



**Diseño de una microturbina para un aerogenerador de eje horizontal para el aprovechamiento de vientos a baja velocidad**

Cristhian Leonardo Pabón Rojas

Trabajo de investigación presentado para optar al título de Magíster en Ingeniería  
Mecánica

Tutores

Carlos Andrés Trujillo Suárez, Doctor (PhD) en Ingeniería Mecánica

Juan Carlos Serrano Rico, Doctor (PhD) en Ingeniería Mecánica

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ingeniería Mecánica  
Medellín, Antioquia, Colombia  
2024

<b>Cita</b>	(Pabón Rojas 2024)
<b>Referencia</b>	Pabón Rojas, C.L. (2024). <i>Diseño de una microturbina para un aerogenerador de eje horizontal para el aprovechamiento de vientos a baja velocidad</i> [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
<b>Estilo APA 7 (2020)</b>	



Maestría en Ingeniería Mecánica, Cohorte VII.  
 Grupo de Investigación Energía Alternativa  
 Sede de Investigación Universitaria (SIU).

Se agradece el apoyo financiero brindado por el Programa Científico Colombia en el marco de la convocatoria Ecosistema Científico (Contrato No. FP44842-218-2018).



**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** John Jairo Arboleda Céspedes.

**Decano:** Julio César Saldarriaga.

**Jefe departamento:** Pedro León Simanca.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## **Agradecimientos**

Quiero manifestar mi agradecimiento a toda mi familia y seres queridos que me acompañaron y dio su apoyo durante esta etapa. A mis directores los profesores Carlos Trujillo y Juan Carlos Serrano, que me dieron la oportunidad de enfrentarme ante esta etapa de formación y me guiaron para llegar hasta este momento, muchas gracias por su consejo, enseñanzas y apoyo. A todos los profesores y compañeros que compartieron esta etapa conmigo y aportaron su parte durante el proceso. Agradezco al Programa Colombia científica como fuente de financiación, en el marco de las convocatorias Ecosistema científico, contrato No. FP44842- 218-2018.

# Índice

<b>Resumen</b>	<b>8</b>
<b>Abstract</b>	<b>9</b>
<b>Introducción</b>	<b>10</b>
<b>1 Objetivos</b>	<b>12</b>
1.1 Objetivo general . . . . .	12
1.2 Objetivos específicos . . . . .	12
1.3 Etapas del trabajo de investigación . . . . .	12
<b>2 Marco Conceptual</b>	<b>15</b>
2.1 Teoría de optimización del perfil . . . . .	21
<b>3 Selección de perfiles aerodinámicos</b>	<b>24</b>
<b>4 Optimización de los perfiles</b>	<b>28</b>
<b>5 Diseño de álabes</b>	<b>39</b>
5.1 Teoría de conservación de cantidad de movimiento . . . . .	40
5.2 Teoría de elemento de álabes . . . . .	43
5.3 Teoría de momentum de elemento de álabes . . . . .	46
5.4 Análisis Dimensional . . . . .	53
5.5 Modelo tamaño escala . . . . .	59
5.6 Oportunidades de mejora . . . . .	62
<b>6 Análisis Fluido-Dinámico</b>	<b>64</b>
6.1 Análisis experimental . . . . .	87
<b>7 Conclusiones</b>	<b>94</b>
7.1 Conclusión General . . . . .	96
<b>8 Referencias Bibliográficas</b>	<b>98</b>

## Lista de tablas

1	Características geométricas del perfil base SG6040 y versiones optimizadas GIM3 y OPT3 . . . . .	35
2	Características aerodinámicas del perfil base SG6040 y versiones optimizadas GIM3 y OPT3 . . . . .	35
3	Distribución de la cuerda y ángulo para cada sección del álabe calculado por el método BEM . . . . .	52
4	Unidades y dimensiones del teorema $\pi$ . . . . .	56
5	Convergencia de malla. Perfil SG6040 vel=4,55 m/s, $\alpha = 8^\circ$ . . . . .	70
6	Características de comportamiento para cada sección del álabe . . . . .	71
7	Resultados de las simulaciones en diferentes softwares y sus comparaciones para los perfiles aerodinámicos . . . . .	73
8	Parámetros para dominio en 3 dimensiones según distintos autores. Todos los parámetros son tomados desde la ubicación del centro del rotor y usan su diámetro como referencia [ $D$ ], para este trabajo $D = 2m$ . . . . .	77
9	Resultados computacionales velocidad angular y potencia para las velocidades de viento 11m/s, 9m/s y 6m/s . . . . .	87
10	Resultados experimentales velocidad angular y potencia para las velocidades de viento 10,67m/s, 9m/s y 6m/s . . . . .	92

## Lista de figuras

1	Modelos de las palas del rotor para la prueba de su rendimiento. Fuente (28)	20
2	Aletas en las puntas de los álabes con varios ángulos . Fuente (37)	21
3	Esquema de la parametrización del perfil . Fuente (24)	23
4	Perfiles aerodinámicos utilizados a bajos números de Reynolds	26
5	Curvas de comparación de rendimiento para diferentes perfiles aerodinámicos en un $Re$ igual a $1 \times 10^5$	27
6	Curvas de comparación de rendimiento para diferentes perfiles aerodinámicos en un $Re$ igual a $5 \times 10^4$	28
7	Diagrama de flujo para la optimización de los perfiles aerodinámicos	29
8	Perfil aerodinámico a partir de curvas de Bézier. Forma geométrica del perfil en color azul, puntos de control en color negro	30
9	Comparación de perfil base SG6040, GIM3 y perfil optimizado OPT3 para: $Re = 6 \times 10^4$	33
10	$C_l/C_d$ vs ángulo de ataque para los perfiles SG6040 y el perfil diseñado preliminar GIM3	34
11	$C_l$ vs ángulo de ataque para los perfiles SG6040 y el perfil diseñado preliminar GIM3	34
12	Comparación de perfiles para: $Re = 5,2 \times 10^4$ donde el perfil Opt3 es llamado RAIZ y es comparado con el perfil base SG6040	34
13	Curvas de comparación de comportamiento para perfiles MED5 y SG6043. $C_l/C_d$ vs ángulo de ataque ( $AoA$ ) para un número de Reynolds igual a 60.000	36
14	Curvas de comparación de comportamiento para perfiles MED5 y SG6043. $C_l/C_d$ vs ángulo de ataque ( $AoA$ ) para un número de Reynolds igual a 100.000	36
15	Curvas de comparación de $C_l$ vs $AoA$ para los perfiles MED5 y SG6043 en número de Reynolds igual a 100.000	37
16	Curvas de comparación de $C_l$ vs $C_d$ para los perfiles MED5 y SG6043 para un número de Reynolds igual a 100.000	37
17	Volumen de control creado por el área del rotor $A$ y la velocidad del viento como $l$ . Fuente: (6)	39
18	Disco actuador conservación de la masa aguas arriba y abajo del disco. Fuente: (42)	41
19	Disco actuador giratorio y estela debido a la rotación. Fuente: (5)	42
20	Esquema de teoría de elemento de álabes. Fuente: (5)	44
21	Geometría del perfil para analizar. Fuente (42)	45

22	División del álabe para diseño de elemento. Fuente (42)	47
23	Diagrama de flujo para cálculo de la cuerda y ángulo según el método BEM	50
24	División del álabe en 12 secciones y su distribución de perfiles	51
25	Distribución de la cuerda y ángulo de inclinación a lo largo del álabe calculados con la metodología BEM	52
26	Piezas impresas por manufactura aditiva (Impresión 3D)	60
27	Rotor impreso en 3D situado en la sección de prueba del túnel de viento	61
28	Montaje del sensor de torque: 1.Pieza acople con rotor, 2. Acople flexible, 3. Sensor de torque, 4. Disco mecánico para frenado	62
29	Descripción del dominio para análisis 2D	65
30	Mallada por defecto para el perfil	66
31	"Sphere of Influence". Alrededor del perfil	66
32	Divisiones para el dominio	67
33	Mallado tipo C para el análisis fluido dinámico en 2D	68
34	Grafica de convergencia de malla. Perfil SG6040 vel=4,55 m/s, $\alpha = 8^\circ$	70
35	Contorno de presiones al rededor de un perfil	72
36	Coefficiente de presión para el perfil RAIZ y SG6040	73
37	Coefficiente de presión valores experimentales y numéricos Fuente: Cornell ((25))	74
38	Coefficiente de presión obtenida en software XFOIL mismas condiciones	75
39	Comparación geometrica de los perfiles diseñados	75
40	Alineación de los perfiles del álabe en la cuarta cuerda	76
41	Dominio para análisis en 3 dimensiones	78
42	Descripción en dirección axial del dominio en función del diametro del rotor D	79
43	Análisis de convergencia de mallado	80
44	Velocidad angular del rotor con la familia de perfiles optimizados para un viento de 11m/s	81
45	Potencia obtenida del rotor con la familia de perfiles optimizados para un viento de 11m/s	82
46	Velocidad angular vs time step para viento de 11m/s	83
47	Potencia vs Vel. Angular para viento de 11m/s	83
48	Velocidad angular vs time step para viento de 9m/s	84
49	Potencia vs time step para viento de 9m/s	85
50	Velocidad angular vs time step para viento de 6m/s	86
51	Potencia vs time step para viento de 6m/s	86

52	Velocidad angular [rad/s] vs tiempo [s] para viento de $6m/s$ . . . . .	89
53	Potencia [W] vs TSR para viento de $6m/s$ . . . . .	89
54	Velocidad angular [rad/s] vs tiempo [s] para viento de $9m/s$ . . . . .	90
55	Potencia [W] vs TSR para viento de $9m/s$ . . . . .	90
56	Velocidad angular [rad/s] vs tiempo [s] para viento de $10,67m/s$ . . . . .	91
57	Potencia [W] vs TSR para viento de $10,67m/s$ . . . . .	92

## Lista de símbolos

$C_l$	Coefficiente de sustentación
$C_d$	Coefficiente de arrastre
$MFD$	Metodo de direcciones factibles
$Re$	Número de Reynolds
$AoA$	Ángulo de ataque
$\rho$	densidad
$c$	longitud de cuerda
$V$	Velocidad relativa del fluido
$\mu$	viscosidad dinámica
$Ec$	Energía cinética
$Cp$	Coefficiente de potencia
$U$	Velocidad del viento

## Resumen

El aumento de la población y la industrialización de los procesos productivos requieren cada vez mayor cantidad de energía, en ocasiones para ser suministrada lleva al incremento de quema de combustibles fósiles; que generan mayor cantidad de contaminantes y gases de efecto invernadero. La Energía eólica y solar fotovoltaica ofrecen a corto y largo plazo una alternativa para la reducción de estos contaminantes. En Colombia se motiva el uso de fuentes de energía alternativa con el fin de disminuir la emisión de gases de efecto invernadero, siendo la energía eólica una de estas fuentes (9), (14). Las turbinas eólicas de eje horizontal tienen una gran oportunidad de aprovechar el recurso eólico de baja velocidad debido a su alta eficiencia y como dice (63) las turbinas de pequeño tamaño son un buen objetivo para ser optimizadas, pues las velocidades de viento menores a  $6,5\text{m/s}$  no están siendo aprovechadas siendo estas turbinas de pequeño porte las indicadas para zonas de difícil acceso y zonas urbanas.

En este estudio se buscó mejorar el rendimiento de un perfil aerodinámico mediante implementación de estrategias de optimización, el cual será usado en los álabes de una turbina eólica de pequeño tamaño y baja potencia, Siendo una oportunidad para obtener rendimientos aprovechables de vientos de baja velocidad, presentes en zonas donde la red interconectada de energía eléctrica tiene carencias.

Para el estudio se utilizó una metodología de optimización sobre los perfiles involucrando el software Xfoil como método de evaluación del rendimiento aerodinámico, este software requiere bajo costo computacional, pero ha demostrado tener suficiente exactitud para la predicción de los coeficiente de arrastre y sustentación necesarios para evaluar el rendimiento aerodinámico (44). Además, se realizó evaluación numérica mediante software CFD. De forma complementaria se hicieron análisis experimentales en túnel de viento con modelo escala del rotor.

*Palabras clave:* perfil aerodinámico, coeficiente de arrastre, coeficiente de sustentación, energía eólica, Xfoil.

---

### Abstract

The increase in population and the industrialization of production processes require increasingly larger amounts of energy. To meet this demand, it is necessary to increase the burning of fossil fuels, which generate higher quantities of pollutants and greenhouse gases. Wind and solar energy offer a short and long-term alternative for reducing these pollutants. In Colombia, the use of alternative energy sources is encouraged in order to decrease the emission of greenhouse gases, with wind energy being one of these sources (9), (14). Horizontal axis wind turbines have a great opportunity to harness low-speed wind resources due to their high efficiency as say (63) Small-sized turbines are a good target for optimization since wind speeds below 6.5m/s are not being utilized. These small turbines are suitable for areas with difficult access and urban areas.

In this study, the aim was to enhance the performance of an aerodynamic profile through the implementation of optimization strategies. This profile will be used in the blades of a small-sized, low-power wind turbine. This presents an opportunity to achieve usable yields from low-speed winds, particularly in areas where the interconnected electrical energy grid is lacking.

For this study, an optimization methodology was employed on the profiles involving the Xfoil software as a method for assessing aerodynamic performance. This software requires low computational cost but has demonstrated sufficient accuracy in predicting the drag and lift coefficients necessary for evaluating aerodynamic performance (44). Additionally, numerical evaluation was conducted using Computational Fluid Dynamics (CFD) software. Complementary experimental analyses were carried out in a wind tunnel using a scaled model of the rotor.

*Keywords:* airfoil, drag coefficient, lift coefficient, wind energy, Xfoil.

## Introducción

El aumento de la población y la industrialización de los procesos productivos requieren cada vez mayor cantidad de energía, cuyo incremento resulta en la mayoría de las ocasiones, mayor consumo de combustibles fósiles; que generan mayor cantidad de contaminantes y gases de efecto invernadero. La energía eólica y solar fotovoltaica ofrecen a corto y largo plazo una alternativa para la reducción de estos contaminantes (9). En Colombia para la disminución de emisión de gases de efecto invernadero se promueve el uso de fuentes no convencionales de energía (FNCE), siendo la energía eólica una de ellas. Colombia busca disminuir la dependencia de fuentes fósiles e hídricas de gran escala, estas últimas representan entre 70% y 80% de la energía generada en la matriz eléctrica y periódicamente sufren riesgo de escasez por eventos climáticos como el fenómeno del niño, que en los años 90's llevó a una crisis energética. A esto se suma el aumento de precios del gas natural y la tendencia en la disminución de precio de las energías renovables (14). En el país existe un gran potencial de generación eólica, 18GW solamente en la región de la Guajira, pero en otras regiones puede tener gran variabilidad tanto en dirección y magnitud donde el promedio de velocidades anuales oscila entre los 4m/s y 5m/s. Estas bajas velocidades representan un potencial explotable en regiones como Antioquia, Sur del Catatumbo (específicamente Norte de Santander), Cundinamarca y el bajo Magdalena (48). A pesar de eso, en 2017 solo el 0,4% del potencial eólico ha sido utilizado y aproximadamente el 50% del territorio nacional corresponde a zonas no interconectadas al sistema nacional de red eléctrica (45). Por ejemplo el caso de la región del Catatumbo donde solo 5 de 11 municipios tenían disposición de cobertura eléctrica igual o por encima del promedio nacional, siendo parte de las casi 1847 localidades con deficiente suministro de energía eléctrica (16).

Basado en lo anterior es claro que existe un potencial no explotado de energía eólica y es importante resaltar que dicho recurso se encuentra disponible mayoritariamente en un rango de bajas velocidades. Algunas zonas con potencial eólico presentan problemas de cobertura eléctrica y son de difícil acceso, los aerogeneradores de pequeño tamaño pueden ser usados en estas regiones para suplir parte de la energía al no necesitar grandes infraestructuras. Considerando de pequeño tamaño, turbinas eólicas con diámetros menores a 5m y que pueden generar hasta 10kW (63). De manera más específica, tomando lo descrito por Clausen y Wood tamaños considerados pequeños se clasificarían en micro (menos de 1,5m de radio), gama media (menos de 2,5m de radio) y mini (menos de 5m de radio) (13).

---

Las turbinas eólicas pequeñas son una alternativa prometedora para generar electricidad limpia, renovable y económica en zonas remotas donde la red eléctrica no llega o es insuficiente. La finalidad de esta investigación se centra en ayudar a dichas comunidades a suplir algunos gastos eléctricos que no requieran un alto potencial eléctrico, como por ejemplo cargar una batería, dispositivos electrónicos o proporcionar energía a lámparas LED. Sin embargo, el diseño y la optimización enfrenta varios desafíos técnicos, económicos y sociales que limitan su difusión y aprovechamiento. Entre estos desafíos se encuentran: La baja velocidad promedio del viento en el territorio de interés, que reduce la potencia y el factor de capacidad de las turbinas eólicas de pequeño tamaño. La alta turbulencia y variabilidad del viento en zonas montañosas, que afecta la aerodinámica y la estabilidad de los aerogeneradores. Esto produce que se aumente el arrastre y la fatiga de los álabes, reduce la eficiencia de extracción de energía del viento y genera fluctuaciones en la tensión y la frecuencia de la electricidad producida. Una de las barreras más importantes en las que se centra esta investigación es en la dificultad para acceder a las zonas de su instalación. Lo que se busca es tener un aerogenerador que sea fácil de transportar, de instalar y que sea fácil de operar teniendo en cuenta que por lo general las comunidades de estas zonas cuentan con poca información y conciencia sobre los beneficios.

Como indica Van Treuren, las turbinas eólicas de pequeño tamaño son un buen objetivo para ser optimizadas debido a que las velocidades bajas no están siendo aprovechadas en comparación con los vientos mayores a 6,5m/s para los cuales cualquier tipo de turbina eólica parece adecuado, a pesar de que hay estimaciones que indican que el costo de su uso es rentable en especial comparado con las tecnologías para la generación eólica marina (63). Los aerogeneradores de baja potencia son empleados generalmente para el uso doméstico y agrícola, se utilizan para disminuir el gasto energético en cascos urbanos o para sitios donde la conexión a la red es complicada o inexistente, estos pueden utilizar baterías para almacenar energía cuando hay problemas de continuidad además de alternar el uso del aerogenerador con otros tipos de generación eléctrica (1). En la evaluación del ciclo de vida de aerogeneradores de eje horizontal a pequeña escala realizada por Wang y Teah en Taiwán, se ha logrado encontrar que para algunas de estas turbinas la retribución de la energía utilizada en fabricación y otros procesos de su ciclo de vida es muy elevado, según cálculos, la retribución puede llegar a ser mayor a 160 años (65). Sin embargo, existen campos de investigación que se pueden explorar; estos pueden ser los componentes internos o los componentes aerodinámicos entre los cuales el elemento principal es el rotor, que guarda mayor relación con la eficiencia del aerogenerador y depende de los perfiles aerodinámicos utilizados. Sobre estos aún falta aumentar la base

de datos para bajos números de Reynolds (35). Entendiendo bajo Reynolds por debajo de  $5 \times 10^5$  para el caso de álabes (40). Aunque algunos trabajos exploran el aumento de rendimiento de las turbinas al utilizar protuberancias (28) o winglets (37), son opciones de optimización. Sin embargo, pueden generar dificultad en la fabricación de los rotores. El uso de perfiles aerodinámicos, diseñados para bajos números de Reynolds puede ser una solución práctica para reducir la velocidad de viento necesaria para funcionamiento o el arranque sin aumentar procesos y costos de fabricación.

## 1 Objetivos

### 1.1 Objetivo general

Diseñar una microturbina de eje horizontal para el aprovechamiento de vientos de baja velocidad presentes en regiones del territorio colombiano.

### 1.2 Objetivos específicos

1. Seleccionar una familia de perfiles aerodinámicos para ser optimizada basándose en el rendimiento aerodinámico, medido por los coeficientes de sustentación, arrastre y su relación entre sí.
2. Optimizar la familia de perfiles aerodinámicos seleccionada, teniendo como criterio su comportamiento aerodinámico medido en: coeficiente de sustentación, coeficiente de arrastre y su relación entre sí.
3. Diseñar un modelo en tres dimensiones de turbina eólica utilizando los perfiles optimizados y construir un modelo a escala.
4. Evaluar el desempeño de la turbina diseñada mediante comparación de resultados obtenidos de manera numérica y experimental.

### 1.3 Etapas del trabajo de investigación

1. Búsqueda de información

Se realizará una búsqueda bibliográfica sobre los trabajos más relevantes en el campo del diseño de perfiles aerodinámicos aplicados en álabes de aerogeneradores y trabajos relacionados con el área de investigación con enfoques numérico y experimental. Como resultado se espera identificar los métodos y técnicas utilizadas para el diseño, evaluación, supuestos y condiciones o restricciones tenidas en cuenta para turbinas eólicas de eje horizontal de pequeño tamaño y los perfiles aerodinámicos utilizados en estas. Debido al enfoque numérico de buena parte del trabajo, debe ser estudiado con detenimiento el análisis computacional, tener en cuenta modelos de solución que se ajusten a problemas en la capa límite asociados a bajos números de Reynolds.

## 2. Optimización de los perfiles aerodinámicos

Seguido de la etapa de búsqueda de información, se procederá a la implementación de dicha información relacionada con el método de optimización. Se realizará una selección del método de parametrización que más se adecue, la definición de las restricciones y los supuestos que permitan solucionar la función objetivo. Se espera que dicha función esté enfocada ya sea en minimizar el coeficiente de arrastre o en maximizar la relación del rendimiento aerodinámico (definida por el coeficiente de sustentación y el coeficiente de arrastre  $C_l/C_d$ ). Tras el diseño de los perfiles se espera comparar computacionalmente con perfiles encontrados en la teoría, variables como el coeficiente de sustentación y coeficiente de arrastre en el análisis en dos dimensiones y coeficiente de potencia en el caso de tres dimensiones en el modelo de turbina diseñado en la etapa siguiente. En el proceso de optimización se planea usar el software Xfoil en el algoritmo, ya que permite su acople en distintos sistemas de cómputo numérico y así evaluar las características aerodinámicas del perfil en cada modificación geométrica.

## 3. Diseño del modelo de turbina eólica con los perfiles diseñados

En esta etapa del proyecto se pretende realizar el diseño de una turbina eólica de eje horizontal para su posterior evaluación mediante CFD y experimentación. Para este diseño se plantea la utilización de la metodología BEM en el cálculo de la cuerda y el ángulo de inclinación de los álabes, basado en las características aerodinámicas encontradas en los perfiles obtenidos en la etapa anterior. Utilizando software CAD para la generación del modelo, además de obtener información necesaria para la evaluación numérica, como parámetros inerciales que el software puede calcular. El modelo a escala estará basado en el diseño CAD conseguido en esta etapa

del proyecto, pero estará sujeto a las herramientas encontradas para la evaluación experimental, donde existen variables como: tamaño del espacio en túnel de viento.

#### 4. Análisis numérico y experimental de la turbina diseñada.

En esta etapa se estudiará el comportamiento y desempeño aerodinámico del modelo de la turbina eólica. Para esto se pretende el uso de herramientas computacionales para 2D como XFOIL y para 3D Ansys Fluent teniendo en cuenta parámetros y condiciones de funcionamiento, condiciones extremas y condiciones de arranque que sean definidos por el estudio bibliográfico para distintas zonas de Colombia. Adicional se busca realizar una evaluación experimental cuya finalidad es la validación de resultados obtenidos en los estudios numéricos. Para dicha prueba se espera contar con un túnel de viento que se encuentra en construcción en las instalaciones de la Universidad de Pamplona, donde el tamaño del modelo escala de la turbina dependerá del área transversal de la zona de pruebas del túnel. Dicho espacio se espera sea de forma cuadrada de 1m x 1m. El procedimiento de fabricación del modelo conllevará el uso de manufactura aditiva, métodos de corte en CNC u otro método que facilite su construcción. Los parámetros a tener en cuenta son la velocidad del viento, el torque y velocidad de giro del rotor, medidos por un anemómetro y un sensor de torque o en su defecto una combinación de medición de voltaje y amperaje.

#### 5. Documentación y conclusión

La meta de esta etapa es la divulgación de los resultados y las conclusiones finales del trabajo, una descripción de procedimientos y metodologías utilizadas junto con las condiciones consideradas durante todo el proceso. Además, recomendaciones y sugerencias que sean relevantes.

## 2 Marco Conceptual

Las turbinas eólicas de eje horizontal (HAWT Horizontal Axis Wind Turbine por sus siglas en inglés) tienen algunas ventajas y desventajas cuando se comparan con los aerogeneradores de eje vertical (VAWT, Vertical Axis Wind Turbine por sus siglas en inglés), puede tener una mayor eficiencia en la extracción de energía del viento, debido a que funciona a velocidad de viento mayor con la cual es impactado, además de ser inmune al retroceso que puede presentarse en los VAWT cuando los alabes giran en contra del viento cuando van de regreso a la corriente. Pero como desventaja siempre debe estar apuntando a la dirección del viento, y se hace necesario un mecanismo adicional que le permita orientarse. Por lo general para aerogeneradores pequeños se usa una veleta (31).

Para el aprovechamiento del viento los aerogeneradores tienen gran variedad de tamaños, los más grandes tienen un atractivo mayor por el tiempo en el que pueden retribuir lo invertido en ellos, pero la mayor parte del mundo no puede utilizar turbinas de gran escala por no tener suficiente potencial eólico, además de necesitar sumas de capital y extensiones de tierra de gran tamaño para posicionar las grandes turbinas; así los aerogeneradores de pequeño tamaño ganan interés (66). Los aerogeneradores se pueden clasificar según el tamaño, los aerogeneradores de escala pequeña se pueden dividir según el radio de su rotor y la potencia como: micro turbinas con 1,5m de radio y potencia 1kW de rango medio con 2,5m de radio y potencia 5kW y mini con 5m de radio y de 20kW o más potencia (13).

Pequeños sistemas de energía eólica se están distribuyendo como una fuente popular de energía renovable en sitios remotos, suburbanos, incluso ciudades debido al ascendente costo de los combustibles (64). Los aerogeneradores pequeños se convierten en herramientas vitales de extracción pues a diferencia de las grandes turbinas no necesitan las mejores condiciones de viento, pero eso se ve reflejado en el coeficiente de potencia alrededor de 25% un valor menor que los 45% que pueden alcanzar las turbinas de gran tamaño (55).

De manera general las partes de un aerogenerador de eje horizontal (HAWT) normalmente comprende una góndola en lo alto de una torre, extrae energía del viento mediante un rotor que usa álabes o palas que transmiten su energía a un generador que se encuentra dentro de la góndola (8) así como el rotor consiste de palas y un cubo o núcleo, dentro de la góndola se encuentran partes mecánicas y eléctricas rotativas como la caja de engranes y el generador. Como partes del aerogenerador también se encuentran compo-

mentos electrónicos y cableado y controles de máquina (42).

La eficiencia del álabe determina el rendimiento del rotor de la turbina, el diseño de este álabe es un proceso que no se puede hacer en un paso, es necesario realizar iteraciones. Para la optimización del diseño se debe tener en cuenta como objetivo un criterio aerodinámico como, el máximo coeficiente de potencia, hasta que es logrado este objetivo se puede dar finalizada la optimización (60). Con el fin de obtener la mayor cantidad de energía, los aerogeneradores pequeños son diseñados con una alta relación de velocidad en la punta que resulta en una mayor distribución del ángulo de giro de la pala o álabe y un ángulo de ataque alto. Por el ángulo de ataque tan alto en especial en la punta de la pala es difícil la generación de un torque suficiente de giro, por tanto, se dificulta el arranque a bajas velocidades de viento (54) para turbinas de gran tamaño, una manera de resolver el problema del alto ángulo de ataque es la variación dinámica de la inclinación del álabe con forme lo requiera, pero para aerogeneradores pequeños no es viable económicamente debido al modesto tamaño del sistema, el control del ángulo podría tener un costo muy alto en comparación con la energía que se podría obtener. Por esta razón es más razonable optimizar el diseño del rotor (50).

En la búsqueda de la optimización se ve la necesidad de seleccionar perfiles aerodinámicos cuyo rendimiento sea bueno a bajos números de Reynolds (62) Debido a las bajas velocidades de viento y el pequeño tamaño de los álabes los números de Reynolds a los cuales se encuentran trabajando los aerogeneradores de escalas pequeñas están en valores debajo de 500.000 (35). Números donde se presentan problemas de separación de la capa límite (66). En distintos trabajos se ha venido adelantando estudios de la geometría de los rotores mediante el uso de procedimientos automáticos de mejora combinados con procedimientos con una tradición más larga, más precisamente enfocados en los álabes de los aerogeneradores. Para minimizar el tiempo de arranque y aumentar el coeficiente de potencia se han aplicado algoritmos genéticos, métodos de lattice vortex o estrategias de evolución diferencial combinados con teoría BEM. como es el caso de (10). que utilizan un procedimiento de optimización de la geometría combinando CFD y RSM (Response Surface methodology) un proceso de optimización con énfasis en la fuerza de sustentación y el rendimiento aerodinámico obtenido de la relación de la sustentación y el arrastre (10).

Para el diseño geométrico del álabe es comúnmente utilizado el método BEM (Blade Element Momentum Theory por sus siglas en inglés) mezcla de la teoría de momento y la teoría de elemento de álabe. Donde la pala es dividida en secciones en las cuales se calcula el tamaño de la cuerda, el ángulo de posición y el coeficiente de potencia y luego

son integrados los datos de cada sección. Para el cálculo se utilizan los datos de coeficiente de sustentación y arrastre de los perfiles aerodinámicos (51) Teniendo en cuenta el método de diseño diversos autores desarrollan técnicas para la optimización, por ejemplo (60), describe una estrategia donde, un álabe es óptimo en una sección si el valor del coeficiente de potencia es máximo, entonces los factores de inducción axial y tangencial serán óptimos en esa sección, de acuerdo con ese principio los autores dicen que dando un valor máximo para coeficiente de potencia en las ecuaciones de predicción, los valores de la cuerda y el ángulo óptimos se podrán calcular en la sección (60) también el método BEM analiza el comportamiento del álabe diseñado por este mismo método, como se ve en el trabajo de (17) realizó el diseño de un álabe para un aerogenerador horizontal de pequeño tamaño que fue diseñado según el método BEM y también fue analizado por el mismo método. Según el trabajo lograron obtener un coeficiente de potencia de 0,53 con valores de la relación de velocidad en la punta cercanos a 6, en ese trabajo utilizaron el perfil SG6043 y herramientas como MATLAB y XFOIL para generar códigos de diseño y evaluación. El método de diseño es llamado en este trabajo como método de Schmitz optimum rotor design (17).

El cálculo del coeficiente de potencia no se queda solo en el método BEM si no también son usados diferentes softwares para la evaluación no solo del rendimiento del rotor, sino para los distintos fenómenos que se pueden presentar, una herramienta usada son softwares CFD, también se encuentran otros con menor costo computacional o de hardware como es Qblade el cual usa el código de Xfoil pero con un entorno más amigable y la teoría BEM para medir el rendimiento. Como muestra Ali Said en su trabajo donde analizó 4 diferentes perfiles aerodinámicos (NACA 4412, SG6043, SD7062 y S833), comparando datos con valores experimentales de la turbina de 3kW a 10m/s velocidad del viento. El rotor tenía 1,5m de radio (Said et al.). En otro trabajo se realiza un estudio y optimización de la geometría de un aerogenerador para el trabajo en números de Reynolds entre 100.000 y 250.000, velocidad de viento de 8m/s, con un rotor de radio de 1m, número de álabes de 3 a 6 y los perfiles SG6043 y NACA 4412. Para la selección del perfil aerodinámico en el trabajo se usó XFOIL comparando los dos perfiles nombrados anteriormente creando 4 diseños algunos de un solo perfil y otros mixtos con ambos perfiles distribuidos en el álabe, con una relación de velocidad en la punta entre 4 y 6 los valores de mejor coeficiente de potencia se encontraron con velocidades entre 350 y 450 rpm. También fue logrado una velocidad de arranque de 3.2 m/s y la velocidad máxima para el corte de 20 m/s. En la evaluación de los diseños el valor más alto para el coeficiente de potencia llegando a 0,44 lo obtuvo un álabe con perfiles mixtos (47).

