

Caracterización experimental en túnel de viento de un perfil aerodinámico DU06W200 para una
turbina eólica de eje vertical

Kevin Daniel Perico Quintero y Jesús Garzón Araque

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

Jorge Luís Chacón Velasco

Doctor en Ingeniería Mecánica

Codirector

PhD. Luis Fernando García Rodríguez

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

A mi familia por su apoyo en mi proceso de formación, principalmente a mi madre por su amor incondicional.

A mis grandes amigos y amigas que han sido invaluable a lo largo de mi vida.

A mis profesores y compañeros de la carrera que me han enseñado aptitudes para mi profesión y la vida en general.

Kevin Daniel Perico Quintero

Dedicatoria

*A Dios por permitirme culminar satisfactoriamente esta etapa, por darme fortaleza y paciencia
para seguir adelante.*

*A mis padres Luis Alfonso Y Ligia, por apoyarme en cada proyecto, por ser la motivación
para seguir luchando cada día por mis metas y sueños.*

*A Natalia Vega compañera, confidente, testigo de mis alegrías y tristezas, siempre
apoyando, motivando y alegrando cada momento. Siempre estarás en mi corazón “Coisa
Linda”.*

A mis profesores y compañeros de la carrera que me enseñaron a ser una mejor persona.

Jesús Garzón Araque

Agradecimientos

Al director del proyecto, ha sido un mentor excepcional, brindando orientación y retroalimentación constructiva en cada etapa del proceso. Su visión y conocimientos han enriquecido significativamente el contenido de este documento. Además, su paciencia y apoyo incondicional han sido fundamentales para superar los desafíos y alcanzar los objetivos establecidos.

Tabla de contenido

Introducción	16
1. Justificación	18
1.1. Límites del Proyecto	19
1.1.1. Prototipo de alabe.....	19
1.1.2. Velocidad de trabajo.....	19
1.1.3. Análisis de resultados.....	19
2. Objetivos	20
2.1. Objetivo General.....	20
2.2. Objetivos Específicos.....	21
3. Marco Teórico.....	21
3.1. Antecedentes	21
3.1.1. Referentes internacionales	21
3.1.2. Referentes nacionales.....	23
3.1.3. Referentes locales.....	24
3.2. Base Teórica.....	24
3.2.1. Funcionamiento de las turbinas eólicas	24
3.2.2. Potencia teórica extraída por el sistema.....	24
3.2.3. Terminología aerodinámica	26
3.2.4. Fuerzas de presión y cortantes	27
3.2.5. Fuerzas de sustentación y de arrastre.....	27
3.2.6. Coeficientes de sustentación, arrastre y potencia	29
3.2.7. Fuerza de arrastre debido a la fricción y a la presión	30

3.2.8.Sustentación.....	32
3.2.9.Capa límite.....	36
3.2.10. Análisis dimensional y similitud.....	38
3.2.11. Túnel de viento de la escuela.....	39
3.2.12. Dispositivo TA300/300C de medición de fuerzas.....	42
4. Metodología.....	44
4.1. Primera Fase.....	44
4.2. Segunda Fase.....	45
4.3. Tercera Fase.....	48
5. Primer Objetivo.....	48
5.1. Diseño del Experimento con el Teorema Pi de Buckingham.....	48
5.2. Cálculo de las Condiciones de Laboratorio.....	51
5.3. Corrección de los Efectos en el Laboratorio.....	53
5.3.1. Efecto de bloqueo sólido.....	53
5.3.2. Efecto de bloqueo de estela.....	55
5.3.3. Curvatura aerodinámica.....	56
5.3.4. Efecto de flotabilidad.....	56
5.3.5. Ecuaciones de corrección.....	57
6. Segundo Objetivo.....	58
6.1. Construcción de los Modelos.....	58
6.1.1. Alternativas de construcción del modelo.....	58
6.1.2. Selección de materiales y construcción.....	60
6.2. Validación de la Calibración de los Sensores.....	63

6.3. Resultados Experimentales con los Modelos DU06W200	67
6.4. Estudio Experimental de la Capa Límite	72
7. Tercer Objetivo	79
7.1. Datos de Entrada y Ecuaciones.....	80
7.2. Potencias Eólicas Estimadas en las Tres Zonas.....	82
8. Conclusiones	84
9. Recomendaciones.....	84
Referencias Bibliográficas	85
Apéndices.....	87

Lista de tablas

Tabla 1. Dimensiones primarias de los parámetros.	49
Tabla 2. <i>Velocidades promedio anual</i> Velocidades promedio anual.....	51
Tabla 3. <i>Velocidades del túnel de viento</i> Velocidades del túnel de viento	53
Tabla 4 . ANOVA para validación de la calibración.....	65
Tabla 5 <i>Análisis de varianza modelo de 200 mm</i> Análisis de varianza modelo de 200 mm.....	68
Tabla 6 <i>Punto de transición</i>	78
Tabla 7 <i>Parámetros</i>	80
Tabla 8 <i>Potencias</i>	82

Lista de figuras

Figura 1 <i>Túnel de Viento</i>	17
Figura 2 <i>Modelo de Betz</i>	25
Figura 3 <i>Terminología del perfil aerodinámico</i>	26
Figura 4 <i>Fuerzas de presión y viscosas</i>	27
Figura 5 <i>Fuerzas resultantes</i>	28
Figura 6 <i>Dispositivo TA300/300C-TARC</i>	29
Figura 7 <i>Flujo de aire con respecto al álabe</i>	31
Figura 8 <i>. Superficie de sustentación</i>	32
Figura 9 <i>Región irrotacional</i>	33
Figura 10 <i>Flujo irrotacional sobre superficie simétrica</i>	34
Figura 11 <i>Flujo irrotacional sobre superficie no simétrica</i>	34
Figura 12 <i>Flujo irrotacional y flujo circulatorio</i>	35
Figura 13 <i>Efecto de la circulación sobre el flujo</i>	36
Figura 14 <i>Propiedades y comportamiento de la capa límite</i>	37
Figura 15 <i>Método de repetición de variables</i>	39
Figura 16 <i>Etapas del túnel de viento</i>	40
Figura 17 <i>Pantalla principal SCADA</i>	41
Figura 18 <i>Células de carga</i>	42
Figura 19 <i>Contrapesos</i>	43
Figura 20 <i>Modelado 3D de la serie DU06W200</i>	44
Figura 21 <i>Placa túnel de viento</i>	45
Figura 22 <i>Módulo de calibración del Software</i>	46
Figura 23 <i>Calibración de los sensores</i>	46

Figura 24 <i>Modelo NACA 0018</i>	47
Figura 25 <i>Estructura del álabes</i>	48
Figura 26 <i>Efecto de bloqueo sólido</i>	54
Figura 27 <i>Efecto de bloqueo de estela</i>	55
Figura 28 <i>Curvatura aerodinámica restringida y no restringida</i>	56
Figura 29 <i>Efecto de flotabilidad</i>	57
Figura 30 <i>Esqueleto de un modelo alar de avión</i>	60
Figura 31 <i>Costillas</i>	61
Figura 32 <i>Impresión de los álabes en PLA</i>	61
Figura 33 <i>Montaje de los modelos</i>	62
Figura 34 <i>Mecanizado del eje</i>	63
Figura 35 <i>Cl del Peaper</i>	63
Figura 36 <i>Cl obtenido</i>	64
Figura 37 <i>Cd del peaper Cd del peaper</i>	66
Figura 38 <i>Cd obtenido</i>	67
Figura 39 <i>Datos experimentales de álabes Lc: 200 mm</i>	69
Figura 40 <i>Datos experimentales álabes Lc: 100 mm</i>	70
Figura 41 <i>Resultados con el menor rendimiento</i>	71
Figura 42 <i>Modelo en cámara de ensayos</i>	72
Figura 43 <i>Sistema Tubo de pitot-Modelo en SolidWorks</i>	73
Figura 44 <i>Perfil de velocidad local en distintos puntos alrededor de los modelos DU06W200 y NACA0018</i>	75
Figura 45 <i>Capa límite sobre los modelos DU06W200 y NACA0018</i>	77

Figura 46 *Turbina comercial* 81

Figura 47 *TSR óptimo* 81

Apéndices

Apéndice A DU06W200_Lc=100mm_V=10,75m/s_Cl vs Ang	87
Apéndice B DU06W200_Lc=100mm_V=14,75m/s_Cl vs Ang	88
Apéndice C DU06W200_Lc=100mm_V=17,25m/s_Cl vs Ang	89
Apéndice D DU06W200_Lc=200mm_V=5,37m/s_Cl vs Ang	90
Apéndice E DU06W200_Lc=200mm_V=8,62m/s_Cl vs Ang	92

Glosario

Túnel de viento: Es una herramienta utilizada en experimentos para examinar cómo el flujo de aire afecta a los objetos los cuerpos sólidos.

Perfil Aerodinámico: Se le conoce como perfil aerodinámico al área y geometría de un elemento o mecanismo que al desplazarse a través de un medio es capaz de generar a su alrededor una distribución de presiones, capaz de producir una fuerza de sustentación.

CFD: Es una de las áreas de la mecánica de fluidos donde se resuelven y estudian los problemas relacionados con el flujo de fluidos mediante técnicas y algoritmos numéricos.

Sustentación: Es la fuerza generada sobre un cuerpo que se desplaza a través de un fluido en dirección perpendicular a la dirección del flujo.

Arrastre: Es la fuerza generada sobre un cuerpo que se desplaza a través de un fluido en dirección paralela y opuesta a la dirección del flujo.

Fluido: Medio en estado líquido o gaseoso en el que se encuentran los objetos sometidos a prueba

Turbina VAWT: (Vertical Axis Wind Turbine) lo que se traduce como turbina eólica de eje vertical, es un equipo que se usa para convertir la energía eólica en energía eléctrica por medio de un rotor de aspas con la peculiaridad de que su eje se encuentra orientado de forma vertical.

PLA: Conocido como ácido poliláctico, es un polímero denominado como bioplástico, hecho principalmente a base de maíz o caña de azúcar que cuenta con propiedades muy similares al polietileno, esto permite que pueda ser utilizado como material principal en impresiones 3D.

TSR: Relación de velocidad de punta

Resumen

Título: Caracterización experimental en túnel de viento de un perfil aerodinámico DU06W200 para una turbina eólica de eje vertical.¹

Autores: Kevin Daniel Perico Quintero y Jesús Garzón Araque²

Palabras claves: sustentación, arrastre, túnel de viento, caracterización.

Descripción: Los autores de este documento exponen la caracterización de un modelo alar de la referencia DU06W200 puesto a prueba en el túnel de viento de la escuela de ingeniería mecánica en la Universidad Industrial de Santander, con el fin de encontrar los coeficientes de sustentación y arrastre de acuerdo con las condiciones de viento de tres zonas del sector del cañón del Chicamocha. Se establece como factor importante al momento de realizar la caracterización la geometría del modelo, por tal razón los autores deciden realizar la impresión parcial en PLA de dos modelos con 100 mm y 200 mm de longitud de cuerda, con el fin de obtener resultados de los coeficientes y extrapolarlos a un modelo de escala real. Adicional a esto, tomaran en cuenta el criterio de efecto de bloqueo en túnel de viento y la afectación que esto tiene en los resultados finales, buscando aplicar ecuaciones de corrección que permitan obtener coeficientes más cercanos a la realidad. Finalmente, se hace la estimación de la potencia producida por una turbina eólica a escala real ubicada en las tres zonas estudiadas, con base a los resultados de laboratorio obtenidos de los coeficientes de arrastre y sustentación.

¹ Proyecto para optar al título de ingeniero mecánico

² Estudiantes de pregrado, facultad de ingeniería físico-mecánicas, escuela de ingeniería mecánica, director: PhD. Jorge Luis Chacón Velazco

Abstract

Title: Experimental wind tunnel characterization of a DU06W200 airfoil for a vertical axis wind turbine.³

Author: Kevin Daniel Perico Quintero y Jesús Garzón Araque⁴

Key words: lift, drag, wind tunnel, characterization.

Description: The authors of this document present the characterization of a wing model of the reference DU06W200 tested in the wind tunnel of the school of mechanical engineering at the Universidad Industrial de Santander, to find the lift and drag coefficients according to the wind conditions of three zones of the Chicamocha canyon sector. The geometry of the model is established as an important factor at the time of the characterization, for this reason the authors decided to perform the partial printing in PLA of two models with 100 mm and 200 mm of chord length, to obtain results of the coefficients and extrapolate them to a real scale model. In addition to this, they will consider the wind tunnel blocking effect criterion and the effect that this has on the final results, seeking to apply correction equations that allow obtaining coefficients closer to reality. Finally, an estimation of the power produced by a full-scale wind turbine located in the three studied zones is made, based on the laboratory results obtained from the drag and lift coefficients.

³ Project for the degree of mechanical engineer

⁴ Undergraduate students, faculty of physical-mechanical engineering, school of mechanical engineering, Director: PhD. Jorge Luis Chacón Velazco

Introducción

En la actualidad, para la validación de la mayoría de los prototipos y experimentos en ingeniería mecánica relacionados a la mecánica de fluidos, se acude a softwares de simulación de fluidos, que permiten tener una visualización programada del comportamiento del objeto de ensayo sometido a interacción con un fluido. La implementación de programas de dinámica de fluidos computacional denominada en inglés como CFD, es hasta el momento la forma más fácil y rápida de obtener resultados cercanos a la realidad “Las importantes ventajas de las técnicas CFD frente a otros tipos de investigación en mecánica de fluidos son la reducción significativa del tiempo y los costes experimentales, la capacidad de analizar sistemas o condiciones difíciles de simular experimentalmente, como por ejemplo el sistema respiratorio, y el nivel de detalle.” (Fernández Tena, 2015) [1].

Sin embargo, existen métodos experimentales para realizar validaciones de proyectos y obtener resultados que están muy cerca de la realidad que son de gran importancia y dan un aporte sustancial al desarrollo de un proyecto, bajo condiciones estrictamente controladas, para describir ¿cómo? o ¿Por qué? ocurre un evento particular.

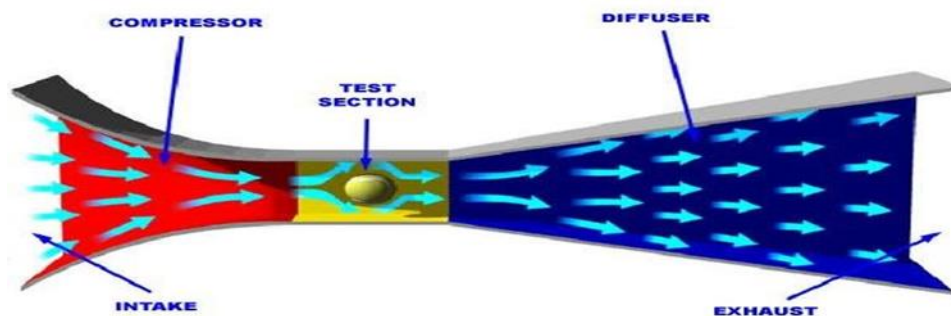
Utilizando el método experimental, la mayoría de los investigadores intentan predecir eventos futuros basándose en el conocimiento actual, de esta manera, tener un modelo que pueda ser manejado y modificado es una forma práctica e importante de lograr resultados realistas en el rendimiento de la máquina.

Por ejemplo, la implementación de un túnel de viento (figura 1) una estructura conformada por una tobera, una cámara de ensayos, un difusor y un ventilador, en el cual el modelo de estudio se coloca a prueba dentro de la cámara de ensayos del túnel y este cuenta con sensores que proporcionan a los ingenieros la información necesaria para estimar el valor de parámetros

importantes como la fuerza arrastre y fuerza de sustentación. El aire es impulsado por un ventilador capaz de generar vientos de diferentes intensidades que se aplican al modelo desde diferentes ángulos de ataque, de esta manera es posible observar los efectos y la influencia del viento sobre el modelo de estudio [3].

Figura 1

Túnel de Viento



Nota. Tomado de (<https://praktikum2011etsii.blogspot.com/2011/06/28/2%C2%BA-dia-de-praktikum/>)

Así mismo, cuando no hay suficientes medios ya sean económicos o de espacio para disponer de un túnel de viento de nivel sónico o mayor, es posible hacer estudios de prototipos en una estructura de nivel subsónica y extrapolar los resultados a su escala real mediante diferentes métodos y teoremas.

Tomando en cuenta lo anterior, existe un documento de investigación relacionado al potencial de energía eólica del cañón del Chicamocha (L. García, L. Chacón, 2018) desarrollado por profesores de la Universidad Industrial de Santander, en el cual estudian la viabilidad mediante CFD de instalación de una turbina eólica de eje vertical y destacar la superioridad de un modelo VAWT de álabe tipo DU06W200 sobre un NACA0018, para lo cual escogieron tres sectores de la región (El Río del Chicamocha, La Mesa de los Santos y El Parque Nacional del Chicamocha

PANACHI), obteniéndose como resultado que el sector y el modelo con mejores rendimientos son el Río del Chicamocha y el álabe tipo DU06W200 respectivamente [2]. Llegaron a esta conclusión gracias a los resultados arrojados por dinámica de fluidos computacional, lo que conlleva a la formulación de la pregunta ¿Es posible caracterizar un perfil alar de forma experimental teniendo en cuenta los efectos de bloqueo y extrapolar los resultados obtenidos a una turbina eólica de tamaño real para estimar la potencia que puede generar?

1. Justificación

A nivel ambiental, los generadores eólicos son una fuente de energía renovable, inagotable, no contamina y tiene una marca ambiental mínima, comparado con las demás fuentes de energía. Según FORECA empresa finlandesa que mide el clima en tiempo real, la geografía que presenta el río Chicamocha ofrece una disponibilidad de vientos fuertes y constantes a lo largo del día. La implementación de esta turbina en el Río del Chicamocha permite aprovechar gran parte de la energía ofrecida por el viento de la zona, disminuir la dependencia de la comunidad del mercado energético de esta zona y ayuda a contribuir al desarrollo renovable y sostenible de la región.

La presente investigación está dirigida a la caracterización y análisis experimental del comportamiento de una hélice DU06W200 para una turbina eólica de eje vertical en túnel de viento, permitiendo efectuar mediciones experimentales de fuerzas de sustentación y arrastre.

Posee justificación práctica, ya que las pruebas experimentales en túnel de viento permiten observar, aplicar y calcular la interacción del flujo físico real con las hélices de un modelo a escala de una turbina eólica, relacionando modelo y prototipo mediante las leyes de escalamiento conocidas. Con los resultados obtenidos en la turbina a escala se puede extrapolar los datos a un tamaño real, permitiendo tener una idea más clara de su funcionamiento, comportamiento y desempeño en la instalación final en El Cañón del Chicamocha.

