

DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DEL ÁLABE DE UN AEROGENERADOR DE EJE
HORIZONTAL DE BAJA POTENCIA Y BAJA VELOCIDAD

Presenta
JAIRO ANDRES CORDOBA CARRILLO



Universidad de Pamplona
Facultad de Ingenierías y Arquitectura
Departamento de Ingeniería Mecánica, Mecatrónica e Industrial
Ingeniería Mecánica

Pamplona norte de Santander
2019

DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DEL ÁLABE DE UN AEROGENERADOR DE EJE
HORIZONTAL DE BAJA POTENCIA Y BAJA VELOCIDAD

Presenta
Jairo Andres Cordoba Carrillo

Trabajo de grado presentado para la obtención al Título de
Ingeniero Mecánico

Director
Dr. Juan Carlos Serrano Rico



Universidad de Pamplona
Facultad de Ingenierías y Arquitectura
Departamento de Ingeniería Mecánica, Mecatrónica e Industrial
Ingeniería Mecánica

Pamplona norte de Santander
2019

” Solo triunfa en el mundo quien se levanta y busca las circunstancias, y las crea si no las encuentra”

(George Bernard Shaw)

Resumen

Uno de los aspectos mas importantes a tener en cuenta para el diseño aerodinámico de los aerogeneradores de eje horizontal, de baja potencia y baja velocidad, es el uso de perfiles aerodinámicos que componen los álabes de la hélice, especialmente diseñados para aumentar la eficiencia a la hora de capturar la energía cinética del viento y reducir el costo de la misma.

Este trabajo se enfoca en el diseño de los perfiles aerodinámicos de un álabe para un aerogenerador de eje horizontal, de baja potencia y baja velocidad, mediante el uso de la optimización numérica. Se propone una combinación de teorías con las cuales se busca mejorar la precisión y la confiabilidad del diseño. Además de una parametrización numérica para el modelamiento de curvas y superficies que a este componen. En primer lugar, se describe toda la fundamentación teórico matemática, con la cual se entenderán los conceptos necesarios para el diseño de los de perfiles aerodinámicos. seguido de esto, se presentan las teorías de diseño y optimización, aplicadas mediante el uso de una serie de algoritmos diseñados y programados en lenguaje Python, generandose así, un ejecutable escrito en el mismo lenguaje, que facilite la interacción de estas teorías con el usuario. La parte final de este trabajo está dedicada a ilustrar la solución obtenida en relación con el Coeficiente de potencia. Los resultados son discutidos y comparados con perfiles ya existentes.

Abstrac

One of the most important aspects to take into account for the aerodynamic design of low-power, low-speed horizontal-axis wind turbines is the use of aerodynamic profiles that make up the propeller blades, especially to increase efficiency at the time to capture the kinetic energy of the wind and reduce the cost of it.

This work focuses on the design of the aerodynamic profiles of a blade for a low-power, low-speed, horizontal-axis wind turbine, through the use of numerical optimization. We propose a combination of theories with which we seek to improve the accuracy and reliability of the design. In addition to a numerical parameterization for the modeling of the curves and the surfaces that are composed. In the first place, all the mathematical theoretical foundation is described, with which the necessary concepts for the design of the aerodynamic profiles will be understood. Next, we present the theories of design and optimization, applied through the use of a series of algorithms, as well as programs in Python language, thus generating an executable written in the same language, which facilitates the interaction of these theories with the user . The final part of this work is dedicated to illustrate the solution of the results in relation to the power coefficient. The results are discussed and compared with existing profiles.

Índice general

Índice de figuras	1
Índice de tablas	2
Nomenclatura	3
Siglas y abreviaciones	4
1. Introducción	5
1.1. Justificación	7
1.2. Objetivos	8
1.2.1. Objetivo general	8
1.2.2. Objetivos específicos	8
2. Marco teórico	9
2.1. Energía renovable	9
2.1.1. Energía eólica en Colombia	9
2.1.2. Pros y contras de la energía eólica	10
2.2. Aerogenerador	10
2.2.1. Componentes de un Aerogenerador	11
2.2.2. Tipologías de un aerogenerador	12
2.3. Hélice	14
2.3.1. Álabes	14
2.3.2. Coeficiente de potencia y relación de velocidades	14
2.3.3. Solidez	15
2.3.4. Número de álabes	15
2.3.5. Tamaño de la hélice	16
2.3.6. Velocidad de rotación	16
2.4. Perfil aerodinámico	16
2.4.1. Parámetros geométricos del perfil aerodinámico	17
2.4.2. Clasificación de los perfiles aerodinámicos	17
2.4.3. Principio de funcionamiento de los perfiles aerodinámicos	19
3. Diseño de perfiles aerodinámicos	21
3.1. Métodos de diseño	21
3.1.1. Método directo	21

3.1.2.	Método inverso	22
3.2.	Tipologías de diseño	23
3.2.1.	Con sustentación máxima	23
3.2.2.	Para bajo número de Reynolds	23
3.2.3.	Transónicos	23
3.2.4.	Con espesor máximo	23
3.2.5.	Laminares	23
4.	Teoría de diseño de álabes	24
4.1.	Límite de Betz	24
4.2.	Teoría de momento	26
4.3.	Teoría de elemento de pala	26
4.4.	Teoría de elemento de pala - Momento (BEM)	28
4.5.	Aproximaciones sucesivas	30
4.5.1.	Criterio de convergencia	30
5.	Optimización de forma geométrica	31
5.1.	Curvas de Bézier	31
5.1.1.	Superficies de Bézier	31
5.1.2.	Propiedades de las curvas de Bézier	32
5.2.	Algoritmo de Casteljau	32
6.	Recursos computacionales	34
6.1.	Xfoil V6.99	34
6.2.	Python V3.7.6	34
6.3.	Solidworks V18	34
6.4.	Ansys V19	34
6.5.	DAP V1.0	35
7.	DAP v1.0	36
8.	Diseño del álabe	40
8.1.	Perfiles estudiados	40
8.2.	Preselección de los perfiles	47
8.3.	Selección de perfiles para cada posición	56
8.4.	Optimización de forma geométrica para perfiles seleccionados como puntos de control	57
8.5.	Aplicación de la teoría BEM	64
8.6.	Construcción del álabe	68
9.	Análisis computacional	69
9.1.	Herramienta CFD	69
9.2.	Fenómeno físico	69
9.3.	Volumen de control	70
9.4.	Condiciones frontera	70
9.5.	Descripción de malla	70

9.6. Modelo de turbulencia	74
9.7. Coeficiente de potencia, C_p	74
10. Resultados	75
11. Conclusiones	81
12. Recomendaciones	82
Bibliografía	82

Índice de figuras

2.1.	<i>Complejo eólico Jemeiwaa Kai (Portafolio, 2019)</i>	10
2.2.	<i>Partes de un aerogenerador (Redacción PartesDel, 2017)</i>	11
2.3.	<i>Aerogenerador Tipo Darrieus y Savonius respectivamente (Energías and Villación, 2017)</i>	13
2.4.	<i>Hélice de un aerogenerador (E.L.Houghton et al., 2001)</i>	14
2.5.	<i>Valores de N en función de λ (E.L.Houghton et al., 2001)</i>	15
2.6.	<i>Descripción de un perfil aerodinámico (E.L.Houghton et al., 2001)</i>	17
2.7.	<i>Perfil NACA 2412 Simétrico (Autor)</i>	18
2.8.	<i>Perfil Sg 6043 Asimétrico (Autor)</i>	18
2.9.	<i>Comportamiento del perfil según su forma (E.L.Houghton et al., 2001)</i>	19
2.10.	<i>Vortices de velocidad y fuerzas resultantes en un perfil (E.L.Houghton et al., 2001)</i>	19
3.1.	<i>Representación Método Directo (E.L.Houghton et al., 2001)</i>	22
3.2.	<i>Representación Método Inverso (E.L.Houghton et al., 2001)</i>	22
4.1.	<i>Aeroturbina en la teoría unidimensional de Betz (E.L.Houghton et al., 2001)</i>	24
4.2.	<i>Fuerzas que actúan sobre un perfil (Manwell, 2009)</i>	27
5.1.	<i>Curva de Bezier (Education et al., 2011)</i>	31
7.1.	<i>Ventana de bienvenida (Autor)</i>	36
7.2.	<i>Ventana principal (Autor)</i>	36
7.3.	<i>Sección puntos de control (Autor)</i>	37
7.4.	<i>Sección ingreso de datos (Autor)</i>	37
7.5.	<i>Sección selección de resultados (Autor)</i>	37
7.6.	<i>Sección acciones (Autor)</i>	38
7.7.	<i>Sección resultados graficos (Autor)</i>	38
7.8.	<i>Sección parámetros aerodinámicos (Autor)</i>	38
7.9.	<i>Sección perfiles trabajados (Autor)</i>	39
7.10.	<i>Sección parámetros (Autor)</i>	39
7.11.	<i>Sección espesor y transición del perfil (Autor)</i>	39
8.1.	<i>Esquema utilizado para dividir el álabe (Autor)</i>	40
8.2.	<i>Perfiles considerados para la posición 1 (Autor)</i>	41
8.3.	<i>Perfiles considerados para la posición 2 (Autor)</i>	41
8.4.	<i>Perfiles considerados para la posición 3 (Autor)</i>	42

8.5. <i>Perfiles considerados para la posición 4 (Autor)</i>	43
8.6. <i>Perfiles considerados para la posición 5 (Autor)</i>	43
8.7. <i>Perfiles considerados para la posición 6 (Autor)</i>	44
8.8. <i>Perfiles considerados para la posición 7 (Autor)</i>	45
8.9. <i>Perfiles considerados para la posición 8 (Autor)</i>	45
8.10. <i>Perfiles considerados para la posición 9 (Autor)</i>	46
8.11. <i>Perfiles considerados para la posición 10 (Autor)</i>	47
8.12. <i>Comportamiento de la relación de sustentación con $Re = 5e4$ y $Re = 1e5$ respectivamente, para los perfiles preseleccionados en la posición 1 (Autor)</i> . .	48
8.13. <i>Comportamiento del coeficiente de sustentación con $Re = 5e4$ y $Re = 1e5$ respectivamente, para los perfiles preseleccionados en la posición 1 (Autor)</i> . .	48
8.14. <i>Comportamiento del coeficiente de arrastre con $Re = 5e4$ y $Re = 1e5$ respectivamente, para los perfiles preseleccionados en la posición 1 (Autor)</i>	49
8.15. <i>Comportamiento de la relación de sustentación con $Re = 5e4$ y $Re = 1e5$ respectivamente, para los perfiles preseleccionados en la posición 3 (Autor)</i> . .	49
8.16. <i>Comportamiento del coeficiente de sustentación con $Re = 5e4$ y $Re = 1e5$ respectivamente, para los perfiles preseleccionados en la posición 3 (Autor)</i> . .	50
8.17. <i>Comportamiento del coeficiente de arrastre con $Re = 5e4$ y $Re = 1e5$ respectivamente, para los perfiles preseleccionados en la posición 3 (Autor)</i>	50
8.18. <i>Comportamiento de la relación de sustentación con $Re = 5e4$ y $Re = 1e5$ respectivamente, para los perfiles preseleccionados en la posición 5 (Autor)</i> . .	51
8.19. <i>Comportamiento del coeficiente de sustentación con $Re = 5e4$ y $Re = 1e5$ respectivamente, para los perfiles preseleccionados en la posición 5 (Autor)</i> . .	51
8.20. <i>Comportamiento del coeficiente de arrastre con $Re = 5e4$ y $Re = 1e5$ respectivamente, para los perfiles preseleccionados en la posición 5 (Autor)</i>	52
8.21. <i>Comportamiento de la relación de sustentación con $Re = 5e4$ y $Re = 1e5$ respectivamente, para los perfiles preseleccionados en la posición 7 (Autor)</i> . .	53
8.22. <i>Comportamiento del coeficiente de sustentación con $Re = 5e4$ y $Re = 1e5$ respectivamente, para los perfiles preseleccionados en la posición 7 (Autor)</i> . .	53
8.23. <i>Comportamiento del coeficiente de arrastre con $Re = 5e4$ y $Re = 1e5$ respectivamente, para los perfiles preseleccionados en la posición 7 (Autor)</i>	54
8.24. <i>Comportamiento de la relación de sustentación con $Re = 5e4$ y $Re = 1e5$ respectivamente, para los perfiles preseleccionados en la posición 9 (Autor)</i> . .	55
8.25. <i>Comportamiento del coeficiente de sustentación con $Re = 5e4$ y $Re = 1e5$ respectivamente, para los perfiles preseleccionados en la posición 9 (Autor)</i> . .	55
8.26. <i>Comportamiento del coeficiente de arrastre con $Re = 5e4$ y $Re = 1e5$ respectivamente, para los perfiles preseleccionados en la posición 9 (Autor)</i>	56
8.27. <i>Relación de sustentación para los perfiles seleccionados, $Re = 1e5$ (Autor)</i> . .	57
8.28. <i>Comparación de perfiles para la posición 1 (Autor)</i>	58
8.29. <i>Comparación de perfiles para la posición 1 (Autor)</i>	58
8.30. <i>Comparación de perfiles para la posición 3 (Autor)</i>	59
8.31. <i>Comparación de perfiles para la posición 3 (Autor)</i>	60
8.32. <i>Comparación de perfiles para la posición 4 (Autor)</i>	60
8.33. <i>Comparación de perfiles para la posición 4 (Autor)</i>	61
8.34. <i>Comparación de perfiles para la posición 5 (Autor)</i>	61

8.35. Comparación de perfiles para la posición 5 (Autor)	62
8.36. Comparación de perfiles para la posición 7 (Autor)	63
8.37. Comparación de perfiles para la posición 7 (Autor)	63
8.38. Comportamiento del ángulo de giro (Autor)	65
8.39. Comportamiento de la cuerda (Autor)	65
8.40. Coeficientes de inducción axial y angular (Autor)	67
8.41. Comportamiento del Coeficiente de potencia (Autor)	67
8.42. Álabe diseñado (Autor)	68
9.1. Volumen de control (Autor)	70
9.2. Malla generada (Autor)	71
9.3. Face sizing aplicado (Autor)	72
9.4. Inflacion aplicada (Autor)	72
9.5. Sphere of influence aplicada (Autor)	72
9.6. Calidad ortogonal de la malla (Autor)	73
9.7. Calidad oblicua de la malla (Autor)	73
10.1. Presión y turbulencia para $r = 0,08m$ (Autor)	75
10.2. Presión y turbulencia para $r = 0,15m$ (Autor)	75
10.3. Presión y turbulencia para $r = 0,23m$ (Autor)	76
10.4. Presión y turbulencia para $r = 0,30m$ (Autor)	76
10.5. Presión y turbulencia para $r = 0,38m$ (Autor)	77
10.6. Presión y turbulencia para $r = 0,45m$ (Autor)	77
10.7. Presión y turbulencia para $r = 0,53m$ (Autor)	77
10.8. Presión y turbulencia para $r = 0,60m$ (Autor)	78
10.9. Presión y turbulencia para $r = 0,68m$ (Autor)	78
10.10 Presión y turbulencia para $r = 0,75m$ (Autor)	78
10.11 Distribución de presión en cada álabe (Autor)	79
10.12 Turbulencia a $0,03m$ aguas abajo del álabe (Autor)	79
10.13 Comportamiento de la velocidad 2D y 3D (Autor)	80
10.14 Velocidad del aire (Autor)	80

Índice de tablas

8.1. <i>Perfiles considerados para la posición 1</i>	40
8.2. <i>Perfiles considerados para la posición 2</i>	41
8.3. <i>Perfiles considerados para la posición 3</i>	42
8.4. <i>Perfiles considerados para la posición 4</i>	42
8.5. <i>Perfiles considerados para la posición 5</i>	43
8.6. <i>Perfiles considerados para la posición 6</i>	44
8.7. <i>Perfiles considerados para la posición 7</i>	44
8.8. <i>Perfiles considerados para la posición 8</i>	45
8.9. <i>Perfiles considerados para la posición 9</i>	46
8.10. <i>Perfiles considerados para la posición 10</i>	46
8.11. <i>Perfiles preseleccionados para la posición 1</i>	47
8.12. <i>Perfiles preseleccionados para la posición 3</i>	50
8.13. <i>Perfiles preseleccionados para la posición 5</i>	51
8.14. <i>Perfiles preseleccionados para la posición 7</i>	52
8.15. <i>Perfiles preseleccionados para la posición 9</i>	54
8.16. <i>Perfiles seleccionados para cada posición</i>	56
8.17. <i>Resultados para la posición 1</i>	57
8.18. <i>Resultados para la posición 3</i>	59
8.19. <i>Resultados para la posición 4</i>	60
8.20. <i>Resultados para la posición 5</i>	62
8.21. <i>Resultados para la posición 7</i>	62
8.22. <i>Perfiles tratados para cada posición</i>	64
8.23. <i>Datos de inicio</i>	64
8.24. <i>Valores para la cuerda y el ángulo de giro según la posición</i>	64
8.25. <i>Variables independientes según la posición</i>	66
8.26. <i>Coeficientes de inducción y ángulo de inclinación para cada sección</i>	66
8.27. <i>Coeficiente de potencia para cada sección</i>	67
9.1. <i>Controles de malla globales</i>	71

Nomenclatura

Símbolo	Descripción	Unidad
A_{fb}	Área frontal de barrida	m^2
C_d	Coficiente de resistencia	-
C	Cuerda del álabe	-
C_p	Coficiente de potencia de la hélice	-
C_l	Coficiente de sustentación	-
D	Diametro de hélice	m
F	Factor de corrección Prandtl	-
N	Número de álabes	-
A_p	Superficie proyectada de las aspas	m^2
R	Radio de hélice	m
P	Potencia captada por el aerogenerador	w
P_e	Potencia eléctrica que genera la hélice	w
n	Velocidad de rotación de la hélice	rpm
V	Velocidad del viento	$\frac{m}{s}$
θ	Ángulo de inclinación	-
φ	Ángulo relativo	-
λ	Coficiente de velocidad específica	-
ρ	Densidad	$\frac{Kg}{m^3}$
a	Factor de inducción axial	-
a'	Factor de inducción angular	-
η	Rendimiento global de la turbina	-
η_e	Rendimiento eléctrico	-
η_m	Rendimiento del multiplicador	-
σ'	Solidez del álabe	-
ω	Velocidad angular	$\frac{Rad}{s}$
U_1	Velocidad de entrada	$\frac{m}{s}$
U_2	Velocidad de ataque	$\frac{m}{s}$
U_3	Velocidad de salida	$\frac{m}{s}$
P_1	Presión en la entrada	$\frac{N}{m^2}$
P_2	Presión en la salida	$\frac{N}{m^2}$
T	Fuerza de empuje	N
C_T	Coficiente de empuje	-

Siglas y abreviaciones

Abreviatura	Significado
<i>IEA</i>	Agencia Internacional de la Energía
<i>CAD</i>	Diseño asistido por computadora
<i>BEDT</i>	Diálogo de transición energética en Berlín
<i>CAE</i>	Ingeniería asistida por computadora
<i>IPCC</i>	Panel Intergubernamental de Cambio Climático
<i>SIN</i>	Sistema interconectado nacional
<i>TEP</i>	Teoría del elemento de pala
<i>BEM</i>	Teoría del momento del elemento de pala

Capítulo 1

Introducción

El agotamiento de muchos recursos vitales para nuestra especie a consecuencia de su dilapidación o de su destrucción, fruto de comportamientos (conscientes o inconscientes) depredadores orientados por la búsqueda de beneficios particulares a corto plazo, constituye uno de los más preocupantes problemas de la actual situación de emergencia mundial (Brown and Folch, 2017).

A ciencia cierta, resulta complicado conjeturar con eficacia por cuánto tiempo podremos seguir haciendo uso de los recursos no renovables, tales como el petróleo, el carbón y el gas natural. Lo que sí sabemos es que ese lapso será corto, claro está que esto dependerá en gran medida de las reservas estimadas y el ritmo de consumo mundial, el cual viene presentando un aumento exagerado. Según el Banco Mundial para el año 2014 hubo una producción total de energía de 13,776 Millones de toneladas métricas de petróleo equivalente, de la cual se presentó el siguiente consumo, el 80.9 % perteneciente a los combustibles fósiles, el 7.5 % a los combustibles renovables y un 8.1 % a la energía nuclear y alternativa (Bank, 2014). En términos ambientales y según lo aprobado por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (Por sus siglas en inglés IPCC), en el año 2018 se esperaba que el petróleo representara el 33.5 % de la energía primaria total, un equivalente de 73 toneladas de emisiones efectivas de CO₂ por Terajulio, el gas natural el 24 % de esa misma energía, un equivalente de 56 toneladas y el carbón un 29 %, un equivalente de 95 toneladas respectivamente (José Antonio, 2018). Es evidente el impacto negativo que representa el uso desmesurado de estas energías, por lo cual es preciso referirse a las alteraciones ecológicas, cambios climáticos, pérdida de biodiversidad, entre muchos más.

Esto ha traído con siglo una transición hacia un sistema energético fundamentado en tecnologías renovables y alternativas, teniendo así mismo efectos sociales, culturales, económicos y ambientales. De acuerdo a la Agencia Internacional de la Energía (Por sus siglas en inglés IEA), la demanda mundial de electricidad aumentará un 70 % hasta 2040, elevando su participación en el uso de la energía final del 18 % al 24 % en el mismo periodo, motivada principalmente por regiones emergentes (International Energy Association, 2018).

Es aquí donde la Energía Eólica inicia a obtener gran participación en el medio, a pesar de ser uno de los recursos energéticos renovables más antiguos aprovechados por la humanidad,

ha venido tomando auge a medida que el problema energético se hace mas evidente, es hoy en día la energía que cuenta con los niveles mas altos de eficiencia y desarrollo en el campo de las renovables, debido a que es una fuente energética inagotable, no contaminante, es decir, cero emisión de gases de efecto invernadero, causantes del calentamiento global. Además, disponible en prácticamente toda la tierra, por esto es tan utilizada en la producción de Electricidad.

De acuerdo con la IEA la Energía Eólica representa aproximadamente el 80 % de la electricidad que produce el grupo Acciona anualmente, es decir, un 5 % del consumo mundial de electricidad, esperando que para el año 2040 esta represente el 9 % de la demanda eléctrica mundial ([International Energy Association, 2018](#)). Pero, ¿ como aprovechamos al máximo esta energía ? ; para esto es necesario entender su funcionamiento, el cual consiste simplemente en transformar la energía que produce el movimiento de las palas de un aerogenerador impulsadas por el viento en Energía Eléctrica.

Un aerogenerador es un instrumento que tiene como propósito convertir la Energía Cinética del viento en Energía Eléctrica, variando su eficiencia según su tecnología, posición y velocidad de funcionamiento. Integrado por una serie de componentes, en este caso estudiaremos los perfiles aerodinámicos que constituyen los Alabes (Aspas) del mismo.

Este proyecto de tesis converge en el diseño y optimización de los perfiles aerodinámicos situados en diez secciones de un alabe de manera radial al eje de rotación, para un aerogenerador de eje horizontal a bajo números de Reynolds. Esto mediante la aplicación del método de diseño directo, adaptando sistemas para el modelamiento de curvas, superficies de Bezier con algoritmo De casteljau y curvas diferenciables Splines para la construcción de la geometría. De igual forma se acoplan dos teorías para el diseño de los perfiles, la teoría del elemento de pala (Por sus siglas en inglés TEP) basada en la evaluación de las fuerzas y momentos aerodinámicos que actúan sobre una sección y la teoría del momento del elemento de pala (Por sus siglas en inglés BEM) basada en la cantidad de movimiento, análisis de volumen de control y la cantidad de energía que se puede obtener. Se hará uso de las herramientas Xfoil y Xflr5, para el análisis de los perfiles generados. Como la interfaz de trabajo relacionada con estos últimos es robusta y poco interactiva, se realizara un ejecutable escrito en lenguaje Python que permitirá automatizar la entrada y salida de datos, brindando la posibilidad de acceder directamente a las herramientas ya nombradas.

1.1. Justificación

Hoy en día es imposible vivir sin energía. Es requerida para iluminación de vías y vivienda, la calefacción y refrigeración, la cocción de alimentos, en la comunicación y el transporte y, en general, en las diversas actividades del ser humano.

A medida que los requerimientos energéticos van aumentando, los aerogeneradores se van caracterizando según su tecnología y punto de posicionamiento, esto, debido a que los niveles de eficiencia de los mismos dependerán de su diseño y zona geografía de funcionamiento. Los aerogeneradores que funcionan a bajo números de Reynolds son de tamaño pequeño (Ubicados por lo general en zonas con obstrucciones topológicas) y a diferencia de los de gran tamaño (Ubicados en zonas con optimas condiciones) estos no trabajan con corrientes de viento constantes, es decir, no se tienen velocidades optimas.

Con lo anterior, surge la necesidad de aumentar la eficiencia de los aerogeneradores de baja potencia, haciendo así, mas rentable su uso. Optimizando los perfiles aerodinámicos que componen el alabe se obtienen variaciones positivas en la relación de sustentación, mejorando la extracción de la energía eólica. Hasta el momento, nos hemos enfocado en parámetros geográficos y tecnológicos, pero si observamos desde el punto de vista económico, uno de los grandes problemas en la ejecución de estos proyectos, es la relación costo-beneficio, por tal motivo la optimización del rotor es económicamente mas viable que la implementación de un sistema que automatice la variación del angulo de ataque según la dirección de las corrientes del viento, esta ultima, ataca de forma directa a la eficiencia del aerogenerador, puesto que si el choque entre los dos no es optimo, la extracción de energía sera deficiente.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Diseñar el álabe de un aerogenerador de eje horizontal de baja potencia y baja velocidad mediante el uso de Xfoil, Xflr5 y Python.

1.2.2. Objetivos específicos

- Seleccionar las herramientas de optimización aerodinámica para los perfiles del álabe
- Diseñar los algoritmos que permitan la aplicación de las herramientas de optimización
- Programar los algoritmos de optimización aerodinámica para los perfiles del álabe
- Diseñar el aerogenerador optimizado mediante el uso de software CAD
- Simular el aerogenerador optimizado con el fin de determinar su rendimiento en condiciones de operación mediante el uso de software CAE

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Energía renovable

Se denomina energía renovable a aquella obtenida mediante fuentes naturales virtualmente inagotables, capaces de regenerarse por medios naturales (Canseco, 2010). Como concepto, ha existido hace una gran cantidad de años, sin embargo su desarrollo mas significativo se ha dado en las ultimas décadas. Se diferencia de las energías alternativas ya que estas son las que se consideran que pueden remplazar las fuentes primarias de energía actuales. Dentro de las energías renovables se encuentran la eólica, solar, biomasa, geotérmica, hidroeléctrica, mareomotriz, undimotriz y los biocombustibles.

2.1.1. Energía eólica en Colombia

El evento Berlin Transition Energy Dialogue (Por sus sigles en inglés BEDT) realizado en la capital Alemana, tuvo lugar en abril de 2019, reunió a los actores de la transición energética de todo el mundo para dar a conocer los avances en la materia. Por su puesto, contó con la presencia de Colombia, fuerte influenciador a nivel latinoamericano, Según la Ministra de Energía y Minas de dicho país (Dinero, 2019), Colombia esta llena de retos y oportunidades simultáneamente, dijo a demás que cuentan con la sexta matriz energética mas limpia del mundo, esto, debido a que el 70 % de la electricidad que se produce proviene de la generación hidroeléctrica, aunque, a pesar de eso, es uno de los veinte países mas vulnerables al cambio climático. De igual forma destaco que la velocidad de las corrientes de viento que recorren La Guajira es dos veces mas que la media mundial, por ultimo, apunto a la inauguración de El paso, la planta solar mas grande construida hasta la fecha en el país, compuesta por cerca de 250.000 paneles solares, con una producción esperada de alrededor de 176 GWh al ano, abasteciendo a cerca de 400.000 personas.

Actualmente el complejo eólico Jemeiwaa Kai (Ver Figura 2.1) es el proyecto mas ambicioso en este campo, conformado por cinco parques, con una capacidad total esperada de 648 MW y ubicado en el municipio de Uribia (Guajira), aunque se encuentra en etapa de desarrollo y licenciamiento, 549 MW de capacidad instala del proyecto, ya cuentan con permiso de conexión garantizada al Sistema Interconectado Nacional (Por sus siglas SIN), se espera que apenas entre en operación antes de acabar el año 2022 suministre al sistema 2900 GWh (Portafolio, 2019).



Figura 2.1: Complejo eólico Jemeiwaa Kai (*Portafolio, 2019*)

2.1.2. Pros y contras de la energía eólica

La principal ventaja de la energía eólica es la no contaminación al medio ambiente, es inagotable y detiene la extenuación de los combustibles fósiles, contribuyendo así a la transición energética y al cambio climático. En términos económicos, es una de las fuentes mas baratas, compitiendo de forma directa con las centrales térmicas de carbón (Considerado como el combustible fósil mas barato), considerando los costos de saneamiento ambiental. Por otra parte, si consideramos como una desventaja el hecho de que la aplicación de esta energía a gran escala, produce una alteración sobre el paisaje, considerándose como contaminación visual.

2.2. Aerogenerador

La Agencia Nacional de Energía Eléctrica (Por sus siglas ANEEL) clasifica como aerogeneradores de pequeño tamaño a maquinas eólicas generadoras con potencia nominal igual o inferior a 500 kW y la Comisión Electrotecnica Internacional (Por sus siglas IEC) considera de pequeño tamaño a aquellas con área barrida entre 2 y 200 m^2 (*Araújo et al., 2009*).

Un aerogenerador es una maquina formada principalmente por una turbina eólica y un generador eléctrico cuyo propósito es convertir la energía cinética del viento en energía mecánica, para así, transformarla en energía eléctrica. Su único recurso es la energía del viento, la cual es limpia y sostenible. Esta hace girar los álabes del aerogenerador que al moverse accionan el rotor, transformando la energía cinética del viento en energía mecánica rotacional, a su vez, esta pasa por una serie de sistemas de transmisión hasta llegar al generador eléctrico, que por lo general es un alternador (*Ramirez et al., 1930*).

Existen dos tipos de aerogeneradores según su eje de rotación, horizontal y vertical. Por motivos de eficiencia y mayor rendimiento, el tipo de aerogenerador mas utilizado en la actualidad es el aerogenerador de eje horizontal, en el cual, el eje de rotación se encuentra paralelo al suelo (*Ramirez et al., 1930*). Este tipo de aerogeneradores tienen su eje de rotación principal en la parte superior de una torre y necesitan un mecanismo de orientación para hacer frente a los cambios bruscos en la dirección del viento.