Al utilizar softwares para la evaluación del rendimiento, la selección de un modelo matemático adecuado es importante, se pueden encontrar ejemplos de modelos que demuestran aproximaciones experimentales, como el caso del trabajo de (29) donde comparan distintos modelos de análisis con datos experimentales, ellos concluyen que el modelo Reynolds Stress Model es excelente para predecir la velocidad para el inicio de rotación y los vórtices generados en la punta del álabe además del déficit debido a la estela con buena precisión (29). Otro modelo que muestra resultados comparables con datos experimentales en CFD es el modelo de turbulencia de segundo orden SST- $k\omega$  donde lo compararon con datos de un rotor de 4m de diámetro donde 1,7m corresponden al álabe construido con un perfil NACA 4418. Otro punto importante de este trabajo es la utilización de 5 mallas con diferente cantidad de nodos para demostrar que no necesariamente entre mayor número de elementos tenga un mejor resultado si no que en un momento dado refinar más la malla no va a dar diferencia o mejora (38).

El modelo SST- $k\omega$  también es utilizado en el estudio de diseño de un perfil aerodinámico que fue diseñado para un explorador de Marte que debía funcionar bajo condiciones de bajo números de Reynolds, junto a este también fue utilizado el modelo de transición de dos ecuaciones Gamma-Re  $\gamma-Re_\theta$  para la predicción del punto de transición entre laminar y turbulento (34) este estudio es realizado por los problemas de separación de la capa límite de fluido que puede tener el aeroplano debido al bajo número de Reynolds, en este caso es por la baja densidad que tiene la atmosfera marciana en comparación con la del planeta Tierra, y es tenido en cuenta que utilizar diseños para altos números de Reynolds degrada drásticamente el rendimiento del perfil, este fenómeno no solo ocurre en aeroplanos, los aerogeneradores no escapan del problema del número de Reynolds bajo, el cual puede deberse a la baja velocidad de viento a la que sea puesto en funcionamiento. Al igual que el trabajo de (34) los perfiles de los aerogeneradores deben ser optimizados para trabajar en cada vez más bajas velocidades de viento.

Para el diseño del álabe del aerogenerador como una parte fundamental del rendimiento del mismo, es importante la selección del perfil o perfiles utilizados para la construcción, antes de ser seleccionados son comparados, buscando el cumplimiento del comportamiento para las condiciones aerodinámicas. Además de la selección de un perfil una mejor idea es el diseño u optimización tomando un perfil base. Teniendo en cuenta que una optimización es proceso de determinación de las variables de decisión para minimizar o maximizar sus valores, donde los problemas, es un proceso y tedioso para la mayoría de problemas, incluso hay muchas soluciones locales a la optimización que no garantizan la solución más óptima a nivel global (15).

En su esencia más general una optimización numérica soluciona las restricciones no lineales de un problema para encontrar un conjunto de variables de diseño que se pueden contener en un vector, durante mucho tiempo se han desarrollado y propuestos algunos métodos de optimización con conceptos teóricos muy alejados unos de otros. En general es difícil seleccionar uno como el mejor de todos debido a las ventajas y desventajas que tienen (22).

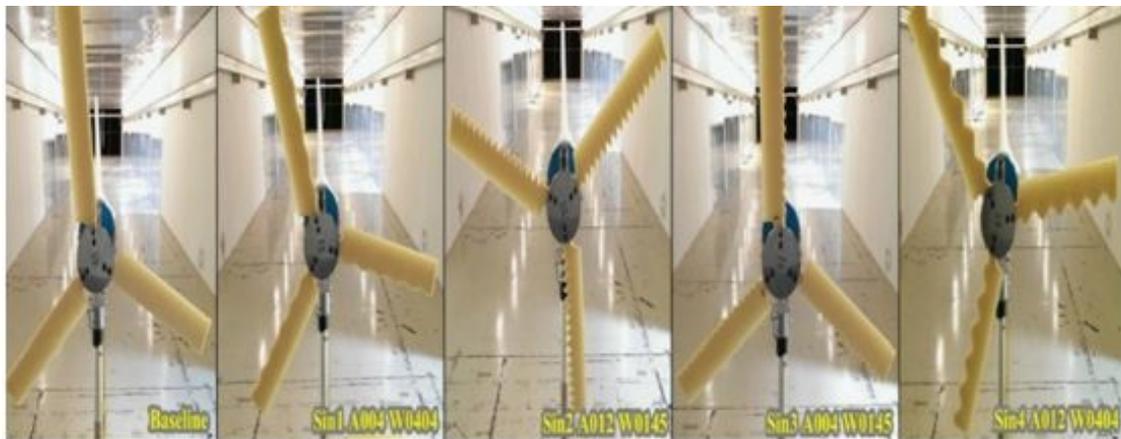
Por más de 100 años el diseño de perfiles aerodinámicos sigue capturando el interés de los practicantes de la aerodinámica aplicada, este interés se oxigena debido a la combinación de los nuevos requerimientos de diseño para aplicaciones únicas y nuevas tecnologías. Por lo general el diseño de los perfiles requiere información típica como el coeficiente de sustentación máximo, el rango de operación donde se encuentra mínimo el arrastre. Pero estos requerimientos pueden trasladarse a características específicas como la distribución de presión, mientras que una gran sustentación requerida puede prosperar por la limitación del pico de succión en el borde de ataque. Son características que claramente están incluidas en cualquier método de diseño de un perfil (52).

Una técnica de diseño muy popular para los perfiles es la técnica inversa, donde su principio básico es la prescripción del coeficiente de presión y posteriormente es creada la geometría del perfil, mediante modificaciones iterativas de la distribución de presiones en la superficie del perfil, el diseñador generaba la geometría que cumplía con los requerimientos. Un método con algunas desventajas asociadas con la técnica, como la dificultad para utilizar múltiples requerimientos al mismo tiempo. Una alternativa para la solución de estos problemas es una optimización de diseño multidisciplinaria, una optimización numérica (23).

Las restricciones que se deben aplicar en el diseño del perfil llegan a ser muy variadas según los requerimientos, como pueden ser ruido producido o la misma seguridad del aerogenerador. Como la restricciones mostradas por (12) en su revisión, una de ellas es la restricción del número mach en la punta del álabe no sea mayor a 0,3 para evitar el ruido causado por la compresibilidad, otro es el factor de inducción axial que no debería exceder de 0,5 para evitar que la velocidad del rotor se torne negativa. En términos de geometría una restricción de los puntos en su posición, de la localización es importante como restricción física y de fabricación (12).

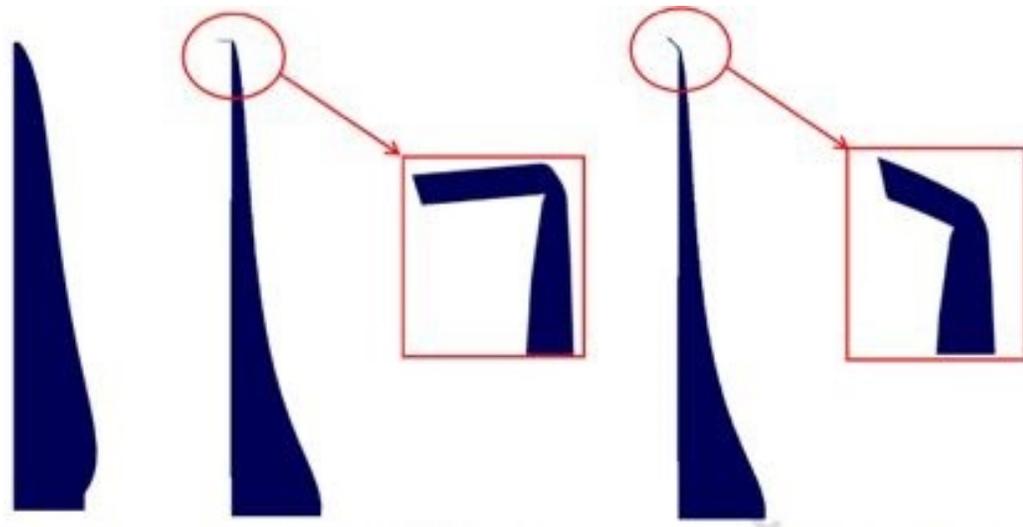
Para la optimización otros estudios realizan cambios en la geometría que se pueden describir como protuberancias, (28) muestra un ejemplo del cambio del rendimiento

debido a protuberancias o variaciones de la geometría a lo largo del álabe. En el trabajo se probaron 4 diferentes protuberancias con formas de ondas como se ve en la Figura 1 donde se encontró que las protuberancias con amplitud mayor resultaban con un mejor rendimiento, también los autores concluyeron que para aerogeneradores de pequeña escala diseñados para bajos valores de velocidad de viento estas protuberancias pueden mejorar el rendimiento. En la punta también se ven cambios de la geometría convencional como la creación de “winglets” pequeñas aletas al terminar el álabe usados para evitar la pérdida por la vorticidad en la punta. Como muestran (37) fueron probadas varias versiones con distintos tamaños y ángulos, algunas fueron estudiadas experimentalmente. En este estudio se utilizó Ansys Fluent en estado estable, con un número máximo de elementos mayor a 3,5 millones. Se diseñó el álabe con radio de 0,35m por medio de metodología BEM con una velocidad de viento para inicio de rotación de 3,4 m/s los “winglets” variaban de tamaño desde el 1% del radio del rotor hasta el 7% y ángulo de inclinación de 15° en 15° grados hasta llegar a 90°. obtuvieron como resultado que entre mayor tamaño de winglet mejora los coeficientes de potencia y sustentación, valores que también variaron con el ángulo de inclinación, pero una desventaja es el incremento del momento de flexión por el tamaño, con un proceso del tamaño y el ángulo para el “winglets” resultaron valores óptimos de tamaño 6,32% y un ángulo de inclinación de 48,3° donde se obtuvo un 8,78% de mejora en el coeficiente de potencia y coeficiente de torque obtenidos para una relación de velocidad en la punta igual a 5 (37) en la Figura 2 se puede ver el modelo de estas aletas.



**Figura 1**

*Modelos de las palas del rotor para la prueba de su rendimiento. Fuente (28)*



**Figura 2**

*Aletas en las puntas de los álabes con varios ángulos . Fuente (37)*

El diseño de un aerogenerador y la optimización no solo compete al diseño del rotor, los componentes internos de la góndola también intervienen, como dicen (3) se pueden ver 2 clases de partes, las mecánicas y las eléctricas. En su diseño y fabricación de una turbina eólica de pequeño tamaño. En este trabajo usaron imanes de neodimio grado N52. Los imanes permanentes se colocaron dentro del rotor para producir una corriente alterna trifásica. una indicación que hacen es que la baja velocidad y bajo torque en un aerogenerador de pequeña escala, son balanceados para una carga efectiva de la batería utilizada. Para ellos el mayor impacto sobre la rotación para la producción de potencia depende principalmente del número de polos del generador y la estructura del embobinado con el diámetro de los alambres (3)

## 2.1 Teoría de optimización del perfil

Algoritmo basado en gradiente: se puede tomar como una categoría de técnicas de optimización que usan el gradiente del objetivo como función para encontrar una solución óptima. Cada iteración del algoritmo ajusta los valores de las variables de decisión de tal forma un valor de la función objetivo menor. Ellos son usados de mejor manera en sistemas donde hay un claro objetivo a optimizar (22).

La optimización numérica soluciona las restricciones no lineales para encontrar un

conjunto de variables de diseño  $X$ . en la ecuación 1 se define la función objetivo que depende del valor de las variables  $X$ . las ecuaciones 2 y 3 son inecuaciones de restricción (las restricciones de igualdad también se pueden escribir como inecuaciones en la ecuación 2 y la ecuación 4 define la región de búsqueda para el mínimo valor. Los límites son definidos por los grados de libertad por la ecuación 4.

$$\text{Minimizar } F(x) \quad (1)$$

$$g_j(x) \leq 0 \quad j = 1, M \quad (2)$$

$$h_x(x) = 0 \quad k = 1, L \quad (3)$$

$$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U \quad i = 1, N \quad (4)$$

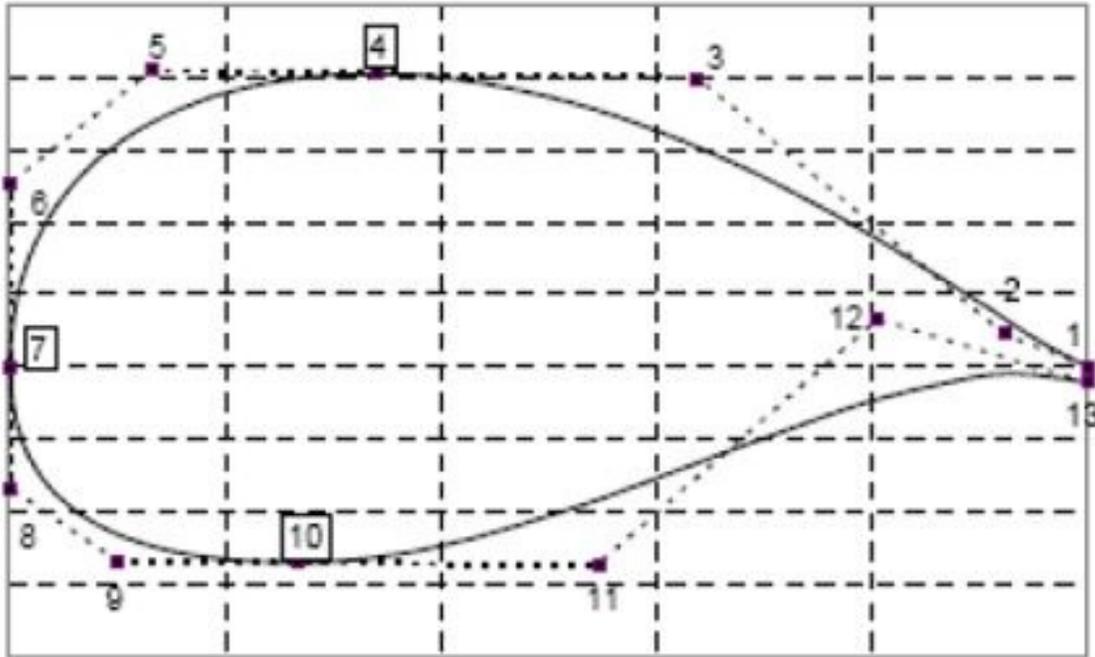
Donde  $N$  es el número de variables  $x$ ,  $M$  es el número de inecuaciones de restricción y  $L$  es el número de igualdades de restricción (23).

(19) describe las necesidades para solucionar el problema de optimización:

- Desarrollo de un conjunto de parámetros que representen la geometría del perfil.
- Desarrollo de herramientas que genere un conjunto de parámetros que compute la función objetivo y las restricciones de optimización. Esto involucra una herramienta de análisis aerodinámico.
- Desarrollo de una herramienta que genere las variables de diseño, función objetivo y restricciones que generen una nueva geometría aerodinámica más cercano al óptimo o el más óptimo.

Para la parametrización geométrica el perfil puede ser descrito por líneas polinomiales de distintos grados. Una forma es dividir la geometría de tal manera que la parametrización sea hecha por polinomios de Bézier de tercer orden como muestra (24) donde

las variables de diseño son las posiciones tanto horizontal como vertical de los puntos de control del polinomio mostrado en la Figura 3.



**Figura 3**

*Esquema de la parametrización del perfil . Fuente (24)*

La división de la geometría puede tener en cuenta distintos sectores del perfil, la superficie superior o superficie inferior, o teniendo en cuenta los bordes de ataque o de fuga ya que el borde de ataque se torna crítico para grandes números Mach, donde las altas velocidades en la superficie inferior y una tendencia a incrementar las pérdidas. La geometría del borde de ataque también influye en el rendimiento ya sea una geometría elíptica o circular (11).

### 3 Selección de perfiles aerodinámicos

Existen diversos perfiles aerodinámicos que varían su geometría dependiendo sus funciones y ambientes de trabajo, algunos están diseñados para ser utilizados a números de Reynolds por debajo de  $5 \times 10^5$ , valor que es considerado bajo en áreas como aviación o Aero-generación. En el primer paso de diseño se tiene contemplado la selección de una familia perfiles para ser utilizados a lo largo del álabe, serán parte vital de la aerodinámica del rotor y de la cual depende su rendimiento.

La selección de los perfiles aerodinámicos se lleva a cabo mediante la evaluación del desempeño aerodinámico con softwares como Xfoil o XFLR5, este último es un software que usa los mismos algoritmos de Xfoil y permite hacer los mismos análisis, pero con un entorno más intuitivo y amigable con el usuario.

Antes de realizar la selección, se hizo una consulta en literatura para revisar familias de perfiles ya utilizadas en aerogeneradores o que fueran diseñados para trabajar a bajos números de Reynolds. Entre ellos encontramos trabajos como el de Ronit K Singh de la Universidad del Pacífico Sur de Fiyi realizado en conjunto con la Universidad Marítima de Corea del Sur Donde realizaron experimentos con un perfil aerodinámico mejorado (AF300) en un túnel de viento de circuito abierto. EL Perfil AF300 es comparado con otros 8 perfiles diseñados para aplicaciones de bajos números de Reynolds en turbinas eólicas de eje horizontal, ya que no fue posible encontrar la geometría de AF300, fueron tenidos en cuenta perfiles utilizados como el SG6043 y el FX63-137. Los análisis fueron realizados en números de Reynolds de  $38 \times 10^3$ ,  $75 \times 10^3$ ,  $1,28 \times 10^5$  y  $2,05 \times 10^5$ , valores similares a los de este trabajo (57).

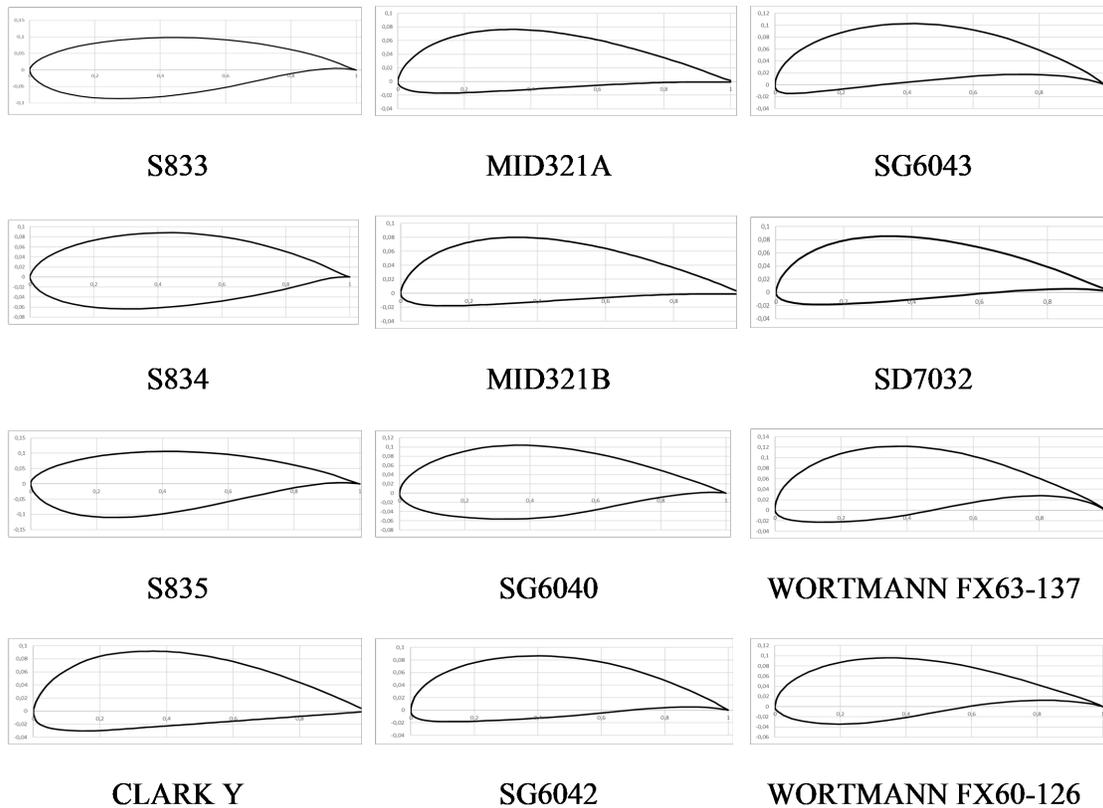
Posteriormente, Ronit K Singh desarrollaron un rotor de dos álabes, diseñado para una aplicación de bajo número Reynolds, el cual se instaló en un generador Air-X marine 400W. El rotor incorporó una forma cónica y de torsión a la sección del perfil aerodinámico AF300. La inclinación de los álabes varió en un rango de 15 a 20 para estudiar el rendimiento y la velocidad de arranque. Encontró que la turbina funcionaba mejor a un ángulo de ataque de 18. En promedio, la turbina eólica produjo un coeficiente de potencia de 0,255 a una velocidad del viento de  $6m/s$ . En comparación con un rotor de tres álabes, el nuevo rotor de dos palas produjo más energía eléctrica a la misma velocidad de flujo libre (56).

El diseño e implementación de álabes para un generador Air X, donde inicialmente

se analizaron los perfiles aerodinámicos BW3, A18 y SG6043 a una velocidad del viento de  $5\text{ m/s}$  fue estudiado por (4). Para el diseño con perfil aerodinámico BW3 se muestra un coeficiente de potencia de 0.38 en la simulación y 0.34 en los experimentos con una estimación inicial del número de Reynolds de  $25 \times 10^3$ . Los resultados muestran que el nuevo diseño es más rentable y se aprovecha más energía eólica utilizando un área de barrido equivalente de  $0.79\text{ m}^2$ . En el estudio de (46) abordaron el diseño y la optimización de un pequeño álabe de aerogenerador tanto en la parte aerodinámica como en la parte estructural. El estudio se enfocó en buscar producir mucha más potencia y reducir el tiempo de arranque, mediante una técnica de optimización de algoritmo genético. El perfil aerodinámico utilizado fue el SG6043, su selección se debe en gran parte a su alta relación de sustentación y arrastre, la cual ocurre en un número Reynolds de  $2,2 \times 10^5$ . El rendimiento de los álabes huecos y sólidos se evaluó a la velocidad de inicio de  $3,4\text{ m/s}$ . Mientras que los álabes huecos tienen un rendimiento razonable a velocidades de menores, el arranque de los álabes sólidos empeora progresivamente a medida que la velocidad disminuye. Para garantizar la seguridad de aerogeneradores como este, los autores argumentan que se debe realizar estudios profundos de pandeo y vibraciones, entre otros.

El perfil aerodinámico SD7032 es tenido en cuenta por su utilización como perfil de un rotor que opera a bajos números de Reynolds en el trabajo de (7). A pesar de ser usado para el diseño de un aerogenerador de  $10\text{ MW}$ , y una limitante estructural debido a su espesor, el perfil SD7032 es menos sensible a la separación del fluido a números de Reynolds entre  $1 \times 10^5$  y  $5 \times 10^5$ . Los perfiles de la familia WORTMANN FX63-137 usados para simulación de los álabes de un rotor de un pequeño aerogenerador usando teoría de diseño BEM y el código de Qblade por (26), mediante la modificación de su superficie con la adhesión de material rugoso similar al papel abrasivo; lo cual revela una disminución en la sustentación de alrededor del 50%.

Algunos de los perfiles están diseñados en familias y son recomendados para distintas zonas o secciones en el álabe para su mejor aprovechamiento. Es el caso de los perfiles S833, S834 y S835 diseñados como una familia de perfiles para aerogeneradores de eje horizontal para bajos valores de Reynolds, a diferencia de los perfiles anteriormente usados, que eran diseñados para la industria aeronáutica con el objetivo de tener una máxima sustentación y un mínimo de arrastre (58). Estos perfiles aerodinámicos fueron también recomendados por el Laboratorio Nacional De Energías Renovables NREL (National Renewable Energy Laboratory, por sus siglas en inglés) ubicado en Colorado, EE.UU. Laboratorio dedicado a investigar y desarrollar tecnología energética más eficiente e impulsar el uso de energías renovables. Según la NREL los perfiles ya mencionados deben ser usados



**Figura 4**

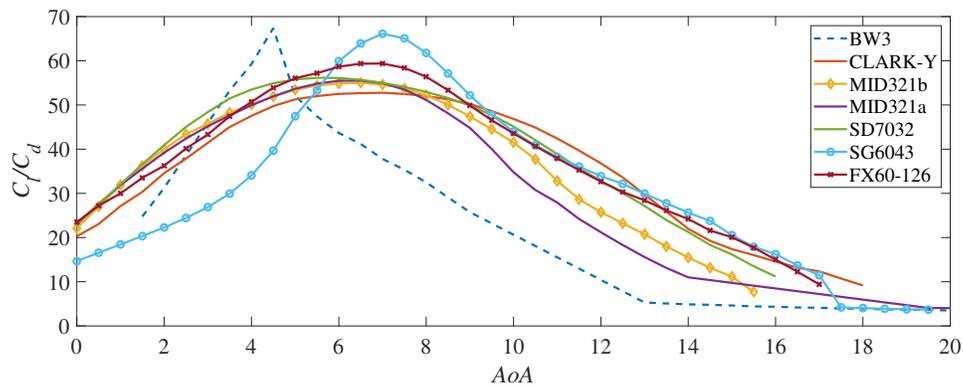
*Perfiles aerodinámicos utilizados a bajos números de Reynolds*

para un rotor con diámetro entre 1 y 3m y valores del número de Reynolds entre  $2 \times 10^5$  y  $4 \times 10^5$  (32). Los perfiles MID321a y MID321b fueron seleccionados por (36), (35) a pesar de no presentar la mejor relación de sustentación y arrastre comparada con otros perfiles, su valor máximo se mantiene más constante para una mayor variación del ángulo de ataque para valores de números de Reynolds desde  $80 \times 10^3$  hasta  $2 \times 10^5$ .

Con los perfiles anteriormente descritos se hace la base de la cual fue seleccionada la familia de perfiles, en la figura 4 se pueden apreciar para una comparación de su geometría, encontramos que tienen variaciones como diferencias en la curvatura del intradós, y del ángulo del borde de salida.

Utilizando el software XFLR5 se realiza una comparación de las curvas de la relación entre los coeficientes de sustentación y arrastre  $C_l/C_d$  para diferentes ángulos de ataque  $AoA$  de los que sobresalen los perfiles BW3 y SG6043 alcanzando 68 y 66 respec-

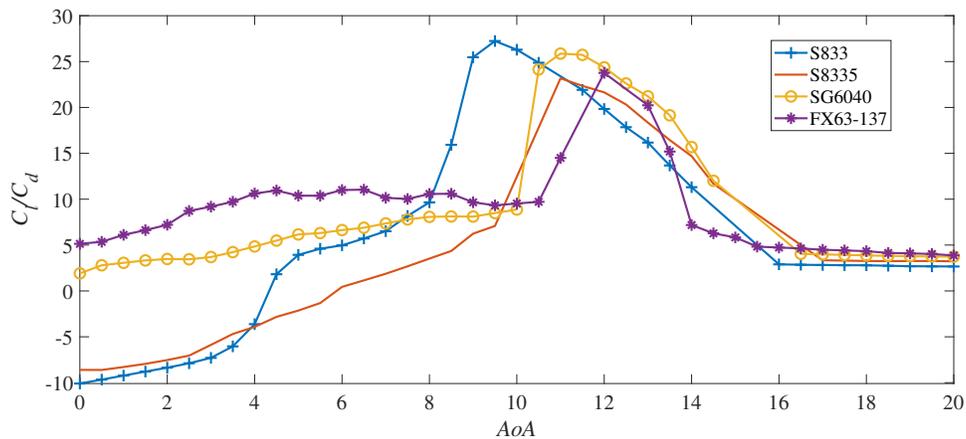
tivamente mientras que los otros perfiles no pasaron de 60 como se puede apreciar en la figura 5 aunque el perfil BW3 supera en este aspecto al SG6043 también podemos notar es que a distintos ángulos de ataque el perfil SG6043 es superior logrando una curva con pendientes menos pronunciadas y es indicador de menor variabilidad en la relación  $C_l/C_d$  para varios ángulos de ataque, algo más provechoso para vientos que no son constantes, esto y el alto rendimiento fueron los criterios para su selección como perfil para ser usado en el diseño.



**Figura 5**

*Curvas de comparación de rendimiento para diferentes perfiles aerodinámicos en un  $Re$  igual a  $1 \times 10^5$*

De igual manera en la figura 6 son comparados varios perfiles aerodinámicos con la diferencia de que estos están destinados para la zona de la raíz del álabe, la zona donde se necesita perfiles con mayor espesor para soportar las cargas sobre el álabe. En este caso las diferencias en las curvas  $C_l/C_d$  vs  $AoA$  no son determinantes para una selección puesto que no hay gran diferencia en los valores que alcanzan, el perfil S833 se destaca entre todos alcanzando el punto mayor en 26 seguido del SG6040 en 25, pero al ser seleccionado el perfil SG6043 es conveniente seleccionar el perfil SG6040 de la misma familia de perfiles y con características geométricas similares.



**Figura 6**

*Curvas de comparación de rendimiento para diferentes perfiles aerodinámicos en un  $Re$  igual a  $5 \times 10^4$*

La utilización de la familia de perfiles SG604X, más específicamente los SG6040 y SG6043 es conveniente, debido a que provienen de una familia diseñada para aerogeneradores de eje horizontal y trabajar en valores de Reynolds por debajo de  $5 \times 10^5$  (21). El perfil SG6040 diseñado para la zona de la raíz del álabe, mientras el SG6043 con un espesor menor y más curvo, para utilizarse en el resto del álabe.

#### 4 Optimización de los perfiles

Luego de la selección de la familia de perfiles, el siguiente paso a realizar es la optimización de estos, para aumentar su rendimiento aerodinámico en el régimen de números de Reynolds bajos que esperamos encontrar por la baja velocidad de viento.

Para este propósito se seguirá el procedimiento descrito en el diagrama de flujo de la figura 7.