1.1. Límites del Proyecto

1.1.1. Prototipo de alabe

Siendo el estudio del prototipo la base de este proyecto, su construcción se realizará mediante impresión 3D en material PLA (Ácido poli láctico) por ser un material eco amigable con el ambiente y su fácil acceso en el mercado. Además, en cuestión de dimensionamiento el álabe no debe superar los 250 mm de longitud de cuerda, ya que la compuerta que da acceso al área de trabajo (para el montaje del modelo) tiene un diámetro de 250 mm.

1.1.2. Velocidad de trabajo

Ya que el estudio del prototipo está dirigido a la región del Cañón del Chicamocha, existe un trabajo de investigación ya realizado en el sector entre La Mesa de los Santos y el Cañón de Chicamocha denominado “Potencial de energía eólica del cañón del Chicamocha y selección de superficies aerodinámicas VAWT mediante modelado CFD” (L. García, L. Chacón, 2018) en donde se tiene registro de una velocidad promedio máxima 7 m/s, razón por la cual no se trabajará a velocidades de viento superiores a esta, además se presenta una densidad de potencia del viento de 485 [W/m²], donde según la literatura con densidades superiores a 200 [w/m²] es lo suficientemente rentable para generar energía eléctrica a partir de aerogeneradores.

1.1.3. Análisis de resultados

El fin de este proyecto es confrontar los resultados del túnel de viento con los de la simulación. Identificar vórtices y pérdidas que no se predijeron en la simulación, escalar el funcionamiento del prototipo a uno real por medio del teorema Pi de Buckingham para obtener los datos de un modelo en tamaño real. Realizar nuevos ensayos en CFD está fuera de los límites del proyecto, ya que lo que se pretende es validar de manera experimental los datos del túnel de viento con los resultados ya existentes de la mecánica de fluidos computacional.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Caracterizar el desempeño de un perfil aerodinámico DU06W200 para una turbina eólica de eje vertical mediante pruebas experimentales en túnel de viento evaluando la viabilidad de aplicación en el cañón del Chicamocha.

2.2. Objetivos Específicos

- Definir las condiciones operacionales del túnel de viento de la escuela de ingeniería mecánica con base en las características ambientales del cañón del Chicamocha utilizando como referencia las velocidades promedio anual del viento en las tres zonas de 5.9, 6.9 y 4.3 [m/s].
- Construir dos modelos a escala de alabe tipo VAWT de perfil DU06W200 de 100 mm y 200 mm de cuerda para evaluar los coeficientes de arrastre, sustentación y estudio de la capa límite variando el ángulo de ataque entre 0 y 30 grados.
- Calcular la potencia eólica del alabe DU06W200 a escala real para una turbina eólica de eje vertical implementando el teorema Pi de Buckingham.

3. Marco Teórico

3.1. Antecedentes

3.1.1. *Referentes internacionales*

- En Trujillo Perú en el año 2021 se desarrolló una tesis de grado en la cual se comparó los resultados de los coeficientes de arrastre, sustentación y potencia de diversos perfiles aerodinámicos obtenidos de forma numérica con el programa XFOIL y de forma experimental con un túnel de viento. De esta tesis se puede extraer la definición e implementación que se hizo de los parámetros adimensionales clave para el diseño

experimental en un túnel de viento similar al que se va a usar en el presente trabajo (Optimización del coeficiente de potencia aerodinámico en turbinas eólicas a partir de la relación sustentación arrastre calculados en un túnel de viento subsónico, Lozano, 2021).

- En la Universidad de Illinois EE. UU en el año 2004, se publicó un documento de investigación de pruebas aerodinámica en túnel de viento de seis perfiles aerodinámicos para turbinas eólicas donde se tomaron medidas de sustentación, arrastre y momento variando el número de Reynolds, midiendo previamente la calidad de flujo que se desarrollaba en el túnel de viento. El valor agregado de este documento científico es la forma en la que se mide la calidad del flujo con el que se está trabajando, corrigiendo de esta manera las variaciones arbitrarias que se pueden estar obteniendo de los parámetros adimensionales. También se resalta el trabajo que se hizo relacionando los parámetros clave con diferentes números de Reynolds (Wind Tunnel Aerodynamic Tests of Six Airfoils for Use on Small Wind Turbines, Selig, McGranahan, 2004).
- En la Universidad nacional de Chonbuk Corea del Sur, se publicó un artículo científico relacionado con la corrección del efecto de bloqueo en túnel de viento realizando pruebas experimentales con modelos a escala de turbinas eólicas. El valor agregado de este artículo al presente trabajo es la investigación cuantitativa que se hizo de la influencia del efecto de bloqueo sobre el coeficiente de potencia obtenido en pruebas experimentales en túneles de viento relativamente pequeños con respecto al modelo que se está estudiando (Blockage corrections for wind tunnel tests conducted on a Darrieus wind turbine, Jeong, Lee, Kwon, 2018).
- En Yogyakarta Indonesia, se publicó un artículo científico del método de análisis dimensional aplicado a la predicción de la potencia eólica de una turbina a escala real

basándose en mediciones hechas en túnel de viento con dos modelos a escala de diferente tamaño. El aporte de este artículo al presente trabajo es la utilización del teorema Pi de Buckingham para determinar correlaciones entre los parámetros adimensionales para escalar y estimar el desempeño del prototipo real de turbina eólica (Dimensional Analysis of Power Prediction of a Real-Scale Wind Turbine Based on Wind-Tunnel Torque Measurement of Small-Scaled Models, Sutrisno, Iswahyudi, Wibowo, 2018).

- En Texas EE.UU, se publicó un artículo científico relacionado con las pruebas experimentales de aerogeneradores a pequeña escala en túneles de viento a condiciones de bajos números de Reynolds, siendo este el factor típico que genera problemas al momento de escalar los modelos y condiciones operacionales del túnel de viento. El aporte principal extraído de este artículo son las consideraciones que se tuvieron al momento de realizar el escalamiento de la turbina eólica para lograr la similitud geométrica y coincidencia entre los números de Reynolds (Small-Scale Wind Turbine Testing in Wind Tunnels Under Low Reynolds Number Conditions, Van Treuren, 2015).

3.1.2. Referentes nacionales

- En el departamento de Antioquia Colombia en el año 2020, se publicó un artículo científico sobre el potencial de energía eólica del cañón del Chicamocha en el departamento de Santander, donde se expone la velocidad del viento y densidad de potencia eólica registradas mensualmente durante un año. De este artículo se extrae la información requerida sobre las condiciones ambientales que se tienen en el lugar donde va a estar ubicada la turbina eólica que se pretende validar en el presente proyecto de grado (Chicamocha canyon wind energy potential and VAWT airfoil selection through CFD modeling, García, Jaramillo, Chacón, 2020).

3.1.3. Referentes locales

- En el departamento de Santander Colombia en el año 2014 se realizó el análisis aerodinámico de dos perfiles diferentes diseñados para turbinas eólicas de eje vertical usando simulación en CFD, en donde se calculan los coeficientes de arrastre y sustentación para cada uno y se enuncia el perfil que obtuvo el mejor desempeño. Con este trabajo de grado se establece la elección del perfil aerodinámico DU06W200 que se va a probar en el túnel de viento y validar de forma experimental los valores de los coeficientes de arrastre y sustentación obtenidos por simulación CFD (Análisis aerodinámico del perfil de los álabes de una turbina eólica de eje vertical mediante simulación en 2D usando CFD, García, 2014).

3.2. Base Teórica

3.2.1. Funcionamiento de las turbinas eólicas

Los aerogeneradores sirven como dispositivos de transformación de energía cinética del viento a energía eléctrica. El flujo de viento mueve una hélice y mediante un sistema mecánico se hace girar el rotor de un generador que produce energía eléctrica.

La hélice extrae en mayor o menor medida la energía cinética del viento dependiendo de la aerodinámica del perfil alar de los álabes. Es por esto que se tiene gran interés en la ingeniería por el estudio, análisis y optimización de dichos perfiles.

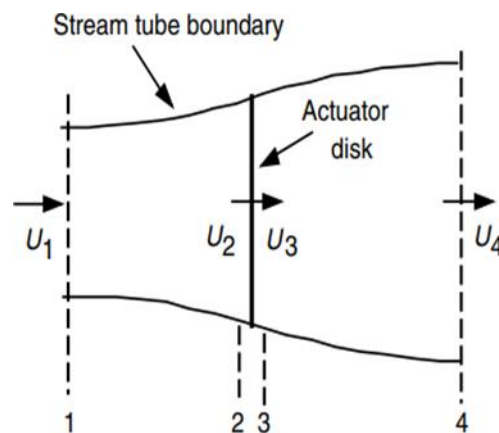
3.2.2. Potencia teórica extraída por el sistema

Para determinar la potencia de un rotor de turbina ideal, se puede usar el modelo simple de Betz basado en la teoría del momento lineal, pudiéndose aplicar a cualquier tipo de aerogenerador.

Dicho modelo parte de analizar un volumen de control delimitado por un tubo de corriente de aire y dos secciones transversales al inicio y al final de este. Se considera que el único flujo de aire es a través de las secciones transversales que están en los extremos del tubo de corriente. El “actuador disk” representa la turbina ideal que genera una discontinuidad en la presión del tubo de corriente de aire (obsérvese el aumento de la sección transversal de este después de pasar por el actuador disk), ver **Figura 2**.

Figura 2

Modelo de Betz



Nota. Tomado de *Wind energy explained* (p.93), por Manwell, 2009, WILEY.

Este análisis se desarrolla bajo los siguientes supuestos:

- El flujo de aire es homogéneo, incompresible y en estado estacionario.
- El arrastre por fricción es despreciable.

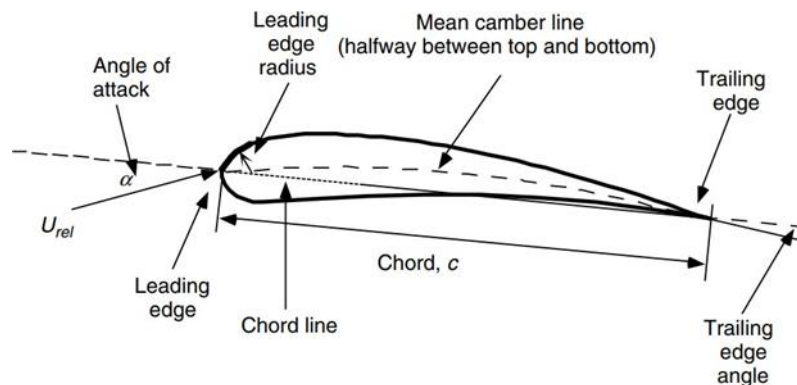
- Se consideran un número infinito de cuchillas.
- El empuje sobre el área del rotor es uniforme.
- Estela no giratoria.
- La presión estática aguas arriba y aguas abajo del rotor es la misma presión estática en la región ambiental no perturbada.

3.2.3. Terminología aerodinámica

En la **Figura 3** se observan los términos que caracterizan al álabe. La línea de inclinación media es el lugar geométrico de los puntos que dividen exactamente por la mitad al perfil del álabe. El punto inicial y final de la línea de inclinación media se denominan borde de ataque y borde de fuga respectivamente. La recta que conecta los bordes de ataque y fuga es la línea de cuerda y la distancia desde el borde de ataque hasta el borde de fuga medida a lo largo de la línea de cuerda se denomina longitud de cuerda C o Lc del perfil aerodinámico. Finalmente, el ángulo de ataque α se define como el ángulo entre el vector de dirección del viento y la línea de cuerda.

Figura 3

Terminología del perfil aerodinámico



Nota. Tomado de *Wind energy explained* (p.102), por Manwell, 2009, WILEY.

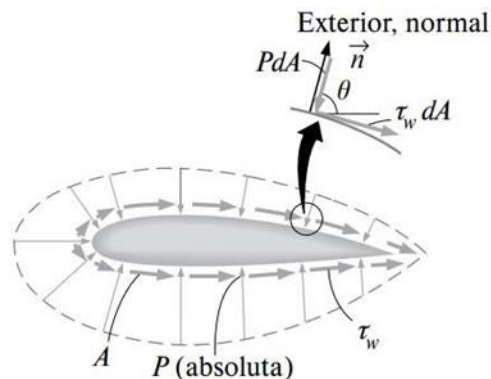
3.2.4. Fuerzas de presión y cortantes

La energía rotacional de eje se obtiene principalmente de las fuerzas de presión y cortantes (debido a la viscosidad del aire y condición de no deslizamiento) que se generan sobre los álabes de la turbina causados cuando el flujo de viento pasa sobre ellos.

Gracias al movimiento relativo del flujo de viento sobre los álabes se producen las fuerzas de presión que son normales a la superficie y fuerzas cortantes que son paralelas a la superficie de los álabes.

Figura 4

Fuerzas de presión y viscosas



Nota. Tomado de *Mecánica de fluidos* (p.614), por Cengel, 2018, McGrawHillEducation.

3.2.5. Fuerzas de sustentación y de arrastre

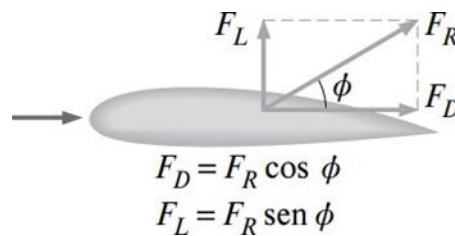
Más que el estudio de la distribución individual de estas fuerzas sobre cada elemento infinitesimal de superficie del perfil del álabes, lo que nos interesa para el cálculo del potencial energético de la turbina es la fuerza resultante de estas fuerzas normales y tangenciales a la superficie.

Por conveniencia, si aplicamos el sistema de referencia sobre el álabe, se tiene que esta fuerza resultante se puede descomponer en dos fuerzas, una normal a la dirección del flujo de viento llamada fuerza de sustentación (F_L) y otra fuerza paralela a la dirección del viento llamada fuerza de arrastre (F_D), tal como se observa en la

Figura 5.

Figura 5

Fuerzas resultantes



Nota. Tomado de *Mecánica de fluidos* (p.614), por Cengel, 2018, McGrawHillEducation.

La presión y fuerzas de corte que actúan sobre un diferencial de área dA se enuncian de la siguiente manera:

$$dF_D = -P dA \cos \theta + \tau_w dA \text{sen } \theta \quad (1)$$

$$dF_L = -P dA \text{sen } \theta - \tau_w dA \cos \theta \quad (2)$$

donde θ es el ángulo que la normal exterior que da forma con la dirección de flujo positivo.

Las fuerzas totales de arrastre y sustentación que actúan sobre el cuerpo del álabe se determinan integrando las anteriores ecuaciones sobre toda la superficie del álabe:

$$F_D = \int_A dF_D = \int_A (-P \cos \theta + \tau_w \text{sen } \theta) dA \quad (3)$$

$$F_L = \int_A dF_L = - \int_A (P \text{sen } \theta + \tau_w \cos \theta) dA \quad (4)$$

Las anteriores ecuaciones son útiles cuando se simula en la computadora, pero no son prácticas para análisis experimentales. Afortunadamente, para efectos prácticos en el presente proyecto, sólo nos interesa la resultante de la fuerza de arrastre y de sustentación siendo esto lo que se va a calcular de forma directa en el túnel de viento con el dispositivo TA300/300C-TARC,

Figura 6

Dispositivo TA300/300C-TARC



Nota. Tomado de *Catálogo TA300/300C* (p.7), edibon, 2021.

3.2.6. Coeficientes de sustentación, arrastre y potencia

Las fuerzas de sustentación y de arrastre dependen de variables como la densidad ρ del aire, la velocidad V que este lleva, la geometría y orientación del álabe. Conviene trabajar con parámetros adimensionales que describan la relación que hay entre estas variables y ser usados independientemente de las variaciones que se les pueden dar.

Estos parámetros son el coeficiente de arrastre C_D y el coeficiente de sustentación C_L y se definen como:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (5)$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (6)$$

Se toma A como el área de planta, que es el área que una persona observa del cuerpo desde arriba en una dirección normal al cuerpo (Cuerda x Envergadura). El término $\rho V^2/2$ es la presión dinámica.

El rendimiento del rotor de un aerogenerador suele caracterizarse por su coeficiente de potencia C_p y se define como:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho U^3 A} = \frac{\text{Rotor power}}{\text{Power in the wind}} \quad (7)$$

Siendo U la velocidad del viento. Este coeficiente adimensional representa la fracción de potencia del viento que es extraída por el rotor.

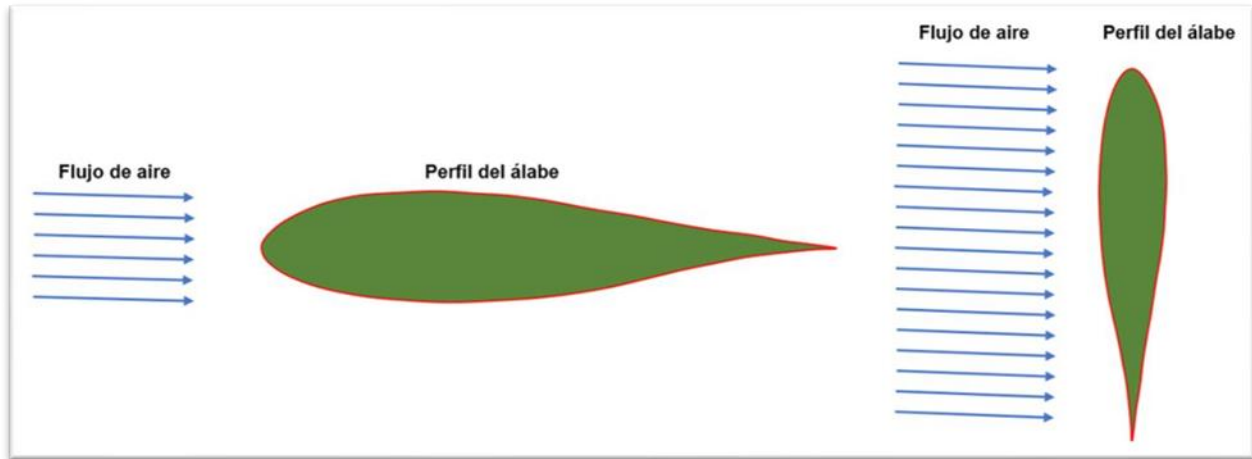
3.2.7. Fuerza de arrastre debido a la fricción y a la presión

La fuerza de arrastre neta en dirección al flujo depende de los efectos combinados de las fuerzas de fricción y de presión alrededor de la superficie del perfil del álabe.

La dirección en la que impacta el flujo de viento al álabe determinará cuál de los dos efectos es predominantemente mayor. Si el flujo de aire impacta al álabe de forma paralela a su línea de cuerda, la fuerza de arrastre dependerá principalmente de las fuerzas de fricción sobre la superficie, pero si el flujo impacta al álabe de forma perpendicular a su línea de cuerda, entonces la fuerza de arrastre dependerá principalmente de la diferencia de presiones que se genera aguas arriba y aguas abajo del álabe, **Figura 7**.

