y su selección bajo parámetros de optimización, se describen a continuación:

En el estudio "Diseño del álabe de un aerogenerador horizontal de baja potencia" [10], se establecen preliminarmente 13 perfiles alares recopilados según aspectos como números de Reynolds por debajo de 500.000 y estudios previos relacionados con aerogeneradores de pequeño tamaño.

En el estudio "Diseño geométrico del perfil del aspa de un aerogenerador de baja potencia" [14], se evaluaron once perfiles aerodinámicos y se encontró que el perfil SG6043 presentó las mejores características en términos de la relación entre el coeficiente de sustentación y arrastre con un ángulo de ataque pequeño.

En el estudio "Revisión de los perfiles aerodinámicos apropiados para turbinas de eje horizontal y de pequeña escala en zonas boscosas" [15], se analizaron tres perfiles aerodinámicos seleccionados a partir de una revisión literaria extensa, concluyendo que el perfil SG6043 tenía el mejor desempeño.

En el estudio "Diseño de un prototipo de turbina eólica de eje vertical para pruebas de laboratorio" [16], se seleccionaron los perfiles NACA 4415 y NACA 0018 como los perfiles aerodinámicos que brindaban un mayor coeficiente de sustentación a menores velocidades de viento debido a su geometría simétrica.

En el estudio "Diseño y construcción de un prototipo de turbina eólica de eje vertical para generación a baja potencia" [17], se evaluaron tres perfiles alares y se seleccionó el perfil NACA 0018 debido a su mejor coeficiente de sustentación y arrastre.

En el estudio "Design of a low Reynolds number airfoil for small horizontal axis wind turbines" [11], se diseñó un perfil aerodinámico con bajos números de Reynolds para aplicaciones en pequeñas turbinas eólicas de eje horizontal.

Capítulo 5

METODOLOGÍA

Para comenzar con el diseño y construcción de un prototipo de álabe para un generador horizontal de baja potencia con aplicación en ZNI de Colombia, se tienen en cuenta los siguientes parámetros (que deben ser asimilados a variables independientes): a) el tamaño del aerogenerador para el cual se va a diseñar el alabe, b) la velocidad del viento que se especifica en las zonas no interconectadas de Colombia, c) las secciones de perfiles alares seleccionados que serían utilizados en el diseño y construcción del alabe; y d) densidad del material a usar para la construcción del álabe.

Respecto a los pasos asociados al desarrollo de la metodología para la presente investigación se identificaron un total de cuatro (4) fases, de las cuales se describen a continuación:

5.1 Primera fase: Definición de zonas ZNI y potencia de generación objetivo

En esta fase, se define la ubicación geográfica de las ZNI, identificándolas en el mapa publicado por la IPSE (Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para Zonas No Interconectadas), para establecer las regiones objetivas a las que se busca atender con una solución óptima.

Como se observa en la figura 9, se marcan en color amarillo las ZNI de Colombia, y en color blanco las que zonas que si hacen parte del SIN; de igual manera se clasifican por tipo de localidades, las cuales hacen referencia a características generales, como la cantidad de horas del servicio eléctrico que se presta en ciertas poblaciones, que se puede dar por generación en base a combustibles fósiles mediante planta eléctricas (Diesel) u otras fuentes

Localidades:

Tipo 1: Total, de 93 localidades con más 301 usuarios. Horas de servicio: 24

Tipo 2: 130 localidades entre 151 y 300 usuarios. Horas de servicio: 8

Tipo 3: 600 localidades que tienen entre 51 y 150 usuarios. Horas de servicio: 5

Tipo 4: 625 localidades con menos de 50 usuarios. Horas de servicio: 4

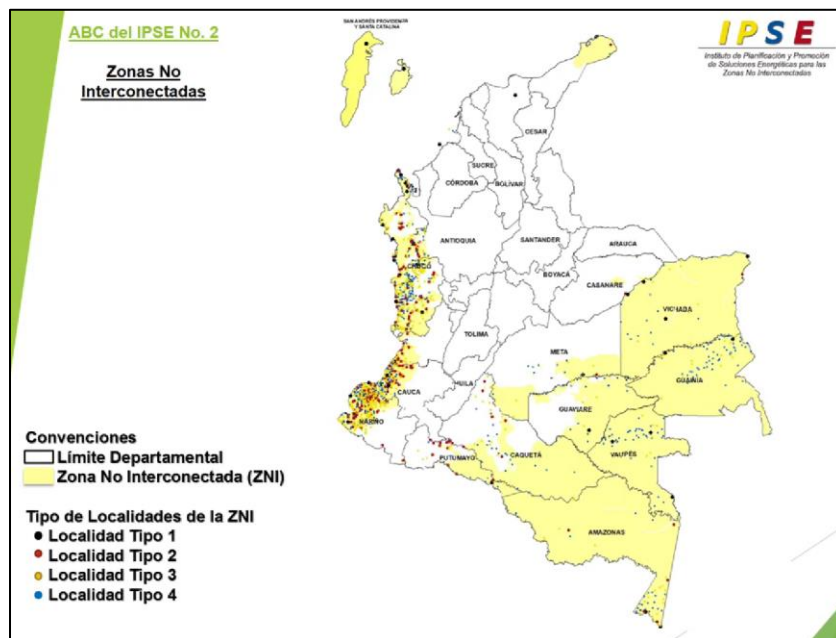


Figura 9. Mapa interactivo Zonas No Interconectadas en su segundo capítulo de la sección #ColombiAprende. IPSE

Al contar con el registro de las localidades descritas, se delimitan las ZNI de Colombia, y se establecen varias regiones, con el fin de clasificar la velocidad promedio del viento. Lo anterior, en el entendido, de que estas zonas son el área geográfica de estudio para la cual se propondrá el uso del alabe diseñado en el presente trabajo, que podrá aplicarse a las velocidades del viento correspondientes.

En la figura 10, se puede evidenciar el potencial eólico disponible que se tiene en el territorio colombiano, con una velocidad del viento multianual a una altura sobre la superficie de 10m. La figura, se obtiene de la extrapolación de datos anuales adquiridos en diferentes estaciones meteorológicas administradas por el IDEAM.

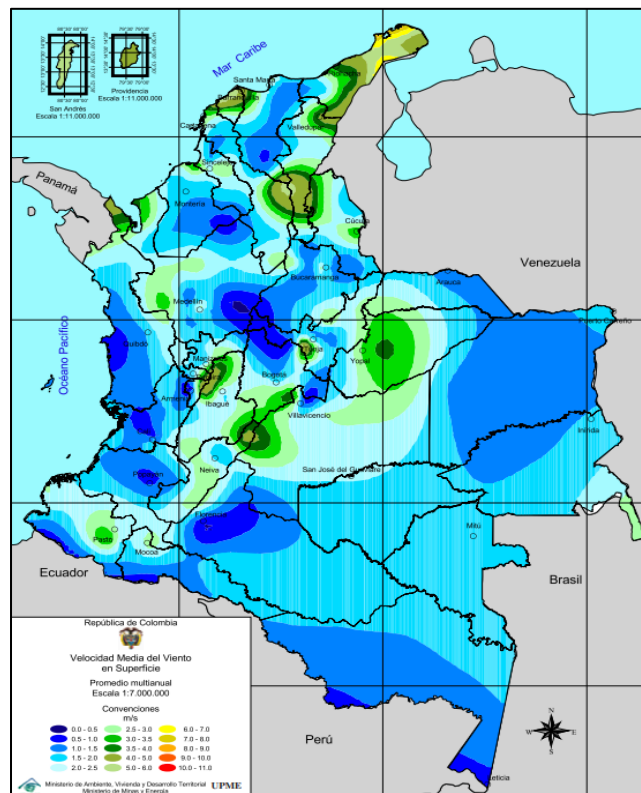


Figura 10. Atlas de viento y energía eólica Colombia. Promedio multianual. [18, p. 32]

Es de resaltar que en Colombia en todo el territorio nacional se presentan vientos inferiores a 5 m/s y son constantes a lo largo del año como se observa en la gráfica anterior, con excepción de la alta Guajira, Bolívar y el pie de monte llanero en los que se presentan velocidades de viento superiores. En vista de lo anterior, se fija como velocidad del viento objetivo para el análisis de los perfiles alares aplicables a las ZNI, $V = 5$ m/s.

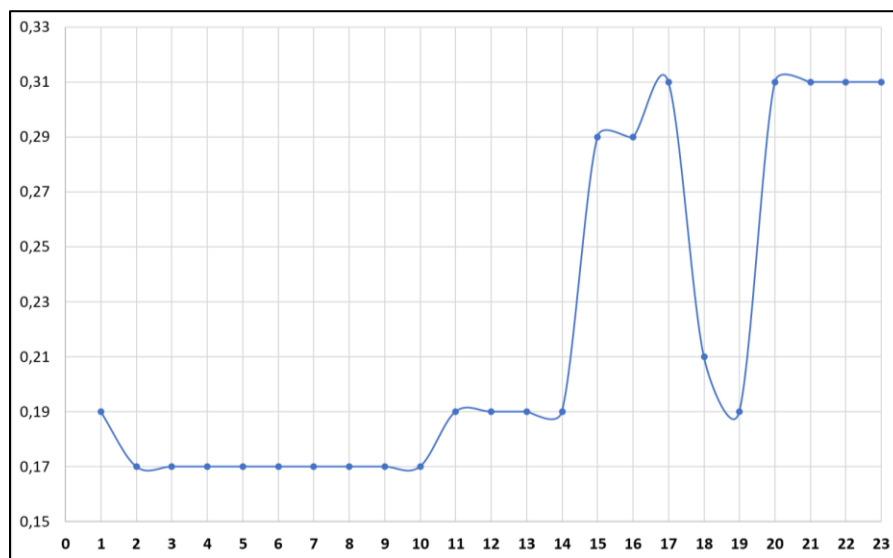
Con el fin de establecer un tamaño base objetivo del álabe prototipo, se realiza un perfil de carga tipo para una casa en ZNI. Es de anotar que se tienen en cuenta elementos básicos para mejora de la calidad de vida en zonas apartadas. Este análisis se puede observar en tabla 1 y la figura 11.

Cómo se puede observar, el consumo total diario se estima en 5 Kwh, con picos de consumo de 0,3 Kwh en horas de la tarde y noche (hasta las 24 horas).

Tabla 1. Estimación de cargas en casa tipo ZNI

Elemento	Consumo de energía eléctrica (W)	Consumo de energía eléctrica (Wh)	Tiempo de uso promedio (horas)	Consumo de energía diario (Wh)	Consumo de energía diario casa ZNI (kWh)
Iluminación	Lámpara LED	20	12,00	240	0,24
Electrodomésticos que producen calor	Ventilador	20	6,00	120	0,12
Aparatos electrónicos	Televisor LED	100	4,00	400	0,4
	Nevera pequeña	150	24,00	3600	3,6
	Computador portátil	20	8,00	160	0,16
Otros	Otros	20	24,00	480	0,48
Total día		330		5000	5
Promedio por hora				208	0,208

La estimación realizada, representa un consumo aproximado de 150 Kwh al mes, lo que está cerca del promedio de consumo eléctrico por hogar que se presentaba en el año 2015 (157 Kwh) [18, p. 8].



*Figura 11. Perfil de carga para una casa tipo zona ZNI.
Fuente: Elaboración propia*

Se establece un límite superior de radio de rotor $R = 1\text{m}$, debido a restricciones para la construcción del prototipo (materiales e impresión 3D). Las potencias calculadas para una

velocidad del viento promedio de 5 m/s, y radios de rotor de 0.25, 0.50, 0.75 y 1.00 metros, se muestran en la figura 12. La potencia disponible calculada se encuentra en 118W para un C_p de 0.5, lo que serviría para cubrir el 50% (104W) de la potencia diaria promedio total calculada en la tabla 1. (208 W). Para efectos del presente trabajo de investigación, se toma el radio de rotor objetivo $R = 1$ metro.

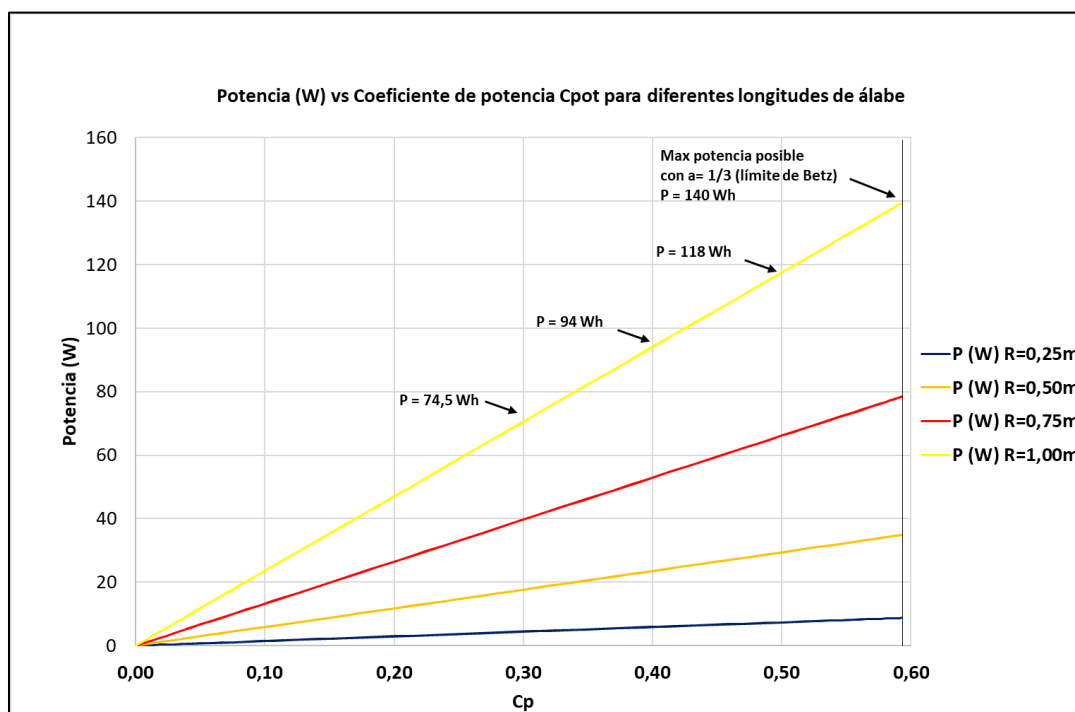


Figura 12. Potencia disponible para diferentes radios de rotor R y coeficientes de potencia C_p .

En cuanto a la rotación de los álabes, nos interesa una velocidad moderada por efectos de que se desea fabricación local, y es difícil y costoso acceder a materiales compuestos. Por lo tanto fijamos la tip speed ratio λ en 3, valor para el cual se recomienda un número de álabes B de entre 3 y 6 [19, p. 134]. Definimos 3 álabes para el rotor objetivo.

5.2 Segunda Fase: Selección de perfiles aerodinámicos para estudio

La metodología que se empleó en este punto, se basa en una selección rigurosa de perfiles alares para su posterior análisis con base en los parámetros establecidos en el presente documento.

Este desarrollo, es fundamentado con el objetivo de identificar aquellos perfiles que funcionen de manera óptima a las velocidades que se registran en el territorio nacional para las zonas no interconectadas de Colombia, por tanto, se ha desarrollado una revisión de referencias bibliográficas relevantes que van de acuerdo al presente objetivo de estudio, y que se enfocan en el campo de la aerodinámica y turbinas eólicas. Para ello, comienza con la recopilación de la información, que es pertinente para el análisis y la comparación de los resultados reportados en cada uno de estos estudios y documentos previos consultados, por tanto, han establecido un conjunto de criterios del desempeño que servirán como la base para la selección los de perfiles alares.

Este enfoque dado, para el desarrollo del documento que se basa en la literatura y conocimientos previos científicos, garantizan la fundamentación teórica y la aplicación de conocimientos consolidados en los procesos de selección, [15] , dando así, una base sólida para el desarrollo de futuras investigaciones que se enfocan en el ámbito de la aerodinámica aplicada a las turbinas eólicas de baja potencia, toda vez, que cada uno de los estudios, artículos y documentos consultados definen una justificación sólida para la selección de perfiles alares como se detalla a continuación.

Para definir los tres primeros perfiles, se investigó el documento denominado “Diseño del álabe de un aerogenerador horizontal de baja potencia” [10, pp. 219-229], en el cual se establecen de forma preliminar 13 perfiles alares, los cuales fueron recopilados según aspectos, tales como, números de Reynolds por debajo de 500.000 y la utilización de estudios previos relacionados con aerogeneradores de pequeño tamaño; de igual manera algunos de estos perfiles están diseñados en familias y son recomendados para distintas zonas y secciones del alabe con el fin de obtener un mejor aprovechamiento. Como resultado de esta selección y depuración de información, se establecieron, como parámetros de selección, números de Reynolds entre 50.000 y 150.000. Posteriormente, se evaluaron parámetros como, la relación entre el coeficiente de sustentación y el coeficiente de arrastre vs el ángulo de ataque, el coeficiente de sustentación vs el ángulo de ataque, el coeficiente de sustentación vs el arrastre, además de tener en cuenta datos geométricos como el espesor

máximo de los perfiles para su ubicación dentro del diseño del alabe. Cabe anotar que la relación entre la sustentación y el arrastre, es el parámetro más importante en el diseño de los alabes para una turbina eólica.

Como resultado de la aplicación de los parámetros descritos, se seleccionan los 3 perfiles con el mejor desempeño aerodinámico para formar el álabe: para la primera zona (la de mayor espesor raíz, en el área comprendida en la que parte de dirección del rotor hacia la punta) es tomado el perfil Wortmann FX60-126; para la zona media por su mejor comportamiento a través de todo el rango seleccionado para el número de Reynolds, es elegido el perfil SG6043; y por último para la punta es elegido por el buen comportamiento a números de Reynolds bajos y menor curvatura de perfil, es seleccionado el perfil SG6042. El resultado se observa en la siguiente figura:

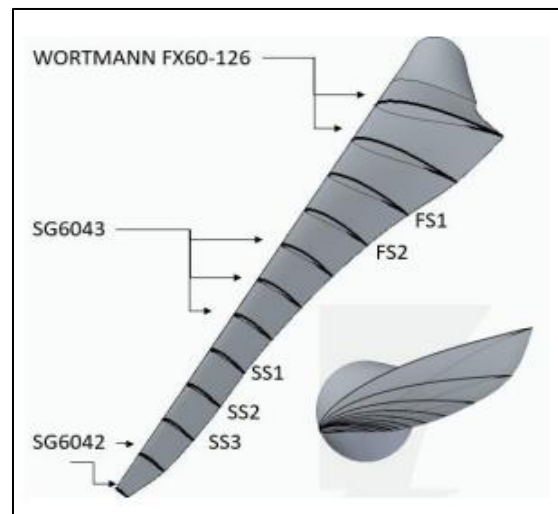


Figura 13. Perfil de álabe a partir de 3 perfiles independientes [10, p. 225]

De igual manera, en el estudio denominado “Diseño geométrico del perfil del aspa de un aerogenerador de baja potencia” [14], se encuentran resultados obtenidos al realizar la evaluación de once (11) perfiles aerodinámicos. El perfil que demostró mejores características en la relación al coeficiente de sustentación y arrastre con un ángulo de ataque pequeño fue el perfil SG6043.

Otro estudio relevante, es el denominado “Revisión de los perfiles aerodinámicos apropiados para turbinas de eje horizontal y de pequeña escala en zonas boscosas” [15] en el cual se analizan 3 perfiles aerodinámicos de uso frecuente, seleccionados a partir de una revisión literaria extensa. Los perfiles se analizan y modelan revisando el mayor potencial en las condiciones de interés, de baja velocidad de viento y alta turbulencia (como lo son las zonas boscosas), y se concluye que el mejor desempeño -eficiencia máxima- se encuentra a un ángulo de ataque menor de $3,5^\circ$ para el perfil SG6043, siendo éste, 110% y 85% más eficiente que el perfil NACA 0012 y el perfil S809 respectivamente [15].

En cuanto a la escogencia de los perfiles cuarto y quinto, se tomó como base, el estudio denominado “Diseño de un prototipo de turbina eólica de eje vertical para pruebas de laboratorio” [16], en el que la selección de los perfiles aerodinámicos se desarrolla con el fin de que las palas sean intercambiables, y se determina que el perfil que puede brindar un mayor coeficiente de potencia a menores velocidades de viento debido a su geometría asimétrica es el NACA 4415 (para un primer prototipo); y el perfil NACA 0018 (para un segundo prototipo), contando con el uso de perfiles aerodinámicos asimétricos pueden contribuir a solucionar el problema del autoarranque en las turbinas eólicas [16]

De igual manera, según lo evidenciado en el documento “Diseño y construcción de un prototipo de turbina eólica de eje vertical para generación a baja potencia”, [17], en el cual se comenta que los perfiles más comúnmente utilizados por las máquinas eólicas son de la serie NACA, se evalúan tres perfiles alares y de ellos escoge el que tiene mejor coeficiente de sustentación y arrastre determinando un rendimiento aerodinámico óptimo, a números de Reynolds bajos. El comportamiento de los perfiles se puede observar en la figura 14, en la cual se evidencia que el prototipo que presenta un mejor comportamiento en los parámetros evaluados es el perfil NACA 0018 [17]. Por tanto, basados en estos resultados, se toma la decisión de escoger este perfil.