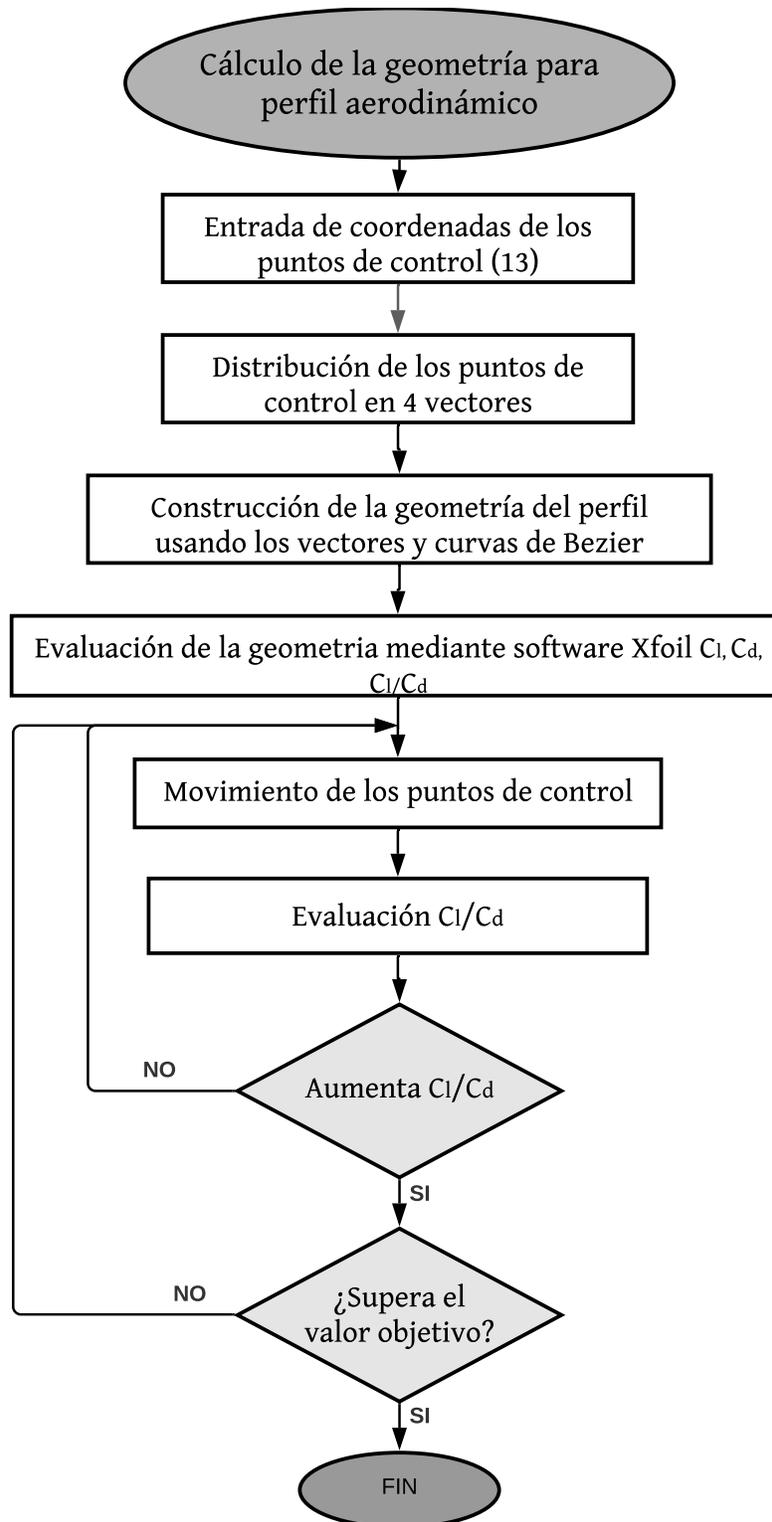
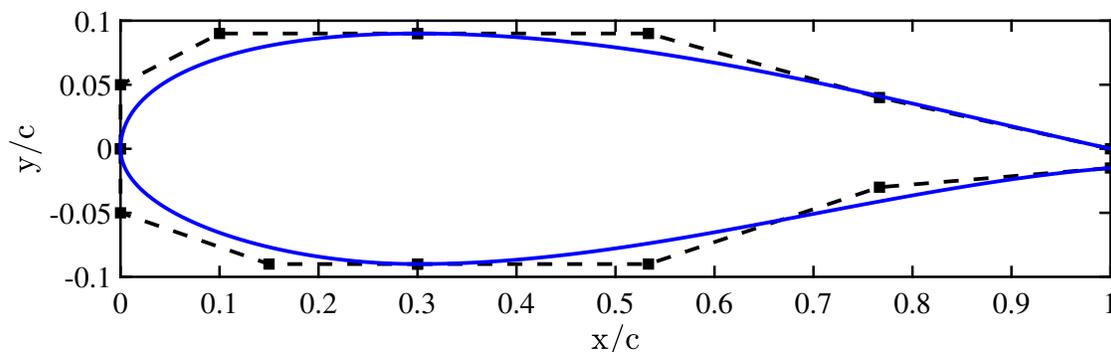
**Figura 7**

Diagrama de flujo para la optimización de los perfiles aerodinámicos

Utilizando la herramienta Matlab en conjunto con el software Xfoil, en un código se construye la forma geométrica de cada perfil a partir del método de curvas de Bézier, de este modo tendremos control de la geometría con pocos puntos de control. Cada vez que se muevan los puntos la geometría cambiara y será evaluada en el software Xfoil, los datos serán comparados hasta alcanzar el rendimiento optimo siempre y cuando respete las restricciones del problema de optimización.

En la figura 8 se puede ver como la forma geométrica del perfil aerodinámico es construida a partir de los puntos de control del método de curvas de Bézier, un método polinomial de parametrización que permite un control constante y permite el ajuste de la geometría del perfil aerodinámico, la geometría se compone de 4 curvas, hechas con cuatro vectores que se unen para un total de 13 puntos de control. En la imagen se resalta de color azul la forma del perfil mientras que la línea punteada de color negra son los vectores de los puntos de control.



**Figura 8**

*Perfil aerodinámico a partir de curvas de Bézier. Forma geométrica del perfil en color azul, puntos de control en color negro*

El método de optimización usado en el programa es un método basado en gradientes, el MFD (Método de Direcciones Factibles) que mueve los puntos de control hasta alcanzar el valor óptimo garantizando el cumplimiento de las restricciones. El programa avanza asumiendo una dirección y cantidad de movimiento para los puntos de control de tal manera que la geometría del perfil se vaya modificando con cada movimiento hasta que el rendimiento no pueda aumentar más.

El problema de optimización tiene como meta minimizar o maximizar la respuesta de la función objetivo, en este caso se define como la maximización del rendimiento aerodinámico, que nosotros conocemos como la relación entre el coeficiente de sustentación y

el coeficiente de arrastre.

$$\text{Maximizar } Z = \frac{C_l}{C_d}(X_i) \quad i = 1, \dots, \quad (5)$$

Donde  $i$  son el grupo de variables o parámetros que definen la geometría y que son utilizados como límites para el problema de optimización, y están listados como restricciones geométricas. Las características geométricas de los perfiles tienen valores dados en porcentaje, que corresponde a la relación comparada con la cuerda  $c$  del perfil, así, si el espesor máximo es de 15% significa 0,15 veces la cuerda  $c$ .

Restricciones geométricas:

- El espesor máximo  $T_{max}$  descrito como la diferencia entre el punto más elevado del extradós  $Y_{up}$  en la parte superior del perfil, menos el valor absoluto del punto directamente abajo de este  $Y_{lo}$ . Para el perfil destinado a la raíz se tomó un intervalo entre 14% y 16%, mientras que para el otro perfil entre 9% y 12%, con la intención de que no tenga un espesor superior al perfil de la raíz y pero tampoco sea muy delgado.

$$T_{max} = Y_{up} - Y_{lo} \quad (6)$$

- La posición del espesor máximo  $X_{tm}$  que se describe como la posición en el eje  $x$ , que va desde 0 hasta 1, donde 0 es la posición del borde de ataque y 1 la del borde de fuga. En variables el límite inferior (el más cercano a 0)  $X_{li}$  y el límite superior (el más cercano a 1)  $X_{ls}$  para ambos perfiles los límites estuvieron entre el 20% y el 50% para no tener geometrías complicadas de fabricar y siguiendo lo visto en los otros perfiles evaluados.

$$X_{li} \leq X_{tm} \leq X_{ls} \quad (7)$$

- El espesor del borde de fuga  $\Delta Y_{bf}$ , descrito como la diferencia en el eje  $y$  entre los puntos de control final e inicial y se controlan con las variables  $Y_{bfs}$  para el punto superior y  $Y_{bfi}$  para el punto inferior.

$$Y_{bfi} \leq Y_{bf} \leq Y_{bfs} \quad (8)$$

Para la instancia del modelo se debe tener en cuenta características del entorno,

datos de funcionamiento para la evaluación de los perfiles y que deben ser descritos en el código para el trabajo en Xfoil. Como son:

- Ángulo de ataque  $AoA$

En este caso, no es necesario la introducción de un ángulo de ataque en específico, la metodología utilizada realiza una optimización general, mucho más conveniente, pues si se usa un ángulo en específico puede que lo que mejore en ese ángulo sea arruinado en otro ángulo diferente. el rango de  $AoA$  de evaluación abarco desde 0 hasta 20 grados

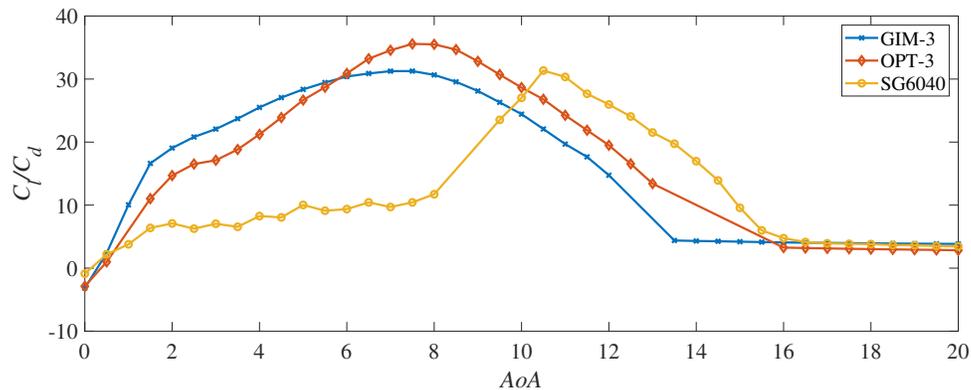
- Número de Reynolds  $Re$

El valor del número de Reynolds varia según el perfil que se está optimizando y los datos calculados previamente sobre el régimen esperado. para el perfil de la zona de la raíz, se evaluó un  $Re = 6 \times 10^4$  mientras que para el otro perfil se utilizó  $Re = 6 \times 10^4$  y  $Re = 1 \times 10^5$ .

- Número Mach  $Mach$

La importancia de introducir un numero Mach en el software Xfoil, recae en la definición del fluido como compresible o incompresible, este último corresponde a valores por debajo de 0.3, se calcula de la relación entre la velocidad tangencial esperada del fluido respecto al álabe, con la velocidad del sonido.

El código de optimización fue utilizado inicialmente en el perfil SG6040, diseñado para la zona de la raíz del álabe, el perfil de mayor espesor y con poca curvatura. Se busca un incremento en el rendimiento aerodinamico sin afectar en gran medida esas características que lo hacen más robusto para aguantar esfuerzos. De la implementación son obtenidos 2 perfiles cuyas curvas de rendimiento pueden verse en la figura 9.

**Figura 9**

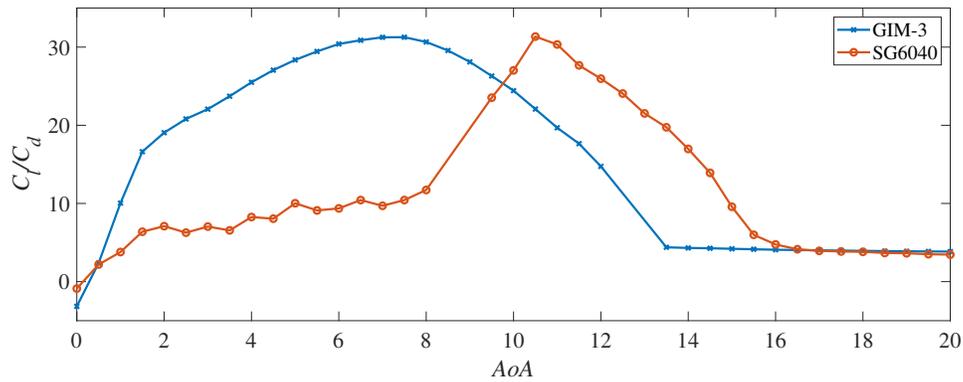
Comparación de perfil base SG6040, GIM3 y perfil optimizado OPT3 para:  $Re = 6 \cdot 10^4$

En la figura 9 se puede observar como la curva del perfil OPT3 sobrepasa el rendimiento de los otros 2 perfiles, razón para ser seleccionado como el perfil destinado a la raíz del álabe, y que conoceremos de ahora en adelante como perfil RAIZ para efectos prácticos. La comparación de las características geométricas se pueden encontrar en la tabla 1

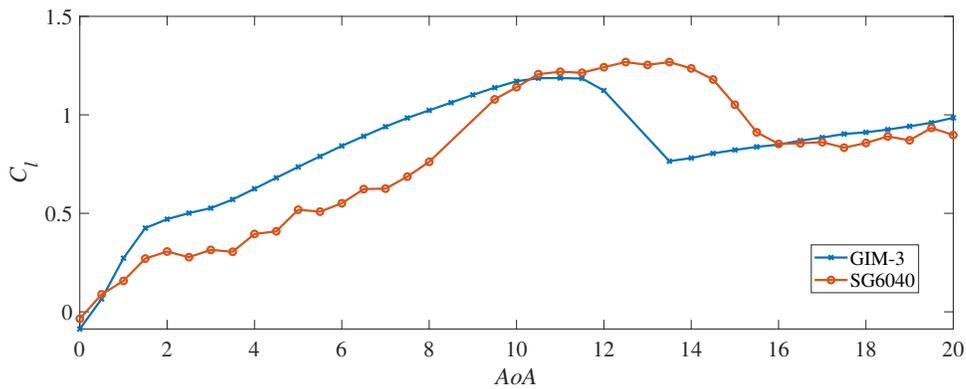
Aunque el GIM3 presenta un aumento en el rendimiento aerodinámico y coeficiente de sustentación para algunos  $AoA$  como puede verse en la figura 10 y la figura 11. El perfil OPT3 ahora RAIZ presenta un mejor rendimiento, incluso disminuyendo el valor del número de Reynolds a  $5,2 \cdot 10^4$  como puede verse en la figura 9. Este  $Re$  se tuvo en cuenta como el valor mínimo calculado con los datos de tamaño de cuerda  $c$  obtenidos y que se pueden apreciar más adelante en la tabla 3 de la sección siguiente y la ecuación del número de Reynolds.

$$Re = \frac{\rho V c}{\mu} \quad (9)$$

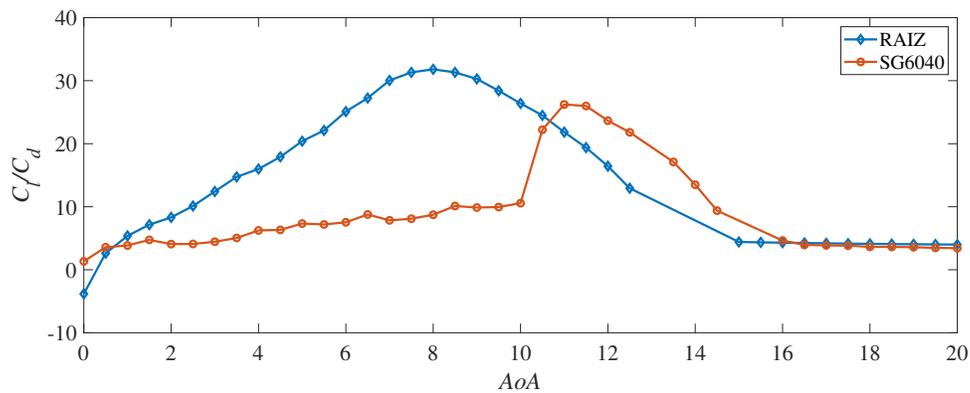
Siendo  $\rho$  la densidad del aire,  $\mu$  la viscosidad dinámica,  $c$  el tamaño de la cuerda que debe ser calculada para cada sección del álabe y  $V$  la velocidad relativa del fluido con la sección del álabe que usa ese perfil.



**Figura 10**  
 $C_l/C_d$  vs ángulo de ataque para los perfiles SG6040 y el perfil diseñado preliminar GIM3



**Figura 11**  
 $C_l$  vs ángulo de ataque para los perfiles SG6040 y el perfil diseñado preliminar GIM3



**Figura 12**  
Comparación de perfiles para:  $Re = 5,2 \times 10^4$  donde el perfil Opt3 es llamado RAIZ y es comparado con el perfil base SG6040

Gracias a las restricciones geométricas los perfiles no variaron en gran medida entre si, como puede verse en la tabla de comparación de sus características que se pueden encontrar en la tabla 1.

Característica	SG6040	GIM3	OPT3
MAX ESPESOR	16 %	15 %	14,11 %
POSICION MAX ESPESOR	35,37 %	30,03 %	31,31 %
MAX CURVA	2,5 %	0,0 %	1,47 %
POSICION MAX CURVA	60 %	100 %	64,65 %

**Tabla 1**

*Características geométricas del perfil base SG6040 y versiones optimizadas GIM3 y OPT3*

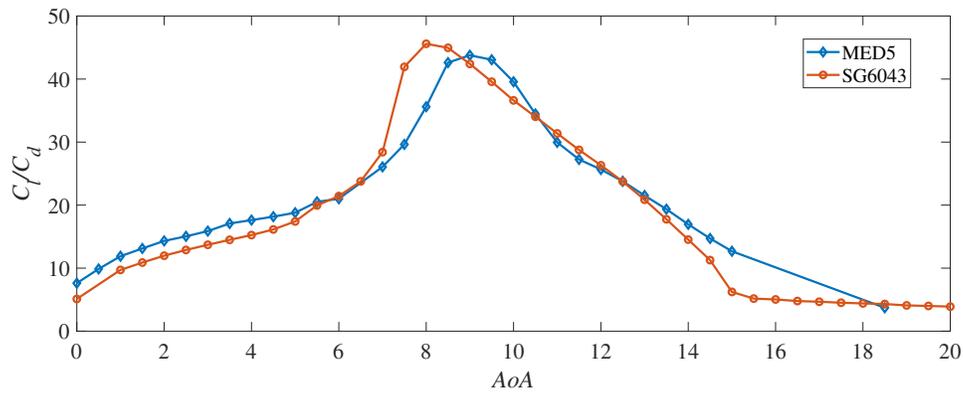
En la tabla 2 pueden compararse las características aerodinámicas para el ángulo de ataque con mayor rendimiento aerodinámico de cada perfil, se puede apreciar como los perfiles optimizados tienen menos coeficiente de arrastre  $C_d$  que el perfil original, pero el coeficiente de sustentación  $C_l$  no fue superado.

Característica	SG6040	GIM3	OPT3
$C_l$	1,193	0,937	1,051
$C_d$	0,037	0,030	0,029
$C_l/C_d$	32,215	31,397	35,831
AoA	10°	7°	8°

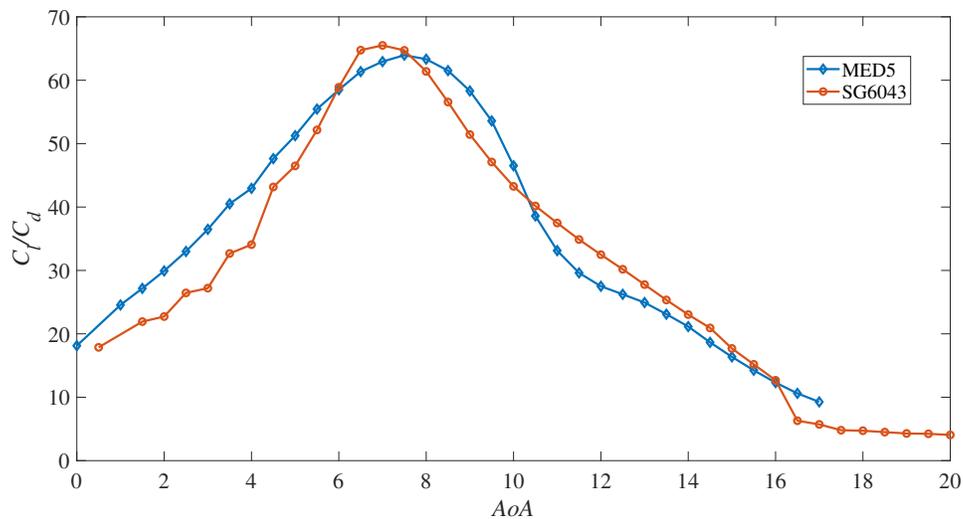
**Tabla 2**

*Características aerodinámicas del perfil base SG6040 y versiones optimizadas GIM3 y OPT3*

Para el perfil SG6043, de menor espesor, pero mayores prestaciones aerodinámicas se utilizó el mismo procedimiento de optimización, con el se obtuvo una geometría prometedora llamada MED5, del cual se puede ver la comparación de rendimiento en la figura 13 y figura 14.

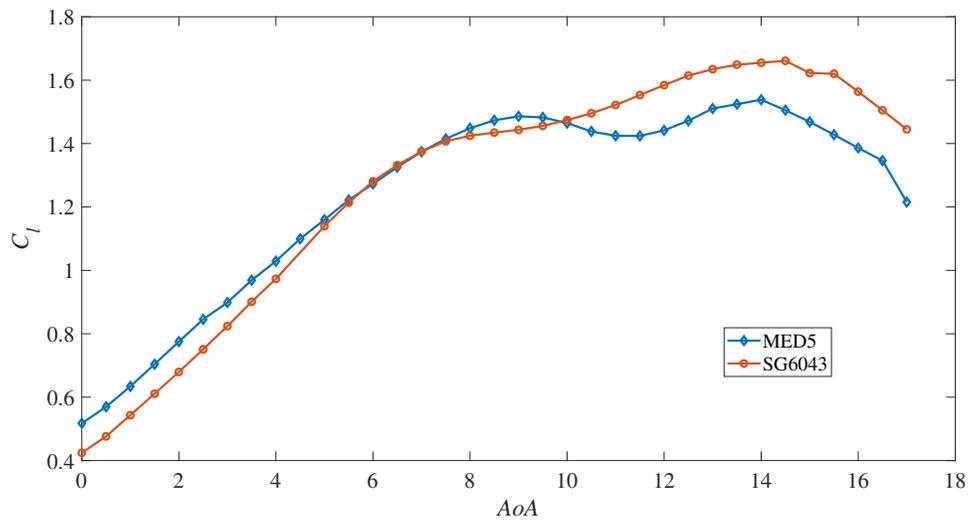
**Figura 13**

Curvas de comparación de comportamiento para perfiles MED5 y SG6043.  $C_l/C_d$  vs ángulo de ataque (AoA) para un número de Reynolds igual a 60.000

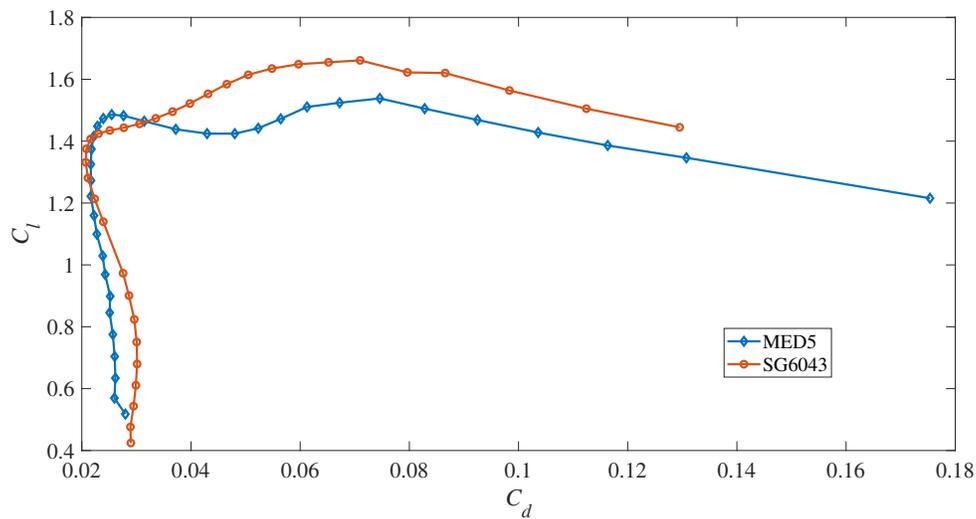
**Figura 14**

Curvas de comparación de comportamiento para perfiles MED5 y SG6043.  $C_l/C_d$  vs ángulo de ataque (AoA) para un número de Reynolds igual a 100.000

Si bien el rendimiento medido en  $C_l/C_d$  del perfil MED no supera el valor máximo del perfil base SG6043, también se tuvo en cuenta la comparación del coeficiente de sustentación vs  $AoA$  y la relación de coeficiente de sustentación y arrastre, esto se presenta en las figuras 15 y 16 donde vemos ambas gráficas y podemos apreciar como el perfil MED es superior en  $C_l$  hasta alcanzar el  $AoA$  de  $10^\circ$  y con un coeficiente de arrastre más bajo en comparación.

**Figura 15**

Curvas de comparación de  $C_l$  vs  $AoA$  para los perfiles MED5 y SG6043 en número de Reynolds igual a 100.000

**Figura 16**

Curvas de comparación de  $C_l$  vs  $C_d$  para los perfiles MED5 y SG6043 para un número de Reynolds igual a 100.000

Una vez obtenidos los perfiles aerodinámicos, son distribuidos a lo largo del álabe, la zona más cercana al eje de rotación correspondiente a 1/3 del largo total será conocida como la raíz, y será utilizado el perfil RAIZ en ella. Mientras que en las 2/3 partes restantes

será utilizado el perfil MED5 con menor espesor pero mayor rendimiento aerodinámico.

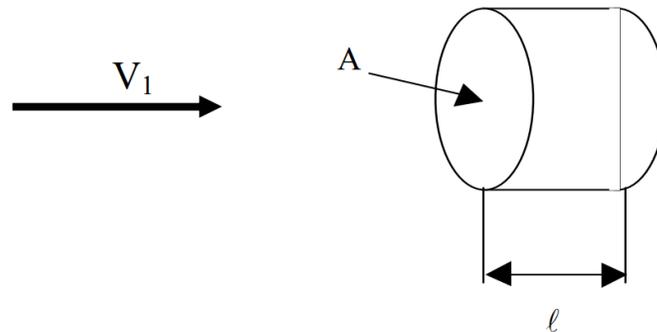
## 5 Diseño de álabe

Un aerogenerador aprovecha la energía cinética debida a la velocidad del viento, en el caso de los aerogeneradores de eje horizontal los álabes se mueven por la sustentación del aire pasando al rededor y entre más rápido pasa el fluido mayor es la sustentación que puede generar.

La energía cinética debida a la velocidad del viento se puede definir como:

$$E_c = \frac{1}{2}mV^2 \quad (10)$$

Asumiendo que la energía será tomada de un volumen de control donde:  $E_c$  la energía cinética [J],  $m$  la masa en [Kg] y  $U$  es la velocidad del viento [ $\frac{m}{s}$ ].



**Figura 17**

Volumen de control creado por el área del rotor  $A$  y la velocidad del viento como  $l$ . Fuente: (6)

$$m = A\rho l \quad (11)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del fluido [ $\frac{kg}{m^3}$ ],  $A$  el área barrida por el rotor en [ $m^2$ ]. Y la ecuación para la potencia está dada por:

$$P = \frac{1}{2}A\rho U^3 \quad (12)$$

Donde  $P$  es la potencia en [W].

La potencia captada por un aerogenerador está definida por un límite llamado límite de Betz, el alemán Albert Betz en 1920 calculó ese límite de la máxima eficiencia que puede tener una turbina eólica. Ese valor es  $16/27$  (0.593). Desde entonces es conocido como el límite de Betz. Este límite también fue deducido por el británico Lanchester y el científico ruso Joukowski. Hasta el día de hoy, es un límite que constituye el máximo valor porcentual que puede ser extraído por una turbina eólica de una corriente de aire. (30).

Incluyendo este coeficiente de potencia la ecuación de la potencia extraída es:

$$P = C_p \frac{1}{2} A \rho U^3 \quad (13)$$

### 5.1 Teoría de conservación de cantidad de movimiento

Siguiendo las indicaciones de (42) la teoría BEM compuesta por otras dos teorías de diseño es buena herramienta para el cálculo de la geometría del álabe.

Basado en la teoría de conservación del momentum, la cual analiza las fuerzas generadas sobre el álabe en un volumen de control, esta teoría es usada para predecir la potencia que se podría obtener un rotor ideal y el empuje que provocaría el viento sobre este. Igualmente, es atribuida al alemán Albert Betz (42) y en ella es aplicada el concepto de un disco. Aguas arriba del disco el área transversal del flujo es menor, pues hay que aplicar la ley de conservación de la masa y el viento reduce su velocidad al pasar por el disco y lo mismo cuando el disco se expande aguas abajo (5).

Asumiendo las siguientes condiciones:

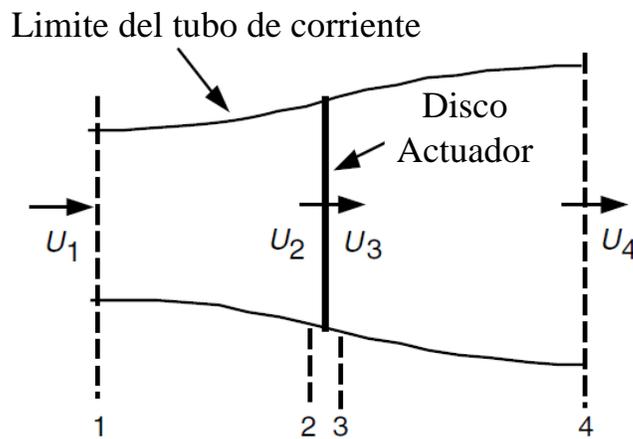
- Un estado de fluido homogéneo e incompresible
- Sin arrastre
- Un número infinito de aspas
- Sin estela de rotación
- La presión aguas arriba y aguas abajo del rotor es tomada como presión estática del ambiente

Aplicando la teoría se puede obtener la fuerza del viento sobre el aerogenerador. La fuerza de empuje sobre el rotor es calculada por la ecuación (14)

$$T = \dot{m}(U_1 - U_4) \quad (14)$$

Donde el Empuje  $T$  está en  $[N]$  y el flujo másico  $\dot{m} [\frac{kg}{s}]$ . Intercambiando el símbolo de la velocidad por  $U$ .

En la Figura 18, la velocidad en cada punto está definida por  $U$ .



**Figura 18**

*Disco actuador conservación de la masa aguas arriba y abajo del disco. Fuente: (42)*

Y definiendo un factor de inducción axial, un valor representativo de la disminución en forma de fracción de la velocidad del viento en forma libre y el plano del rotor, denotado por  $a$ .

$$a = \frac{(U_1 - U_2)}{U_1} \quad (15)$$

$$U_2 = U_1(1 - a) \quad (16)$$

$$U_4 = U_1(1 - 2a) \quad (17)$$

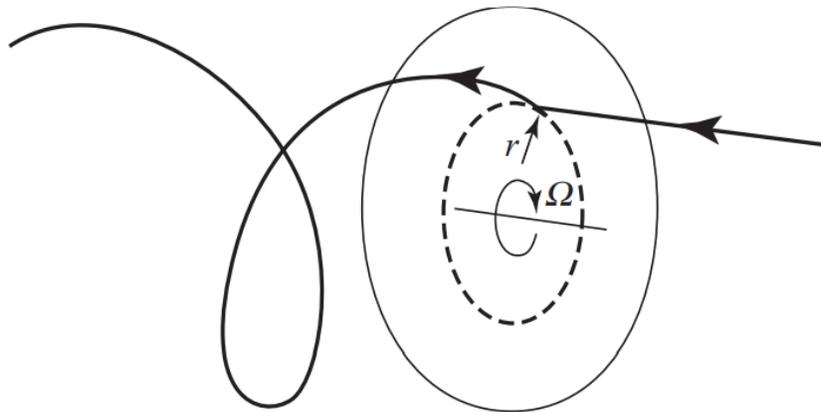
y por tanto su valor no puede exceder de 0.5 o significaría que la velocidad del viento después de pasar por el rotor es cero y la teoría no sería posible. Sustituyendo en la ecuación potencia:

$$P = \frac{1}{2} A \rho V^3 4a(1-a)^2 \quad (18)$$

Y la eficiencia con la que el aerogenerador obtiene energía del viento está indicada por el coeficiente de potencia  $C_p$ .

$$C_p = 4a(1-a)^2 \quad (19)$$

Hasta el momento se había tomado el rotor sin movimiento, ahora debe ser introducido el análisis del momentum angular debido a la rotación del disco, rotación que genera movimiento en el flujo de aire que continua detrás y que es contraria al giro del rotor, una reacción al torque ejercido por este mostrado en la Figura 19.