2.2.1. Componentes de un Aerogenerador

Los principales componentes de un aerogenerador son los siguientes (Ver Figura 2.2):

- **Rotor:** Su función es transformar la energía cinética del viento en un par mecánico de torsión en el eje del equipo. La velocidad de rotación se encuentra acotada por parámetros del diseño estructural, siendo la velocidad de punta de las aspas el principal indicador.
- **Góndola:** Sirve de alojamiento para los elementos mecánicos y eléctricos (caja multiplicadora, generador eléctrico, módulos de control, etc.) del aerogenerador.
- **Caja de engranajes o multiplicadora:** Puede estar presente o no. Transforma la baja velocidad del eje del rotor en alta velocidad de rotación, en el eje del generador eléctrico.
- **Generador eléctrico:** Existen diferentes tipos, dependiendo del diseño del aerogenerador: síncronos o asíncronos, jaula de ardilla o doblemente alimentados, con excitación o con imanes permanentes. Este equipo convierte la energía en electricidad.
- **Torre:** Ubica a la góndola a una mayor altura, donde los vientos son de mayor intensidad, permitiendo el giro de las aspas. Su diseño estructural soporta el peso de los equipos contenidos en la góndola del aerogenerador.
- **Sistema de control:** Se hace cargo del funcionamiento seguro y eficiente del equipo, controla la orientación de la góndola, la posición de las aspas y la potencia total entregada por el equipo.

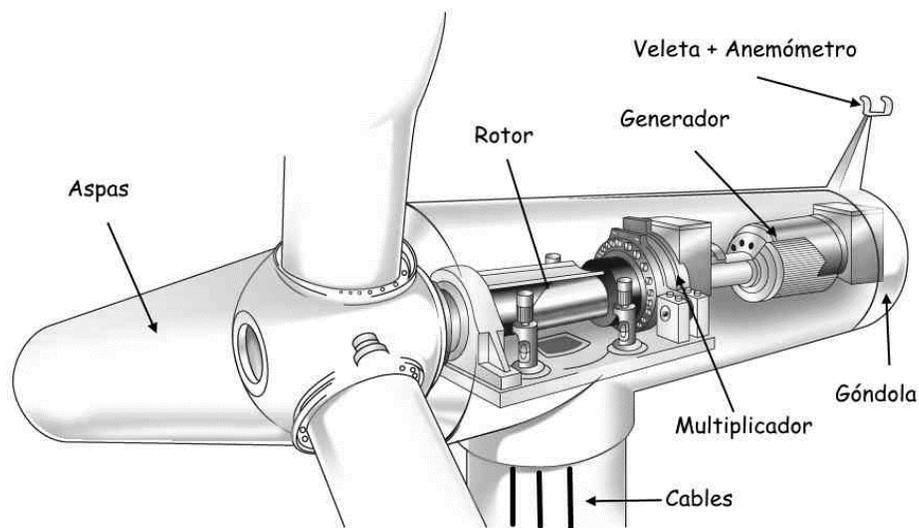


Figura 2.2: Partes de un aerogenerador (Redacción PartesDel, 2017)

2.2.2. Tipologías de un aerogenerador

Existen múltiples formas de clasificar un aerogenerador, según (E.L.Houghton et al., 2001) se clasifican en dos aspectos, el primero, lo clasifica según el tipo de potencia capaz de suministrar, y el segundo, conforme la posición de su eje. Se debe tener en cuenta que el tamaño del aerogenerador es directamente proporcional a la potencia que genera el mismo. Es decir, un generador de baja potencia será considerablemente más pequeño que uno de alta. Según su potencia:

- **Aerogenerador de baja potencia:** Son aquellos que suministran una potencia de hasta 500 KW. Sus aplicaciones principalmente se dan en tres sistemas diferentes:
 - **Sistemas individuales:** Generalmente se utilizan para cargar baterías, suministrando tanto corriente alterna como continua. Con los modernos sistemas de control electrónicos, pueden ser usados para mover bombas eléctricas directamente, sin emplear baterías. También se pueden emplear para la calefacción de viviendas.
 - **Sistemas centralizados:** Un sistema eólico centralizado satisface la demanda energética de una comunidad con electricidad producida, almacenada y transformada en un sistema eólico central y luego se distribuye, a través de líneas eléctricas, hasta cada una de las viviendas y otros sitios.
 - **Sistemas híbridos:** se usa una turbina eólica en combinación con otra fuente de generación: por ejemplo, paneles fotovoltaicos o un generador eléctrico a base de diésel. Este tipo de sistemas se denominan sistemas híbridos, y una de las mayores ventajas que presentan, con respecto a un sistema individual, es que dan una mayor seguridad para la generación de energía eléctrica.
- **Aerogenerador de media potencia:** Son aquellos que poseen un suministro de potencia entre 500 KW y 30 MW, su aplicación se da generalmente para abastecer con electricidad zonas comunitarias.
- **Aerogenerador de alta potencia:** Son aquellos capaces de producir más de 30MW. Utilizados para proveer electricidad a la red nacional, por esto se encuentran instalados comúnmente en zonas con gran potencial eólico (Como la Guajira). Formando un parque eólico.

Ahora según la posición del eje:

- **Aerogenerador de eje vertical:** En este tipo de aerogeneradores las palas giran al rededor de un eje central posicionado verticalmente. De forma general se puede decir que el rendimiento de los aerogeneradores de eje vertical se encuentra por debajo de la mitad que el correspondiente a aerogeneradores de eje horizontal, hecho que ha dirigido la industria al desarrollo de esto últimos frente a los primeros (Bautista et al., 2012). A pesar de esto, presentan tres ventajas fundamentales con respecto a los de eje horizontal:
 - La sujeción de las palas es de fácil diseño y ejecución
 - No necesitan sistema de orientación para captar la energía del viento

- Fácil ubicación del tren de potencia, generador y transformador, a nivel del suelo

Los mas usados son (Ver Figura 2.3):

- Tipo Darrieus
- Tipo Savonius

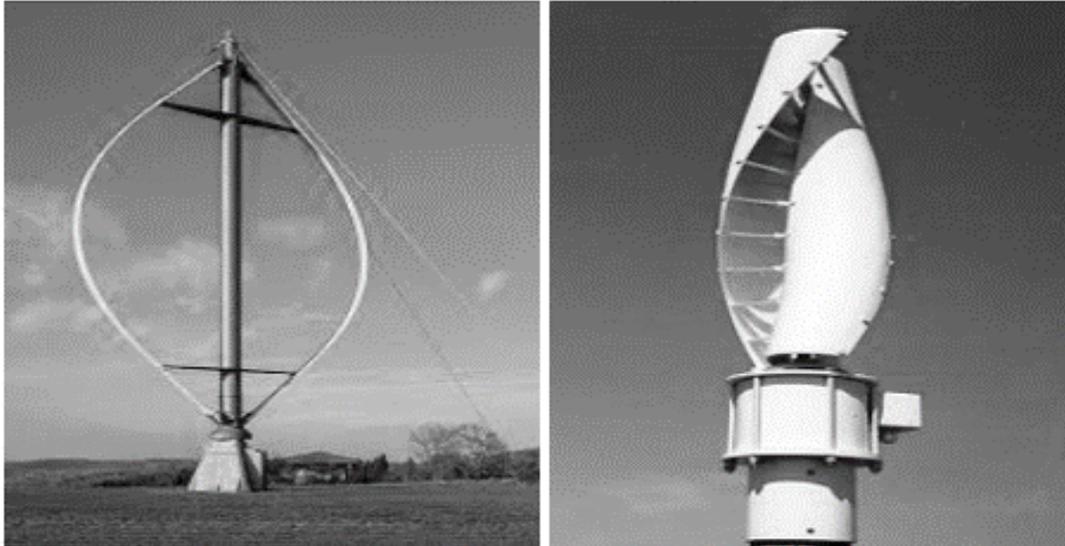


Figura 2.3: Aerogenerador Tipo Darrieus y Savonius respectivamente (*Energías and Villacián, 2017*)

- Aerogenerador de eje horizontal: Este tipo de aerogeneradores se caracterizan por girar las palas en dirección perpendicular a la velocidad del viento. Se clasifican a su vez en aeroturbinas lentas y rápidas, según la velocidad de giro de sus rotores. Las últimas son las que se conectan a la red, mientras que las primeras suelen funcionar en “isla”. así como el tamaño esta directamente relacionado con la potencia, la velocidad de giro de las turbinas es inversamente proporcional al numero de palas que tiene, es decir, entre mayor sea el factor sustentación, menor sera el numero de palas presentes en el aerogenerador.
 - Aero turbina lenta: Suelen tener entre 6 y 24 palas, lo que les confiere elevados pares de arranque y reducida velocidad de giro. No se destinan a generación eléctrica sino, tradicionalmente, a aplicaciones como bombeo de agua. En estas máquinas el coeficiente (landa), relación entre velocidad lineal en punta de pala y velocidad del viento, es igual a 1.
 - Aero turbina rapida: Suelen tener entre dos y tres palas, siendo estos últimos los mas frecuentes, con un adecuado perfil aerodinámico. Presentan un coeficiente (landa) mayor de 4, alcanzando valores hasta de 12 y 14, lo que las hace muy adecuadas para la generación de energía eléctrica por requerir un multiplicador de menor tamaño y coste.

2.3. Hélice

La hélice es la encargada de convertir la energía del cinética del viento en energía rotacional (Ver Figura 2.4 a).

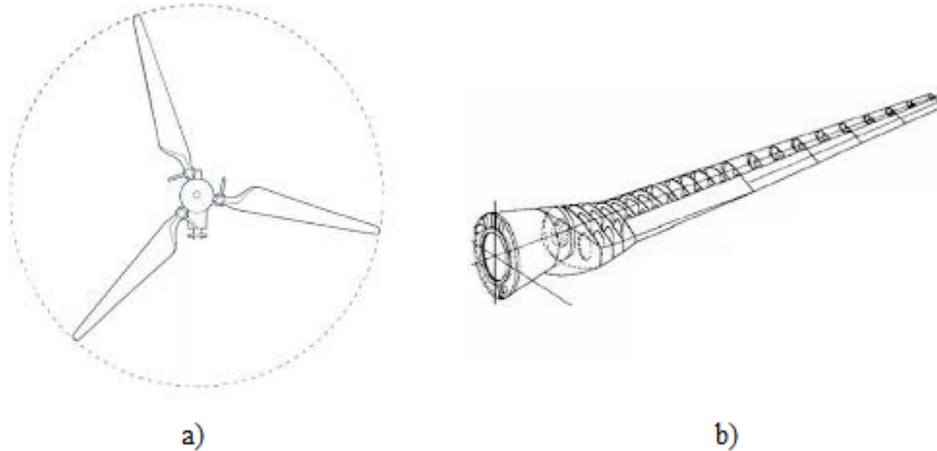


Figura 2.4: Hélice de un aerogenerador (E.L.Houghton et al., 2001)

2.3.1. Álabe

Son las aspas o palas que conforman la hélice, parte fundamental en una turbina eólica (Ver Figura 2.4 b). Realizan varias tareas y están preparadas para resistir grandes cargas según su tamaño. Los álabes toman la energía del viento, la capturan y hacen girar el rotor, transmitiendo así la energía. Están compuestos por una serie de perfiles aerodinámicos, ubicados estratégicamente para cumplir con los requerimientos de diseño. Los álabes emplean el mismo principio de la fuerza de empuje que actúa por la parte de abajo del ala. El aire produce una sobre presión en la parte inferior y un vacío en la parte superior, provocando así una fuerza de empuje que hace que el rotor gire (E.L.Houghton et al., 2001).

2.3.2. Coeficiente de potencia y relación de velocidades

El coeficiente de potencia C_p en combinación con el parámetro adimensional λ (Relación de velocidades), permiten representar las características principales para la hélice, este ultimo, constituye la relación entre la velocidad en la punta del alabe y la velocidad del viento. El coeficiente de potencia C_p se define como (Ver Ecuación 2.1):

$$C_p = \frac{\text{Potencia}_{\text{mecanica}}}{\text{Potencia}_{\text{viento}}} = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A_{fb} V^3} = 4a(1 - a)^2 \quad (2.1)$$

La relación de velocidades combina las variables mas importantes del diseño, de tal modo que el comportamiento de la hélice queda totalmente definido al representarse el coeficiente

de potencia C_p en función de la relación de velocidades (Bastianon, 2008). λ esta dada por la siguiente expresión (Ver Ecuación 2.2):

$$\lambda = \frac{wR}{V} \quad (2.2)$$

2.3.3. Solidez

Se denomina solidez a la relación entre la superficie proyectada por los álabes sobre el disco de la hélice y la superficie frontal barrida por esta. La ecuación 2.3 representa la solidez de una hélice:

$$\sigma' = \frac{A_p}{A_{fb}} \quad (2.3)$$

Donde,

$$A_p = N \int_{Raiz}^{\frac{D}{2}} C dr \quad (2.4)$$

y,

$$A_{fb} = \frac{\pi D^2}{4} \quad (2.5)$$

De igual forma las hélices se pueden clasificarse según su solidez, las que presentan una mayor solidez, son aquellas que se componen de hasta 25 álabes. A medida que esta disminuye la velocidad en la hélice aumentara, asiendo así, que la extracción de energía aumente, con lo cual se minimiza su dimensión, peso y costo de fabricación.

2.3.4. Número de álabes

En las hélices de baja solidez, el rendimiento aerodinámico se incrementa a medida que el número de álabes aumentan, pero, se debe tener en cuenta que esto deja de ser significativo en el momento que la hélice contenga más de tres aspas (Bastianon, 2008).

El número de álabes esta correlacionado con la relación de velocidades λ . la Figura 2.5 se observan los valores recomendados para N en función de λ .

λ	B
1	8-24
2	6-12
3	3-6
4	3-4
>4	1-3

Figura 2.5: Valores de N en función de λ (E.L.Houghton et al., 2001)

2.3.5. Tamaño de la hélice

Para determinar el tamaño de la hélice es necesario conocer la potencia eléctrica requerida por el usuario y/o los rendimientos de los distintos elementos que integran la turbina. Como para la generación eléctrica es necesario alcanzar un alto número de revoluciones, suele ser necesario incorporar un multiplicador de velocidades. Por lo general este es una caja de engranajes, con la cual el rendimiento puede alcanzar valores hasta del 90 %. El rendimiento global de la turbina está dado por la ecuación 2.6:

$$\eta = \eta_c \eta_m C_p \quad (2.6)$$

De tal modo que la potencia de salida será:

$$P_e = \frac{1}{2} \eta \rho V^3 A_{fb} \quad (2.7)$$

Despejando A_{fb} obtenemos,

$$A_{fb} = \frac{2P_e}{\eta \rho V^3} \quad (2.8)$$

Como $A_{fb} = \pi R^2$, el radio de la hélice será,

$$R = \sqrt{\frac{2P_e}{\pi \eta \rho V^3}} \quad (2.9)$$

2.3.6. Velocidad de rotación

Como se mencionó anteriormente, la relación de velocidades λ está dada por la ecuación 2.2, con la velocidad nominal del viento definida, se obtiene ω , con lo cual se puede hallar la velocidad de rotación de la hélice en *rpm* (Ver ecuación 2.10):

$$n = \frac{\omega 30}{\pi} \quad (2.10)$$

2.4. Perfil aerodinámico

Si un ala horizontal es cortada por un plano vertical paralelo a la línea central, la forma de la sección resultante es generalmente lo que se denomina perfil aerodinámico (E.L.Houghton et al., 2001). Esta es una sección aerodinámica, que para uso subsónico casi siempre tiene un borde de ataque redondeado, El grosor se incrementa levemente al máximo hasta que se produzca entre un cuarto y la mitad del perfil y, de igual manera, se reduzca hacia la parte posterior de la sección (Ver Figura 2.6). La forma de la sección se da generalmente como una tabla de valores de x y valores correspondientes de y . Estas ordenadas de sección generalmente se expresan como porcentajes de la cuerda.

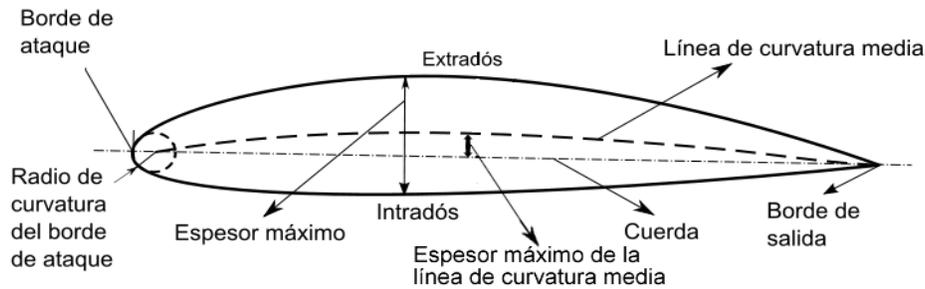


Figura 2.6: Descripción de un perfil aerodinámico (E.L.Houghton et al., 2001)

2.4.1. Parámetros geométricos del perfil aerodinámico

Los parámetros geométricos que describen un perfil se generalizan de la siguiente manera:

- **Borde de ataque:** Es el punto de inicio del perfil, en este insiden las corrientes de viento.
- **Borde de salida:** Es el punto final del perfil, en este las corrientes que se separaron al inicio vuelven a coincidir.
- **Cuerda:** Es la línea que une el borde de ataque con el borde de salida, es una dimensión característica del perfil.
- **Línea de curvatura media:** Es una línea equidistante entre el intradós y el extradós, además, esta fija a curvatura del perfil.
- **Espesor máximo de la línea de curvatura media:** Es la distancia máxima entre la línea de curvatura media y la cuerda del perfil.
- **Espesor máximo:** Es la distancia máxima entre el intradós y el extradós, esta se mide perpendicularmente a la cuerda. Es uno de los parámetros más importantes a tener en cuenta para el diseño del perfil.
- **Radio de curvatura del borde de ataque:** Define la forma del borde de ataque y es el radio de un círculo tangente al extradós e intradós.
- **Intradós:** Área de alta presión y baja velocidad.
- **Extradós:** Área de baja presión y alta velocidad.

2.4.2. Clasificación de los perfiles aerodinámicos

Según su forma:

- **Simétricos** (Ver Figura 2.7), perfil diseñado con todos sus bordes iguales, genera menos sustentación que los Asimétricos y no presentan movimiento en su centro de presión.

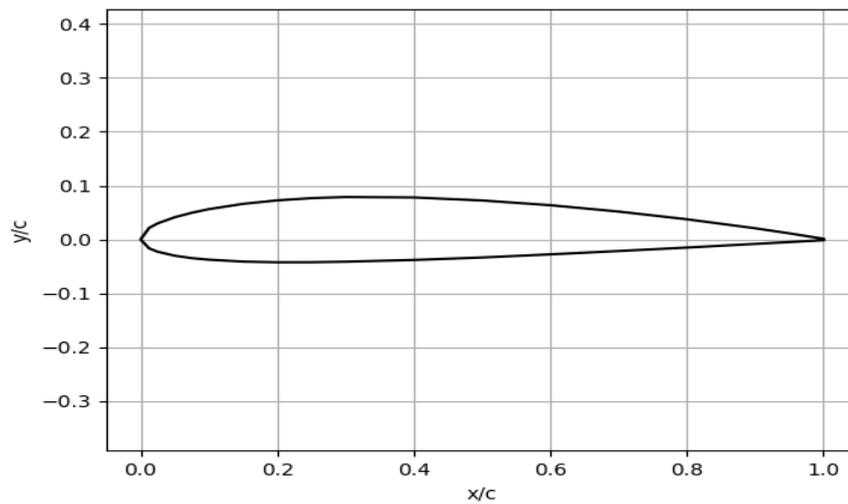


Figura 2.7: Perfil NACA 2412 Simétrico (Autor)

- **Asimétricos** (Ver Figura 2.8), perfil diseñado con todos sus bordes diferentes, presenta un mayor coeficiente de sustentación y cambio en el flujo de aire.

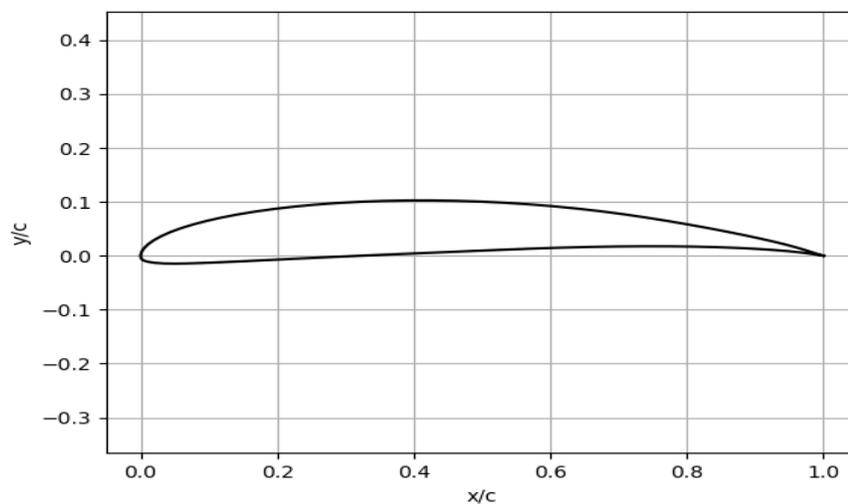


Figura 2.8: Perfil Sg 6043 Asimétrico (Autor)

La Figura 2.9 muestra el comportamiento del perfil según el tipo, comparando el coeficiente de sustentación contra el ángulo de ataque según su forma, se observa que los perfiles asimétricos presentan mejor coeficiente de sustentación que los simétricos. Según sus características:

- **De flujo laminar:** Perfiles diseñados para maximizar el porcentaje de flujo laminar en la capa límite.

- **De alta sustentación:** Perfiles con coeficientes de sustentación comparativamente altos.

Según el rango de velocidades de operación:

- Subsónicos
- Transónicos
- Supersónicos

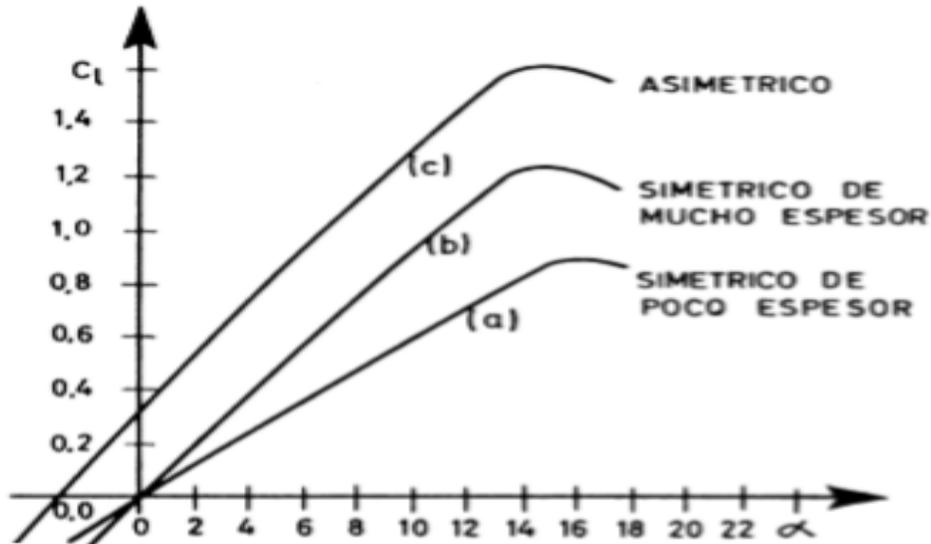


Figura 2.9: Comportamiento del perfil según su forma (E.L.Houghton et al., 2001)

2.4.3. Principio de funcionamiento de los perfiles aerodinámicos

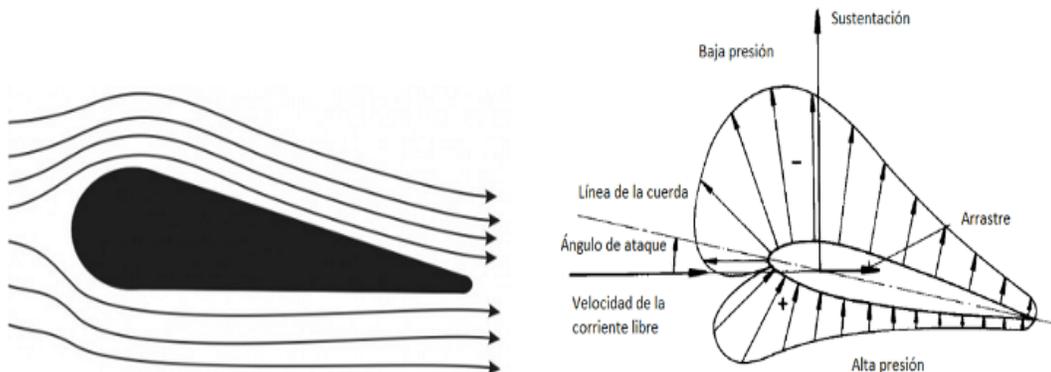


Figura 2.10: Vortices de velocidad y fuerzas resultantes en un perfil (E.L.Houghton et al., 2001)

Cuando un perfil se mueve a través del aire, se producen variaciones en la velocidad del aire a lo largo de la superficie, el aumento de la velocidad de este sobre el extradós, con respecto

a la del intradós, produce una diferencia de presiones entre ambas superficies. Esta diferencia de presiones puede ser cero, positiva o negativa. Cuando toma valor positivo ó negativo, genera una fuerza resultante conocida como sustentación. A medida que el ángulo de ataque va aumentando, la velocidad y la presión se van haciendo inversamente proporcionales, es decir, en el intradós la presión ira aumentando y la velocidad disminuyendo, mientras que para el extradós, la presión ira disminuyendo y la velocidad aumentando. De esta forma aumentara la fuerza de sustentación, ubicada en el centro de presiones (Ver Figura 2.10).

Muchos factores contribuyen a la sustentación total generada por un perfil. El incremento de la velocidad causa un aumento en la sustentación debido a la diferencia de presiones entre el extradós y el intradós. Normalmente un aumento de sustentación generara un aumento de arrastre, por lo tanto, cuando se diseña un perfil se deben tener en cuenta estos factores, diseñandose para que tenga un trabajo óptimo en el rango de velocidades en que funcionara ([Galindo Flores, 2006](#)).

Capítulo 3

Diseño de perfiles aerodinámicos

3.1. Métodos de diseño

El uso de catálogos para la selección de un perfil aerodinámico ha sido uno de los métodos más exitosos, sin embargo, las aplicaciones de estos se han ido diversificando con el desarrollo de nuevas tecnologías y requerimientos. Desde aerogeneradores caseros hasta aerogeneradores de colección masiva, aplicaciones que cuentan con una serie de parámetros totalmente diferentes entre sí. es por esto, que para satisfacer estas necesidades se han venido implementando métodos que permiten la variación y/o modificación de aquellos perfiles que no cumplen con esta serie de requisitos. Una de las ventajas relacionadas con el diseño de perfiles teórico es que permite que muchos conceptos diferentes puedan ser evaluados no solo en aspectos estructurales o aerodinámicos, si no también económicos. El proceso para el diseño de un perfil está estrechamente ligado a un previo conocimiento de las propiedades de la capa limite y la relación entre la geometría y la distribución de presiones. El método más usado para el diseño de un perfil es el hacer uso de uno diseñado previamente por otra persona, este método es conocido como Optimización de un perfil, teniendo en cuenta que funciona cuando los objetivos de ambos diseños coinciden. Los métodos para el diseño de perfiles aerodinámicos se dividen en, Directo e Inverso.

3.1.1. Método directo

El diseño directo parte de tener las especificaciones de la geometría, el cálculo de presiones y rendimiento. Se evalúa la geometría y se modifica de tal forma que se pueda mejorar el rendimiento mediante procesos de optimización. Esta optimización se realiza teniendo como meta la minimización de alguna función objetivo que caracterice el rendimiento del perfil. Así el diseño directo parte de una geometría ya establecida y se debe calcular su distribución de presiones en la superficie de dicha geometría. Posteriormente se ajusta sucesivamente la forma hasta que se obtienen los resultados de rendimiento deseados (Galindo Flores, 2006). La Figura 2.10 muestra la representación esquemática del proceso para aplicar este método, en el cual la forma del perfil es usada para calcular las distribuciones de velocidad, características de capa limite, posición de transición laminar a turbulenta y las polares de arrastre.

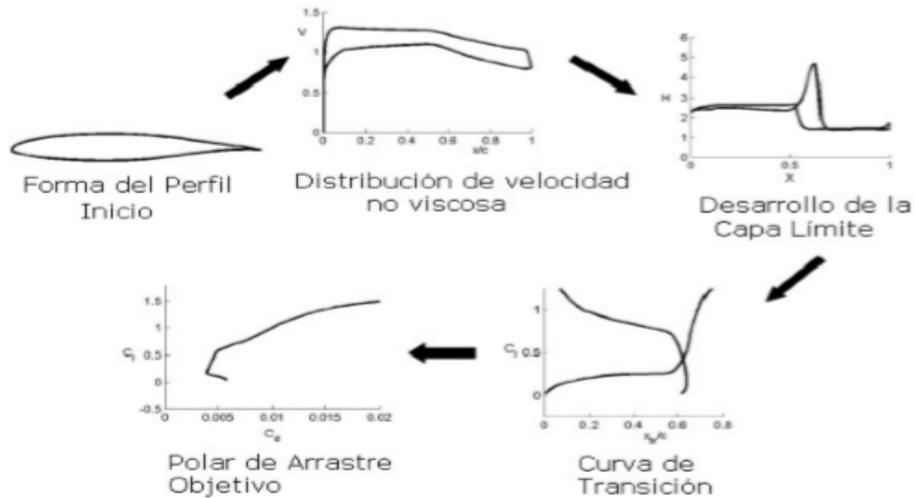


Figura 3.1: Representación Método Directo (E.L.Houghton et al., 2001)

3.1.2. Método inverso

El diseño inverso como su nombre lo indica, se realiza en sentido contrario al diseño directo, en este, se debe llegar a determinar una geometría partiendo de las distribuciones de presión de dicha superficie, tal presión integra el rendimiento del perfil que se desea, ya con sus características mejoradas. Estas condiciones ya están diseñadas de tal forma que, por ejemplo, se eviten cavitaciones, velocidades no deseadas, desprendimiento de la capa límite, incluso que dicho perfil satisfaga especificaciones de carácter aerodinámico y/o geométrico, como tamaños y espesores de materiales (E.L.Houghton et al., 2001). Así el rendimiento final de los perfiles diseñados con ingeniería inversa puede ser controlado de manera indirecta mediante el control directo en las distribuciones de velocidad y especificaciones en el desarrollo de capa límite.