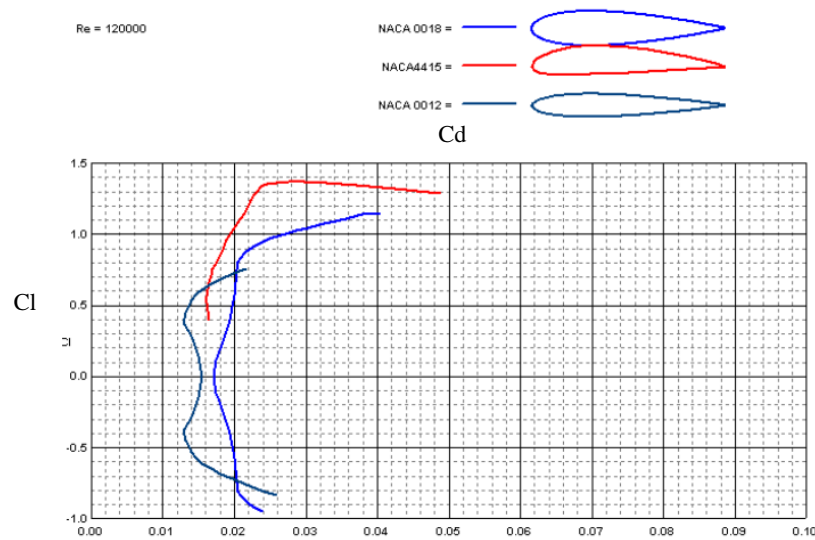


Figura 14. Coeficientes de elevación y arrastre para varios perfiles aerodinámicos.
Fuente: [17, p. 80]

Para la selección del sexto perfil aerodinámico, se investiga el documento “Design of a low Reynolds number airfoil for small horizontal axis wind turbines” [11], en el cual se diseña un perfil aerodinámico con bajos números de Reynolds, con aplicaciones en pequeñas turbinas eólicas de eje horizontal que logre un rendimiento adecuado al momento de arranque, expuesto a una baja velocidad de viento. Para lo anterior, se realizan pruebas experimentales a un perfil aerodinámico mejorado del perfil GOE300, el cual se denomina AF300 en el presente estudio; Con las modificaciones, se mejora el rendimiento y las propiedades aerodinámicas al retrasar la separación del flujo y aumentar el coeficiente de sustentación. Por tanto, para efectos de la presente investigación, se selecciona el perfil aerodinámico base, es decir, el perfil GOE300.

Referente a la selección del séptimo perfil aerodinámico, se investiga el documento denominado: “Aerodynamic Design of Horizontal Axis Wind Turbine Blades” [6], en el cual se enfatiza el desarrollo de álabes para aerogeneradores en uso, mediante un programa informático, enfocado en diseño y análisis de cargas dinámicas. En las evaluaciones de diseño se toma como base el perfil aerodinámico NACA 4412, que presenta valores óptimos de coeficiente de sustentación y arrastre a velocidades medias de viento.

Complementariamente, otro trabajo de investigación denominado “Mejora aerodinámica del perfil NACA 4412 mediante Hoyuelos esféricos: estudio CFD” [18], escoge un perfil aerodinámico, para lograr mejorar la eficiencia del mismo en alteraciones sencillas, logrando obtener una respuesta positiva de la simulación maximizando la eficiencia. Se escoge el perfil NACA 4412, siendo un perfil asimétrico, y relevante.

Y para la selección del octavo y último perfil aerodinámico, se revisa el estudio denominado “Diseño y Simulación de perfiles de aerogeneradores Horizontales a Bajo Número de Reynolds” [19]; en el cual se busca seleccionar álabes para uso en aerogeneradores de baja potencia de aproximadamente de 1 kW, a bajos números de Reynolds. Como resultado, se encuentra que el perfil con mejor eficiencia aerodinámica fue el CLARK Y, destacándose su estabilidad en el rango de ángulos entre 5° y 8° .

La revisión de la literatura permitió identificar los perfiles aerodinámicos que han demostrado un rendimiento destacado a bajas velocidades de viento, cumpliendo con los requisitos específicos de eficiencia aerodinámica, generación de sustentación y bajo arrastre, además de considerar otros aspectos relevantes, como la estabilidad y adaptabilidad a las condiciones variables del viento. En la figura 15, se presentan los perfiles aerodinámicos seleccionados.

Con la selección de perfiles alares planteados se procede a definir los parámetros de mayor relevancia que permitan la evaluación de perfiles alares aplicados a turbinas eólicas de baja potencia, basados en el estudio de Gustavo Richmond Navarro [15], a saber: número de Reynolds, ángulo de ataque, y el número de paneles del perfil.

Los perfiles aerodinámicos escogidos se simulan en el software de XFOIL/XFLR5, el cual permite la integración entre la funcionalidad para realizar cálculos y su proyección gráfica – visual, logrando así, facilidad de comparación y poder escoger el perfil aerodinámico óptimo para el presente caso de estudio.

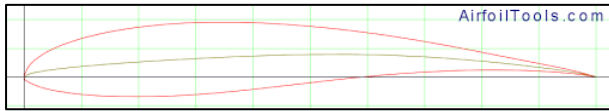
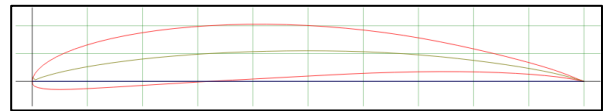
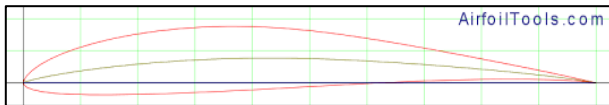
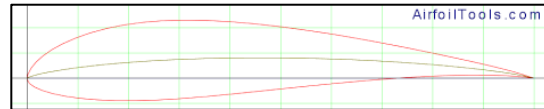
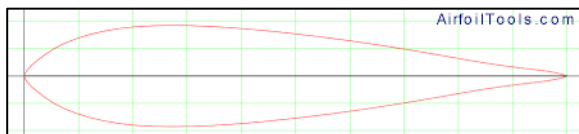
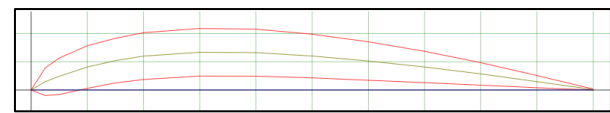
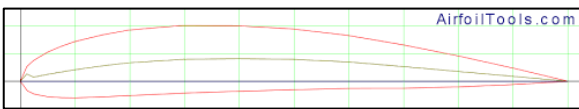
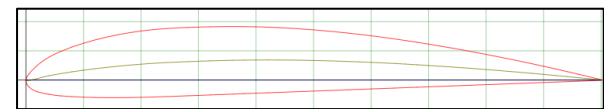
Wortmann FX60-126**SG6043****SG6042****NACA 4415****NACA 0018****GOE 300 (AF300)****NACA 4412****CLARK Y**

Figura 15. Perfiles aerodinámicos escogidos para estudio

Fuente: Elaboración propia basado en Airfoil Tools [8]

5.3 Tercera Fase: Modelación de perfiles alares en Software XFOIL/XFLR5

Para esta tercera fase, la modelación de los perfiles alares se realizó en el software XFOIL/XFLR5. Se sigue la metodología estándar del software, que incluye discretización del perfil en paneles, la simulación aerodinámica, y el análisis de resultados. Los gráficos obtenidos permiten evaluar el rendimiento del perfil alar, y se realizan iteraciones y ajustes según sea necesario para optimizar el diseño.

5.3.1 Importar y cargue del perfil en el software de modelación

La búsqueda de los puntos paramétricos de los perfiles alares se realizó mediante la base de datos de Airfoil Tools [8]. Allí se obtuvieron los puntos de referencia, para su posterior cargue en el software XFLR5, y su modelación. A partir de los resultados

obtenidos, se seleccionaron dos perfiles para posteriormente ser evaluados, optimizados y escoger el perfil aerodinámico optimizado para la construcción del prototipo.

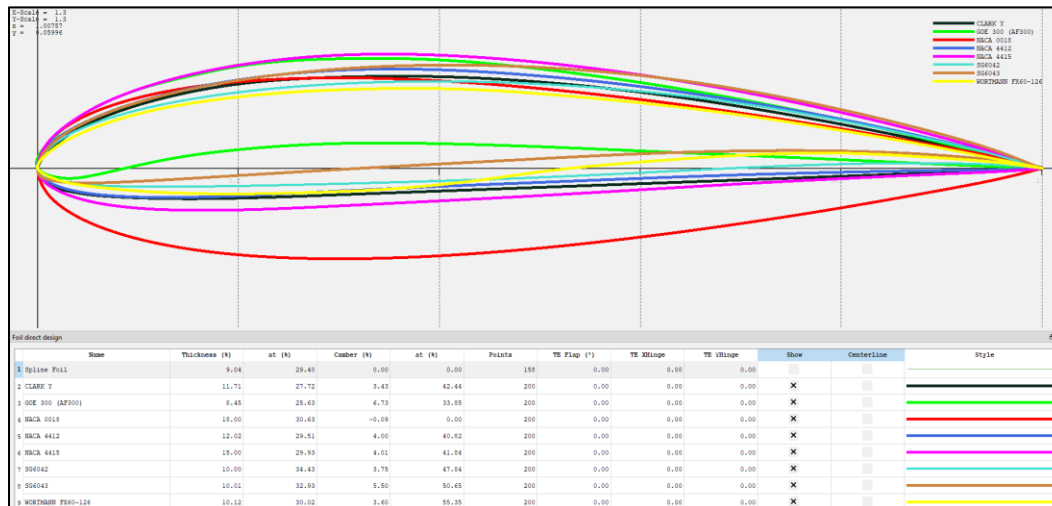


Figura 16. Perfiles cargados en software XFLR5

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la figura 16, se realiza el cargue de los ocho perfiles alares seleccionados, en el software de modelación XFLR5. Posteriormente, se realiza su análisis mediante la opción “XFOil Direct Analysis”. Esta función en XFLR5 corresponde a un módulo que permite realizar un análisis aerodinámico detallado de un perfil alar utilizando el programa XFOIL. Dentro de la ventana se pueden ajustar parámetros como el ángulo de ataque, el número de Reynolds, el espesor relativo del perfil y otros parámetros específicos. Luego, se puede ejecutar el análisis y XFOIL calculará los coeficientes aerodinámicos, como el coeficiente de sustentación (C_l), el coeficiente de arrastre (C_d) y otros parámetros relevantes.

5.3.2 Parámetros y criterios de evaluación de los perfiles alares seleccionados

5.3.2.1 Definición de Parámetros

Como primer parámetro para iniciar la evaluación de los perfiles aerodinámicos, se define el **Número de Reynolds (Re)**. Con base en la velocidad del viento base escogida

(para zonas ZNI) de 5 m/s. Esta velocidad, corresponde al viento que se presenta de manera libre, alejado de un posible aerogenerador. Como se puede observar en la figura 7, la dirección de viento que nos interesa, es la que se identifica como U_{rel} , o velocidad relativa del viento, la cual tiene en cuenta el movimiento de rotación del álabe. Esta velocidad se puede calcular aplicando la ecuación (15), la cual se presenta en términos de la velocidad del viento libre U_{∞} , el factor de inducción a y el ángulo de torsión φ .

Habiendo definido $R = 1\text{m}$, en la tabla 2, se muestra el cálculo realizado para estimar los ángulos de torsión óptimos luego de dividir la longitud del álabe en 18 secciones. Previamente definida la tip speed ratio en 3 en la punta R , se aplican las ecuaciones (37), (40) y (42) para hallar tip speed ratio λ_{ri} , ángulo de torsión óptimo $\varphi_{opt i}$, y longitud de la cuerda c_i , en cada radio i .

Tabla 2. Cálculo del ángulo de torsión óptimo y longitud de cuerda

Radio rotor R m	Tip Speed Ratio λ	Delta Tip Speed Ratio $\Delta \lambda$	Velocidad del viento U_{∞} (m/s)	Velocidad tangencial Ω m/s
1,00	3	0,15	5,00	15,00

Relación de radios r/R	radio desde el eje central r_i m	Tip Speed Ratio a r_i λ_{ri}	Angulo de torsión a r_i φ_{opt}	Cuerda a r_i c_i m
0,15	0,15	0,45	43,8	0,22
0,20	0,20	0,60	39,4	0,26
0,25	0,25	0,75	35,4	0,29
0,30	0,30	0,90	32,0	0,31
0,35	0,35	1,05	29,1	0,33
0,40	0,40	1,20	26,5	0,34
0,45	0,45	1,35	24,4	0,35
0,50	0,50	1,50	22,5	0,36
0,55	0,55	1,65	20,8	0,37
0,60	0,60	1,80	19,4	0,37
0,65	0,65	1,95	18,1	0,37
0,70	0,70	2,10	17,0	0,38
0,75	0,75	2,25	16,0	0,38
0,80	0,80	2,40	15,1	0,38
0,85	0,85	2,55	14,3	0,38
0,90	0,90	2,70	13,5	0,38
0,95	0,95	2,85	12,9	0,38
1,00	1,0	3,00	12,3	0,38

A partir de la tabla 2, y tomando 2 valores del factor de inducción, uno mínimo de 0,11 y el máximo según el límite de Betz, de 1/3, se realiza el cálculo del número de Reynolds para los 18 valores de cuerda c_i y velocidades del viento relativas $U_{rel i}$ calculadas a partir de los ángulos de torsión óptimos $\varphi_{opt i}$. Los resultados se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Cálculo de #Reynolds aplicables al álabe objetivo

c_i m	a =0,11			a =0,33 (máximo)		
	U_{rel} m/s	# Reynolds $\rho = 1.42E-05$ (a 10°C)	# Reynolds $\rho = 1.51E-05$ (a 20°C)	U_{rel} m/s	# Reynolds $\rho = 1.42E-05$ (a 10°C)	# Reynolds $\rho = 1.51E-05$ (a 20°C)
0,22	6,4	99014	93091	4,8	74539	70080
0,26	7,0	128144	120478	5,3	96468	90697
0,29	7,7	156488	147127	5,8	117806	110758
0,31	8,4	184403	173371	6,3	138820	130515
0,33	9,2	212095	199407	6,9	159667	150115
0,34	10,0	239679	225340	7,5	180432	169638
0,35	10,8	267210	251224	8,1	201158	189124
0,36	11,6	294712	277082	8,8	221862	208589
0,37	12,5	322189	302914	9,4	242547	228037
0,37	13,4	349629	328712	10,1	263203	247458
0,37	14,3	377012	354458	10,8	283818	266839
0,38	15,2	404312	380125	11,5	304370	286161
0,38	16,2	431495	405682	12,2	324834	305401
0,38	17,1	458520	431089	12,9	345178	324528
0,38	18,0	485335	456300	13,6	365365	343507
0,38	19,0	511882	481259	14,3	385349	362296
0,38	19,9	538087	505896	15,0	405077	380843
0,38	20,9	563863	530130	15,7	424481	399087

Los números de Reynolds calculados, se encuentran en el rango de 74539 a 530130, desde el calculado a la menor velocidad relativa hasta el calculado a la mayor velocidad relativa.

Para efectos de la evaluación de los perfiles alares, se determina un número de Reynolds de 100.000 (con extremos entre 70.000 y 700.000). Es de anotar, que este rango cubre las variaciones de viscosidad cinemática del aire, entre temperaturas de 10°C:

($1.4207 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{seg}$) y 20°C ($1.5111 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{seg}$), Lo anterior con el fin de poder comparar datos de posibles pruebas experimentales de laboratorio que se pudiesen realizar en túnel de viento en la ciudad de Bogotá.

Como segundo parámetro, se define el **Ángulo de ataque (Alpha o α)**. Se establecen valores desde -20° a 20° , con un delta de $0,5^\circ$ cambiando con respecto a cada iteración; Este rango se escogió teniendo en cuenta los límites de diseño de los perfiles alares seleccionados y revisando valores óptimos para los coeficientes C_d y C_l en las gráficas construidas en XLFR5.

Como tercer parámetro se define, el **Número de paneles del perfil**. Es importante para simular el comportamiento de los perfiles alares debido a su influencia en la precisión y la eficiencia del análisis aerodinámico. En este tipo de análisis, el perfil alar se divide en una serie de paneles o secciones discretas para simplificar los cálculos y las ecuaciones que describen el flujo de aire alrededor del perfil. Cada panel se trata como una superficie plana con características aerodinámicas específicas. Al aumentar el número de paneles, se mejora la precisión de la simulación y se obtienen resultados más cercanos a la realidad. Esto se debe a que más paneles permiten una mejor representación de las variaciones en el flujo de aire y la distribución de presiones a lo largo del perfil. Los paneles adicionales ayudan a capturar detalles más finos, como la separación del flujo, los efectos de borde y las perturbaciones locales. Para las simulaciones a realizar en el presente trabajo de investigación, se fija un valor de 200. Este valor se escoge, teniendo en cuenta la baja complejidad de la forma y el borde de los perfiles a analizar, y la capacidad computacional de los equipos a utilizar.

Como cuarto parámetro, se define un **mallado en SolidWorks**, el cual se refiere a la generación de una malla o discretización de volúmenes finitos en un modelo tridimensional. El enmallado adecuado es esencial para realizar análisis numéricos precisos y obtener resultados confiables. Un enmallado adecuado implica seleccionar el tamaño de los volúmenes finitos de manera que se capturen de manera precisa los detalles y las

características importantes del modelo, al tiempo que se mantiene un número de elementos manejable para el análisis.

En el proceso de mallado del software SolidWorks, se llevan a cabo cálculos utilizando la ecuación de Navier-Stokes, en la cual se realiza un promedio con la variable ν . Debido a esto, en el modelo que se procesa en este software, es posible aplicar dos tipos de mallas de manera independiente. En primer lugar, se emplea una malla global que abarca todo el dominio computacional. Esta malla permite al usuario definir un nivel de malla global y un factor de proporción, los cuales pueden seleccionarse en una escala del 1 al 7. En esta escala, el valor 1 representa la malla más gruesa, mientras que el valor 7 corresponde a la malla más fina en términos de tamaño de celda. Por otro lado, la segunda opción es la malla local, que se utiliza exclusivamente en regiones específicas del dominio computacional. Esta malla es más avanzada que la global y se emplea principalmente en áreas con geometrías altamente complejas o flujos de fluidos. Como resultado de lo mencionado, un refinamiento en la simulación mediante la malla implica la segmentación de cada celda en partes más pequeñas. En otras palabras, cada celda se divide en cuatro partes iguales. A continuación, en la tabla 4, se presentan los valores correspondientes a los números de celda para cada nivel

Tabla 4. Número resultante de celdas después de varios niveles de refinamiento que actúan sobre una celda inicial

Nivel	0	1	2	3	4	5	6	7
Numero de Celdas	1	4	16	64	256	1024	4096	16384

Con base en lo expuesto anteriormente, se ha optado por seleccionar un nivel de refinamiento de 7, ya que este nivel representa el máximo nivel de detalle, y el número de celdas correspondiente es de 16,384. Esto se hace con el propósito de asegurar que los resultados obtenidos en la presente simulación sean lo suficientemente precisos para los objetivos planteados. El solucionador seleccionado para este propósito es el método de volumen finito. En cuanto a las condiciones del flujo, las elecciones para las simulaciones realizadas son las siguientes:

- Características físicas: Flujo de fluido.
- Tipo de análisis de geometría: Externo.
- Manejo de la geometría: Tipo CAD Boolean.
- Tipo de fluido del proyecto: Gases (aire).
- Tipo de fluido: Laminar y turbulento.
- Condición térmica de la pared: Pared adiabática.
- Aspereza superficial: 0 micrómetros.
- Parámetros termodinámicos: Presión 101.325 Pa y temperatura 293.2 K.
- Velocidad en dirección x: 5 m/s.
- Intensidad de turbulencia: 0.1%.
- Longitud de turbulencia: 0.0001 m.

En cuanto a los criterios de convergencia, en el software de modelado CFD SolidWorks que se utiliza para las simulaciones y para emular el comportamiento del perfil aerodinámico en un túnel de viento, se busca que las variables de seguimiento seleccionadas como objetivos específicos no experimenten cambios significativos entre cada iteración. Cuando se cumple este punto, se puede considerar que se ha logrado la convergencia

Como quinto parámetro, se define la **Extrusión**, la cual se define a una distancia de 10 mm. La extrusión es una operación común en el modelado tridimensional y se utiliza para crear formas y volúmenes a partir de un perfil base. La elección de una distancia de extrusión de 10 mm resulta de considerar factores como la función y el propósito del modelo y restricciones de diseño.

5.3.2.2 Definición de Criterios de Evaluación

Como **primer criterio**, y más importante, se define la relación entre el **Coefficiente de sustentación/coeficiente de arrastre vs ángulo de ataque (C_l/C_d vs α)**: Se evalúa el punto máximo de C_l/C_d (y encontrar el ángulo óptimo que maximiza su valor). En este punto se da el mayor valor de sustentación generada posible con arrastre inducido mínimo, lo que determina que el perfil será más eficiente energéticamente. De igual manera, se

realiza el análisis del comportamiento de la curva a lo largo de diferentes ángulos, en busca de una estabilidad aerodinámica, y, también en el ángulo 0° .

Es de anotar, que la mayor eficiencia energética se da cuando el coeficiente de potencia es máximo (sin contar con las eficiencias mecánicas – eléctricas, las cuales disminuyen este valor). De acuerdo a la ecuación (45), la cual desarrolla como una sumatoria el coeficiente de potencia C_{pot} , (el cual es función del ángulo de torsión (φ), la tip speed ratio λ_r , el coeficiente de planeo C_D/C_L , y el tip loss factor F), la variable más relevante corresponde al coeficiente de planeo C_D/C_L (valor inverso del coeficiente sustentación arrastre C_L/C_D). λ_R , se estableció en 3, y el ángulo (φ), es función de λ_R . El factor F, es función del número de álabes B (el cual se definió en 3), r y (φ). En conclusión, habiendo fijado las demás variables, la maximización de C_{pot} , depende de maximizar C_L/C_D o lo que es lo mismo, minimizar C_D/C_L .

Como **segundo criterio** para la evaluación de los perfiles aerodinámicos, se define la relación entre el **Coficiente de sustentación y ángulo de ataque: (Cl vs α)**. Para la evaluación de este criterio se identificó el punto máximo de Cl (punto de mayor capacidad de generación de sustentación). De igual manera, se busca el mayor rango de ángulos de ataque efectivos con el fin de mejorar el rendimiento en diversas velocidades y direcciones, siendo una medida relativa cuando se compara con otros perfiles. Por otro lado, se analizó en las gráficas los puntos donde el perfil aerodinámico genera sustentación incluso en ángulos negativos o de valor 0, lo cual puede ser beneficioso en condiciones de viento desfavorable o maniobras específicas de los aerogeneradores. No obstante, se tendrá en cuenta que la curva de Cl vs Alpha exprese su comportamiento de manera uniforme y gradual, toda vez que esto brindará una mayor estabilidad y capacidad de control a los diferentes ángulos de ataque a los que se exponga el perfil aerodinámico.