**Figura 19**

*Disco actuador giratorio y estela debido a la rotación. Fuente: (5)*

Con esto se define un factor de inducción angular  $a'$ , donde  $\omega$  [ $\frac{rad}{s}$ ] es la velocidad angular del rotor, y  $\Omega$  [ $\frac{rad}{s}$ ] es la velocidad angular inducida en la estela.

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega} \quad (20)$$

La ecuación para la relación de la velocidad de punta del álabe y el viento es llamado  $\lambda$ , relaciona la velocidad angular multiplicada por el radio  $R$  [m] del aerogenerador y dividida en la velocidad del viento  $U$  [m/s].

$$\lambda = \frac{\Omega R}{U} \quad (21)$$

La relación de velocidad de punta local para cada posición  $r$  del radio del aerogenerador, a partir de la relación de la velocidad de punta del álabe para cada zona del álabe es de la forma:

$$\lambda r = \frac{\Omega r}{U} = \frac{\lambda r}{R} \quad (22)$$

Además se puede relacionar el factor de inducción angular respecto del factor de inducción axial.

$$a' = \frac{(1 - 3a)}{(4a - 1)} \quad (23)$$

De la conservación de movimiento angular se obtiene un diferencial para la fuerza par, através de:

$$dQ = 4a'(1 - a)\rho U \pi r^3 \Omega dr \quad (24)$$

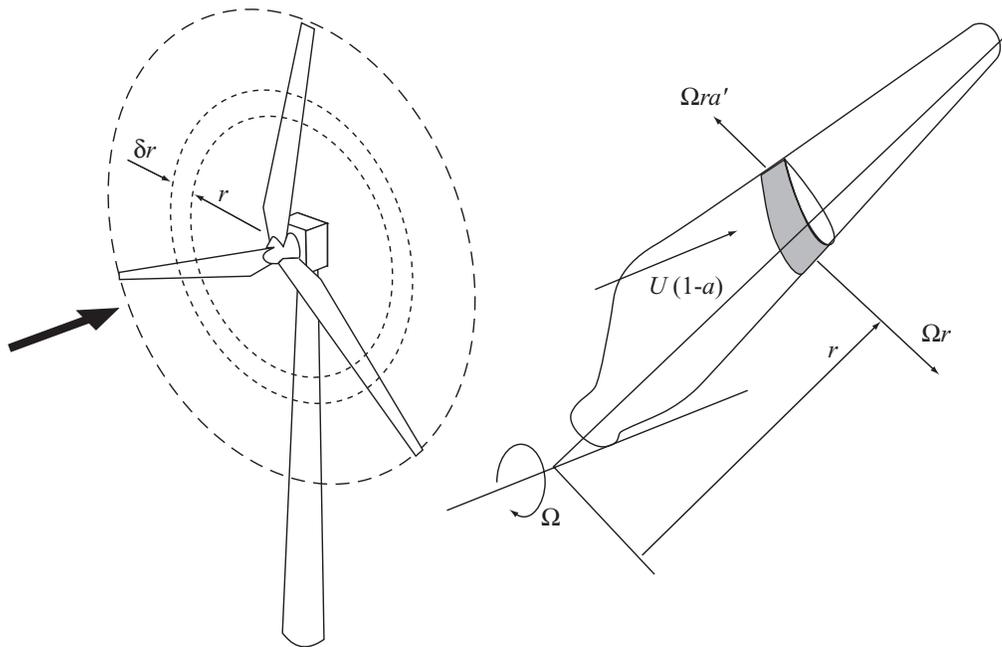
## 5.2 Teoría de elemento de álabe

La teoría de elemento de álabe se refiere al estudio de un segmento del aspa en función de su geometría. Las fuerzas de los alabes de una turbina pueden ser expresadas teniendo como base la fuerza de sustentación, la fuerza de arrastre y ángulo de ataque. En esta teoría el aspa es dividida en un número finito de secciones y se tienen las siguientes consideraciones:

- No hay interacción aerodinámica entre las distintas secciones.

- Las fuerzas en el álabe solo están determinadas por la sustentación y arrastre de las geometrías de los perfiles aerodinámicos.

El esquema de la teoría se muestra en la Figura 20. Donde se puede ver el álabe dividido en secciones, donde  $c$  es la cuerda del segmento,  $dr$  es el tamaño radial del segmento,  $r$  es el radio,  $R$  es el radio del aerogenerador y  $\Omega$  es la velocidad angular del álabe.



**Figura 20**

Esquema de teoría de elemento de álabe. Fuente: (5)

Teniendo en cuenta la rotación de los álabes, la velocidad de incidencia del viento sobre el álabe no solo es su velocidad normal  $U$  si no el resultado del vector creado junto con la velocidad tangencial, esta última es dada por la rotación. Este nuevo vector denominado velocidad relativa, puede ser calculado mediante la siguiente ecuación:

$$U_{rel} = \sqrt{U^2 + (\Omega r)^2} \quad (25)$$

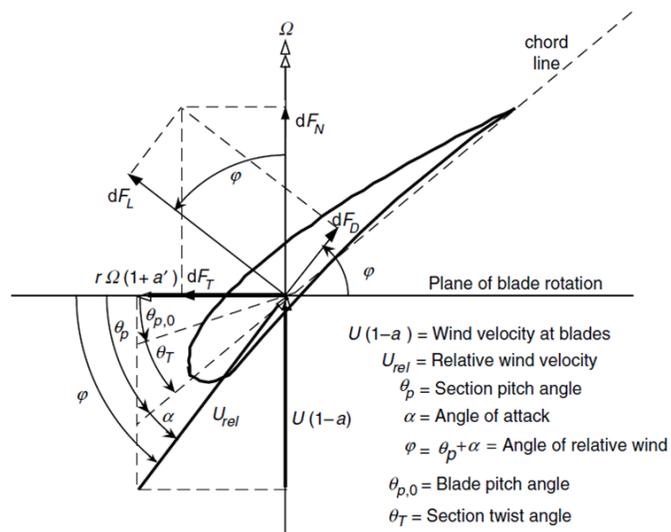
Utilizando un esquema como el de la Figura 21 se puede ver la relación que tienen las distintas variables y su procedencia geométrica.

$$\varphi = \theta_p + \alpha \quad (26)$$

Siendo  $\alpha$  el ángulo de ataque del perfil en [grados],  $\varphi$  el ángulo relativo del viento respecto a la línea del perfil y  $\theta_p$  el ángulo de giro para esa sección. Y la relación que tienen los factores de inducción con el ángulo relativo del viento es dada por:

$$\varphi = \frac{1 - a}{(1 + a' \lambda_r)} \quad (27)$$

Y las fuerzas en forma de diferencial, ya que son el valor para un segmento de tamaño radial  $dr$ .



### Figura 21

Geometría del perfil para analizar. Fuente (42)

La fuerza de sustentación  $F_l$ , la fuerza de arrastre  $F_d$ , y el torque diferencial  $dQ$  a cierta distancia radial medida desde el eje de rotación del aerogenerador para cierto número de álabes  $B$  se pueden expresar en forma diferencial mediante las ecuaciones 28-30. Se puede afirmar que el arrastre disminuye el torque y con él la potencia, pero tiene el efecto de aumentar el empuje.

$$dF_l = C_l \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c dr \quad (28)$$

$$dF_d = C_d \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c dr \quad (29)$$

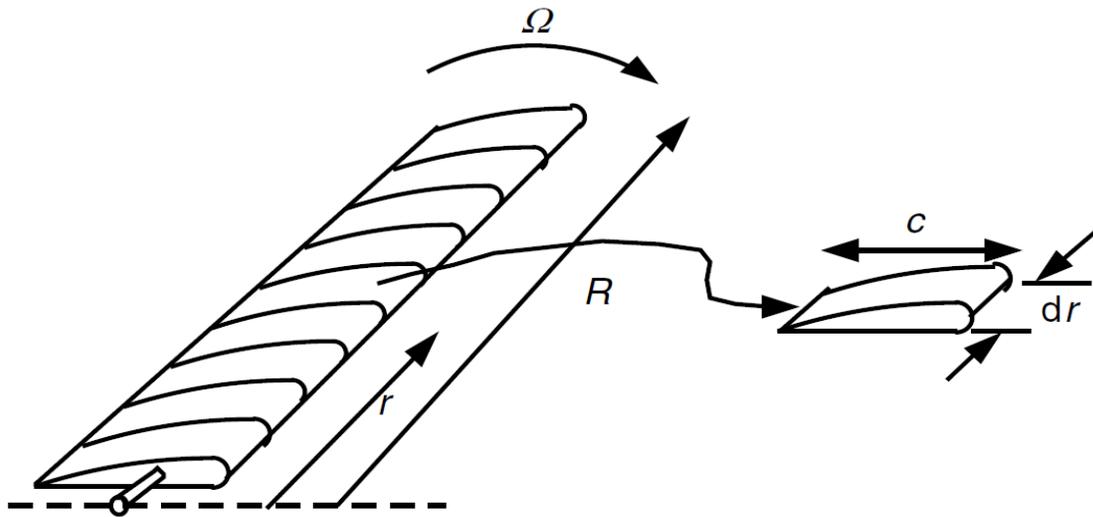
$$dQ = B \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_l \sin \varphi - C_d \cos \varphi) c r dr \quad (30)$$

Donde  $C_l$  es el coeficiente de sustentación propio del perfil para el ángulo del ataque y a un determinado número de Reynolds, y  $C_d$  el coeficiente de arrastre en los mismos parámetros del nombrado anteriormente.

### 5.3 Teoría de momentum de elemento de álabe

Con la combinación de las teorías explicadas anteriormente, se obtiene el procedimiento para definir la geometría del álabe. La teoría llamada (BEM) teoría de momentum de elemento de álabe, denominada así por la combinación de ambos nombres anteriores. Define dos maneras de solucionar sus ecuaciones, pues hay que hallar los valores de los factores de inducción axial y angular, y esto hace que su solución sea de forma iterativa.

Inicialmete el álabe se divide en varias secciones como es mostrado en la Figura 22 y los parámetros de funcionamiento como son: la velocidad del viento que se aproxima al aerogenerador y la velocidad de rotación.



**Figura 22**  
 División del álabe para diseño de elemento. Fuente (42)

Para cada elemento.

$$\lambda r = \frac{\Omega r}{U} = \frac{\lambda r}{R} \quad (31)$$

$$\varphi = \frac{2}{3} \tan^{-1}\left(\frac{1}{\lambda r}\right) \quad (32)$$

Teniendo en cuenta que para llegar al resultado se puede tomar dos caminos. En este procedimiento se hace más conveniente tomar el proceso de iteración de los factores de inducción axial y angular. Estos valores se iteran hasta que sean iguales a su anterior iteración.

Debido a las pérdidas que se pueden dar en la punta del álabe y la turbulencia generada, se introduce teoría del factor de pérdida en la punta, denominada pérdida en la punta de Prandtl, un factor de corrección en función del número de alabes y otras variables geométricas.

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[ \exp \left( - \left\{ \frac{\left( \frac{B}{2} \right) \left( 1 - \frac{r}{R} \right)}{\frac{r}{R} \sin \varphi} \right\} \right) \right] \quad (33)$$

El cálculo de la cuerda se da por:

$$c = \frac{8\pi r}{BC_l} (1 - \cos \varphi) \quad (34)$$

Donde la solidez  $\sigma'$  la relación entre el área plana del aspa y el área de barrido y está dado por:

$$\sigma' = \frac{Bc}{2\pi r} \quad (35)$$

El cálculo del factor de inducción axial se da por:

$$a = \frac{1}{\left[ 1 + \left( \frac{4F \sin^2 \varphi}{\sigma' C_l \cos \varphi} \right) \right]} \quad (36)$$

Y calculando  $a'$  con la ecuación (23) o (37)

$$a' = \frac{1}{\left[ \left( \frac{4F \cos \varphi}{\sigma' C_l} \right) - 1 \right]} \quad (37)$$

El cálculo de la constante de empuje  $C_T$  se determina mediante la siguiente ecuación:

$$C_T = \frac{\sigma' (1 - a)^2 (C_l \cos \varphi + C_d \sin \varphi)}{\sin^2 \varphi} \quad (38)$$

Esta constante es comparada. Si  $C_T < 0,96$  se recalcula  $a$  con la ecuación (36), pero en caso de que  $C_T > 0,96$ .

$$a = \frac{1}{F} \left[ 0,143 + \sqrt{0,0203 - 0,6427(0,889 - C_T)} \right] \quad (39)$$

Y luego se da el valor para la siguiente iteración del factor de inducción rotatorio  $a'$  con la ecuación (37).

Se comparan ambos valores hasta que la diferencia con su iteración anterior converge para los dos factores. Si no convergen, se debe repetir desde la ecuación (32). Con los valores para los factores de inducción encontrados, se puede proceder con el cálculo del coeficiente de potencia, se pueden usar las ecuaciones:

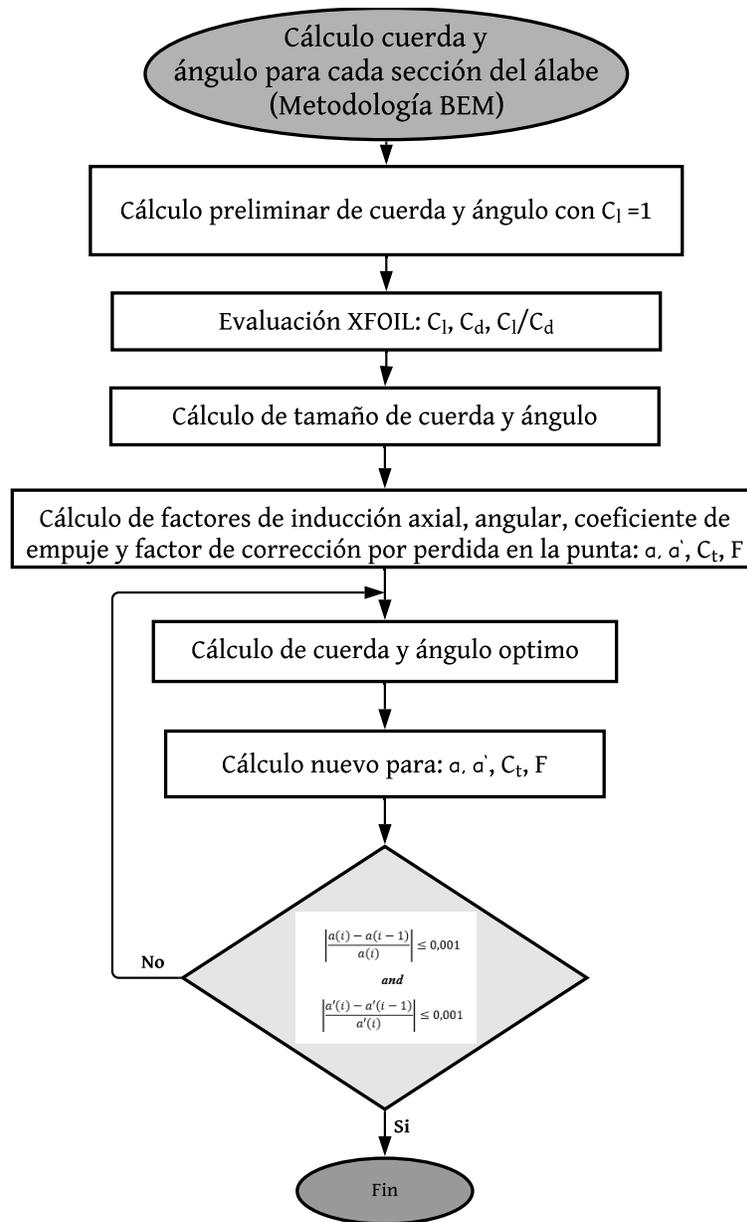
$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_{\lambda_h}^{\lambda} F \lambda_r^3 a' (1 - a) \left[ 1 - \left( \frac{C_d}{C_l} \right) \cot \theta \right] d\lambda_r \quad (40)$$

O para no depender de los factores de inducción:

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_{\lambda_h}^{\lambda} F \sin^2 \varphi (\cos \varphi - \lambda_r \sin \varphi) (\sin \varphi + \lambda_r \cos \varphi) \left[ 1 - \left( \frac{C_d}{C_l} \right) \cot \varphi \right] \lambda_r^2 d\lambda_r \quad (41)$$

La ecuación para el coeficiente de potencia se aplica a cada elemento del álabe, luego son sumados para obtener el coeficiente total del álabe.

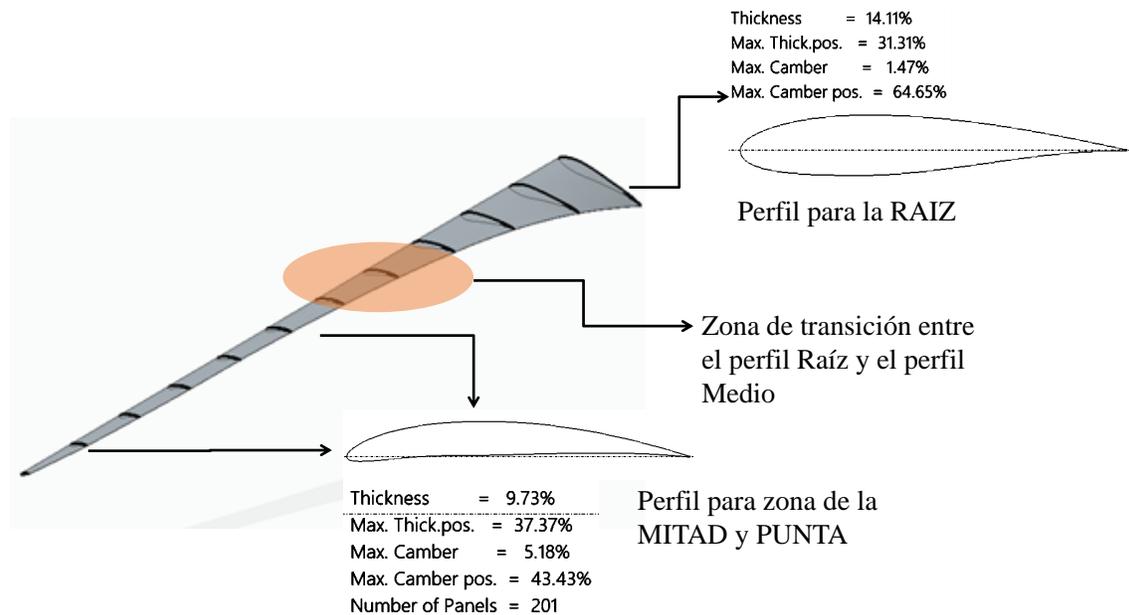
Teniendo los perfiles que serán utilizados, se debe calcular el tamaño de la cuerda y la inclinación que tendrá cada zona del álabe para el rotor. Para esto se deben calcular teniendo en cuenta la teoría y ecuaciones anteriores que se pueden nombrar como Metodología BEM y se realiza de manera iterativa, con apoyo de una herramienta computacional como Matlab. El diagrama de proceso que se tuvo en cuenta, se puede apreciar en la figura 23.



**Figura 23**

*Diagrama de flujo para cálculo de la cuerda y ángulo según el método BEM*

A lo largo del álabe serán utilizados los 2 perfiles aerodinámicos, el perfil RAIZ con mayor espesor en el primer tercio desde el eje de rotación, y el perfil para el resto de la extensión que llamaremos MED, entre los 2 perfiles habrá una "zona de transición" para pasar de un perfil a otro, que al usar perfiles de geometría similar no impactara en gran medida.

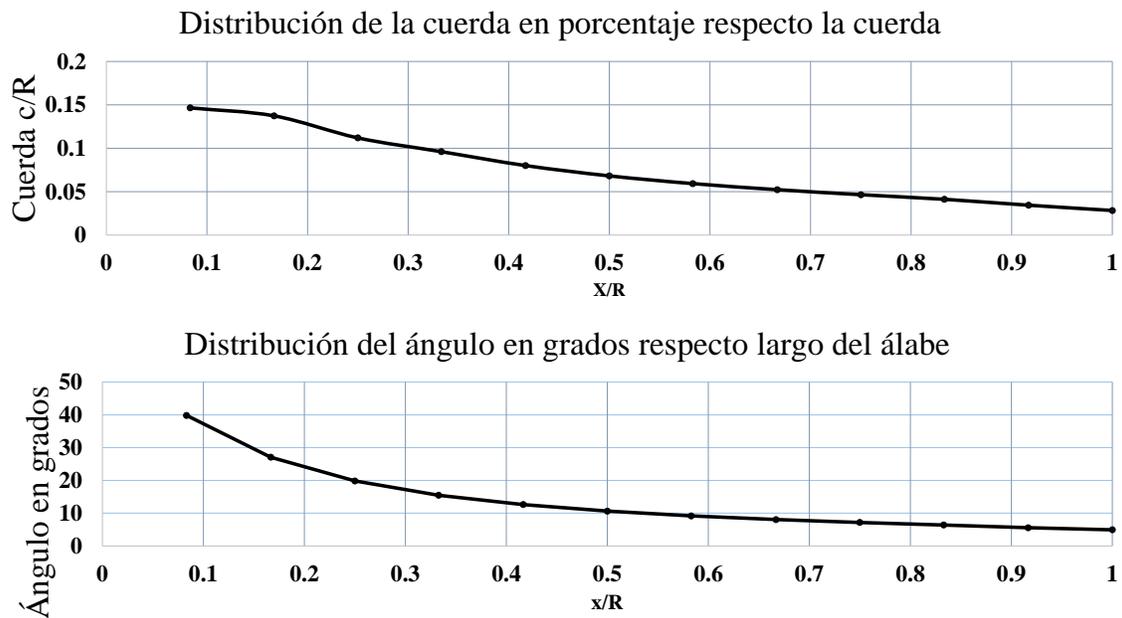


**Figura 24**

*División del álabes en 12 secciones y su distribución de perfiles*

El álabes se dividirá en 12 partes, siendo la sección número 1 la que se encuentra más cerca del eje de rotación y la sección 12 la situada en la punta o final del álabes. Teniendo en cuenta el tamaño del radio del rotor  $R$  igual a  $1m$ , la primera sección se encuentra situada a una distancia  $r$  igual a  $0,0833m$  aproximadamente  $8,3cm$ , en la Figura 24 Puede visualizarse la distribución de los perfiles a lo largo de la longitud del álabes.

En la figura 25 se puede apreciar la distribución de la cuerda junto con la distribución del ángulo de inclinación de las diferentes secciones a lo largo del álabes. En el eje vertical se representan la relación de la cuerda sobre el radio del rotor  $c/R$  y el ángulo de inclinación en grados, mientras en el eje horizontal se presenta la relación  $x/R$  entre la distancia desde el centro de rotación y el radio del rotor en metros. Estas relaciones son tenidas en cuenta para mostrar la información en números adimensionales y en porcentaje desde la perspectiva del radio del rotor.

**Figura 25**

*Distribución de la cuerda y ángulo de inclinación a lo largo del álabe calculados con la metodología BEM*

Los valores de la cuerda y ángulo de inclinación son mostrados en la Tabla 3 donde se pueden visualizar los valores de cada sección en la posición  $x/R$ .

Sección	$x/R$	Cuerda [m]	ángulo [grados]	Número Reynolds	Perfil
1	0.0833	0.1466	39.829	44500	RAIZ
2	0.1667	0.1374	27.068	55759	RAIZ
3	0.25	0.112	19.829	59420	RAIZ
4	0.333	0.0961	15.466	64280	RAIZ
5	0.4167	0.0801	12.616	65110	MED
6	0.5	0.0682	10.63	65580	MED
7	0.583	0.0593	9.172	65860	MED
8	0.667	0.0523	8.055	66050	MED
9	0.75	0.0465	7.161	66180	MED
10	0.833	0.0412	6.389	64220	MED
11	0.9167	0.0344	5.559	59040	MED
12	1	0.0283	4.916	50610	MED

**Tabla 3**

*Distribución de la cuerda y ángulo para cada sección del álabe calculado por el método BEM*

## 5.4 Análisis Dimensional

Un modelo tamaño a escala permite hacer pruebas en bancos de pruebas como túneles de viento, donde se puede controlar la velocidad del viento para analizar el comportamiento del modelo en un ambiente controlado. Por dicha razón se opta por diseñar y construir un modelo a escala del rotor de la microturbina de eje horizontal. Para hacer el escalado, se deben tener cuenta los números adimensionales, en este caso, el número de Reynolds  $Re$ , que fue usado para el cálculo y diseño de la geometría. Este número adimensional relaciona la velocidad del viento  $U$ , la densidad del aire  $\rho$ , la viscosidad dinámica del aire  $\mu$  y el largo de la cuerda en alguna sección del álabe  $c$ . teniendo la siguiente ecuación.

$$Re = \frac{U\rho c}{\mu} \quad (42)$$

Como el número de Reynolds  $Re$  es adimensional, debe ser el mismo valor para el modelo de tamaño real y el modelo a escala, al igualar, la mayoría de valores permanecen constantes excepto por la velocidad del viento  $U$  y el tamaño de la cuerda  $c$  que son relacionados entre si de tal manera que dependiendo el tamaño del modelo escala se puede determinar el valor de la velocidad de viento en el túnel de pruebas o viceversa obteniendo el tamaño del modelo escala a partir de una velocidad de prueba.

$$Re_1 = \frac{U_1\rho_1 c_1}{\mu_1} = Re_2 = \frac{U_2\rho_2 c_2}{\mu_2} \quad (43)$$

Y al despejar, se puede obtener la relación entre el modelo de tamaño real y el modelo escala.

$$U_1 c_1 = U_2 c_2 \quad (44)$$

En este caso donde  $U_p$  es velocidad de viento para el rotor tamaño real,  $c_p$  cuerda del rotor tamaño real,  $U_m$  velocidad de viento modelo escala del rotor,  $c_m$  cuerda del modelo escala del rotor. Ese factor de escala se obtiene de la relación de velocidades del modelo escala sobre el modelo de tamaño real.

$$\frac{U_p}{U_m} \quad (45)$$

De tal manera que la cuerda del modelo escala  $c_m$  se calcula multiplicando el valor del modelo tamaño real por el factor de escala.

$$c_m = c_p \frac{U_p}{U_m} \quad (46)$$

El valor de la cuerda  $c$  puede ser remplazado por otro que sea de la misma dimensión de longitud, por ejemplo, por el diámetro del rotor. Ya que el factor de escala afecta en todas las direcciones, ancho, alto y largo. El rotor de eje horizontal diseñado originalmente tiene un diámetro de  $2m$ , y con el objetivo de ser probado en el túnel de viento de la Universidad de Pamplona se hizo la relación teniendo en cuenta que las medidas del área transversal del banco de pruebas son de  $1m \times 1m$  lo que limita el diámetro del modelo escala. Además, la velocidad de viento en el túnel de prueba, por seguridad tiene un límite de  $12m/s$ . Utilizando la ecuación anterior y teniendo en cuenta una velocidad de viento igual a  $11m/s$  se obtiene la relación el factor de escala y el valor de diámetro para el rotor del modelo a escala.

Ya que la velocidad de diseño para la turbina  $U_p$  es de  $4m/s$  y la velocidad del túnel de pruebas  $U_m$  igual a  $11m/s$ . el factor de escala  $FS$  da como resultado:

$$FS = \frac{U_p}{U_m} = \frac{4m/s}{11m/s} = 0,364 \quad (47)$$

Al multiplicar el factor de escala  $FS$  por las dimensiones del rotor se consiguen todas las dimensiones del modelo a escala. Obteniendo un diámetro de  $0.728m$ .

La semejanza física es una extensión de la semejanza que existe en la geometría donde se involucran distintas variables, como la longitud, pero además aparecen dimensiones tales como la masa, la temperatura, el tiempo, etc. Dos representaciones geométricas son semejantes cuando el cociente entre dos longitudes cualesquiera e una representación es igual al cociente correspondiente en la otra. En problemas que involucran parte geométrica, todos los números adimensionales son o se pueden representar como el cociente de longitudes, y la semejanza geométrica exige la igualdad de esos números

adimensionales. En problemas cinemáticos las dimensiones fundamentales serán la longitud y el tiempo, los cocientes de velocidad, aceleración, tiempo, etc. deben ser iguales para dos problemas semejantes, además debe existir la semejanza geométrica. Sin embargo, para problemas mecánicos aparece una unidad fundamental que es la masa, esta hace que los números adimensionales resultantes de dividir masas o fuerzas correspondientes sean iguales para problemas semejantes. (41), (43). Se puede afirmar que distintos fenómenos físicos son semejantes cuando los números adimensionales que aparecen en esos fenómenos son iguales. Para el caso de aerogeneradores donde se involucran problemas fluidodinámicos hay una serie de magnitudes físicas que se pueden considerar como datos y una vez que se conocen, la solución y comportamiento de las demás magnitudes físicas queda determinado. Para asegurar la semejanza basta con exigir la igualdad de los números adimensionales (33).

Para aplicar el teorema de  $\Pi$  se determina el fenómeno físico en el que coinciden las medidas de magnitudes físicas. Para el caso del aerogenerador se encuentra que la potencia generada ( $W$ ), depende del diámetro ( $D$ ), la densidad del aire ( $\rho$ ), la velocidad ( $v$ ), la velocidad de giro ( $\omega$ ), y el número de álabes ( $n$ ). La relación que se tiene entre las medidas de las magnitudes físicas se expresa de la forma:

$$W(D, \rho, v, \omega, n) = 0 \quad (48)$$

Las unidades y dimensiones involucradas son:

$$\begin{aligned} W &= \frac{ML^2}{t^3} \\ D &= L\rho = \frac{M}{L^3} \\ v &= L/t \\ \omega &= t^{-1} \\ n &= 1(\text{adimensional}) \end{aligned}$$

Las dimensiones primarias serán entonces masa ( $M$ ), longitud ( $L$ ) y tiempo ( $t$ ). El teorema de  $\pi$  muestra que el número máximo de combinaciones adimensionales que se

puede formar con las  $m$  magnitudes físicas es  $(m - p)$ , donde  $p$  es el rango de la matriz  $3 \times 3$  escogida a partir de la tabla 4:

Dimensión	$W$	$\rho$	$v$	$D$	$\omega$	$n$
$M$	1	1	0	0	0	0
$L$	2	-3	1	1	0	0
$t$	-3	0	-1	0	-1	0

**Tabla 4**

*Unidades y dimensiones del teorema  $\pi$*

El rango de la matriz es el orden del determinante distinto de cero de mayor orden que se puede formar con las filas y columnas de dicha matriz. Para la matriz se escoge:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -3 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \quad (49)$$

A partir de esta matriz se extraen los valores para hallar el determinante, al realizar el cálculo se obtiene un valor para el determinante de la matriz igual 1. Al obtener un valor distinto de cero se confirma que ninguna de sus filas ni de sus columnas es combinación lineal de las otras, por lo tanto, el rango  $p$  de la matriz escogida es 3. Por lo tanto, se deben encontrar 3 números  $\pi$ . Los parámetros  $\pi_1 \dots \pi_{(n-p)}$  son las combinaciones adimensionales que se pueden formar con las  $m$  magnitudes asociadas a las medidas.

Para caracterizar los parámetros adimensionales se escogen tres unidades que logren representar cada una de las dimensiones, en este caso se escogieron la densidad  $\rho$  para la masa  $M$ , el diámetro del rotir  $D$  para la longitud  $L$  y la velocidad  $v$  para el tiempo  $t$ .