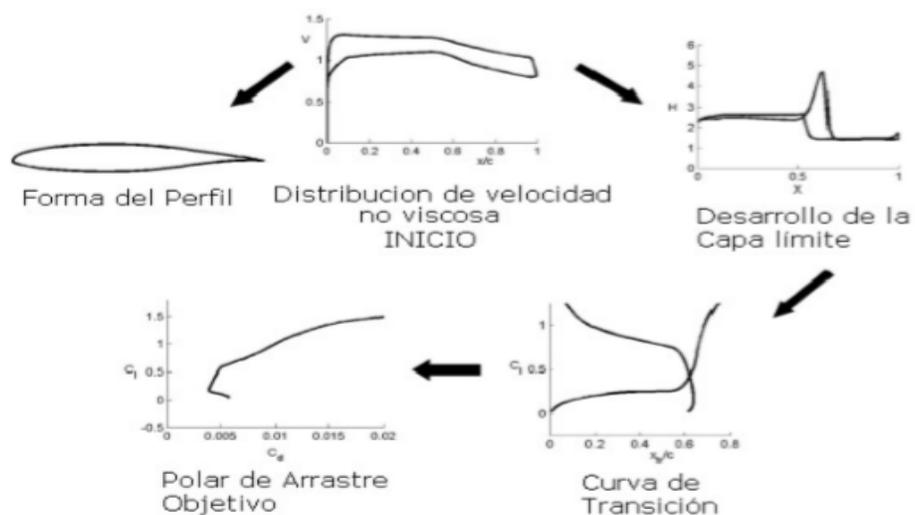


Figura 3.2: Representación Método Inverso (E.L.Houghton et al., 2001)

3.2. Tipologías de diseño

En la mayoría de los casos, el diseño de un perfil aerodinámico está sujeto a una serie de problemas o limitaciones, dadas estas principalmente por la variedad de aplicaciones para con los mismos, es decir, no se podría diseñar un perfil que satisfaga todo al tiempo, o en tal caso, sería muy difícil que este converja a una solución óptima. es por esto que se presentan una serie de tipologías a tener en cuenta al momento de diseñar uno.

3.2.1. Con sustentación máxima

Para generar coeficientes de sustentación elevados, se requieren presiones demasiado negativas sobre la superficie superior del perfil, esto puede ser relacionado con los efectos de compresibilidad, o puede ser impuesto por la necesidad de que la capa limite sea capaz de retrasarse en su gradiente de presión adversa (E.L.Houghton et al., 2001).

3.2.2. Para bajo número de Reynolds

Trabajar con números de Reynolds bajos generan problemas ante el diseño debido a que la capa limite es más inestable al momento de trabajar con gradientes de presión adversa sin separación (Galindo Flores, 2006). Los métodos de diseño a bajos números de Reynolds deben ser capaces de incluir los efectos viscosos que producen la separación de burbujas laminares, efectos de capa limite, transición a la turbulencia, histéresis en los coeficientes de fuerza y el comportamiento no lineal.

3.2.3. Transónicos

En este caso los perfiles que se diseñan estarán expuestos a velocidades muy altas, por lo cual se debe aplicar una optimización que mate mínimamente la resistencia al avance, con lo cual se limitaran las perdidas por resistencia aerodinámica de la onda de choque a dicha velocidad (Galindo Flores, 2006).

3.2.4. Con espesor máximo

La dificultad que presentan estos, es la reducción que sufre la presión mínima debido al espesor, generándose así un gradiente de presión adversa mucho más grande, lo que implica un recuperamiento mucho más rápido. Con estos se busca obtener la máxima sustentación posible y un bajo arrastre, sin dejar a un lado el efecto de cabeceo.

3.2.5. Laminares

Es uno de los más aplicados, ya que el flujo laminar puede ser muy útil para reducir el arrastre por fricción, incrementando así la máxima sustentación y reduciendo la transferencia de calor. Se logra fácilmente bajos números de Reynold, manteniendo una superficie delgada y usando un perfil con gradiente de presión favorable (Grasso, 2014).

Capítulo 4

Teoría de diseño de álabes

En general, un rotor no tiene la forma óptima debido a dificultades de fabricación. Además, cuando un álabes óptimo se ejecuta a una relación de velocidad de punta diferente a la que está diseñado, ya no es óptimo. Por lo tanto, las formas de las álabes deben estar diseñadas para una fácil fabricación y para un rendimiento general en el rango de velocidades de viento y rotor que encontrarán. Al considerar los álabes no óptimos, generalmente se usa un enfoque iterativo. Es decir, se puede asumir una forma de álabes y predecir su rendimiento, probar otra forma y repetir la predicción hasta que se haya elegido un álabes adecuado (Manwell, 2009).

Las fuerzas aerodinámicas de elevación y arrastre sobre los elementos de las varias palas de un rotor de una turbina eólica son las responsables de la velocidad de cambio del momento axial y angular de todo el aire que pasa a través del anillo barrido por los elementos de la pala. Además, la fuerza sobre los elementos de la pala, causada por la caída de presión asociada con la velocidad de rotación en la estela, también debe ser proporcionada por la sustentación aerodinámica y arrastre. Debido a que no hay rotación del flujo que se aproxima al rotor, la presión reducida en el lado de sotavento del rotor causada por la rotación de la estela aparece como una caída de presión escalonada, como la que provoca el cambio en el momento axial (Bavanish and Thyagarajan, 2013).

4.1. Límite de Betz

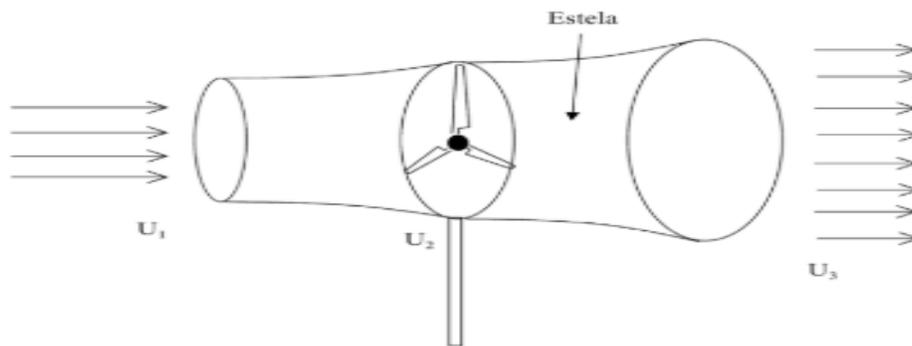


Figura 4.1: Aeroturbina en la teoría unidimensional de Betz (E.L.Houghton et al., 2001)

El modelo mas simplificado de una aeroturbina fue propuesto por Betz en 1926 (Manwell, 2009). Este modelo permite calcular la potencia y la fuerza de empuje que produce el viento sobre el rotor, utilizando un modelo unidimensional muy simplificado. En la Figura 4.1 se muestra la aeroturbina del modelo Betz.

Este método presenta ciertas hipotesis:

- Flujo homogéneo, incompresible y en estado estacionario.
- Se desprecia la fricción del viento sobre las palas.
- Número infinito de palas.
- No existe estela con rotación detrás del rotor.
- La presión aguas arriba y aguas abajo de la aeroturbina es igual a la atmosférica.

Bajo estas condiciones, las ecuaciones de conservación de la masa (Ecuación de continuidad) y la de conservación de la energía (Ecuación de Bernoulli) se pueden escribir como:

$$U_1 A_1 = U_2 A_2 \quad (4.1)$$

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho U_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho U_2^2 \quad (4.2)$$

Aplicando la conservación de la cantidad de movimiento, se obtiene la fuerza de empuje T que soporta el rotor:

$$T = \dot{m}(U_1 - U_3) \quad (4.3)$$

Usando la ecuación de Bernoulli, la fórmula anterior se puede escribir como:

$$T = \frac{1}{2} \rho A_2 (U_1^2 - U_3^2) \quad (4.4)$$

Las tres velocidades del viento se pueden relacionar mediante el coeficiente de velocidad inducida, a , definido por la siguiente ecuación:

$$a = \frac{U_1 + U_3}{U_1} \quad (4.5)$$

Se debe tener en cuenta que la teoría unidimensional de Betz solo es aplicable para $a \leq 1/2$. La fuerza de empuje se suele expresar comúnmente de forma adimensional, a través del llamado coeficiente de empuje:

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \rho U^2 A} \quad (4.6)$$

El número adimensional que mide la potencia del viento es el coeficiente de potencia:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho U^3 A} = 4a(1 - a)^2 \quad (4.7)$$

A la hora de diseñar una turbina, estamos interesados en obtener la máxima potencia de ella. Para calcular el coeficiente de potencia máximo, derivamos la ecuación anterior e igualamos a cero, con lo cual se obtiene:

$$C_p^{max} = \frac{16}{27} = 0,5926a = \frac{1}{3} \quad (4.8)$$

El valor máximo de C_p se denomina límite de Betz y representa la máxima potencia que se puede extraer del viento en una turbina ideal.

4.2. Teoría de momento

Las fuerzas en un álabe de turbina eólica y las condiciones de flujo en estos se pueden derivar considerando la conservación del momento dado que la fuerza es la tasa de cambio de momento. Las ecuaciones necesarias ya se han desarrollado en la derivación del rendimiento de una turbina eólica ideal, incluida la rotación de estela. El presente análisis se basa en el volumen de control anular. En este análisis, se supone que los factores de inducción axial y angular son funciones del radio, r (Manwell, 2009). El resultado de aplicar la conservación del momento lineal al volumen de control de radio r y espesor d_r es una expresión para la contribución diferencial al empuje:

$$dT = \rho V^2 4a(1 - a')\pi r dr \quad (4.9)$$

Del mismo modo, a partir de la conservación de la ecuación de momento angular, el par diferencial, Q , impartido a los álabes (e igualmente, pero en sentido opuesto, al aire) es:

$$dQ = 4a'(1 - a)\rho V \pi r^3 \omega dr \quad (4.10)$$

4.3. Teoría de elemento de pala

Las fuerzas sobre los álabes de una turbina eólica también se pueden expresar en función de los coeficientes de elevación C_l , arrastre C_d y el ángulo de ataque α (Manwell, 2009). En este análisis, se supone que el álabe se divide en N secciones (o elementos). Además, se hacen los siguientes supuestos:

- No hay interacción aerodinámica entre elementos (por lo tanto, no hay flujo radial)
- Las fuerzas sobre los álabes están determinadas únicamente por las características de elevación y arrastre de la forma del perfil de en estos.

La Figura 4.2 nos muestra un diagrama con las fuerzas que actúan sobre un perfil. Al analizar las fuerzas en la sección de la pala, debe tenerse en cuenta que las fuerzas de elevación y arrastre son perpendiculares y paralelas, respectivamente, a un viento efectivo o relativo. El viento relativo es la suma vectorial de la velocidad del viento en el rotor, $V(1 - a)$, y la velocidad del viento debido a la rotación de la pala. Este componente rotacional es la suma vectorial de la

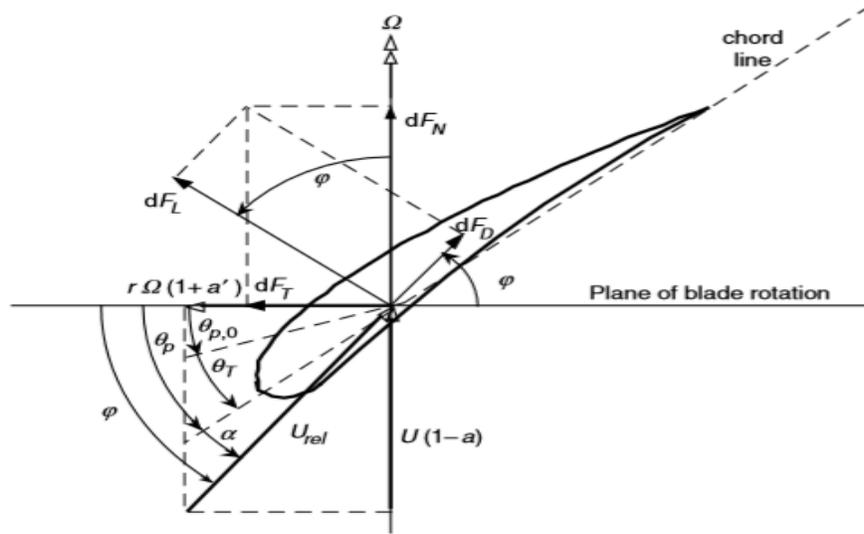


Figura 4.2: Fuerzas que actúan sobre un perfil (Manwell, 2009)

velocidad de la sección del álabes, ωr , y la velocidad angular inducida desde la conservación del momento angular $\omega r/2$, o:

$$\omega r + (\omega/2)r = \omega r + \omega a' r = \omega r(1 + a') \quad (4.11)$$

Tenga en cuenta también que, aquí, el ángulo de giro del álabes, θ_T , se define en relación con la punta del mismo. Por lo tanto:

$$\theta_T = \theta_p - \theta_{p,0} \quad (4.12)$$

El ángulo de giro es, por supuesto, una función de la geometría del álabes, donde a medida que θ_p cambia para diferentes posiciones de álabes, $\theta_{p,0}$ cambia. Tenga en cuenta también que el ángulo del viento relativo es la suma del ángulo de inclinación de la sección y el ángulo de ataque:

$$\varphi = \theta_p + \alpha \quad (4.13)$$

Si el rotor tiene N cantidad de álabes, la fuerza normal total sobre la sección a una distancia r , del centro es:

$$dF_N = N \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 (C_l \cos \varphi + C_d \sin \varphi) C dr \quad (4.14)$$

El par diferencial debido a la fuerza tangencial que opera a una distancia, r , del centro viene dado por:

$$dQ = N r dF_N \quad (4.15)$$

Reemplazando,

$$dQ = N \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 (C_l \sin \varphi + C_d \cos \varphi) C r dr \quad (4.16)$$

4.4. Teoría de elemento de pala - Momento (BEM)

Se supone que las fuerzas sobre un elemento de pala pueden determinarse mediante las características del perfil aerodinámico bidimensional, utilizando un ángulo de ataque determinado a partir de la velocidad resultante incidente en el plano de la sección transversal del elemento; ignorando los efectos tridimensionales. Los componentes de la velocidad en una posición radial en la pala expresados en términos de la velocidad del viento, los factores de flujo y la velocidad de rotación del rotor, determinarán el ángulo de ataque. Al tener información acerca de cómo los coeficientes de sustentación y arrastre del perfil aerodinámico C_l y C_d varían con el ángulo de ataque, las fuerzas sobre las palas se dan normalmente como a y a' . La suposición básica de la teoría BEM es que la fuerza de un elemento de pala es únicamente responsable del cambio de impulso del aire que pasa a través del anillo barrido por el elemento. Por lo tanto, se debe suponer que no hay interacción radial entre los flujos a través de anillos contiguos, una condición que solo es cierta si el factor de inducción de flujo axial no varía radialmente (Bavanish and Thyagarajan, 2013). En la práctica, el factor de inducción de flujo axial rara vez es uniforme pero experimentalmente el análisis del flujo a través de los discos de la hélice muestra que la suposición de independencia radial es aceptable.

En términos simples, con la aplicación de esta se definirá la geometría del alabe. para iniciar con la aplicación, es necesario conocer el radio de la hélice R , número de álabes N , velocidad del viento V , Coeficiente de velocidad específica λ , C_l y C_d . la fundamentación matemática se presenta a continuación.

Como primer paso, se deben suponer valores iniciales para a y a' , con lo cual se determinara el ángulo relativo, dado por:

$$\varphi = \frac{1 - a}{(1 + a')\lambda_r} \quad (4.17)$$

De igual forma, se calcula el valor de la cuerda, dada por:

$$C = \frac{8\pi r}{NC_l}(1 - \cos \varphi) \quad (4.18)$$

Ahora, teniendo en cuenta que, en la punta de las palas de una aeroturbina, se produce una corriente en la parte inferior de la pala que se encuentra a alta presión y, hacia la parte superior de la misma que se encuentra a baja presión; esta corriente tiene como efecto minimizar la fuerza de sustentación de la pala y, por tanto, la potencia de la turbina. Por tal motivo, se introduce un factor de corrección propuesto por Prandtl (Manwell, 2009):

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[\exp\left(-\frac{N/2(1 - r/R)}{(r/R) \sin \varphi}\right) \right] \quad (4.19)$$

Este factor de corrección sólo afecta las ecuaciones de la teoría de momento, dichas ecuaciones se presentan a continuación. Una vez hallado lo anterior e incluyendo el factor de corrección, se podrán calcular los factores de inducción axial a y angular a' , Además del ángulo de inclinación θ :

$$a = \frac{1}{1 + 4F \sin^2 \varphi / \sigma' C_l \cos \varphi} \quad (4.20)$$

$$a' = \frac{1}{4F \cos \varphi / (\sigma' C_l) - 1} \quad (4.21)$$

$$\theta_r = \varphi - \alpha_r \quad (4.22)$$

Por medio de un proceso de aproximaciones sucesivas se deberá variar a y a' e iterar hasta que se obtenga convergencia en ambos factores. Teniendo los factores de inducción, es posible calcular el coeficiente de potencia C_p , tenga en cuenta que este será un coeficiente local, por lo tanto, al final deberá sumar el total de estos, según la cantidad de elementos del álabe. El coeficiente esta dado por la siguiente ecuación:

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_{\lambda_o}^{\lambda} F \lambda_r^3 a' (1 - a) [1 - (C_d/C_l) \cot \varphi] d\lambda_r \quad (4.23)$$

Por ultimo se aplica un ajuste lineal para las variaciones de la cuerda C y el ángulo de inclinación θ , de tal forma, que se facilite un poco la fabricación del álabe.

Donde,

$$C(r) = a_1 r - b_1 \quad (4.24)$$

$$\theta_T(r) = a_2 (r_p - r) \quad (4.25)$$

A continuación se presenta un algoritmo diseñado para la aplicación de la teoría BEM:

DATOS DE INCIO: $R, N, V, \lambda, C_l, C_d$

PASO 1: Suponer valores iniciales para a y a'

PASO 2: Calcular el ángulo relativo φ . (Ec 4.1)

PASO 3: Calcular el valor de la cuerda C . (Ec 4.2)

PASO 4: Calcular la solidez del perfil aerodinámico σ' . (Ec 4.3)

PASO 5: Calcular el factor de corrección de Prandtl F . (Ec 4.4)

PASO 6: Calcular el factor de inducción axial a . (Ec 4.5)

PASO 7: Calcular el factor de inducción angular a' . (Ec 4.6)

PASO 8: Calcular el ángulo de inclinación de la sección θ_r . (Ec 4.7)

PASO 9: Aplicar un método de convergencia para comparar los factores obtenidos en los pasos 6 y 7, con los iniciales. Si se cumple la convergencia salte a paso 11.

PASO 10: Regresar al paso 1, Varie e itere a y a' haciendo uso del método que guste hasta que obtenga una convergencia coherente.

PASO 11: Determinar el coeficiente de potencia C_p . (Ec 4.8)

PASO 12: (Opcional, recomendado): Realizar un ajuste lineal para las variaciones de la cuerda C y el ángulo de inclinación θ .

DATOS DE SALIDA: C, θ, C_p

4.5. Aproximaciones sucesivas

El método de aproximaciones sucesivas consiste en generar funciones convergentes bajo un esquema iterativo partiendo de una función base. Este método suele ser más lento, pero a la vez más preciso que los otros.

Este método es uno de los procedimientos más importantes y más sencillos de codificar. Suponiendo la ecuación,

$$f(x) = 0 \quad (4.26)$$

Donde $f(x)$ es una función continua que desea determinar sus raíces reales. Entonces se debe sustituir esta, por su ecuación equivalente,

$$x = G(x) \quad (4.27)$$

Con lo cual se estima el valor de la raíz x_0 , y se reemplaza en la ecuación para obtener la siguiente raíz x_1 ,

$$x_1 = G(x_0) \quad (4.28)$$

A su vez, poniendo x_1 como argumento de $G(x)$, se obtendrá la siguiente raíz x_2 . Y así sucesivamente, hasta que se alcance una condición de finalización. Todo esto se puede sintetizar con la siguiente ecuación,

$$x_n = G(x_{n-1}) \quad (4.29)$$

4.5.1. Criterio de convergencia

No todas las ecuaciones pueden resolverse por este método, solamente si el valor absoluto de la derivada de la función $G(x)$ en la vecindad de la raíz solución es menor que la unidad, es decir,

$$|G'(x)| < 1 \quad (4.30)$$

Donde P_i es la ordenada de Bézier del i -th punto de control, y t es el parámetro de posición. $B_i^n(t)$ es un polinomio de Bernstein definido como:

$$B_i^n(t) = \frac{n!}{i!(n-i)!} t^i (1-t)^{n-i}, \quad i = 0, 1, \dots, n \quad (5.3)$$

Ademas, una importante característica de las curvas de Bézier es:

$$\alpha(0) = P_0; \quad \alpha(1) = P_n \quad (5.4)$$

Esta es la definición actual que tienen hoy en día las curvas de Bézier (Education et al., 2011). Para hacer mas didactica y entendible la forma de comprender el funcionamiento de las mismas, se puede hacer uso del algoritmo de Casteljau, el cual se explicará más adelante.

5.1.2. Propiedades de las curvas de Bézier

- **Simetría:** Si invertimos el orden de los puntos de control, la curva de Bézier resultante tras el cambio es la misma pero recorrida en sentido inverso.
- **Envoltura convexa:** La curva de Bézier siempre está contenida dentro de la envoltura convexa de los puntos de control.
- **Disminución de la variación:** El número de intersecciones entre la curva de Bézier y una recta es menor o igual al número de intersecciones de la misma recta con su polígono de control.
- **Pseudo-control local:** Esta es tal vez la propiedad más destacada. Si movemos un punto de control P_i a P'_i , entonces todos los puntos de la curva se moverán respecto a la curva original en la dirección del vector $P_i \rightarrow P'_i$.

5.2. Algoritmo de Casteljau

El algoritmo de de Casteljau es, en el campo del análisis numérico de la matemática, un método recursivo para calcular polinomios en la forma de Bernstein o base de Bernstein o en las curvas Bézier, toma su nombre de su autor Paul de Casteljau. En efecto este algoritmo de Casteljau es un método numéricamente estable para evaluar las curvas de Bézier (Farin, 2018).

Dado un polinomio α en forma de Bernstein de grado n :

$$\alpha(t) = \sum_{i=0}^n B_i^n(t) P_i \quad (5.5)$$

Donde B es un polinomio base de Bernstein, el polinomio en el punto t_0 puede ser obtenido con la relación de recurrencia:

$$B_i^0 = B_i, \quad i = 0, \dots, n \quad (5.6)$$

$$B_i^j = B_i^{j-1}(1-t_0) + B_{i+1}^{j-1}t_0, \quad i = 0, \dots, n-j, \quad j = 1, \dots, n \quad (5.7)$$

Con $B(t_0) = B_0^n$. Para facilitar el cálculo, es muy útil escribir los coeficientes en un esquema triangular, de la siguiente manera:

$$\begin{array}{rcccc} B_0 & = & B_0^0 & & \\ & & & & B_0^1 \\ B_1 & = & B_1^0 & & \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & B_0^n \\ B_{n-1} & = & B_{n-1}^0 & & & \\ & & & & & B_{n-1}^1 \\ B_n & = & B_n^0 & & & \end{array}$$

Capítulo 6

Recursos computacionales

6.1. Xfoil V6.99

XFOIL es un programa interactivo para el diseño y análisis de perfiles aeronáuticos subsónicos aislados. Dadas las coordenadas que especifican la forma de un perfil 2D, los números de Reynold y Mach, XFOIL puede calcular la distribución de presión en el perfil y, por lo tanto, las características de elevación y arrastre. El programa también permite un diseño inverso: variará la forma de una superficie de sustentación para lograr los parámetros deseados.

6.2. Python V3.7.6

Python es un lenguaje de scripting independiente de plataforma y orientado a objetos, preparado para realizar cualquier tipo de programa, desde aplicaciones Windows a servidores de red o incluso, páginas web. Es un lenguaje interpretado, lo que significa que no se necesita compilar el código fuente para poder ejecutarlo, lo que ofrece ventajas como la rapidez de desarrollo e inconvenientes como una menor velocidad.

6.3. Solidworks V18

SOLIDWORKS es un software de diseño CAD 3D (Diseño asistido por computadora) para modelar piezas y ensamblajes en 3D y planos en 2D. El software que ofrece un abanico de soluciones para cubrir los aspectos implicados en el proceso de desarrollo del producto. Sus productos ofrecen la posibilidad de crear, diseñar, simular, fabricar, publicar y gestionar los datos del proceso de diseño.

6.4. Ansys V19

ANSYS es un software que ayuda a encontrar soluciones a problemas de ingeniería a través de la teoría de los elementos finitos para estructuras y de los volúmenes finitos para fluidos. Se utiliza para cálculos estáticos y resuelve problemas lineales y no lineales para estructuras, transferencia de calor, dinámica de fluidos, problemas acústicos y electromagnéticos.

6.5. DAP V1.0

DAP (Diseño de perfiles aerodinámicos) es una aplicación diseñada para realizar cálculos aerodinámicos sobre un perfil alar, esta permite, obtener la caracterización del perfil a estudiar, realizar optimización a partir de puntos de control empleando el método directo, aplicación de la teoría BEM y la interacción directa con los software Xfoil y Xflr5. Esta versión se enlaza directamente con el software Xfoil.

Capítulo 7

DAP v1.0

Aquel que ha tenido la oportunidad de trabajar con Xfoil, es consciente de la poca interactividad con la que cuenta su interfaz, para darle un buen manejo a este software es necesario tener un conocimiento base (aunque no tan amplio); de lo contrario, aunque este arroje resultados, pueden ser erróneos. Por esta razón, se vio la oportunidad de satisfacer esa necesidad, en la cual entran muchos de los usuarios que están dando sus primeros pasos en este tipo de análisis. DAP le brinda al usuario un esquema libre de codificación cmd, además de una interfaz muy fácil de manejar y simple de entender, basta con tener un conocimiento muy básico de lo que se está estudiando para poder ejecutarla. Al ejecutarla el sistema le da la bienvenida y le brinda una serie de recomendaciones para una mejor experiencia, la Figura 7.1 muestra la ventana de bienvenida.

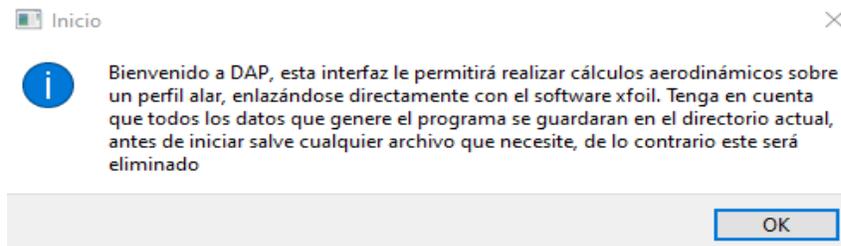


Figura 7.1: Ventana de bienvenida (Autor)

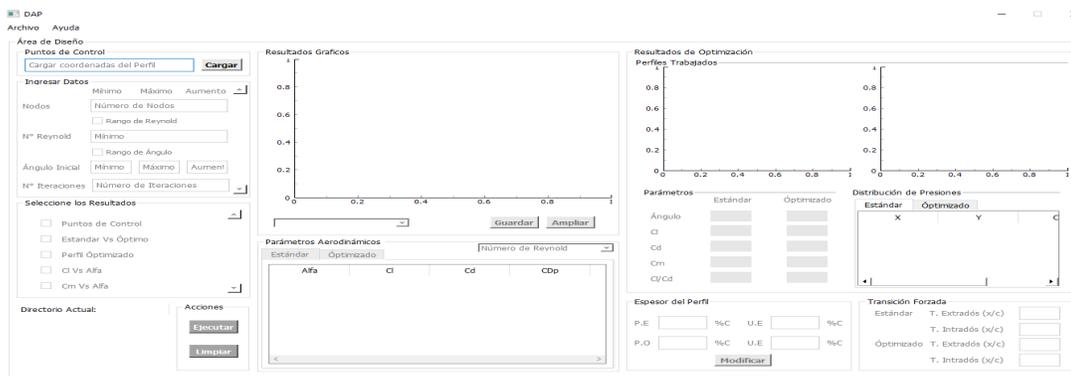


Figura 7.2: Ventana principal (Autor)

En la Figura 7.2 se puede observar la ventana principal de la aplicación, esta cuenta con un área de diseño que abarca todas las funciones, las cuales están divididas en funciones pre-proceso, proceso y pos-proceso.

A continuación se irán explicando las secciones que componen el área de diseño, para dar inicio es necesario cargar las coordenadas del perfil que se desea estudiar, recordando que estas deben estar en un formato *.txt*, la Figura 7.3 muestra dicha sección.

Figura 7.3: Sección puntos de control (Autor)

Tenga en cuenta que, si no carga los puntos de control, no podrá seguir avanzando, ya que a medida que va ingresando se van desbloqueando las funciones. una vez listo esto, deberá proceder a ingresar los datos para el análisis, no olvide que, por defecto, se realiza un diseño directo, es decir, a partir de la variación de una superficie geométrica con ciertas condiciones, se busca obtener variables con valores deseados. para más información sobre el modelo utilizado puede ir a la pestaña ayuda. La Figura 7.4 muestra la sección para el ingreso de datos.

Figura 7.4: Sección ingreso de datos (Autor)

Figura 7.5: Sección selección de resultados (Autor)

Una vez ingresados los datos, deberá seleccionar que resultados gráficos quiere observar, esto se puede ver en la Figura 7.5

En la sección acciones (Vea la Figura 7.6), podrá observar el directorio de trabajo y dos botones, Ejecutar y Limpiar, con el primero se ejecutara el sistema con los datos ingresados y el segundo limpiara por completo el área de diseño.

Directorio Actual:



Figura 7.6: Sección acciones (Autor)

Los resultados gráficos, se podrán ver en la sección mostrada en la Figura 7.7, aquí, podrá analizar las curvas que selecciono anteriormente, también podrá realizar zoom sobre la gráfica y guardarla, bien sea usando el botón o dando clic derecho en ella.

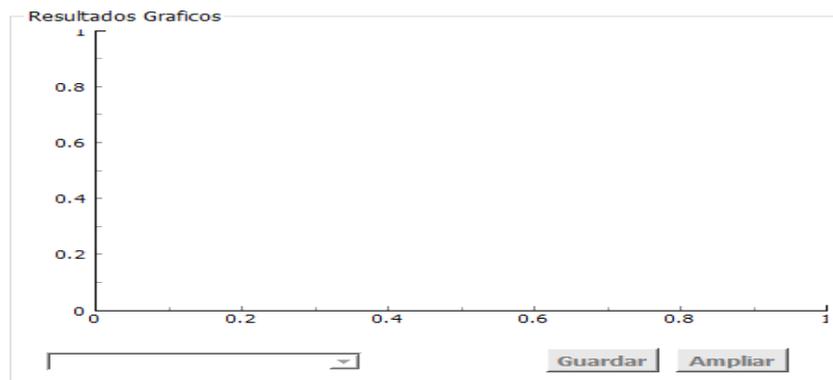


Figura 7.7: Sección resultados graficos (Autor)

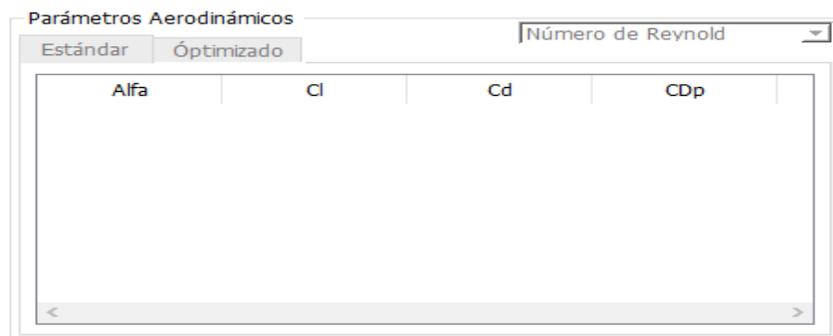


Figura 7.8: Sección parámetros aerodinámicos (Autor)

En la sección parámetros aerodinámicos (Ver Figura7.8), podrá ver el resultado obtenido para cada parámetro en cada perfil, tendrá la opción de escoger.