Como **tercer criterio** se define la relación **Coficiente de arrastre vs ángulo de ataque (Cd vs α)**: Para el análisis de esta gráfica en el perfil aerodinámico, primero se toman los ángulos a los que se registró un Cl máx., y con base en ellos se registra el valor

de Cd en dichos puntos, con el fin de comparar y definir que perfil genera menor coeficiente de arrastre, indicando una mayor eficiencia en términos de consumo de energía. En síntesis, se analiza el comportamiento de variación del Cd a lo largo de los ángulos de ataque, buscando el que presente un aumento gradual y un comportamiento estable.

Como **cuarto criterio** se define la relación entre el **Coefficiente de presión (Cp.) vs ubicación gráfica del perfil (X)**: Al obtener los resultados de las gráficas de coeficientes de presión simuladas en el software XFLR5 se tienen en cuenta dos gráficas: la primera, (Cl vs Alpha), en la cual es relevante el análisis del coeficiente de presión (Cp.). En esta gráfica, se analiza el ángulo en el que se presenta Cl máx., con el fin de evaluar la distribución de presión y comprender como se genera la sustentación máxima para este perfil aerodinámico. Respecto a la segunda gráfica, (Cl/Cd vs Alpha), ésta es relevante también para el análisis del coeficiente de presión (Cp.), evaluando el ángulo donde se presenta Cl/Cd máx. (punto de mayor eficiencia y rendimiento). En cada una de estas gráficas se evaluará en el punto de borde de ataque del perfil aerodinámico, con el fin de comprender cómo se distribuye la presión y cómo se genera la sustentación de esta configuración, donde se busca resaltar los picos de los valores de Cp. positivos y negativos. De igual manera se evalúa la forma de la curva a lo largo del perfil alar, dado que, si esta es plana y la distribución uniforme, indica una distribución de presión más favorable y un perfil aerodinámico más eficiente; si por el contrario tiene variabilidad significativa a lo largo del eje x del perfil, indica la influencia de las características del espesor del perfil y la entrada en pérdida de sustentación o la presencia de turbulencias locales [7].

5.3.3 Análisis de los 8 perfiles aerodinámicos seleccionados con XFLR5

5.3.3.1 Análisis de perfiles de estudio en el Gráfico Cl vs Alpha

La gráfica mostrada en la figura 17, muestra la variación del coeficiente de sustentación (Cl) en los diferentes ángulos de ataque, para los 8 perfiles aerodinámicos de estudio.

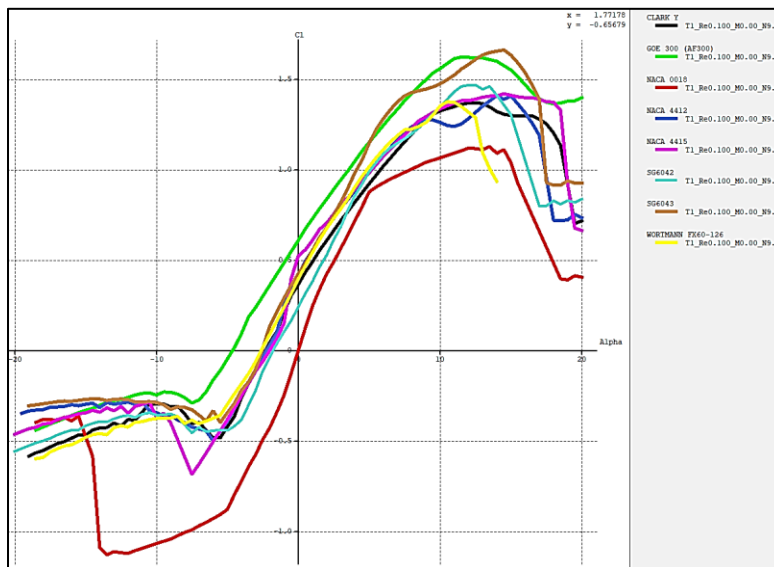


Figura 17. Coeficiente de sustentación C_l para diferentes ángulos de ataque α
Fuente elaboración propia: gráfica construida en software XFLR5

Se definen cada uno de los puntos donde C_l es máximo, para cada uno de los perfiles aerodinámicos obteniendo los valores mostrados en la tabla 5.

Tabla 5. Coeficientes de sustentación C_l máximos vs α

Numero de perfil	Descripción	C_l máx.	ángulo de ataque
1	Wortmann FX60-126	1,37504	10,5°
2	SG6043	1,66211	14,4°
3	SG6042	1,46748	12°
4	NACA 4415	1,42012	14,5°
5	NACA 0018	1,12769	13,5°
6	GOE 300 (AF300)	1,62305	11,4°
7	NACA 4412	1,41277	14,5°
8	CLARK Y	1,37052	12,5°

Con los resultados obtenidos de C_l vs Alpha de la simulación realizada, y con base en el parámetro C_l máx. para ángulos óptimos, se escogen los siguientes perfiles/ángulos: 1) SG6043, α : 14.4°; 2) GOE 300 (AF300), α : 11.4°.

Se concluye que, estos dos perfiles aerodinámicos son los que presentan una mayor capacidad de generación de sustentación. También se puede observar a qué ángulo de

ataque alcanzan un CI máx. antes de perder la capacidad de generar sustentación, y en esto el perfil SG6043, permite un mayor ángulo de ataque, indicando que tendrá mejores rendimientos en diferentes velocidades y direcciones, sin embargo su comportamiento en la curvatura no se presenta de manera uniforme esto genera menor estabilidad y capacidad de control a diferentes ángulos. Por el contrario el perfil GOE 300 (AF300), (segundo perfil que registra un CI máx óptimo). muestra una curva uniforme y que aumenta de manera gradual.

Al realizar un segundo análisis, se muestran en la tabla 6, los valores máximos de CI positivo a un ángulo de ataque de 0° .

Tabla 6. Coeficientes de sustentación CI positivos vs $\alpha = 0$

Numero de perfil	Descripción	CI positivo
1	Wortmann FX60-126	0,39843
2	SG6043	0,42453
3	SG6042	0,24064
4	NACA 4415	0,52354
5	NACA 0018	0
6	GOE 300 (AF300)	0,61057
7	NACA 4412	0,41937
8	CLARK Y	0,36563

Se observa que los perfiles aerodinámicos, que indican mejores resultados son los siguientes: 1) GOE 300(AF300); 2) NACA 4415. Estos perfiles indican los mejores resultados, pues presentan un mayor CI positivo a ángulo de 0° . Esto es beneficioso toda vez que estos perfiles serán capaces de generar sustentación en condiciones de viento a velocidades bajas o en maniobras específicas del aerogenerador.

En la tabla 7, se muestran los puntos donde las líneas abscisas, tocan el ángulo en el que inicia la generación de sustentación. Esta, nos proporciona información sobre perfiles aerodinámicos que generan sustentación a ángulos de ataque más bajos. Comprender estos límites operativos de los perfiles aerodinámicos es fundamental para el

diseño y la aplicación de la aerodinámica, ya que enfocarse en este aspecto permite comprender su rendimiento en condiciones de baja velocidad del viento de manera más precisa.

Tabla 7. Ángulos de ataque α en los que inicia capacidad de sustentación

Numero de perfil	Descripción	Cl levantamiento positivo	ángulo de ataque
1	Wortmann FX60-126	0	-2,63622
2	SG6043	0	-2,47768
3	SG6042	0	-1,78148
4	NACA 4415	0	-2,12918
5	NACA 0018	0	0
6	GOE 300 (AF300)	0	-4,7573
7	NACA 4412	0	-2,24792
8	CLARK Y	0	-2,31343

El perfil que presenta el resultado más alto de sustentación a menor ángulo es el perfil, es el GOE 300 (AF300). Sin embargo, los perfiles Wortmann FX160-126, SG6043, NACA 4412, CLARK Y, NACA 4415 muestran sus resultados en un rango muy corto y con valores similares de ángulos.

5.3.3.2 Análisis de perfiles de estudio en el Gráfico C_d vs C_l

La gráfica que se observa en la figura 18, muestra la relación entre el coeficiente de sustentación C_l y el coeficiente de arrastre. Para este análisis se toman los resultados del coeficiente de sustentación (C_l máx.) obtenidos de la gráfica (C_l vs α) y se analiza su valor en el coeficiente de arrastre (C_d).

Esta evaluación se realiza para observar qué perfiles aerodinámicos en su punto de C_l máx., reportan menor coeficiente de arrastre (C_d) (ver tabla 8), y así encontrar el perfil que menor resistencia aerodinámica presenta. El perfil que se elige de acuerdo a este análisis es el GOE 300 (AF 300).

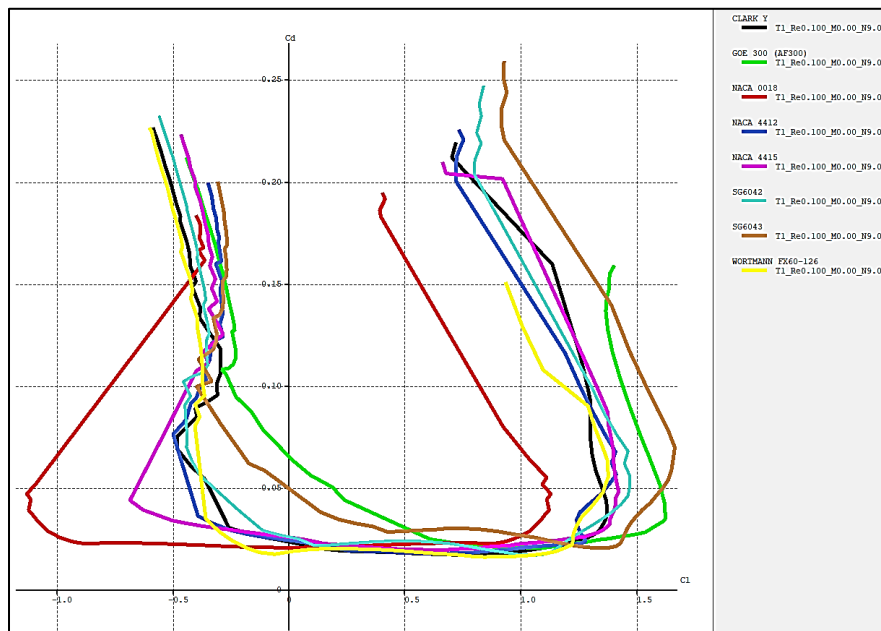


Figura 18. Coeficiente de sustentación C_l vs Coeficiente de arrastre C_d

Fuente propia: gráfica construida en software XFRLR5

Tabla 8. Coeficientes de sustentación C_l máx. vs Coeficientes de arrastre C_d min

Numero de perfil	Descripción	C_l máx.	C_{dmin}
1	Wortmann FX60-126	1,38921	0,05424
2	SG6043	1,66211	0,06428
3	SG6042	1,46748	0,05036
4	NACA 4415	1,42012	0,04822
5	NACA 0018	1,12769	0,04719
6	GOE 300 (AF300)	1,62305	0,03562
7	NACA 4412	1,41277	0,06185
8	CLARK Y	1,37052	0,03988

5.3.3.3 Análisis de perfiles de estudio en el Gráfico C_d vs C_l vs α

En la gráfica mostrada en la figura 19, se observa la variación del coeficiente de sustentación-arrastre C_d/C_l vs α , en la cual se muestran los valores de C_l/C_d y como cambian con respecto a los diferentes ángulos de ataque.

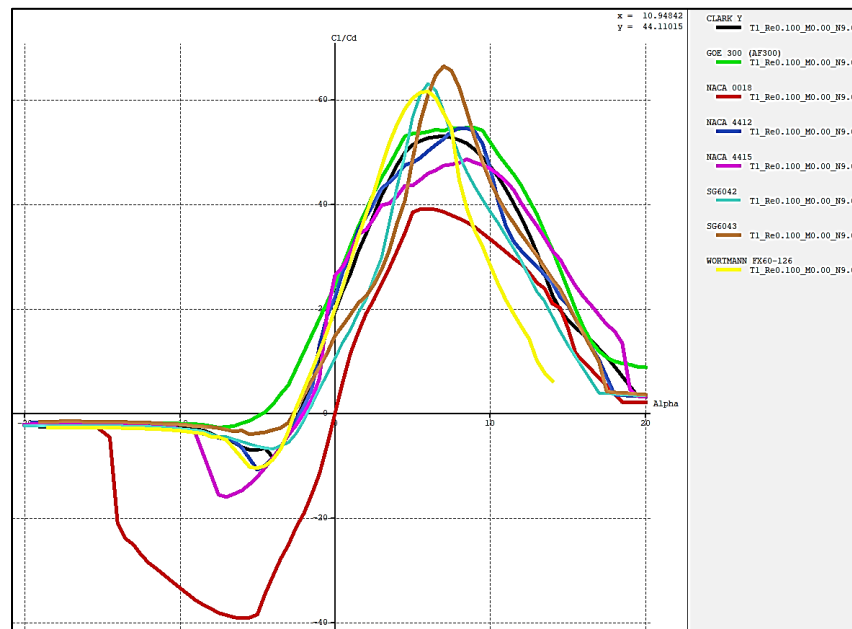


Figura 19. Cl/Cd vs α

Fuente propia: gráfica construida en software XFLR5.

Los perfiles que presentan una mayor sustentación y un menor arrastre (Cl/Cd máx.) se muestran en la tabla 9. Los valores presentados, se muestran para el ángulo de ataque donde Cl/Cd se maximiza.

Tabla 9. Obtención de Cl/Cd máximo para α óptimo

Número de perfil	Descripción	Cl/Cd máx.	Ángulo de ataque
1	Wortmann FX60-126	61,57783	6°
2	SG6043	66,35985	7°
3	SG6042	63,08429	6°
4	NACA 4415	48,7369	8,5°
5	NACA 0018	39,11774	6°
6	GOE 300 (AF300)	54,65944	8,5°
7	NACA 4412	54,52466	8,5°
8	CLARK Y	53,09382	7°

Según los resultados obtenidos, los perfiles que expresan mayor eficiencia aerodinámica en cantidad de la sustentación generada con relación a la cantidad de arrastre producido, son los perfiles: 1) SG6043; 2) SG6042 y 3) Wortmann FX60-126. Estos son los perfiles que muestran mejores resultados en cuanto a su eficiencia aerodinámica, dado

que los valores registrados de Cl/Cd se encuentran por encima de 60, indicando que los perfiles están generando 60 veces más sustentación en comparación con el arrastre producido, entre los ángulos de ataque de 6° y 7° . El perfil GOE 300 (AF300), se encuentra posicionado después de los 3 mencionados en cuanto eficiencia aerodinámica, registrando un valor de $Cl/Cd = 54.95$ con ángulo de ataque de 8.5° , lo cual es cercano a los perfiles 1 a 3, con la ventaja de que el valor de Cl/Cd se mantiene estable, cerca del promedio, en el rango de ángulos de ataque de 4° a 9.5° . Esto trae consigo una mayor versatilidad del perfil adaptándose a vientos variables, pues pequeños cambios en la posición del perfil aerodinámico en relación al flujo de aire no afectaran significativamente su rendimiento aerodinámico.

En la tabla 10, se muestran los resultados de los perfiles aerodinámicos, que generan mayor sustentación con respecto al coeficiente de arrastre Cd , a ángulos de ataque de 0° . Se observa que los perfiles aerodinámicos, que indican mejores resultados son: 1) NACA 4415; 2) GOE 300(AF300). Estos dos perfiles, presentan un mayor Cl/Cd positivo a ángulo de ataque de 0° . Esto es beneficioso toda vez que estos perfiles serán capaces de generar sustentación y menor arrastre, en condiciones de bajas velocidades de o en maniobras específicas del aerogenerador.

Tabla 10. Cl/Cd máximos a $\alpha=0$

Numero de perfil	Descripción	Cl/Cd positivo
1	Wortmann FX60-126	20.02395
2	SG6043	14.86521
3	SG6042	10.60081
4	NACA 4415	26.38062
5	NACA 0018	0
6	GOE 300 (AF300)	24.44930
7	NACA 4412	22.15987
8	CLARK Y	19.44565

5.3.3.4 Análisis de perfiles de estudio respecto al Coeficiente de presiones (C_p)

Para el análisis de coeficientes de presión en los perfiles aerodinámicos estudiados, se utilizaron los parámetros establecidos en el ítem 5.3.2.1 del presente documento. Igualmente, se usaron los ángulos de ataque óptimos que generaron C_l máximos y C_l/C_d máximos. El resumen de estos valores se muestra en la tabla 11.

Tabla 11. Ángulos de ataque α para C_l máx y C_l/C_d máx

Numero de perfil	Descripción	Ángulo de ataque a C_l máx.	Ángulo de ataque a C_l/C_d máx.
1	Wortmann FX60-126	10,5°	6°
2	SG6043	14,4°	7°
3	SG6042	12°	6°
4	NACA 4415	14,5°	8,5°
5	NACA 0018	13,5°	6°
6	GOE 300 (AF300)	11,4°	8,5°
7	NACA 4412	14,5°	8,5°
8	CLARK Y	12,5°	7°

Las gráficas de coeficiente de presión C_p vs X , para cada perfil aerodinámico, a los ángulos de ataque óptimos, se muestran en las figuras 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 y 27. En el análisis aerodinámico de perfiles alares, la función C_p (coeficiente de presión) se utiliza para describir la distribución de presiones en la superficie del perfil. Para cada posición a lo largo de la cuerda (x), hay dos valores de C_p asociados: uno para la superficie superior y otro para la superficie inferior. Los valores de C_p positivos indican una presión menor en comparación con la presión atmosférica de referencia, mientras que los valores de C_p negativos indican una presión mayor que la presión atmosférica de referencia. En un perfil alar típico, la superficie superior del perfil tiene una curvatura que resulta en un flujo de aire más rápido y una disminución de la presión. Por lo tanto, la mayoría de los puntos en la superficie superior del perfil tendrán valores de C_p negativos. Estos valores negativos pueden llegar a ser más pronunciados cerca del borde de ataque y en las regiones de mayor curvatura, como el punto de máxima elevación (punto de inflexión) del perfil.

Por otro lado, la superficie inferior del perfil alar tiene una curvatura que resulta en un flujo de aire más lento y un aumento de la presión. Por lo tanto, la mayoría de los puntos en la superficie inferior del perfil tendrán valores de C_p positivos, que pueden ser más pronunciados cerca del borde de fuga y en las regiones de mayor curvatura. Como conclusión, podemos decir que en un perfil alar, los valores de C_p negativos corresponden a la superficie superior y los valores de C_p positivos corresponden a la superficie inferior. Esta distribución de presiones asimétrica en las dos superficies del perfil es la responsable de la generación de la sustentación y el arrastre aerodinámico en un ala o perfil alar.

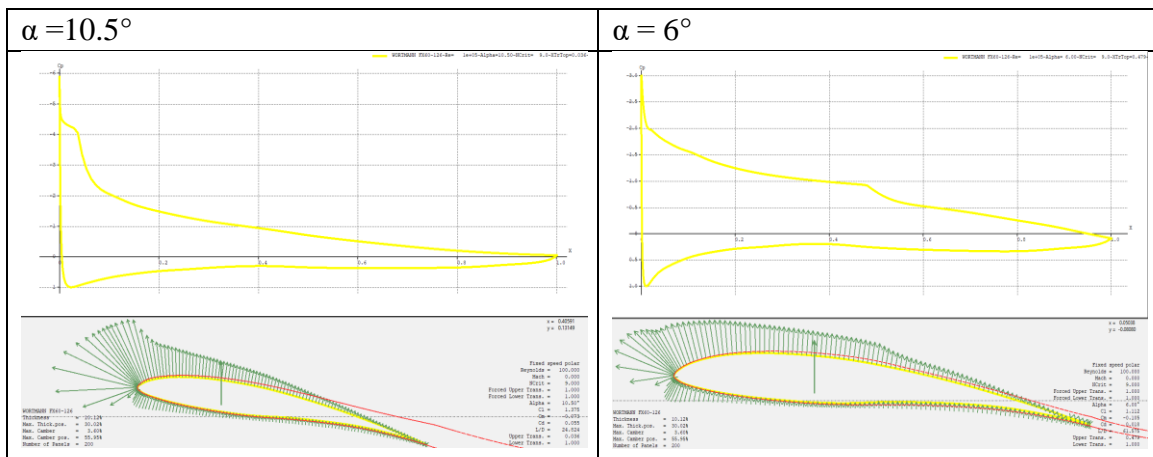


Figura 20. Gráfica C_p vs X , perfil Wortmann FX60-126
Fuente propia: gráfica construida en software XFLR5

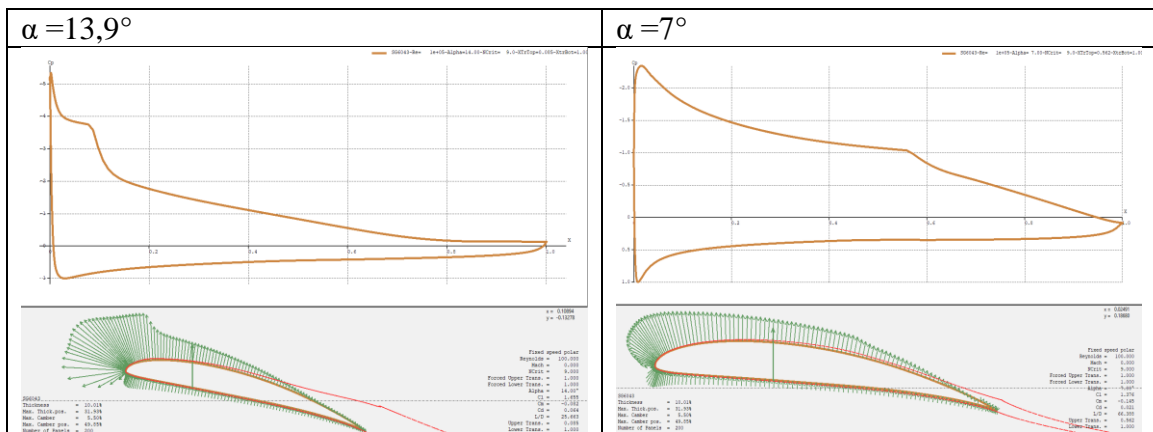


Figura 21. Gráfica C_p vs X , perfil SG6043
Fuente propia: gráfica construida en software XFLR5