Para el primer parámetro se tiene:

$$\pi_1 = \rho^a v^b D^c W = \left(\frac{M}{L^3}\right)^a \left(\frac{L}{T}\right)^b L^c \left(\frac{ML^2}{t^3}\right)$$

$$\begin{aligned}M : 0 &= a + 1 \\L : 0 &= -3a + b + c + 2 \\t : 0 &= -b - 3\end{aligned}$$

Solucionando las ecuaciones se obtiene:  $a = -1, b = -3$  y  $c = -2$ , por lo tanto el primer parámetro adimensional será:

$$\pi_1 = \rho^{-1} v^{-3} D^{-2} W = \frac{W}{\rho v^3 D^2}$$

El segundo parámetro adimensional se determina de la misma manera pero ahora se relacionará con la velocidad de giro  $\omega$ :

$$\pi_2 = \rho^a v^b D^c \omega = \left(\frac{M}{L^3}\right)^a \left(\frac{L}{T}\right)^b L^c \left(\frac{1}{t}\right)$$

$$\begin{aligned}M : 0 &= a \\L : 0 &= -3a + b + c \\t : 0 &= -b - 1\end{aligned}$$

Solucionando las ecuaciones se obtiene:  $a = 0, b = -1$  y  $c = 1$ , por lo tanto el primer parámetro adimensional será:

$$\pi_2 = \rho^0 v^{-1} D^1 \omega = \frac{\omega D}{v}$$

Para el tercer parámetro adimensional se establece la relación con el número de palas  $n$ :

$$\pi_3 = \rho^a v^b D^c n = \left(\frac{M}{L^3}\right)^a \left(\frac{L}{T}\right)^b L^c 1$$

En este caso al  $n$  ser un número adimensional la búsqueda de los exponentes se simplifica pues se sabe que todos serán iguales a cero. por lo tanto, el tercer parámetro adimensional será:

$$\pi_3 = n$$

Se puede establecer la relación entre dichos parámetros de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\pi_1 &= f(\pi_2, \pi_3) \\ \frac{W}{\rho v^3 D^2} &= f\left(\frac{\omega D}{v}, n\right) \\ W &= \rho v^3 D^2 f\left(\frac{\omega D}{v}, n\right)\end{aligned}$$

Cada número adimensional viene a ser el cociente de los factores que resultan de adimensionalizar dos sumandos de una ecuación, que, al ser dimensionalmente homogénea deben tener las mismas dimensiones. Entonces, si los criterios evaluados en la dimensionalización responden a la realidad física de lo que está ocurriendo, es lógico que ese número adimensional tenga una interpretación física de lo que está ocurriendo (33). Para que un experimento logre reproducir un fenómeno real, es necesario establecer los números adimensionales, formados a partir de los datos sean iguales tanto en el experimento como en el caso real, este proceso es conocido como semejanza. La selección de los parámetros adimensionales se ha realizado en función de su importancia para lograr reproducir el fenómeno lo mejor posible.

Con los parámetros seleccionados podemos realizar la comparación entre los valores del modelo escala y el modelo de tamaño real o de prototipo de la siguiente manera. Para relacionar la velocidad angular del prototipo y el modelo a escala:

$$\frac{\omega_p D_p}{U_p} = \frac{\omega_m D_m}{U_m} \quad (50)$$

Donde  $\omega_p$  es la velocidad angular del prototipo o tamaño real,  $D_p$  el diámetro del prototipo,  $U_p$  la velocidad del viento para el prototipo, mientras que  $\omega_m$  la velocidad

angular del modelo escala,  $D_m$  el diámetro del modelo escala y  $U_m$  la velocidad de viento a la que se prueba el modelo escala. Y al despejar quedaría de la siguiente manera:

$$\omega_p = \frac{\omega_m D_m U_p}{U_m D_p} \quad (51)$$

De la misma manera, para relacionar la potencia entre ambos modelos, se utilizará la siguiente relación:

$$\frac{P_p}{\rho_p D_p^2 U_p^3} = \frac{P_m}{\rho_m D_m^2 U_m^3} \quad (52)$$

Donde  $P_p$  es la potencia del prototipo,  $\rho_p$  es la densidad del aire para el prototipo, mientras que  $P_m$  es la potencia del modelo escala y  $\rho_m$  es la densidad del aire para el modelo a escala. De igual manera se despeja, y queda resultado:

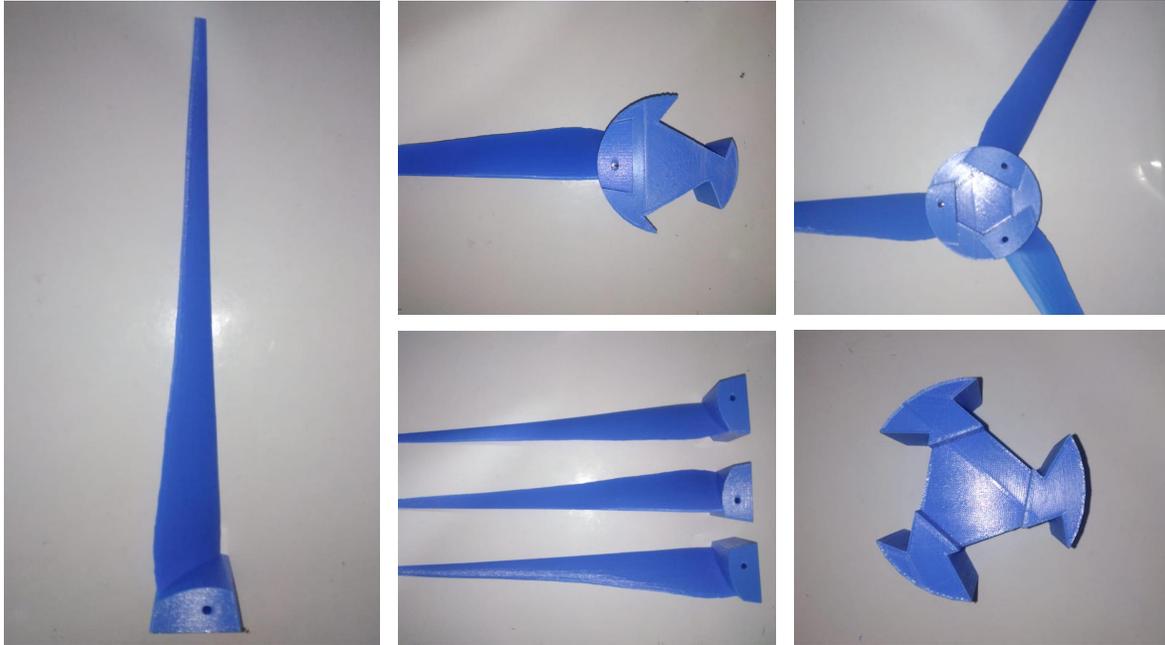
$$P_p = \frac{P_m \rho_p D_p^2 U_p^3}{\rho_m D_m^2 U_m^3} \quad (53)$$

## 5.5 Modelo tamaño escala

Con base en los datos del análisis dimensional, es fabricado un rotor de diámetro  $0,728m$ . El rotor comprende tres álabes, un hub o nariz y una base, en la cual se conecta los tres álabes y la nariz, por medio de sujeción mecánica, más específicamente por medio de tornillos. La base a su vez está conectada al eje de rotación.

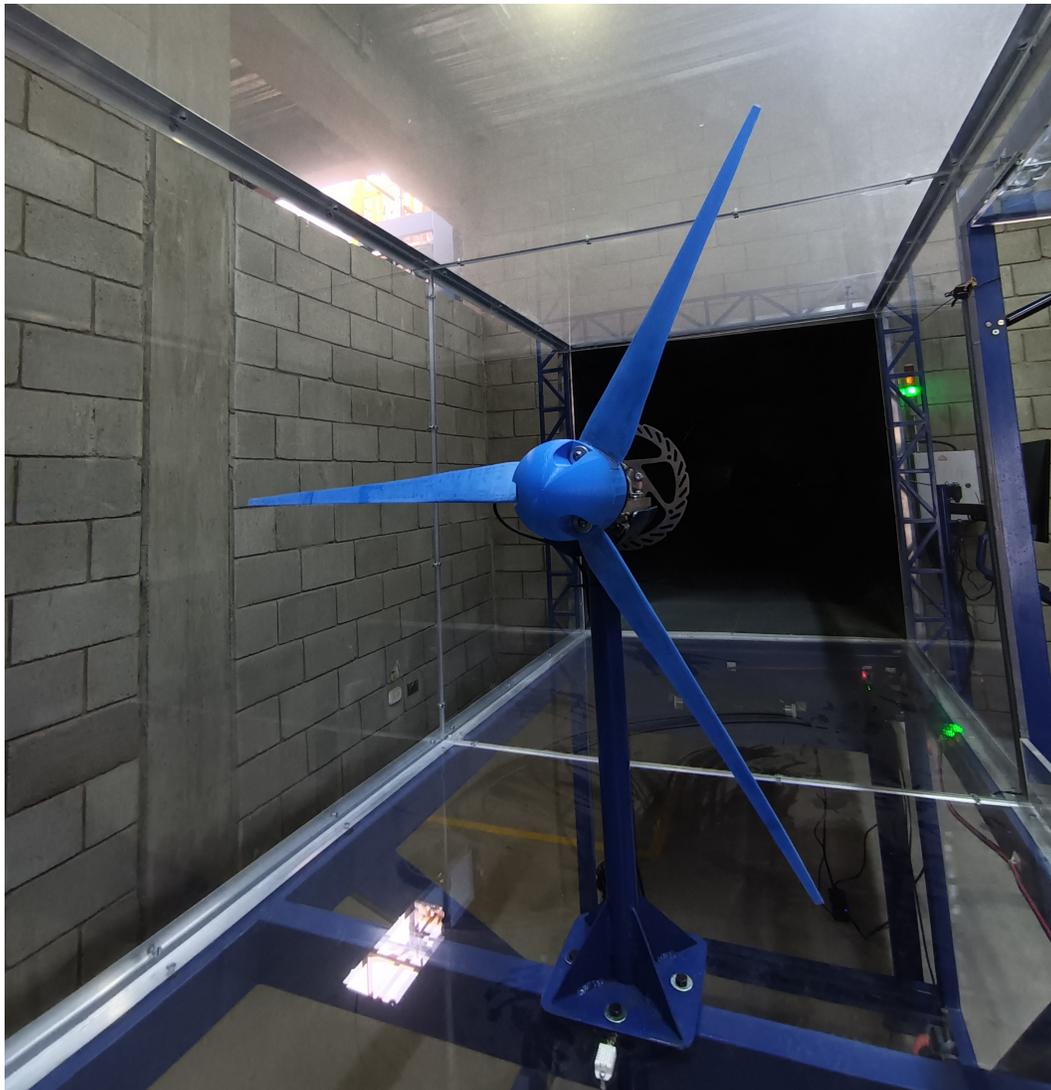
Para su fabricación se empleó el método de modelado por deposición fundida o su acrónimo FDM. Este método de impresión 3D funciona elevando la temperatura a valores cercanos a los  $200C$ , variando según el material utilizado. La fusión del material sucede en una boquilla extrusora que se mueve en los ejes X e Y, en algunos casos en el eje Z pero esta función también la puede hacer la cama. Esta cama tiene una temperatura de calentamiento que permite que el material que va siendo fundido se suelde al material base. Como material para la impresión 3D fue utilizado el PLA, o ácido poliláctico, con una temperatura de fusión entre  $180C$  y  $210C$  y es derivado de materias primas renovables naturales como el almidón de maíz.

Las piezas para el rotor fueron impresas de tal manera que encajaran, con un ensamble sencillo, pero que permitieran un transporte fácil. Las piezas impresas pueden verse en la figura 26.



**Figura 26**  
*Piezas impresas por manufactura aditiva (Impresión 3D)*

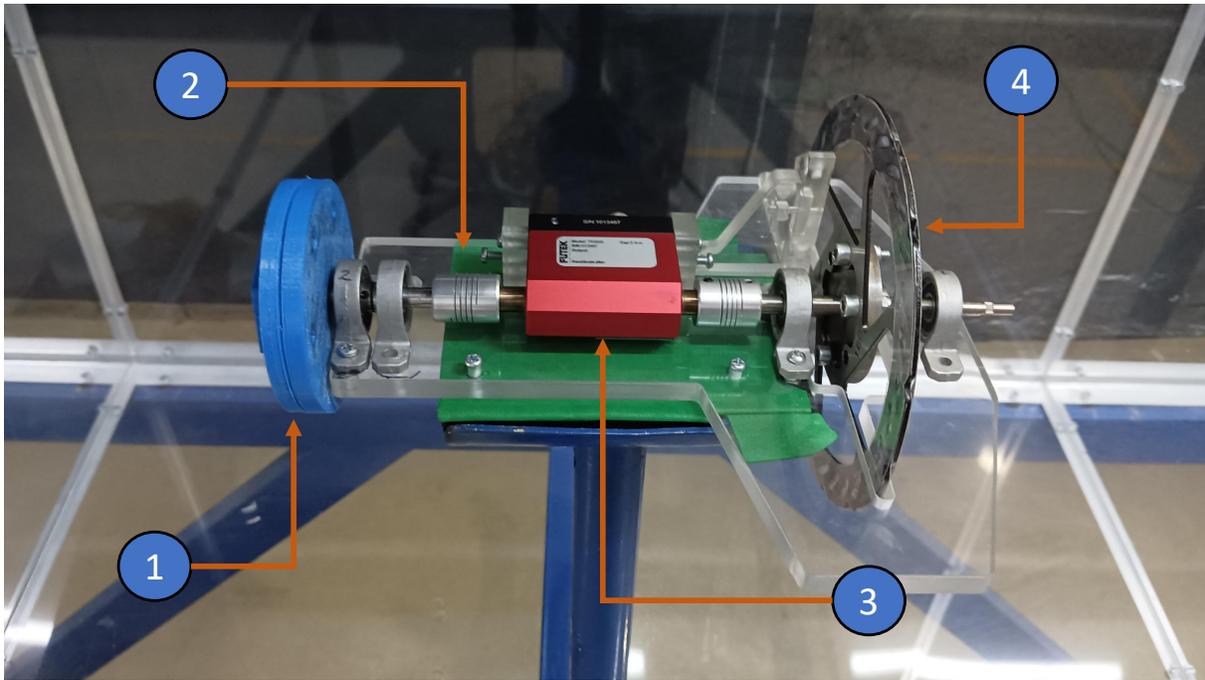
Y el montaje completo situado en el túnel de viento puede apreciarse en la imagen 27, ubicado en la cámara de pruebas de sección cuadrada. Luego de ser impresos los álabes se obtuvo el peso de cada uno, siendo 65 g, 64 g y 66 g. A los álabes se les aplicó una capa de resina epóxica para mejorar su acabado superficial y disminuir la diferencia de peso entre sí, consiguiendo 67 g en los tres, con una diferencia menor a 0,2 g entre ellos.



**Figura 27**

*Rotor impreso en 3D situado en la sección de prueba del túnel de viento*

El rotor está unido a un eje que se conecta por medio de acoples flexibles tanto al sensor de torque, como al disco de frenado, en la figura 28 puede verse el montaje.



**Figura 28**

*Montaje del sensor de torque: 1. Pieza acople con rotor, 2. Acople flexible, 3. Sensor de torque, 4. Disco mecánico para frenado*

Se alineó el montaje de manera axial utilizando un comparador de caratulas para minimizar las vibraciones que puedan afectar la medición y dañar los componentes en movimiento. Además, se implementaron acoples flexibles de aluminio que permiten cierta desalineación que gracias a su área ranurada permite que exista una tolerancia que facilite el giro.

Para mitigar la vibración hacia el soporte del tunel, fué colocada una almohada de espuma bajo la base del sensor, de tal forma que sirviera como amortiguador.

## 5.6 Oportunidades de mejora

Si bien los acoples flexibles de aluminio cumplieron su función para permitir cierta desalineación durante la rotación sin interferir en el funcionamiento y además protegieron el sensor de torque; esta misma flexibilidad es la posible causante de una pérdida de potencia importante. El cambio de acoples por uno de modelo araña o de mayor tecnología que permita mayor transmisión de potencia es una oportunidad para mejorar el

montaje.

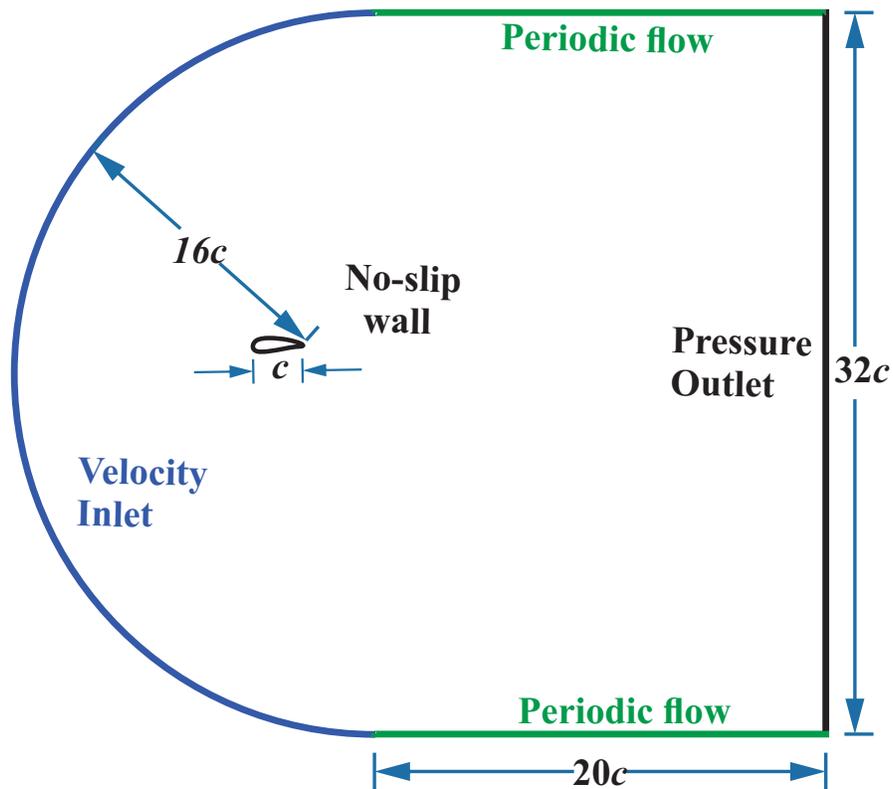
Otra oportunidad de mejora es la utilización de otro sistema de frenado, como la utilización de un freno prony, un freno de sujeción mecánica que pueda aplicar la fuerza de manera más homogénea en todo el eje. U optar por la utilización de un freno magnético, una opción mucho más costosa pero que daría un frenado más uniforme y preciso de controlar.

Adicional, el funcionamiento del túnel de viento no fue el esperado, debido a que la infraestructura eléctrica donde se encuentra el laboratorio no está diseñada para el funcionamiento de un equipo que requiere tanta potencia eléctrica, deriva en una restricción de la velocidad para el viento y como tal una restricción para las pruebas. La velocidad de viento máxima que alcanza el túnel al momento de las pruebas son  $10,67m/s$  velocidad con la que se consiguieron los resultados presentados en el próximo capítulo.

## 6 Análisis Fluido-Dinámico

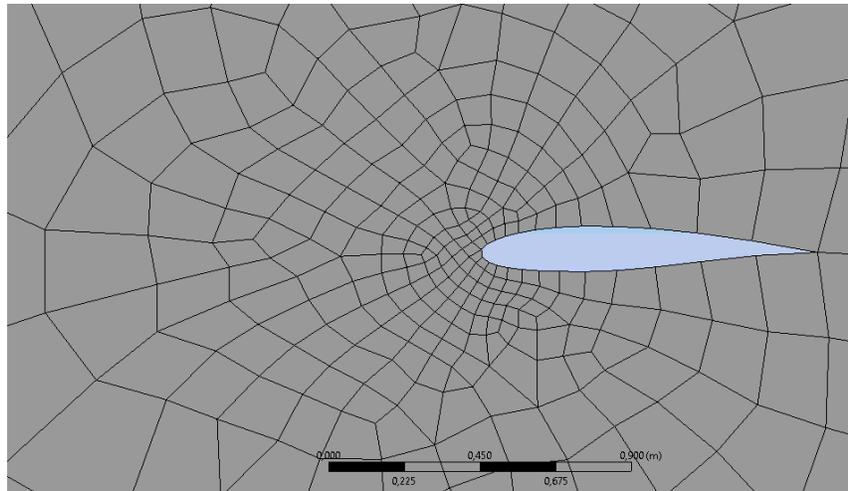
La simulación en dos dimensiones de los perfiles a utilizar en el álabe es parte importante del mismo diseño de un aerogenerador, el análisis fluido dinámico sobre estos componentes elementales dará los últimos datos sobre su rendimiento y si es requerido identificará la necesidad de un rediseño. La utilización de software CFD puede dar un concepto del rendimiento de los perfiles más acercado al obtenido de forma experimental, así como cuando se utiliza el software Xfoil.

Como parte de la simulación está el proceso de pre-procesamiento, en el cual interviene desde la búsqueda de modelos y metodologías de solución numérica hasta el diseño CAD y mallado. Teniendo en cuenta lo anterior a continuación se presentan características de simulación a tener en cuenta para el análisis numérico de los perfiles y procedimiento llevado a cabo hasta el momento: El dominio computacional es mostrado en la Figura 29 y se tiene como criterio de referencia el tamaño de la cuerda. Aguas arriba del perfil, el tamaño del dominio es 16 veces la cuerda y 20 veces para aguas abajo.



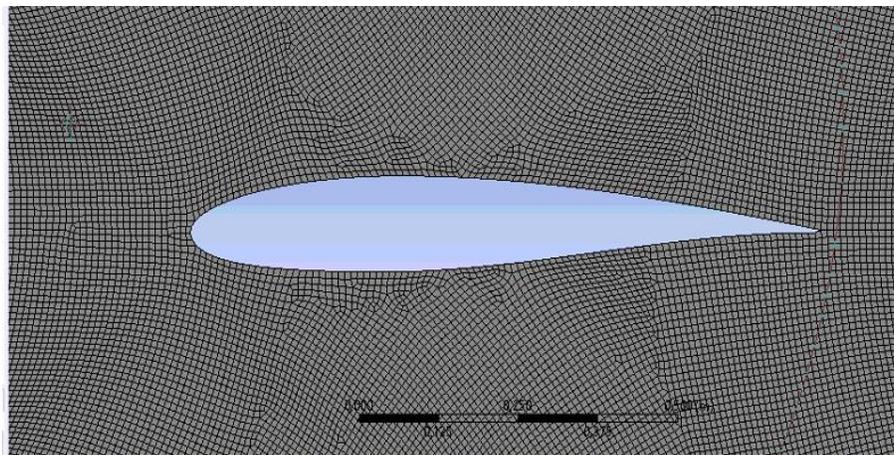
**Figura 29**  
 Descripción del dominio para análisis 2D

Fueron utilizadas las herramientas *sizing* y *Bias factor* para la generación del mallado. Para la solución numérica son tenidos en cuenta las propiedades del fluido como la densidad ( $1,225\text{kg}/\text{m}^3$ ) y la viscosidad dinámica ( $1,789 \times 10^{-5} \text{ [kg}/\text{m}\cdot\text{s}]$ ). Como modelo de transición fue utilizado el  $k - \omega$ , más específicamente modelo de turbulencia SST por su mejor rendimiento para el análisis de la energía turbulenta cercana a las paredes de objetos. Se llevó a cabo un estudio de la metodología de mallado, comenzando con un mallado por defecto que realiza automáticamente el software como se ven la Figura 30. Posteriormente, fueron utilizadas herramientas de mejora de malla mediante la utilización de la herramienta *sizing* para su estudio.



**Figura 30**  
*Mallada por defecto para el perfil*

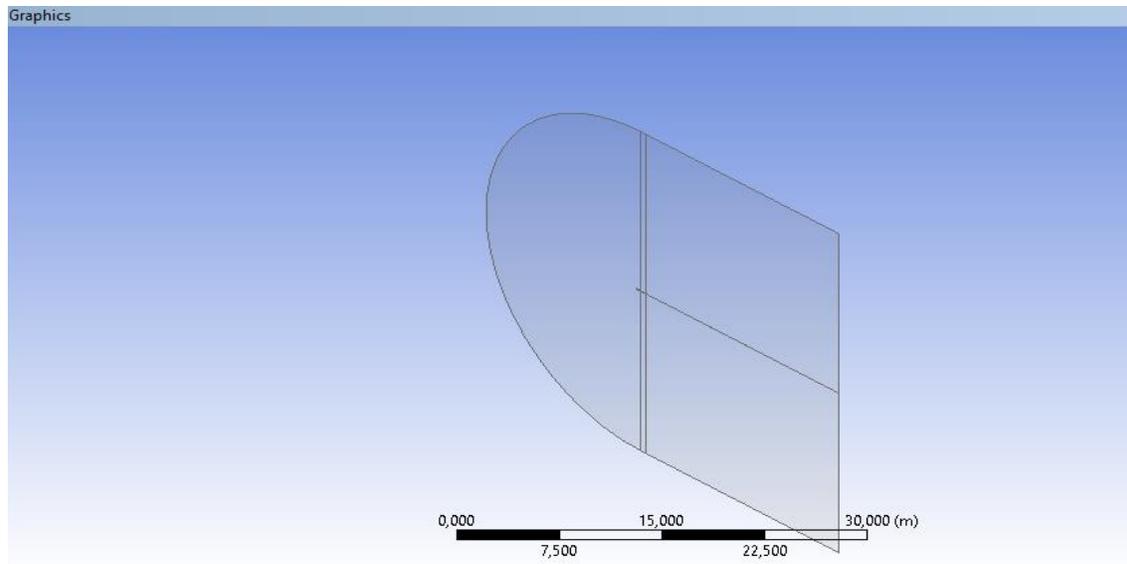
Fue aplicada la herramienta “Sphere of Influence” para controlar el tamaño de los elementos alrededor del perfil en un área circular cercana, como puede verse en la figura 31.



**Figura 31**  
*“Sphere of Influence”. Alrededor del perfil*

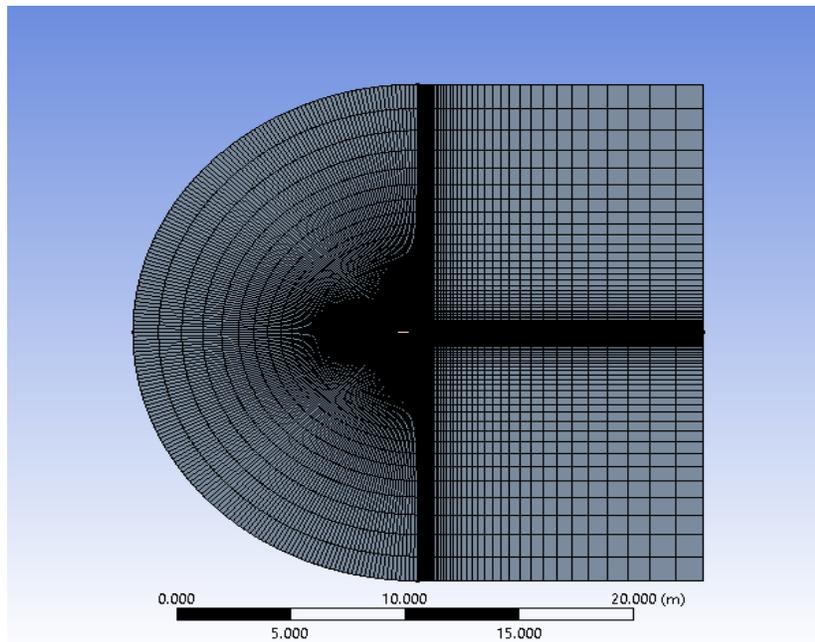
A pesar de que la forma de los elementos y tamaño alrededor del perfil mejoró considerablemente, siguen presentándose algunos desordenes y relaciones de aspectos donde los elementos no son cuadrados. Luego del intento de mejorar el mallado, solo con la utilización de herramientas de malla generada por defecto, se opta por la creación de

una malla tipo C utilizada para perfiles aerodinámicos y que se ajustara de buena manera a la forma que tiene el dominio del fluido y permite control sobre el tamaño y número de elementos. Para ella se dividió el dominio en 5 sectores, el primero de estos sectores es medio círculo ubicado aguas arriba del perfil. Otros dos sectores, uno por encima del extradós y otro por debajo del intradós y los 2 restantes detrás del perfil tanto por encima como por debajo del punto final del borde Figura 32.



**Figura 32**  
*Divisiones para el dominio*

Aprovechando las divisiones de los sectores, se utilizaron distintas herramientas de *sizing* para darle características al mallado que se ajusten al perfil de una forma más precisa. Las herramientas utilizadas fueron: *Edge sizing* junto con la utilización de *Bias factor*. Con la utilización de estas herramientas se consiguen mallas con una visualización más ajustada al perfil y con una forma de elemento homogénea. El número de elementos en la zona del borde de ataque juega un papel importante, ya que en esta región el espesor de la capa límite es de menor tamaño. En la 33 se puede ver uno de los mallados estructurados tipo C utilizados para el análisis fluido dinámico de 2D.



**Figura 33**  
*Mallado tipo C para el análisis fluido dinámico en 2D*

En el análisis numérico y simulación es necesario la utilización de una malla más refinada, por lo general representa una solución más precisa, pero a medida que la malla aumenta en su refinamiento el tiempo de cálculo aumenta. Para obtener una malla equilibrada que satisfaga la exactitud y los recursos computacionales se debe llevar a cabo un estudio de convergencia de malla, en especial cuando se va a utilizar un procedimiento para varias simulaciones. El procedimiento de convergencia de malla básicamente trata de la creación de una malla con un menor número de elementos y analizar los resultados proporcionados por ese modelo, luego aumentar el número de elementos y de nuevo evaluarlo, comparar los resultados y llevar a cabo este ciclo hasta que la diferencia entre dos resultados sucesivos sea menor a un margen de error buscado.

La búsqueda de una convergencia de malla avanzó de la mano de la disminución del parámetro  $Y^+$ . Este valor adimensional fue utilizado para tener en cuenta el tamaño del elemento cerca de la superficie del perfil aerodinámico, lo que se busca es tener un valor de  $Y^+ \sim 1$  para tener en cuenta todos los fenómenos que se presentan en la capa límite del fluido.

$y^+$  es una variable adimensional que se utiliza para describir la distancia de una pared a un punto cercano en una capa límite. En perfiles aerodinámicos,  $y^+$  se relaciona

con el espesor de la capa límite y el coeficiente de fricción de la superficie al cuadrado. Una forma de explicar  $y^+$  en perfiles aerodinámicos es usando la siguiente fórmula:

$$y^+ = \frac{u_\tau y}{\nu}$$

donde  $u_\tau$  es la velocidad de fricción,  $y$  es la distancia normal a la pared y  $\nu$  es la viscosidad cinemática del fluido.

En otras palabras,  $y^+$  mide qué tan cerca está el punto de la pared en términos de unidades de velocidad de fricción. Un valor bajo de  $y^+$  indica que el punto está muy cerca de la pared, donde el efecto viscoso es dominante. Un valor alto de  $y^+$  indica que el punto está lejos de la pared, donde el efecto inercial es dominante.

Los valores de  $y^+$  adecuados para diferentes tipos de perfiles aerodinámicos dependen del régimen de flujo y del método de modelado que se utilice. En general, se pueden distinguir tres regiones de  $y^+$  según el comportamiento de la capa límite:

- Región viscosa: cuando  $y^+$  es menor que 5, el flujo está dominado por la viscosidad y se puede resolver usando las ecuaciones de Navier-Stokes. En esta región se requiere una malla muy fina para capturar los efectos viscosos. - Región intermedia: cuando  $y^+$  está entre 5 y 30, el flujo está en transición entre la región viscosa y la región logarítmica. En esta región se pueden usar modelos de turbulencia como el *k-epsilon* o el *k-omega* para aproximar el comportamiento del flujo. - Región logarítmica: cuando  $y^+$  es mayor que 30, el flujo está dominado por la turbulencia y se puede usar la ley de la pared para relacionar el esfuerzo cortante con la velocidad. En esta región se puede usar una malla más gruesa sin perder precisión.