De igual forma, podrá observar los perfiles trabajados en la sección perfiles trabajados (Ver Figura 7.9).

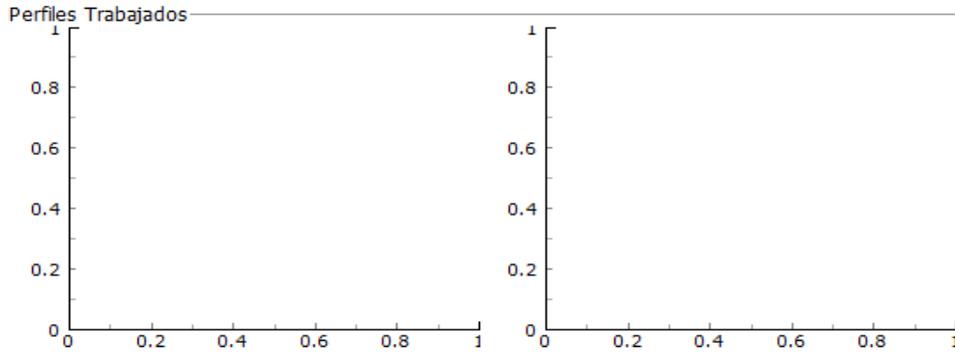


Figura 7.9: Sección perfiles trabajados (Autor)

La sección parámetros (Ver Figura 7.10) presenta una comparación entre los parámetros más importantes del diseño, además del coeficiente de presión en cada punto.

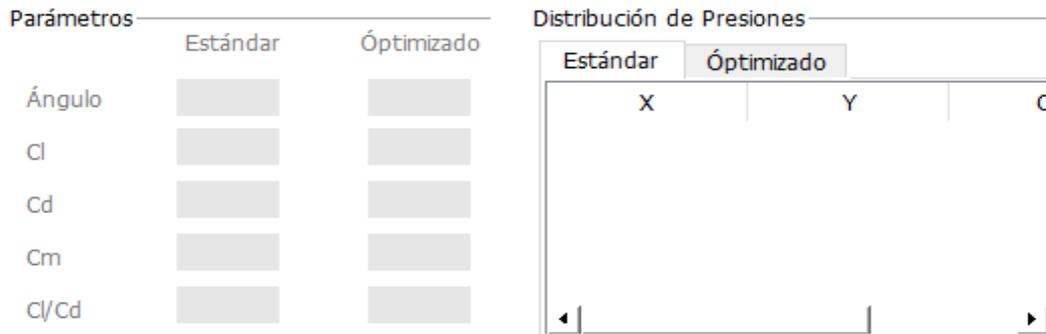


Figura 7.10: Sección parámetros (Autor)

Por último en la Figura 7.11, se muestra la sección espesor del perfil, en la cual, se observa el espesor y la ubicación de este. También la transición forzada en el intradós y el extradós.



Figura 7.11: Sección espesor y transición del perfil (Autor)

Capítulo 8

Diseño del álabe

8.1. Perfiles estudiados

Para dar inicio al diseño del álabe es necesario generar un banco de perfiles con los cuales se trabajará, esto se realizará con la ayuda de una base de datos de libre acceso, publicada por la Universidad de Illinois (UICC,database).

Como se nombró anteriormente, el álabe se dividirá en 9 secciones, contando con 10 posiciones en total, es decir, estará compuesto por 10 perfiles aerodinámicos, más las interpolaciones de línea entre cada sección. La Figura 8.1 muestra el esquema usado.

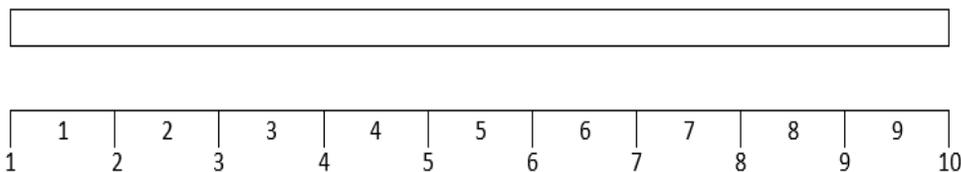


Figura 8.1: *Esquema utilizado para dividir el álabe (Autor)*

Como se observa en la Figura 8.1, la posición 10 coincide con la punta del álabe, a su vez, la posición 1 con la sección mas cercana a la raíz. La Figura 8.2 muestra los perfiles considerados para la posición 1, de estos se escogerá el que presente mejores características para servir como base de la optimización según lo explica (Grasso, 2014). De igual forma la Tabla 8.1 presenta las características de estos.

Posición	Perfil	Espesor (%C)	A (%C)	Curvatura (%C)	A (%C)
1	Clarym15	15	29.6	3.6	39.6
	Fx60160	15.6	40	3.1	60
	S822	16	39.2	1.8	59.5
	S834	15	39.5	1.6	60
	Sg6040	16	35.3	2.3	60.5

Tabla 8.1: *Perfiles considerados para la posición 1*

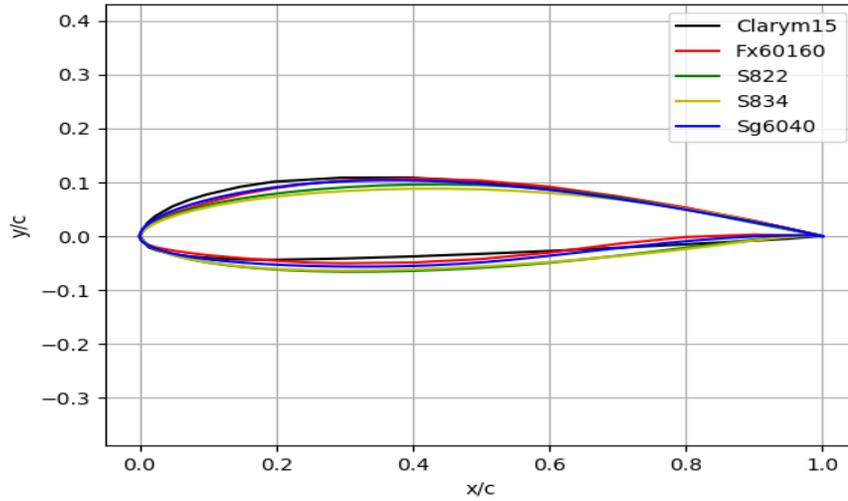


Figura 8.2: Perfiles considerados para la posición 1 (Autor)

Para la posición 2, se presentan los perfiles expuestos en la Figura 8.3, junto con sus características, evidenciadas en la Tabla 8.2.

Posición	Perfil	Espesor (%C)	A (%C)	Curvatura (%C)	A (%C)
2	E585	14.6	37.6	4.2	42.8
	Fx84w150	15	37.1	4.2	40.2

Tabla 8.2: Perfiles considerados para la posición 2

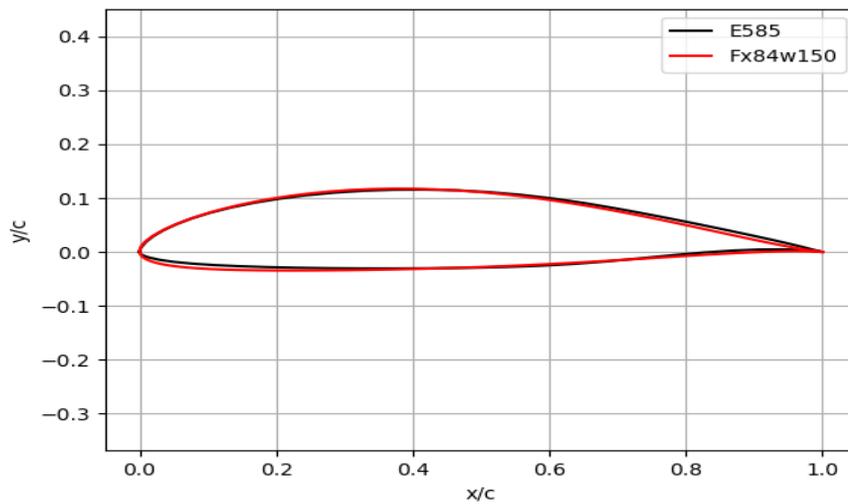


Figura 8.3: Perfiles considerados para la posición 2 (Autor)

Para la posición 3, se presentan los perfiles expuestos en la Figura 8.4, junto con sus características, evidenciadas en la Tabla 8.3.

Posición	Perfil	Espesor (%C)	A (%C)	Curvatura (%C)	A (%C)
3	E397	13.5	29.4	5.3	52.1
	Fx63137sm	13.7	30.9	5.8	56.5
	Goe430	13.4	29.5	4.8	49.6

Tabla 8.3: *Perfiles considerados para la posición 3*

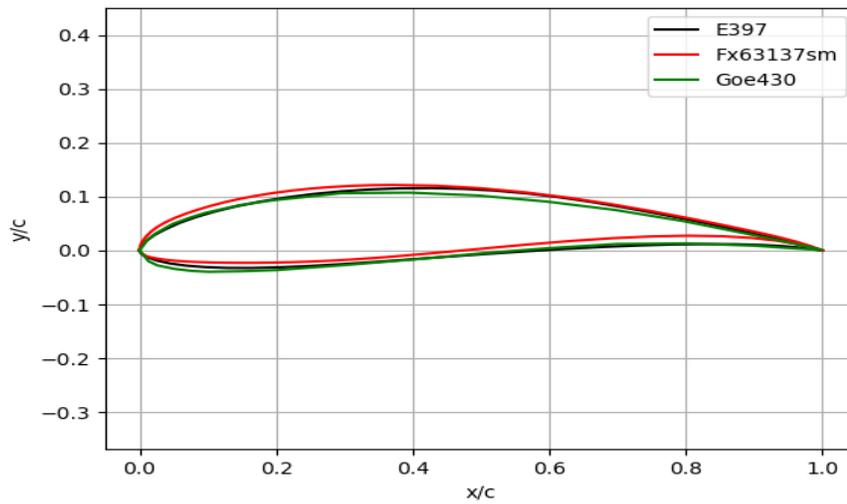


Figura 8.4: *Perfiles considerados para la posición 3 (Autor)*

Para la posición 4, se presentan los perfiles expuestos en la Figura 8.5, junto con sus características, evidenciadas en la Tabla 8.4.

Posición	Perfil	Espesor (%C)	A (%C)	Curvatura (%C)	A (%C)
4	Dae11	12.8	32.8	6.6	44.4
	Goe497	12.7	30	5.3	50
	Naca6412	12	30.1	6	39.6
	Stcyr24	12.4	30	5.9	40

Tabla 8.4: *Perfiles considerados para la posición 4*

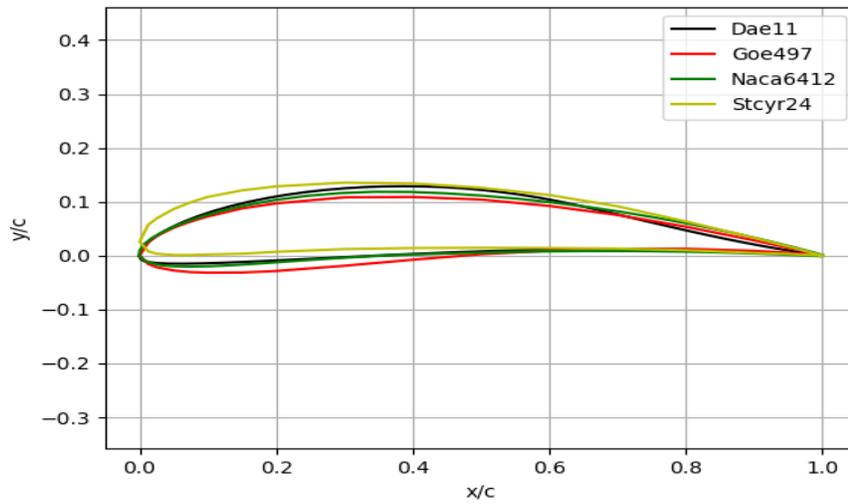


Figura 8.5: Perfiles considerados para la posición 4 (Autor)

Para la posición 5, se presentan los perfiles expuestos en la Figura 8.6, junto con sus características, evidenciadas en la Tabla 8.5.

Posición	Perfil	Espesor (%C)	A (%C)	Curvatura (%C)	A (%C)
5	Goe405	11.1	30	6.5	40
	Goe591	11.2	30	5.1	40
	Mh115	11.1	29.8	5.5	46

Tabla 8.5: Perfiles considerados para la posición 5

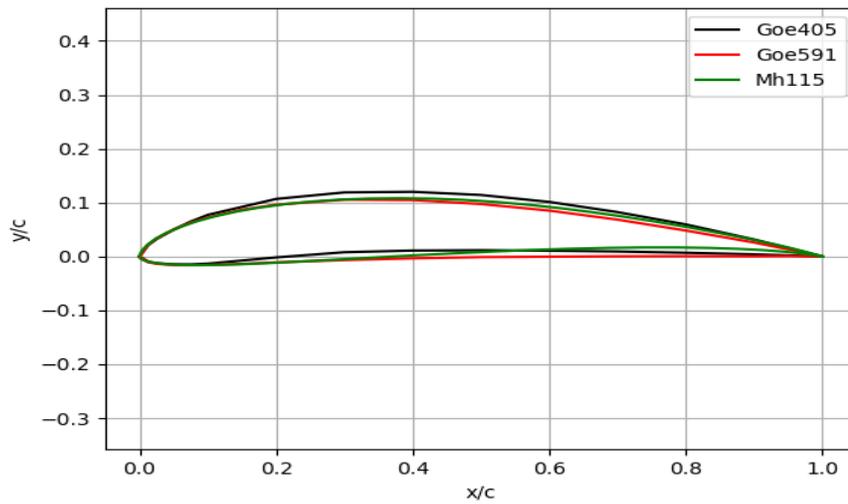


Figura 8.6: Perfiles considerados para la posición 5 (Autor)

Para la posición 6, se presentan los perfiles expuestos en la Figura 8.7, junto con sus características, evidenciadas en la Tabla 8.6.

Posición	Perfil	Espesor (%C)	A (%C)	Curvatura (%C)	A (%C)
6	E193	10.2	31	3	44.7
	E392	10.1	31.6	3.7	45.3
	S7055	10.5	31.8	3.3	38.6
	Sg6043	10	32.1	5.1	53.3
	Fx60100sm	10	27.9	3.5	56.5

Tabla 8.6: *Perfiles considerados para la posición 6*

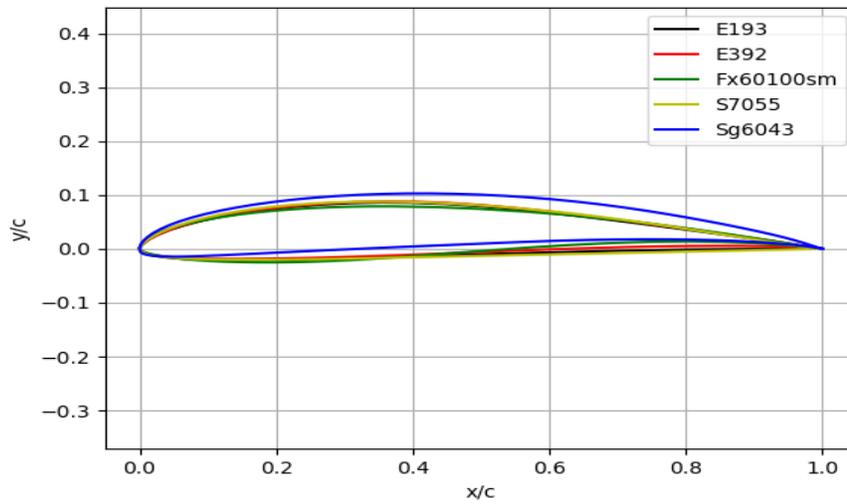


Figura 8.7: *Perfiles considerados para la posición 6 (Autor)*

Para la posición 7, se presentan los perfiles expuestos en la Figura 8.8, junto con sus características, evidenciadas en la Tabla 8.7.

Posición	Perfil	Espesor (%C)	A (%C)	Curvatura (%C)	A (%C)
7	Dae51	9.4	30.7	4	46.4
	Goe602m	9.6	30	3.8	50
	Mh116	9.9	32.4	4.1	46.4
	S3025	9.4	30.9	3	44.9
	S4061	9.6	30.9	3.3	44.7

Tabla 8.7: *Perfiles considerados para la posición 7*

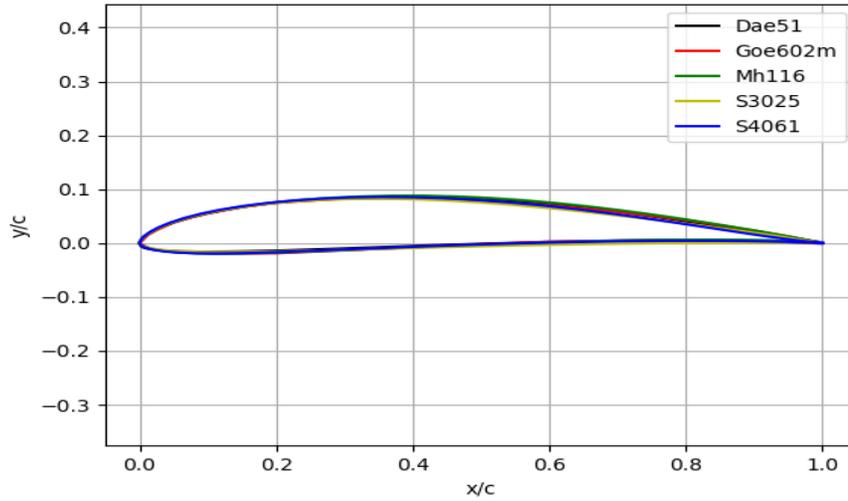


Figura 8.8: *Perfiles considerados para la posición 7 (Autor)*

Para la posición 8, se presentan los perfiles expuestos en la Figura 8.9, junto con sus características, evidenciadas en la Tabla 8.8.

Posición	Perfil	Espesor (%C)	A (%C)	Curvatura (%C)	A (%C)
8	Ag24	8.4	26	2.2	46.9
	Goe565	8.4	30	2.8	50
	Mh32	8.7	30.2	2.3	45.7

Tabla 8.8: *Perfiles considerados para la posición 8*

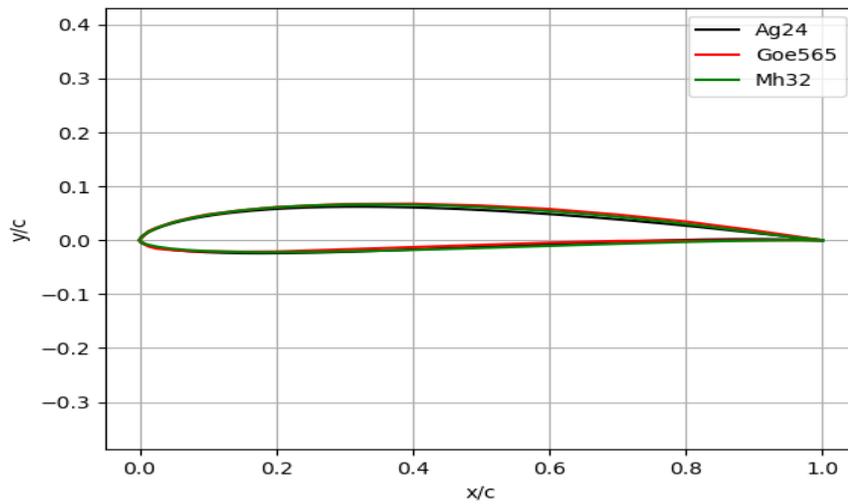


Figura 8.9: *Perfiles considerados para la posición 8 (Autor)*

Para la posición 9, se presentan los perfiles expuestos en la Figura 8.10, junto con sus características, evidenciadas en la Tabla 8.9.

Posición	Perfil	Espesor (%C)	A (%C)	Curvatura (%C)	A (%C)
9	A18	7.3	30	3.9	45
	Cr001sm	7.3	27.1	4.1	45.4
	Goe371	7	29.9	4.6	39.9
	Sa7024	7	25.9	3.3	43.3

Tabla 8.9: Perfiles considerados para la posición 9

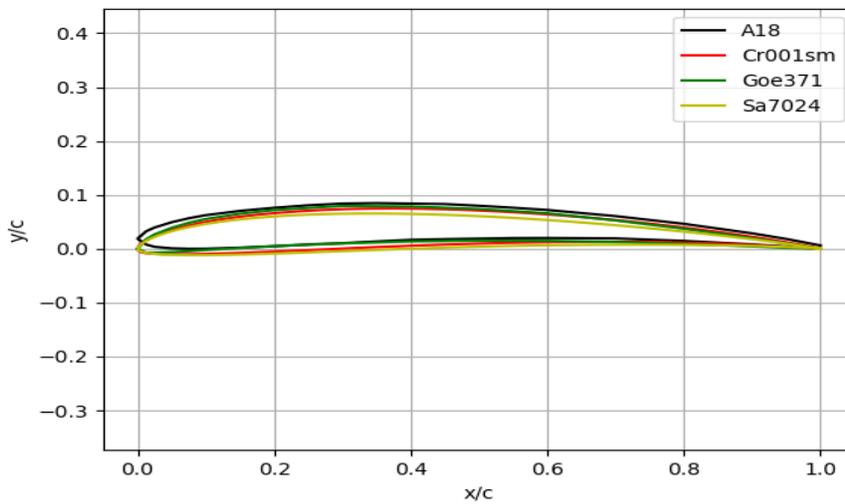


Figura 8.10: Perfiles considerados para la posición 9 (Autor)

Para la posición 10, se presentan los perfiles expuestos en la Figura 8.11, junto con sus características, evidenciadas en la Tabla 8.10.

Posición	Perfil	Espesor (%C)	A (%C)	Curvatura (%C)	A (%C)
10	Goe377	6.5	30	3.9	40
	Goe399	6.9	29.9	4.2	39.9
	Usa5	6.4	30	4.5	40
	Usa41	6.6	30	4.5	40

Tabla 8.10: Perfiles considerados para la posición 10

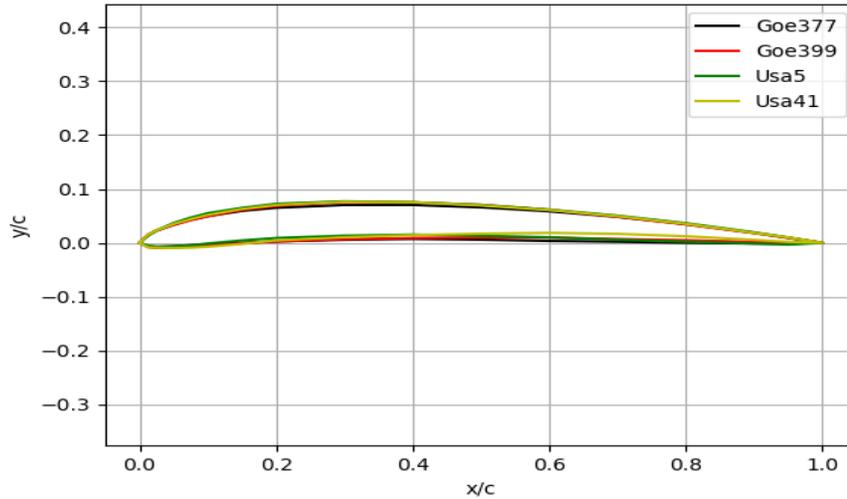


Figura 8.11: Perfiles considerados para la posición 10 (Autor)

8.2. Preselección de los perfiles

La elección del perfil aerodinámico para hélices de aerogeneradores se inicia seleccionando aquellos que poseen un elevado coeficiente de sustentación, y simultáneamente un bajo coeficiente de resistencia. Esto normalmente se obtiene tomando aquellos perfiles que poseen altos valores de la relación sustentación sobre resistencia, C_l/C_d y luego, se deberá considerar otras propiedades relacionadas con la forma en que C_l y C_d varían con el ángulo de ataque. Para las turbinas eólicas se sugieren aquellos perfiles en los cuales el coeficiente C_l alcanza su valor máximo en forma suave, evitando los que tienen picos agudos de C_l en función de α , en los cuales la abrupta caída de la sustentación puede producir fuertes vibraciones. Las exigencias para lograr coeficientes aerodinámicos óptimos conducen a perfiles muy delgados pero como éstos por lo general no son lo suficientemente resistentes como para soportar los considerables esfuerzos a que serán sometidos, se deberá realizar un compromiso entre la aerodinámica y la resistencia estructural (Bastianon, 2008).

Perfil	Reynolds	$\alpha(^{\circ})$	C_l/C_d	C_l	C_d
S822	50000	10	26.041	0.965	0.0370
	100000	9	38.983	0.913	0.0234
S834	50000	10	24.090	0.970	0.0402
	100000	7	46.652	0.904	0.0193
SG6040	50000	11	9.079	0.806	0.0887
	100000	9	50.033	1.193	0.0238

Tabla 8.11: Perfiles preseleccionados para la posición 1

Para la posición 1, la Tabla 8.11 muestra los perfiles preseleccionados para esta posición,

además de sus características a diferente número de Reynolds. En la Figura 8.12 se compara la relación de sustentación C_l/C_d . Se observa que el perfil con mejor comportamiento de C_l/C_D es el perfil S822 para ambos Reynolds.

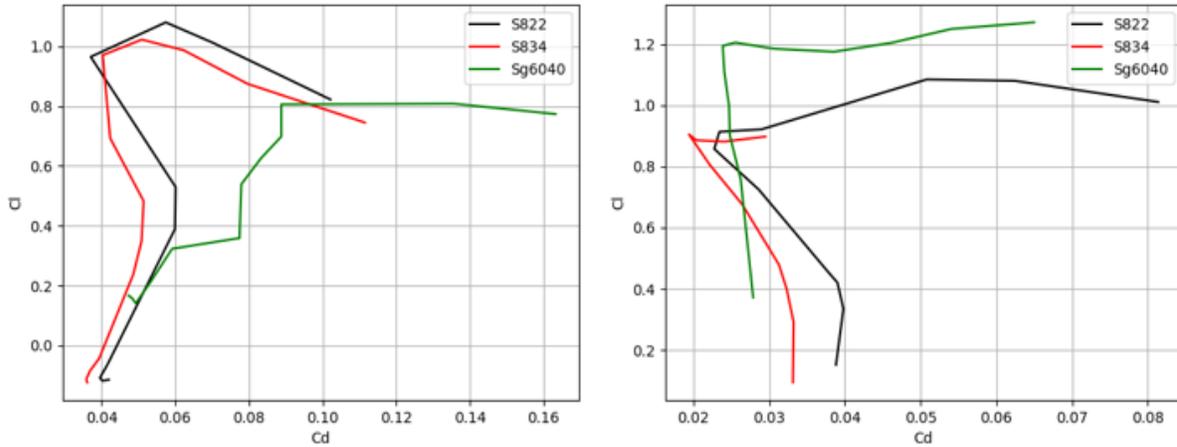


Figura 8.12: Comportamiento de la relación de sustentación con $Re = 5e4$ y $Re = 1e5$ respectivamente, para los perfiles preseleccionados en la posición 1 (Autor)

En la Figura 8.13 se relaciona el comportamiento del coeficiente de sustentación C_l , se observa que el perfil S822 presenta un comportamiento más estable.

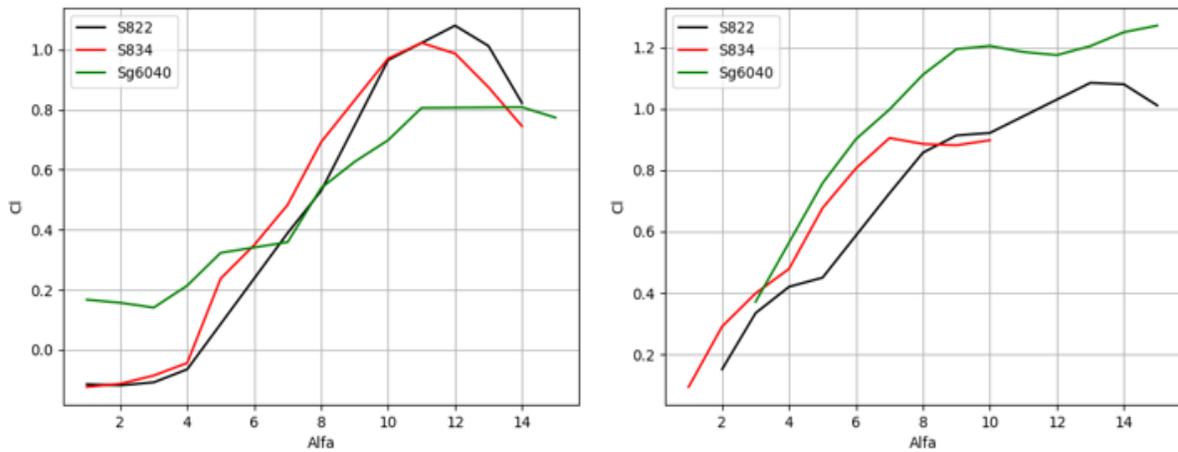


Figura 8.13: Comportamiento del coeficiente de sustentación con $Re = 5e4$ y $Re = 1e5$ respectivamente, para los perfiles preseleccionados en la posición 1 (Autor)

La Figura 8.14 se relaciona el comportamiento del coeficiente de arrastre C_d , se puede observar que los perfiles S822 y S834 tienen un comportamiento similar.