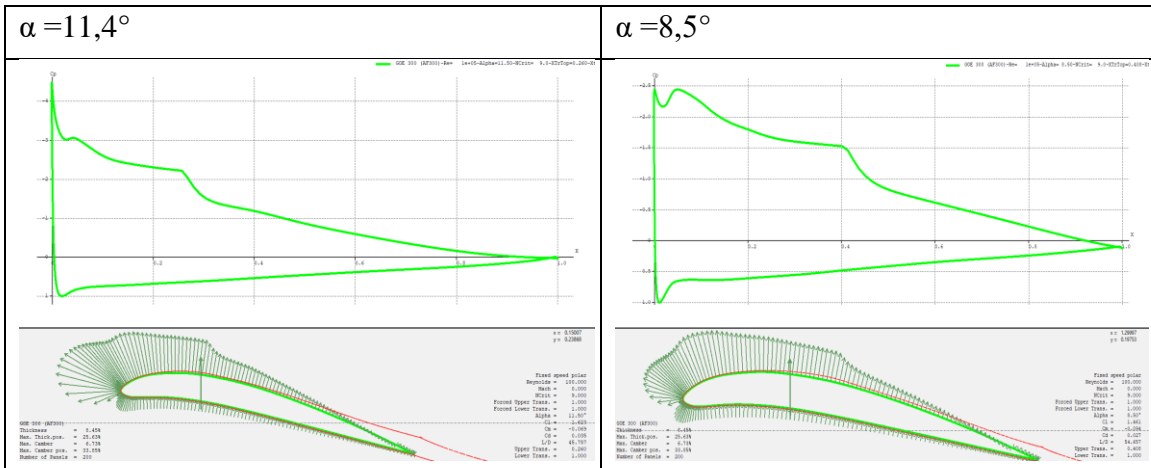


Figura 25. Gráfica C_p vs X , perfil GOE (AF300)
Fuente propia: gráfica construida en software XFLR5

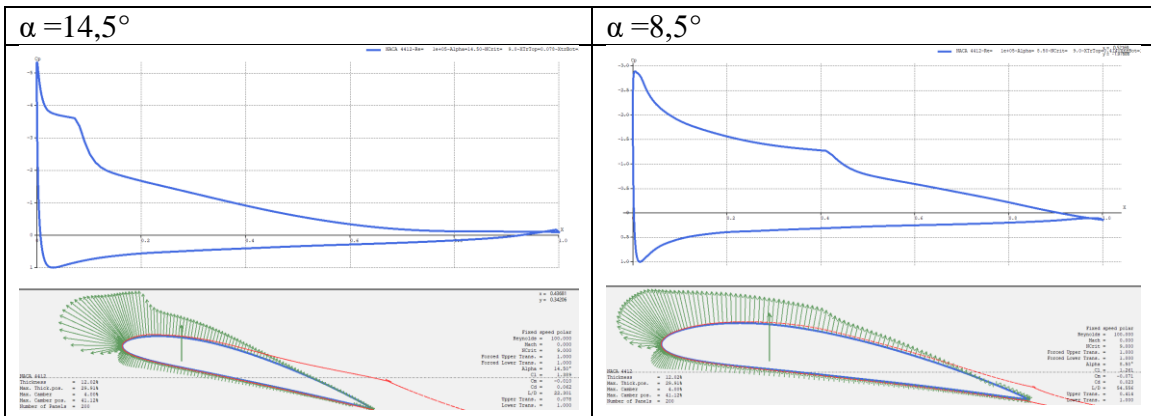


Figura 26. Gráfica C_p vs X , perfil NACA 4412
Fuente propia: gráfica construida en software XFLR5

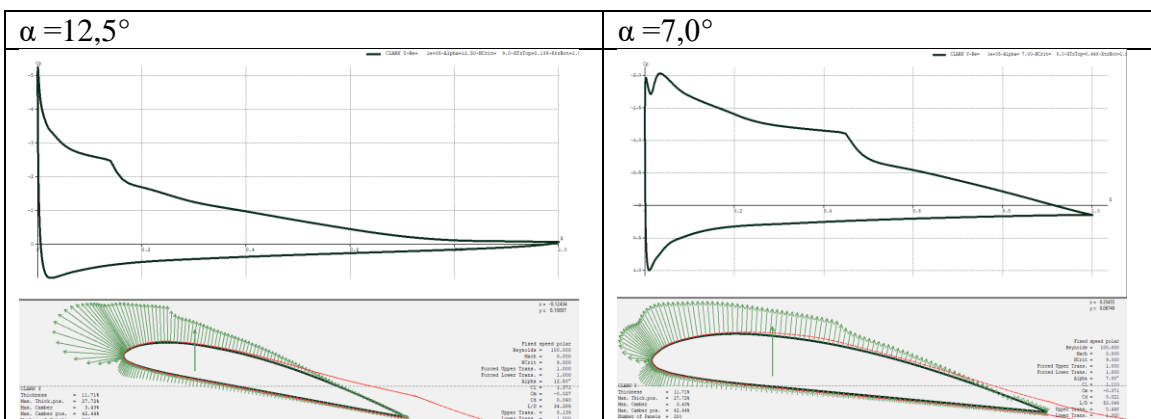


Figura 27. Gráfica C_p vs X , perfil CLARK Y
Fuente propia: gráfica construida en software XFLR5

Las gráficas de Coeficiente de presión vs X, nos muestran el perfil de presiones a lo largo del perfil en 2D. Los valores máximos y mínimos para Cp, se presentan en la tabla 12. Los valores más negativos representan presiones menores a la atmosférica con mayor diferencial de presión, lo cual genera mayor succión, asociándose esto a una mayor sustentación. La fuerza de sustentación está determinada por el área bajo la curva de Cp vs X. Por esta razón, aunque el perfil que tiene el Cp más bajo es el Wortmann FX60-126, éste ocupa el sexto lugar en la lista de Cl_{max} (ver tabla 5).

Tabla 12. Cp mínimos y máximos a valores de α óptimos

Perfil No.	Descripción del perfil	Cp. mínimo	Ubicación gráfica del perfil (X)	Cp. máximo	Ubicación gráfica del perfil (X)
1	Wortmann FX60-126 ($\alpha = 10.5^\circ$)	-5.86756	0	1.00644	0.02074
	Wortmann FX60-126 ($\alpha = 6^\circ$)	-3.00538	0	0.98615	0.00950
2	SG6043 ($\alpha = 13.9^\circ$)	-5.33416	0.00319	0.99937	0.02791
	SG6043 ($\alpha = 7^\circ$)	-2.34486	0.01595	0.99837	0.00797
3	SG6042 ($\alpha = 12^\circ$)	-4.91512	0.00169	1.00031	0.02536
	SG6042 ($\alpha = 6^\circ$)	-2.02339	0.01606	0.98963	0.00676
4	NACA 4415 ($\alpha = 14.5^\circ$)	-4.13929	0.00845	0.97332	0.03043
	NACA 4415 ($\alpha = 8.5^\circ$)	-2.37945	0.01352	0.99965	0.01437
5	NACA 0018 ($\alpha = 13.5^\circ$)	-4.10556	0.01196	1.00380	0.03110
	NACA 0018 ($\alpha = 6^\circ$)	-2.28703	0.01944	0.99972	0.01183
6	GOE 300 (AF300) ($\alpha = 11.4^\circ$)	-4.46889	0	1.00836	0.01862
	GOE 300 (AF300) ($\alpha = 8.5^\circ$)	-2.43814	0.05110	0.99803	0.00798
7	NACA 4412 ($\alpha = 14.5^\circ$)	-5.31264	0	1.00688	0.02959
	NACA 4412 ($\alpha = 8.5^\circ$)	-2.87617	0.00507	0.99653	0.01268
8	CLARK Y ($\alpha = 12.5^\circ$)	-5.25867	0	0.99989	0.02073
	CLARK Y ($\alpha = 7^\circ$)	-2.03514	0.03466	0.99861	0.00845

A continuación, se analiza el comportamiento de cada perfil objeto de estudio:

Para los ángulos donde Cl se hace máximo:

Wortmann FX60-126 ($\alpha = 10.5^\circ$): En la gráfica del coeficiente de presión para este perfil aerodinámico, se observa, que presenta valores negativos más altos con respecto

a los perfiles de comparación, con un valor de -5.86756; y positivos máximos de 1.00644. Lo anterior indica que en la zona del borde de ataque se presenta una presión más alta ángulo evaluado (punto de C_l máx.) por cuanto mayor será la sustentación en este punto. Sin embargo, a lo largo del perfil la gráfica muestra que tiene una pendiente que decae pronunciadamente, indicando que a continuación entrará en la zona de pérdida rápidamente. Es de tener en cuenta que si bien éste es el perfil que mayor coeficiente de presión reporta, no necesariamente es el que mayor sustentación genera.

SG6043 ($\alpha = 13.9^\circ$): En la gráfica de coeficiente de presión para este perfil aerodinámico, se observa que, si bien es el segundo perfil que muestra valores de C_p más altos, (-5.33416), y positivos máximos de 0.99937 cerca de la zona del borde de ataque se favorece la generación de sustentación. Es de anotar que se observa una variación de pendiente en el punto de $X = 0.07768$, indicando la posición donde el flujo pasa de laminar a turbulento. Esta transición también puede resultar en separación de flujo.

NACA 4412 ($\alpha 14.5^\circ$): En la gráfica del coeficiente de presión para este perfil aerodinámico, se observa, que presenta valores de C_p negativos de -5.31264; y positivos máximos de 1.00688; siendo su coeficiente de presión alto en el borde de ataque, y no necesariamente reporta los valores de C_l máx. eficientes en comparación, no obstante, se observa un pico en su pendiente en el eje $X = 0.07259$, indicando la presencia de turbulencias locales.

Para los ángulos donde C_l/C_d se hace máximo:

Wortmann FX60-126 ($\alpha = 6^\circ$): En la gráfica del coeficiente de presión para este perfil aerodinámico, se observa, que presenta valores de C_p negativos más altos con respecto a los perfiles de comparación (-3.00538); y positivos máximos de 0.98615; en esta gráfica se observa que su distribución de presión es descendente pero no se encuentra uniforme, dado que se observa un pico en el punto del eje $X: 0.48176$, indicando una ligera turbulencia local, lo cual puede aumentar su arrastre, sin favorecer la sustentación.

NACA 4412 ($\alpha = 8.5^\circ$): En la gráfica del coeficiente de presión para este perfil aerodinámico, se observa, que si bien es el segundo perfil que presenta mejores valores de C_p . negativos (-4.13929); y positivos máximos de 0.97332, se observa una presión que es descendente con una distribución irregular, con un pico en el punto del eje $X = 0.41160$, lo cual predice turbulencias locales en este punto; de igual manera se observa en el borde de fuga un entrecruzamiento de las presiones generando turbulencias.

GOE 300 (AF300) ($\alpha = 8.5^\circ$): En la gráfica del coeficiente de presión para este perfil aerodinámico, se observa, que presenta valores máximos de C_p . negativos de: -2.43814; y positivos máximos de: 0.99803. Este perfil no presenta una uniformidad en su distribución de presión dado que la compresión del flujo a través del perfil presenta dos áreas críticas pico en el eje x en los puntos 0.04984 y 0.40108, lo que predice ligeras turbulencias. Esto puede deberse a error numérico o separación de burbuja. Sin embargo, su pendiente es la más tenue comparada con los demás perfiles, permitiendo tener una distribución mayor de presiones a lo largo del perfil, obteniendo generación de sustentación constante.

5.3.4 Selección de 2 perfiles óptimos y su combinación para obtener perfil mixto final UR001

Luego del análisis realizado con el software XFLR5 y a partir de los resultados obtenidos en la tabla 12, se escogen como perfiles óptimos los siguientes: 1) SG6043; y 2) GOE300. Los valores relevantes para estos dos perfiles, se resumen en la tabla 13. Se puede observar, que los perfiles preseleccionados tienen: **Criterio 1:** Cl/Cd por encima de 50, **Criterio 2:** Cl máx por encima de 1,6; **Criterio 3:** Cd por debajo de 0,07 y **Criterio 4:** C_p mínimo por debajo de -4,4. Luego estos dos perfiles, son los que manejan mejores condiciones aerodinámicas de captura de energía a la velocidad del viento definida para la presente investigación, de 5 m/s.

Tabla 13. Comparativo de variables de perfiles preseleccionados vs perfil mixto

Variable	SG6043	GOE300	UR001
Cl máx	1,66211 $\alpha = 14,4^\circ$	1,62305 $\alpha = 11,4^\circ$	1,62985 $\alpha = 15,0^\circ$
Cl @ $\alpha = 0^\circ$	0,42453	0,61057	0,48049
α inicio sustentación	-2,4776	-4,7573	-2,81257
Cd @ Cl máx	0,05424	0,03562	0,07087
Cl/Cd máx	66,3598 $\alpha = 7^\circ$	54,65949 $\alpha = 8,5^\circ$	65,24159 $\alpha = 7^\circ$
Cl/Cd @ $\alpha = 0^\circ$	14,86521	24,4493	16,59372
Cp mín	-5,33416 $\alpha = 13,9^\circ$ -2,344860 $\alpha = 7,0^\circ$	-4,46889 $\alpha = 11,4^\circ$ -2,438140 $\alpha = 8,5^\circ$	-5,76753 $\alpha = 15,0^\circ$ -2,213990 $\alpha = 7,0^\circ$
Cp máx	-0,99937 $\alpha = 13,9^\circ$ -0,99837 $\alpha = 7,0^\circ$	-1,00836 $\alpha = 11,4^\circ$ -0,99803 $\alpha = 8,5^\circ$	-1,00022 $\alpha = 15,0^\circ$ -0,998660 $\alpha = 7,0^\circ$

Con el fin de obtener un perfil aerodinámico optimizado, para efectos de la presente investigación, se ejecuta la herramienta “Interpolate Foils”, en la cual, se cargan los 2 perfiles preseleccionados, y se combinan variando parámetros como el espesor y el cámben (curvatura asimétrica de un perfil alar). Es de anotar que para la creación del nuevo perfil mixto se asignan pesos porcentuales de incidencia de cada perfil en el nuevo perfil. Para el presente caso, se estableció incidencia de 80% GOE300 + 20%SG6043. La función "Interpolate Foils" en XFLR5 se utiliza para realizar una interpolación entre dos perfiles alares (foils) existentes y obtener un perfil alar intermedio. Cuando selecciona esta opción, se abre una ventana donde se pueden configurar los parámetros de interpolación. Los parámetros principales que se deben especificar son los porcentajes de interpolación para cada perfil alar original. El proceso de interpolación combina las características y propiedades de los perfiles alares originales para generar un nuevo perfil alar intermedio. XFLR5 realiza una interpolación lineal entre los puntos de control de los dos perfiles alares, generando un nuevo perfil con características que se encuentran entre los perfiles originales. Esta función es útil cuando se desea explorar y analizar perfiles intermedios entre dos perfiles existentes, en lugar de utilizar solo perfiles discretos. Puede ayudar a comprender cómo cambian las características aerodinámicas, como el coeficiente de sustentación y arrastre, a lo largo del rango de interpolación.

Con el nuevo perfil mixto generado (UR001), se aplica un **análisis inverso** que busca calcular características aerodinámicas óptimas, variando nuevamente su forma y

recalculando propiedades. La función "XFoil Inverse Design" en XFLR5 permite realizar un diseño inverso de perfiles alares utilizando el programa XFOIL. Esta función es útil cuando se desea obtener un perfil alar con características aerodinámicas específicas, como un coeficiente de sustentación objetivo o una distribución de presiones determinada. Dentro de la ventana de "XFoil Inverse Design", se puede establecer el coeficiente de sustentación objetivo (Cl), la distribución de presiones deseada o cualquier otro objetivo específico para el perfil alar. Esta función es útil para generar perfiles alares que cumplan con ciertos requisitos aerodinámicos. Se puede utilizar para diseñar perfiles alares óptimos basados en una determinada aplicación, como minimizar la resistencia al avance o maximizar la sustentación en una determinada gama de ángulos de ataque. Es importante tener en cuenta que el proceso de diseño inverso requiere de varias iteraciones y ajustes para lograr resultados óptimos. Si bien la eficiencia calculada luego de las variaciones, mejora, y se logra obtener mayor sustentación con respecto a los otros perfiles evaluados, a lo largo de la curva, se presentan picos que alteran la eficiencia total. Se pretende buscar puntos problemáticos que generen turbulencias, o bajas eficiencias y eliminarlos. Este proceso se puede observar en la figura 28.

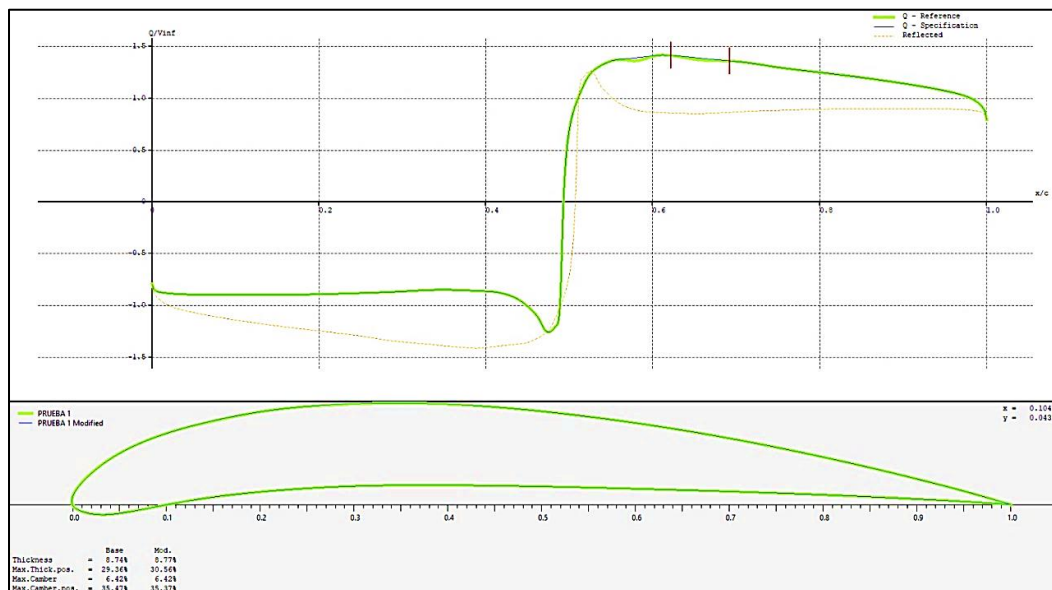


Figura 28. Variación de parámetros para optimización de perfil mixto UR001

Fuente propia: gráfica construida en software XFLR5 – Interpolate Foils

El perfil generado luego de optimización para efectos de la presente investigación se denominará UR001 y se muestra en la figura 29.

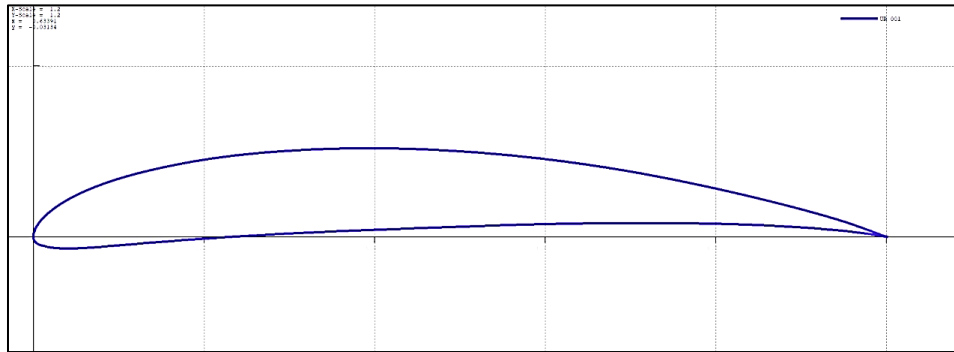


Figura 29. Nuevo perfil optimizado UR001

Fuente propia: gráfica construida en software XFLR5

La gráfica correspondiente de Cl/Cd vs α , se puede observar en la figura 30. Como se puede comprobar, el nuevo perfil generado UR001, nos permite obtener mayores Cl en un mayor número de ángulos de ataque y de forma estable.

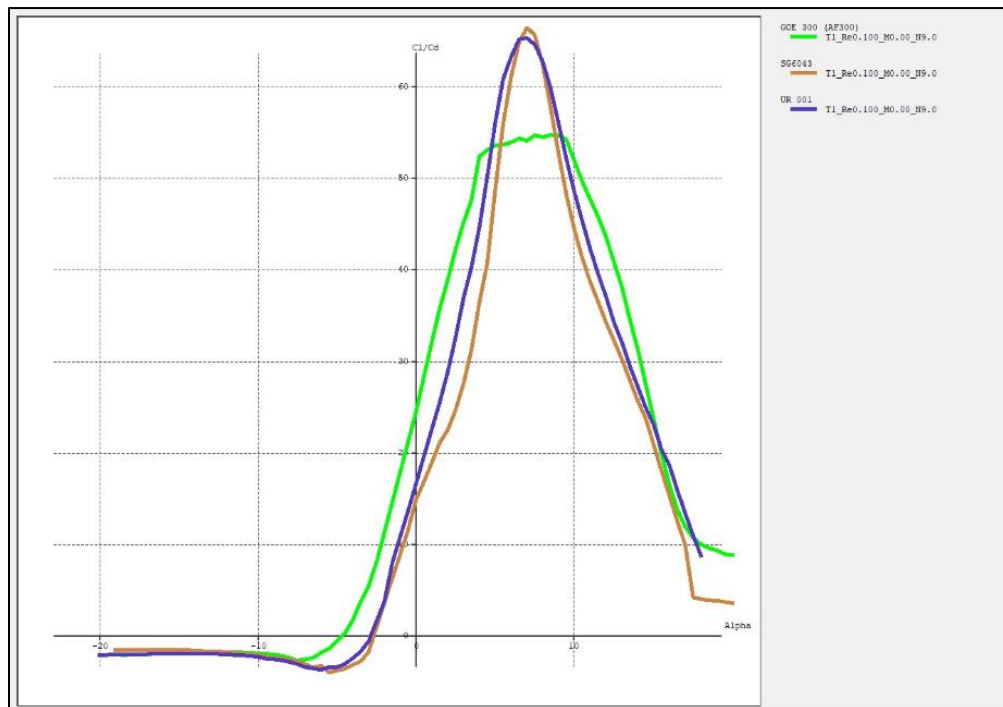


Figura 30. Gráfica Cl/Cd vs α para el nuevo perfil optimizado UR001

Fuente propia: gráfica construida en software XFLR5

Las gráficas de C_l vs α y de C_d vs C_l se muestran en las figuras 31 y 32. Se puede observar, que el coeficiente de sustentación C_l se vuelve positivo para un ángulo de ataque α negativo de -3° , y aumenta con pendiente constante hasta un $\alpha = 7^\circ$, $C_l=1,4$ (C_l aumenta en 0,14, por cada grado de aumento en el ángulo de ataque). Luego ésta pendiente baja en el rango de α entre 7° y 15° para luego disminuir (C_l aumenta desde 1,4 a 1,6 en 8° , aumento de 0.025 por grado).