Para perfiles aerodinámicos que operan a bajos números de Reynolds ( $< 2 \times 10^5$ ), se recomienda usar valores de  $y^+$  menores que 1 para resolver la capa límite con mayor exactitud. Para perfiles aerodinámicos que operan a altos números de Reynolds ( $> 2 \times 10^5$ ), se pueden usar valores de  $y^+$  mayores que 30 para simplificar el cálculo y reducir el costo computacional.

En el análisis de convergencia de malla mostrado en la Tabla 5 fue evaluado el rendimiento aerodinámico del perfil SG6040. Con los resultados obtenidos no se alcanza a apreciar suficiente la convergencia del coeficiente de sustentación ni del coeficiente de arrastre, por esta razón se opta por utilizar el valor de  $Y^+ = 1$ , con un tamaño de elemento

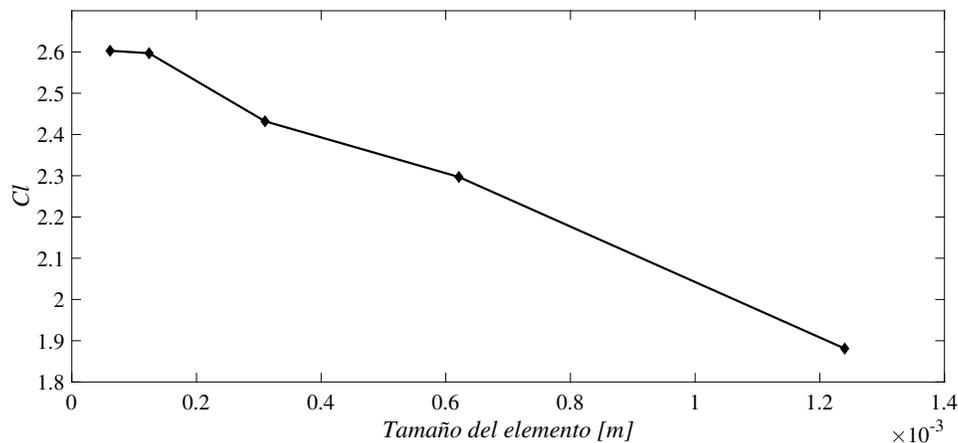
$6.14 \times 10^{-5}$ . Estos valores fueron tomados para los análisis de los perfiles aerodinámicos destinados a la RAIZ del álabe y la zona MEDIA.

Los resultados de la convergencia de mallado puede verse en la Tabla 5 y en la figura 34 en ella se detalla el cambio de las variables respuestas ( $C_l$  y  $C_d$ ) teniendo en cuenta el tamaño de los elementos de la primera capa de elementos desde el perfil aerodinámico.

Y+	Tamaño elemento [m]	$C_l$	$C_d$	Relación $C_l/C_d$
20	1,24E-3	1.88082	0.22138	8.49588942
10	6,21E-4	2.29707	0.16762	13.7040329
5	3,1E-4	2.43175	0.14539	16.7257033
2	1,242E-4	2.59720	0.12595	20.6208813
1	6,14E-5	2.60267	0.11185	23.2692892

**Tabla 5**

*Convergencia de malla. Perfil SG6040 vel=4,55 m/s,  $\alpha = 8^\circ$*



**Figura 34**

*Grafica de convergencia de malla. Perfil SG6040 vel=4,55 m/s,  $\alpha = 8^\circ$*

Respecto a la configuración para el análisis fluido dinámico se tuvo en cuenta el modelo de turbulencia  $k-\omega SST$ , cuyo modelo de solución consta de 2 ecuaciones. El modo de solución basado en presión fue seleccionado debido al bajo número Mach presente en el fluido y cuyo valor es menor a 0,15, lo que permite tratar el fluido como incompresible y no se hace necesario tener en cuenta el solucionador basado en densidad.

Para la calidad de la malla fue revisado como principal parámetro La Oblicuidad o "Skweness" como medida de calidad de malla se refiere a la calidad de la estructura,

muestra que tanto los elementos del mallado se acercan a su forma ideal, por ejemplo, un triángulo rectángulo o un cuadrado de ángulos rectos. De manera numérica, el valor conseguido debe ser el más cercano a cero y la calidad se mide en los siguientes rangos: entre 0 y 0,25 excelente, 0,25 a 0,5 bueno, 0,5 a 0,75 justo o apenas aceptable y 0,75 hacia arriba es una calidad pobre. En este caso se mantuvo la Oblicuidad en el rango de excelente con un promedio de 0,19 gracias al estilo de mallado en C que permitía los ángulos de los elementos cercanos a 90° por excepción de la región curva.

Otro parámetro que se tuvo en cuenta para el análisis numérico fue el “Aspect Ratio” o relación de aspecto, es una medida del estiramiento de la celda, en general se busca valores bajos de relación de aspecto, y se recomienda que permanezca por debajo de 35:1 para soluciones energéticas estables. Por el estilo de mallado en C del dominio para los perfiles, hay elementos en los que la Relación de Aspecto es bastante elevada, pero se tuvo en cuenta el valor promedio, y cercano a las paredes del perfil, 22:1 en este caso, aunque en los más lejanos y de las paredes, se vio valores de 400:1.

Posteriormente para el análisis en 3 dimensiones también se tuvo en cuenta estos parámetros de calidad de mallado, para los cuales corresponden valores de Oblicuidad promedio de 0,23 y una relación de aspecto de 12:1, relacionado con el uso de elementos de forma tetra-hexagonal.

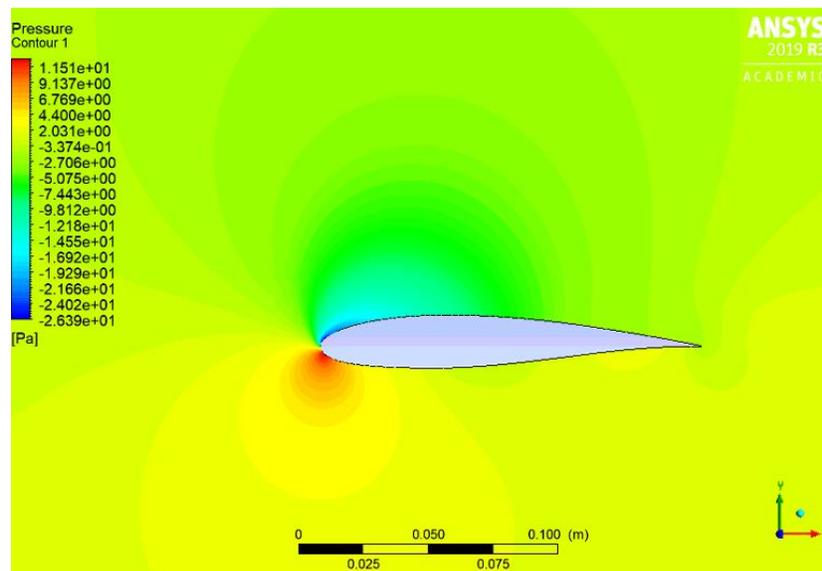
Para el análisis la velocidad del viento fue introducida de manera vectorial, su cálculo tuvo en cuenta la velocidad relativa entre cada sección del álabe y el aire las cuales son presentadas en la Tabla 6.

Sección	x/R	Cuerda [m]	velocidad viento [m/s]	Número Reynolds	Perfil
1	0.0833	0.1466	4.553	44500	RAIZ
2	0.1667	0.1374	6.087	55759	RAIZ
3	0.25	0.112	7.958	59420	RAIZ
4	0.333	0.0961	10.033	64280	RAIZ
5	0.4167	0.0801	12.193	65110	MED
6	0.5	0.0682	14.424	65580	MED
7	0.583	0.0593	16.659	65860	MED
8	0.667	0.0523	18.944	66050	MED
9	0.75	0.0465	21.348	66180	MED
10	0.833	0.0412	25.744	64220	MED
11	0.9167	0.0344	26.825	59040	MED
12	1	0.0283	26.825	50610	MED

**Tabla 6**

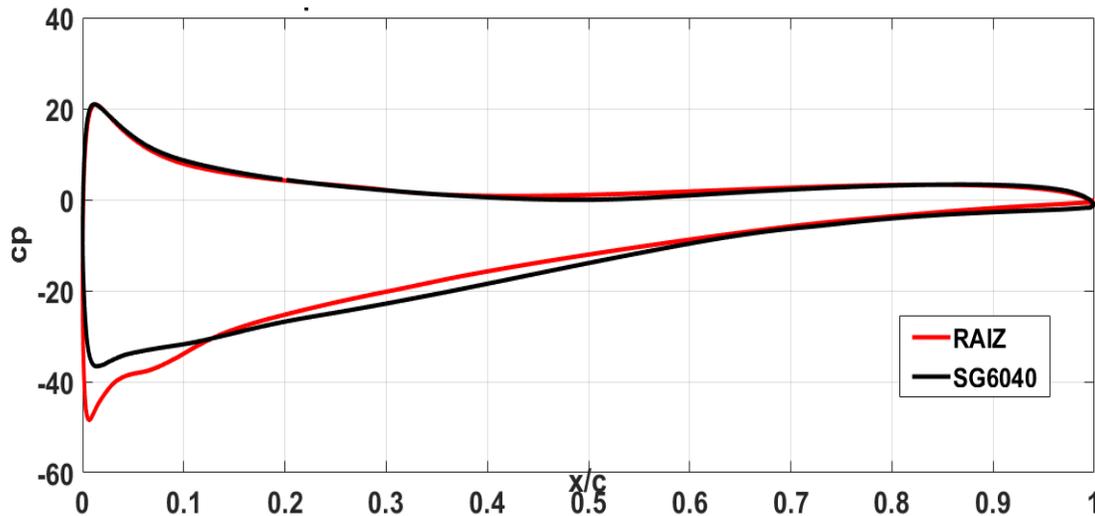
*Características de comportamiento para cada sección del álabe*

Del análisis podemos apreciar imágenes como la Figura 35, en ella se puede apreciar el cambio de presión en el intradós y extradós del perfil en estudio, siendo los contornos rojos de mayor presión y los contornos azules los de valor más bajo, se puede apreciar la diferencia de presión que representa el empuje o sustentación que obtiene el perfil aerodinámico por el fluido que pasa a su alrededor. También se puede observar que el punto de máxima presión se encuentra ubicado próximo al borde de ataque, un indicador de que el comportamiento es el esperado.



**Figura 35**  
*Contorno de presiones al rededor de un perfil*

El diagrama de coeficiente de presión mostrado en la Figura 36 se observa como el perfil RAIZ tiene un área mayor que el del perfil SG6040, correspondiente con un mayor empuje de este perfil RAIZ.



**Figura 36**  
Coeficiente de presión para el perfil RAIZ y SG6040

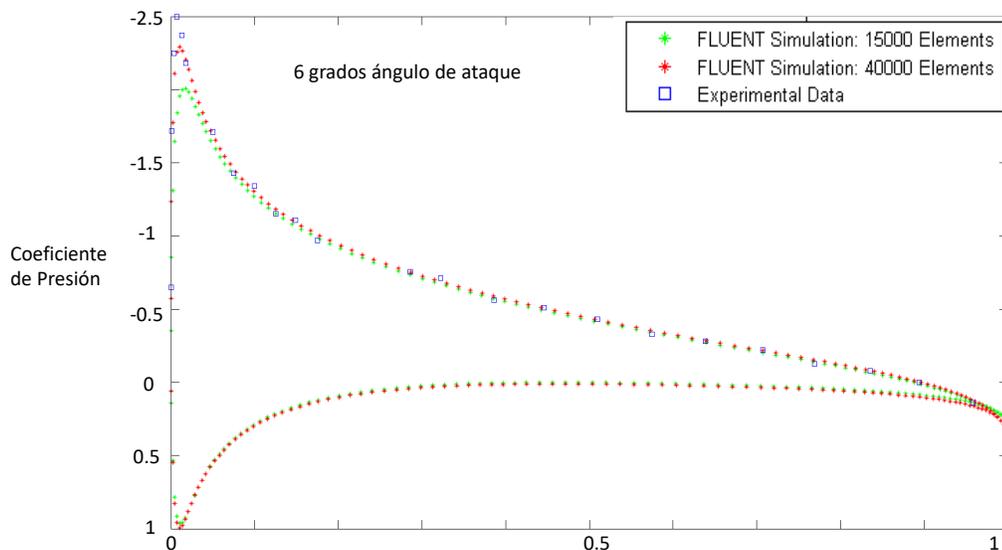
Los resultados de las simulaciones realizadas con el software Fluent se presentan en la Tabla 7 de la cual vemos un rendimiento superior o similar de los perfiles diseñados cuando se compara con los perfiles base, recordando que para el perfil de la RAIZ el perfil base fue el SG6040 y para el perfil MED, fue el SG6043. También en la Tabla 7 se hace la comparación con los resultados del software Xfoil.

Perfiles	$C_l$	$C_d$	$C_l/C_d$	software
SG6040	2.603	0.112	23.269	FLUENT
RAIZ	2.17	0.0969	22.42	FLUENT
SG6040	1.181	0.038	30.737	XFOIL
RAIZ	1.051	0.029	35.831	XFOIL
SG6043	1.98	0.621	31.859	FLUENT
MED	1.904	0.0589	32.32	FLUENT
SG6043	1.406	0.031	45.064	XFOIL
MED	1.480	0.033	44.58	XFOIL

**Tabla 7**  
Resultados de las simulaciones en diferentes softwares y sus comparaciones para los perfiles aerodinámicos

Para revisar la confiabilidad del software Xfoil se buscaron datos experimentales y análisis similares al objeto de estudio, encontrándose el realizado por la Universidad de

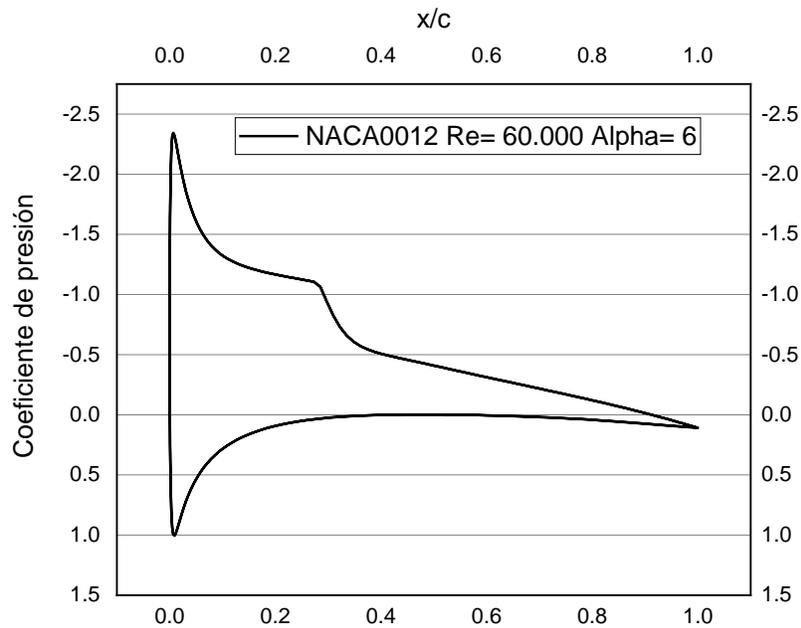
Cornell “Flujo sobre un perfil” en el cual mediante la utilización del software Fluent se analiza el perfil NACA0012. Entre los principales parametros de la simulación se encuentra que se desarrollaron con un número de Reynolds igual a  $55.8 \times 10^3$  y bajo la suposición de flujo incompresible con Mach igual a 0.15. Los resultados encontrados coinciden con los obtenidos en este trabajo. En los resultados experimentales el valor para el coeficiente de sustentación fue igual a 0.663 mientras que el valor encontrado en el software Xfoil fue de 0.697. Al comparar las gráficas para el coeficiente de presión se puede ver el buen pronóstico del software Xfoil. En datos experimentales de la gráfica 37 el coeficiente de presión llega a -2.5, mientras que con Xfoil se calculan valores muy similares como -2.3 muy cerca del borde de ataque como se ven en la Figura 38.



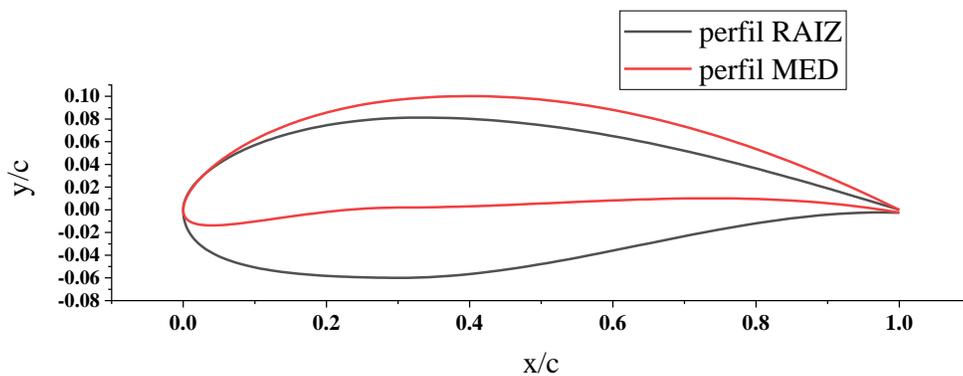
**Figura 37**

*Coeficiente de presión valores experimentales y numéricos Fuente: Cornell ((25))*

Después de este análisis sobre el funcionamiento del software XFOIL para bajos números de Reynolds, podemos ver con más confianza los datos entregados en los primeros cálculos para los perfiles RAIZ y MED. Con la suficiente confianza en los perfiles diseñados y los datos obtenidos de la metodología para el cálculo de la cuerda y ángulo de giro, se da paso al modelado de la geometría 3D del álabe y la posterior simulación numérica en 3D. Los perfiles diseñados pueden verse en la Figura 39 donde se aprecia sus diferencias geométricas, en especial su espesor y la variación del tamaño de la cuerda.

**Figura 38**

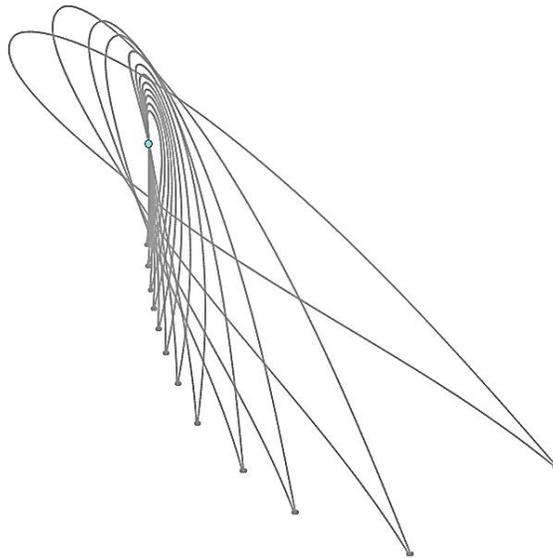
*Coeficiente de presión obtenida en software XFOIL mismas condiciones*

**Figura 39**

*Comparación geométrica de los perfiles diseñados*

Para la construcción de la geometría del álabe, las diferentes secciones fueron alineados a partir de la cuarta cuerda, como es conocido el eje que pasa un cuarto del valor de la cuerda desde el borde de ataque de los perfiles aerodinámicos, y ese mismo eje es usado como referencia para el giro de "cabeceo" o inclinación de los perfiles. Su representación

puede verse en la Figura 40.



**Figura 40**

*Alineación de los perfiles del ala en la cuarta cuerda*

Para el cálculo numérico en 3 dimensiones es seleccionada la utilización de un análisis de malla dinámica, más específicamente el llamado *six DOF* o seis grados de libertad. Este tipo de análisis permite evaluar la interacción del fluido con objetos hasta en 6 diferentes formas, 3 movimientos lineales en la dirección de los ejes  $x$ ,  $y$  y  $z$  junto con los movimientos rotacionales en dichos ejes. Es necesaria la utilización de un conjunto de mallas, una estacionaria con tamaños de elementos mayores y una malla que se moverá en la región cercana al objeto, en este caso el rotor.

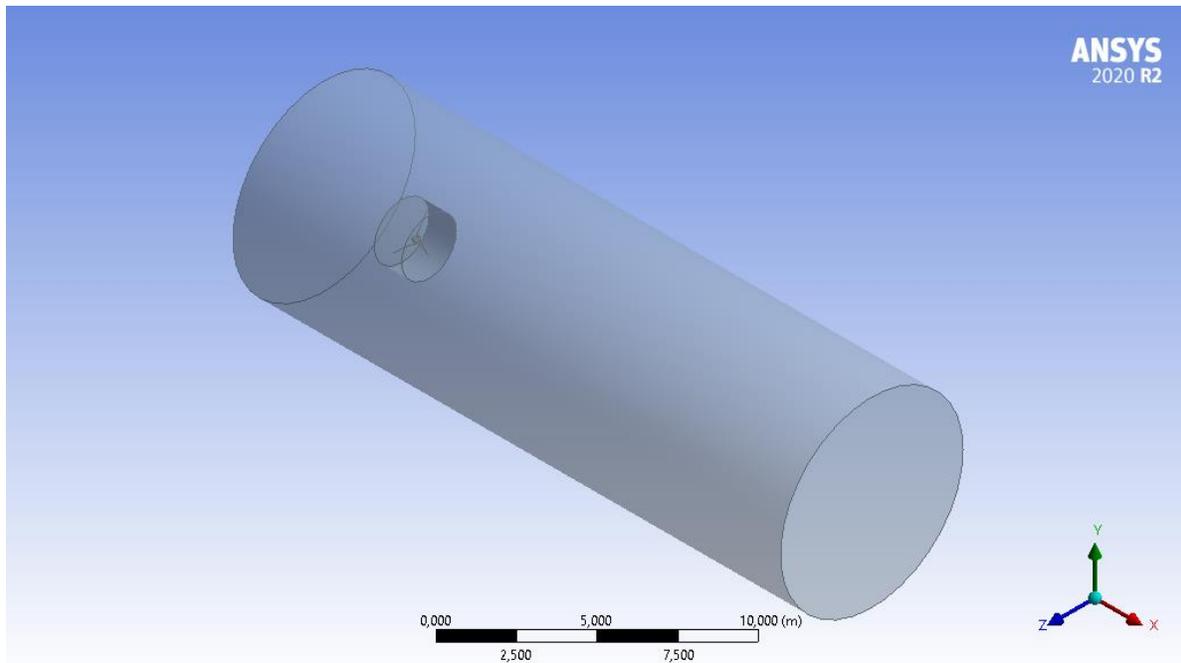
Análisis en 3 dimensiones: El dominio o espacio de fluido a ser utilizado en esta parte del análisis está basado en distintos trabajos sobre la interacción del viento con turbinas eólicas de eje horizontal, a partir de estos autores se obtiene la tabla 8 que muestra el tamaño del dominio computacional usado por ellos. Todos los parámetros son tomados desde la ubicación del centro del rotor y usan su diámetro como referencia [ $D$ ], para este trabajo  $D = 2$  [m]

Autores	Aguas arriba	Aguas abajo	Distancia radial desde centro	largo subdominio	diámetro subdominio
(18)	3D	7D	3D		
(2)	2D	13D		0,6D	1,2D
(39)	1,5D	5D	3.5D		
(61)	1,5D	3D			
(20)	3D	10D	2D		
(53)	3,6D	7,92D	2,88D		
(59)	1D	2,5D	2D		
Dominio propio	3D	10D	2D	0,6D	1,2D

**Tabla 8**

*Parámetros para dominio en 3 dimensiones según distintos autores. Todos los parámetros son tomados desde la ubicación del centro del rotor y usan su diámetro como referencia [D], para este trabajo  $D = 2m$*

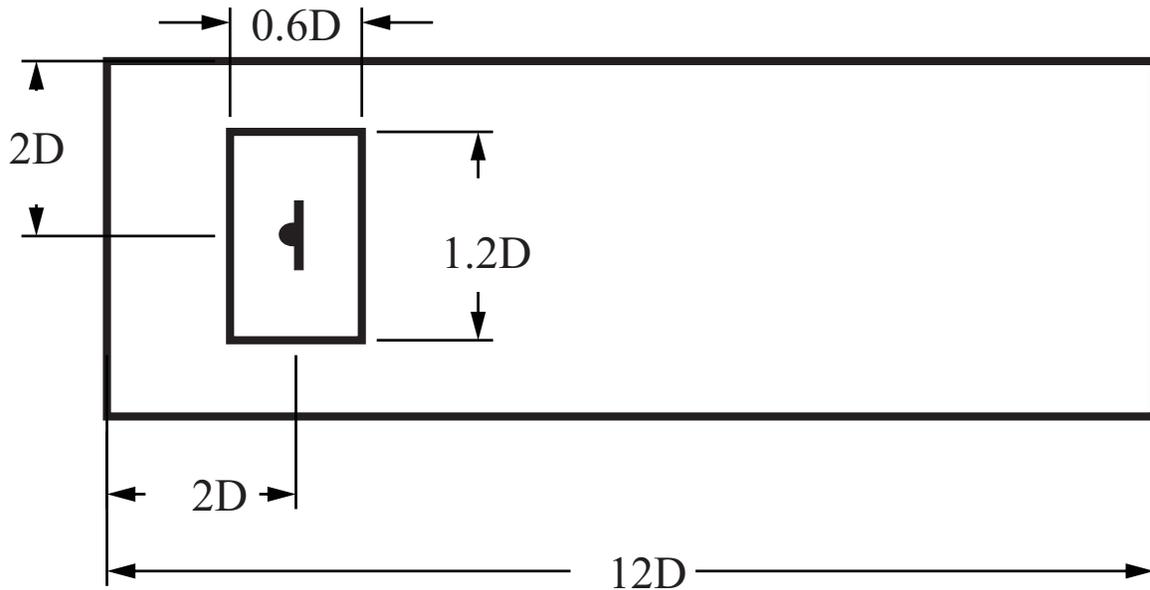
Se utilizará un dominio de forma cilíndrica, con subdominio en el interior con forma de disco que tendrá una longitud igual a  $0.6D$  (siendo  $D$  el diámetro del rotor), con el rotor centrado y un diámetro igual a  $1,2D$ , este tamaño está basado en el trabajo de abdelsalam et al (2). El dominio exterior a pesar de que este autor usa una distancia aguas arriba de 2 veces el diámetro, se eligió una distancia de 3 veces el diámetro como el que usan Gao et al y Eltayesh et al en sus trabajos, una distancia radial de 2 diámetros como indica nuevamente Gao et al (18) (20). Para la distancia aguas abajo también fue tomado en cuenta el trabajo de Gao et al junto con el de Lee et al, además de ser una distancia mayor que el tomado por Eltayesh et al de 7 veces el radio. Este dominio también tiene un tamaño similar al encontrado en el trabajo de Shapiro et al, pero cuyo dominio posee forma hexaedral con un largo total de  $11.52D$  y en las direcciones vertical y horizontal tiene un tamaño de  $5.76D$  cada una (53). La figura 41 es la imagen de la representación del dominio para las simulaciones 3D.



**Figura 41**  
*Dominio para análisis en 3 dimensiones*

Las dimensiones en función del diámetro del rotor  $D$  pueden verse en la figura 42

Modelo de turbulencia: Para el análisis numérico es necesario seleccionar un modelo de turbulencia que brinde una solución aproximada de las ecuaciones RANS (Reynolds Average Navier Stocks en inglés) las ecuaciones promediadas de Navier Stocks, que describen el movimiento de flujo de fluido y la turbulencia para calcular velocidad, presión y temperatura. Se opta por utilizar el modelo  $SSTk\omega$  que según diferentes autores proporciona resultados similares a los que se obtienen en mediciones experimentales (18) (27)

**Figura 42**

*Descripción en dirección axial del dominio en función del diámetro del rotor  $D$*

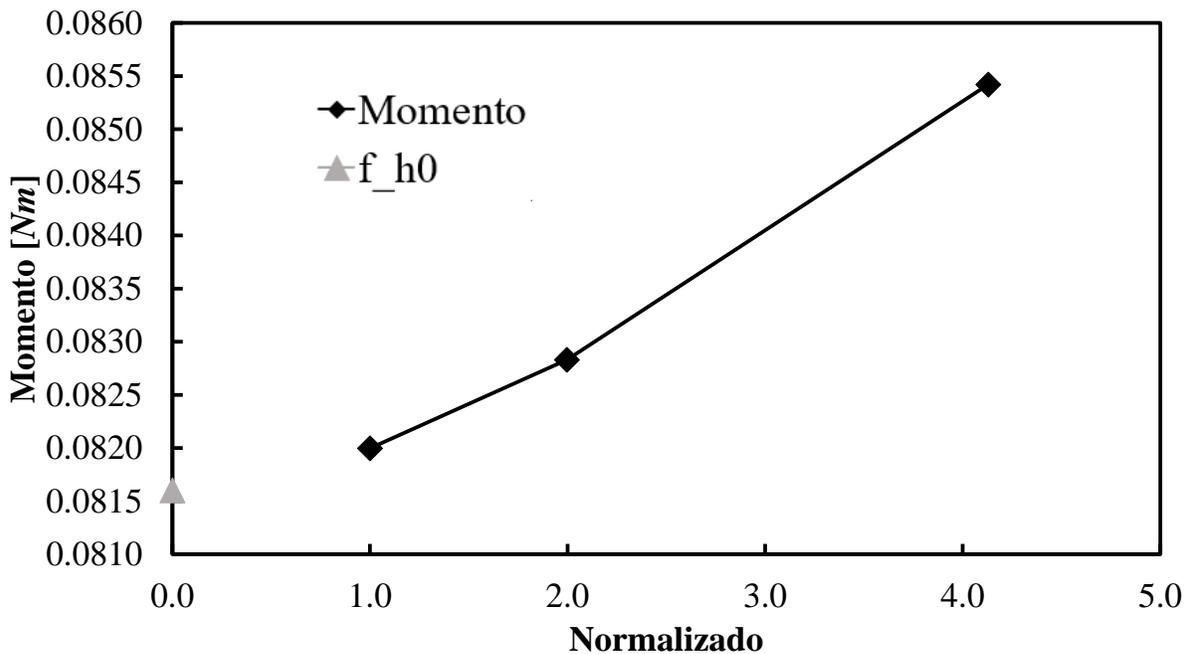
Realizar un análisis de convergencia de mallado es importante para garantizar el uso del número de elementos adecuado para tener un comportamiento fluido dinámico lo más cercano a la realidad posible sin aumentar el costo computacional desproporcionadamente. En este caso el análisis es llevado a cabo con el uso de al menos 3 mallas con distinto número de elementos, una gruesa, una media y una fina. La finalidad de las 3 es utilizar la extrapolación de Richardson, utilizada en métodos numéricos para mejorar la precisión de cálculos numéricos para la derivada de una función partiendo de la serie de Taylor.

Las tres mallas a ser utilizadas deben tener una relación en el número de elementos que pase por encima de 1,3 y que sea cercana a 2 pero no necesariamente exacto. En el análisis también se tiene en cuenta un valor respuesta esperado, ya sea momento, velocidad o cualquier otro de interés y se compara este valor con el número de elementos. Es calculado un valor objetivo  $f_{h0}$  que representa el caso donde la malla es tan fina que el espacio entre los elementos es igual a cero. Y los resultados de las 3 mallas es comparado con este valor para conocer el error de los resultados de las simulaciones.

Realizar un análisis de convergencia de mallado es importante para garantizar el uso del número de elementos adecuado para tener un comportamiento fluido dinámico

lo más cercano a la realidad posible sin aumentar el costo computacional desproporcionadamente. En este caso el análisis es llevado a cabo con el uso de al menos 3 mallas con distinto número de elementos, una gruesa, una media y una fina. La finalidad de las 3 es utilizar la extrapolación de Richardson, utilizada en métodos numéricos para mejorar la precisión de cálculos numéricos para la derivada de una función partiendo de la serie de Taylor.