Figura 7

Flujo de aire con respecto al álabe



Nota. Tomado de Autores del proyecto.

La fuerza de arrastre debida a la fricción depende en gran medida de la viscosidad del fluido, siendo directamente proporcional a esta ya que se generan grandes esfuerzos cortantes sobre la superficie del álabe con una viscosidad alta.

Por lo mismo, sabiendo que el número de Reynolds es inversamente proporcional a la viscosidad del fluido, el arrastre va a depender principalmente por el efecto de fricción para números de Reynolds bajos, siendo este nuestro caso de estudio.

Por lo discutido anteriormente, se espera que haya ciertas discrepancias en las medidas de fuerza de arrastre con variaciones en la temperatura del flujo de aire ya que esto incide directamente en su valor de densidad.

Finalmente, considerando que el túnel de viento con el que se van a realizar las pruebas experimentales trabaja con flujo laminar totalmente desarrollado y números de Reynolds relativamente bajos, se espera que la incidencia de la rugosidad del material de los modelos a

escala de los álabes sea despreciable, ya que la rugosidad de la superficie influye en el coeficiente de arrastre sólo cuando se tiene flujo turbulento.

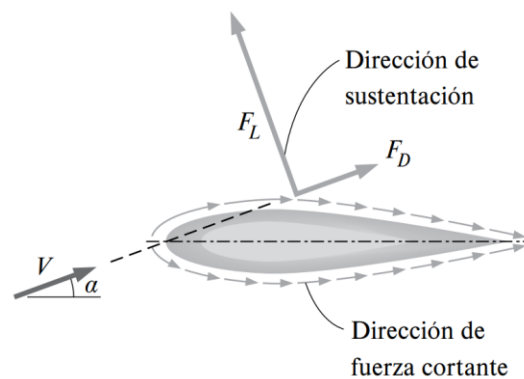
3.2.8. Sustentación

Las turbinas eólicas de eje vertical (VAWT) pueden tener rotores impulsados por arrastre o impulsados por sustentación. El rotor impulsado por arrastre más común es el rotor Savonius y se han utilizado principalmente para el bombeo de agua y aplicaciones de alto torque. En su contraparte, los rotores impulsados por sustentación se utilizan para la generación de energía eléctrica, siendo este el caso de estudio y por lo cual es indispensable conocer cómo se genera el efecto de sustentación sobre los álabes de la VAWT.

Para los rotores que tienen la finalidad de generar sustentación, el aporte de los efectos viscosos a la sustentación por lo general es despreciable, por la geometría aerodinámica de los álabes, y la fuerza cortante es paralela a la superficie y por lo tanto casi normal a la dirección de sustentación, como se aprecia en **Figura 8**.

Figura 8

Superficie de sustentación



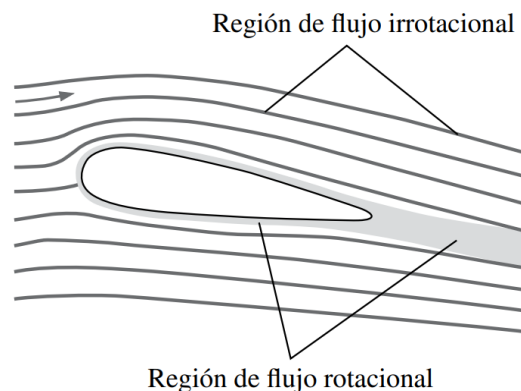
Nota. Tomado de *Mecánica de fluidos* (p.636), por Cengel, 2018, McGrawHillEducation.

Debido a esto, para efectos prácticos, se puede considerar que la sustentación se debe sólo a la distribución de presión en la superficie del álabe, por lo que la geometría del álabe es la que tiene la influencia principal sobre la sustentación.

Existen regiones de flujo en donde las partículas de fluido no tienen rotación neta (fuera de la capa límite); estas regiones se llaman *irrotacionales*, **Figura 9**.

Figura 9

Región irrotacional



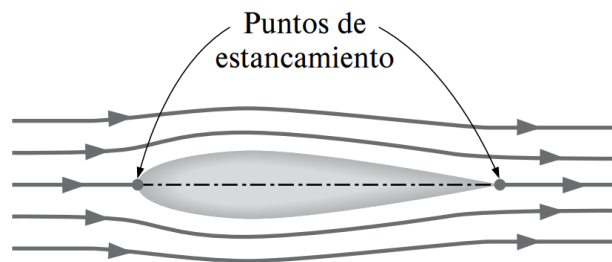
Nota. Tomado de *Mecánica de fluidos* (p.531), por Cengel, 2018, McGrawHillEducation.

La presión del aire cambia en diferentes puntos a lo largo de la superficie del perfil del álabe. Sin embargo, en general, la distribución de presión del aire permanece constante a través de la capa límite con dirección normal a la superficie del álabe, por lo cual, la presión neta en esta región tenderá a cero y es razonable ignorar esta región y calcular la distribución de presión sólo en la región de flujo irrotacional con la *teoría de flujo potencial* (cero vorticidad, flujo irrotacional).

Los campos de flujo que se obtienen a partir de los cálculos hechos con la teoría de flujo potencial se muestran en la **Figura 10** y **Figura 11**.

Figura 10

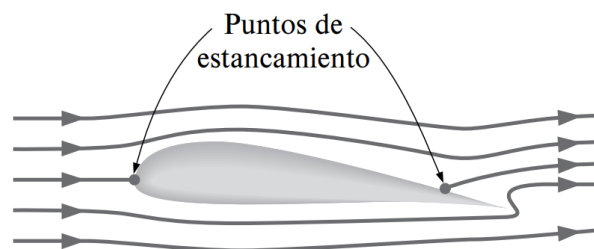
Flujo irrotacional sobre superficie simétrica



Nota. Tomado de *Mecánica de fluidos* (p.637), por Cengel, 2018, McGrawHillEducation.

Figura 11

Flujo irrotacional sobre superficie no simétrica



Nota. Tomado de *Mecánica de fluidos* (p.637), por Cengel, 2018, McGrawHillEducation.

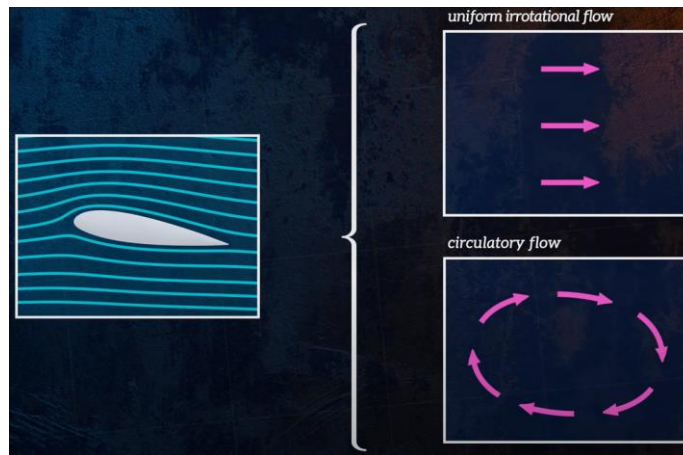
Como se observa en la **Figura 10**, a un ángulo de ataque cero, la sustentación que se produce por el perfil alar simétrico es cero (como se esperaba debido a la simetría) y los puntos de estancamiento coinciden con los bordes de ataque y fuga del álabe. Sin embargo, para el álabe asimétrico (**Figura 11**) que está a un ángulo de ataque pequeño, los puntos de estancamiento frontal y posterior ya no coinciden con los bordes de ataque y fuga respectivamente.

El valor de sustentación, calculado con la teoría de flujo potencial, para este último caso también es cero, siendo una clara contradicción con las observaciones y mediciones experimentales por lo que se concluye que hay que modificar la teoría para adaptarla a los fenómenos observados.

La teoría de flujo potencial y el fenómeno observado pueden reconciliarse si se tiene en cuenta el concepto de circulación. Se supone que el flujo alrededor del perfil alar se puede considerar como la superposición de un flujo irrotacional uniforme idealizado y un flujo circulatorio, tal como se observa en la **Figura 12**.

Figura 12

Flujo irrotacional y flujo circulatorio



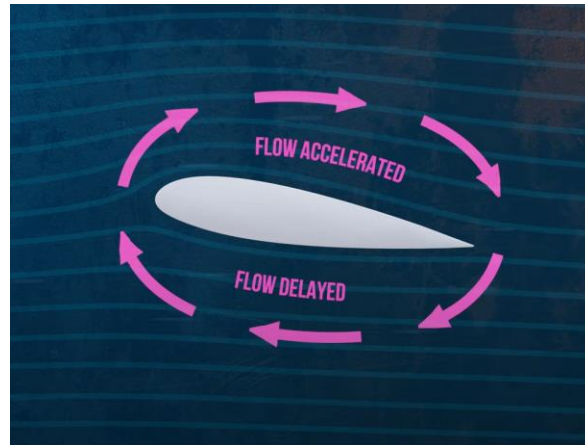
Nota. Tomado de

https://www.youtube.com/watch?v=E3i_XHIVCeU&ab_channel=TheEfficientEngineer).

La circulación tiene el efecto de acelerar el flujo por encima del perfil aerodinámico y retrasar el flujo por debajo (**Figura 13**) por lo que, por el principio de Bernoulli y la conservación de la masa, se explica la aparición de la diferencia de velocidades en ambas superficies y el consecuente delta de presión que genera el efecto de sustentación en perfiles aerodinámicos asimétricos.

Figura 13

Efecto de la circulación sobre el flujo



Nota. Tomado de

(https://www.youtube.com/watch?v=E3i_XHIVCeU&ab_channel=TheEfficientEngineer).

3.2.9. Capa límite

Comúnmente se considera con el término “efectos de escala” a las discrepancias que surgen cuando se emplean modelos para recolectar datos experimentales en lugar del prototipo real del álabe. Para entender estos efectos de escala la clave está en comprender las características y el comportamiento de la capa límite, en donde los aspectos cruciales a considerar corresponden a los puntos donde la capa límite pasa de laminar a turbulenta y donde ocurre la separación.

Es crucial considerar diversas propiedades fundamentales en relación al comportamiento de la capa límite.

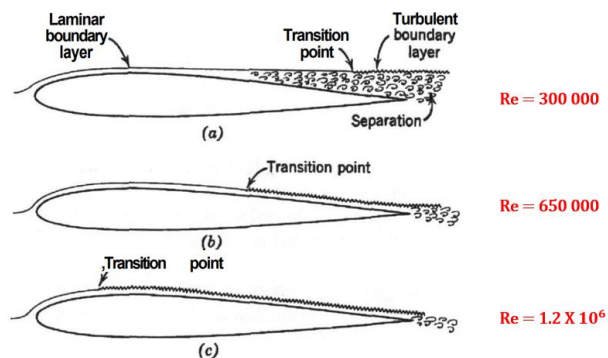
- 1) El arrastre y el espesor de la capa límite son funciones del número de Reynolds.
- 2) Las capas límite de tipo laminar experimentan significativamente menor arrastre, aunque también poseen mucha menos energía para vencer las rugosidades o las esquinas, lo que

provoca que las capas laminares se desprendan de una superficie de manera más fácil en comparación con las capas turbulentas.

- 3) Conforme el número de Reynolds (su longitud característica) crece, se torna más difícil preservar una capa límite de tipo laminar.
- 4) Una capa límite laminar es incentivada por una disminución de la presión en la dirección del flujo, conocida como "gradiente favorable", mientras que cuando la presión aumenta en la dirección del flujo se llama "gradiente adverso".
- 5) La determinación del punto de transición de flujo laminar a turbulento es un aspecto que continúa siendo objeto de investigación. Este punto comúnmente se estima a través de diferentes fuentes de datos que abarcan desde los métodos predictivos de transición existentes hasta reglas empíricas basadas en la práctica. Este proceso se aplica tanto en los métodos computacionales actuales como en los experimentos llevados a cabo en túneles de viento. En la **Figura 14** se muestran algunas de las propiedades anteriormente mencionadas.

Figura 14

Propiedades y comportamiento de la capa límite



Nota. Tomado de *Low Speed Wind Tunnel Testing* (p.305), por J.B. Barlow, 1999, WILEY.

3.2.10. Análisis dimensional y similitud

Se ha hecho énfasis en el valor que tienen las pruebas experimentales para determinar el rendimiento de los sistemas de generación de energía en condiciones que se asemejen a la realidad. Muchas veces, es requerido reducir los costos en tiempo y dinero de estas pruebas para que su realización se justifique, siendo el escalamiento del sistema la opción más viable.

La técnica que le permite a los ingenieros estimar el rendimiento de un sistema real partiendo del análisis de pruebas experimentales, echas con sistemas a escala de laboratorio, se llama **análisis dimensional** la cual permite generar parámetros adimensionales y leyes de escalamiento que se usan en el diseño del experimento y su posterior reporte de los resultados.

Para que esta técnica sea efectiva, el modelo a escala del álabe desarrollado debe cumplir rigurosamente con el principio de **similitud**. La similitud total entre modelo y prototipo se logra siempre y cuando se cumplan las siguientes condiciones:

- La geometría del modelo a escala debe ser idéntica a la del prototipo, lo que indica que el perfil DU06W200 no puede ser modificada al momento de escalarse (similitud geométrica).
- La velocidad en cualquier punto del flujo de aire alrededor de la superficie del modelo debe apuntar en la misma dirección y ser proporcional, en un factor de escalamiento constante, a la velocidad en el punto correspondiente en el flujo del prototipo (similitud cinemática).
- Todas las fuerzas en el flujo del modelo se escalan por un factor constante con las correspondientes fuerzas en el flujo del prototipo (similitud dinámica).

Si se denota con la letra griega mayúscula pi (Π) y subíndices numéricos a todos los parámetros adimensionales que describen al sistema, la condición de similitud total se logra si, siendo el

modelo y prototipo geoméricamente idénticos, todos los grupos Π independientes coinciden entre el modelo y el prototipo.

El método de repetición de variables desarrollado por el científico ruso Dimitri Riabouchinsky y popularizado por Edgar Buckingham es la forma más sencilla de generar los parámetros adimensionales necesarios para llevar a cabo las pruebas experimentales en el túnel de viento. En la **Figura 15** se observan los pasos a seguir de este método.

Figura 15

Método de repetición de variables

Paso 1: haga una lista con los parámetros del problema y cuenta su número total, n .
Paso 2: haga una lista con las dimensiones primarias de cada uno de los n parámetros.
Paso 3: establezca la <i>reducción</i> j como el número de dimensiones primarias. Calcule k , el número esperado de Π $k = n - j$
Paso 4: elija j <i>parámetros repetitivos</i> .
Paso 5: construya las k Π y manipule según sea necesario.
Paso 6: escriba la relación funcional final y verifique su álgebra.

Nota. Tomado de *Mecánica de fluidos* (p.308), por Cengel, 2018, McGrawHillEducation.

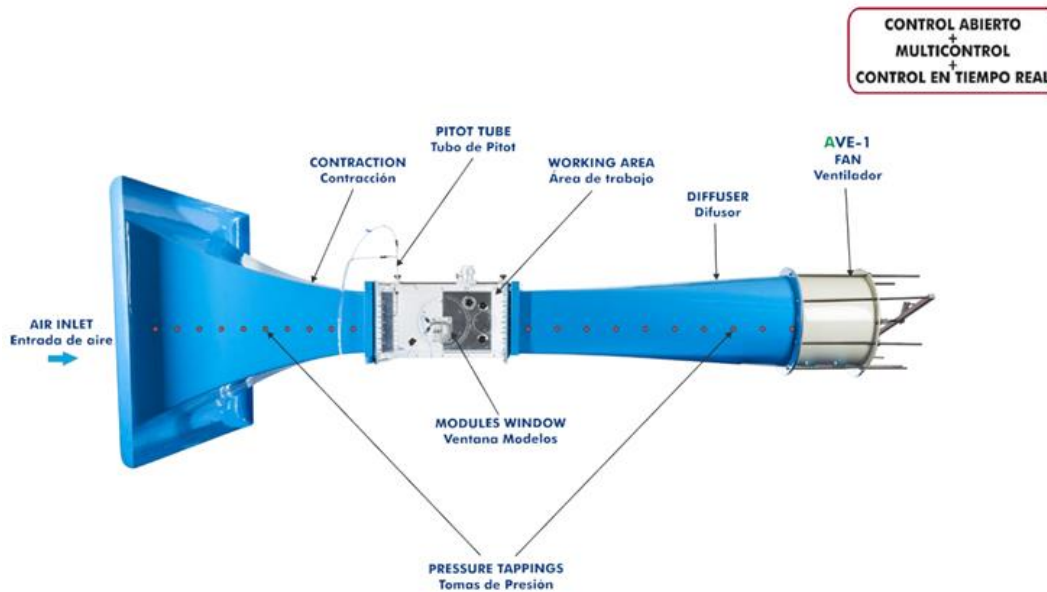
3.2.11. Túnel de viento de la escuela

El túnel de viento con el que se cuenta para el desarrollo del presente proyecto, trabaja con flujo subsónico e incompresible, además es de tipo circuito abierto lo que quiere decir que el aire que es aspirado desde el exterior y circula en las diferentes secciones del equipo es expulsado de nuevo a la atmósfera, por lo tanto, en cada momento se va a estar trabajando con aire renovado tomado del medio ambiente.

En la **Figura 16** se puede ver las diferentes etapas del túnel de viento por las que se hace pasar el flujo de aire y sus elementos principales.

Figura 16

Etapas del túnel de viento



Nota. Tomado de *Catálogo TA300/300C* (p.2), edibon, 2021.

- Labios y sección de remanso: su función es reducir la caída de presión y las interferencias en el flujo.
- Sección de contracción: cuenta con una relación de contracción de 9,5:1 y un contorno curvado que asegura un caudal de aire totalmente desarrollado en el área de trabajo.
- Área de trabajo: es un tramo de sección constante en el que se montan los modelos a ensayar, con dimensiones de sección transversal de 300 x 300mm y 600mm de longitud.

En la parte superior se encuentra un tubo de Pitot con el que se estudia la presión estática, la presión dinámica y la presión total.