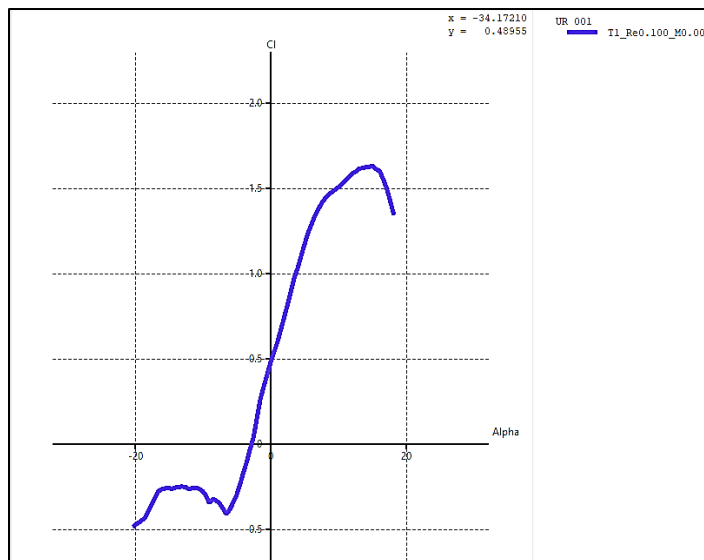


Figura 31. Gráfica C_l vs α para el nuevo perfil optimizado UR001

Fuente propia: gráfica construida en software XFLR5

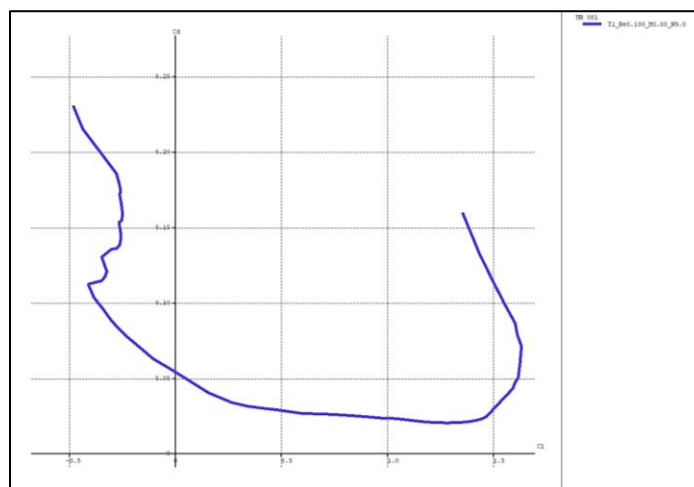


Figura 32. Gráfica C_d vs C_l para el nuevo perfil optimizado UR001

Fuente propia: gráfica construida en software XFLR5

Finalmente, la gráfica presentada en la figura 33, corresponde al coeficiente de presión C_p , para el perfil generado UR001. Este perfil muestra una curva suave, con solamente una caída/cambio de pendiente en el segundo tercio.

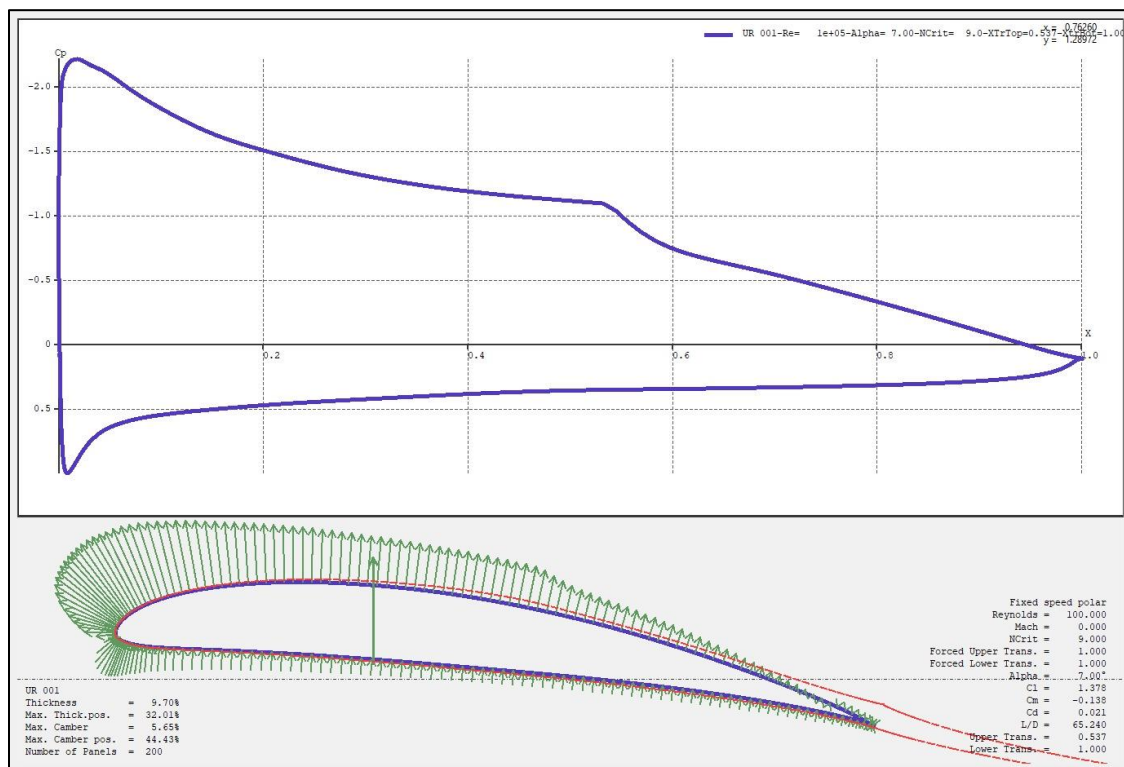


Figura 33. Gráfica C_p vs X , perfil UR001

Los valores de las variables principales de comparación correspondientes al perfil UR001, se muestran en la tabla 13. Se obtiene un coeficiente de sustentación C_{lmax} de 1,62985 para un ángulo de ataque $\alpha = 15,0^\circ$; un valor del factor C_l/C_d de 65,24159 para un ángulo de ataque $\alpha = 7^\circ$; valores de coeficiente de presión C_p mínimos de -5,76753 con $\alpha = 15,0^\circ$; -2,213990 con $\alpha = 7,0^\circ$; y valores de coeficiente de presión C_p máximos de -1,00022 con $\alpha = 15,0^\circ$; -0,998660 con $\alpha = 7,0^\circ$. Estos valores nos muestran un valor óptimo de coeficiente de sustentación con bajo arrastre, para un rango de ángulos de ataque amplios, y con ángulos de ataque negativos para inicio de sustentación. Podemos afirmar entonces que el perfil es adecuado para su aplicación en álabes de aerogeneradores horizontales, debido a que estos valores maximizan la toma de energía del viento, permite lidiar con sus variaciones de velocidad, y es funcional a la velocidad de 5 m/s.

5.3.5 Análisis del perfil aerodinámico UR001 con SOLID WORKS

Luego de crear el perfil UR001, se procede a cargarlo en el programa SolidWorks, y se simula el comportamiento del mismo, con (CFD - Computational Fluid Dynamics), con el fin de comparar con los resultados obtenidos en el software XFLR5. Este análisis computacional, permite emular parcialmente el comportamiento del perfil en un túnel de viento real.

5.3.5.1 Fluid Simulation de SolidWorks (CFD) vs XFLR5

El análisis de CFD en SolidWorks utiliza métodos numéricos para simular el flujo de fluidos alrededor de un objeto o perfil. Proporciona información detallada sobre las características del flujo, como la distribución de presiones, las fuerzas aerodinámicas y otros parámetros relevantes. Estos resultados pueden ayudar a comprender el comportamiento aerodinámico del perfil y realizar comparaciones con otros datos o modelos. Si este tipo de simulación puede proporcionar información valiosa y detallada, no puede emular completamente el comportamiento en un túnel de viento real. Los túneles de viento físicos tienen sus propias limitaciones y características únicas, como la interacción entre el flujo de aire y el modelo a escala real, la turbulencia, los efectos de borde y la posibilidad de ajustar las condiciones de prueba. Sin embargo, los efectos de las paredes del túnel de viento, son los más relevantes, por su afectación en los resultados obtenidos durante la realización de pruebas experimentales.

El cálculo de perfiles alares en XFLR5 y una simulación en SolidWorks para el cálculo de fuerzas de sustentación y arrastre difieren en algunos aspectos importantes como lo son:

- 1) **Método de análisis:** XFLR5 utiliza métodos basados en teoría de perfiles delgados y cálculos aerodinámicos específicos para obtener coeficientes de sustentación y arrastre. Por otro lado, SolidWorks utiliza un enfoque de simulación de flujo de fluido

computacional (CFD) que resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes para modelar el flujo de aire y calcular las fuerzas.

2) **Simplificaciones y suposiciones:** XFLR5 se enfoca en el análisis de perfiles alares específicos y utiliza suposiciones simplificadas, como el método de panel 2D, el cual tiene en cuenta el espesor del perfil, discretiza la superficie en paneles y resuelve el flujo no viscoso mediante un sistema de ecuaciones $n \times n$, lo que permite cálculos rápidos y estimaciones aproximadas. Por otro lado, SolidWorks permite simular perfiles alares más complejos y tiene la capacidad de considerar flujos compresibles, geometrías tridimensionales y condiciones más realistas.

3) **Configuración y precisión:** XFLR5 está diseñado específicamente para el análisis de perfiles alares y proporciona una interfaz optimizada para ingresar las características del perfil y calcular coeficientes aerodinámicos. SolidWorks, por otro lado, es un software de diseño y simulación general que permite una mayor flexibilidad en la configuración del modelo, pero también requiere más experiencia y ajustes para obtener resultados precisos.

4) **Capacidades adicionales:** SolidWorks ofrece capacidades de simulación más avanzadas, como la capacidad de considerar efectos de flujo turbulento, interacciones entre componentes y análisis de flujo alrededor de ensamblajes completos. Estas características van más allá del alcance de XFLR5, que se centra principalmente en el análisis de perfiles alares individuales.

5) **XFLR5** es una herramienta especializada para el análisis rápido de perfiles alares con suposiciones simplificadas, mientras que SolidWorks proporciona una plataforma más completa para simulaciones de flujo de fluido computacional (CFD) que permiten un análisis más detallado y preciso de fuerzas aerodinámicas en perfiles alares y ensamblajes más complejos.

5.3.5.2 Definición de parámetros iniciales y fórmulas para cálculo de C_l y C_d

En lo relacionado a la presente investigación, se realiza la simulación CFD en SolidWorks, teniendo en cuenta el mismo número de Reynolds, rango de ángulos de ataque, datos de densidad del aire y velocidad del viento con los cuales se ejecutaron los cálculos anteriores realizados en XFLR5. No obstante, es indispensable fijar parámetros adicionales para iniciar la simulación, en la cual se pretende comprender el comportamiento del fluido a través del perfil aerodinámico escogido, mediante el análisis dinámico de fluidos computacional CFD en la herramienta Flow Simulation. Los demás parámetros de simulación utilizados fueron los siguientes:

Ajuste del dominio computacional para una simulación 2D: Es necesario definir el espacio alrededor del perfil para capturar adecuadamente el flujo de viento que lo rodea. Para el presente estudio, el dominio computacional se construye de forma rectangular iniciando en el borde del perfil en cada uno de sus lados por él rectángulo que se forma. En este punto de partida se van aumentando las medidas hasta ajustarse al espacio físico real referente a las dimensiones del túnel de viento específico donde se realice una hipotética fase experimental. Siendo las siguientes dimensiones (expresadas en metros):

X1	1,13254613 m
X2	-0,14 m
Y1	0,2 m
-Y2	-0,3 m

Malla computacional: El tamaño de malla se define luego de realizar varias simulaciones, con el tamaño cada vez más fino, hasta que no se presentes variaciones significativas en los resultados, este se define según la escala de nivel de la malla global que se encuentra entre 1 al 7, siendo 1 el tamaño de las celdas más grande y 7 el tamaño de las celdas más pequeñas, el presente estudio usa el nivel 7 para la ejecución de la simulación siendo el número más alto en el refinamiento de la malla y posteriormente se define el factor de proporción para establecer la densidad de la malla local alrededor del

perfil aerodinámico uniformemente a través del dominio computacional, donde el nivel de refinamiento de las celdas se encuentra entre 1 y 9, siendo escogido como criterio el valor 5 para la presente simulación.

Metas (Goals). Se definen los resultados a obtener en sus valores promedios para la ejecución de esta simulación por medio de las siguientes variables: 1) Curva de distribución de presiones; 2) Velocidad promedio del fluido; 3) Fuerza Normal en X; 4) Fuerza Normal en Y.

Fórmulas para el cálculo de C_L y C_D a partir de variables generadas en SolidWorks: Con el fin de obtener el coeficiente de sustentación y coeficiente de arrastre a partir de los datos de simulación generados por SolidWorks, y ser comparados con los datos recogidos en el software de simulación XFLR5, se utilizan las siguientes fórmulas corregidas por ángulo de ataque propuestas en el trabajo de investigación denominado “Investigation of SolidWorks flow simulation as a valid tool for analyzing airfoil performance characteristics in low Reynolds number flows” [20].

$$L = F_y \cdot \cos \alpha - F_x \cdot \sin \alpha \quad [47]$$

$$D = F_x \cdot \cos \alpha + F_y \cdot \sin \alpha \quad [48]$$

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A} \quad [49]$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A} \quad [50]$$

Donde:

F_y = Fuerza Normal en Y calculada mediante programa SolidWorks. (N)

F_x = Fuerza Normal en X calculada mediante programa SolidWorks. (N)

α = Angulo de ataque del perfil aerodinámico.

L = Fuerza corregida por ángulo de ataque para C_l (N)
 D = Fuerza corregida por ángulo de ataque para C_d (N)
 ρ es la densidad del aire (kg/m^3).
 A es el área de barrido perpendicular al perfil alar (m^2).
 V es la velocidad del viento (m/s).

5.3.6 Impresión 3D del perfil aerodinámico UR001

A continuación, se observa la impresión del perfil aerodinámico UR001 desarrollado en impresora 3D (figura 34), este se le aplicó una reducción a escala del 50%, es decir, su representación está en 1:2. (cuerda de 50 cms, altura 5cms, espesor/span 10 cms) El material empleado fue PLA (con relleno del 10%), el cual consiste en ácido poliláctico, y corresponde a uno de los materiales más populares utilizados en la impresión 3D de escritorio. Es el filamento predeterminado elegido para la mayoría de las impresoras 3D basadas en extrusión porque se puede imprimir a baja temperatura y no requiere una cama caliente. También es uno de los filamentos más ecológicos del mercado actual. Derivado de cultivos como el maíz y la caña de azúcar, el PLA es renovable y, lo que es más importante, biodegradable. Su densidad es de $1,24 \text{ gr/cm}^3$, resistencia 65MPa , rigidez estructural $7,5/10$; y durabilidad $4/10$. El peso de la pieza luego de impresa fue de 365 gr, y su volumen de 16,5 litros, lo cual da una densidad del material de 0.2212 gr/cm^3 , valor bajo que permitiría usar el prototipo para realizar pruebas experimentales en túnel de viento.

La densidad de un álabe de aerogenerador puede variar dependiendo del material utilizado en su construcción. A continuación, se proporcionan algunos ejemplos de densidades aproximadas para diferentes materiales comunes utilizados en álabes de aerogeneradores [21]:

- 1) Fibra de vidrio: La densidad típica de un álabe de fibra de vidrio puede variar entre 1.8 g/cm^3 y 2.2 g/cm^3 .

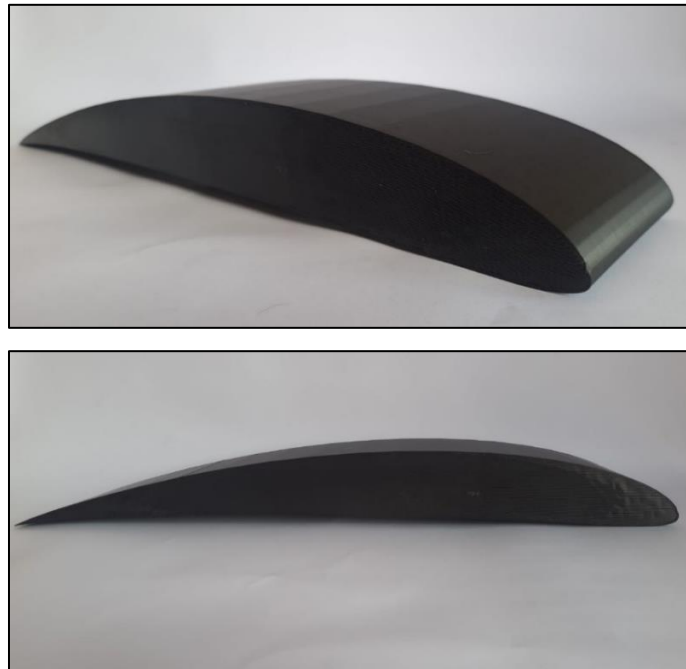


Figura 34. Impresión 3D de prototipo perfil aerodinámico UR001 en PLA

- 2) Madera: La densidad de un álabe de madera puede variar dependiendo de la especie de madera utilizada, pero generalmente se encuentra en el rango de 0.4 g/cm^3 a 0.9 g/cm^3 .
- 3) Materiales compuestos de fibra de carbono: Los álabes fabricados con materiales compuestos de fibra de carbono tienen una densidad más baja en comparación con otros materiales. La densidad típica puede variar entre 1.4 g/cm^3 y 1.8 g/cm^3 .

El valor densidad calculada para el prototipo 0.2212 gr/cm^3 , sería similar al de álabes de aerogeneradores construidos en fibra de vidrio.

Capítulo 6

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Luego de aplicar la metodología explicada en el capítulo 5, se realizaron simulaciones en SolidWorks para valores de ángulo de ataque desde -13 hasta 27 grados; en total 19 simulaciones independientes. Para cada una de éstas, se varió únicamente, el ángulo de ataque, dejando los mismos parámetros de: dominio computacional, tamaño de malla y metas, Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 14. En ésta, se detallan las siguientes variables:

A; como el área de referencia transversal al perfil para cada ángulo de ataque α , en grados sexagesimales; **F_x** e **F_y**, las fuerzas perpendiculares en X e Y, en Newtons; **L**; la fuerza de sustentación en Newtons; **D**; la fuerza de arrastre en Newtons; **Cl**, coeficiente de sustentación adimensional; **Cd**, coeficiente de arrastre adimensional; y **Cl/Cd**, relación de coeficientes sustentación / arrastre, adimensional.

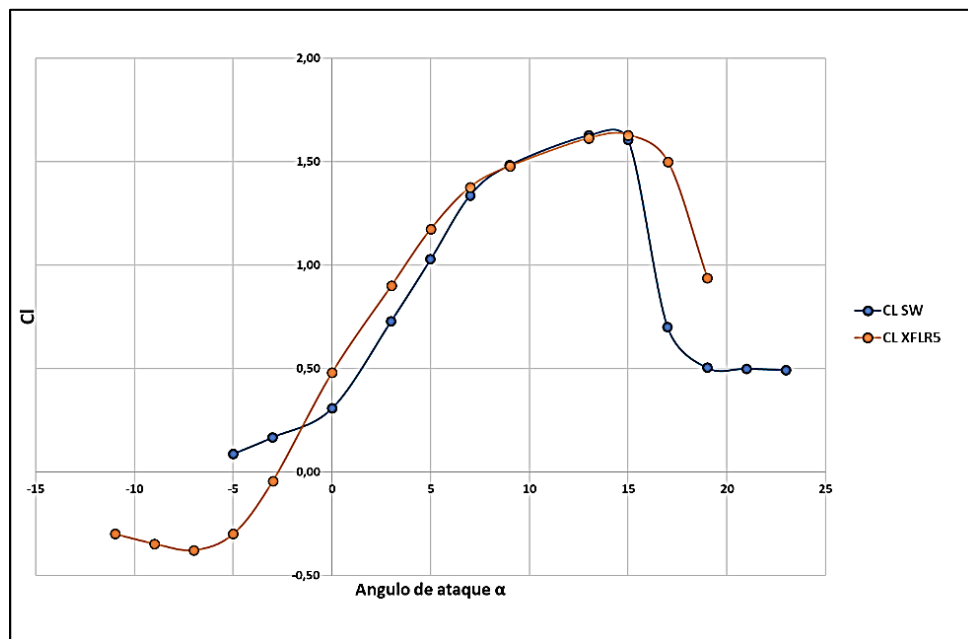
El **Cl máximo** calculado fue de **1,6253**, para un $\alpha = 13^\circ$, mientras que el **Cl/Cd máximo**, corresponde a un valor de **56,293** para un $\alpha = 7^\circ$.

En la figura 35, podemos observar la gráfica comparativa entre el Cl calculado con XFLR5 y el Cl calculado con SolidWorks en donde se presenta una similitud aceptable entre las dos, con una pendiente similar para valores de α entre 0° y 7° ; y α entre los 7° y 15° , para ambos resultados. Lo mismo sucede con el Cl máximo que se da entre los $\alpha = 13^\circ$ y $\alpha = 15^\circ$ de ángulo de ataque.

En la figura 36, se puede observar la comparación de Cl/Cd vs α calculado con XFLR5 y Cl/Cd vs α calculado con SolidWorks. Se observa una pendiente similar para α entre -4° y 7° ; con un Cl/Cd máximo más alto calculado en XFLR5 (65,24) comparado con SolidWorks (56,29); y luego una pendiente de caída de este parámetro mayor en SolidWorks que XFLR5.