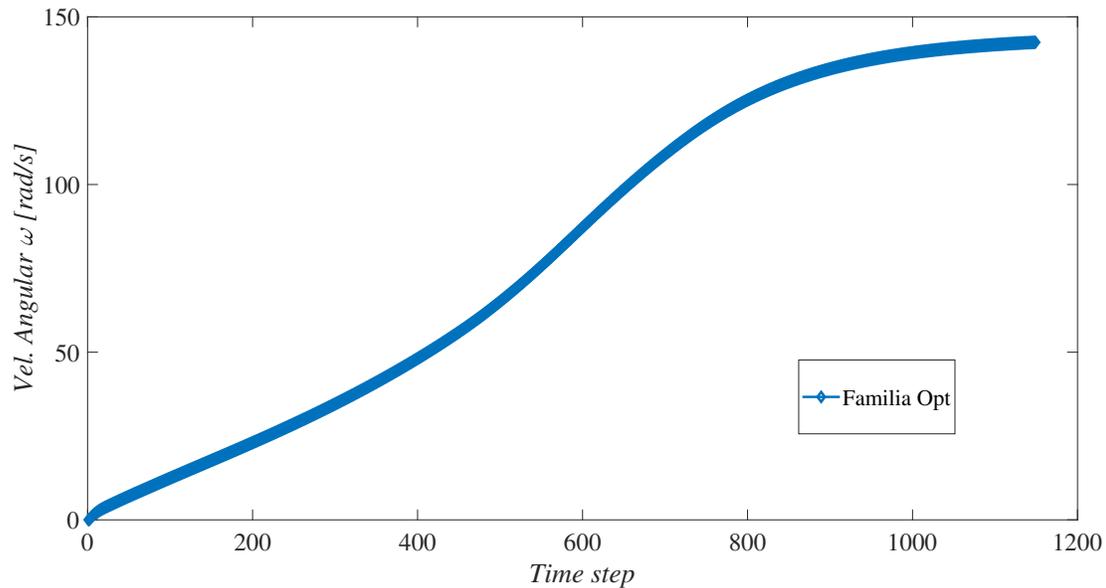
En la figura 43 podemos apreciar la grafica de convergencia de mallado, donde vemos representado el valor tomado como referencia, en este caso el Momento  $Nm$  contra el Normalizado, un valor representativo de la relación entre la cantidad de elementos de las distintas mallas utilizadas. Además podemos apreciar el valor objetivo  $f_{h0}$ , valor teórico de una malla superfina.



**Figura 43**  
*Análisis de convergencia de mallado*

Aprovechando el análisis dimensional para la fabricación del modelo escala, también se utilizaron las dimensiones obtenidas para realizar análisis en el software Ansys, el diámetro final resultó en  $0,728m$ . El primer análisis fue realizado con una velocidad de viento de  $11m/s$ , velocidad a la que fue calculado un Número de Reynolds similar para los modelos de tamaño real y escalado. De esta primera simulación se observa una veloci-

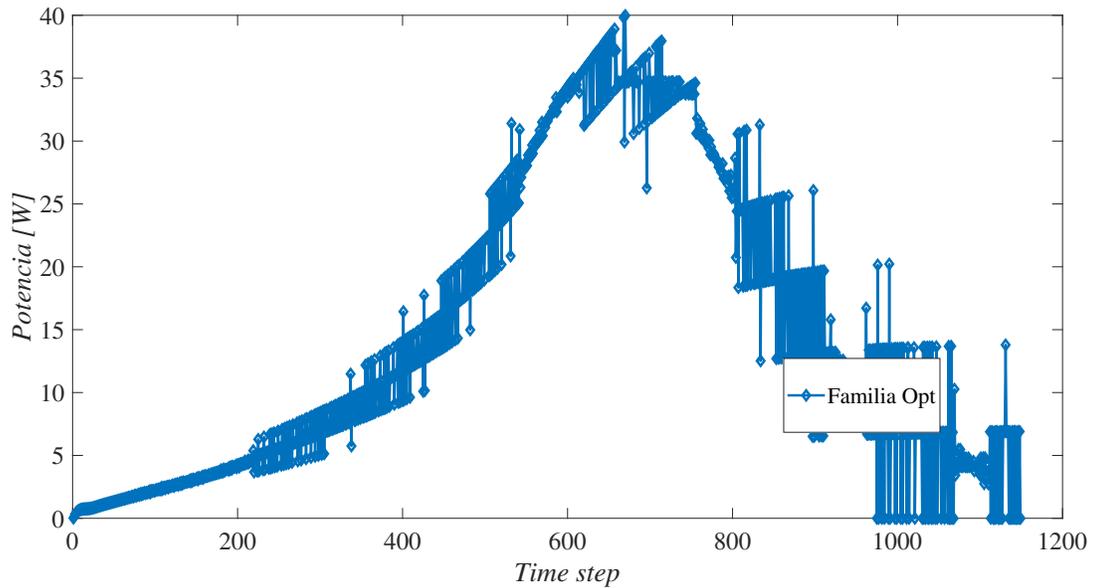
dad angular máxima de  $142,42\text{rad/s}$  lo que equivale a  $1356\text{rpm}$ . En el mismo análisis se observa que puede obtener una potencia de  $38\text{W}$  como se puede ver en la Figura 44 y en la Figura 45 .



**Figura 44**

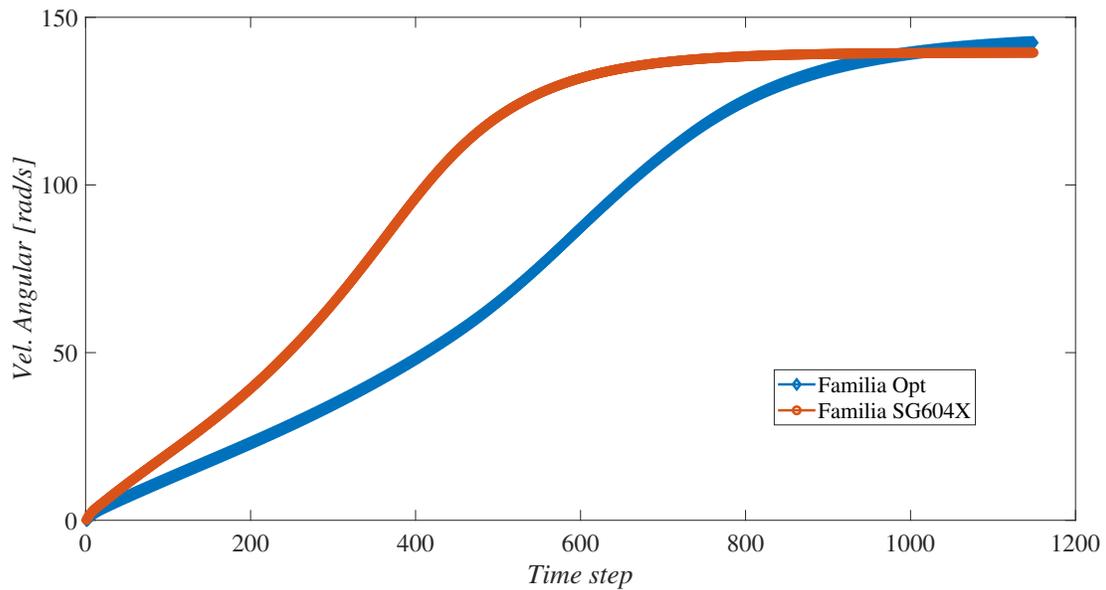
*Velocidad angular del rotor con la familia de perfiles optimizados para un viento de  $11\text{m/s}$*

En la figura 45 puede verse algo de ruido en los datos, debido a los tratamientos de datos para realizar las gráficas, de igual manera se utilizaron los valores que seguían la curva de comportamiento y no afectó el análisis de la misma.

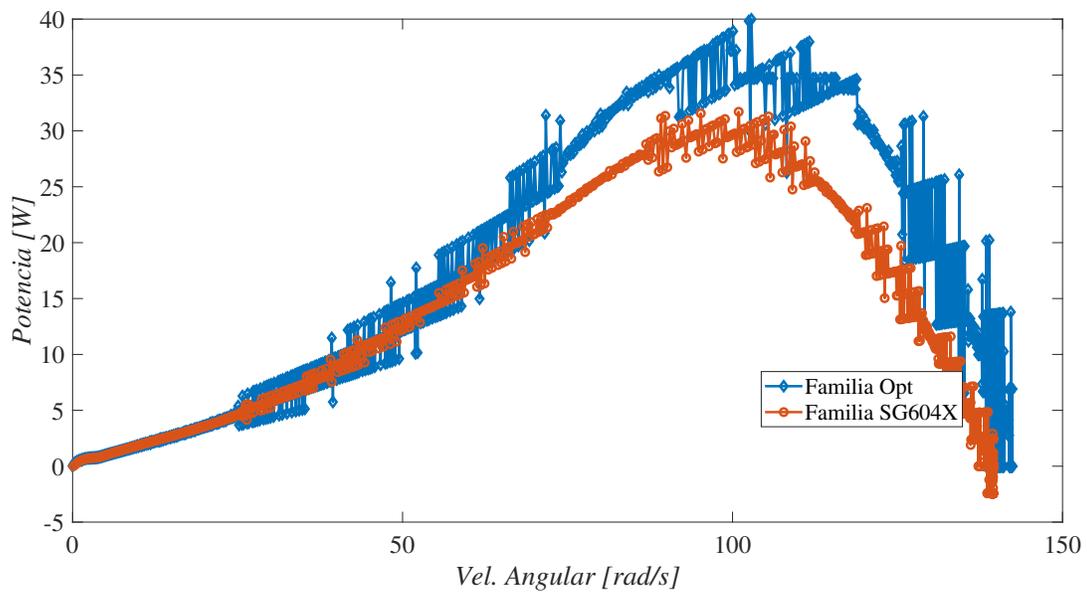
**Figura 45**

*Potencia obtenida del rotor con la familia de perfiles optimizados para un viento de 11 m/s*

En la misma escala y para la misma velocidad fue realizada una geometría de un rotor, pero utilizando los perfiles aerodinámicos SG6040 y SG6043, con los cuales se obtuvo una velocidad angular máxima de  $139,48 \text{ rad/s}$  correspondiente a  $1331,93 \text{ rpm}$ , un valor similar en velocidad, pero un 2% por debajo [46](#). En potencia se obtuvo  $31 \text{ W}$ . comparado con el modelo que utiliza los perfiles optimizados, es una diferencia de 18,4% como se puede ver en la imagen. [47](#).



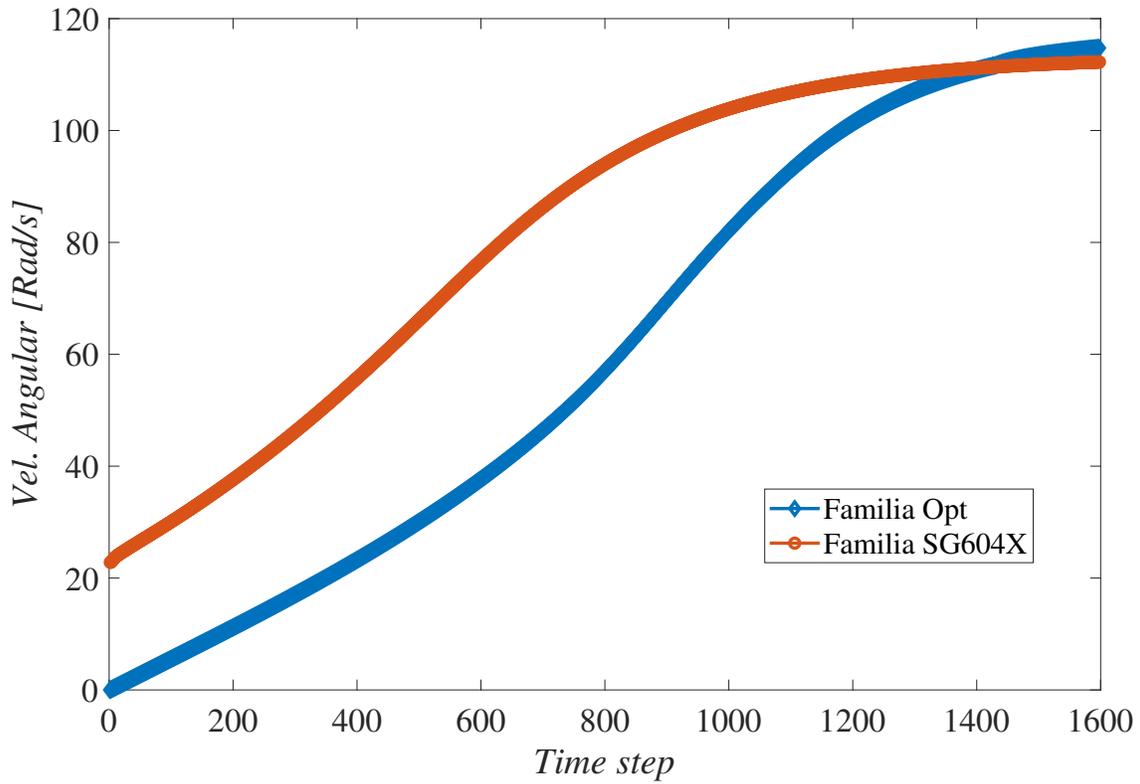
**Figura 46**  
*Velocidad angular vs time step para viento de 11m/s*



**Figura 47**  
*Potencia vs Vel. Angular para viento de 11m/s*

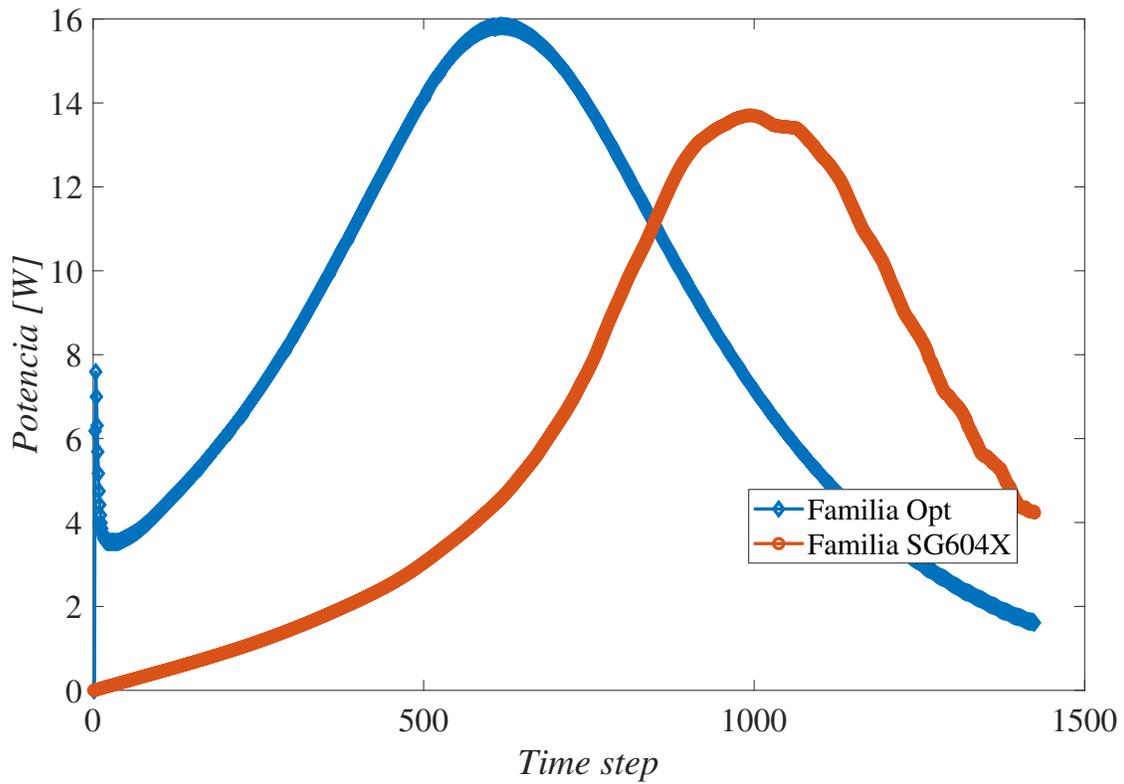
Del mismo modo, para un viento con velocidad de 9m/s encontramos que el rotor con perfiles optimizados alcanza una mayor velocidad angular máxima que el rotor que

tiene la familia de perfiles base, siendo  $116,92\text{rad/s}$  y  $113,17\text{rad/s}$  respectivamente, como se ven en la Figura 48.



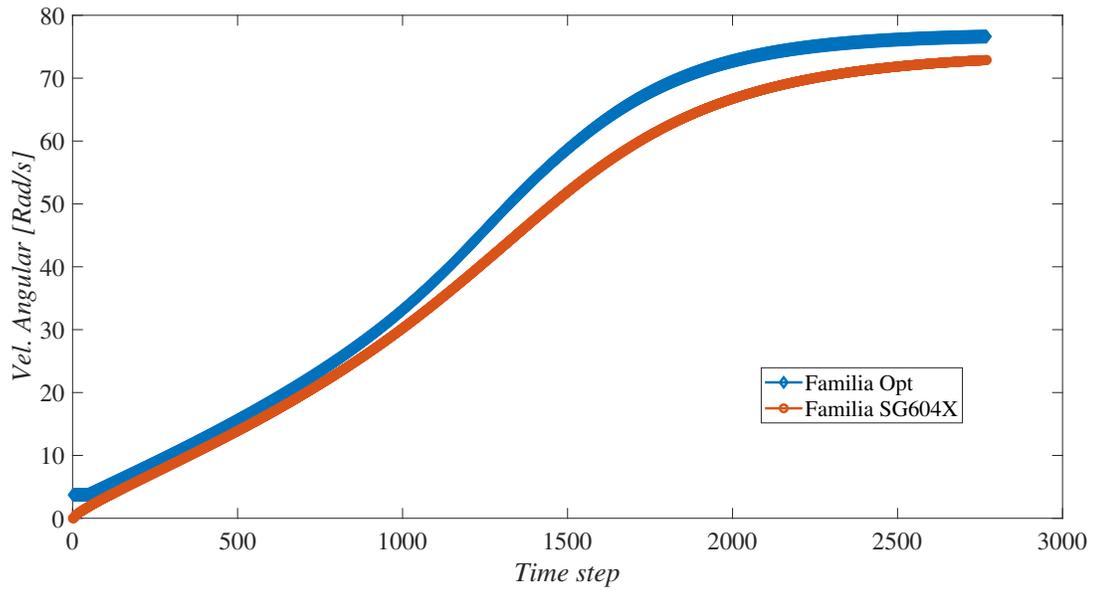
**Figura 48**  
*Velocidad angular vs time step para viento de 9m/s*

En velocidad no es una gran diferencia, pero en los valores de potencia alcanzable máxima la diferencia es mayor, mientras que el rotor optimizado tiene un valor máximo de  $15,83\text{W}$ , el rotor de la familia base solo alcanza  $13,71\text{W}$  como se ve en la figura 49

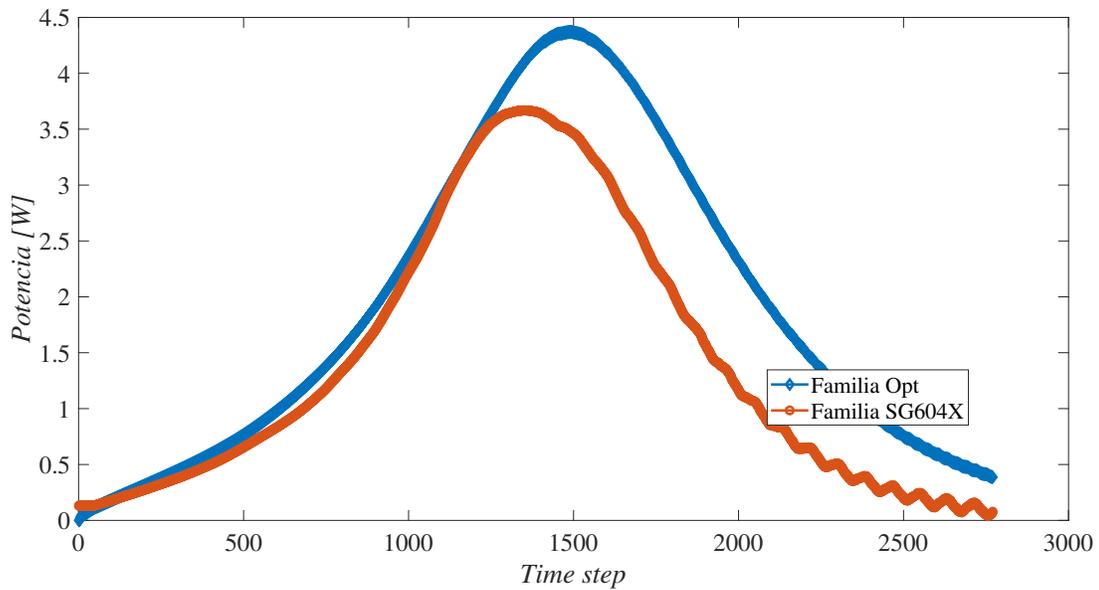


**Figura 49**  
*Potencia vs time step para viento de 9m/s*

De manera muy similar sucede en el caso de viento a velocidad de  $6\text{m/s}$ , la velocidad angular para el rotor optimizado alcanza un valor máximo apenas superior,  $76,62\text{rad/s}$  comparado con el de los perfiles base,  $72,88\text{rad/s}$ , que se puede ver en la figura 50. En potencia, es más apreciable la diferencia con valores máximos de  $4,37\text{W}$  y  $3,67\text{W}$  como se ve en la figura 51



**Figura 50**  
*Velocidad angular vs time step para viento de 6m/s*



**Figura 51**  
*Potencia vs time step para viento de 6m/s*

Velocidad de viento [m/s]	Perfil aerodinámico	Vel. angular máxima [rad/s]	Potencia obtenida [W]
11	Optimizado	142,42	38
11	Familia base	139,48	31
9	Optimizado	116,92	15,83
9	Familia base	113,17	13,71
6	Optimizado	76,62	4,37
6	Familia base	72,88	3,67

**Tabla 9**

*Resultados computacionales velocidad angular y potencia para las velocidades de viento 11m/s, 9m/s y 6m/s*

A partir de los resultados obtenidos se puede deducir que el perfil aerodinámico optimizado tiene una velocidad angular máxima y una potencia obtenida mayor que el perfil base para todas las velocidades del viento consideradas en la tabla (6m/s, 9m/s y 11m/s). Para una velocidad del viento de 11m/s, el perfil optimizado tiene una velocidad angular máxima de 142,42rad/s y una potencia obtenida de 38W, mientras que el perfil que utiliza los perfiles SG6040 y SG6043 tiene una velocidad angular máxima de 139,48rad/s y una potencia obtenida de 31W. Esto representa una diferencia del 18,4% en términos de potencia obtenida. De manera similar, para una velocidad del viento de 6m/s, el perfil optimizado tiene una velocidad angular máxima de 76,62rad/s y una potencia obtenida de 4,37W, mientras que el perfil base tiene una velocidad angular máxima de 72,88rad/s y una potencia obtenida de 3,67W. Esto representa una diferencia del 16,01% en términos de potencia obtenida.

Teniendo en cuenta que el alcance de este proyecto se focaliza en ayudar a comunidades que carecen de servicio eléctrico o tienen uno muy deficiente, se puede decir que se puede emplear un aerogenerador de pequeño tamaño con perfiles optimizados que se podría utilizar para alimentar dispositivos y sistemas de baja potencia. Por ejemplo, podría utilizar la energía generada para iluminar pequeñas áreas, para hacer funcionar sistemas de riego de baja potencia o para cargar baterías de dispositivos portátiles.

## 6.1 Análisis experimental

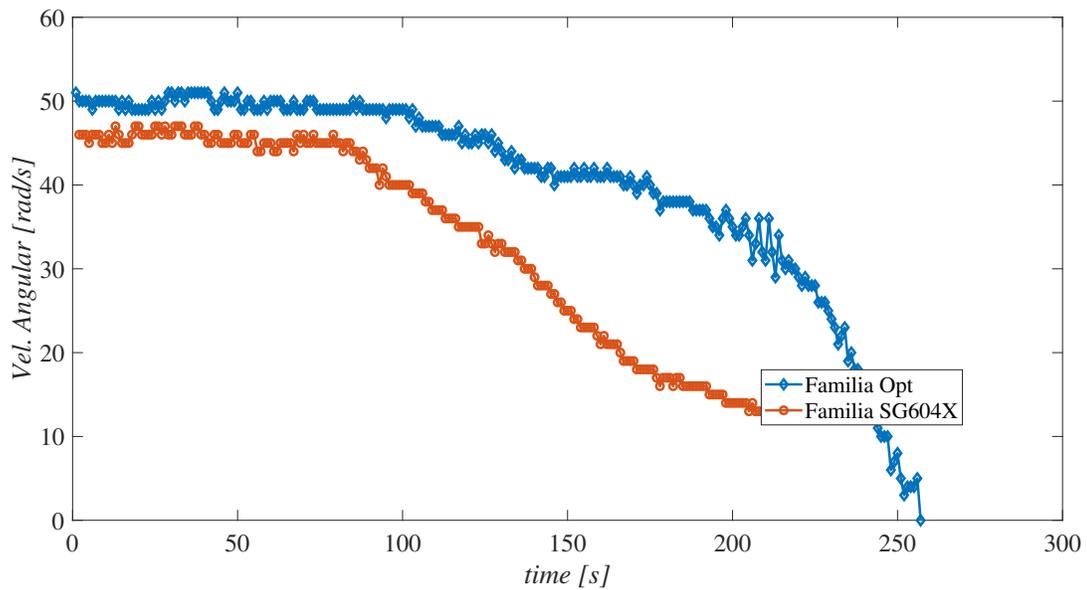
El diseño del rotor fue realizado teniendo en cuenta condiciones normales en con temperatura de 20C, una densidad de aire 1,225kg/m<sup>3</sup>, debido a la visión que se tenía dentro del proyecto para ser utilizado en alturas muy cercanas a las del nivel del mar. Los análisis numéricos fueron realizados teniendo en cuenta este entorno, mientras que

la experimentación fue llevada a cabo en un banco de pruebas tipo túnel de viento, en la ciudad de Pamplona, con una altura de  $2580m$  sobre el nivel del mar, y con una densidad de aire aproximada de  $0,8kg/m^3$ . Lo antes descrito sumado a que, en el momento de la realización de las pruebas, en funcionamiento del túnel no estaba a su máxima capacidad, solo permitió la realización de las pruebas a una velocidad máxima de viento de  $10,7m/s$  aproximadamente.

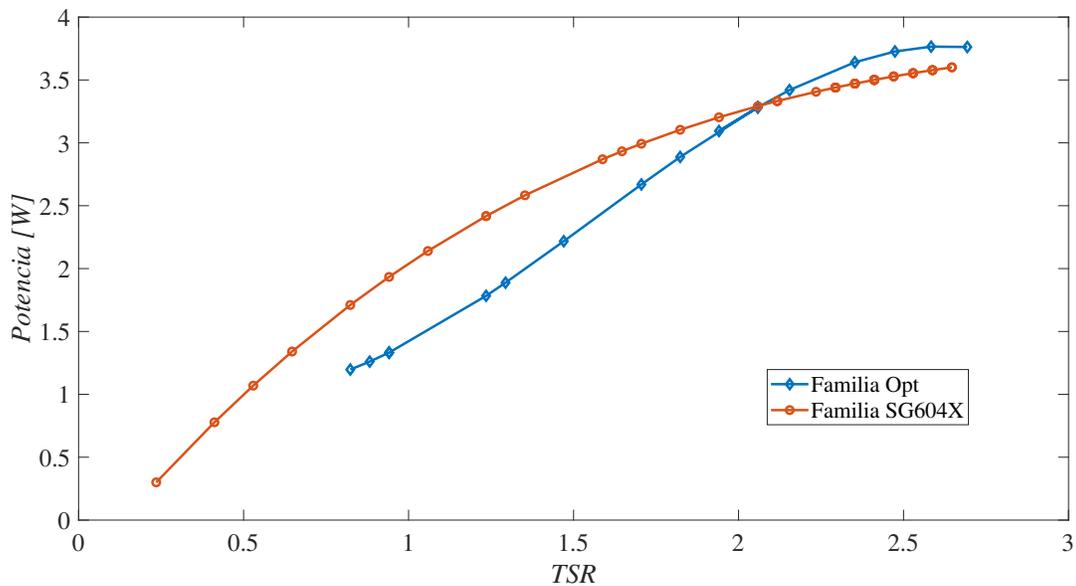
Para la toma de datos durante el experimento se tiene en cuenta que en el montaje se pueden presentar situaciones que provoquen error en la toma de los datos, entre ellas se encuentra la fricción generada en chumaceras, la pérdida de momento en los acoples flexibles que conectan los ejes del sensor con los ejes del freno y del rotor, vibraciones presentes en el montaje dentro del túnel, imperfecciones en los modelos de pruebas, desajustes en el montaje entre otras.

De manera experimental fueron comparados dos modelos de rotor, uno con la utilización de los perfiles optimizados y otro con los perfiles base de la familia SG604X, tomando datos para tres distintas velocidades de viento,  $6m/s$ ,  $9m/s$  y  $10,67m/s$ .

para viento de  $6m/s$  encontramos que la velocidad angular alcanzada es similar entre los dos modelos, el rotor optimizado alcanza  $51rad/s$  lo que equivale a  $487,01rpm$ , mientras que el de perfiles base,  $47rad/s$  equivalentes a  $448,82rpm$ . Valores alejados de los  $76,6rad/s$  y  $72,8rad/s$  obtenidos en simulación de sus respectivos, pero que mantienen la tendencia donde el rotor optimizado muestra una velocidad de giro levemente superior a la del rotor base, esto puede verse en la figura 52. Para la potencia comparada, ningún rotor saco mucha diferencia del otro, el rotor optimizado alcanzó apenas  $0,19W$  por encima del rotor base,  $3,76W$  y  $3,57W$  respectivamente, como se ve en la figura 53.