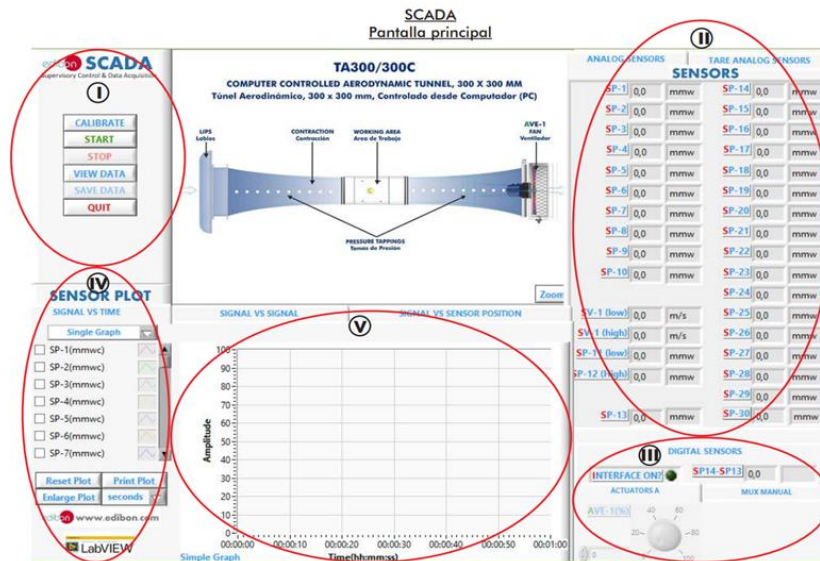
- Difusor: su función es evitar la generación de turbulencias que pueden dañar la calidad de la corriente en el área de trabajo.
- Ventilador: de flujo axial y velocidad variable, se encuentra situado en el lado de la descarga del túnel para proporcionar una mayor uniformidad en el perfil de velocidades en el área de trabajo. Garantiza una velocidad en el área de trabajo de 0 a 34 m/s.

El equipo cuenta con treinta sensores de presión diferencial (de rango entre 0 a 1 psi) para medir la presión estática en sesenta tomas de presión disponibles a lo largo del túnel.

La pantalla principal que muestra el software (SCADA) con el que cuenta el equipo se observa en la **Figura 17**.

Figura 17

Pantalla principal SCADA



Nota. Tomado de *Catálogo TA300/300C* (p.10), edibon, 2021.

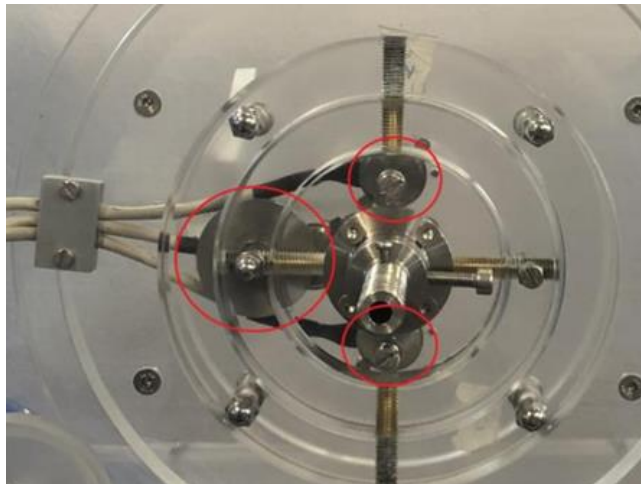
- I. Se encuentran los controles principales del equipo.
- II. Visualizador de los valores medidos por los sensores en tiempo real.
- III. Controles del ventilador.
- IV. Configuración y selección de gráficas.
- V. Visualizador de gráficas en tiempo real.

3.2.12. Dispositivo TA300/300C de medición de fuerzas

Este dispositivo contiene el conjunto de celdas de carga independientes entre sí, con las que se pueden medir las fuerzas y momentos ejercidos sobre el álabe debido al flujo de aire. Las fuerzas y momentos se transmiten por la barra que soporta al modelo y llegan a las celdas de carga que se encargan de transformar estas magnitudes físicas en señales eléctricas y/o de voltaje.

Figura 18

Células de carga



Nota. Tomado de *Manual de prácticas (M7) TA300/300C* (p.33), edibon, 2018.

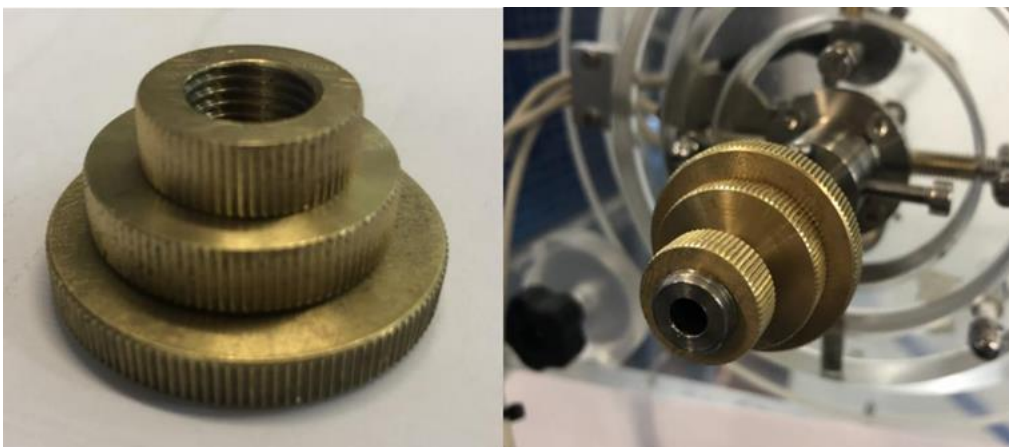
- La celda de carga SF-1, mide la componente de la fuerza resultante perpendicular a la dirección del flujo de viento (fuerza de sustentación).
- La celda de carga SF-3, mide la componente de la fuerza resultante paralela a la dirección del flujo de viento (fuerza de arrastre).
- La celda de carga SF-2 (+), mide el momento en sentido horario.
- La celda de carga SF-2 (-), mide el momento en sentido anti horario.

Adicional a esto, se añade el sensor SANG-1 que mide el ángulo de ataque en la que se posiciona el álabe.

Debido al peso que tiene el álabe y el tramo de varilla que lo soporta, esta no estará en posición horizontal sino ligeramente inclinada hacia la zona de mayor peso por lo que se precisa hacer uso de contrapesos en el extremo libre de la varilla para nivelarla, **Figura 19**.

Figura 19

Contrapesos



Nota. Tomado de *Manual de prácticas (M7) TA300/300C* (p.34), edibon, 2018.

4. Metodología

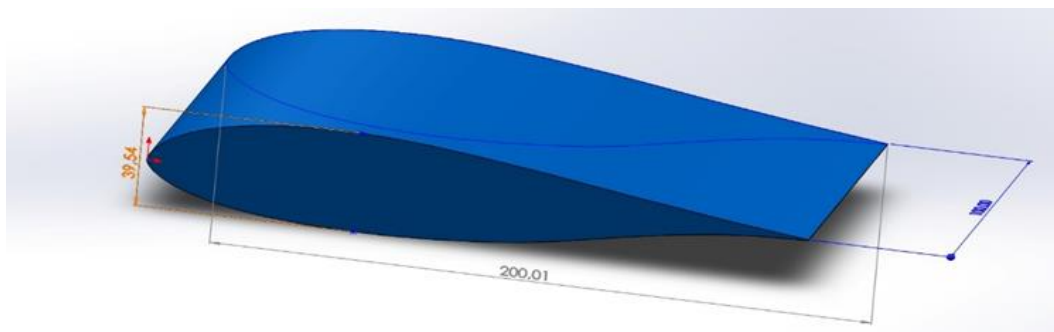
En el desarrollo del proyecto se hace necesario dividirlo por etapas, en las cuales cada una requiere de una búsqueda de información a profundidad con el fin de abarcar lo máximo posible y tener en cuenta las diferentes variables que puedan afectar los resultados del componente práctico.

4.1. Primera Fase

Esta sección corresponde a la búsqueda de información relacionada al proyecto, comenzando por la base teórica de la mecánica de fluidos, las relaciones de interacción entre un fluido y un sólido y las fuerzas que actúan en un perfil aerodinámico. Como la base de este proyecto es el estudio de un perfil aerodinámico denominado DU06W200 se buscará la información pertinente del alabe, los puntos de referencia para montar un modelo 3D para realizar su impresión en PLA y realizar las pruebas en el túnel de viento. Con el fin de obtener datos suficientes y tener una aproximación más precisa a un modelo a escala real, se plantea la construcción de 2 modelos con diferente longitud de cuerda 100 mm y 200 mm.

Figura 20

Modelado 3D de la serie DU06W200



Al mismo tiempo se plantea la recopilación de información acerca del túnel de viento Edibon TA 300/300C presente en la escuela de ingeniería mecánica, para así entender su funcionamiento, sus variables de entrada y salida, la manera correcta de calibración y montaje del

modelo en la cámara de ensayos. La puesta en marcha dependerá de las condiciones de trabajo presentes en la zona de estudio, para este caso el río Chicamocha.

Figura 21

Placa túnel de viento

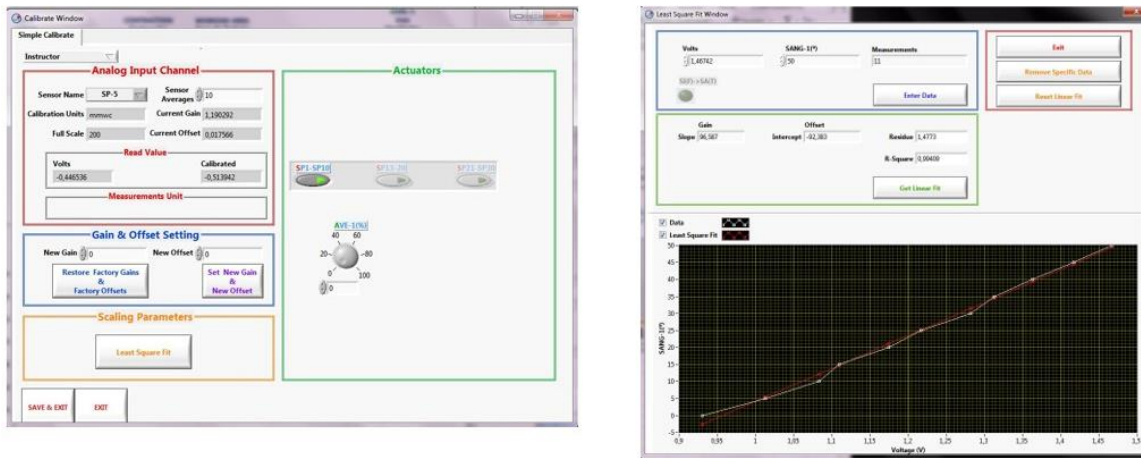


4.2.Segunda Fase

Se debe que realizar la calibración del túnel de viento, para esto, se accede al software y se aprecia que hay varias formas de calibración. La primera, reiniciar todos los sensores y dejarlos con las especificaciones de fábrica. Sin embargo, esto no asegura que los sensores queden calibrados correctamente, por tal razón esta opción no es la más adecuada. La siguiente opción de calibración es la implementación de un sensor de presión diferencial manual, que permita tomar el valor de cada punto de presión a lo largo del túnel y asociarlo al valor de voltaje que indica el sistema en ese preciso instante. De esta manera se crea una línea de tendencia y el programa automáticamente ajusta sus valores a la nueva tendencia, de esta manera los puntos de presión quedaran calibrados.

Figura 22

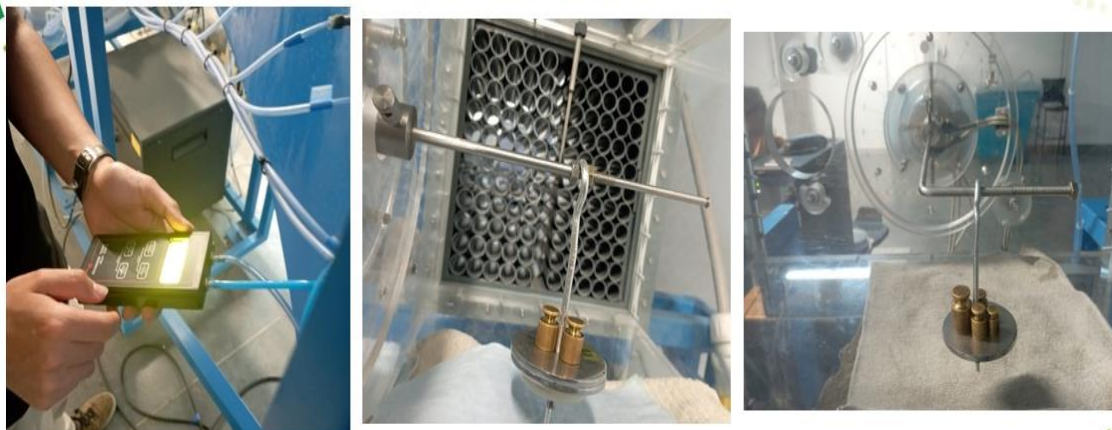
Módulo de calibración del Software



También, se deben calibrar los sensores de sustentación y arrastre, ya que estos también están asociados a un valor de voltaje y se hace necesario confirmar que estén indicando el valor correcto de acuerdo con las velocidades establecidas. Para esto, se utiliza un método sencillo y practico, que consiste en utilizar cargas con pesos establecidos, que permiten tener certeza de la fuerza aplicada y así poder asociarla al valor de voltaje que muestra el programa en pantalla. Así con estos valores, realizar una gráfica y establecer una línea de tendencia con la que el programa tomará como referencia y calibrará automáticamente los sensores de fuerza y sustentación.

Figura 23

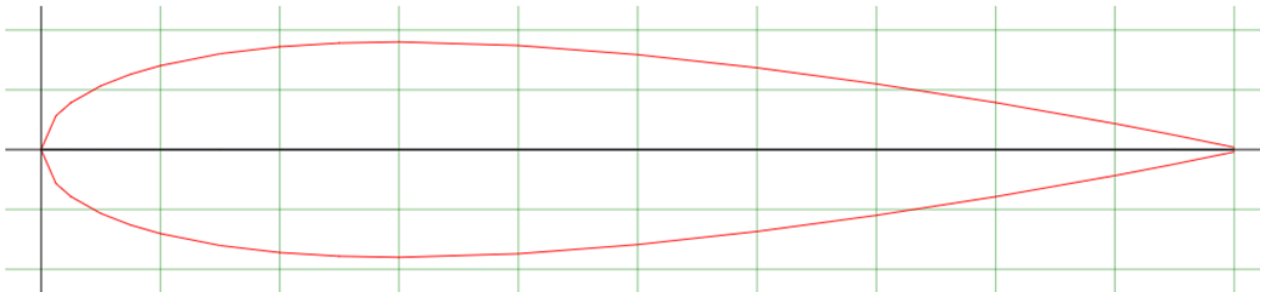
Calibración de los sensores



Una vez recopilada la información necesaria sea hace necesario realizar la impresión 3D de los modelos alares en PLA, de manera que sea posible ajustarlos dentro de la cámara de ensayos del túnel y se puedan obtener los valores de fuerza de arrastre y sustentación necesarios para los cálculos del modelo en tamaño real. Se plantea buscar un modelo alar con datos ya registrados, de esta manera poder realizar la impresión de un modelo que se pueda acoplar en el túnel de la escuela y obtener resultados similares a los registrados en la literatura. Así verificamos que los valores arrojados por el túnel serán ciertos y aproximados a la realidad. Para esto se planea usar un modelo NACA 0018 encontrado en la literatura con datos registrados con diferentes velocidades de viento y ángulos de ataque, utilizando los valores que se puedan manejar en el túnel y obtener los resultados similares.

Figura 24

Modelo NACA 0018



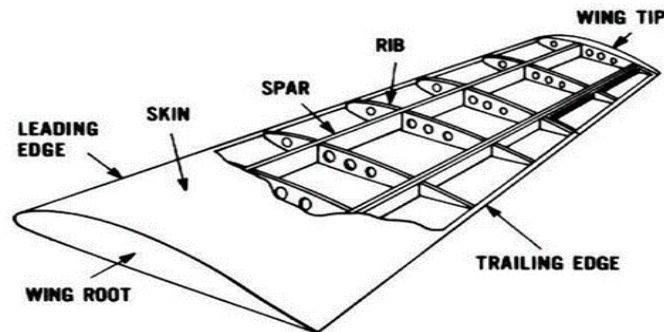
Nota. Tomado de (<http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0018-il>).

Así con el modelo en 3D realizando las pruebas en el túnel, se estaría confirmando la calibración de los sensores y se procedería a realizar las pruebas con el modelo DU06W200 con las longitudes de cuerda de 100 mm y 200 mm bajo la velocidad de viento de la zona del río Chicamocha. Se planea realizar la impresión total y completa de alabe, sin embargo, si el tiempo de impresión es muy demorado o costoso, se tiene planeado como segunda opción realizar un

esqueleto de pieza con la silueta del alabe y de poco espesor, unirlos mediante un soporte y laminar con acetato de vinilo.

Figura 25

Estructura del álabo



Nota. Tomado de *Detailed Design of 120 Seater Passenger Aircraft _Aircraft Design Project-II* (p.12), por Moaz Hussain, 2019.

4.3. Tercera Fase

La parte final de este proyecto sería el análisis de los datos obtenidos en el túnel de viento con los modelos del DU06W200 y su comparación con los datos ya registrados en la literatura mediante la simulación CFD realizada en [4]. De esta manera se estaría confirmando los resultados obtenidos en la simulación y la calibración detallada del túnel de viento para la realización de más proyectos o trabajos que necesiten de su aplicación.

5. Primer Objetivo

5.1. Diseño del Experimento con el Teorema Pi de Buckingham

Empleando el método de repetición de variables paso a paso mencionado en la **Figura 15**, se obtienen los parámetros adimensionales de escalamiento para la fuerza de sustentación.

Paso 1: Los parámetros (entre variables y constantes) que se ven involucrados en las pruebas experimentales se muestran en la **Tabla 1**.

Describiendo una relación funcional como la que se muestra a continuación y siendo $n = 7$

$$F_L = f(L_c, \alpha, V, \rho, \nu, c)$$

Paso 2: se realiza una lista con las dimensiones primarias para cada uno de los n parámetros (**Tabla 1**).

Tabla 1.

Dimensiones primarias de los parámetros.

Parámetro	Definición	Dimensiones primarias
F_L	Fuerza de sustentación	$\{m^1 L^1 t^{-2}\}$
L_c	Cuerda del perfil	$\{L^1\}$
α	Ángulo de ataque	$\{1\}$
V	Velocidad del flujo	$\{L^1 t^{-1}\}$
ρ	Densidad del fluido	$\{m^1 L^{-3}\}$
ν	Viscosidad cinemática del fluido	$\{L^2 t^{-1}\}$
c	Velocidad del sonido en el fluido	$\{L^1 t^{-1}\}$

Paso 3: debido a que son tres las dimensiones primarias que definen a todos los parámetros del problema (masa, longitud y tiempo), se hace establece la reducción $j = 3$ y con el teorema Pi de Buckingham Ecuación (8) se determina el número esperado de Π (k)

$$k = n - j \tag{ 8 }$$

$$k = n - j = 7 - 3 = 4$$

Paso 4: se escogen V , L_c y ρ como los parámetros repetitivos siguiendo los lineamientos sugeridos en la literatura.