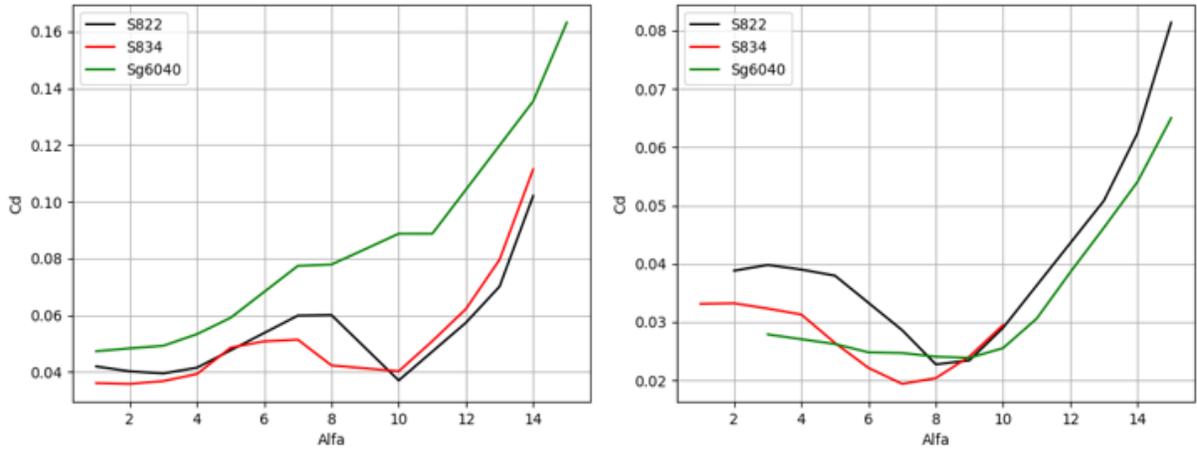


Figura 8.14: Comportamiento del coeficiente de arrastre con $Re = 5e4$ y $Re = 1e5$ respectivamente, para los perfiles preseleccionados en la posición 1 (Autor)

Para la posición 3, la Tabla 8.12 muestra el perfil preseleccionado para esta posición, además de sus características a diferente número de Reynolds. En la Figura 8.15 se muestra el comportamiento de la relación de sustentación C_l/C_d , en esta se observa que es estable hasta un $\alpha = 10$, de ahí en adelante se desestabiliza.

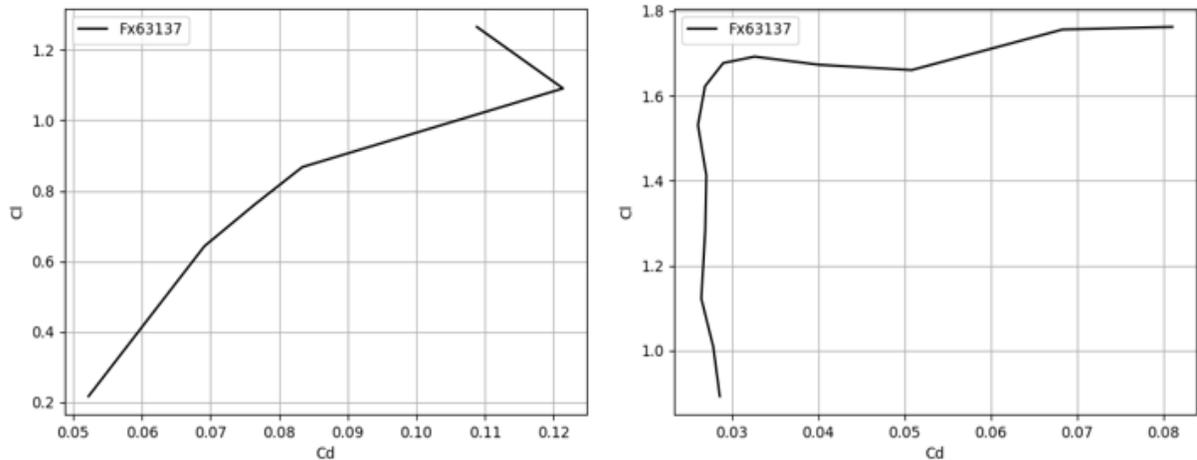


Figura 8.15: Comportamiento de la relación de sustentación con $Re = 5e4$ y $Re = 1e5$ respectivamente, para los perfiles preseleccionados en la posición 3 (Autor)

En la Figura 8.16 se muestra el comportamiento del coeficiente de sustentación C_l a diferentes números de Reynolds. Aquí vemos que efectivamente a partir de $\alpha = 10$ entra en pérdida. La variación en el eje para los valores que toma α se debe a que a partir de $\alpha = 10$ con ese Re no converge.

Perfil	Reynolds	$\alpha(^{\circ})$	C_l/C_d	C_l	C_d
Fx63137sm	50000	11	11.6291	1.2656	0.10883
	100000	8	60.2674	1.6224	0.02692

Tabla 8.12: Perfiles preseleccionados para la posición 3

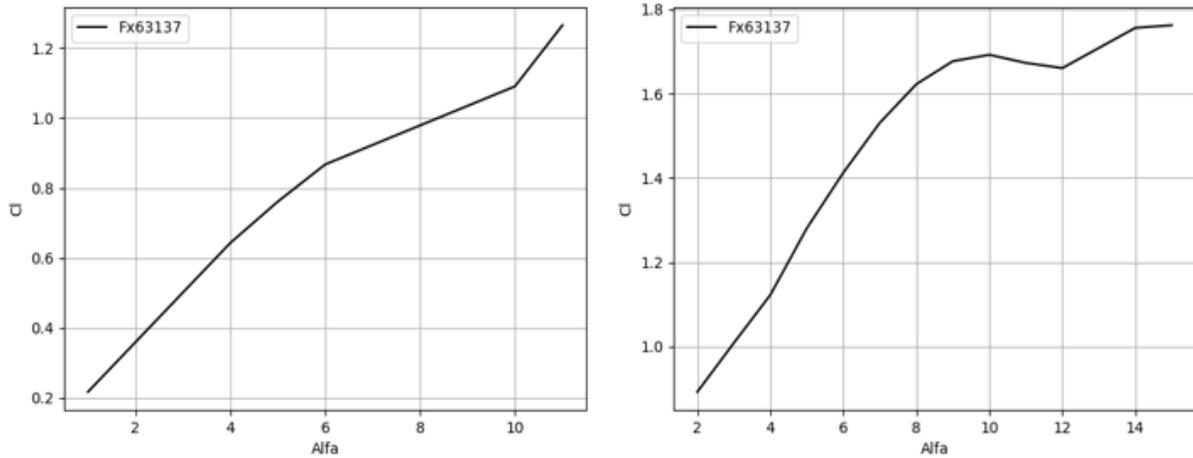


Figura 8.16: Comportamiento del coeficiente de sustentación con $Re = 5e4$ y $Re = 1e5$ respectivamente, para los perfiles preseleccionados en la posición 3 (Autor)

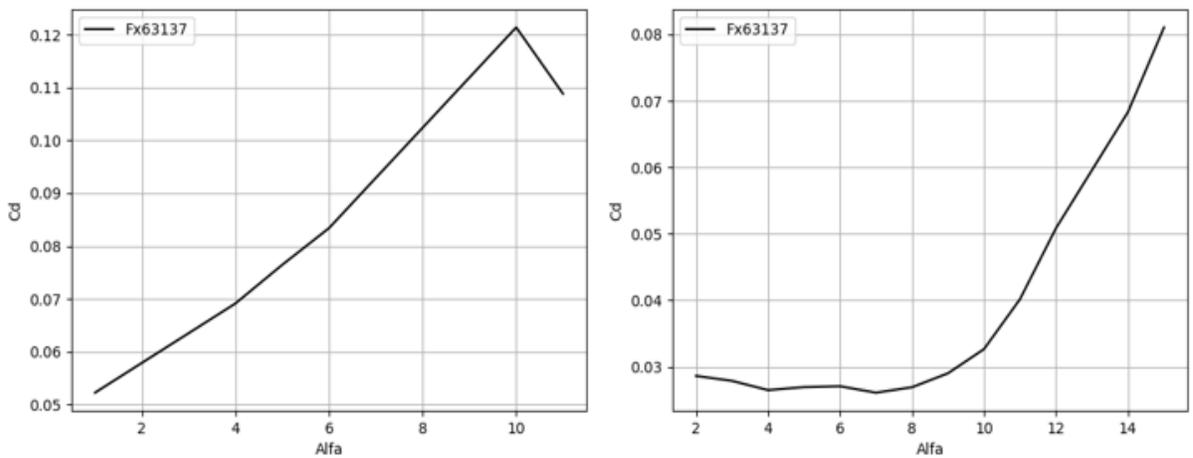


Figura 8.17: Comportamiento del coeficiente de arrastre con $Re = 5e4$ y $Re = 1e5$ respectivamente, para los perfiles preseleccionados en la posición 3 (Autor)

La Figura 8.17 se muestra el comportamiento del coeficiente de arrastre C_d . De igual forma se observa que a partir de $\alpha = 10$ se comporta inestable.

Para la posición 5, la Tabla 8.13 muestra el perfil preseleccionado para esta posición, además de sus características a diferente número de Reynolds. En la Figura 8.18 se observa el comportamiento de la relación de sustentación C_l/C_d . Se evidencia un aumento en esta relación hasta aproximadamente $\alpha = 12$, a partir de ahí se mantiene estable.

Perfil	Reynolds	$\alpha(^{\circ})$	C_l/C_d	C_l	C_d
Mh115	50000	8	13.1747	1.008	0.07651
	100000	8	60.6785	1.4666	0.02417

Tabla 8.13: Perfiles preseleccionados para la posición 5

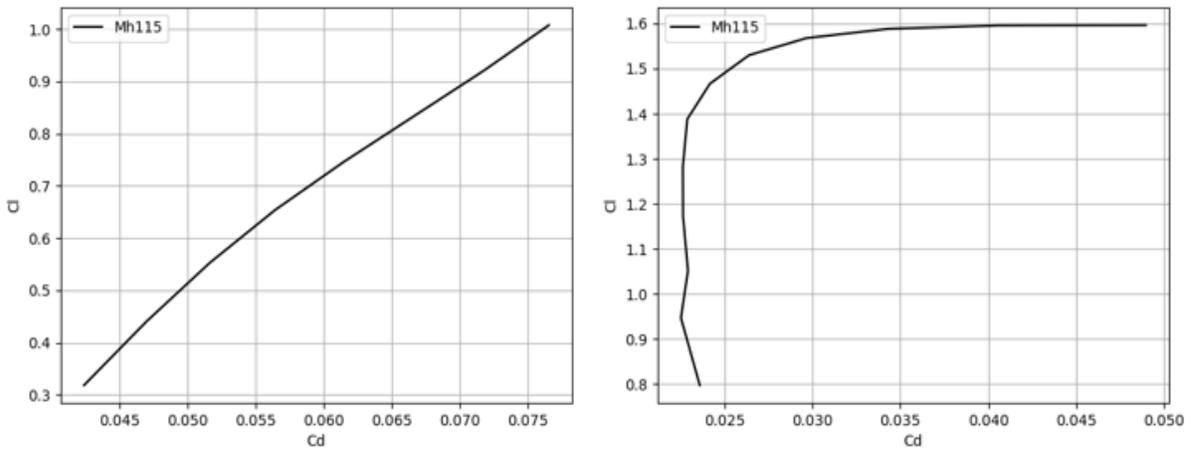


Figura 8.18: Comportamiento de la relación de sustentación con $Re = 5e4$ y $Re = 1e5$ respectivamente, para los perfiles preseleccionados en la posición 5 (Autor)

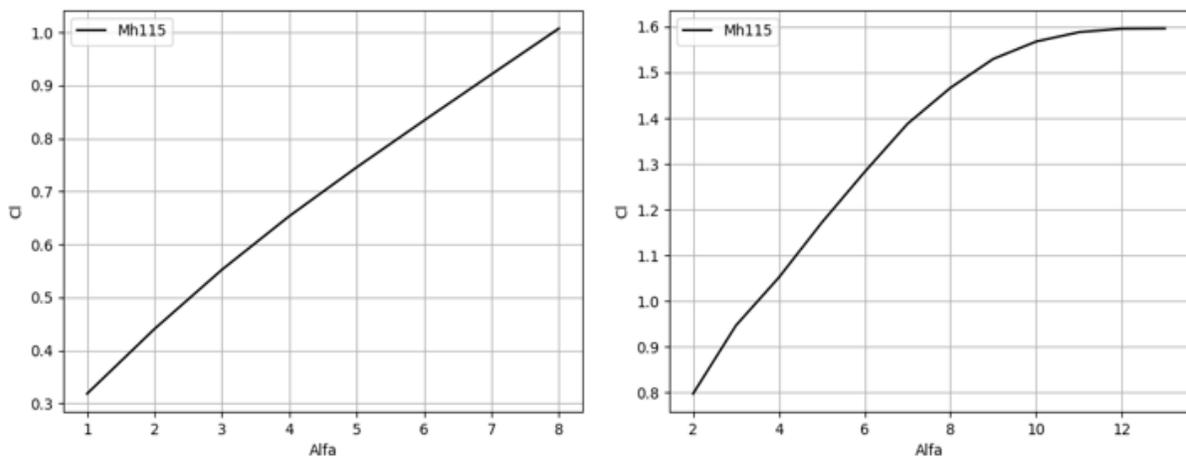


Figura 8.19: Comportamiento del coeficiente de sustentación con $Re = 5e4$ y $Re = 1e5$ respectivamente, para los perfiles preseleccionados en la posición 5 (Autor)

En la Figura 8.19 se muestra el comportamiento del coeficiente de sustentación C_l , aquí vemos que efectivamente a partir de $\alpha = 12$, es estable. La variación en el eje para los valores que toma α se debe a que a partir de $\alpha = 8$ con ese Re no converge.

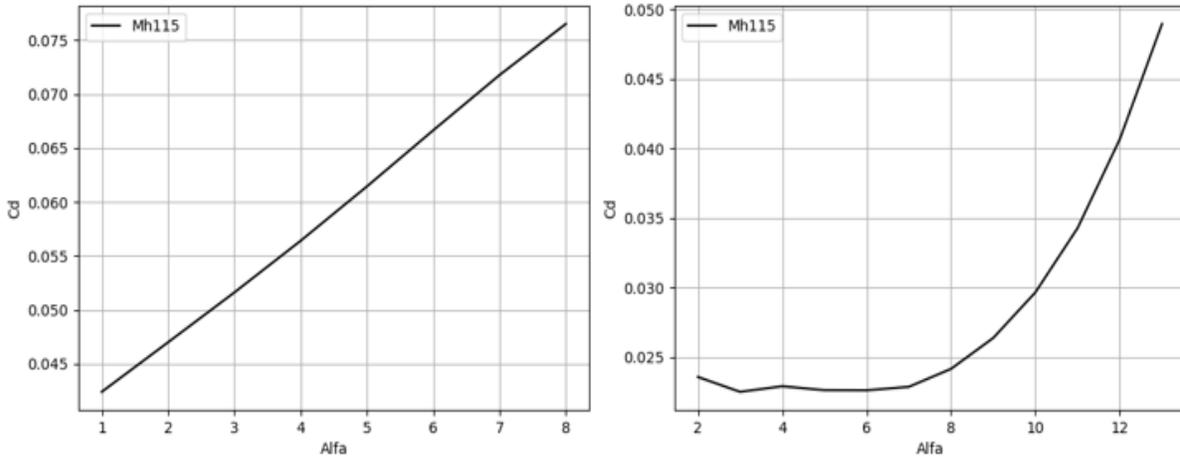


Figura 8.20: Comportamiento del coeficiente de arrastre con $Re = 5e4$ y $Re = 1e5$ respectivamente, para los perfiles preseleccionados en la posición 5 (Autor)

La Figura 8.20 muestra el comportamiento del coeficiente de arrastre C_d , aquí vemos que disminuye a medida que Reynolds aumenta.

Para la posición 7, la Tabla 8.14 muestra los perfiles preseleccionados para esta posición, además de sus características a diferente número de Reynolds. En la Figura 8.21 se compara la relación de sustentación C_l/C_d , en esta se observa que el perfil S4061 presenta un comportamiento más estable ante la variación del número de Reynolds Re y el ángulo de ataque α .

Perfil	Reynolds	$\alpha(^{\circ})$	C_l/C_d	C_l	C_d
Mh116	50000	8	37.2520	1.2092	0.0324
	100000	7	62.4540	1.1885	0.01903
S3025	50000	8	33.0168	1.1579	0.0350
	100000	7	56.6939	1.1078	0.01954
S4061	50000	9	34.9986	1.268	0.0362
	100000	7	58.9721	1.1417	0.01936

Tabla 8.14: Perfiles preseleccionados para la posición 7

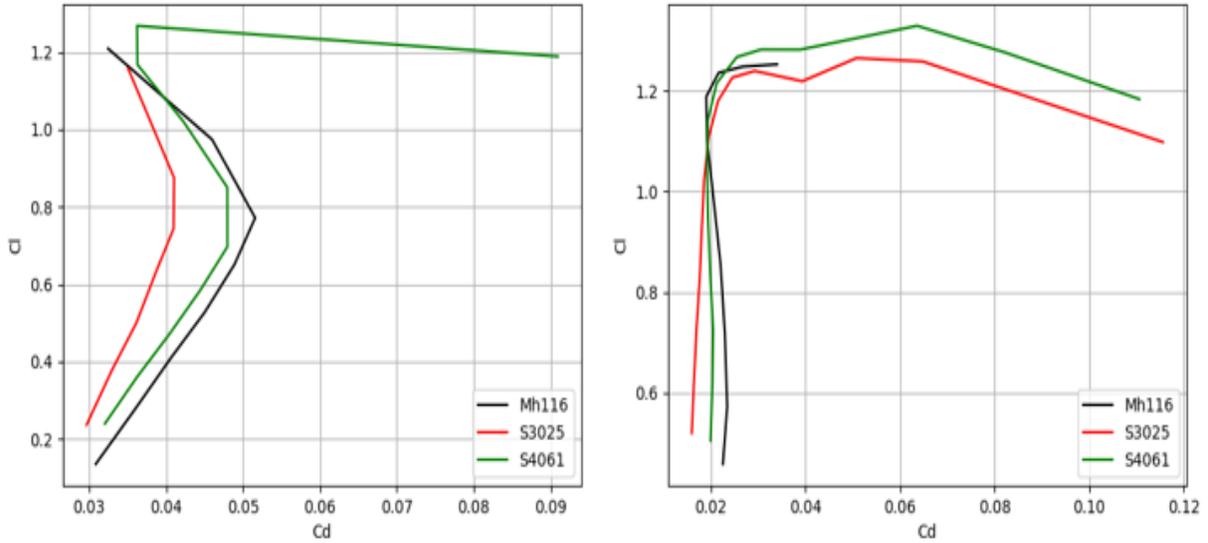


Figura 8.21: Comportamiento de la relación de sustentación con $Re = 5e4$ y $Re = 1e5$ respectivamente, para los perfiles preseleccionados en la posición 7 (Autor)

En la Figura 8.22 se relaciona el comportamiento del coeficiente de sustentación C_l , vemos que a partir de $\alpha = 9$ aproximadamente, entran en pérdida los tres.

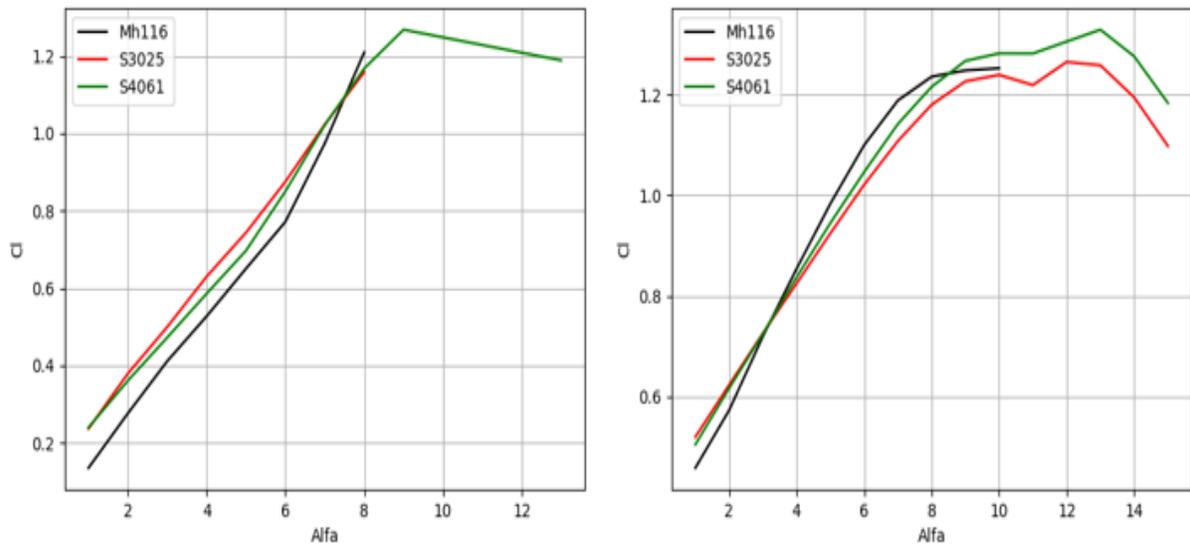


Figura 8.22: Comportamiento del coeficiente de sustentación con $Re = 5e4$ y $Re = 1e5$ respectivamente, para los perfiles preseleccionados en la posición 7 (Autor)

La Figura 8.23 se relaciona el comportamiento del coeficiente de arrastre C_d , aquí se puede ver que a medida que aumenta el número de Reynolds, el comportamiento va mejorando.

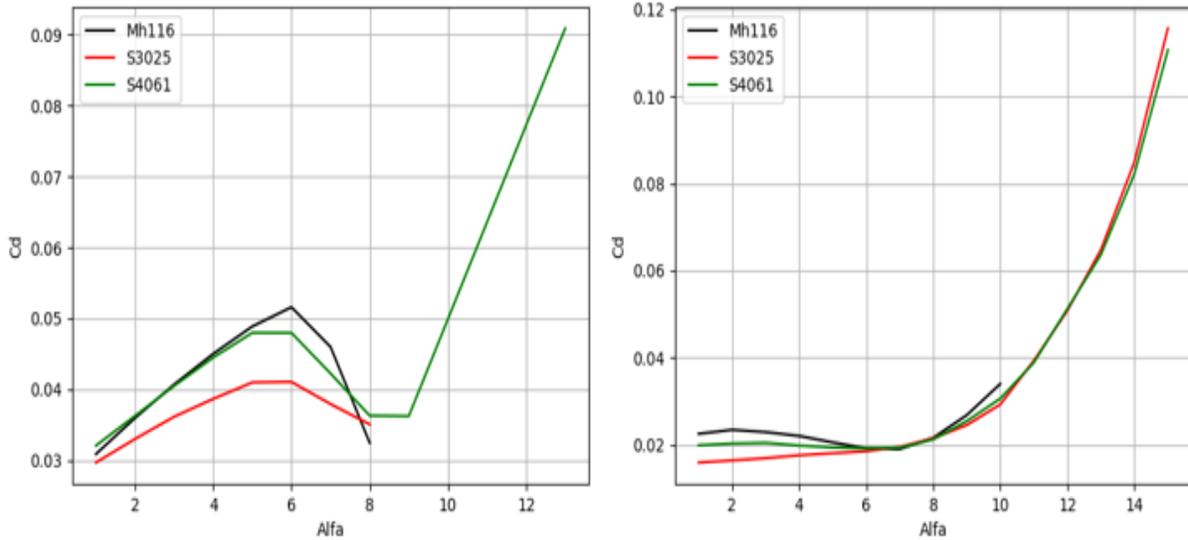


Figura 8.23: Comportamiento del coeficiente de arrastre con $Re = 5e4$ y $Re = 1e5$ respectivamente, para los perfiles preseleccionados en la posición 7 (Autor)

Para la posición 9, la Tabla 8.15 muestra los perfiles preseleccionados para esta posición, además de sus características a diferente número de Reynolds. En la Figura 8.24 se compara la relación de sustentación C_l/C_d , en la cual se puede observar que el perfil con mejor comportamiento es el CR001SM.

Perfil	Reynolds	$\alpha(^{\circ})$	C_l/C_d	C_l	C_d
A18	50000	5	42.6516	1.0825	0.0253
	100000	4	64.2261	1.0167	0.01583
Cr001sm	50000	7	40.6226	1.1679	0.0287
	100000	6	63.9559	1.1026	0.01724
Sa7024	50000	6	38.4122	1.006	0.0262
	100000	5	59.4212	0.924	0.0155

Tabla 8.15: Perfiles preseleccionados para la posición 9

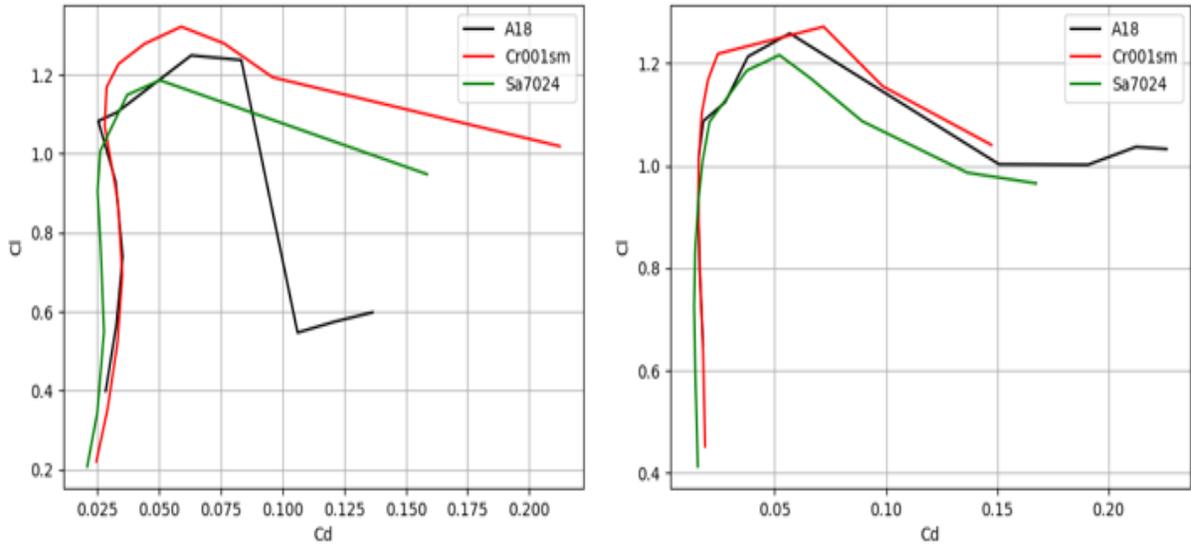


Figura 8.24: Comportamiento de la relación de sustentación con $Re = 5e4$ y $Re = 1e5$ respectivamente, para los perfiles preseleccionados en la posición 9 (Autor)

En la Figura 8.25 se relaciona el comportamiento del coeficiente de sustentación C_l , se observar que a partir de un $\alpha = 9$ los tres perfiles entran en pérdida.

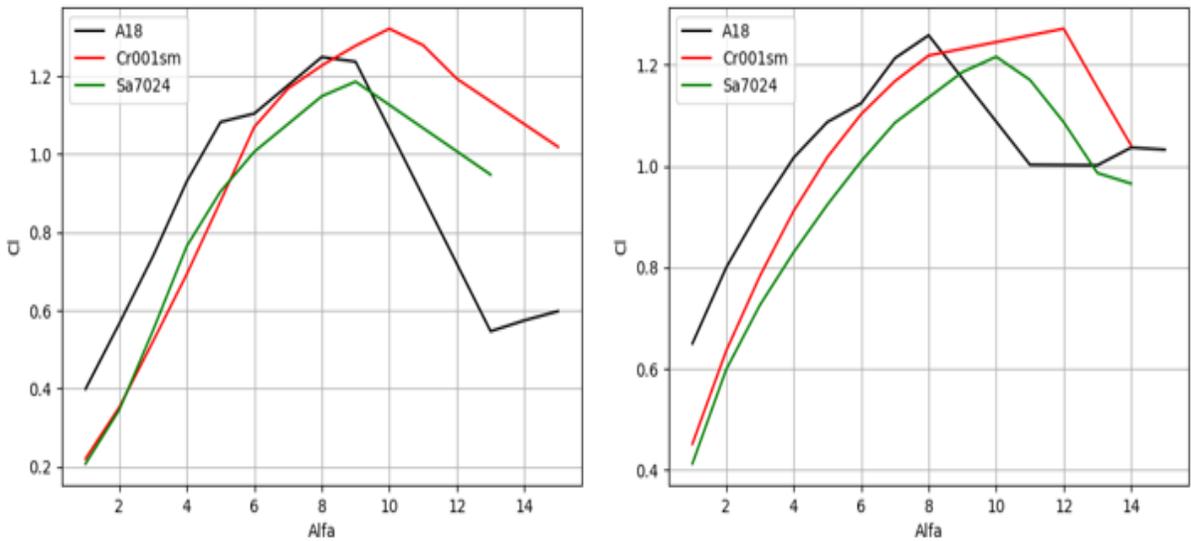


Figura 8.25: Comportamiento del coeficiente de sustentación con $Re = 5e4$ y $Re = 1e5$ respectivamente, para los perfiles preseleccionados en la posición 9 (Autor)

La Figura 8.26 se relaciona el comportamiento del coeficiente de arrastre C_d , de igual manera, se puede ver que el comportamiento mas estable lo presenta el perfil CR001SM.

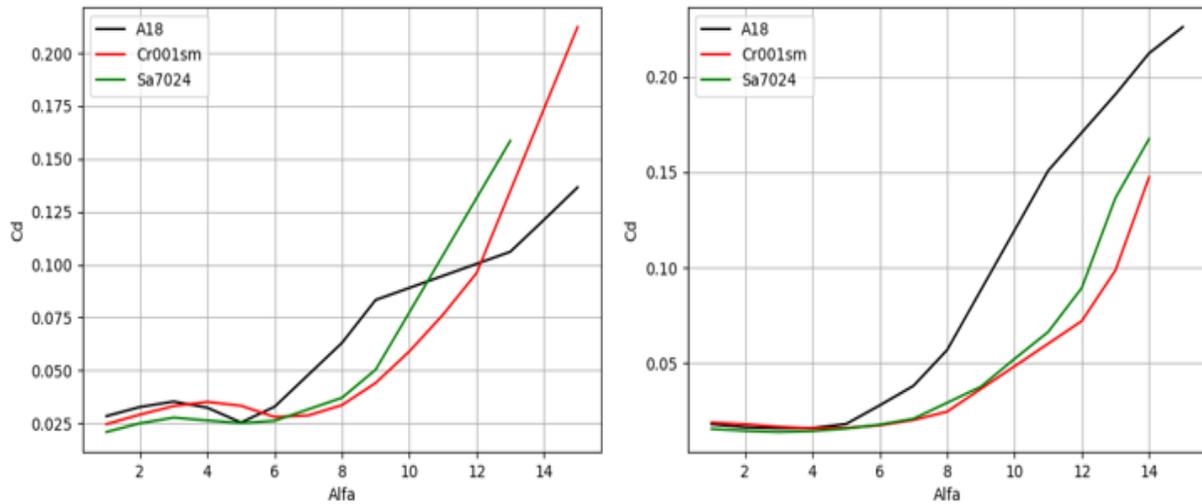


Figura 8.26: Comportamiento del coeficiente de arrastre con $Re = 5e4$ y $Re = 1e5$ respectivamente, para los perfiles preseleccionados en la posición 9 (Autor)

8.3. Selección de perfiles para cada posición

Según (Grasso, 2014), El objetivo principal del diseño de perfiles aerodinámicos es obtener perfiles con alta eficiencia aerodinámica C_l/C_d , sin embargo, además de esto, también se deben tener en cuenta otras consideraciones durante el desarrollo, esto, dado que las nuevas geometrías tienen que ser adecuadas para turbinas de clase de viento bajo, no solo C_l/C_d debe ser alto, sino que el coeficiente de elevación C_l debe ser alto para producir suficiente elevación en condiciones de poco viento.