Tabla 14. Resultados Simulación CFD con SolidWorks

A (m ²)	α (°)	F _x (N)	F _y (N)	L (N)	D(N)	Cl	Cd	Cl/Cd
0,02000	-13	0,0081971	0,00892	0,0105	0,0060	0,0344	0,0195	17,6056
0,00205	-11	0,0068660	0,01200	0,0131	0,0044	0,4165	0,1416	29,4234
0,00183	-9	0,0061713	0,01374	0,0145	0,0039	0,5185	0,1408	36,8365
0,00163	-7	0,0067345	0,00805	0,0088	0,0057	0,3521	0,2278	15,4559
0,00146	-5	0,0093447	0,00116	0,0020	0,0092	0,0881	0,4120	2,1375
0,00131	-3	0,0064555	0,00304	0,0034	0,0063	0,1686	0,3146	5,3575
0,00117	0	0,0021009	0,00552	0,0055	0,0021	0,3075	0,1171	26,2539
0,00126	3	0,0022221	0,01415	0,0140	0,0030	0,7292	0,1540	47,3584
0,00149	5	0,0022578	0,02378	0,0235	0,0043	1,0279	0,1891	54,3578
0,00188	7	0,0020898	0,03893	0,0384	0,0068	1,3365	0,2374	56,2926
0,00228	9	0,0099446	0,05393	0,0517	0,0183	1,4821	0,5233	28,3206
0,00256	13	0,0124498	0,06823	0,0637	0,0275	1,6253	0,0701	23,1746
0,00285	15	0,0153840	0,07652	0,0699	0,0347	1,6045	0,0795	20,1729
0,00313	17	0,0057409	0,03690	0,0336	0,0163	0,7001	0,3391	20,6455
0,00343	19	0,0070022	0,03039	0,0265	0,0165	0,5037	0,3144	16,0193
0,00372	21	0,0083847	0,03372	0,0285	0,0199	0,4996	0,3493	14,3009
0,00402	23	0,0101104	0,03725	0,0303	0,0239	0,4930	0,3877	12,7150
0,00431	25	0,0112800	0,03868	0,0303	0,0266	0,4588	0,4025	11,3996
0,00460	27	0,0124488	0,03891	0,0290	0,0288	0,4116	0,4079	10,0906

Figura 35. Gráfica Cl vs α del perfil UR001 con datos simulación SolidWorks

Fuente: Elaboración propia

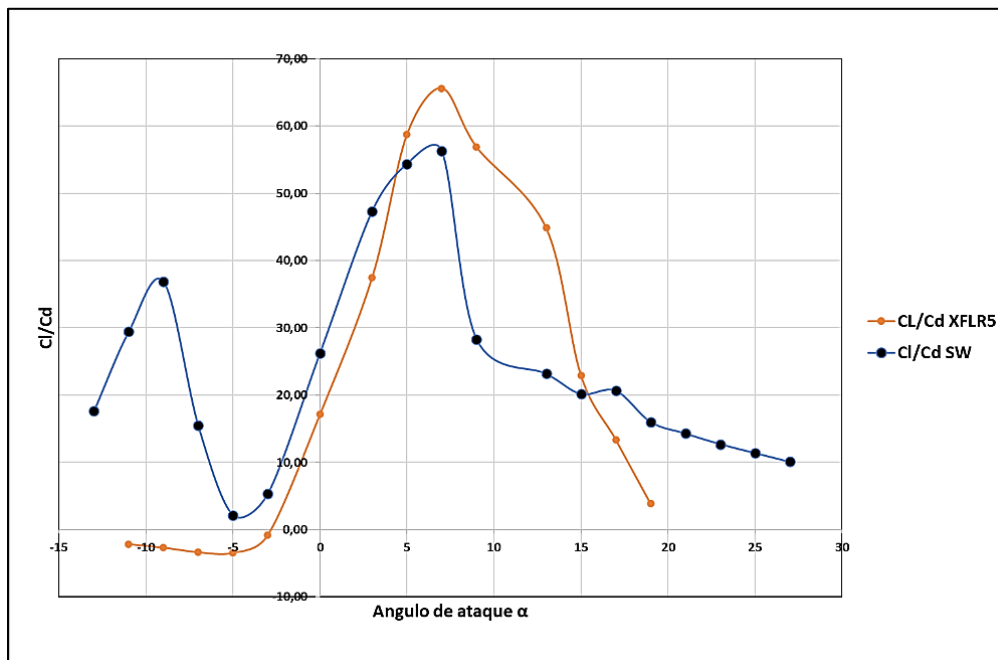


Figura 36. Gráfica Cl/Cd vs α del perfil UR001 con datos simulación SolidWorks
Fuente: Elaboración propia

En general, se puede concluir, que las simulaciones realizadas con SolidWorks, a efectos prácticos, permiten analizar, contrastar y verificar los cálculos realizados a través del programa XFLR5, para el presente caso del perfil UR001. La desviación estándar calculada de los datos obtenidos con SolidWorks respecto a los datos originales calculados del Coeficiente de Sustentación en XFLR5 es de 0,3055, lo que representa el 18,8% del valor máximo de Cl obtenido. En el caso de Cl/Cd , el error calculado es de 6,8849, lo que representa el 12,23% del valor máximo obtenido para Cl/Cd . Las tablas con los cálculos realizados de error se pueden observar en el apéndice 3, “Cálculos de desviación estándar para resultados SolidWorks vs XFLR5 perfil UR001”.

El porcentaje de error aceptable para valores de Cl y Cl/Cd puede variar dependiendo del contexto y la aplicación específica. En general, se busca minimizar el error tanto como sea posible para obtener resultados más precisos y confiables. Sin embargo, no existe un valor estándar universalmente aceptado para el porcentaje de error, ya que puede depender de múltiples factores, como lo son la industria, el tipo de análisis,

los estándares específicos y la tolerancia permitida. En algunas aplicaciones, se establecen umbrales de error muy bajos, como en la industria aeroespacial, donde la precisión es crítica, y se pueden establecer requisitos estrictos para mantener el error dentro de un porcentaje bajo, como el 1% o incluso menor. En otros casos, un margen de error entre el 5% o 20% puede considerarse aceptable, especialmente en análisis preliminares o cuando hay limitaciones de recursos o tecnología [4]. Para el presente trabajo de investigación, y en el entendido de que trata de un análisis preliminar a pruebas experimentales, tomamos el valor del 20% como un valor aceptable para la verificación de los resultados obtenidos en XFLR5 respecto a SolidWorks.

En la figura 37, se puede observar el perfil de velocidad del viento calculado mediante la simulación SolidWorks, para velocidades de recurso del viento promedio de 5 m/s, y con ángulos de ataque $\alpha = 0^\circ$.

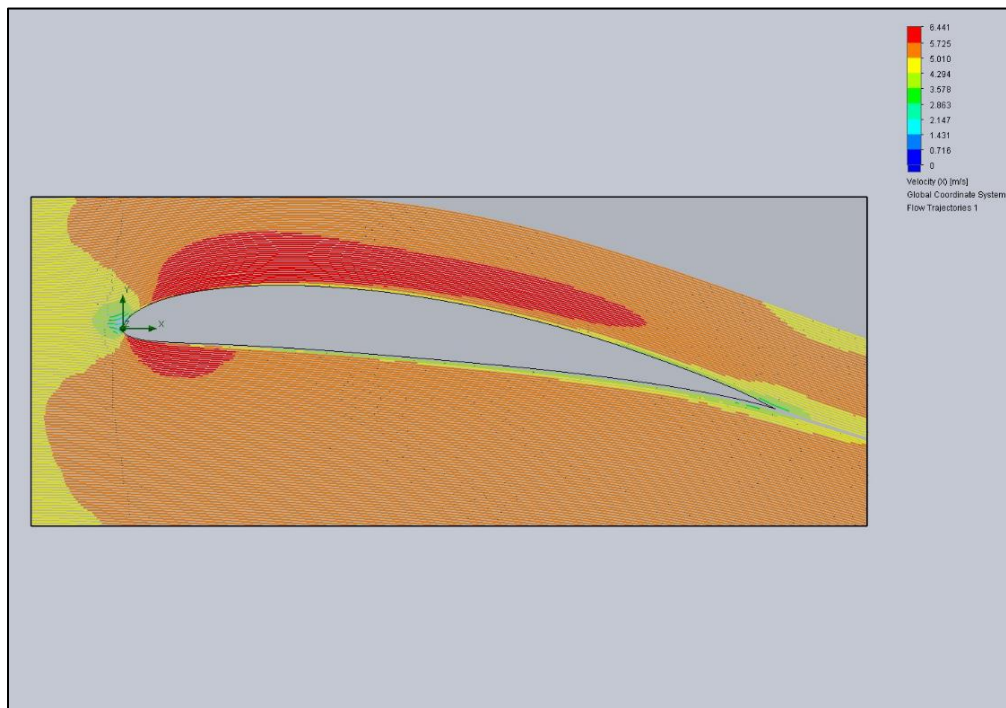


Figura 37. Velocidad del viento simulada en eje X SolidWorks perfil UR001 $\alpha = 0^\circ$

Luego de realizado el análisis de perfiles aerodinámicos, se realizan los cálculos necesarios para estimar el coeficiente de potencia para el aerogenerador definido en el capítulo 5.1 y la figura 12 de la presente investigación. Este consta de 3 álabes, con radio de rotor de $R = 1$ metro, y tip speed ratio $\lambda = 3$. Las variables necesarias se muestran en la tabla 15, usando C_{lmax} , C_l/C_d máx. y ángulo de ataque óptimos obtenidos para el perfil UR001.

Tabla 15. Variables para cálculo de Coeficiente de potencia de aerogenerador

Tip speed ratio λ	Velocidad del viento U_∞ m/s	Radio del rotor R m	Velocidad tangencial Ω m/s	Número de álabes B
3	5	1,00	15,00	3
Delta tip speed ratio $\Delta\lambda$	Coeficiente de sustentación C_L Diseño	Coeficiente sustentación-arrastre C_l/C_d	Coeficiente de planeo C_d/C_l	ángulo de ataque en grados α
0,15	1,6253	56,293	0,017764	7

En la tabla 16, se realiza el cálculo del coeficiente de potencia tomando como base las siguientes ecuaciones:

Ecuación (37) para el cálculo de la tip speed ratio - relación de velocidad en la punta λ_{ti}

Ecuación (40) para el cálculo del ángulo de torsión óptimo ϕ_{opt}

Ecuación (14) para el cálculo del ángulo de paso Θ_p

Ecuación (41) para el cálculo del tip loss factor -factor de pérdida en la punta, F_i

Ecuación (42) para el cálculo de la longitud de la cuerda en r_i

Ecuación (45) para el cálculo de la sumatoria de ΔC_{pot} para cada tramo en que se dividió el álabe.

Es de anotar, que R (1 m) se dividió en $N = 18$ elementos, dejando 0,15 metros para el rotor, y ubicando la punta a 1 metro del eje central.

Los resultados obtenidos, indican que manteniendo el ángulo de ataque constante a lo largo del álabe, el ángulo de paso Θ_p , varía desde los $5,29^\circ$ en la punta, hasta los $36,85^\circ$ en el lado rotor. Respecto a la longitud de la cuerda, ésta varía entre los 22 cms en la punta, hasta los 38 cms en el lado rotor.

Tabla 16. Cálculo de coeficiente de potencia aerogenerador tipo

r/R	r_i	λ_{ri}	φ_{opt}	Θ_p	F_i	C_i	ΔC_{pot}
0,15	0,15	0,45	43,85	36,85	1,0000	0,22	0,005
0,20	0,20	0,60	39,36	32,36	1,0000	0,26	0,008
0,25	0,25	0,75	35,42	28,42	0,9999	0,29	0,011
0,30	0,30	0,90	32,01	25,01	0,9998	0,31	0,014
0,35	0,35	1,05	29,07	22,07	0,9996	0,32	0,017
0,40	0,40	1,20	26,54	19,54	0,9992	0,34	0,020
0,45	0,45	1,35	24,35	17,35	0,9988	0,35	0,023
0,50	0,50	1,50	22,46	15,46	0,9982	0,35	0,026
0,55	0,55	1,65	20,81	13,81	0,9976	0,36	0,029
0,60	0,60	1,80	19,37	12,37	0,9967	0,36	0,032
0,65	0,65	1,95	18,10	11,10	0,9958	0,37	0,034
0,70	0,70	2,10	16,98	9,98	0,9946	0,37	0,037
0,75	0,75	2,25	15,97	8,97	0,9932	0,37	0,040
0,80	0,80	2,40	15,08	8,08	0,9916	0,37	0,042
0,85	0,85	2,55	14,28	7,28	0,9896	0,38	0,045
0,90	0,90	2,70	13,55	6,55	0,9873	0,38	0,047
0,95	0,95	2,85	12,89	5,89	0,9845	0,38	0,050
1,00	1,00	3,00	12,29	5,29	0,9812	0,38	0,052
Cpot							0,533

Finalmente, el coeficiente de potencia calculado, es de 0,533, el cual, si tenemos en cuenta el límite de Betz representa el 89% del valor máximo posible. Esto, sin contar con las eficiencias mecánica y eléctrica.

La potencia calculada de acuerdo a la ecuación (2) del aerogenerador sería de 125W. Inicialmente se propuso cubrir el 50% de las necesidades establecidas según la carga promedio calculada en la tabla 1, que equivale a 104W. Con el diseño realizado de aerogenerador, se cubriría esta necesidad.

Capítulo 7

CONCLUSIONES

1. Luego de investigar velocidades del viento, según el atlas de viento publicado por la UPME, se determina como velocidad del viento objetivo, y representativa para una solución viable en las ZNI, el valor de 5 m/s.

2. Luego del análisis realizado con el software XFLR5 y a partir de los resultados obtenidos para 8 perfiles alares preseleccionados en la literatura (Wortmann FX60-126, SG6043, SG6042, NACA 4415, NACA 0018, GOE 300/AF300, NACA 4412, CLARK Y), se escogen como perfiles óptimos el SG6043; y el GOE300. Estos dos perfiles, son los que manejan mejores condiciones aerodinámicas de captura de energía a la velocidad del viento definida para la presente investigación, de 5 m/s.

3. Con el fin de crear un perfil aerodinámico optimizado, se ejecuta la herramienta “Interpolate Foils”, en la cual, se cargan los 2 perfiles preseleccionados, y se combinan variando parámetros, creando un nuevo perfil mixto al cual se asignan pesos porcentuales de incidencia de cada perfil en el nuevo perfil. Para el presente caso, se estableció incidencia de 80% GOE300 + 20%SG6043, y se asignó en nombre de UR001 al nuevo perfil creado.

4. El Comportamiento del coeficiente de sustentación (C_l) en función del ángulo de ataque (α), del perfil UR001 muestra un comportamiento positivo para un ángulo de ataque negativo de -3° . A medida que el ángulo de ataque aumenta en el rango de -3° a 7° el coeficiente de sustentación aumenta de manera constante en 0.14 por cada grado de aumento, sin embargo, la pendiente de aumento disminuye en el rango de 7° a 15° , donde el coeficiente de sustentación aumenta desde 1.4 hasta 1.6 en 8° con un incremento de 0.025 por grado.

5. En la gráfica de Cl/Cd vs α del perfil UR001 en XFLR5, se obtiene un valor del factor de 65.241 para un ángulo de ataque de 7° , lo que indica una relación favorable entre sustentación y arrastre para este perfil

6. Valores que se destacan en el análisis del perfil UR001 en XFLR5, se observa el coeficiente de sustentación máximo (Cl máx.) de 1.62985, para un ángulo de 15° , valores máximos y mínimos del coeficiente de presión, un valor del factor Cl/Cd de 65.24159 para un ángulo de ataque de 7° . Estos valores indican un perfil óptimo con alta capacidad de generación de sustentación y baja resistencia al arrastre, siendo un perfil adecuado para su uso en aplicaciones de aerogeneradores de baja potencia que funcionen a bajas velocidades del viento.

7. Este perfil aerodinámico UR001, demostró tener características favorables para su aplicación en alabes de aerogeneradores horizontales, su comportamiento aerodinámico muestra una generación de sustentación a ángulos de ataque negativos, una relación favorable entre sustentación y arrastre, y un rendimiento general óptimo en un amplio rango de ángulos de ataque, de igual manera la simulación computacional realizada en Solid Works, emula parcialmente el comportamiento del perfil en el túnel de viento real y ofrece una verificación de los resultados obtenidos en XFLR5

8. El uso de impresión 3D con el material PLA para la construcción del prototipo de perfil aerodinámico UR001 de dimensiones cuerda de 50 cms, altura 5cms, espesor/span 10 cms y relleno 10%, permitió corroborar su viabilidad, dado a que sus propiedades físicas como densidad ($1,24 \text{ gr/cm}^3$), resistencia (65MPa), rigidez estructural (7,5/10); y durabilidad (4/10), complementado con su baja densidad (peso 365 gr - volumen 16,5 litros – densidad 0.2212 gr/cm^3), permitiría usar el prototipo en pruebas experimentales posteriores en túnel de viento.

9. Tras realizar las comparaciones de simulación entre los softwares XFLR5 y SolidWorks, se observa una notable proximidad entre los datos obtenidos en XFLR5 y los

resultados simulados en SolidWorks. El error calculado para C_l fue de 0.355 (18% de C_l máximo) y para C_l/C_d , de 6,88 (12,2% de C_l/C_d máx), valores que están por debajo del 20%, lo cual se considera aceptable en trabajos preliminares a pruebas experimentales. Esto sugiere que los resultados obtenidos en XFLR5 son altamente representativos de la realidad y pueden utilizarse como una base confiable para el análisis de perfiles aerodinámicos. No obstante, es importante destacar la necesidad de contrastar estos resultados con pruebas experimentales reales en futuros trabajos; la validación experimental proporciona una mayor certeza y precisión en la evaluación de los perfiles, garantizando así una aplicación más precisa en situaciones reales.

10. Se calculó el coeficiente de potencia C_{pot} para un aerogenerador tipo de 3 álabes, con tip speed ratio de 3, radio de rotor R de 1 metro, asumiendo una velocidad promedio de viento de 5 m/s. Las variables calculadas para el perfil UR001, definieron el ángulo de ataque en 7° , $C_{l_{diseño}}$ en 1,6253 y C_l/C_d máx. en 56,293. Para estas condiciones, se obtuvo $C_{pot} = 0,533$, lo que nos da una potencia nominal de 125W, lo cual cubre el 50% de las necesidades de un hogar promedio ZNI, definidas en 208W. Los álabes se diseñaron con una longitud de 1 metro, divididos en 18 secciones con tamaños de cuerda que varían entre los 22 y 38 cms, y ángulos de torsión, entre los $12,3^\circ$ y $43,8^\circ$.

11. Este trabajo, puede servir como base futuras investigaciones en este tema, tomando como base el nuevo perfil aerodinámico desarrollado UR001, para construir álabes de alta eficiencia aerodinámica a bajas velocidades de viento.

REFERENCIAS

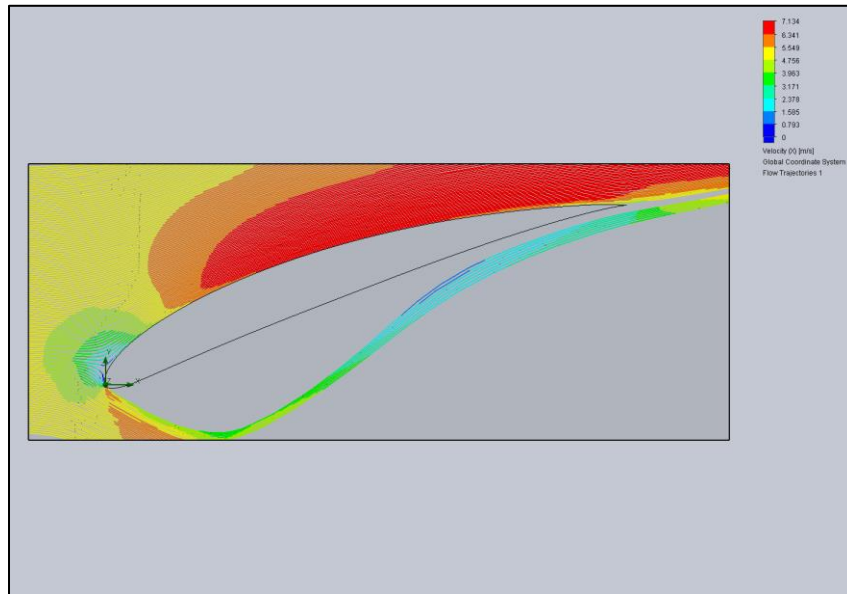
- [1] C. García Torres, *Diseño y experimentación de un prototipo de aerogenerador de baja potencia*, Bogotá: Universidad de Los Andes, 2018.
- [2] UPME, «Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia,» Ministerio de Minas y Energía, Bogotá D.C., 2015.
- [3] Y. Puertas González, *Electrificación sostenible de Zonas No Interconectadas del pacífico colombiano, por medio de clusters prototipo de sistemas híbridos solar-eólico-hidro-diésel optimizados con Homer*, Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana, 2016.
- [4] J. D. J. Anderson, *Fundamentals of Aerodynamics*, Fifth Edition ed., New York: Mc Graw Hill, 2017.
- [5] M. Hansen, *Aerodynamics of Wind Turbines*, London, Sterling VA: EarthScan, 2008.
- [6] A. Mulugeta Biadgo y G. Aynekulu, «Aerodynamic Design of Horizontal Axis Wind Turbine Blades,» Department of Mechanical Engineering, Ethiopia, Ethiopia, 2017.
- [7] J. Manwell, J. McGowan y A. Rogers, *Wind Energy Explained*, 2 ed., Great Britain: WILEY, 2009.
- [8] J. d. D. Rico Ruiz, *Análisis aerodinámico de perfiles alares en forma de diamante en régimen supersónico mediante CFD*, Cantabria: E.T.S. Ing. Industriales y de telecomunicación, Universidad de Cantabria, 2020.
- [9] Airfoil Tools, «<http://airfoiltools.com>,» 2023. [En línea]. Available: <http://airfoiltools.com/calculator/reynoldsnumber>. [Último acceso: 12 06 2023].
- [10] J. J. Soto Gutierrez, *Desarrollo de la Energía Eólica en Colombia*, Bogotá D.C.: Universidad de América, 2016.
- [11] C. L. Pabón R, E. Florez S y J. C. Serrano R, «Diseño del álabe de un aerogenerador horizontal de baja potencia.,» *Revista de la facultad de ciencias básicas*, vol. 1, nº 17, pp. 219-229, 2019.
- [12] R. K. Singha, A. M. Rafiuddin, Z. Mohammad Asid y L. Young-Ho, «Design of a low Reynolds number airfoil for small horizontal axis wind turbines,» *Renewable Energy*, pp. 1-11, 2012.
- [13] M. Drela, «XFOIL An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoils,» *MIT, Department of Aeronautics and Astronautics*, p. 12, 1989.
- [14] R. Dubois, *Análisis del futuro de la energía eólica en Europa*, Barcelona: Universidad Politécnic de Catalunya Barcelonatech, 2021.
- [15] L. A. Acuña Otero, «Diseño geométrico del perfil del Aspa de un Aerogenerador de Baja Potencia,» Universidad de Pamplona, Pamplona, 2018.
- [16] G. Richmond-Navarro, M. Montenegro-Montero y C. Otálora, «Revisión de los perfiles aerodinámicos apropiados para turbinas eólicas de eje horizontal y de

- pequeña escala en zonas boscosas,» *Revista Lasallista de Investigación*, vol. 17, n° 1, pp. 233-251, 2020.
- [17] D. E. Moyano Camargo y C. E. Pinzón Casallas, «Diseño de un prototipo de turbina eólica de eje vertical para pruebas de laboratorio,» Fundación Universidad de América, Bogotá. D.C., 2018.
- [18] O. I. Orduz Berdugo y J. E. Suárez Pérez, Diseño y construcción de un prototipo de turbina eólica de eje vertical para generación a baja potencia, Bucaramanga, 2011.
- [19] UPME, Primer balance de Energía Útil para Colombia y Cuantificación de las Perdidas energéticas relacionadas y la brecha de eficiencia energética, Bogotá, 2019.
- [20] A. A. Silva Carrero, Mejora aerodinámica del perfil NACA 4412 mediante Hoyuelos esféricos: estudio CFD, Escuela Politécnica Superior de Elche, 2022.
- [21] N. P. Ganiele M., M. S. Villanueva A., A. D. Lingeri S. y M. M. Ponzoni L., «Innova Untref,» Julio 2021. [En línea]. Available: <https://revistas.untref.edu.ar/index.php/innova/article/view/1106>.
- [22] J. S. Wallace, Investigation Of Solidworks Flow Simulation As A Valid Tool For Analyzing Airfoil Performance Characteristics In Low Reynolds Number Flows, Stillwater Oklahoma: Oklahoma State University, 2019.
- [23] R. M. Jones, Mechanics of Composite Materials, 1999.
- [24] B. Bharathiraja, T. Sudharsanaa y A. Bharghavi, «Biohydrogen and Biogas—An overview on feedstocks and enhancement process,» *Fuel*, vol. 185, pp. 810-828, 2016.
- [25] Z. Csereklyei, Q. Songze y T. Ancev, «The effect of wind and solar power generation on wholesale electricity prices in Australia,» *Energy Policy*, vol. 131, pp. 358-369.
- [26] J. A. Arboleda G., Manual de evaluación de impacto ambiental de proyectos, obras o actividades., Medellín, Colombia, 2008.
- [27] A. A. S. Carrero, «Mejora aerodinámica del perfil NACA 4412 mediante hoyuelos esféricos: Estudio CFD,» Universidad Miguel Hernández de Elche, Alicante, España, 2022.