Paso 5: se generan las Π ecuaciones con los parámetros repetitivos y usando uno a uno los parámetros restantes iniciando por el parámetro dependiente F_L

$$\Pi_1 = F_L V^{a_1} L_c^{b_1} \rho^{c_1} \rightarrow \{\Pi_1\} = \{(m^1 L^1 t^{-2})(L^1 t^{-1})^{a_1} (L^1)^{b_1} (m^1 L^{-3})^{c_1}\}$$

Se procede a generar y resolver el sistema de ecuaciones igualando la suma de los exponentes de cada dimensión primaria a cero, con el fin de forzar la adimensionalidad.

$$m: 1 + c_1 = 0 \qquad c_1 = -1$$

$$L: 1 + a_1 + b_1 - 3c_1 = 0 \qquad b_1 = -2$$

$$t: -2 - a_1 = 0 \qquad a_1 = -2$$

Reemplazando los valores de los exponentes se determina Π_1 y se busca un parámetro adimensional establecido que sea equivalente al encontrado.

$$\Pi_1 = \frac{F_L}{V^2 L_c^2 \rho} \xrightarrow{\text{equivalente}} C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$$

Se repite este paso para determinar las tres Π ecuaciones restantes obteniendo como resultado lo siguiente:

$$\Pi_2 = \frac{\nu}{V L_c} \xrightarrow{\text{equivalente}} Re = \frac{V L_c}{\nu}$$

$$\Pi_3 = \frac{V}{c} = \text{número de Mach} = Ma$$

$$\Pi_4 = \alpha = \text{ángulo de ataque}$$

Paso 6: la relación funcional final para la fuerza de sustentación queda como

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} = f(Re, Ma, \alpha)$$

Repitiendo los seis pasos del método de repetición de variables para la fuerza de arrastre F_D , se llega a la siguiente relación funcional:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} = f(Re, Ma, \alpha)$$

Para lograr la similitud dinámica se exige que los parámetros adimensionales independientes empaten simultáneamente entre el modelo y el prototipo. Empatar el ángulo de ataque es trivial, pero empatar simultáneamente el Reynolds y el Mach es complicado por lo que se acude a una regla empírica que ofrece la literatura en el que se desprecian los efectos de compresibilidad para números de Mach menores a 0,3 (como es en todas las velocidades con las que se trabajó), por lo que la similitud dinámica aproximada se puede lograr sólo con el empate del Reynolds.

5.2.Cálculo de las Condiciones de Laboratorio

Para determinar la velocidad que debe llevar el viento en la cámara de ensayos del túnel de viento, se parte de las velocidades promedios anuales de los tres lugares dentro de la zona del Cañón del Chicamocha de las que se tiene registro. *Velocidades promedio anual*

Tabla 2.

Velocidades promedio anual

Place	Annual average wind speed [m/s]	Standard deviation	Annual average wind power density [W/m ²]
"Mesa de los santos"	5.9	0.736	306.188
Chicamocha's River	6.9	1.084	485.115
"PANACHI"	4.3	0.536	86.643

Nota. Tomado de Chicamocha canyon wind energy potential and VAWT airfoil selection through CFD modeling (p.62), por García, Jaramillo y Chacón, 2020.

Siguiendo la teoría, para que exista similitud total entre modelo y prototipo se deben igualar todos los grupos de Π números adimensionales que se plantean en el método de repetición de variables. Uno de esos números adimensionales que caracterizan el fenómeno que se está estudiando es el valor del Reynolds.

$$Re = \frac{V_{prom} L_c}{\nu} \quad (9)$$

Por lo que se procede a igualar el grupo adimensional.

$$\left(\frac{V_{prom} L_c}{\nu} \right)_m = \left(\frac{V_{prom} L_c}{\nu} \right)_p \quad (10)$$

Donde L_c es la longitud de cuerda, ν es la viscosidad cinemática y se denota con "m" los valores del modelo y con "p" los del prototipo.

Considerando que la longitud de cuerda del álabe con la que se hicieron las simulaciones en CFD del [4] es de 0,25 [m], el valor de la viscosidad cinemática aproximado es de $\nu \cong 1,5436 * 10^{-5} [m^2/s]$ para una temperatura y presión de 23[°C] y 1[atm] respectivamente, se calcula el valor del Reynolds del prototipo en función de las tres velocidades de la **Tabla 2**.

Se procede a resolver (10) para la velocidad promedio en el túnel de viento con los modelos de 0,1 y 0,2 m de cuerda teniendo en cuenta que la viscosidad cinemática del aire en el laboratorio se toma igual a la del Cañón del Chicamocha debido a las condiciones de temperatura y presión atmosférica casi idénticas entre ambas localidades. Los resultados se presentan en la

Tabla 3.

Tabla 3.*Velocidades del túnel de viento*

Modelo	V_p [m/s]	Re	V_m [m/s]
0,1 m de cuerda	5,9	95556	14,8
	6,9	111752	17,3
	4,3	69642	10,8
0,2 m de cuerda	5,9	95556	7,4
	6,9	111752	8,6
	4,3	69642	5,4

5.3. Corrección de los Efectos en el Laboratorio

Para garantizar que los coeficientes de arrastre, sustentación y potencia que se van a estimar concuerden con el desempeño real que va a tener la turbina VAWT, se debe tener cuidado con los siguientes efectos que están presentes en las pruebas de laboratorio, pero no en un escenario real libre de interferencias ni tampoco en el entorno ideal simulado en CFD con las condiciones de contorno que se establecieron.

Para corregir estos efectos indeseados, se hace uso de los coeficientes de corrección que J.B. Barlow [2] presenta para pruebas bidimensionales y se usa el método de combinación de estos coeficientes propuesto por Selig [11] ya que este si considera los efectos de flotabilidad que se deben tener en cuenta cuando se trabaja con números de Reynolds bajos.

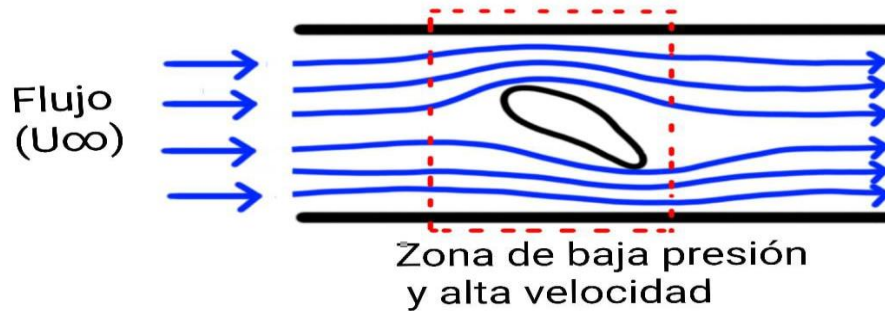
5.3.1. Efecto de bloqueo sólido

Este efecto se produce cuando el modelo que se está probando genera una reducción significativa en el área por donde fluye el aire, ocasionando que los valores de las variables físicas

que se están midiendo no correspondan con la velocidad del aire que se está considerando, **Figura 26**.

Figura 26

Efecto de bloqueo sólido



Por conservación de la masa, se tiene que la velocidad del viento aumenta y la presión disminuye en el área reducida por el modelo lo que conduce a un aumento en las fuerzas y momentos que se están midiendo. El factor de corrección para el bloqueo sólido depende de la geometría del modelo y la sección transversal de la cámara de ensayos tal y como se observa en la siguiente ecuación.

$$\varepsilon_{sb} = \frac{K_1 M_v}{A_{ts}^{3/2}} \quad (11)$$

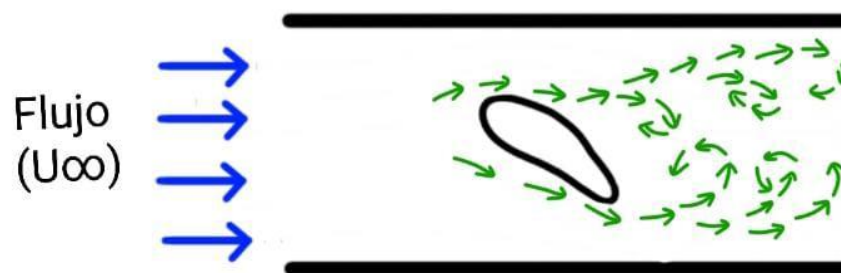
Donde M_v es el volumen del modelo, A_{ts} es el área de la sección transversal de la cámara de ensayos y K_1 es una constante que para nuestro caso toma el valor de 0.74 (según Barlow [2], para modelos ubicados de forma horizontal de pared a pared).

5.3.2. Efecto de bloqueo de estela

El bloqueo de estela se debe a que las paredes del túnel actúan como barreras físicas que restringen el desarrollo libre de la estela impidiendo así que pueda expandirse completamente y disiparse de manera natural.

Figura 27

Efecto de bloqueo de estela



El resultado de este efecto es una disminución en la velocidad dentro de la estela a comparación con la velocidad que llevaría la estela en corriente libre, por lo que, para satisfacer la ecuación de continuidad, se tiene que la velocidad fuera de la estela debe aumentar.

El factor de corrección para el bloqueo de estela es proporcional al tamaño de la estela, lo que significa que también es proporcional al coeficiente de arrastre

$$\varepsilon_{wb} = \left(\frac{c}{2h_{ts}} \right) C_{du} \quad (12)$$

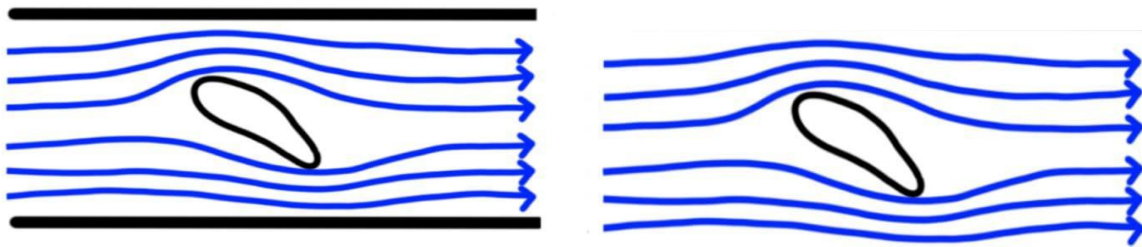
Siendo c la cuerda del modelo y h_{ts} la altura de la cámara de ensayos.

5.3.3. *Curvatura aerodinámica*

Este efecto se refiere a la alteración en las líneas de flujo del viento provocadas por el techo y piso de la cámara de ensayos que actúan como límites físicos que impiden el desarrollo normal que seguirían las líneas de flujo en corriente libre.

Figura 28

Curvatura aerodinámica restringida y no restringida

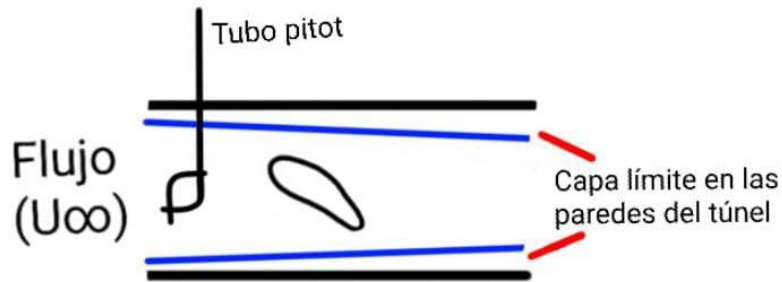


En este caso, la sustentación, el coeficiente de momento y el ángulo de ataque se verán afectados aumentando su valor. El factor de corrección que hay que tener en cuenta para el efecto de la curvatura aerodinámica la define la ecuación (13)

$$\sigma = \frac{\pi^2}{48} \left(\frac{c}{h_{ts}} \right)^2 \quad (13)$$

5.3.4. *Efecto de flotabilidad*

Este efecto se refiere a la reducción de la presión estática a lo largo de la cámara de ensayos producto del engrosamiento de la capa límite en las paredes.

Figura 29*Efecto de flotabilidad*

Debido a que el tubo de Pitot se encuentra ubicado al inicio de la cámara de ensayos, la velocidad que va a entregar será menor a la que se tiene realmente a causa de este efecto.

La corrección del efecto de flotabilidad es tema de estudio en la actualidad y este depende de las características específicas del túnel de viento con el que se está trabajando.

Selig et al.[11] obtuvo de forma experimental el factor de corrección para este efecto Ecuación (14) en el que se observó que la flotabilidad afecta considerablemente a los datos para números de Reynolds bajos, siendo este el caso que se está estudiando.

$$K_{vel} = 1.015755 - 0.0002391V_u + 0.00001712\sqrt{V_u} + \frac{0.1296}{\sqrt{V_u}} \quad (14)$$

5.3.5. Ecuaciones de corrección

Kenneth W. [13] utilizó y comparó los métodos de corrección de Barlow [2] y Selig et [11] encontrando que, en general, el método de Barlow discrepa tan solo entre 0,5 a 1,0% del método de Selig et. A continuación, se presentan las ecuaciones de corrección que se usarán en el presente proyecto basado en el método de Selig et [11].

$$\varepsilon_b = \varepsilon_{sb} + \varepsilon_{wb} \quad (15)$$

$$V = V_u K_{vel} (1 + \varepsilon_b) \quad (16)$$

$$\alpha = \alpha_u + \frac{57.3\sigma}{2\pi} (C_{l_u} + 4C_{m_u}) \quad (17)$$

$$C_l = C_{l_u} \frac{(1 - \sigma)}{(1 + \varepsilon_b)^2} \quad (18)$$

$$C_d = C_{d_u} \frac{(1 - \varepsilon_{sb})}{(1 + \varepsilon_b)^2} \quad (19)$$

$$C_m = \frac{C_{m_u} + C_l \sigma (1 - \sigma) / 4}{(1 + \varepsilon_b)^2} \quad (20)$$

6. Segundo Objetivo

6.1. Construcción de los Modelos

6.1.1. Alternativas de construcción del modelo

Para la construcción del modelo alar en 3D se contó con la ayuda del auxiliar del laboratorio de diseño de la escuela de ingeniería mecánica, encargado del manejo de las máquinas impresoras y cortadora láser, allí se presentaron 2 alternativas de construcción, una impresión en 3D completa del modelo en PLA y una impresión parcial del modelo con recubrimiento de material plástico más exactamente acetato de vinilo.

Impresión total del modelo

Uno de los filamentos más populares es el PLA, que se utiliza tanto en impresoras 3D comerciales como domésticas. El PLA es un filamento más respetuoso con

el medio ambiente porque no requiere recursos limitados como el petróleo, por lo que está lejos de ser un material plástico producido de forma tradicional o muy contaminante

El PLA es un material que tiene características muy importantes, es muy resistente y utilizado en la actualidad para creación de piezas mecánicas. Sin embargo, el proceso de impresión es muy demorado, ya que al momento de hacer la impresión lo hace por medio de capas delgadas de 3 mm y una pieza robusta necesita de varias capas para tener la suficiente rigidez para cumplir con su función. Hacer esto, implica más demora al momento de hacer la impresión, por ejemplo para imprimir un modelo alar de la serie DU06W200 con una longitud de cuerda de 25 cm demoraba cerca de 36 horas, pero por seguridad las impresoras no se deben dejar trabajando solas por más de 8 horas continuas por peligro de una obstrucción de material o movimiento indebido, adicional a esto, hacer parada de la máquina para continuar al día siguiente generaba 2 capas de material diferente con el peligro de que los dos bloques no de adhirieran correctamente y se separaran. Debido a estos inconvenientes se decide buscar otra alternativa para la construcción del modelo alar, de manera que cumpla con la geometría de un alabe de la serie DU06W200 y permita realizar las pruebas en el túnel de viento

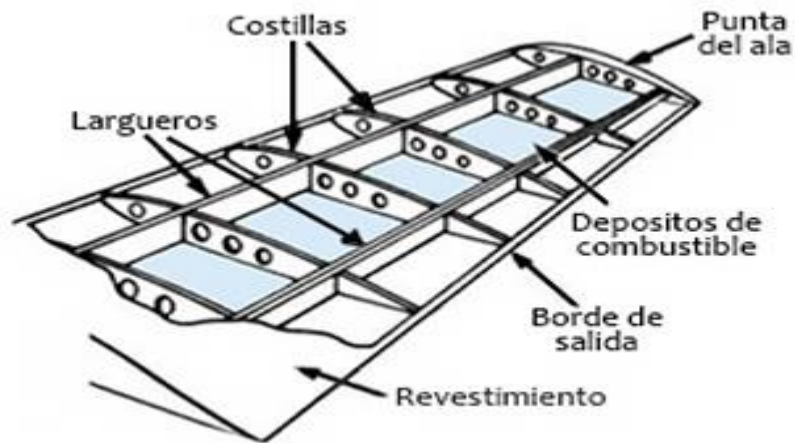
Impresión Parcial del modelo

Para dar cumplimiento a los objetivos del proyecto, se requiere de un perfil alar con la geometría de la serie DU06W200, sin embargo, solo se necesita la geometría exterior, no es relevante el interior del alabe, excluyendo este aspecto, se puede hacer mayor énfasis en el acabado superficial del modelo permitiendo implementar otra alternativa para su construcción. En vista de que la primera alternativa tiene sus complicaciones por material y tiempo, se plantea la impresión parcial del modelo alar, con una combinación entre PLA y lamina de triplex. Haciendo alusión a la manera en que se construye realmente las alas de un avión, se

planteó hacer la estructura del alabe con un esqueleto en madera, con sus extremos en impresión de PLA y recubrimiento en acetato de vinilo.

Figura 30

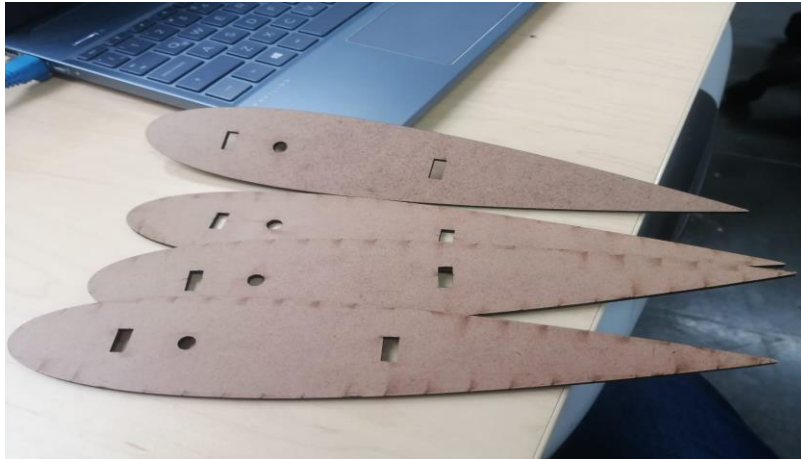
Esqueleto de un modelo alar de avión



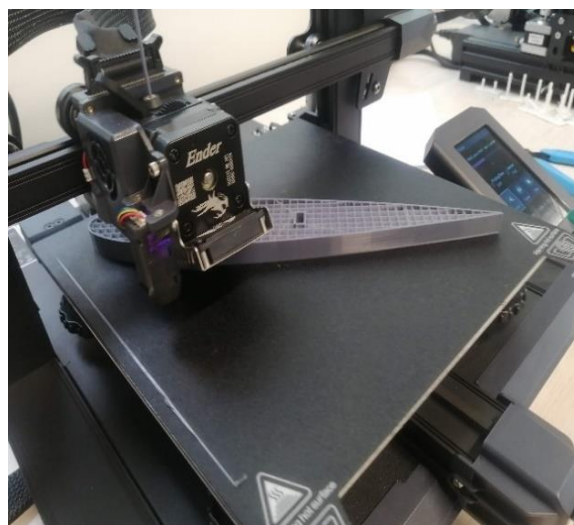
6.1.2. Selección de materiales y construcción

Para la construcción de los modelos alares, se hizo necesario la compra de los siguientes materiales: Lámina de triplex de 5 mm de espesor, largueros de madera de 5 x 10 mm, lámina de acetato de vinilo, pegamento instantáneo, rollo de PLA, varilla roscada de 6 mm y tuercas de ajuste.