Posición	Perfil	Espesor (%C)	$\alpha(^{\circ})$	C_l/C_d	C_l	C_d
1	SG6040	16	9	50.0335	1.1938	0.0238
2	S834	15	7	46.6529	0.9046	0.0193
3	FX63137	13.7	8	60.2674	1.6224	0.0269
4	NACA6412	12	8	52.3688	1.5873	0.0303
5	MH115	11.1	8	60.6785	1.4666	0.0241
6	SG6043	10	7	65.1299	1.3534	0.0207
7	S3025	9.4	7	56.6939	1.1078	0.0195
8	MH32	8.7	5	53.5405	0.8181	0.0152
9	SA7024	7	5	59.4212	0.9241	0.0155
10	A18	7.3	4	64.2261	1.0167	0.0158

Tabla 8.16: Perfiles seleccionados para cada posición

Todo esto, sin dejar de lado el problema de espesor, este mismo, explica que para turbinas de clase MW la variación del espesor puede oscilar por lo general entre el 18 %C y 40 %C, mientras que para turbinar de clase más baja, este puede oscilar entre 7 %C y 20 %C. Con base en esta

información, la Tabla 8.16 presenta los perfiles seleccionados para cada posición del álabes.

En la Figura 8.27 se presenta el comportamiento de la relación de sustentación en función del ángulo de ataque para los perfiles seleccionados, con $Re = 1e5$. Como se observa, aunque son diferentes los coeficientes de sustentación, estos presentan un comportamiento estable y similar, a su vez, se evidencia que los valores más altos de C_l/C_d se dan cuando el ángulo de ataque esta entre 4 y 8.

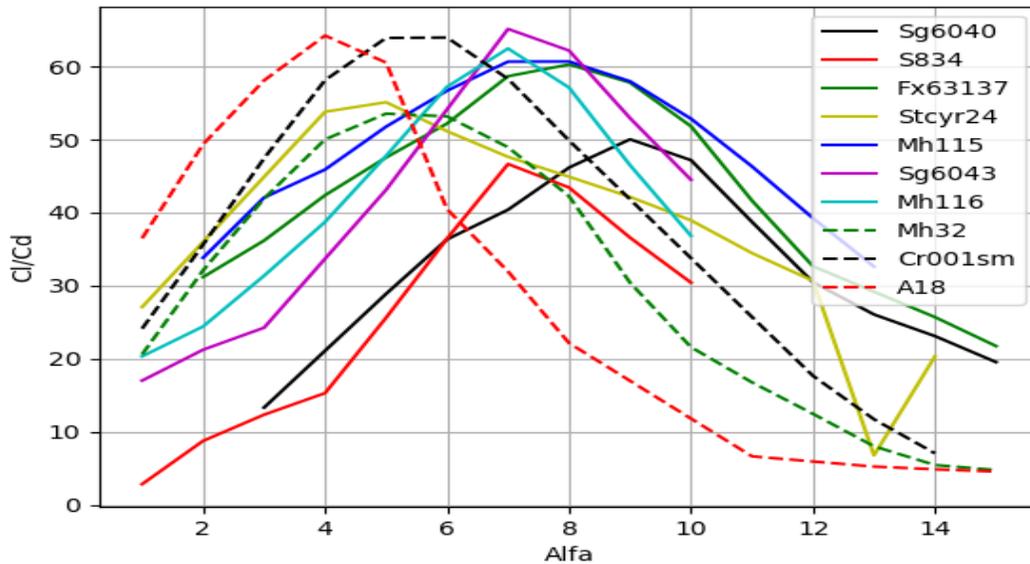


Figura 8.27: Relación de sustentación para los perfiles seleccionados, $Re = 1e5$ (Autor)

8.4. Optimización de forma geométrica para perfiles seleccionados como puntos de control

Ahora, se aplica la teoría planteada en el capítulo 5, al perfil base seleccionado en la sección anterior para todas las posiciones, con lo cual, se obtienen los resultados que muestra la Tabla 8.17 para la posición 1.

Perfil	$\alpha(^{\circ})$	C_l	C_d	C_m	C_l/C_d
Estándar	9	1.1938	0.02386	-0.0567	50.034
Óptimo	9	1.2001	0.02296	-0.059	52.217

Tabla 8.17: Resultados para la posición 1

Como se puede observar, aunque el ángulo se mantiene constante, la relación de sustentación aumento aproximadamente 2,5 puntos en relación con la anterior, de igual manera se obtiene una

disminución en el coeficiente de arrastre. En la Figura 8.28 se comparan los dos perfiles, tenga en cuenta que para una mejor visualización, se utilizó una escala 10:1 en el eje Y , esto quiere decir que 10 unidades en el eje Y representarían 1 unidad en el eje X .

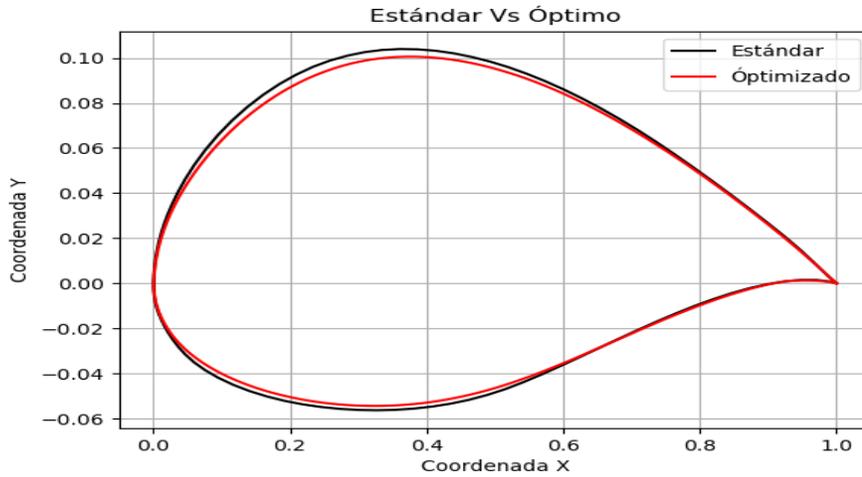


Figura 8.28: Comparación de perfiles para la posición 1 (Autor)

La Figura 8.29 muestra el comportamiento de los parámetros para tener en cuenta en la posición 1. Se puede observar que el comportamiento mejoró significativamente.

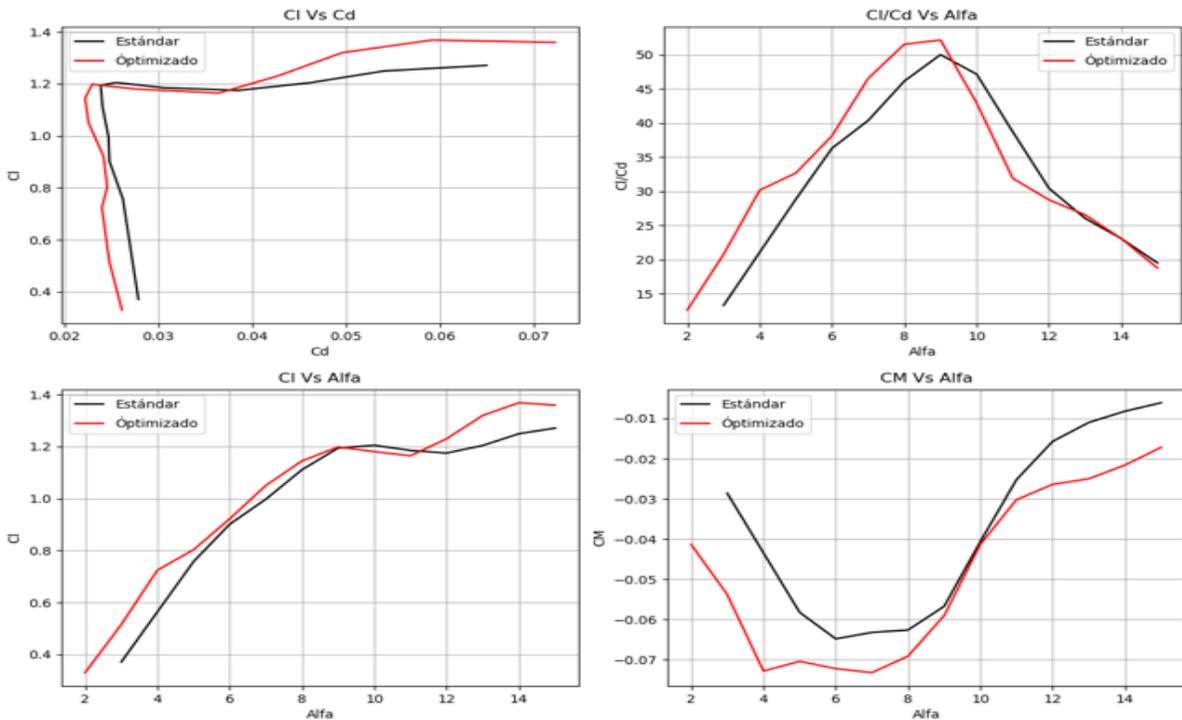


Figura 8.29: Comparación de perfiles para la posición 1 (Autor)

Para la posición 3, se obtienen los resultados que muestra la Tabla 8.18.

Perfil	$\alpha(^{\circ})$	C_l	C_d	C_m	C_l/C_d
Estándar	8	1.6224	0.02692	-0.1744	60.267
Óptimo	8	1.6211	0.02549	-0.1766	61.197

Tabla 8.18: Resultados para la posición 3

Como se puede observar, aunque el ángulo se mantiene constante, la relación de sustentación aumento aproximadamente 2 puntos en relación con la anterior, de igual manera se obtiene una disminución en el coeficiente de arrastre. En la Figura 8.31 se comparan los dos perfiles, tenga en cuenta que para una mejor visualización, se utilizo una escala 10:1 en el eje Y, esto quiere decir que 10 unidades en el eje Y representarían 1 unidad en el eje X.

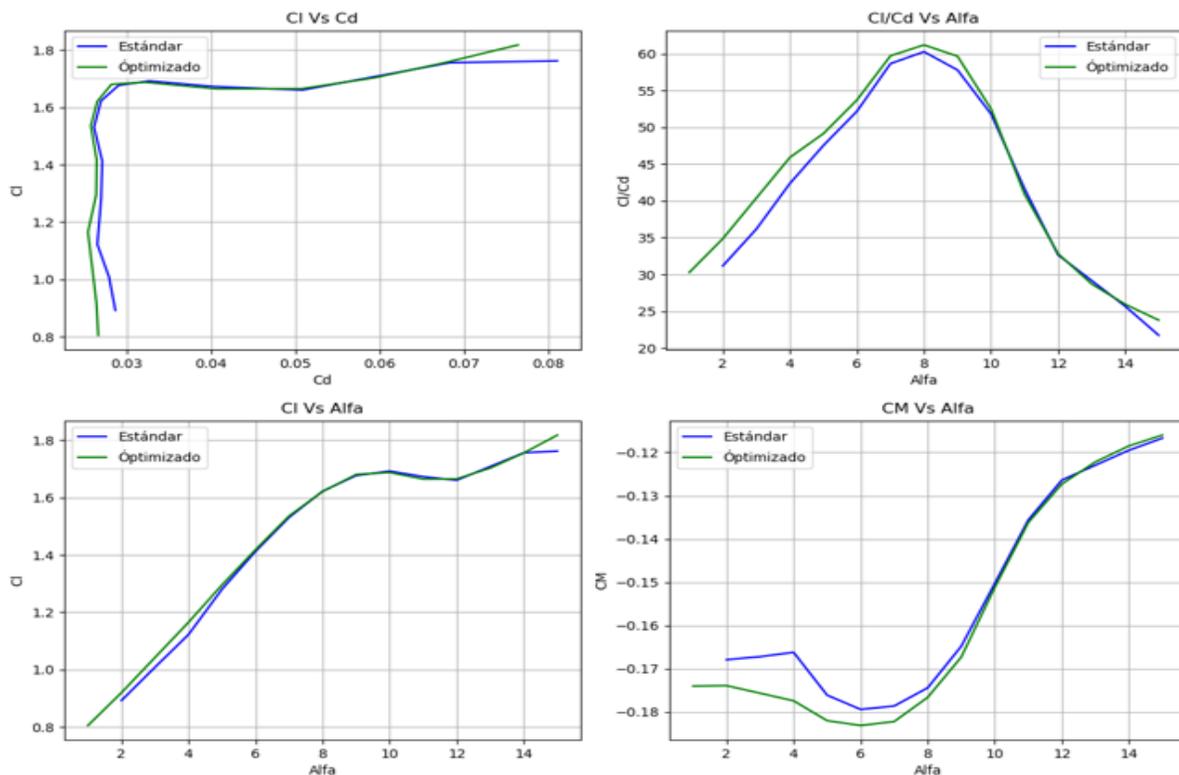


Figura 8.30: Comparación de perfiles para la posición 3 (Autor)

La Figura 8.30 muestra el comportamiento de los parámetros para tener en cuenta en la posición 3. Se debe tener en cuenta que en las posiciones más cercanas a la raíz, no solo se diseña buscando un óptimo en la relación de sustentación, en estas, debe existir una relación entre la sustentación y el espesor, puesto que, en estas posiciones son más relevantes las propiedades estructurales.

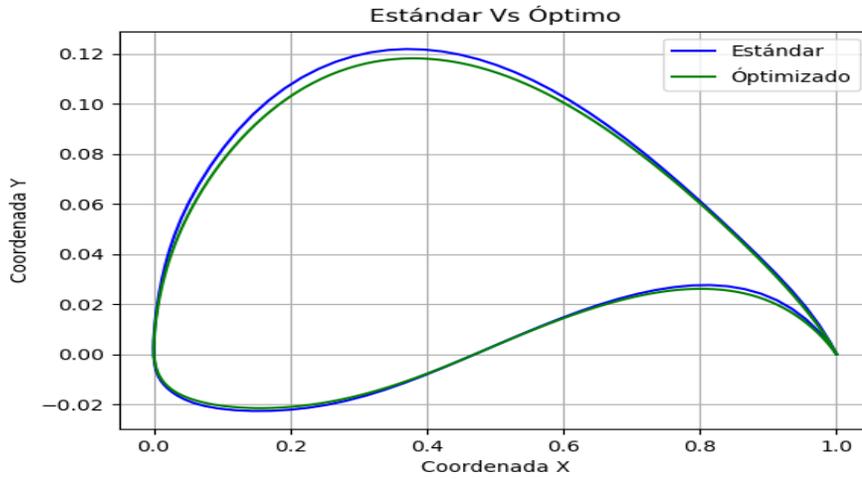


Figura 8.31: Comparación de perfiles para la posición 3 (Autor)

Para la posición 4, se obtienen los resultados que muestra la Tabla 8.19.

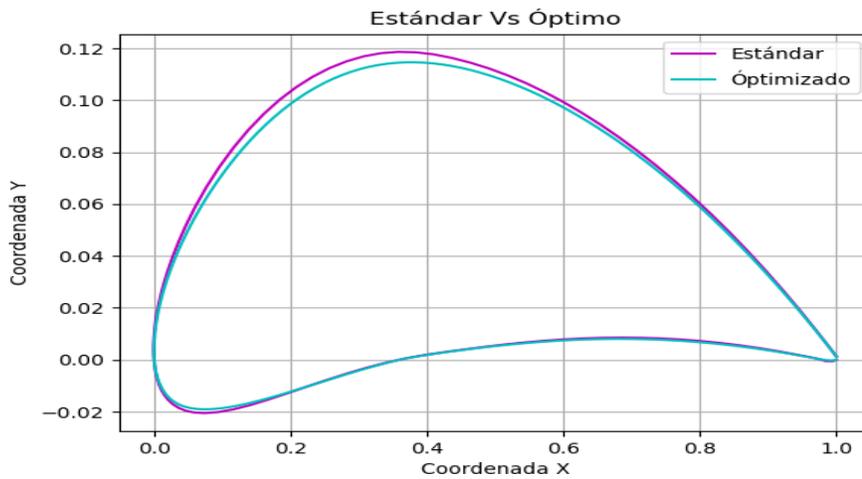


Figura 8.32: Comparación de perfiles para la posición 4 (Autor)

Perfil	$\alpha(^{\circ})$	C_l	C_d	C_m	C_l/C_d
Estándar	10	1.5873	0.03031	-0.1132	52.369
Óptimo	9	1.5013	0.02696	-0.1187	55.686

Tabla 8.19: Resultados para la posición 4

Como se puede observar, el ángulo en el cual se encuentra la mejor relación de sustentación inicia a variar, la relación de sustentación aumenta aproximadamente 3 puntos en relación con la anterior, se puede ver que aunque el coeficiente de sustentación disminuye el coeficiente de arrastre también lo hace. En la Figura 8.32 se comparan los dos perfiles, tenga en cuenta que

para una mejor visualización, se utilizó una escala 10:1 en el eje Y, esto quiere decir que 10 unidades en el eje Y representarían 1 unidad en el eje X. Mientras que, la Figura 8.33 muestra el comportamiento de los parámetros para tener en cuenta en la posición 4.

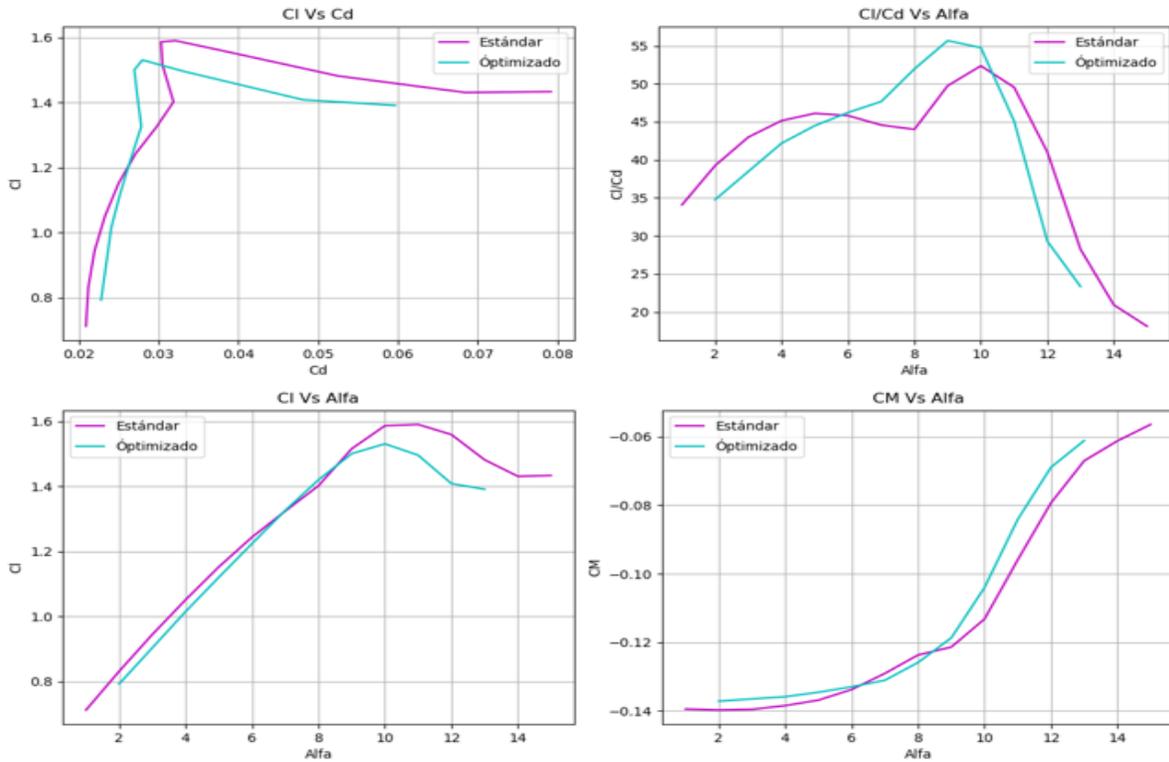


Figura 8.33: Comparación de perfiles para la posición 4 (Autor)

Para la posición 5, se obtienen los resultados que muestra la Tabla 8.20.

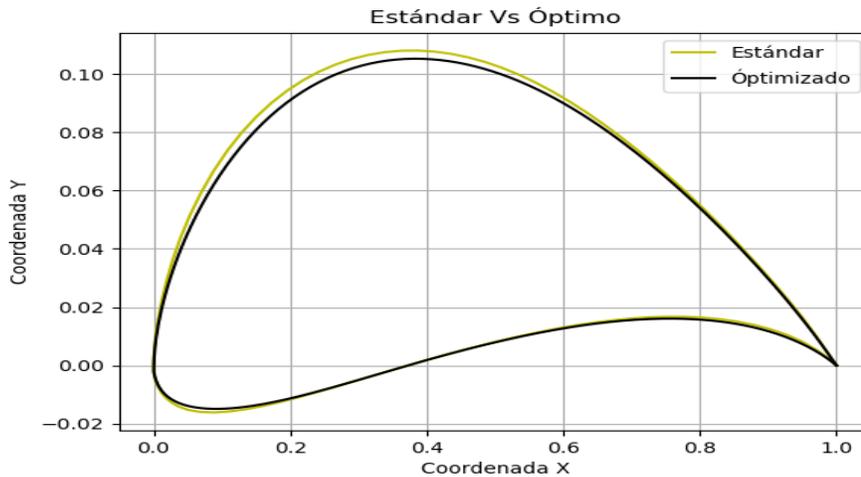


Figura 8.34: Comparación de perfiles para la posición 5 (Autor)

Perfil	$\alpha(^{\circ})$	C_l	C_d	C_m	C_l/C_d
Estándar	8	1.4666	0.02417	-0.1358	60.679
Óptimo	8	1.4648	0.02365	-0.1378	61.937

Tabla 8.20: Resultados para la posición 5

Como se puede observar, la relación de sustentación aumenta aproximadamente 1,5 puntos en relación con la anterior, se puede ver que el coeficiente de arrastre disminuye respecto al anterior. En la Figura 8.34 se comparan los dos perfiles, tenga en cuenta que para una mejor visualización, se utilizo una escala 10:1 en el eje Y, esto quiere decir que 10 unidades en el eje Y representarían 1 unidad en el eje X. Mientras que, la Figura 8.35 muestra el comportamiento de los parámetros para tener en cuenta en la posición 5.

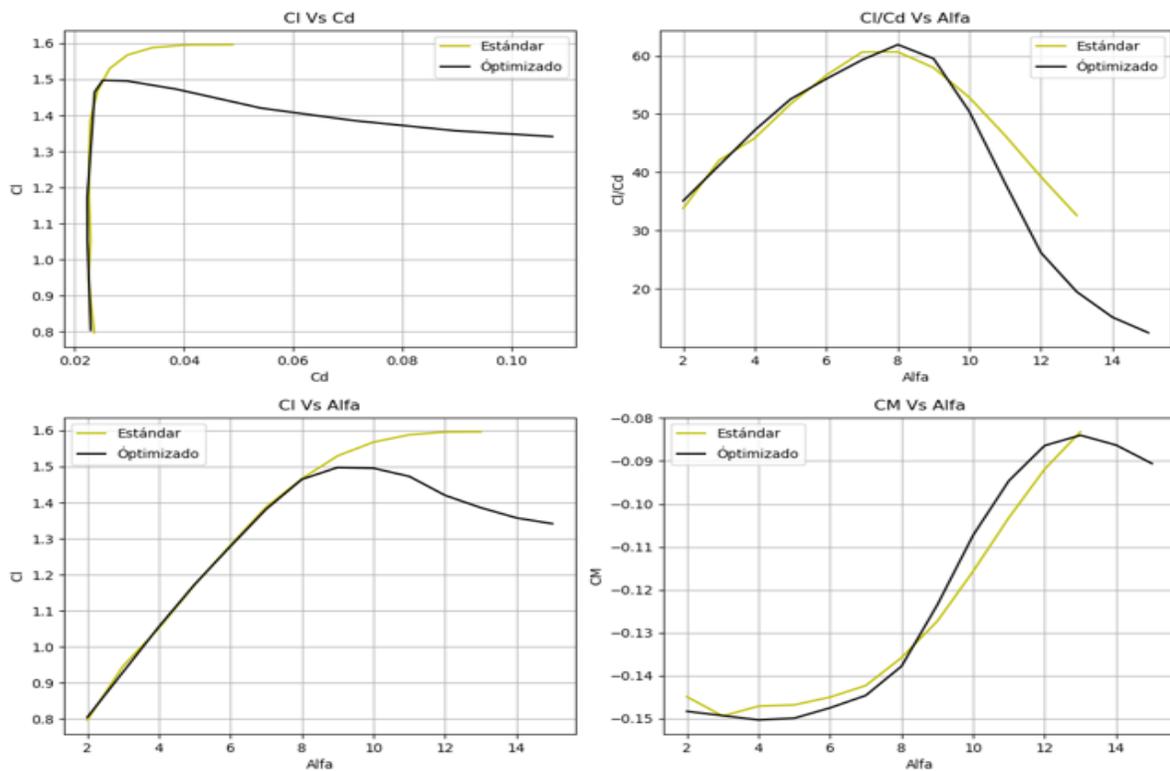


Figura 8.35: Comparación de perfiles para la posición 5 (Autor)

Para la posición 7, se obtienen los resultados que muestra la Tabla 8.21.

Perfil	$\alpha(^{\circ})$	C_l	C_d	C_m	C_l/C_d
Estándar	7	1.1078	0.01954	-0.067	56.694
Óptimo	7	1.1109	0.01944	-0.0702	57.145

Tabla 8.21: Resultados para la posición 7

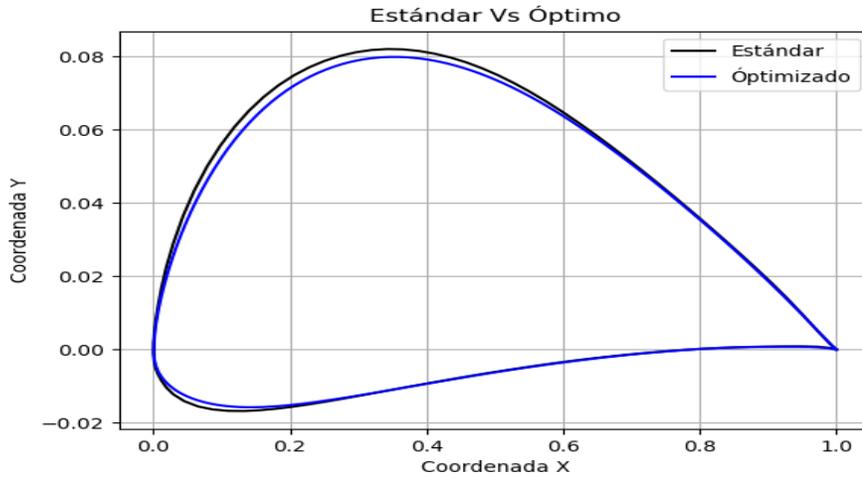


Figura 8.36: Comparación de perfiles para la posición 7 (Autor)

Como se puede observar, el ángulo se mantiene constante, la relación de sustentación aumenta aproximadamente 1 punto en relación con la anterior. En la Figura 8.36 se comparan los dos perfiles, tenga en cuenta que para una mejor visualización, se utilizó una escala 10:1 en el eje Y , esto quiere decir que 10 unidades en el eje Y representarían 1 unidad en el eje X . Por otra parte, la Figura 8.37 muestra el comportamiento de los parámetros para tener en cuenta en la posición 7.

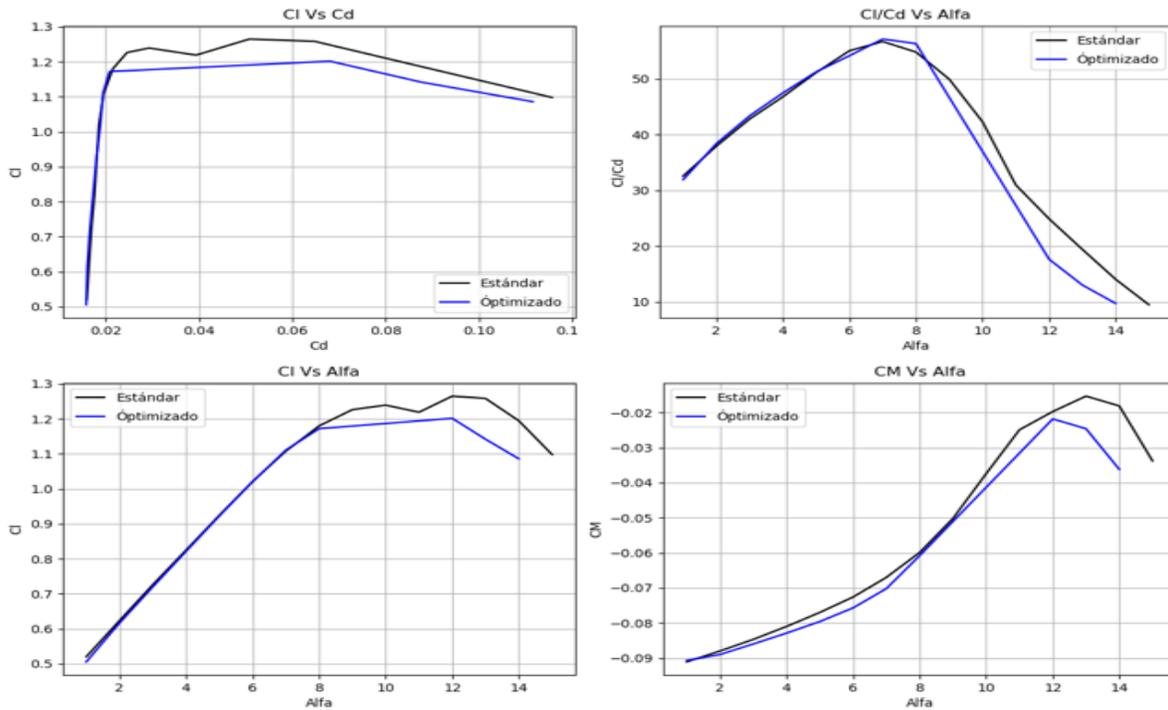


Figura 8.37: Comparación de perfiles para la posición 7 (Autor)

De igual forma se repite este procedimiento en cada posición. La Tabla 8.22 presenta los nuevos perfiles para cada posición.

Posición	$r(m)$	Perfil	$\alpha(^{\circ})$	C_i/C_d	C_i	C_d
1	0.080	A1	9	52.217	1.2001	0.02296
2	0.154	A2	9	52.217	1.2001	0.02296
3	0.228	A3	8	61.197	1.6211	0.02549
4	0.302	A4	9	55.686	1.5013	0.02696
5	0.376	A5	8	61.937	1.4648	0.02365
6	0.450	A6	8	61.937	1.4648	0.02365
7	0.524	A7	7	57.145	1.1109	0.01944
8	0.598	A8	6	54.603	0.9004	0.01649
9	0.672	A9	4	59.419	0.8182	0.01377
10	0.750	A10	4	64.458	0.9862	0.01531

Tabla 8.22: Perfiles tratados para cada posición

8.5. Aplicación de la teoría BEM

La Tabla 8.23 presenta los datos necesarios para iniciar con la aplicación de la teoría.