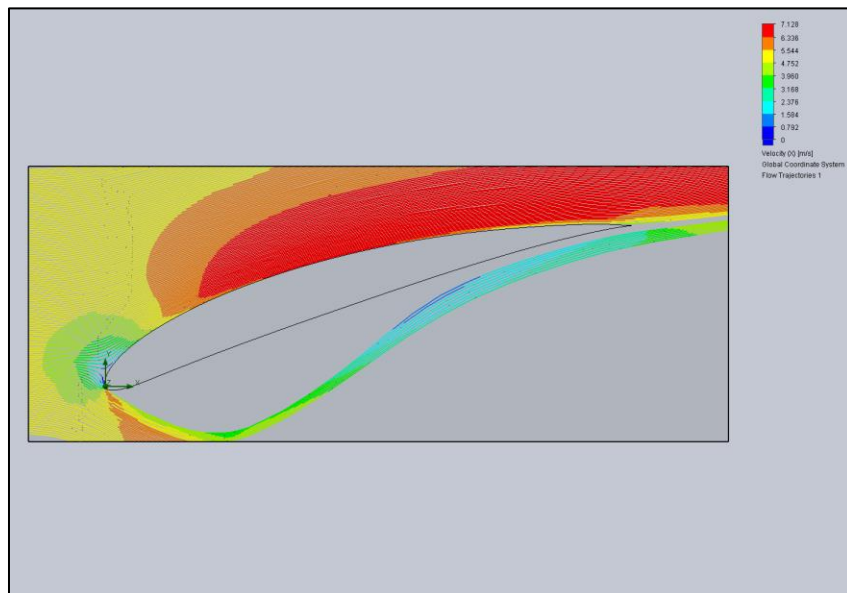
APÉNDICES

Apéndice 1. Comportamiento de la velocidad del viento a diferentes ángulos de ataque del perfil UR001