A manera de hacer el modelo liviano y no quede tan pesado para el montaje en la cámara de ensayos del túnel, las costillas se hacen de lámina de triplex de 5 mm de espesor, cortadas con láser, gracias al banco que cuenta el laboratorio de diseño de la escuela. Los largueros, funcionan como vigas que dan soporte y resistencia al modelo, están hechos de madera de 5 mm* 10 mm.

Figura 31*Costillas*

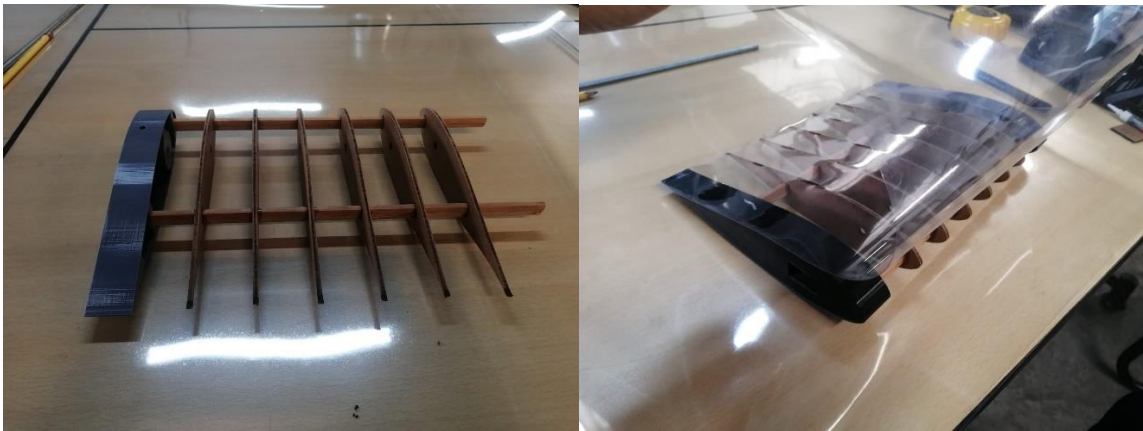
Pero, el modelo se debe acoplar al sensor de fuerzas ubicado en la cámara de ensayos del túnel y con los cortes de madera no es posible realizarlo; entonces se decide imprimir los extremos del alabe, haciéndolo más anchos de 3 cm permitiendo que se puedan ajustar a la varilla del sensor, sin embargo, se hacen con un relleno del 10% para no gastar tanto material y hacer el modelo más liviano, en ultimas lo que interesa para el caso de estudio es el perfil exterior del alabe.

Figura 32*Impresión de los álabes en PLA*

Una vez terminada la impresión de los dos extremos del alaba, se procede a armar la estructura del modelo para posteriormente realizar su laminación con acetato de vinilo.

Figura 33

Montaje de los modelos



Una vez terminada la laminación con el acetato, el modelo queda listo para ser utilizado en las pruebas del túnel de viento. Sin embargo, hace falta colocar la varilla roscada que va a funcionar como conector entre el perfil y los sensores de fuerza. La varilla debe ir empotrada en un agujero de 6 mm, pero presenta un escariado de 1 mm que va a permitir un mejor ajuste del tornillo prisionero. Por esta razón se compra una varilla roscada de 6 mm y se mecaniza en el taller de la escuela de ingeniería mecánica.

Figura 34

Mecanizado del eje



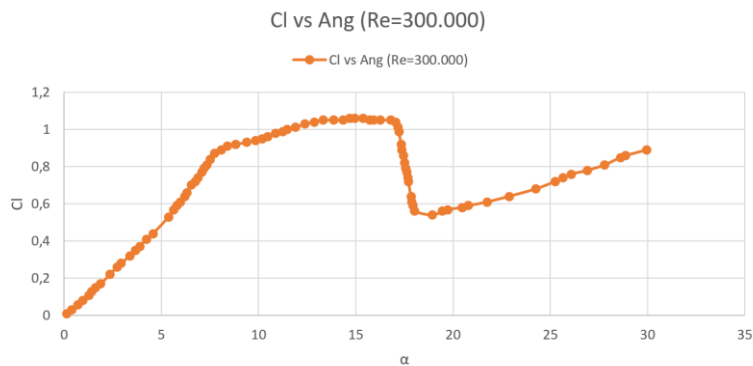
Así, una vez terminado el mecanizado, la varilla queda lista para acoplarla al modelo y hacer el montaje en la cámara de ensayos para comenzar con las pruebas.

6.2. Validación de la Calibración de los Sensores

A manera de confirmar la calibración del túnel de viento, se decide hacer las pruebas con un modelo NACA 0018 que esté fundamentado y aprobado a manera de obtener los mismos resultados o al menos parecidos en el túnel de viento de la escuela.

Figura 35

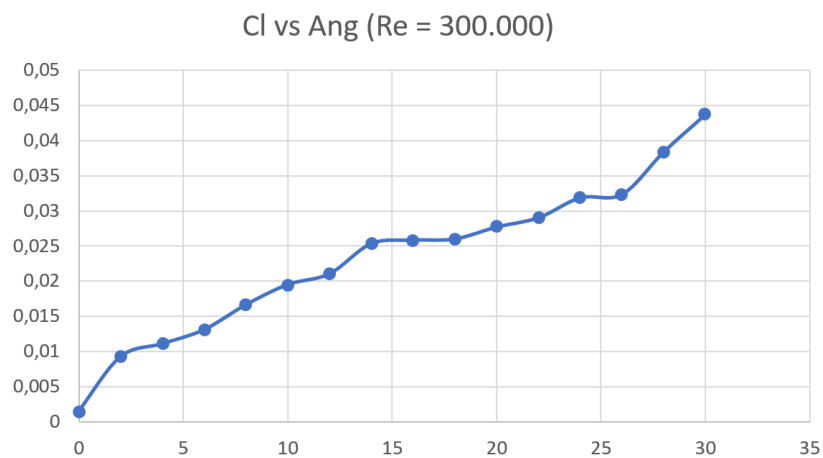
Cl del Peaper



De acuerdo con las pruebas realizadas con este modelo, en un túnel de viento que supera en tamaño casi 3 veces al que se encuentra en el laboratorio de la escuela de ingeniería mecánica, para un Reynolds de 150.000, valor al cual se puede acceder colocando el túnel a una capacidad del 75%, obtienen valores para el coeficiente de sustentación alrededor del 1.1.

Figura 36

Cl obtenido



Aplicando el análisis de varianza, podemos apreciar que la variación entre estos grupos de datos es muy grande, la cual confirma que los datos obtenidos en [1] son mucho mayores que los obtenidos en el laboratorio, por tal razón, es posible afirmar que los datos obtenidos en el túnel de viento no son datos reales y están sujetos a variaciones y alteraciones.

Tabla 4 . ANOVA para validación de la calibración

ANOVA para validación de la calibración

RESUMEN				
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
Angulo	16	136	8,5	22,66666667
CI NACA paper	16	11,38	0,71125	0,126465
Angulo	16	136	8,5	22,66666667
CI NACA Laboratorio	16	0,24069343	0,015043339	4,57981E05

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	1063,211744	4	265,8029359	22,99813314	1,7341E-11	2,52790657
Dentro de los grupos	681,897662	59	11,55758749			
Total	1745,109406	63				

Resulta que el modelo NACA 0018 de 200 mm de cuerda utilizado en las pruebas de laboratorio, no llega a los valores de sustentación que muestra [1] con un modelo de las mismas condiciones, esto se debe a que la cámara de ensayos empleada en dicho experimento, tiene unas dimensiones superiores a las que se cuenta en la escuela, esto hace que el experimento obvie factores como el efecto de bloqueo efectuado por las paredes sobre el modelo empleado, provocando que el desempeño del modelo sea el máximo durante las pruebas y de esta manera obteniendo resultados de coeficientes máximos.

Cabe recordar que el túnel implementado en las pruebas de este proyecto es un modelo didáctico, no está completamente especializado para pruebas de caracterización para un nivel superior de confirmación de datos, por tal motivo, los datos obtenidos de aquí en adelante van a tener una variación con respecto a un valor real, por las limitaciones del túnel de viento y adicional las limitaciones referidas al efecto de bloqueo.

Así mismo, realizando un comparativo entre los valores de arrastre de ambas pruebas, los resultados obtenidos en la prueba realizada en [1], tiene valores altos a los mismos ángulos de inclinación, aunque presentan un comportamiento similar hasta los 17 grados, de ahí en adelante [1] tiene un aumento considerable en sus valores de coeficiente de arrastre, en cambio los datos obtenidos en el túnel de viento llegan a un máximo de 0.12 provocando que se genere una gran diferencia entre las dos gráficas.

Figura 37

Cd del peaper

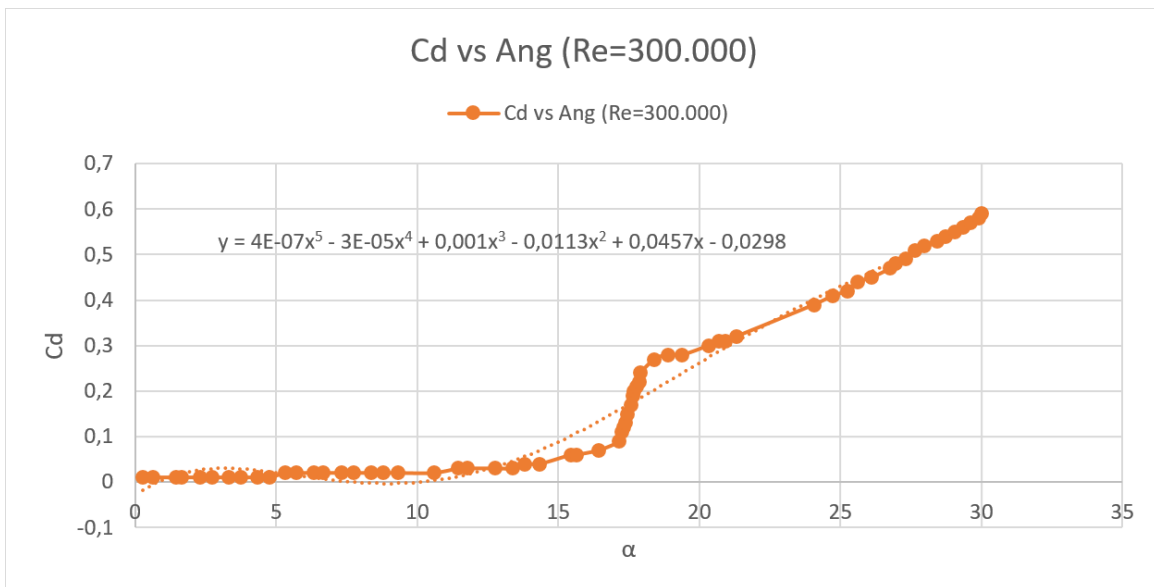
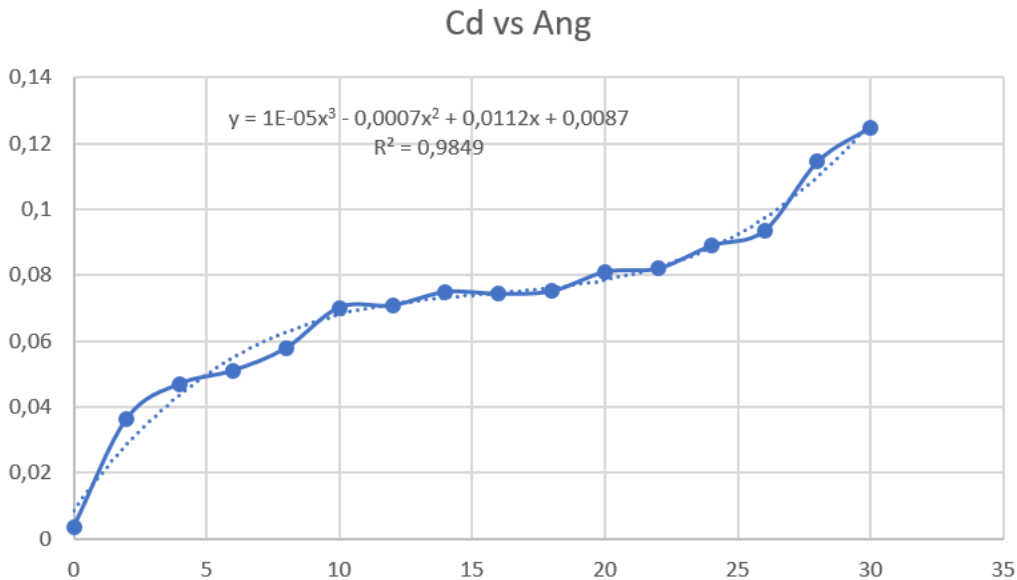


Figura 38*Cd obtenido*

6.3.Resultados Experimentales con los Modelos DU06W200

Para estimar el desempeño aerodinámico que va a tener el perfil a escala real, se hace uso de los datos recopilados en las pruebas experimentales y el método de repetición de variables Pi Buckingham.

Con los datos obtenidos del DU de 100 y escalados a un perfil de 200, realizando los ANOVAS, y sabiendo estadísticamente cuál es el porcentaje de error, precisión y exactitud de los datos obtenidos experimentalmente del perfil de 200 y lo que teóricamente deberíamos obtener (con el método Pi de Buckingham), podemos determinar la precisión y validez de las pruebas experimentales. De acuerdo con el análisis de varianza ANOVA, determina que debe establecerse una hipótesis nula en la que se establece que las medias de los grupos analizados son similares o si existe alguna diferencia entre el grupo de muestras, quiere

decir que al menos una de las medias es diferente a las demás, ocasionando que se pueda determinar el grupo con mejor rendimiento y comportamiento de los datos.

En base a los datos obtenidos en las pruebas experimentales, el modelo de 200 mm de cuerda a una velocidad de 5,37 m/s obtuvo los mejores resultados y comportamiento de datos, que permiten obtener los valores más altos en los coeficientes de arrastre y sustentación.

Tabla 5

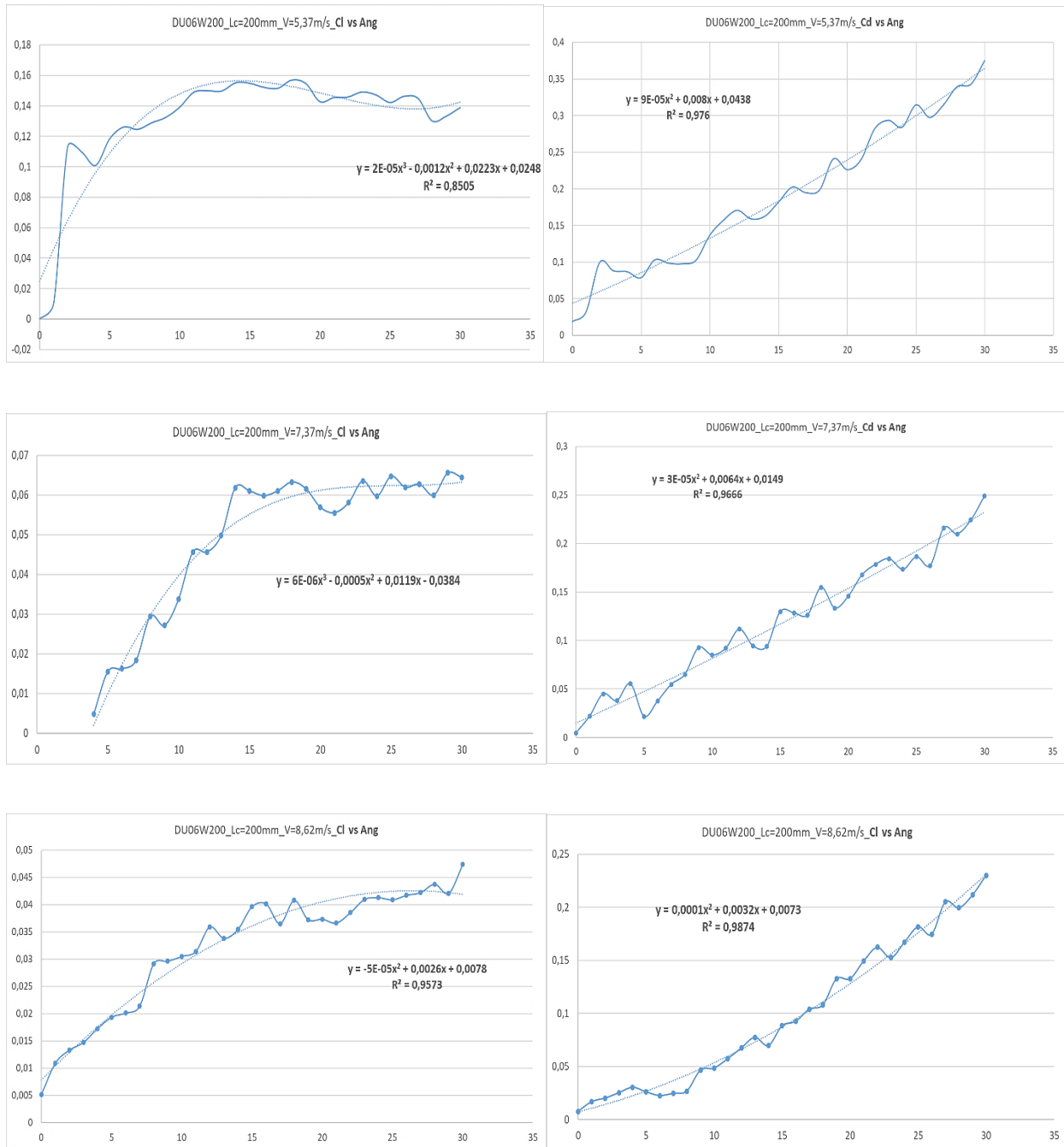
Análisis de varianza modelo de 200 mm

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	1840,90859	3	613,636198	53,3399419	9,6642E-20	2,70818647
Dentro de los grupos	1012,37428	88	11,5042532			
Total	2853,28288	91				

Donde efectivamente el valor de F es superior al valor crítico, confirmando que este grupo tiene el valor de la media superior a los demás grupos, alcanzando los mejores valores para los coeficientes de arrastre y sustentación.