Radio, $R(m)$	Relación de velocidades, λ	Velocidad, $V(m/s)$	Número de álabes, N
0.75	7	5	3

Tabla 8.23: Datos de inicio

Aplicando la fundamentación matemática presentada en el Capítulo 4, se obtuvieron los valores para la cuerda C y el ángulo de giro φ , en cada posición. La Tabla 8.24 muestra los datos obtenidos para la distribución utilizada.

Posición	Radio, $r(m)$	Cuerda, C	Ángulo de giro, $\varphi(g)$
1	0.08	0.1038	35.5016
2	0.15	0.0869	23.1668
3	0.23	0.0500	16.7228
4	0.30	0.0432	12.9694
5	0.38	0.0386	10.5560
6	0.45	0.0380	8.88602
7	0.53	0.0366	7.66606
8	0.60	0.0355	6.73756
9	0.68	0.0310	6.00801
10	0.75	0.0285	5.42006

Tabla 8.24: Valores para la cuerda y el ángulo de giro según la posición

Analizando los resultados expuestos en la Tabla 8.24, se evidencia que los valores obtenidos para cada sección, cumplen con uno de los criterios de diseño para álabes, el cual es, que a medida que el radio r_L aumenta, la cuerda C y el ángulo de giro φ disminuyen sucesivamente (E.L.Houghton et al., 2001). La Figura 8.38 muestra la curva de comportamiento de φ para cada posición, a su vez, la Figura 8.39 presenta el comportamiento de la cuerda para cada posición.

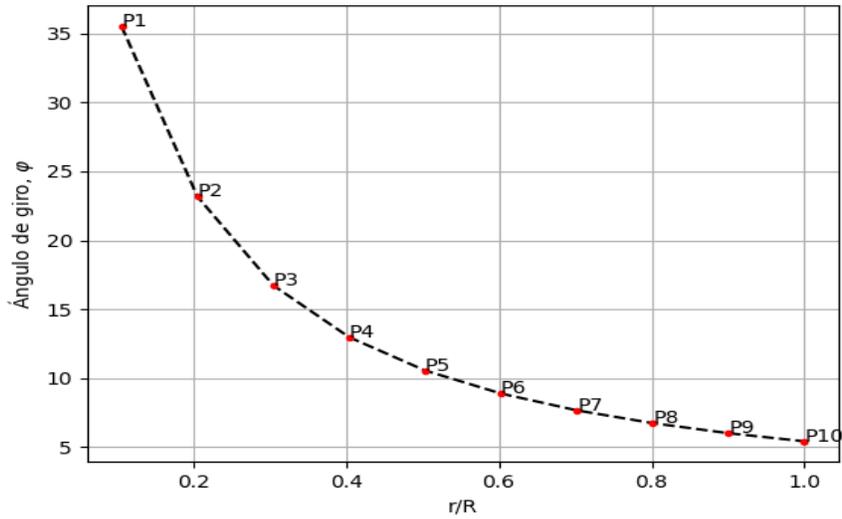


Figura 8.38: Comportamiento del ángulo de giro (Autor)

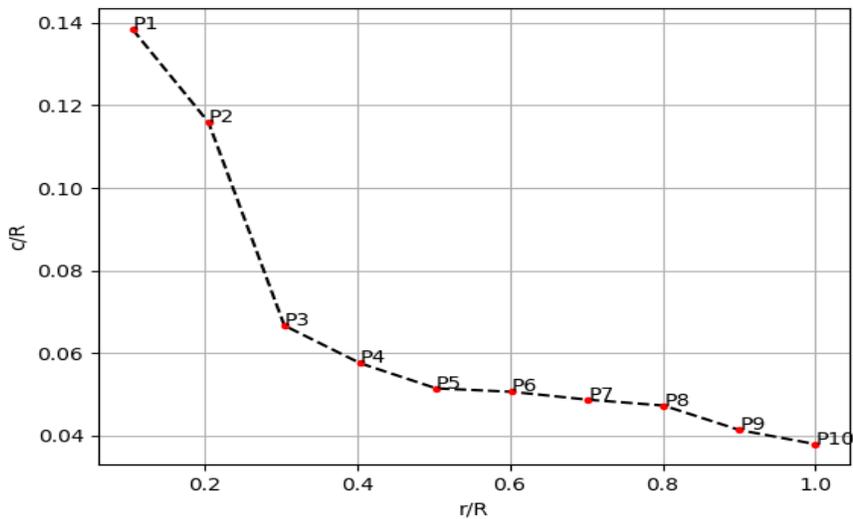


Figura 8.39: Comportamiento de la cuerda (Autor)

Con los datos tabulados en la Tabla 8.24, se procedió a calcular las variables independientes de los coeficientes de inducción axial y angular, estas, se presentan en la Tabla 8.25.

Radio, $r(m)$	λ_L	Ángulo de ataque, $\alpha(g)$	Factor de corrección	Solidéz
0.08	0.7466	9	1	0.6196
0.15	1.4414	9	0.9999997	0.2688
0.23	2.1362	8	0.9999955	0.1044
0.30	2.8311	9	0.9999661	0.0680
0.38	3.5259	8	0.9998004	0.0462
0.45	4.2207	8	0.9989361	0.0328
0.53	4.9155	7	0.9945915	0.0322
0.60	5.6103	6	0.9731659	0.0307
0.68	6.3051	4	0.8678259	0.0269
0.75	7	4	0.8345435	0.0181

Tabla 8.25: Variables independientes según la posición

Ahora, revisando los datos de la Tabla 8.25, se observa el cumplimiento con el criterio de solidez, teniendo en cuenta que, a medida que esta disminuye la velocidad en la hélice aumentara, asiendo así, que la extracción de energía aumente (Manwell, 2009). Con los valores obtenidos anteriormente, se procedió con el calculo de los coeficientes de inducción para cada sección, estos se muestran en la Tabla 8.26.

Radio, $r(m)$	a	a'	Ángulo de inclinación, $\theta(g)$
0.08	0.3098	0.2959	26.5016
0.15	0.3239	0.0961	14.1668
0.23	0.3285	0.0462	8.72285
0.30	0.3304	0.0268	3.96943
0.38	0.3314	0.0175	2.55603
0.45	0.3320	0.0122	2.00801
0.53	0.3323	0.0091	1.42006
0.60	0.3326	0.0070	0.88602
0.68	0.3327	0.0055	0.73756
0.75	0.3332	0.0032	0.66606

Tabla 8.26: Coeficientes de inducción y ángulo de inclinación para cada sección

Ya con esto, se encuentra el coeficiente de potencia C_p para cada sección, presentados en la Tabla 8.27. Por último, se calculo el coeficiente de potencia global para el álabe diseñado,

$$C_{p_g} = 0,391049 = 39,10\% \quad (8.1)$$

Teniendo en cuenta que (Manwell, 2009) determina el coeficiente de potencia máximo como 44 %, es decir, la máxima potencia que se puede extraer del viento en una turbina ideal; observamos que se obtuvo un buen C_p para el álabe.

La Figura 8.40 muestra la relación de los coeficientes de inducción axial y angular, se puede observar la convergencia de de estos, en referencia a las curvas ideales planteadas por Betz (Manwell, 2009). Por otro lado, la Figura 8.41 presenta el comportamiento del coeficiente de potencia para cada posición.

Radio, $r(m)$	$Ve(m/s)$	Coefficiente, C_p
0.08	4.33821	0.0036646
0.15	7.33943	0.0136631
0.23	10.7269	0.0249642
0.30	14.1759	0.0354935
0.38	17.6404	0.0462047
0.45	21.1100	0.0560832
0.53	24.5818	0.0644979
0.60	28.0546	0.0710650
0.68	31.5278	0.0716568
0.75	70.0002	0.0037560

Tabla 8.27: Coeficiente de potencia para cada sección

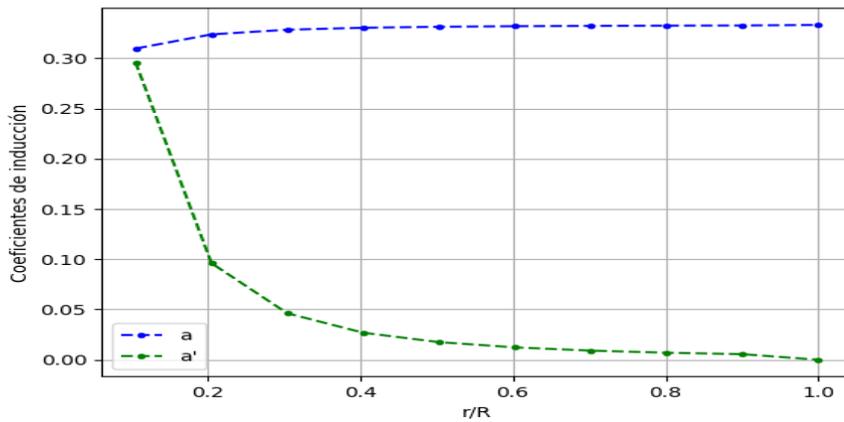


Figura 8.40: Coeficientes de inducción axial y angular (Autor)

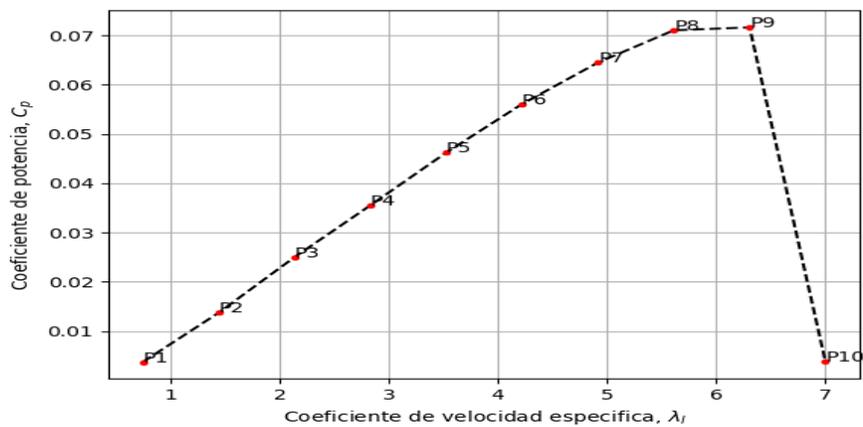


Figura 8.41: Comportamiento del Coeficiente de potencia (Autor)

8.6. Construcción del álabe

Para la construcción del álabe se utilizó Solidwork v18. El proceso es muy sencillo, primero se deben convertir las coordenadas del perfil según el dimensionamiento de la cuerda; segundo, se crean un número de croquis igual a la cantidad de posiciones; tercero, se genera la geometría haciendo uso de la herramienta de extrusión; por último, se aplica un suavizamiento a las curvas que componen el álabe, esto con el fin de mejorar la geometría. La Figura 8.42 presenta el álabe contruido.

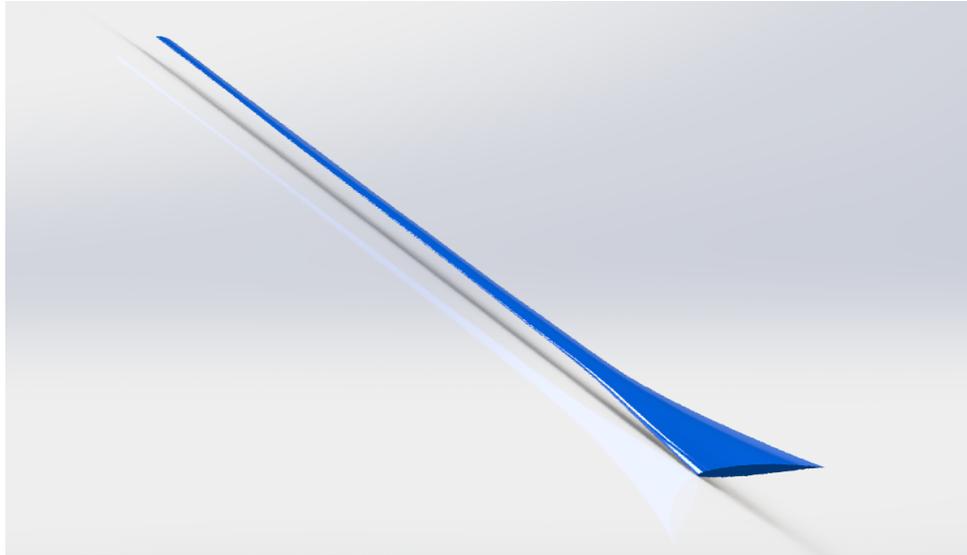


Figura 8.42: *Álabe diseñado (Autor)*

Capítulo 9

Análisis computacional

El análisis aerodinámico sobre el álabe diseñado se ejecutó haciendo uso de Ansys v16, el proceso se describe a continuación.

9.1. Herramienta CFD

ANSYS CFD es una herramienta de software de cómputo de alto rendimiento de la dinámica fluida (CFD) que entrega soluciones confiables y exactas rápidamente y robusto a través de una amplia gama de los usos del CFD y de la multi-física. CFD se reconoce por su exactitud, robustez y velocidad excepcionales con maquinaria de rotación tal como bombas, ventiladores, compresores, y turbinas del gas e hidráulicas.

9.2. Fenómeno físico

En términos simples, este fenómeno físico se define como, la rotación de un objeto que afecta a su trayectoria a través de un fluido (En este caso aire), como, por ejemplo, puede observarse en cómo se desvía una pelota de fútbol al ser lanzada con fuerza y de forma que gire sobre su eje. Para esto, existe una serie de formulaciones matemáticas que describen el mismo, esta fundamentación matemática se determina como ecuaciones de Navier Stokes. Para iniciar se define la conservación de la masa como,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{v}_r = 0 \quad (9.1)$$

De igual forma se define la conservación de Momentum como,

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}_r \vec{v}_r) + \rho (2\vec{w} \times \vec{v}_r + \vec{w} \times \vec{w} \times \vec{r}) = \nabla_p + \nabla \cdot \vec{\tau}_r \quad (9.2)$$

Siendo $2\vec{w} \times \vec{v}_r$ la fuerza de aceleración de Coriolis y $\vec{w} \times \vec{w} \times \vec{r}$ la aceleración centrípeta.

9.3. Volumen de control

Para la definición del volumen de control V_c , se utilizó la estructuración propuesta por (Manwell, 2009), el cual propone que, la distancia entre el álabe y el V_c aguas arriba, debe ser igual a 15 veces el radio ($15R$), aguas abajo $10R$ y Radialmente de $5R$, donde R es el radio de la hélice. Tenga en cuenta que el V_c adopta la forma de $1/3$ de cilindro, esto con el fin de poder aplicar condiciones periódicas rotacionales, permitiendo así, el aumento simétrico de N álabes. La Figura 9.1 muestra la estructura del V_c utilizado.

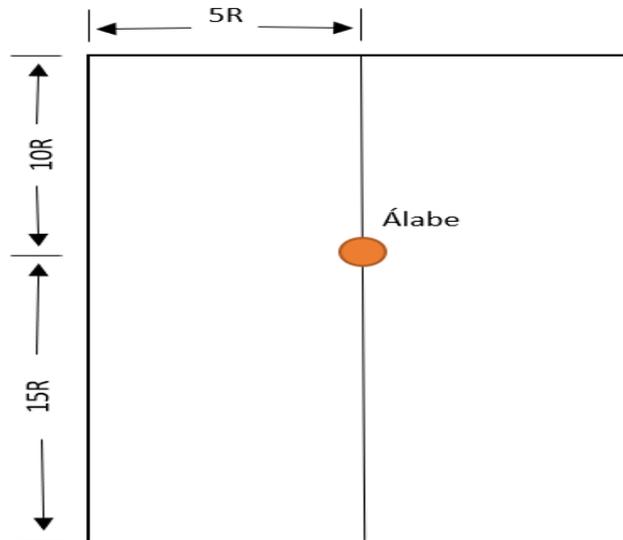


Figura 9.1: *Volumen de control (Autor)*

9.4. Condiciones frontera

Las condiciones de frontera utilizadas en este análisis se describen a continuación:

- **Entrada:** Se define la velocidad como $5(m/s)$, con turbulencia del 5% y relación de la misma de 10% .
- **Salida:** Teniendo en cuenta que aunque existe un gradiente de presión, este hace parte de la presión estática no de la dinámica, por tanto, se define la presión como $1(atm)$.
- **Caras de simetría:** Se definen como interfaces periódicas para garantizar resultados de forma simétrica.
- **Cara lateral:** Se define la velocidad como $5(m/s)$.

9.5. Descripción de malla

La malla aplicada en este estudio se presenta en la Figura 9.2.

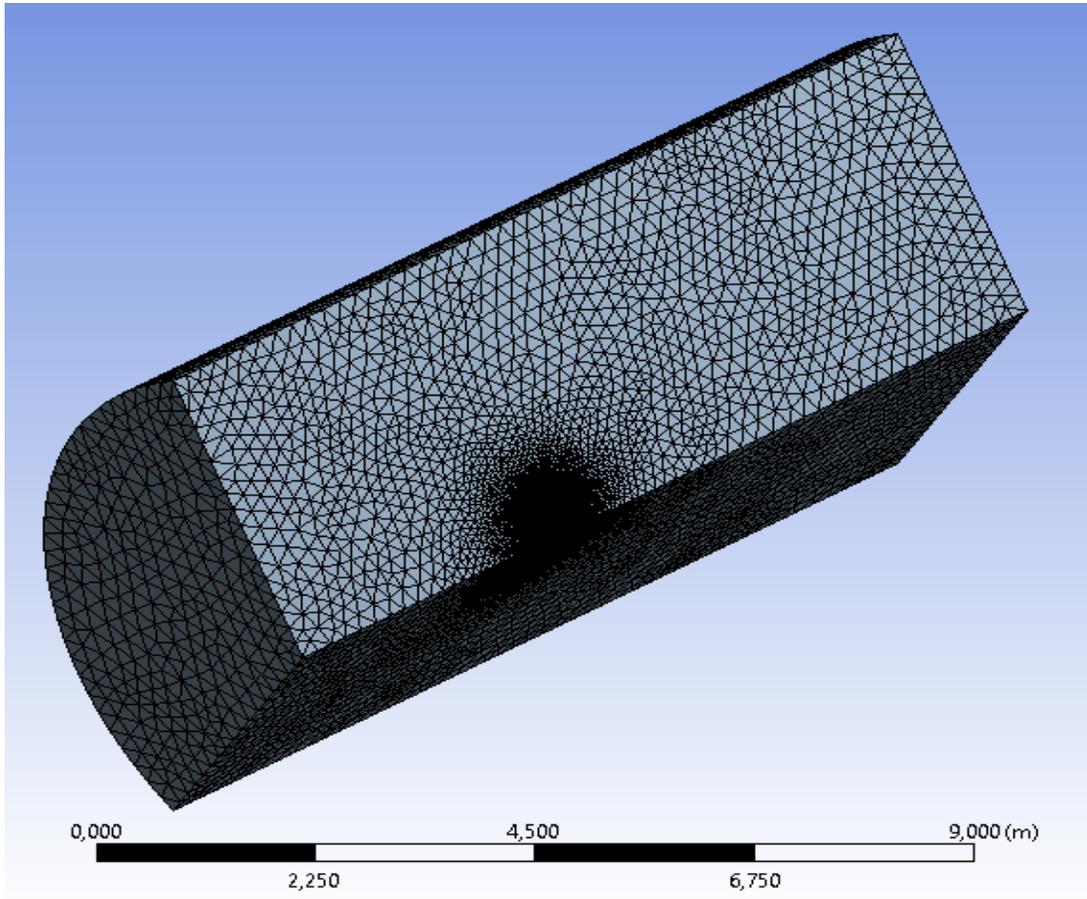


Figura 9.2: *Malla generada (Autor)*

Para mejorar la malla generada existe una serie de controles tanto globales como locales, estos se presentan a continuación:

- **Controles globales:** La configuración para estos se presenta en la Tabla 9.1.

Relevancia	Suavizado	Transición
50	Medio	Lenta

Tabla 9.1: *Controles de malla globales*

- **Controles locales:** A diferencia de los anteriores, estos se aplican en zonas determinadas, definidos como:
 - **Match control:** Este control se utiliza con el fin de planear los nodos en las caras de interface periódica para que coincida con la simetría.
 - **Face sizing:** Este control se aplica al area superficial del álabe que esta en contacto con el V_c , la Figura 9.3 muestra como se ve.

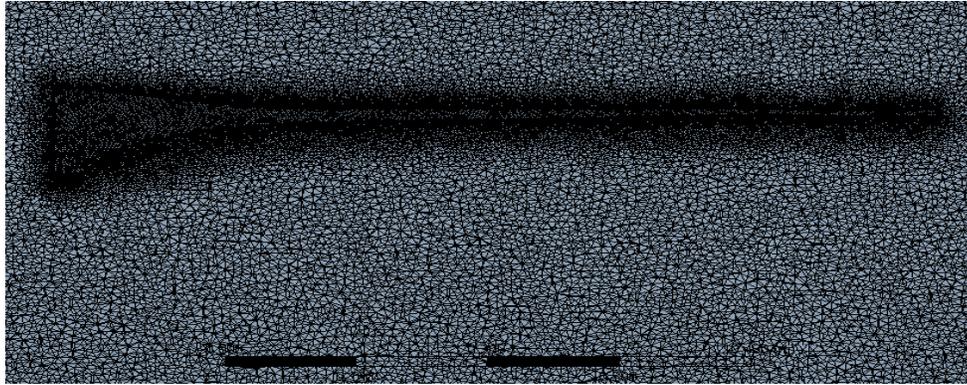


Figura 9.3: *Face sizing aplicado (Autor)*

- **Inflation:** Este control mejora la uniformidad de los nodos en la zona aplicada, la Figura 9.4 muestra como se ve.

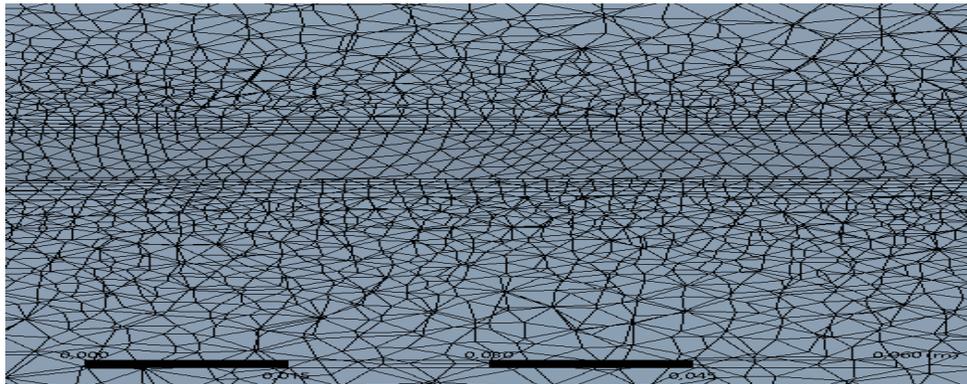


Figura 9.4: *Inflation aplicada (Autor)*

- **Sphere of influence:** Genera un refinamiento de forma esférica según su centro, vea la Figura 9.5.

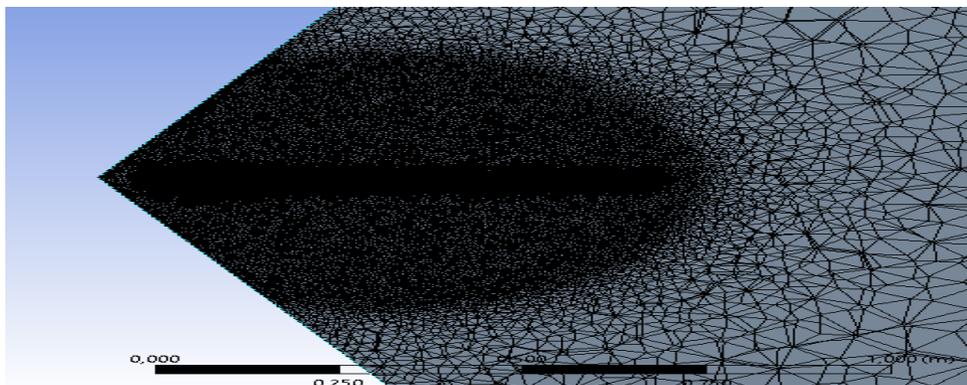


Figura 9.5: *Sphere of influence aplicada (Autor)*

Por último, las Figuras 9.6 y 9.7 presenta las características de calidad en la malla, ortogonalidad y oblicuidad, respectivamente. Según (Bavanish and Thyagarajan, 2013) establece que una buena ortogonalidad es aquella que se encuentra sobre 0,75 y para la oblicuidad por debajo de 0,25. Con esto, es claro decir que se obtuvo una buena calidad.

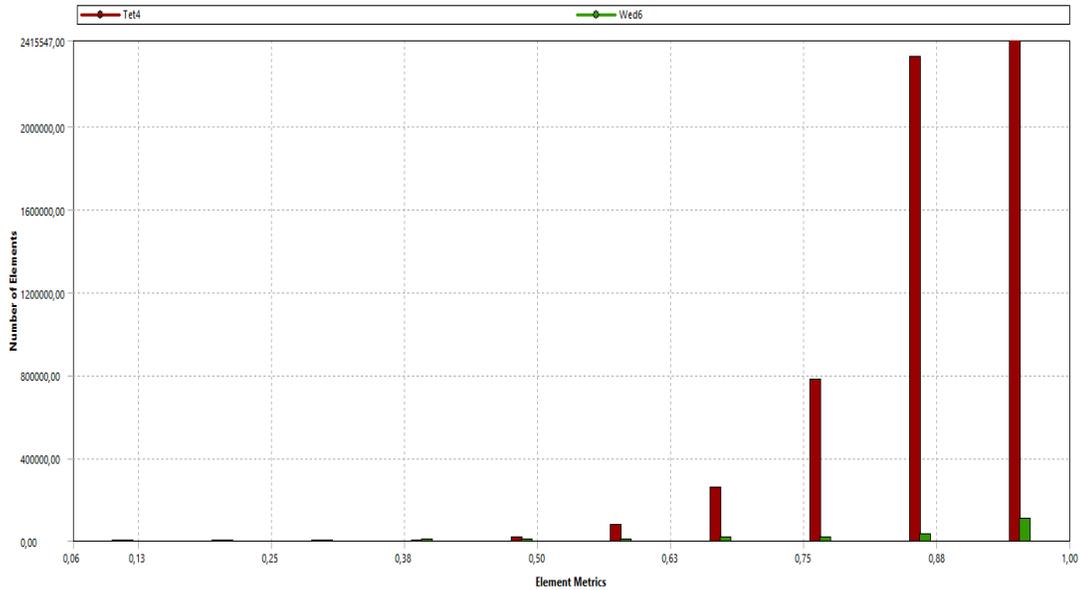


Figura 9.6: Calidad ortogonal de la malla (Autor)

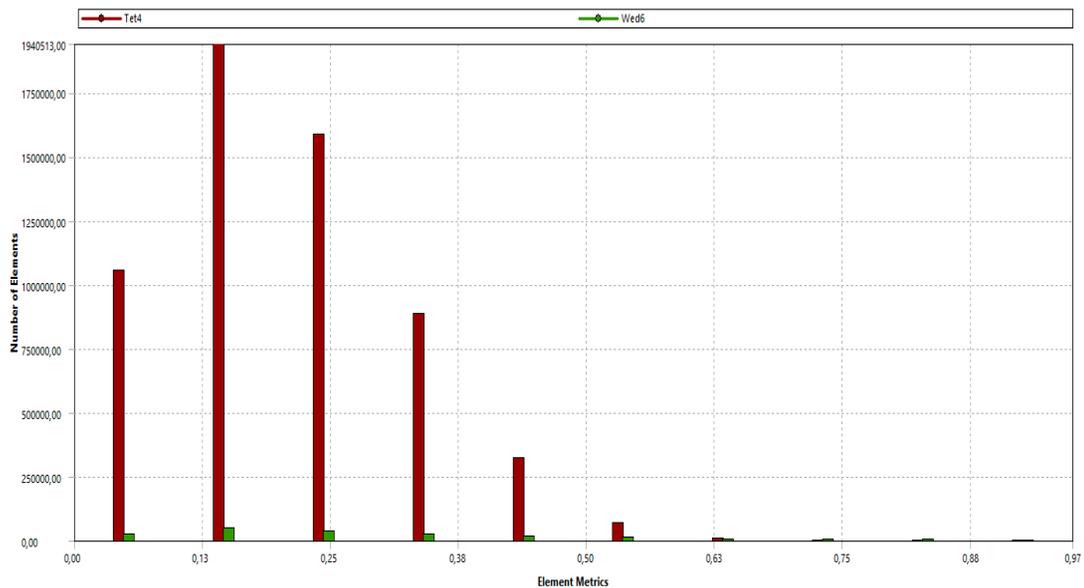


Figura 9.7: Calidad oblicua de la malla (Autor)

9.6. Modelo de turbulencia

El modelo de turbulencia seleccionado para este análisis fue:

- $K - w$ (SST): Es un modelo de viscosidad parásita de dos ecuaciones que se ha vuelto muy popular. La formulación de transporte de esfuerzo cortante (SST) combina lo mejor de dos mundos. El uso de una formulación $k - w$ en las partes internas de la capa límite hace que el modelo se pueda usar directamente hasta la pared a través de la subcapa viscosa, por lo tanto, el modelo SST $k - w$ se puede usar como modelo de turbulencia para valores de número de Reynolds bajos sin funciones de amortiguación adicionales (Gustavo, 2019).

A pesar de ser uno de los más utilizados, este produce niveles de turbulencia demasiado grandes en regiones con gran tensión normal, como regiones de estancamiento y regiones con fuerte aceleración. Sin embargo, esta tendencia es mucho menos pronunciada que con un modelo $k - E$ normal. Según (Grasso, 2014), este es el modelo más apropiado cuando se desea trabajar con este tipo de análisis.

9.7. Coeficiente de potencia, C_p

Como se definió antes, C_p puede determinarse como,

$$C_p = \frac{B\tau w}{0,5\rho AV^3} \quad (9.3)$$

Donde τ , representa el torque generado por el álabe. Por defecto, Ansys v16 nos entrega el τ calculado, en este caso fue,

$$\tau = 0,2812(N/m) \quad (9.4)$$

Con lo que es posible calcular el C_p , dando como resultado,

$$C_p = 0,2909 = 29,09\% \quad (9.5)$$

Si comparamos el C_{pBEM} con el C_{pAnsys} , nos damos cuenta que disminuyó, esto se debe a, los defectos que se presentan en la malla; claro, aunque se obtuvo una buena malla, la cual cuenta con $1,2e6$ número de nodos y $6,1e6$ número de elementos, hay una interferencia con la relación dimensional entre el V_c y el álabe.