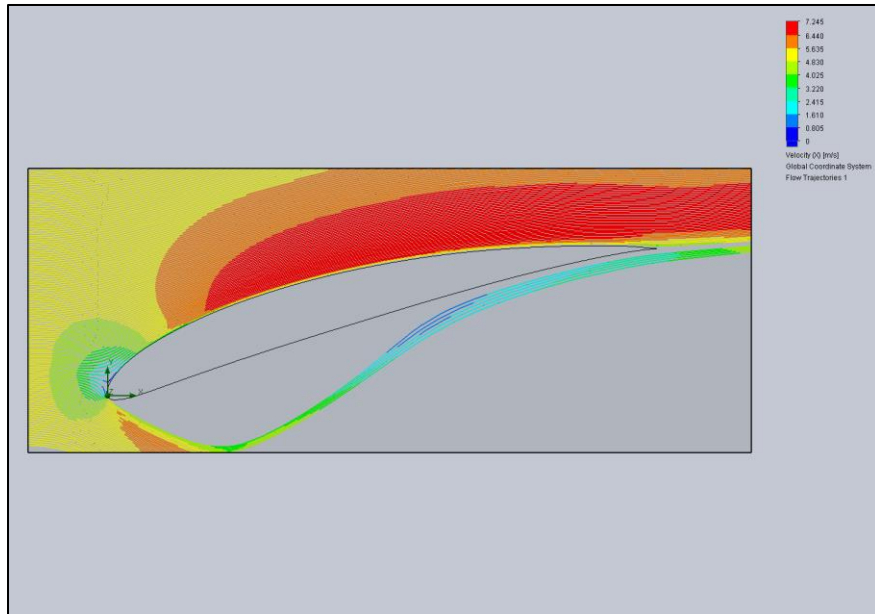
-13 grados



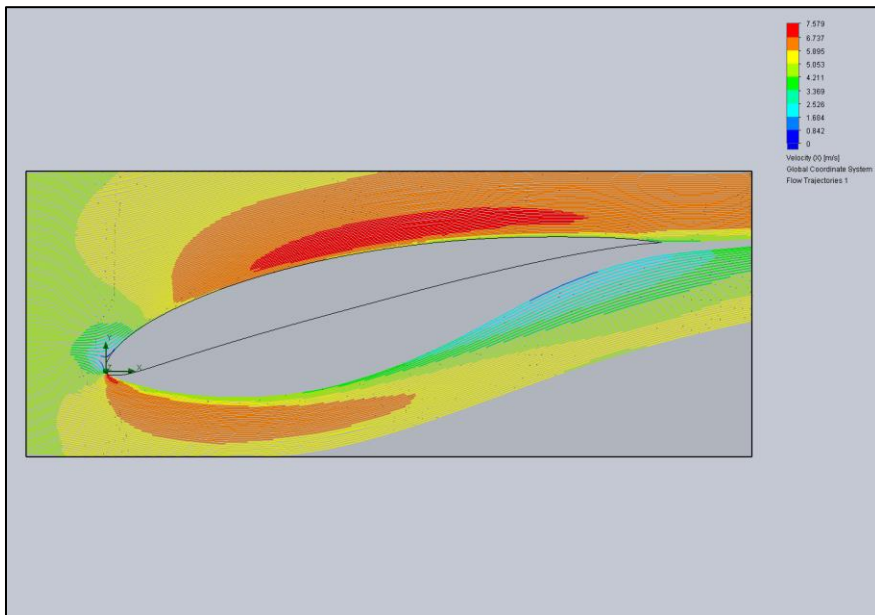
-11 grados



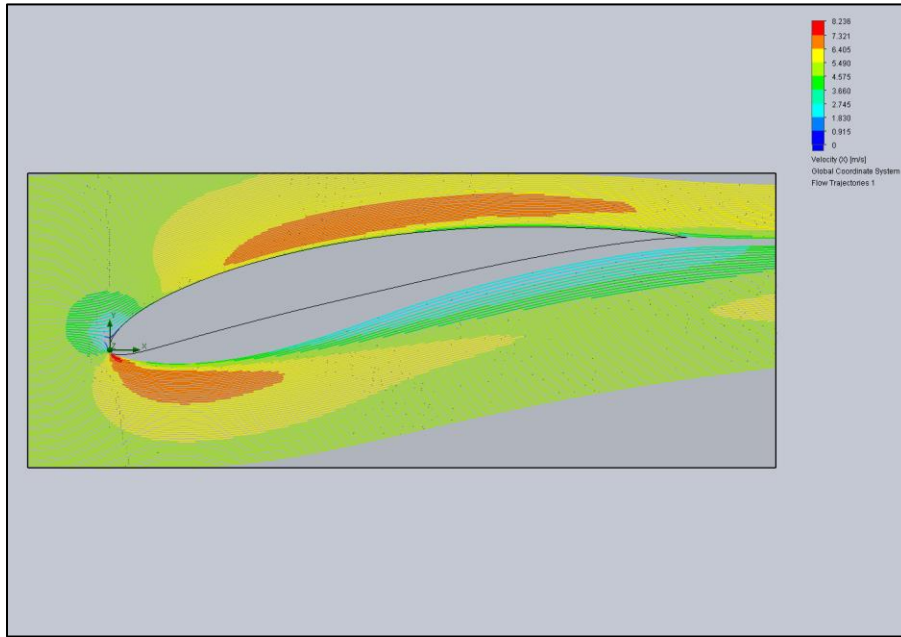
-9 grados



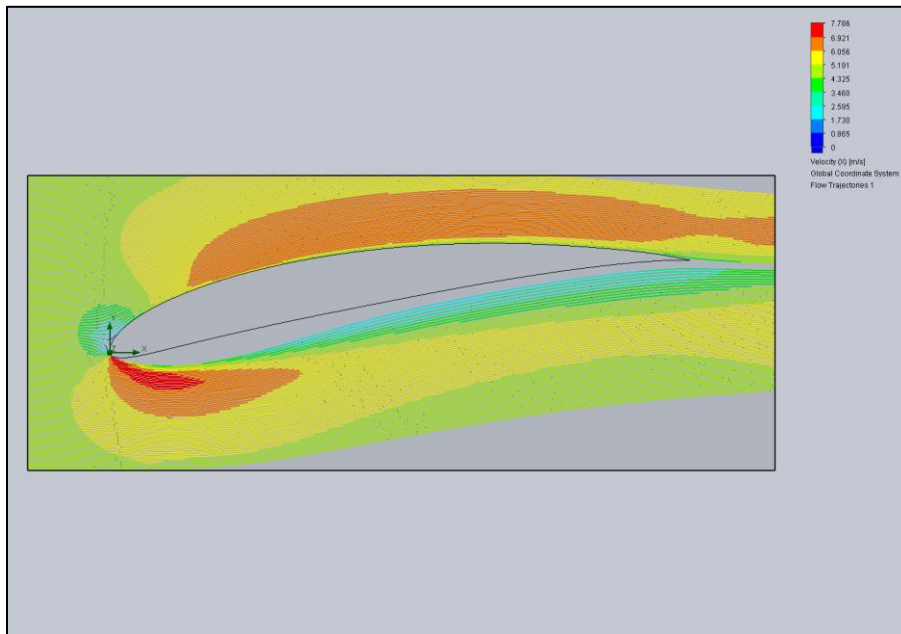
-7 grados



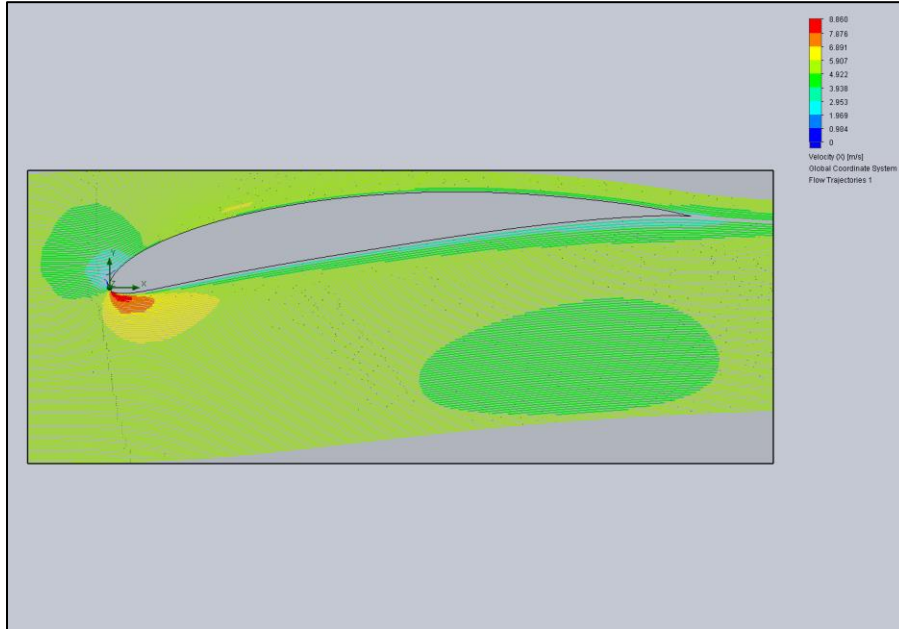
-5 grados



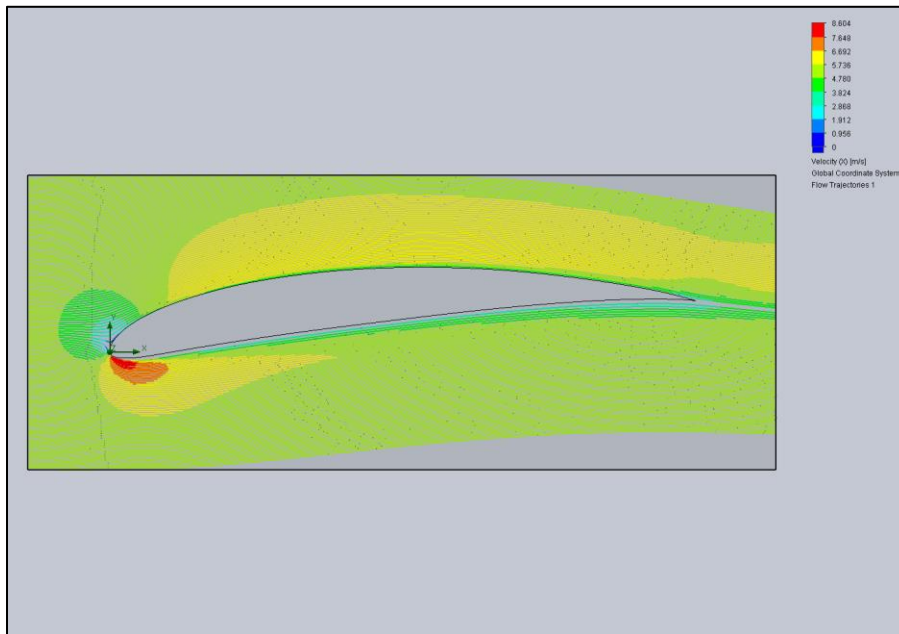
-3 grados



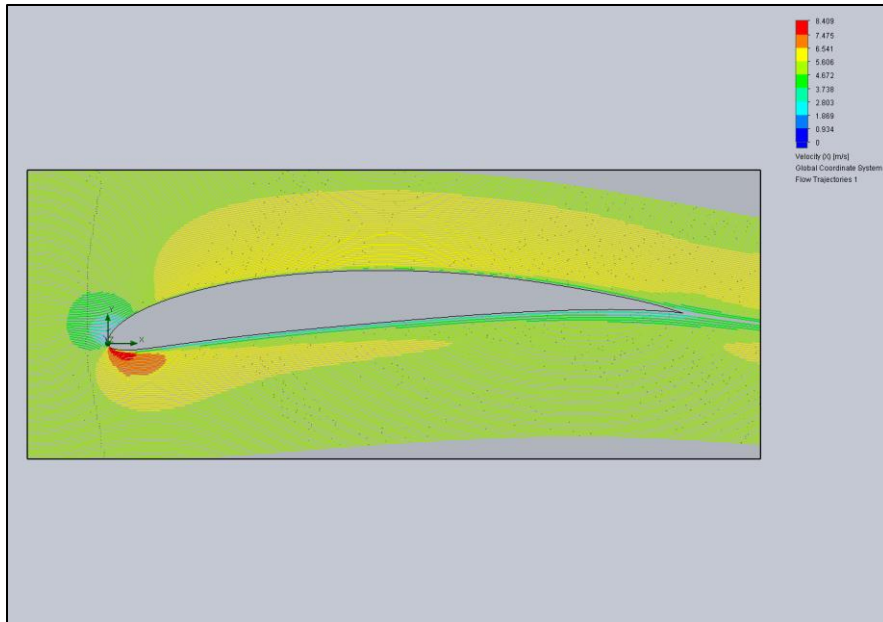
0 grados



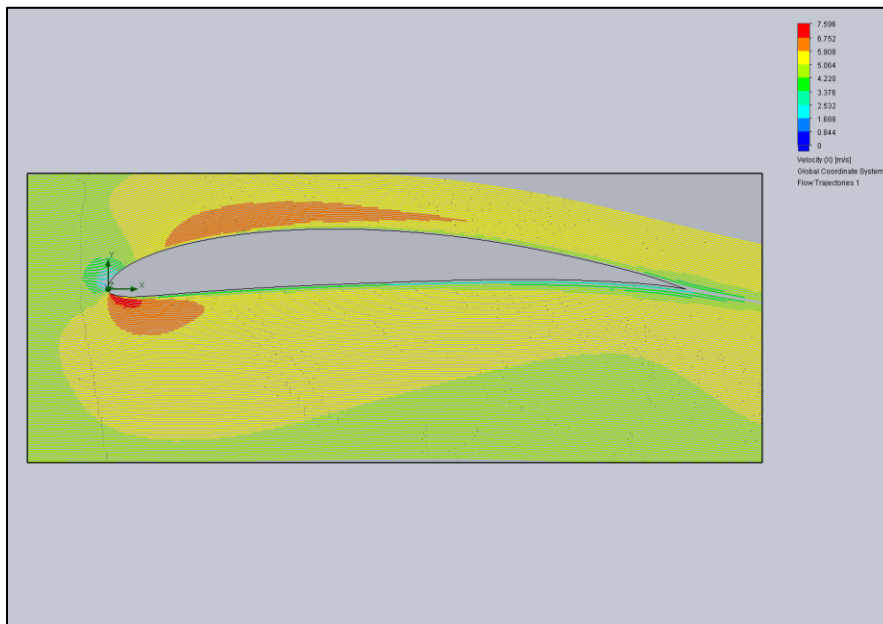
3 grados



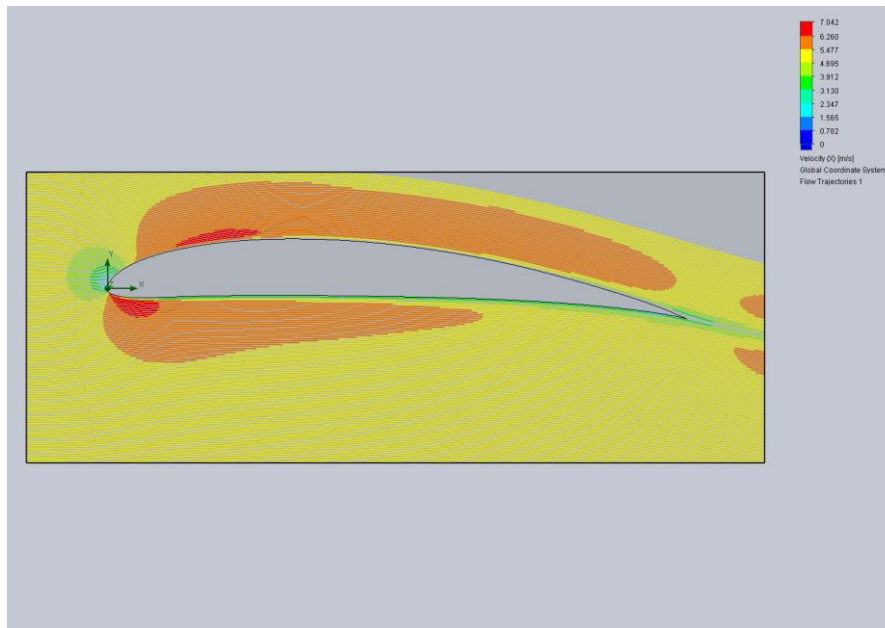
5 grados



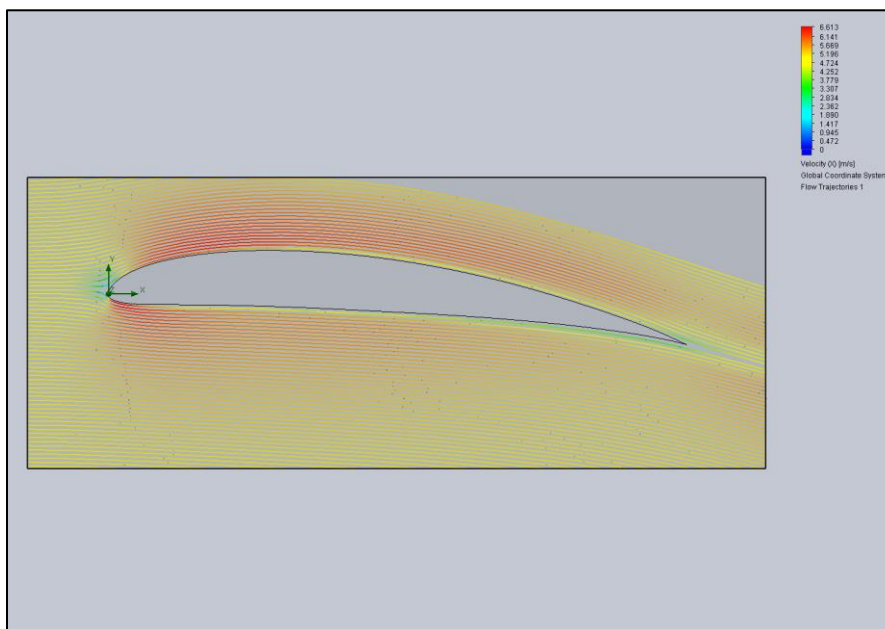
7 grados



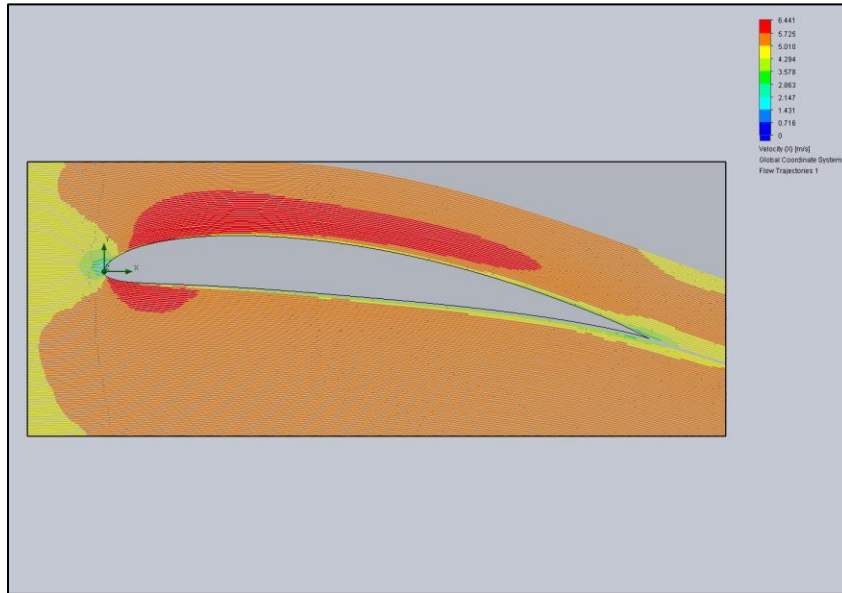
9 grados



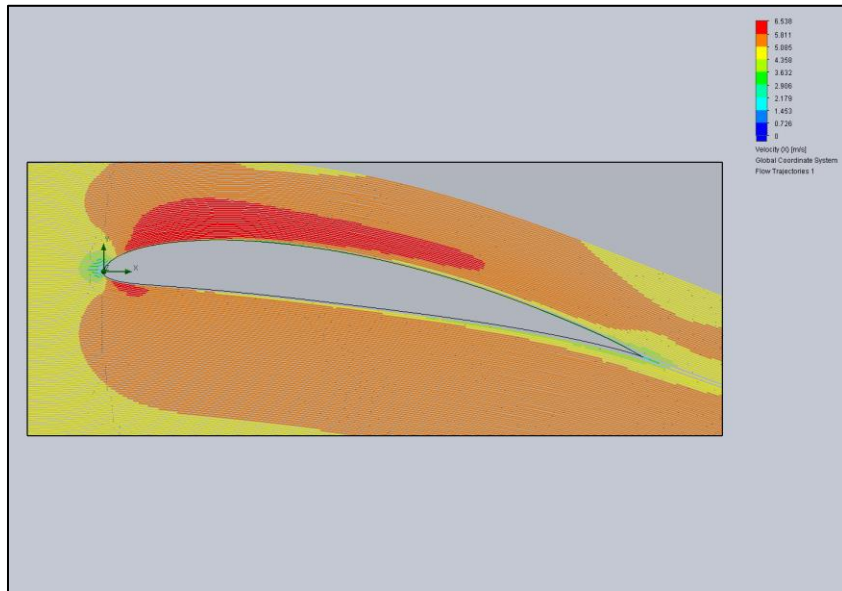
13 grados



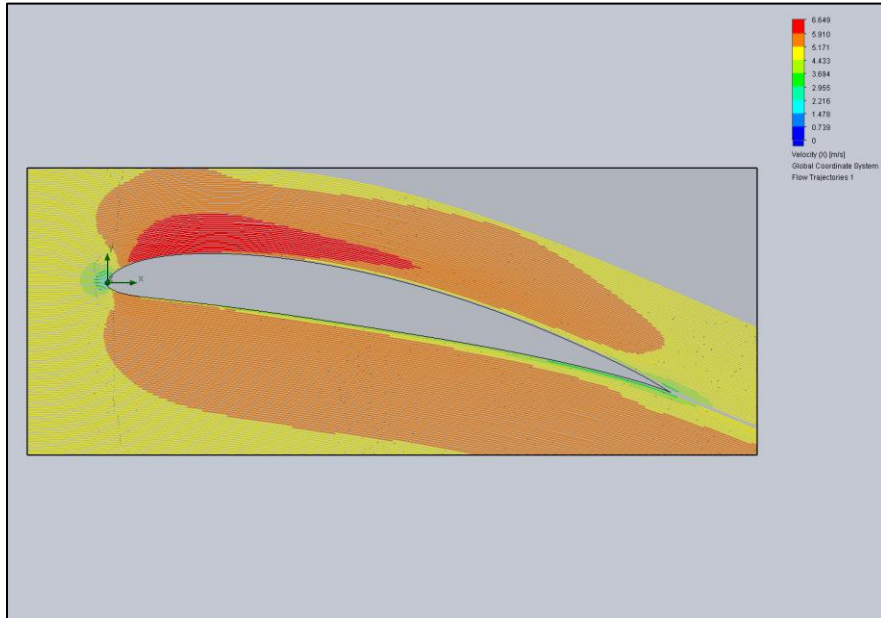
15 grados



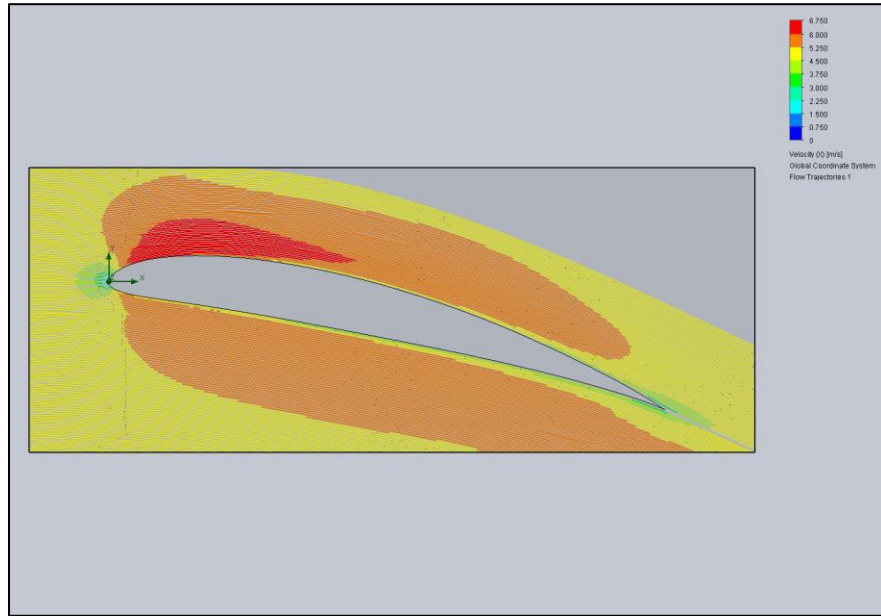
17 grados



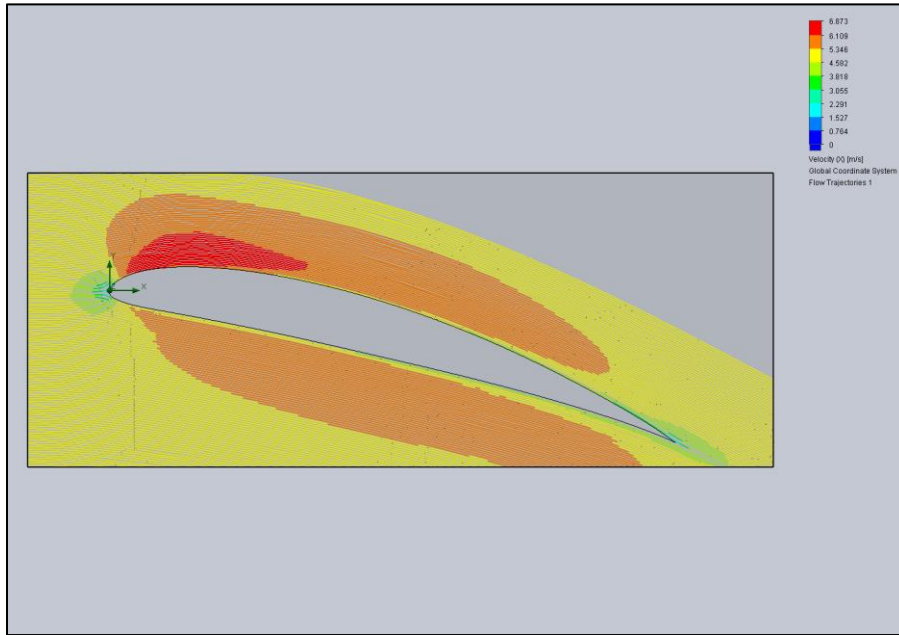
19 grados



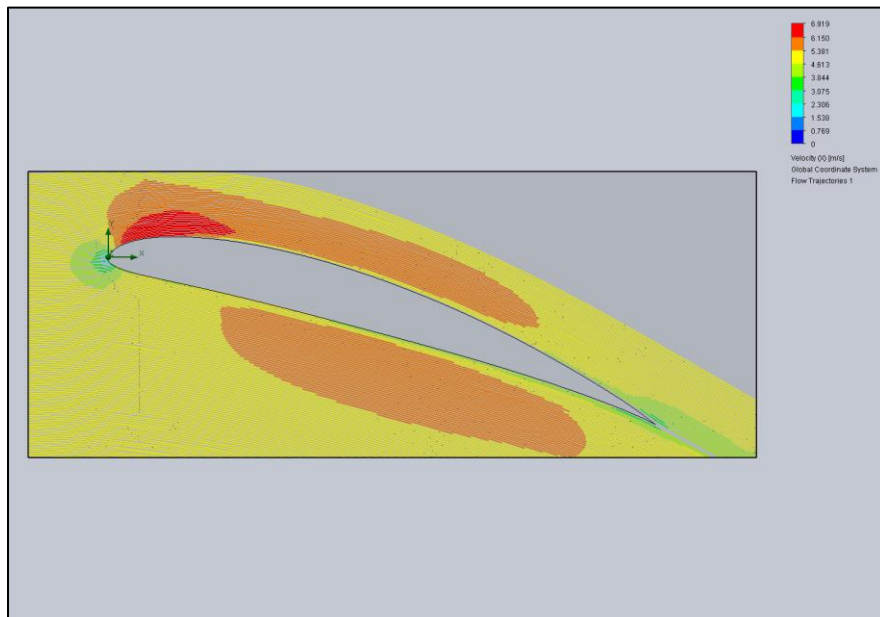
21 grados



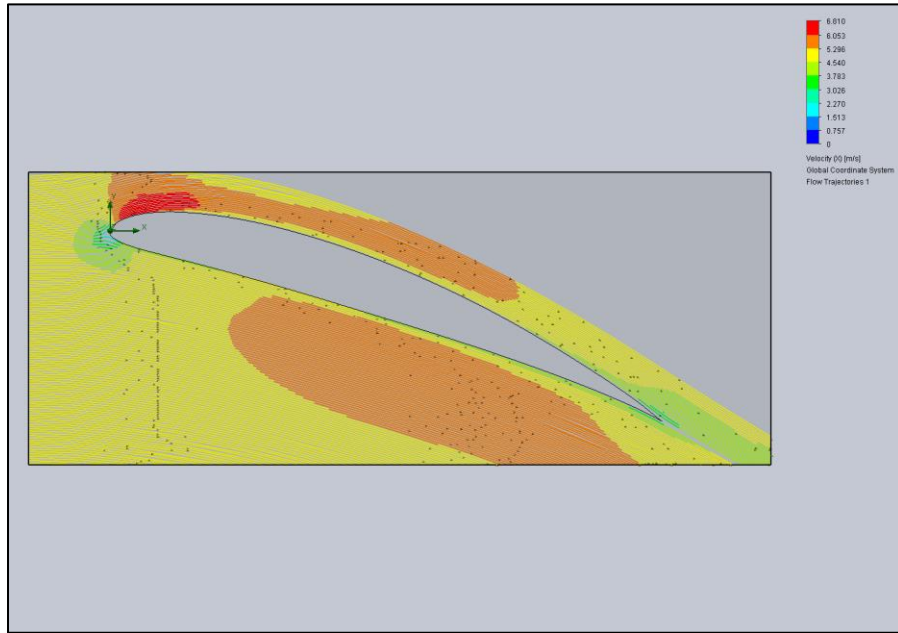
23 grados



25 grados



27 grados



Apéndice 2. Puntos X,Y,Z del perfil UR001

X	Y	Z
1	0.0000000	0
0.9957223	0.0014609	0
0.9884539	0.0041503	0
0.9800062	0.0073245	0
0.9706829	0.0107631	0
0.9607963	0.0142527	0
0.9504763	0.0176765	0
0.9397304	0.0210241	0
0.9285546	0.0243203	0
0.9169930	0.0275926	0
0.9051482	0.0308391	0
0.8931099	0.0340476	0
0.8809402	0.0372080	0
0.8686763	0.0403149	0
0.8563402	0.0433670	0
0.8439518	0.0463633	0
0.8315264	0.0493019	0
0.8190726	0.0521816	0
0.8065968	0.0550019	0
0.7941061	0.0577618	0
0.7816086	0.0604593	0
0.7691102	0.0630917	0
0.7566143	0.0656566	0
0.7441258	0.0681521	0
0.7316558	0.0705744	0
0.7192180	0.0729163	0
0.7068133	0.0751696	0
0.6944227	0.0773315	0
0.6820257	0.0794049	0
0.6696124	0.0813926	0
0.6571783	0.0832968	0
0.6447224	0.0851194	0
0.6322510	0.0868614	0
0.6197746	0.0885212	0

0.6072975	0.0900956	0
0.5948128	0.0915832	0
0.5823100	0.0929859	0
0.5697861	0.0943068	0
0.5572481	0.0955473	0
0.5447054	0.0967064	0
0.5321628	0.0977823	0
0.5196225	0.0987738	0
0.5070861	0.0996800	0
0.4945551	0.1004994	0
0.4820297	0.1012308	0
0.4695097	0.1018740	0
0.4570009	0.1024286	0
0.4445150	0.1028926	0
0.4320599	0.1032615	0
0.4196335	0.1035309	0
0.4072280	0.1036977	0
0.3948329	0.1037604	0
0.3824392	0.1037192	0
0.3700435	0.1035752	0
0.3576465	0.1033294	0
0.3452519	0.1029825	0
0.3328654	0.1025345	0
0.3204923	0.1019852	0
0.3081382	0.1013345	0
0.2958174	0.1005836	0
0.2835547	0.0997313	0
0.2713693	0.0987722	0
0.2592715	0.0976996	0
0.2472666	0.0965068	0
0.2353571	0.0951869	0
0.2235412	0.0937323	0
0.2118130	0.0921355	0
0.2001564	0.0903870	0
0.1885445	0.0884808	0
0.1769652	0.0864190	0
0.1654297	0.0842077	0
0.1539706	0.0818583	0

0.1426581	0.0793865	0
0.1315746	0.0767974	0
0.1207676	0.0740819	0
0.1102642	0.0712314	0
0.1000869	0.0682371	0
0.0902514	0.0650957	0
0.0807923	0.0618200	0
0.0717806	0.0584422	0
0.0633036	0.0549969	0
0.0554299	0.0515160	0
0.0482077	0.0480332	0
0.0416593	0.0445782	0
0.0357781	0.0411871	0
0.0305461	0.0379108	0
0.0259401	0.0347952	0
0.0219207	0.0318524	0
0.0184279	0.0290759	0
0.0153968	0.0264556	0
0.0127656	0.0239812	0
0.0104797	0.0216422	0
0.0084941	0.0194266	0
0.0067720	0.0173210	0
0.0052799	0.0153152	0
0.0039939	0.0133985	0
0.0028998	0.0115571	0
0.0019886	0.0097788	0
0.0012520	0.0080556	0
0.0006780	0.0063850	0
0.0002483	0.0047689	0
-0.0000537	0.0032104	0
-0.0002418	0.0017092	0
-0.0003139	0.0002720	0
-0.0002436	-0.0011412	0
0.0000219	-0.0025545	0
0.0005400	-0.0039249	0
0.0013330	-0.0052046	0
0.0023695	-0.0063698	0
0.0036233	-0.0074085	0

0.0050843	-0.0083055	0
0.0067444	-0.0090604	0
0.0085968	-0.0097011	0
0.0106441	-0.0102774	0
0.0128979	-0.0108404	0
0.0153843	-0.0113986	0
0.0181413	-0.0119353	0
0.0212165	-0.0124281	0
0.0246705	-0.0128523	0
0.0285811	-0.0131886	0
0.0330480	-0.0134210	0
0.0381943	-0.0135323	0
0.0441689	-0.0134942	0
0.0511538	-0.0132796	0
0.0593085	-0.0128847	0
0.0686891	-0.0123005	0
0.0792371	-0.0115304	0
0.0907796	-0.0106036	0
0.1030744	-0.0095707	0
0.1158175	-0.0084921	0
0.1287489	-0.0074099	0
0.1417411	-0.0063470	0
0.1547441	-0.0053162	0
0.1677561	-0.0043232	0
0.1807888	-0.0033664	0
0.1938500	-0.0024420	0
0.2069383	-0.0015450	0
0.2200373	-0.0006736	0
0.2331341	0.0001702	0
0.2462255	0.0009844	0
0.2593129	0.0017677	0
0.2723996	0.0025199	0
0.2854875	0.0032410	0
0.2985785	0.0039310	0
0.3116774	0.0045899	0
0.3247907	0.0052192	0
0.3379234	0.0058212	0
0.3510781	0.0063980	0

0.3642576	0.0069523	0
0.3774660	0.0074867	0
0.3907063	0.0080051	0
0.4039776	0.0085114	0
0.4172758	0.0090090	0
0.4305958	0.0095004	0
0.4439325	0.0099878	0
0.4572748	0.0104730	0
0.4706111	0.0109546	0
0.4839361	0.0114310	0
0.4972473	0.0119001	0
0.5105430	0.0123604	0
0.5238212	0.0128101	0
0.5370762	0.0132477	0
0.5502993	0.0136695	0
0.5634867	0.0140708	0
0.5766410	0.0144470	0
0.5897693	0.0147945	0
0.6028778	0.0151115	0
0.6159698	0.0153960	0
0.6290525	0.0156464	0
0.6421323	0.0158627	0
0.6552101	0.0160456	0
0.6682820	0.0161951	0
0.6813430	0.0163102	0
0.6943905	0.0163891	0
0.7074229	0.0164304	0
0.7204387	0.0164322	0
0.7334367	0.0163930	0
0.7464156	0.0163107	0
0.7593739	0.0161836	0
0.7723100	0.0160095	0
0.7852221	0.0157864	0
0.7981077	0.0155116	0
0.8109661	0.0151826	0
0.8237960	0.0147971	0
0.8365946	0.0143527	0
0.8493566	0.0138472	0

0.8620736	0.0132776	0
0.8747362	0.0126403	0
0.8873312	0.0119319	0
0.8998393	0.0111485	0
0.9122297	0.0102869	0
0.9244524	0.0093440	0
0.9364341	0.0083183	0
0.9480581	0.0072109	0
0.9591831	0.0060225	0
0.9696353	0.0047636	0
0.9792498	0.0034423	0
0.9879361	0.0020995	0
0.9955421	0.0008218	0
0.9999992	0.0000000	0

Apéndice 3. Cálculos de desviación estándar para resultados SolidWorks vs XFLR5 perfil UR001

Desviación estándar para Coeficiente de Sustentación CI (XFLR5 vs SW)

Alfa	CI XFLR5	CISW	Error	(Error-Media)^2
-11	-0,2976	0,4165	0,7141	0,1427
-9	-0,3450	0,5185	0,8635	0,2778
-7	-0,3761	0,3521	0,7282	0,1535
-5	-0,2980	0,0881	0,3861	0,0025
-3	-0,0430	0,1686	0,2116	0,0156
0	0,4805	0,3075	0,1730	0,0267
3	0,9000	0,7292	0,1708	0,0274
5	1,1750	1,0279	0,1471	0,0358
7	1,3777	1,3365	0,0412	0,0871
9	1,4780	1,4821	0,0041	0,1104
13	1,6140	1,6253	0,0113	0,1057
15	1,6290	1,6045	0,0245	0,0973
17	1,5000	0,7001	0,7999	0,2148
19	0,9380	0,5037	0,4343	0,0096
			4,7098	1,3070
		Media	0,3364	0,0934
		Desviación Estándar		0,3055

Desviación estándar para factor adimensional CI/Cd (XFLR5 vs SW)

Alfa	CI XFLR5	CISW	Error	(Error-Media)^2
-5	-3,4253	2,1375	5,5628	7,6742
-3	-0,7679	5,3575	6,1254	4,8739
0	17,1607	26,2539	9,0932	0,5778
3	37,5000	47,3584	9,8584	2,3267
5	58,7500	54,3578	4,3922	15,5306
7	65,6048	56,2926	9,3122	0,9587
9	56,8462	28,3206	28,5256	407,7377
13	44,8333	23,1746	21,6587	177,5733
15	22,9437	20,1729	2,7708	30,9392
17	13,3929	20,6455	7,2526	1,1673
19	3,9083	16,0193	12,1109	14,2724
			116,6628	663,6319
		Media	8,3331	47,4023
		Desviación Estándar		6,8849