En la gráfica de ángulo contra Coeficiente de sustentación, se puede observar que presenta los valores más altos y los mantiene estables una vez se superan los 10 grados, permitiendo obtener un mayor rendimiento y aprovechamiento del aire a la velocidad de 5.37 m/s. Sin embargo, así como presenta el coeficiente de sustentación más alto, también presenta los valores más altos en su coeficiente de arrastre, de acuerdo con el análisis de varianza, este es el modelo con el mejor rendimiento.

Figura 39 Datos experimentales de álabe Lc: 200 mm

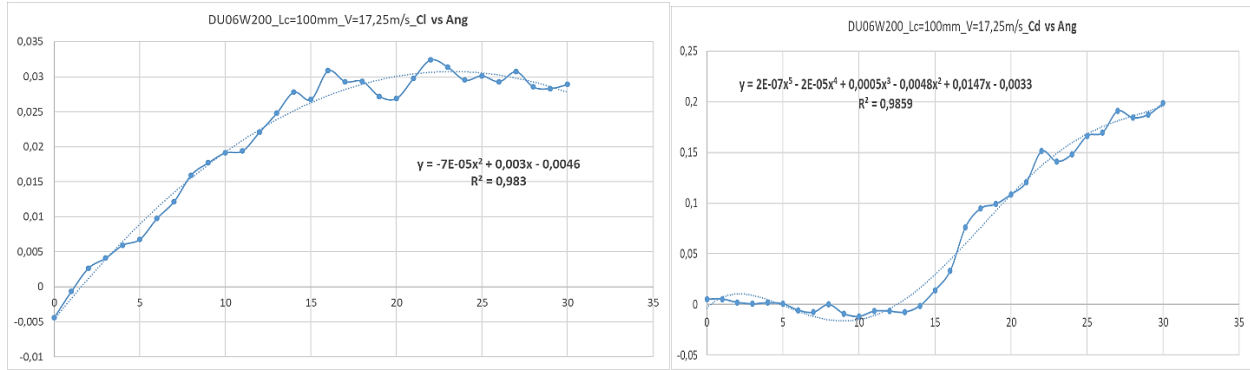


Sin embargo, el modelo de 100 mm de cuerda a una velocidad de 17.25 m/s también presentó un buen comportamiento, a pesar de tener un pico de en el coeficiente de sustentación al

momento de hacer el transcurso de 10 a 15 grados de inclinación. Esto también es debido al fenómeno de pérdida profunda, en donde a medida que aumenta el ángulo de inclinación, en cierto punto el flujo de aire se separa, haciendo que se desplace hacia adelante a medida que el ángulo aumenta. Sumado al efecto de bloqueo por las paredes del túnel, provoca que se genere una alteración en la toma de datos, pero a pesar de esto, la tendencia trata de mantenerse. Por otra parte, el coeficiente de arrastre siempre mantiene su tendencia creciente, ya que este no se ve tan afectado por el efecto de bloqueo, al contrario, se ve beneficiado.

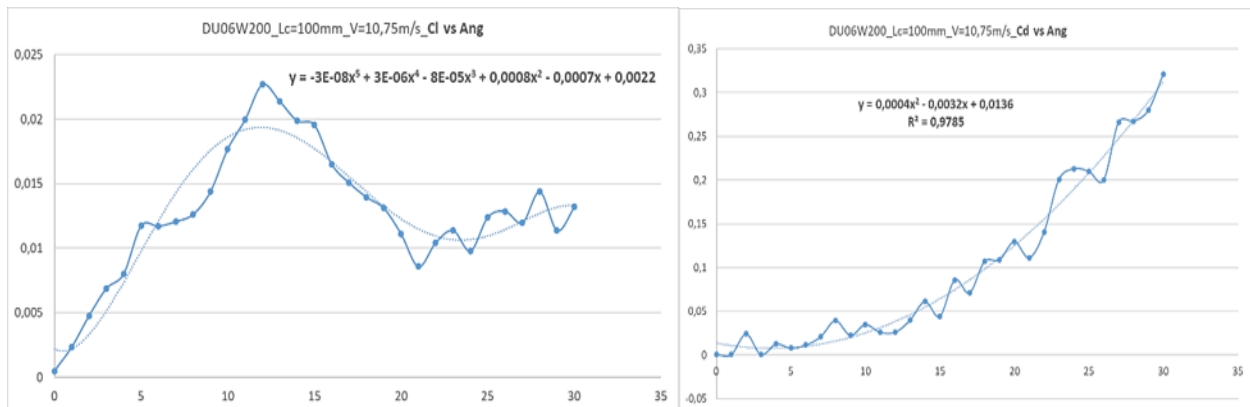
Figura 40. Datos experimentales álabes L_c : 100 mm





El modelo con el menor rendimiento sin duda alguna fue de 100 mm de cuerda a una velocidad de 10.75m/s, presentando los valores más bajos de coeficiente de sustentación y los más altos en arrastre, haciendo que sea la prueba menos eficiente de las realizadas en el túnel de viento, a pesar de que la gráfica de sustentación contra ángulo tiene un comportamiento creciente constante, no desarrolla más y se mantiene en valores por debajo de 0.025, lo cual no es suficiente para dar un buen rendimiento en la turbina.

Figura 41. Resultados con el menor rendimiento



Se realiza el escalamiento de los datos experimentales obtenidos tanto con el modelo de 100 como con el de 200, al prototipo real con cuerda de 250 mm.

A continuación, se presenta el desarrollo del método Pi de Buckingham para una de las pruebas:

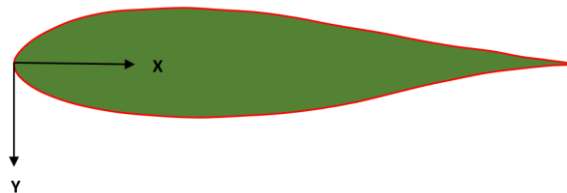
Debido a que para el método se requiere representar una variable dependiente en función de parámetros independientes entre sí mismos, se realiza el método por separado para las variables dependientes F_l , F_d y P (potencia del perfil).

6.4. Estudio Experimental de la Capa Límite

Se estudió el comportamiento de la capa límite de los modelos NACA0018 y DUW06200 de 200 mm de cuerda mediante la determinación del perfil de velocidades y el efecto que tienen los cambios de caudal de entrada y ángulo de ataque sobre la capa límite.

Para esto, se empleó un tubo de Pitot con el que se tomaron los valores de presión dinámica en diferentes puntos de cuerda del modelo (X) y a diferentes alturas desde la superficie del modelo (Y), tal como se observa en la figura 42.

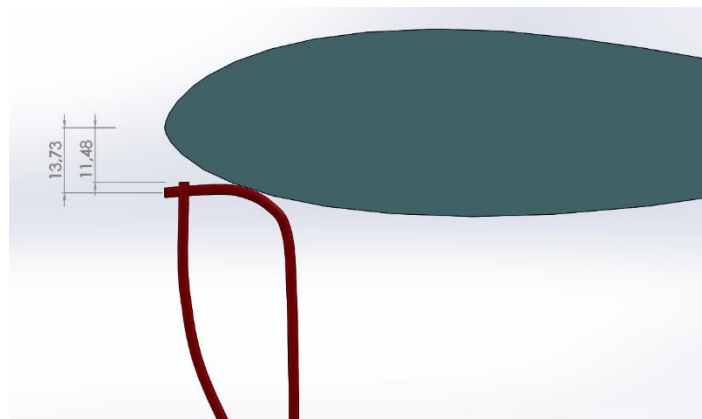
Figura 42 Modelo en cámara de ensayos





Debido a la configuración y geometría del sistema modelo-tubo de Pitot, se hacía imposible tomar medidas alrededor de la superficie del modelo ($y=0$) para los puntos más cercanos al borde de ataque del perfil, por lo que se modeló el sistema en SolidWorks para determinar las distancias reales de Y a las que se tomaron los valores de presión dinámica.

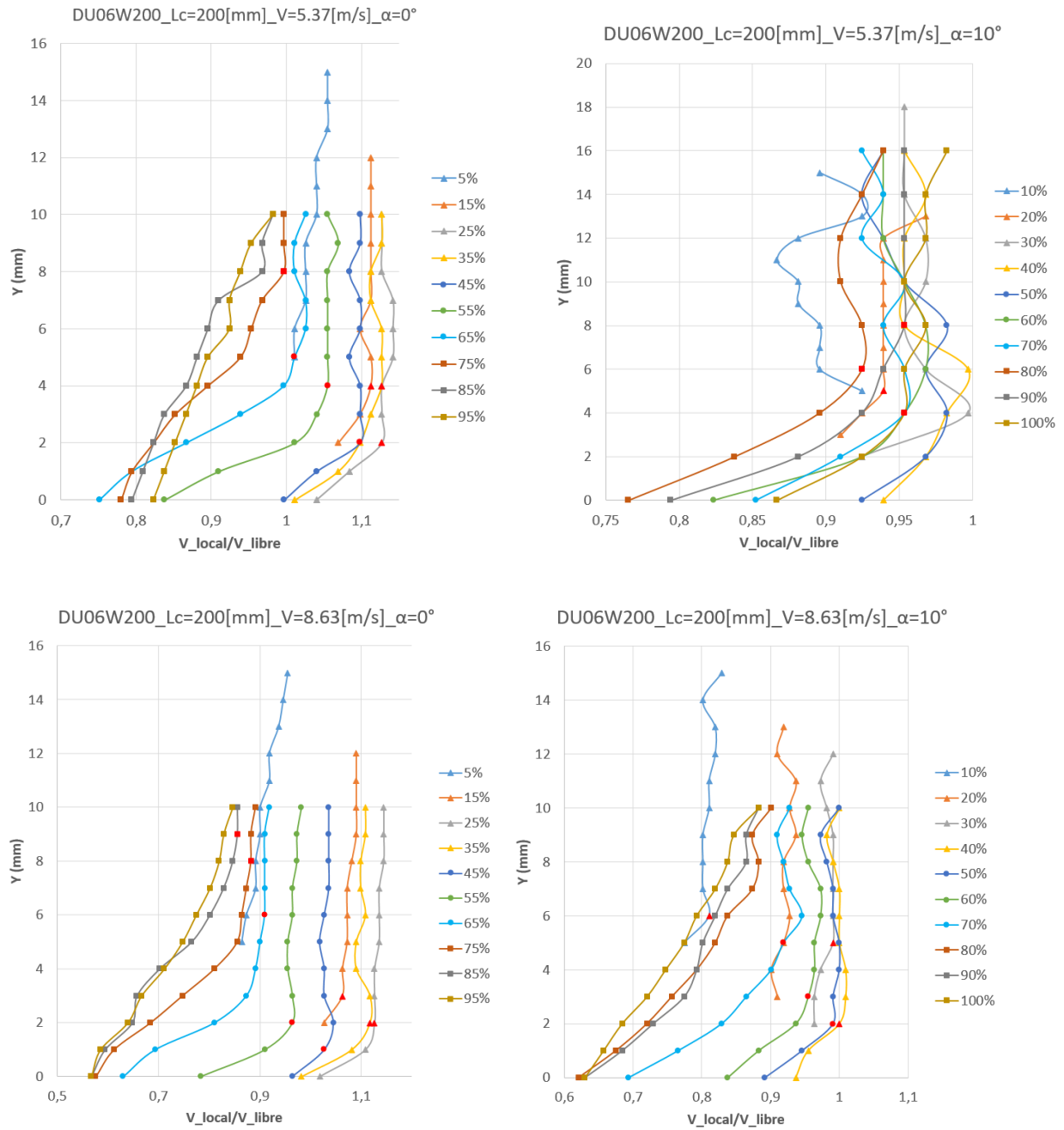
Figura 43 Sistema Tubo de pitot-Modelo en SolidWorks.

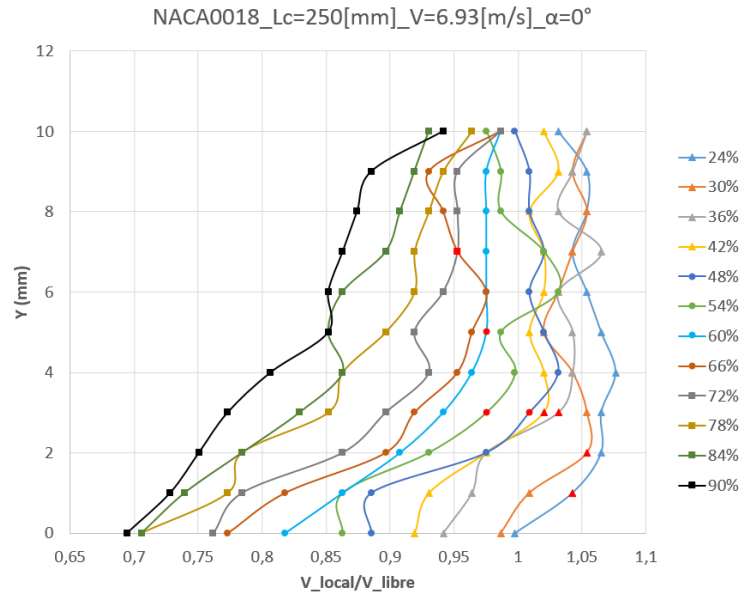


A continuación, se muestran los resultados de la velocidad local del viento en relación a la velocidad de corriente libre para distintos porcentajes de cuerda (medidos desde el borde de ataque) y a diferentes alturas de la superficie inferior de los modelos DU06W200 de 200 mm y el NACA0018 de 250 mm de cuerda.

Se marcan de color rojo los puntos en los cuales la curva comienza a estabilizarse a un valor de velocidad local constante y con los cuales se construye el boceto de la capa límite.

Figura 44 Perfil de velocidad local en distintos puntos alrededor de los modelos DU06W200 y NACA0018



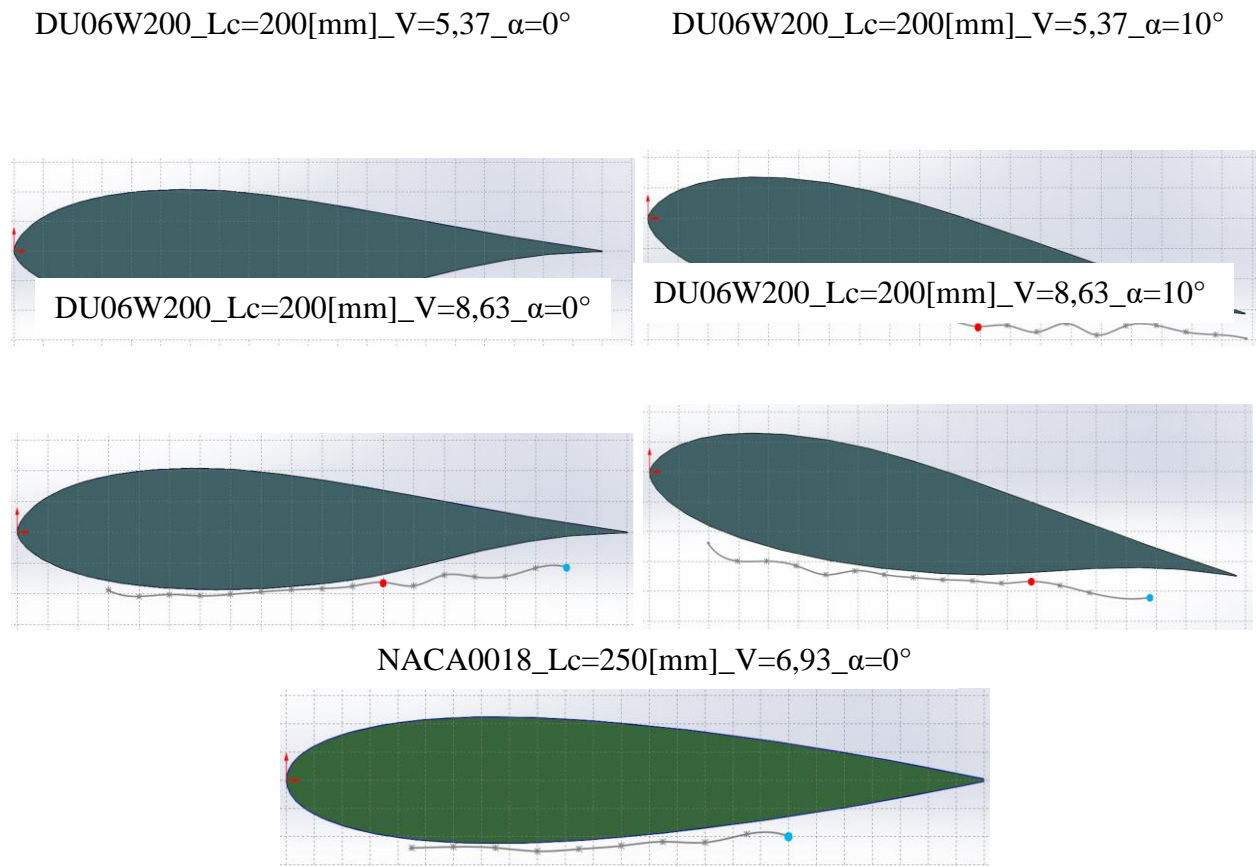


Los perfiles de velocidad de las figuras 30 y 31 presentan el comportamiento esperado según la literatura con la única salvedad de que el punto de estabilización de la velocidad local varía en los diferentes porcentajes de cuerda.

Esta discrepancia se explica por el gran porcentaje de bloqueo que se tuvo durante las pruebas ya que la cámara de ensayos no es lo suficientemente grande como para permitir un desarrollo completo de flujo libre sin interferencia de las capas límites de las paredes y del modelo que actúan como una tobera acelerando el flujo en las zonas donde el modelo es más ancho.

Teniendo ya los puntos aproximados donde el perfil de velocidades tiende a adquirir una magnitud constante, se construye un aproximado de la capa límite que presentan los modelos a las condiciones de viento del parque Panachi y el Río Chicamocha (La rejilla mostrada es de 10x10 mm), Figura 30.

Figura 45 Capa límite sobre los modelos DU06W200 y NACA0018.



Se calcula el número de Reynolds local (con la velocidad de corriente libre y la longitud de cuerda) en los diferentes porcentajes de cuerda, y se determina si se encuentra en régimen laminar ($Re < 10^5$), régimen turbulento ($Re > 3 * 10^6$) o transición ($10^5 < Re < 3 * 10^6$) dentro de la capa límite, Tabla 11.