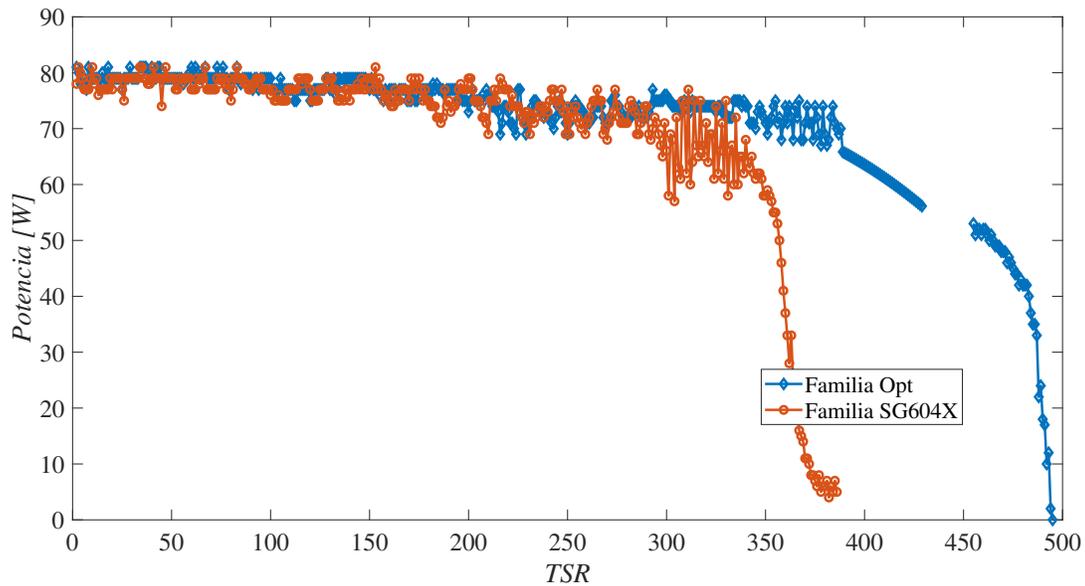
**Figura 52**  
Velocidad angular [rad/s] vs tiempo [s] para viento de 6m/s



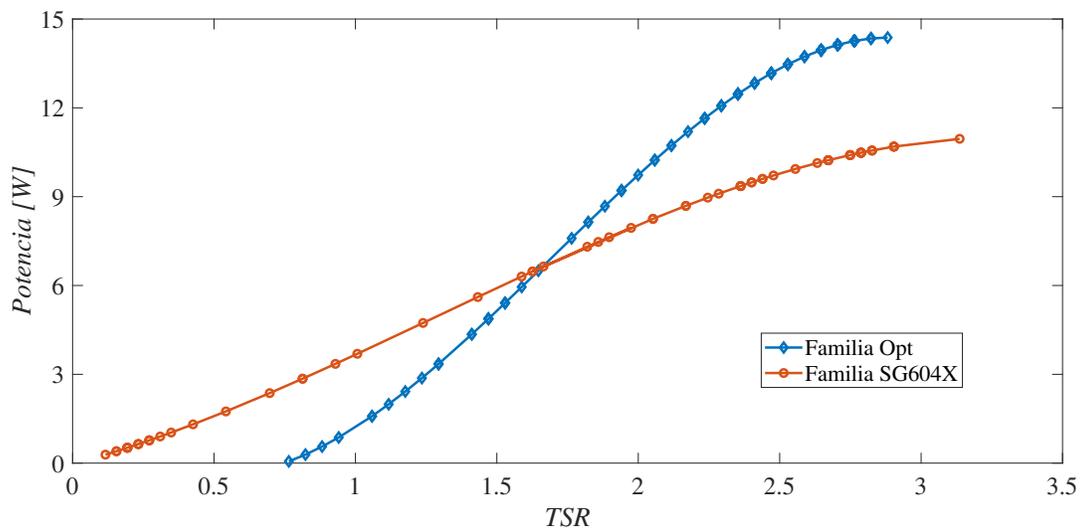
**Figura 53**  
Potencia [W] vs TSR para viento de 6m/s

En la gráfica 54 se aprecia que con viento de 9m/s el comportamiento fue similar, velocidades de rotación cercanas entre los modelos, teniendo el rotor optimizado una leve

diferencia por encima, alcanzando un valor máximo de  $81\text{rad/s}$ , mientras que el rotor base alcanzó  $79\text{rad/s}$ , equivalentes a  $773,49\text{rpm}$  y  $754,39\text{rpm}$  de manera respectiva. En potencia alcanzaron  $14,37\text{W}$  y  $10,95\text{W}$  como se ve en la gráfica 55.

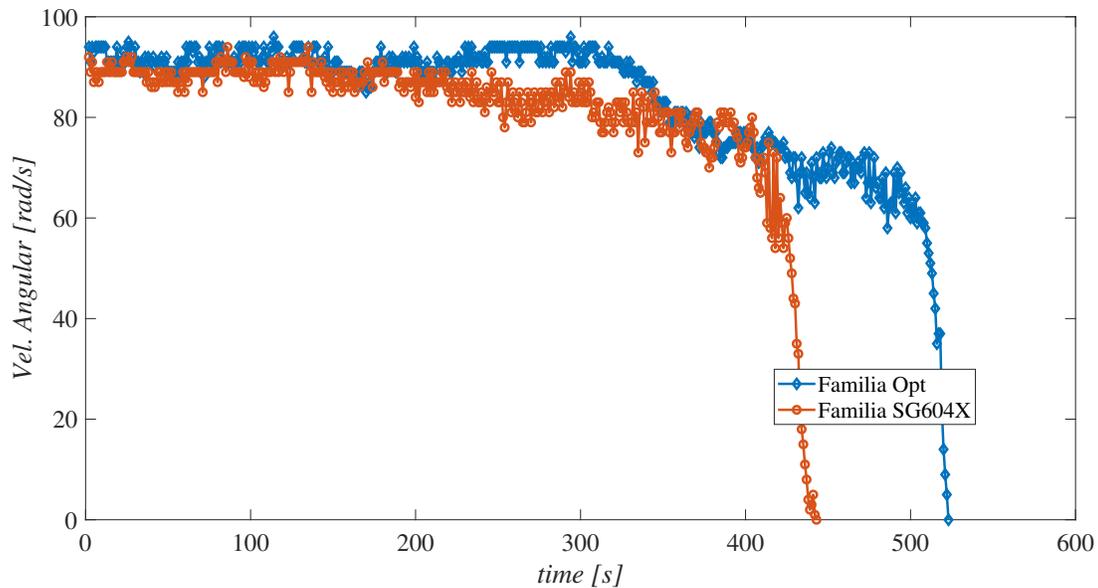


**Figura 54**  
*Velocidad angular [rad/s] vs tiempo [s] para viento de 9m/s*



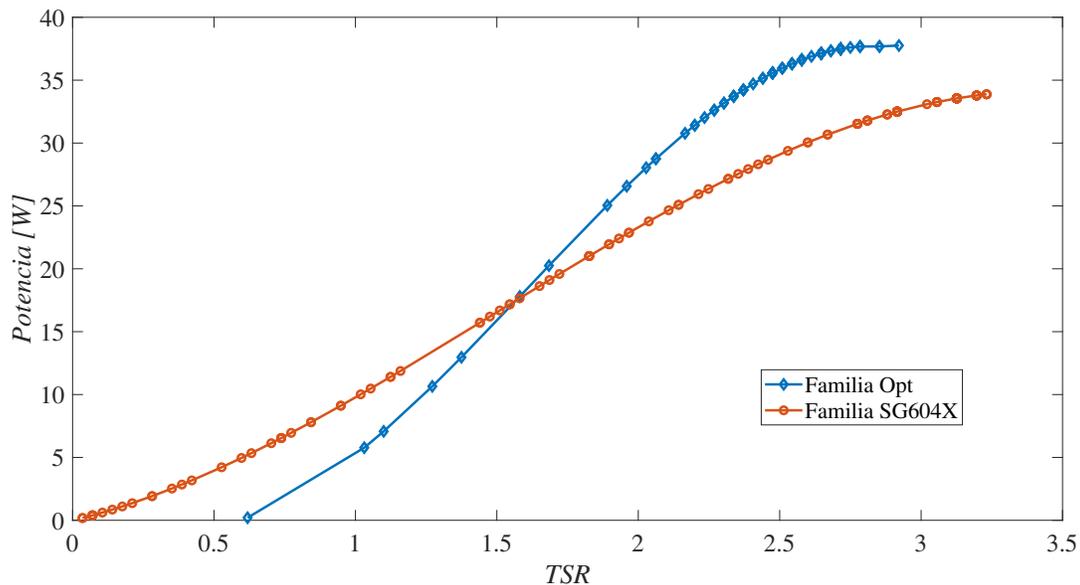
**Figura 55**  
*Potencia [W] vs TSR para viento de 9m/s*

Para viento de  $10,67\text{m/s}$  se observó velocidades de rotación similares entre ambos modelos, velocidades máximas de  $96\text{rad/s}$  y  $93\text{rad/s}$  equivalentes a  $916,73\text{rpm}$  y  $888,08\text{rpm}$  para el rotor optimizado y el SG604X respectivamente como se ve en la figura 56. Al comparar la potencia obtenida vemos que el modelo optimizado supera  $3,9\text{W}$  al modelo base, con  $37,75\text{W}$  y  $33,87\text{W}$  respectivamente y puede verse en la figura 57.



**Figura 56**

*Velocidad angular [rad/s] vs tiempo [s] para viento de  $10,67\text{m/s}$*



**Figura 57**  
Potencia [W] vs TSR para viento de 10,67m/s

Velocidad de viento [m/s]	Perfil aerodinámico	Vel. angular máxima [rad/s]	Potencia obtenida [W]
10,67	Optimizado	96	37,75
10,67	Familia base	93	33,87
9	Optimizado	81	14,37
9	Familia base	79	10,95
6	Optimizado	51	3,76
6	Familia base	47	3,57

**Tabla 10**  
Resultados experimentales velocidad angular y potencia para las velocidades de viento 10,67m/s, 9m/s y 6m/s

Al realizar el análisis en los resultados experimentales se puede observar que la tendencia con los resultados obtenidos se puede concluir que el perfil aerodinámico optimizado tiene una velocidad angular máxima y una potencia obtenida mayor que el perfil base para todas las velocidades del viento de 6m/s, 9m/s y 10,67m/s (debido a las limitaciones del túnel de viento) Para una velocidad del viento de 10,67m/s, el perfil optimizado tiene una velocidad angular máxima de 96rad/s, mientras que el perfil que utiliza los perfiles SG6040 y SG6043 tiene una velocidad angular máxima de 93rad/s produciendo cambios en relación al sistema experimental. En este caso la diferencia de potencia es de 10,52%.

Bajo estos mismos parámetros, para una velocidad del viento de  $9m/s$ , el perfil optimizado tiene una velocidad angular máxima de  $81rad/s$  y una potencia obtenida de  $14,37W$ , mientras que el perfil base tiene una velocidad angular máxima de  $79rad/s$  y una potencia obtenida de  $10,95W$ . Esto representa una diferencia del  $23,8\%$  en términos de potencia obtenida. Mientras que, para la velocidad de  $6m/s$  se obtienen valores de potencia de  $3,76W$  para el perfil optimizado y  $3,57W$  para el perfil base, produciendo una diferencia de potencia del  $5,053\%$ .

Con los resultados se puede ver diferencia en el rendimiento de los rotores, los perfiles optimizados, aunque no generan una mayor velocidad de giro, si generan una mejora en la obtención de potencia para todas las condiciones en la que se hizo pruebas. Los coeficientes de potencia de los resultados son:  $0,10$ ;  $0,13$  y  $0,19$  para viento de  $6m/s$ ,  $9m/s$  y  $10,7m/s$  respectivamente. Teniendo en cuenta que la velocidad de  $10,7m/s$  es en la que el número de Reynolds es más similar al esperado en un prototipo de tamaño real, utilizando la fórmula [53](#), encontramos que la potencia posible ronda  $21,43W$ , correspondiente a un coeficiente de potencia de  $0,174$ .

## 7 Conclusiones

1. Entre los perfiles analizados el SG6043 y BW3 destacan por su rendimiento, pero tuvo sentido que fuera seleccionado el perfil diseñado para turbinas eólicas debido a su desempeño en diferentes ángulos de ataque con menor variación para la zona de 6 a 8 grados del ángulo de ataque donde alcanzo su punto máximo de  $66 Cl/Cd$ . La selección de los perfiles SG6040 Y SG6043 haciendo dupla como familia fue provechoso para que, en la creación del álabe, la geometría no cambie de forma abrupta al pasar de sección en sección.

2. La modificación de la geometría, actuando más específicamente en la curvatura, borde de fuga, borde de ataque o espesor, resulta en una optimización adecuada para cambiar el comportamiento aerodinámico del perfil, ajustando la geometría y su rendimiento a las necesidades que se tienen. Durante el estudio, la disminución del espesor y la curvatura, se vio reflejada en el aumento de la relación de los coeficientes  $Cl/Cd$  de hasta un 11,22% y mayor estabilidad para más ángulos de ataque en el punto de máximo rendimiento.

3. El diseño del modelo en tres dimensiones de la turbina eólica permitió integrar los perfiles optimizados y definir las dimensiones y propiedades de los componentes de la turbina. El modelo resultante fue un rotor de tres palas de  $2m$  de diámetro. El modelo se construyó a escala 1:3 mediante impresión 3D y se probó en el túnel de viento. Se encontró que el modelo tenía un buen desempeño aerodinámico y mecánico y que logró generar una potencia eléctrica de  $37,75W$  a  $10,67m/s$ . Con el análisis dimensional corresponde a  $21,43W$  con un viento de  $4m/s$ .

4. Fue encontrada una gran diferencia en el comportamiento de los rotores entre el análisis numérico y los resultados recogidos de forma experimental, en mayor medida se vio una gran diferencia en la velocidad de rotación, de forma experimental fue mucho más baja, razones supuestas para explicar esto son la fricción de los componentes del montaje experimental, desajustes en el mismo montaje y vibraciones encontradas por la rotación, que aunque fueron disminuidas en gran medida con el uso de componentes de seguridad como acoples flexibles, espumas para amortiguación e instrumentos de alineación, no se pudieron mitigar en su totalidad, y representan una pérdida de potencia importante. A pesar de la diferencia en la velocidad de rotación, la potencia obtenida de forma experimental y la potencia esperada por el análisis numérico no tuvo tanta diferencia. Como observacion para el futuro, el uso de dispositivos de mucha más precision pero de un costo

monetario mayor, pueden ser una alternativa interesante para trabajos del mismo tipo.

El gran tamaño del túnel de viento fue ventajoso para el trabajo de pruebas con el modelo escala, ya que la precisión de la geometría de los álabes se dificultaba a medida que debía disminuir su tamaño. No obstante, incrementaba la velocidad con la que el viento debía moverse, para mantener el valor del número adimensional Reynolds al cual se habían hecho los análisis en simulación. Este incremento de velocidad supone un incremento en la potencia necesaria para mover el rotor del túnel de viento, potencia que en el momento del trabajo no puede soportar la instalación eléctrica del laboratorio de la Universidad de Pamplona, limitando la velocidad de viento a un máximo de  $10,67\text{m/s}$ .

5. La evaluación del desempeño de la turbina diseñada se realizó mediante la comparación de los resultados obtenidos de manera numérica y experimental. Se midió la potencia eléctrica generada por la turbina para diferentes velocidades del viento, tanto en el túnel de viento como en la simulación. Se encontró que la turbina con los perfiles optimizados presentó un aumento de la potencia del 13% en promedio, en comparación con la turbina con los perfiles base, sin embargo, el mejor funcionamiento se presenta cuando las velocidades de vientos son cercanas a los  $9\text{m/s}$ . Además, se observó que, tanto en el túnel de viento como en la simulación, la potencia tenía la misma tendencia, es decir, se pudo observar el aumento de esta con la velocidad del viento hasta alcanzar un valor máximo y luego su disminución. Característica que permitió comparar ambos tipos de resultados.

6. La metodología utilizada, para una microturbina de eje horizontal de  $2\text{m}$  de diámetro no es la más indicada para el aprovechamiento de vientos de baja velocidad (que no superan los  $5\text{m/s}$ ), el tamaño de la turbina, y el diseño simple de los álabes no es suficiente para aprovechar vientos con tan baja velocidad con una turbina de eje horizontal ya que el rotor solo obtuvo un coeficiente de potencia de  $0,174$  bastante bajo para el  $0,3$  esperado. Si bien los perfiles optimizados tuvieron un mejor rendimiento que los perfiles utilizados como base, no permitieron una extracción de energía suficiente para ser bien aprovechada y se deberían abordar diferentes metodologías para seguir en el estudio de su aprovechamiento.

El proyecto de investigación realizado como ejercicio académico de formación fue de gran utilidad para el entrenamiento del autor en diversas habilidades. Si bien el resultado no fue práctico por las limitaciones encontradas en el diseño y bancos de pruebas, si permitió el aprendizaje de herramientas y estrategias de modelamiento numérico, fa-

bricación de modelos escala y prototipos, trabajos en manufactura aditiva, herramientas computacionales y matemáticas, extraer y sintetizar información relevante de datos obtenidos a partir de diferentes tipos de observaciones para validar y verificar resultados de las pruebas hechas. También desarrolló el pensamiento creativo y el método científico para diseñar soluciones eficientes, explorar alternativas y posibilidades e incorporar elementos novedosos o mejorados al prototipo. Además, fortaleció sus capacidades de planificación y organización de recursos, así como sus habilidades de investigación, comunicación y trabajo en equipo. Habilidades que servirán para futuros proyectos o trabajos relacionados con este tema y le ayudaron a desarrollar su pensamiento crítico, su creatividad y su capacidad de resolver problemas. Así, se espera que este trabajo contribuya al avance científico y tecnológico en el diseño y la optimización de aerogeneradores de pequeño tamaño que operen a baja velocidad de viento y otros temas de interés relacionados.

## 7.1 Conclusión General

En la investigación presente, se ha estudiado de manera numérica y experimental el rendimiento de una microturbina eólica de eje horizontal de  $2m$  de diámetro con el fin de aprovechar vientos baja velocidad ( $4m/s$ ) y se llevó a cabo en diferentes etapas. En la primera etapa fue seleccionada una familia de perfiles para posteriormente realizar una optimización de la geometría, la familia que fue seleccionada por su rendimiento aerodinámico fue la familia SG604X, diseñada para bajos números de Reynolds, más específicamente los perfiles SG6040, con mayor espesor para la zona de la raíz del álabe, y el perfil SG6043, con menor espesor, pero con mayor rendimiento para ser usado en la zona del cuerpo. Luego de aplicar el algoritmo de optimización para aumentar su rendimiento, fueron utilizadas las geometrías modificadas en el diseño de un rotor, que en las siguientes etapas del trabajo fue analizado tanto numérica como experimentalmente, encontrando que el desempeño con los nuevos perfiles fue comparablemente mejor que el desempeño de los perfiles originales. Pero a pesar de esto no se encuentra viable el uso para aprovechar vientos de  $4m/s$  en gran medida.

La metodología utilizada, el rendimiento de un rotor de 3 palas, para una microturbina de eje horizontal de  $2 m$  de diámetro no es la más indicada para el aprovechamiento de vientos de baja velocidad (que no superan los  $5 m/s$ ), el tamaño de la turbina, y el diseño simple de los álabes no es suficiente para aprovechar vientos con tan baja velocidad ya que el rotor solo obtuvo un coeficiente de potencia de  $0,174$  bastante bajo para el  $0,3$  esperado. si bien los perfiles optimizados tuvieron un mejor rendimiento que los perfiles

utilizados como base, no permitieron una extracción de energía suficiente para ser bien aprovechada y se deberían abordar diferentes metodologías para seguir en el estudio de su aprovechamiento.

En términos generales se puede decir que aunque los resultados entre el análisis fluido dinámico y el experimental difieren se puede observar que siguen la misma tendencia y esta se caracteriza por obtener mayores potencias al optimizar el perfil del álabe. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la potencia que se obtiene dependerá de la velocidad del viento y si esta es baja también la potencia será considerablemente baja y puede no ser suficiente para satisfacer todas las necesidades energéticas de una vivienda. En este caso, podría considerar la posibilidad de utilizar múltiples aerogeneradores para aumentar la cantidad de energía generada o combinar el uso de aerogeneradores con otras fuentes de energía renovable.

## 8 Referencias Bibliográficas

### Referencias

- [1] Abdali, T., Pahlavan, S., Jahangiri, M., Alidadi Shamsabadi, A., and Sayadi, F. (2019). Techno-econo-environmental study on the use of domestic-scale wind turbines in iran. *Energy Equipment and Systems*, 7(4):317–338.
- [2] Abdelsalam, A. M., El-Askary, W., Kotb, M., and Sakr, I. (2021). Computational analysis of an optimized curved-bladed small-scale horizontal axis wind turbine. *Journal of Energy Resources Technology*, 143(6).
- [3] Acharya, S., Pokhrel, A., Bohara, B., and Shrestha, B. (2017). Design & fabrication of small scale horizontal axis wind turbine and performance analysis of the turbine. In *2017 International Conference on Smart grids, Power and Advanced Control Engineering (ICSPACE)*, pages 75–80. IEEE.
- [4] Akour, S. N., Al-Heymari, M., Ahmed, T., and Khalil, K. A. (2018). Experimental and theoretical investigation of micro wind turbine for low wind speed regions. *Renewable energy*, 116:215–223.
- [5] Anaya-Lara, O., Jenkins, N., Ekanayake, J. B., Cartwright, P., and Hughes, M. (2011). *Wind energy generation: modelling and control*. John Wiley & Sons.
- [6] Bastianon, R. A. (2008). Cálculo y diseño de la hélice óptima para turbinas eólicas. *Buenos Aires*.
- [7] Bayati, I., Belloli, M., Bernini, L., and Zasso, A. (2017). Aerodynamic design methodology for wind tunnel tests of wind turbine rotors. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 167:217–227.
- [8] Bech, A. and Valsgaard, P. (2011). Method for manufacturing a wind turbine blade. US Patent 7,895,746.
- [9] Beltrán-Telles, A., Morera-Hernández, M., López-Monteagudo, F. E., and Villela-Varela, R. (2017). Prospectiva de las energías eólica y solar fotovoltaica en la producción de energía eléctrica. *CienciaUAT*, 11(2):105–117.
- [10] Benim, A. C., Diederich, M., and Pfeiffelmann, B. (2018). Aerodynamic optimization of airfoil profiles for small horizontal axis wind turbines. *Computation*, 6(2):34.

- 
- [11] Chattopadhyay, A., Pagaldipty, N., and Chang, K. (1993). A design optimization procedure for efficient turbine airfoil design. *Computers & Mathematics with Applications*, 26(4):21–31.
- [12] Chehouri, A., Younes, R., Ilinca, A., and Perron, J. (2015). Review of performance optimization techniques applied to wind turbines. *Applied Energy*, 142:361–388.
- [13] Clausen, P. and Wood, D. (1999). Research and development issues for small wind turbines. *Renewable Energy*, 16(1-4):922–927.
- [14] de las Energías Renovables, U. I. (2015). no convencionales en colombia integración de las energías en colombia. *UPME: Bogota, Colombia*.
- [15] Dhiman, G. and Kaur, A. (2018). Optimizing the design of airfoil and optical buffer problems using spotted hyena optimizer. *Designs*, 2(3):28.
- [16] Diaz Motta, A. (2020). Estudio de factibilidad técnico-económica de un sistema de generación híbrido para zonas no interconectadas de colombia.
- [17] El-Okda, Y., Adref, K., Chikhalsouk, M., and Al Hajjar, H. (2019). Design of a small horizontal axis wind turbine. In *2019 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*, pages 1–7. IEEE.
- [18] Eltayesh, A., Castellani, F., Burlando, M., Hanna, M. B., Huzayyin, A., El-Batsh, H. M., and Becchetti, M. (2021). Experimental and numerical investigation of the effect of blade number on the aerodynamic performance of a small-scale horizontal axis wind turbine. *Alexandria Engineering Journal*, 60(4):3931–3944.
- [19] Gallart, M. S. (2004). *Development of a design tool for aerodynamic shape optimization of airfoils*. PhD thesis, University of Victoria.
- [20] Gao, Z., Li, Y., Wang, T., Shen, W., Zheng, X., Pröbsting, S., Li, D., and Li, R. (2021). Modelling the nacelle wake of a horizontal-axis wind turbine under different yaw conditions. *Renewable Energy*.
- [21] Giguere, P. and Selig, M. S. (1998). New Airfoils for Small Horizontal Axis Wind Turbines. *Journal of Solar Energy Engineering*, 120(2):108–114.
- [22] Grasso, F. (2008). *Multi-objective numerical optimization applied to aircraft design*. PhD thesis, Ph. D. Thesis, Dip. Ingegneria Aerospaziale, Università di Napoli Federico II.

- 
- [23] Grasso, F. (2011). Usage of numerical optimization in wind turbine airfoil design. *Journal of Aircraft*, 48(1):248–255.
- [24] Grasso, F. (2014). Design of a family of new advanced airfoils for low wind class turbines. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 555, page 012044. IOP Publishing.
- [25] Gregory, N. and O'reilly, C. (1970). Low-speed aerodynamic characteristics of naca 0012 aerofoil section, including the effects of upper-surface roughness simulating hoar frost.
- [26] Holst, D., Pechlivanoglou, G., Kohlrausch, C., Nayeri, C., and Paschereit, C. (2016). shawt design: Airfoil aerodynamics under the influence of roughness. In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, volume 49873, page V009T46A005. American Society of Mechanical Engineers.
- [27] Hsiao, F.-B., Bai, C.-J., and Chong, W.-T. (2013). The performance test of three different horizontal axis wind turbine (hawt) blade shapes using experimental and numerical methods. *Energies*, 6(6):2784–2803.
- [28] Huang, G.-Y., Shiah, Y., Bai, C.-J., and Chong, W. (2015). Experimental study of the protuberance effect on the blade performance of a small horizontal axis wind turbine. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 147:202–211.
- [29] Jackson, R. and Amano, R. S. (2016). Application of the reynolds stress model to direct modeling and actuator disk simulations of a small-scale horizontal-axis wind turbine. In *Fluids Engineering Division Summer Meeting*, volume 50299, page V01BT29A002. American Society of Mechanical Engineers.
- [30] Jiang, H., Li, Y., and Cheng, Z. (2015). Performances of ideal wind turbine. *Renewable Energy*, 83:658–662.
- [31] Johari, M., Jalil, M., and Shariff, M. F. M. (2018). Comparison of horizontal axis wind turbine-hawt and vertical axis wind turbine-vawt. *International Journal of Engineering and Technology*, 7(4.13):74–80.
- [32] Jonkman, J. and Buhl Jr, M. L. (2015). Nwtc information portal (fast). *National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, accessed May, 11:2016*.
- [33] Julio, H. R., Pablo, G. D. P., and Claudio, Z. (2016). *MECÁNICA DE FLUIDOS. PROBLEMAS Y SOLUCIONES*. Editorial UNED.

- 
- [34] Jung, J., Yee, K., Misaka, T., and Jeong, S. (2017). Low reynolds number airfoil design for a mars exploration airplane using a transition model. *TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES*, 60(6):333–340.
- [35] Karthikeyan, N., Murugavel, K. K., Kumar, S. A., and Rajakumar, S. (2015). Review of aerodynamic developments on small horizontal axis wind turbine blade. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42:801–822.
- [36] Karthikeyan, N. and Suthakar, T. (2016). Computational studies on small wind turbine performance characteristics. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 759, pages 1–6.
- [37] Khaled, M., Ibrahim, M. M., Hamed, H. E. A., and AbdelGwad, A. F. (2019). Investigation of a small horizontal–axis wind turbine performance with and without winglet. *Energy*, 187:115921.
- [38] Khalil, E. E., ElHarriri, G. E., AbdelGhany, E. E., and Farghaly, M. E. (2019). Withdrawal: Computations of aerodynamic behaviour of small horizontal axis wind turbine with naca4418 airfoil. In *AIAA Scitech 2019 Forum*, pages 1277–c1.
- [39] Lee, M.-H., Shiah, Y.-C., and Bai, C.-J. (2016). Experiments and numerical simulations of the rotor-blade performance for a small-scale horizontal axis wind turbine. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 149:17–29.
- [40] López, E. J., Zappa, A. E., and Cañón, C. A. W. (2017). Determinación de las características aerodinámicas de perfiles para aerogeneradores de baja potencia utilizando dinámica de fluidos computacional. *Mecánica Computacional*, 35(16):925–940.
- [41] Maeda, T., Kamada, Y., Shimizu, K., Ogasawara, T., Nakai, A., Kasuya, T., et al. (2017). Effect of rotor aspect ratio and solidity on a straight-bladed vertical axis wind turbine in three-dimensional analysis by the panel method. *Energy*, 121:1–9.
- [42] Manwell, J. F., McGowan, J. G., and Rogers, A. L. (2010). *Wind energy explained: theory, design and application*. John Wiley & Sons.
- [43] Mereu, R., Federici, D., Ferrari, G., Schito, P., and Inzoli, F. (2017). Parametric numerical study of savonius wind turbine interaction in a linear array. *Renewable Energy*, 113:1320–1332.

- 
- [44] Morgado, J., Vizinho, R., Silvestre, M., and Páscoa, J. (2016). Xfoil vs cfd performance predictions for high lift low reynolds number airfoils. *Aerospace Science and Technology*, 52:207–214.
- [45] Ñustes-Cuellar, W. A. and Rivera-Rodríguez, S. R. (2017). Colombia: Territorio de inversión en fuentes no convencionales de energía renovable para la generación eléctrica. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 17(1):37–48.
- [46] Pourrajabian, A., Afshar, P. A. N., Ahmadizadeh, M., and Wood, D. (2016). Aerostructural design and optimization of a small wind turbine blade. *Renewable Energy*, 87:837–848.
- [47] Prakash, M. K. C. . S. (2018). The aerodynamic shape optimization for a small horizontal axis wind turbine blades at low reynolds number. 8(6):843–854.
- [48] Ruiz Murcia, J. F., Serna Cuenca, J., Zapata Lesmes, H. J., et al. (2017). Atlas de viento de colombia.
- [Said et al.] Said, A., Islam, M., Mohiuddin, A., and Idres, M. Performance analysis of a small capacity horizontal axis wind turbine using qblade. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 7:153–157.
- [50] Scappatici, L., Bartolini, N., Castellani, F., Astolfi, D., Garinei, A., and Pennicchi, M. (2016). Optimizing the design of horizontal-axis small wind turbines: From the laboratory to market. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 154:58–68.
- [51] Schubel, P. J. and Crossley, R. J. (2012). Wind turbine blade design. *Energies*, 5(9):3425–3449.
- [52] Selig, M. (2003). Low reynolds number airfoil design lecture notes. *VKI Lecture Series, November*, pages 24–28.
- [53] Shapiro, C. R., Gayme, D. F., and Meneveau, C. (2018). Modelling yawed wind turbine wakes: a lifting line approach. *Journal of Fluid Mechanics*, 841.
- [54] Shen, X., Yang, H., Chen, J., Zhu, X., and Du, Z. (2016). Aerodynamic shape optimization of non-straight small wind turbine blades. *Energy Conversion and Management*, 119:266–278.

- 
- [55] Singh, R., Ahmed, M. R., Zullah, M., and Lee, Y. (2011). Blade design and performance testing of a small wind turbine for low wind speed applications. In *Proceedings of the World Renewable Energy Asia Regional Congress and Exhibition (WREC-Asia) in cooperation with The 5th International Conference on Sustainable Development in Building and Environment (SuDBE2011)*.
- [56] Singh, R. K. and Ahmed, M. R. (2013). Blade design and performance testing of a small wind turbine rotor for low wind speed applications. *Renewable Energy*, 50:812–819.
- [57] Singh, R. K., Ahmed, M. R., Zullah, M. A., and Lee, Y.-H. (2012). Design of a low reynolds number airfoil for small horizontal axis wind turbines. *Renewable energy*, 42:66–76.
- [58] Somers, D. M. (2005). S833, s834, and s835 airfoils: November 2001–november 2002. Technical report, National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).
- [59] Sun, C., Tian, T., Zhu, X., Hua, O., and Du, Z. (2021). Investigation of the near wake of a horizontal-axis wind turbine model by dynamic mode decomposition. *Energy*, page 120418.
- [60] Tang, X., Huang, X., Peng, R., and Liu, X. (2015). A direct approach of design optimization for small horizontal axis wind turbine blades. *Procedia CIRP*, 36:12–16.
- [61] Van Rooij, R. and Arens, E. (2007). Analysis of the experimental and computational flow characteristics with respect to the augmented lift phenomenon caused by blade rotation. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 75, page 012021. IOP Publishing.
- [62] Van Treuren, K. W. (2016). Small horizontal axis wind turbines: Current status and future challenges. In *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, volume 49873, page V009T46A014. American Society of Mechanical Engineers.
- [63] Van Treuren, K. W. (2019). Current status and future challenges for small horizontal axis wind turbines. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 141(9).
- [64] Wallace, B. D., McLaughlin, D. K., and Stewart, S. W. (2015). Evaluating the aerodynamic performance of small horizontal axis wind turbines. In *33rd Wind Energy Symposium*, page 1002.
- [65] Wang, W.-C. and Teah, H.-Y. (2017). Life cycle assessment of small-scale horizontal axis wind turbines in taiwan. *Journal of cleaner production*, 141:492–501.

- [66] Wen, T. W., Palanichamy, C., and Ramasamy, G. (2019). Performance optimization of constant speed-small horizontal axis wind turbine (cs-shawt) for wind energy development in malaysia. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 9(3):280.