Capítulo 10

Resultados

Este capítulo presenta los resultados obtenidos para cada posición del álabe. Como se puede observar en la Figura 10.1 se puede ver que el punto de máxima presión se sitúa justo debajo del radio de curvatura, mientras que la turbulencia es mínima en esta zona.

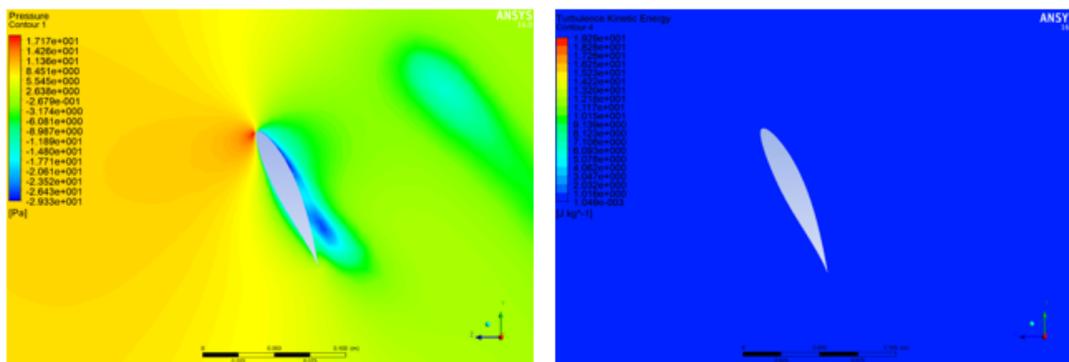


Figura 10.1: *Presión y turbulencia para $r = 0,08m$ (Autor)*

En la Figura 10.2 se puede corroborar que efectivamente la zona de mayor presión es el intradós, y vemos como el nivel de turbulencia empieza a aumentar.

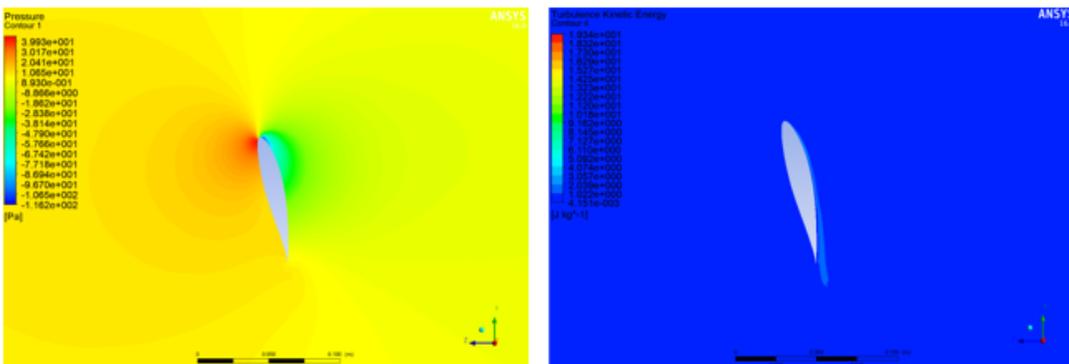


Figura 10.2: *Presión y turbulencia para $r = 0,15m$ (Autor)*

La Figura 10.3 muestra que, en este punto, la presión empieza a disminuir con respecto a la anterior y el nivel de turbulencia presenta un aumento consecutivo.

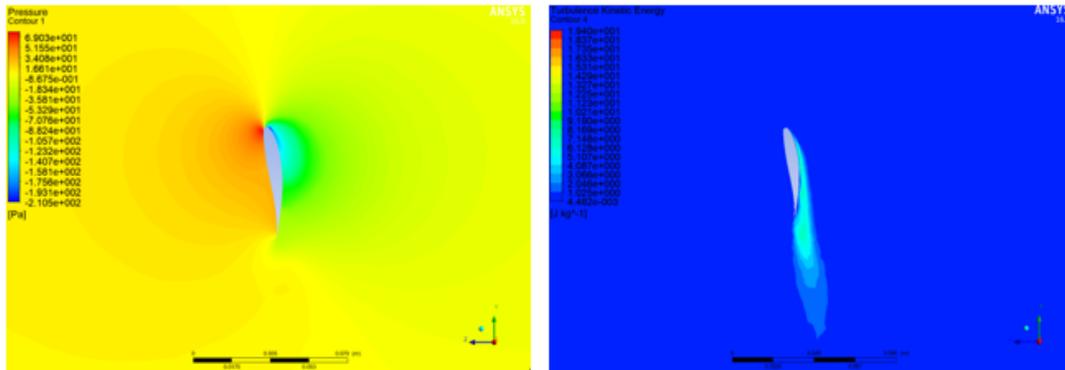


Figura 10.3: *Presión y turbulencia para $r = 0,23m$ (Autor)*

En la Figura 10.4 se observa un cambio brusco en el nivel de turbulencia, teniendo en cuenta el comportamiento que ha venido presentando, estos cambios, se deben a los efectos de malla presentados en dichas zonas.

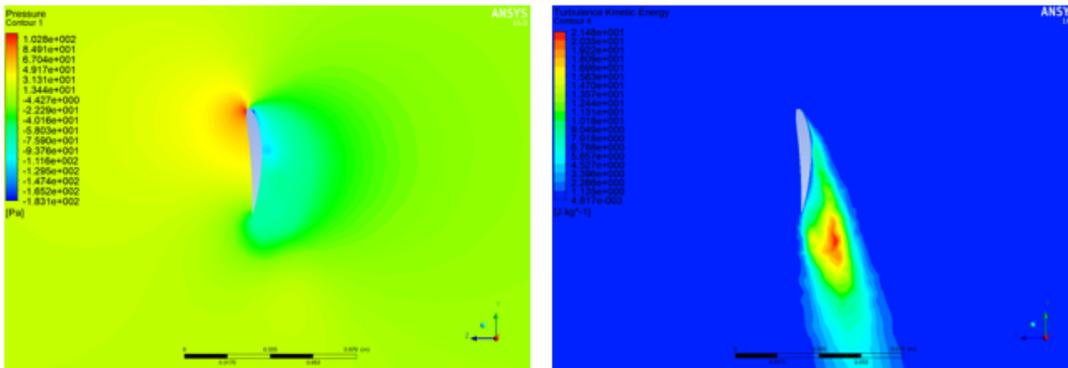


Figura 10.4: *Presión y turbulencia para $r = 0,30m$ (Autor)*

A su vez, la Figura 10.5 afirma lo dicho anteriormente, la turbulencia en esta zona vuelve a coincidir con el comportamiento que viene presentando desde la primer posición, por tal motivo, es válido afirmar que el cambio brusco de la Figura 10.4 se debe a esos defectos.

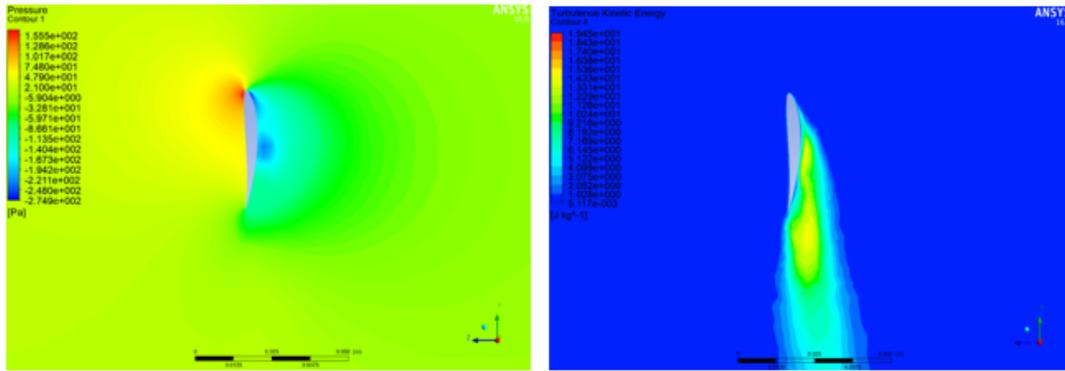


Figura 10.5: *Presión y turbulencia para $r = 0,38m$ (Autor)*

La Figura 10.6 vuelve a presentar los mismos cambios que la Figura 10.4, la turbulencia presenta un comportamiento extraño según la secuencia. Por otro lado, la presión presenta buen comportamiento.

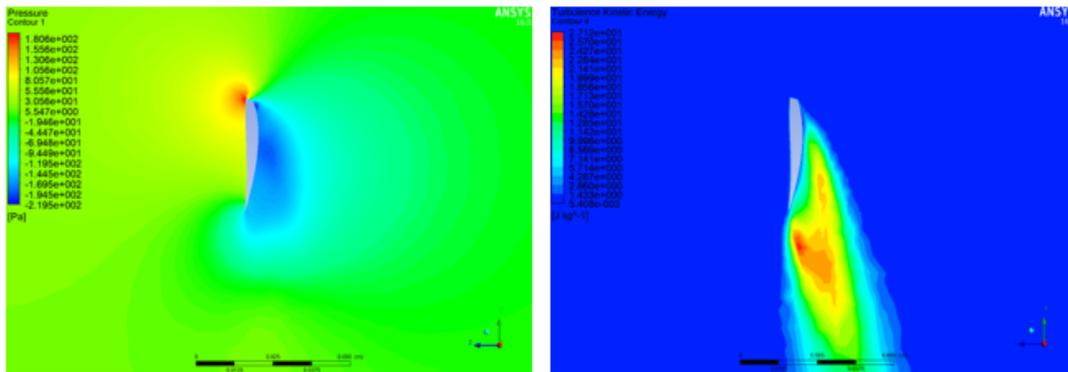


Figura 10.6: *Presión y turbulencia para $r = 0,45m$ (Autor)*

En la Figura 10.7 podemos ver que se normaliza bastante, aunque presenta características un poco parecidas, si tenemos en cuenta el comportamiento de la siguiente posición (Ver Figura 10.8).

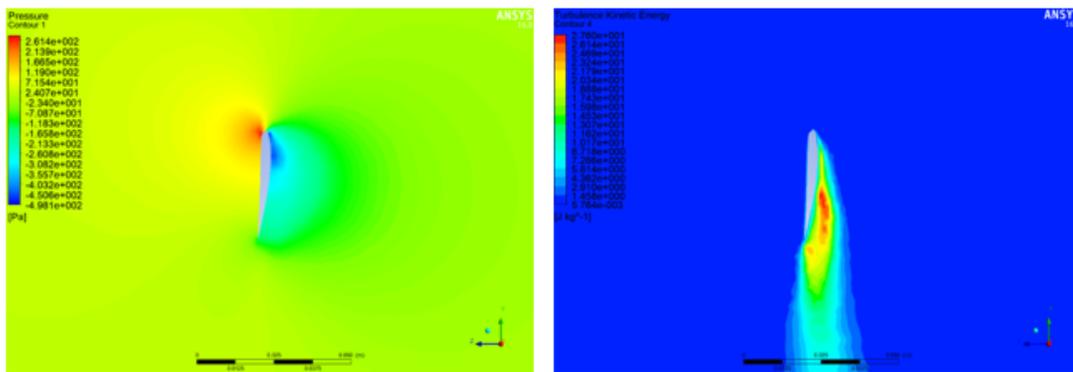


Figura 10.7: *Presión y turbulencia para $r = 0,53m$ (Autor)*

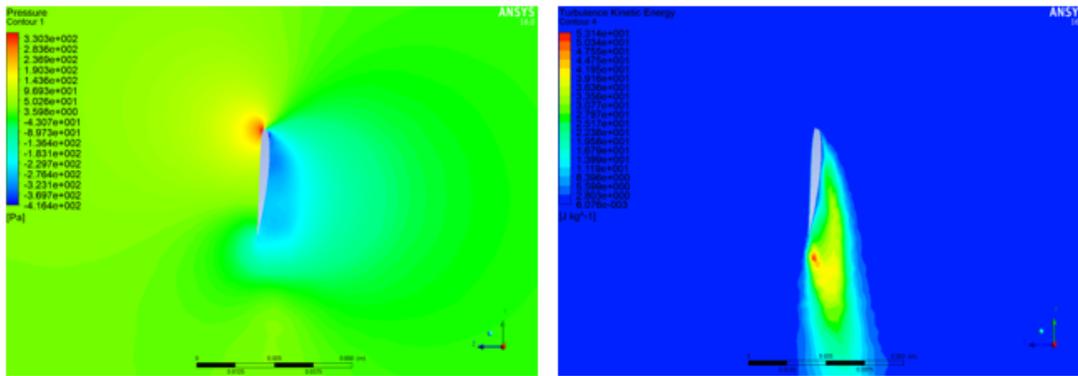


Figura 10.8: *Presión y turbulencia para $r = 0,60m$ (Autor)*

Como era de esperarse en la posición cercanas a la punta (Ver Figuras 10.9 y 10.10), el nivel de turbulencia aumenta drásticamente. De igual forma se observa que presentan un patrón de aumento similar, claro está que las pérdidas en la punta son mayores, teniendo en cuenta que en esta zona la capa limite tiende a desprenderse mucho antes.

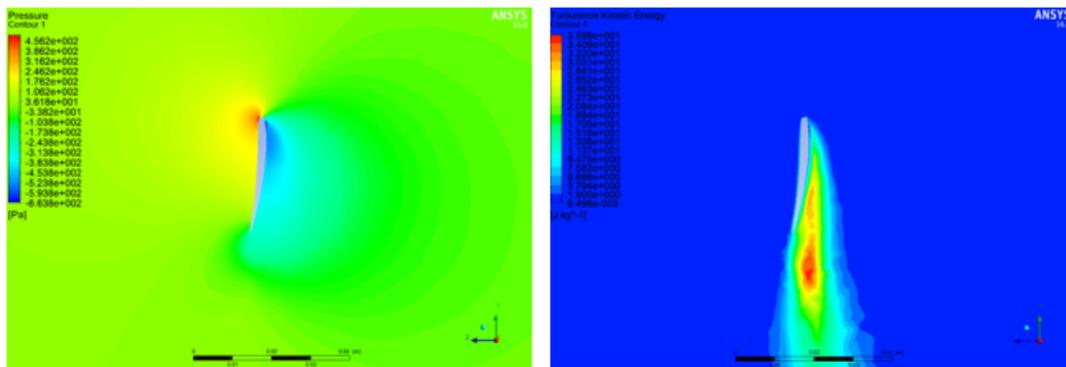


Figura 10.9: *Presión y turbulencia para $r = 0,68m$ (Autor)*

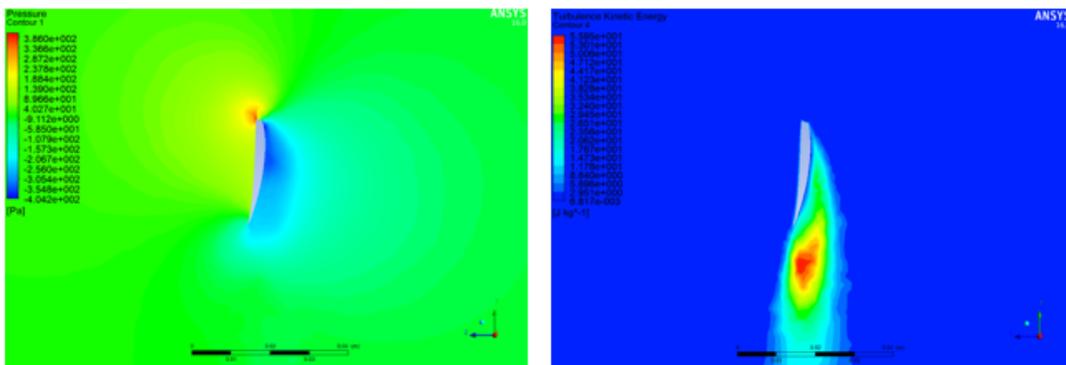


Figura 10.10: *Presión y turbulencia para $r = 0,75m$ (Autor)*

Como se puede observar en las Figuras 10.4 y 10.6, en ese punto, se evidencia un cambio brusco según la secuencia que llevan los resultados, esto, se debe a los defectos descritos en el capítulo anterior, donde expuso el problema que relaciona el empalme del V_c y el área superficial del álabe, haciendo que el análisis tenga cierto grado de divergencia en esos puntos.

La Figura 10.11 muestra la distribución de presión en cada álabe.

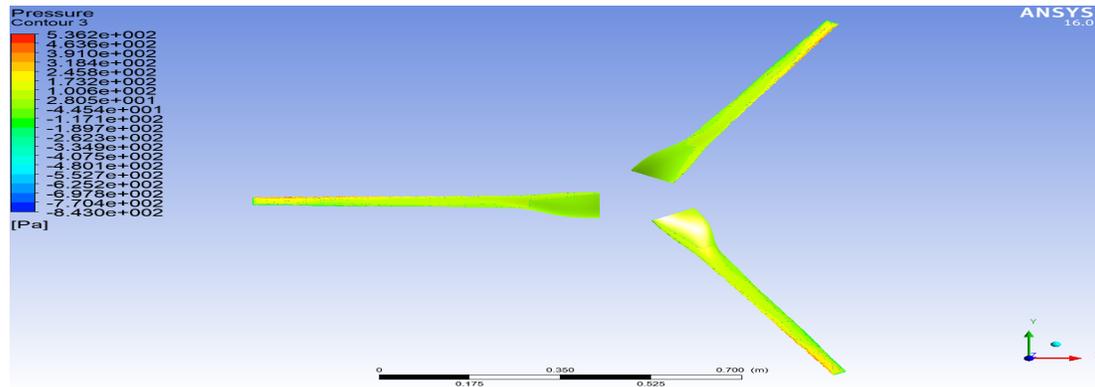


Figura 10.11: *Distribución de presión en cada álabe (Autor)*

La Figura 10.12 muestra la turbulencia cuando el aire va a una distancia de $0,03m$ aguas abajo de la hélice.

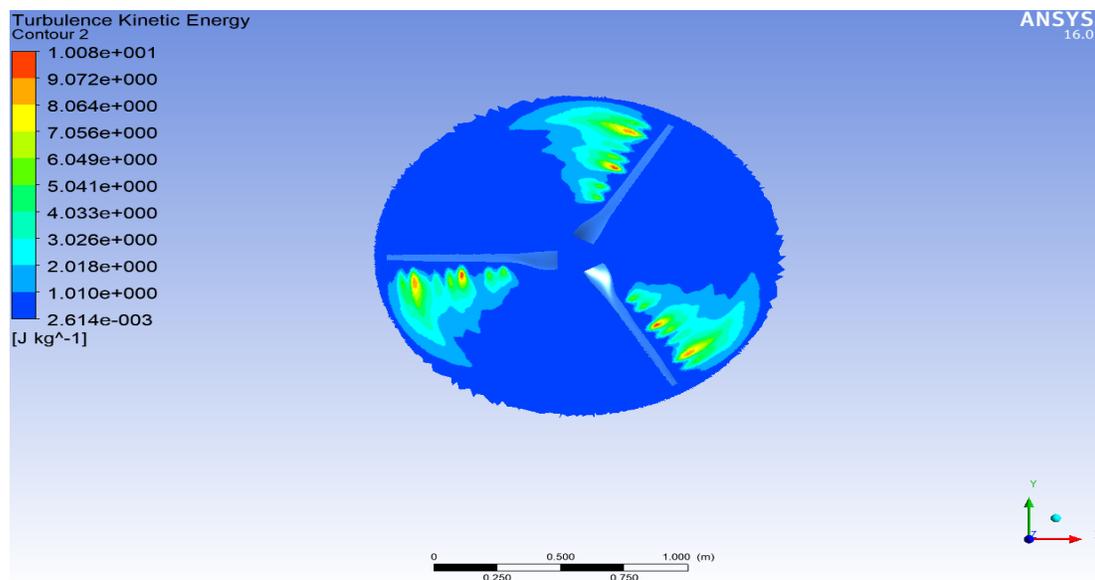


Figura 10.12: *Turbulencia a $0,03m$ aguas abajo del álabe (Autor)*

La Figura 10.13 muestra el comportamiento de la velocidad en 2D y 3D.

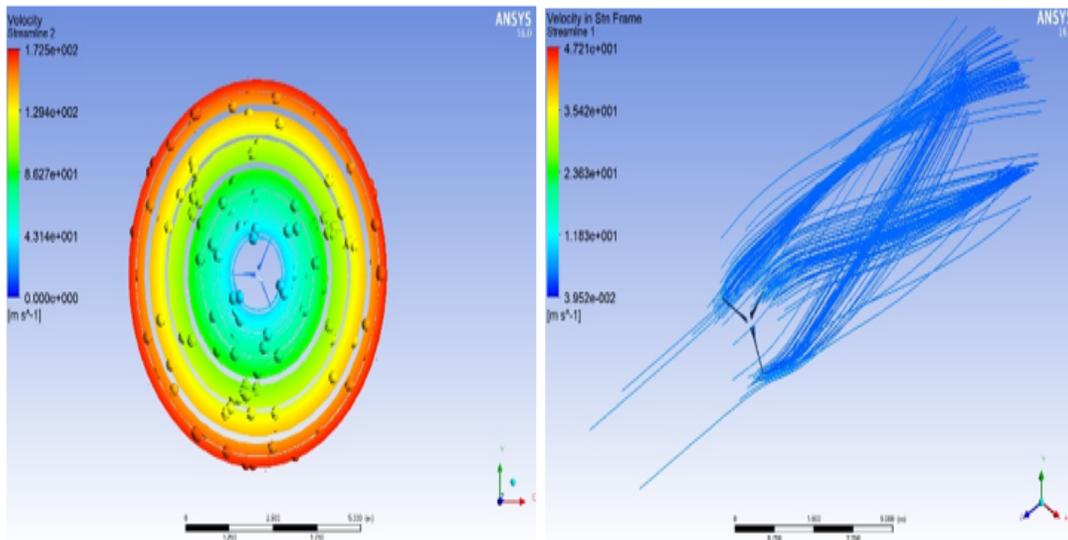


Figura 10.13: *Comportamiento de la velocidad 2D y 3D (Autor)*

La Figura 10.14 presenta una captura de pantalla tomada a la animación generada para la velocidad.

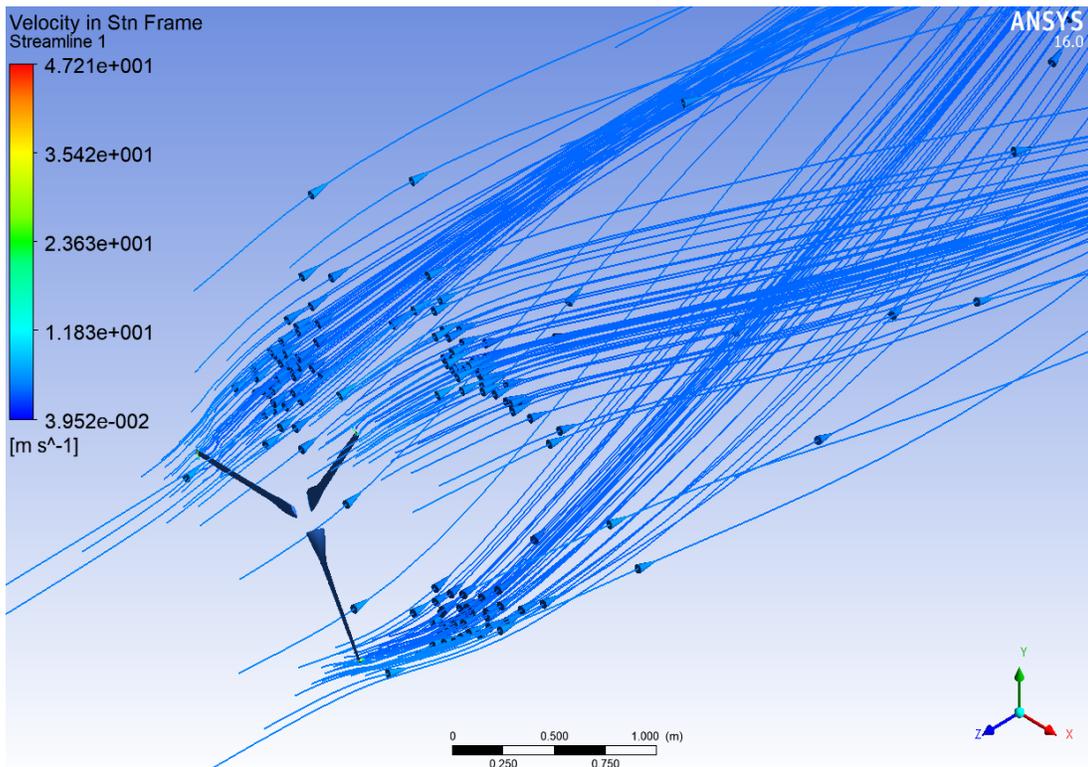


Figura 10.14: *Velocidad del aire (Autor)*

Capítulo 11

Conclusiones

Se logro optimizar los perfiles aerodinámicos que componen el álabe para un aerogenerador de eje horizontal, baja potencia y velocidad; esto, mediante la implementación teórico-matemática que fundamenta el diseño de un perfil aerodinámico. Uno de los grandes problemas que abarcan estos diseños, se basa en las bajas velocidades V de funcionamiento, ya que, si tenemos en cuenta que el número de Reynolds Re es directamente proporcional a V , es decir, a medida que V disminuye, Re también, en consecuencia, se ve directamente afectada la relación de sustentación Cl/Cd , esto, recordando que el coeficiente de sustentación C_l y arrastre C_d dependen de Re ; a esto se añade otro inconveniente, para lograr aumentar Cl/Cd es necesario iniciar una variación en la geometría del perfil, buscando así, el que mejor relación presente, pero, sin dejar aún lado uno de los aspectos más importantes, la fabricación. Todo esto, hace que el grado de dificultad en el diseño aumente.

A pesar de que los resultados obtenidos en la simulación presentan un buen nivel de convergencia, existe un porcentaje de error en algunas zonas de la malla, presentándose como defectos de forma (en términos coloquiales, pequeños pellizcos), los cuales se obtienen debido a la variación geométrica en la superficie de contacto, ayudando a que el error en ese punto aumente, por ejemplo, en estos puntos el desprendimiento de la capa límite se da mucho antes, haciendo así que la condición de turbulencia crezca. Esto se corrige aumentando la calidad de la malla, la relación de tamaño entre elementos de malla y seleccionando acertadamente las zonas afectadas. Como experiencia se puede decir que cuando se habla de una mejora en la malla, no se refiere específicamente al aumento de nodos, una gran cantidad de nodos no asegura una excelente calidad; claro, mejorar una malla implica inevitablemente el aumento de nodos, pero no siempre en exceso.

La aplicación DAP v1.0, diseñada por el autor, fue de gran ayuda para la realización de este proyecto, todos lo realizado sobre los perfiles aerodinámicos fue trabajado en esta aplicación, aunque tiene dependencias con los software Xfoil v6.99 y Xflr5, fue diseñada en uno de los lenguajes más rápidos y limpios del mercado. Desde luego, presenta una interfaz muy fácil de usar, basta con tener conocimiento básico sobre lo que se está trabajando y podrá ejecutarla.

Capítulo 12

Recomendaciones

En primera instancia, para trabajos futuros se recomienda contar con buenos recursos computacionales, ya que un gran porcentaje del error se debe a este aspecto; además, entrar en un análisis riguroso para con el proceso de mallado, puesto que, las deformaciones geométricas se deben a esto, si no se obtiene una malla balanceada entre las superficies, aumentara el error.

Sería de gran ayuda implementar y ejecutar un proceso de fabricación para el álabe, con esto, se podría corroborar el nivel de convergencia real que se obtuvo en este trabajo; también se podría aplicar un análisis estructural sobre el álabe y combinar el comportamiento.

Bibliografía

- Araújo, A. M., Melo, G. M., De Medeiros, A. L., and Dos Santos, M. J. (2009). Simulation of the production of electricity with small size aerogenerators. *Informacion Tecnologica*, 20(3):37–44. 10
- Bank, T. W. (2014). World Development Indicators — The World Bank. 5
- Bastianon, R. A. (2008). Cálculo y diseño de la hélice óptima para una turbina eólica. page 48. 15, 47
- Bautista, J., Fernandez, G., Bautista, J., and Fernandez, G. (2012). Generador Eolico De Baja Potencia. pages 1–38. 12
- Bavanish, B. and Thyagarajan, K. (2013). Optimization of power coefficient on a horizontal axis wind turbine using bem theory. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26:169–182. 24, 28, 73
- Brown and Folch (2017). Crecimiento económico y sostenibilidad. *Revista Eureka sobre enseñanza y divulgación de las ciencias.*, 4(1):193–194. 5
- Canseco, M. (2010). Energías Renovables En América Latina. *Ciudadanía y Valores*, pages 1–12. 9
- Dinero, E. (2019). situación de la transición energética en Colombia. 9
- Education, S., Volume, L., and Bravo, O. G. (2011). ezier. 4(14):181–194. 9, 31, 32
- E.L.Houghton, P.W.Carpenter, Steven H, C., and Daniel T, V. (2001). *Aerodinamics for engineering students*. sixth edit edition. 9, 12, 14, 15, 16, 17, 19, 22, 23, 24, 65
- Energías, T. and Villacián, C. C. (2017). Energía y Telecomunicaciones Alberto Arroyo Gu ? érrrez Raquel MarGnez Torre. (Iv). 9, 13
- Farin, G. (2018). The Essentials of CAGD. *The Essentials of CAGD*. 32
- Galindo Flores, D. R. (2006). Diseño De Perfiles Aerodinámicos. page 108. 20, 21, 23
- Grasso, F. (2014). Design of a family of new advanced airfoils for low wind class turbines. *Journal of Physics: Conference Series*, 555(1):0–9. 23, 40, 56, 74
- Gustavo, R. (2019). Modelos de turbulencia introductorio. *Technical Report*, (September). 74

- Hidalgo-Martínez, M., Sanmiguel-Rojas, E., and Burgos, M. A. (2014). Design of cams with negative radius follower using Bézier curves. *Mechanism and Machine Theory*, 82:87–96. 31
- International Energy Association (2018). World energy balances: overview. *World Energy Balances 2018*, 12(c):24. 5, 6
- José Antonio, R. N. (2018). Consumo de energía primaria mundial — Economía — Ecología — El Viejo Topo. 5
- Manwell, J. F. (2009). *Wind energy explained*. 9, 24, 25, 26, 27, 28, 66, 70
- Portafolio (2019). AES Colombia compra el parque eólico más grande de la Nación — Negocios — Portafolio. 9, 10
- Ramirez, R. G., Antelmo, A., Martinez, R., Parra, M. S., Angel, M., Morales, M., Aurora, M., Cuellar, H., Xochiquetzal, I., and Godinez, A. (1930). Investigación, desarrollo e innovación tecnológica de sistemas de control de aerogeneradores. 10
- Redacción PartesDel (2017). Partes del aerogenerador. 9, 11
- Ting, K.-L., Lee, N., and Brandan, G. (1994). Synthesis of polynomial and other curves with the Bezier technique. *Mechanism and Machine Theory*, 29(6):887–903. 31