Tabla 6

Punto de transición

DU06W200			
V corriente libre(m/s)	X (mm)	n° Reynolds	Laminar/Turbulento
5,375	0	0	Laminar
	170	59196	Laminar
	180	62678	Laminar
	190	66160	Laminar
	200	69642	Laminar
8,625	0	0	Laminar
	170	94989	Laminar
	180	100577	Transición
	190	106164	Transición
	200	111752	Transición
NACA0018			
6,93	0	0	Laminar
	180	80811	Laminar
	195	87545	Laminar
	210	94280	Laminar
	225	101014	Transición

De la Figura 30 cabe mencionar que no se pudo construir la capa límite en los puntos más cercanos al borde de ataque debido a las limitaciones de montaje modelo-tubo de Pitot mostrado en la figura 29.

De estos resultados podemos observar que si el álabe se somete a menor velocidad de corriente de aire el punto de transición de la capa límite se aleja del borde de ataque lo que ocasiona que esta se separe más fácilmente de la superficie del álabe tal y como lo indica la teoría.

Se ha marcado en azul el punto de transición que se observa realizando la práctica experimental que es justamente donde termina la construcción de la capa límite ya que a partir de este punto el comportamiento del perfil de velocidades no se estabiliza o presenta un

comportamiento errático. Además, este punto hallado con la práctica experimental coincide aproximadamente con los puntos teóricos de transición que se describieron en la Tabla 11.

Un caso especial es que para el DU06W200 a la velocidad de 5,37 m/s el punto donde termina la construcción de la capa límite no corresponde al punto de transición si no que más bien a partir de ese punto no se logró medir la capa límite ya que esta se había alejado más allá del máximo espesor que se midió ($Y_{\text{maximo}} = 16\text{mm}$).

De color rojo se marca el punto donde se percibe que empieza la separación de la capa límite con el modelo y en particular, para el NACA0018 este punto coincide con el punto de transición.

7. Tercer Objetivo

Para la realización del tercer y último objetivo, se usan los resultados de las pruebas experimentales de los modelos DUW200 para estimar la potencia eólica que podría presentar una turbina eólica de eje vertical tipo Darrieus-H con dicho perfil de álabes y a las condiciones ambientales estudiadas.

Existen diversos métodos que intentan estimar de manera precisa la potencia de un prototipo de turbina eólica basándose en mediciones experimentales con modelos a escala. Una de la más conocidas se basa en construir el modelo a escala completo del prototipo de la turbina, para medir en condiciones de laboratorio variables clave como lo son la velocidad angular y el torque generado por el modelo. A partir de estos datos se logra dar de manera relativamente sencilla un estimado de potencia del prototipo a escala real.

Debido a que el túnel de viento con el que se contaba para la realización del presente proyecto se limitaba sólo a poder estudiar perfiles aerodinámicos y no modelos a escala completos, se

exploró un método alternativo de cálculo de potencia de turbina diferente a los comúnmente usados.

7.1.Datos de Entrada y Ecuaciones

El método de cálculo de la potencia de la turbina se basa en la siguiente ecuación tomada de [6]

$$P = \Omega RH \frac{Bc}{2\pi} \frac{1}{2} \rho \int_0^{2\pi} U_{rel}^2 (C_l \sin(\alpha) - C_d \cos(\alpha)) d\phi \quad (21)$$

En la siguiente tabla se describe cada una de las variables que interfieren en la ecuación 21

Tabla 7

Parámetros

Parámetro	Símbolo
Velocidad Angular del rotor	Ω
Radio del rotor	R
Longitud de palas	H
Numero de palas	B
Cuerda	c
Densidad del viento	ρ
Angulo de ataque	α
Factor de inducción	a
Posición angular	ϕ

Como se puede ver, la ecuación de potencia escogida queda en función de los coeficientes de arrastre, sustentación y parámetros geométricos de la turbina eólica. La variable Urel es la velocidad de viento relativa que se genera sobre los álabes producto de la suma vectorial de la velocidad de corriente libre del viento y el movimiento del mismo rotor, ecuación 22.

$$U_{rel}^2 = \{\Omega R + (1 - a)U\sin(\phi)\}^2 + \{(1 - a)U\cos(\phi)\}^2 \quad (22)$$

Se definen los parámetros geométricos de la turbina eólica con base a una que se encuentra en el mercado, figura 46.

Figura 46

Turbina comercial



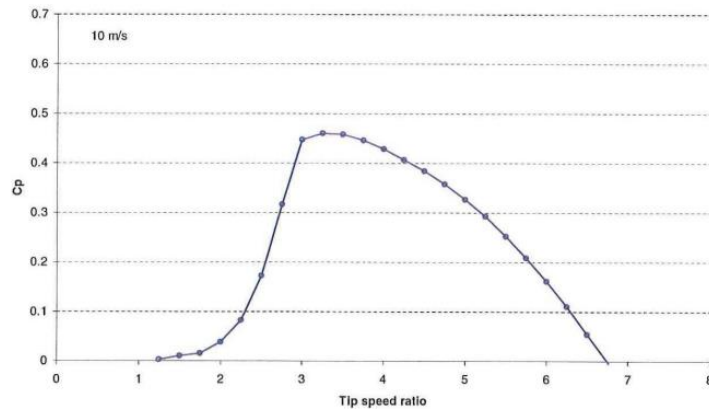
Item	FH-6000W	FH-8000W
Rated power	6000W	8000W
Maximum power	6500W	8500W
Rated voltage	12V/24V	12V/24V/48V
Start up wind speed	1.3m/s	1.3m/s
Cut-in wind speed	2.5m/s	2.5m/s
Rated wind speed	10m/s	10m/s
Security wind speed	40m/s	40m/s
Net weight	20kg	21kg
Wheel Diameter	0.8	
Blade height	1.0m	
Blade number	3	
Blade material	aluminium alloy	
Generator	Three phase permanent magnet suspension motor	
Controller system	Electromagnet	
Insulation	auto up-wind	

Nota. Tomado de (<https://es.aliexpress.com/>)

De [5] se puede observar la relación de velocidad de punta TSR óptima para una turbina eólica de eje vertical con álabes tipo NACA0018 a una velocidad de viento de 10m/s, Figura 38.

Figura 47

TSR óptimo



Nota. Tomado de *The Desing and Testing of Airfoils for Application in Small Vertical Axis Wind Turbines*. pg 8.

A pesar de que se está trabajando con álabes tipo DUW200 esta es una buena aproximación del TSR óptimo a usar ya que las condiciones de viento son cercanas a las que se tienen, por lo tanto, se define TSR igual a 3. Sabiendo que el TSR se define como ecuación 23, se despeja la velocidad angular del rotor.

$$\lambda = \frac{\Omega R}{U} \tag{23}$$

Debido a la complejidad de la ecuación xx se hace uso del programa Matlab para resolverla y obtener los resultados de las potencias validando al mismo tiempo el código a usado.

7.2.Potencias Eólicas Estimadas en las Tres Zonas

A continuación, se presentan los resultados de las potencias generadas por la turbina en Watts por cada vuelta del rotor para las tres localidades estudiadas y los dos modelos construidos.

Tabla 8

Potencias

	DU06W200_Lc=100[mm]			DU06W200_Lc=200[mm]			NACA0018_Lc=250[mm]
	10,75[m/s]	14,75[m/s]	17,25[m/s]	5,37[m/s]	7,37[m/s]	8,62[m/s]	10[m/s]
Potencia [W]	-86,1	-53,4	101,3	-67,8	-59	-47	414
Cp	-0,15	-0,03	0,04	-0,92	-0,31	-0,15	0,48

Para la validación del código, se usaron los mismos resultados experimentales de C_l y C_d de [1] que anteriormente se usaron para validar la calibración de los sensores del túnel de viento.

Se observa en la *tabla 13* que el código propuesto da el resultado del coeficiente de potencia esperado para la prueba con la que se hace la comparación (Figura 38), además que el valor calculado de potencia generada por unidad de vuelta se encuentra dentro de los rangos esperados de lo que esperaría en una turbina con estas características.

8. Conclusiones

- Se logró definir las condiciones de operación del túnel de viento con la velocidad promedio anual de las tres zonas estudiadas.
- Se evaluaron los coeficientes de arrastre y sustentación para las diferentes velocidades con los dos modelos construidos, dando como resultado que el modelo de 100 milímetros de cuerda ofrece una mejor calidad en las tendencias de las gráficas debido a la reducción significativa que hay en los efectos producidos por el bloqueo de la cámara de ensayos.
- Es posible caracterizar y construir parcialmente la capa límite sobre los modelos, con el método utilizado, obteniendo una aproximación cercana a lo que teóricamente se esperaba.
- El código propuesto para estimar el cálculo de la potencia generada por la turbina se valida satisfactoriamente con datos experimentales de la literatura, obteniendo valores de coeficiente de potencia y potencia generada dentro de los rangos esperados.
- Las potencias y coeficientes estimados para las tres localidades muestran valores negativos. Esta tendencia se debe a que, en todas las pruebas realizadas, el coeficiente de arrastre superó al coeficiente de sustentación dando a entender que los sensores con los que está equipado el túnel de viento requieren ajustes y calibraciones adicionales para entregar valores coherentes con investigaciones de este tipo.

9. Recomendaciones

- Para futuros proyectos ejecutados en este banco de pruebas, se recomienda cambiar los sensores de fuerza, ya que tienen diferente sensibilidad, haciendo que el proceso de calibración se vuelva tedioso y extenso.
- Se recomienda usar túneles de mayores dimensiones y capacidades si se requiere obtener resultados más precisos.

Referencias Bibliográficas

- [1] *Two-dimensional low-Reynolds number wind tunnel results for airfoil NACA 0018* (32.^a ed., pp. 525–527). (2008). (32.^a ed.). WIND ENGINEERING. WIND ENGINEERING.
- [2] *LOW- SPEED WIND TUNNEL TESTING* (3.^a ed.). (1999). (3.^a ed.). Toronto: JHON WILEY & SONS,INC. Toronto: JHON WILEY & SONS,INC.
- [3] *Mecánica de fluidos fundamentos y aplicaciones* (4.^a ed.). (2018). (4.^a ed.). Ciudad de México : Mc Graw Hill. Ciudad de México : Mc Graw Hill.
- [4] García, L. F. (2019). *Chicamocha Canyon wind energy potential and VAWT airfoil selection through CFD modeling* (94.^a ed., pp. 56–66). Medellin, Colombia: Redin. Medellin, Colombia: Redin.
- [5] *The Desing and Testing of Airfoils for Application in Small Vertical Axis Wind Turbines* (1.^a ed., pp. 56–66). (2006). (1.^a ed.). Master of Science Thesis. Master of Science Thesis.
- [6] *Wind Energy Explained, Theory, Desing and Application* (2.^a ed.). (2009). (2.^a ed.). Wiley. Wiley.
- [7] *Blockage corrections for wind tunnel tets conduted on a Darrieus wind turbine* (2.^a ed., pp. 229–239). (2018). (2.^a ed.). South Korea: ELSEVIER. South Korea: ELSEVIER.
- [8] Tena, F. A. (2015, 1 junio). *Aplicaciones de la dinámica de fluidos computacional a la neumología / Archivos de Bronconeumología*,
- [9] Manwell, J. F., MCGOMAN, J.G., & ROGERS, A. L. (2009). *Wind energy explained* (2a. ed.-.). USA.: Wiley.
- [10] Silva, W. L. (2021). Optimización del coeficiente de potencia aerodinámico en turbinas eólicas a partir de la relación sustentación arrastre calculados en un túnel de viento subsónico. Tesis de grado. Universidad nacional de Trujillo, Trujillo, Perú.
- [11] Selig, M. S., and McGranahan, B. D. (November 18, 2004). Wind Tunnel Aerodynamic Tests of Six Airfoils for Use on Small Wind Turbines. ASME. J. Sol. Energy Eng. November 2004; 126(4): 986–1001

[12] García, L. F. (2014). *Análisis aerodinámico del perfil de los álabes de una turbina eólica de eje vertical mediante simulación en 2D usando CFD*. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

[13] Van Treuren, K. W. (September 1, 2015). *Small-Scale Wind Turbine Testing in Wind Tunnels Under Low Reynolds Number Conditions*. ASME. J. Energy Resour. Technol. September 2015

[14]]. Sutrisno, Iswahyudi, S., & Wibowo, S. (2018). Dimensional Analysis of Power Prediction of a Real-Scale Wind Turbine Based on Wind-Tunnel Torque Measurement of Small-Scaled Models. *Energies*, 11(9), 2374

Apéndices**Apéndice A DU06W200_Lc=100mm_V=10,75m/s_Cl vs Ang**

% Datos de entrada

Omega = 80.625;

R = 0.4;

H = 1;

B = 3;

C = 0.1;

Rho = 1.192;

a = 0.2;

U = 10.75;

% Definición de la variable simbólica x

syms x;

% Cálculo de Alfa

Alfa = atan((U*(1-a)*cos(x))/(Omega*R+U*(1-a)*sin(x)));

% Cálculo de Ur

Ur = (Omega*R + (1-a)*U*sin(x))^2 + ((1-a)*U*cos(x))^2;

% Cálculo de Cl y Cd

Cl = -0.00000003*(Alfa)^5 + 0.000003*(Alfa)^4 - 0.00008*(Alfa)^3 + 0.0008*(Alfa)^2 -
0.0007*Alfa + 0.0022;

Cd = 0.0004*(Alfa)^2 - 0.0032*Alfa + 0.0136;

% Cálculo de la integral

```
P = Omega*R*H*(B*C/(2*pi))*0.5*Rho*double(int(Ur*(Cl*sin(Alfa)-Cd*cos(Alfa)), x, 0, 2*pi));
```

```
% Cálculo del coeficiente de potencia
```

```
Cp = P/(0.5*Rho*2*R*H*U^3)
```

```
% Mostrar el resultado
```

```
disp(['La potencia calculada es: ' num2str(P)]);
```

Apéndice B DU06W200_Lc=100mm_V=14,75m/s_Cl vs Ang

```
% Datos de entrada
```

```
Omega = 110.625;
```

```
R = 0.4;
```

```
H = 1;
```

```
B = 3;
```

```
C = 0.1;
```

```
Rho = 1.192;
```

```
a = 0.2;
```

```
U = 14.75;
```

```
% Definición de la variable simbólica x
```

```
syms x;
```

```
% Cálculo de Alfa
```

```
Alfa = atan((U*(1-a)*cos(x))/(Omega*R+U*(1-a)*sin(x)));
```

```
% Cálculo de Ur
```

$$U_r = (\Omega \cdot R + (1-a) \cdot U \cdot \sin(x))^2 + ((1-a) \cdot U \cdot \cos(x))^2;$$

% Cálculo de Cl y Cd

$$C_l = 0.0000003 \cdot (\text{Alfa})^4 - 0.00001 \cdot (\text{Alfa})^3 + 0.0002 \cdot (\text{Alfa})^2 + 0.0011 \cdot \text{Alfa} + 0.0011;$$

$$C_d = 0.0003 \cdot (\text{Alfa})^2 - 0.0021 \cdot \text{Alfa} + 0.0033;$$

% Cálculo de la integral

$$P = \Omega \cdot R \cdot H \cdot (B \cdot C / (2 \cdot \pi)) \cdot 0.5 \cdot \rho \cdot \text{double}(\text{int}(U_r \cdot (C_l \cdot \sin(\text{Alfa}) - C_d \cdot \cos(\text{Alfa})), x, 0, 2 \cdot \pi));$$

% Cálculo del coeficiente de potencia

$$C_p = P / (0.5 \cdot \rho \cdot 2 \cdot R \cdot H \cdot U^3)$$

% Mostrar el resultado

$$\text{disp}(['La potencia calculada es: ' \text{num2str}(P)]);$$

Apéndice C 1. DU06W200_Lc=100mm_V=17,25m/s_Cl vs Ang

% Datos de entrada

$$\Omega = 133.125;$$

$$R = 0.4;$$

$$H = 1;$$

$$B = 3;$$

$$C = 0.1;$$

$$\rho = 1.192;$$

$$a = 0.2;$$

$$U = 17.75;$$

% Definición de la variable simbólica x

```
syms x;
```

```
% Cálculo de Alfa
```

```
Alfa = atan((U*(1-a)*cos(x))/(Omega*R+U*(1-a)*sin(x)));
```

```
% Cálculo de Ur
```

```
Ur = (Omega*R + (1-a)*U*sin(x))^2 + ((1-a)*U*cos(x))^2;
```

```
% Cálculo de Cl y Cd
```

```
Cl = -0.00007*(Alfa)^2 + 0.003*(Alfa) - 0.0046;
```

```
Cd = 0.0000002*(Alfa)^5 - 0.00002*(Alfa)^4 + 0.0005*(Alfa)^3 - 0.0048*(Alfa)^2 +  
0.0147*(Alfa) - 0.0033;
```

```
% Cálculo de la integral
```

```
P = Omega*R*H*(B*C/(2*pi))*0.5*Rho*double(int(Ur*(Cl*sin(Alfa)-Cd*cos(Alfa)), x, 0,  
2*pi));
```

```
% Cálculo del coeficiente de potencia
```

```
Cp = P/(0.5*Rho*2*R*H*U^3)
```

```
% Mostrar el resultado
```

```
disp(['La potencia calculada es: ' num2str(P)]);
```

Apéndice D 1. DU06W200_Lc=200mm_V=5,37m/s_Cl vs Ang

```
% Datos de entrada
```

```
Omega = 40.275;
```

```
R = 0.4;
```

$$H = 1;$$

$$B = 3;$$

$$C = 0.2;$$

$$\text{Rho} = 1.192;$$

$$a = 0.2;$$

$$U = 5.37;$$

% Definición de la variable simbólica x

syms x;

% Cálculo de Alfa

$$\text{Alfa} = \text{atan}((U*(1-a)*\cos(x))/(\text{Omega}*R+U*(1-a)*\sin(x)));$$

% Cálculo de Ur

$$U_r = (\text{Omega}*R + (1-a)*U*\sin(x))^2 + ((1-a)*U*\cos(x))^2;$$

% Cálculo de Cl y Cd

$$C_l = 0.00002*(\text{Alfa})^3 - 0.0012*(\text{Alfa})^2 + 0.0223*(\text{Alfa}) + 0.0248;$$

$$C_d = 0.00009*(\text{Alfa})^2 + 0.008*(\text{Alfa}) + 0.0438;$$

% Cálculo de la integral

$$P = \text{Omega}*R*H*(B*C/(2*\pi))^2*0.5*\text{Rho}*double(\text{int}(U_r*(C_l*\sin(\text{Alfa})-C_d*\cos(\text{Alfa})), x, 0, 2*\pi));$$

% Cálculo del coeficiente de potencia

$$C_p = P/(0.5*\text{Rho}*2*R*H*U^3)$$

% Mostrar el resultado

disp(['La potencia calculada es: ' num2str(P)]);

Apéndice E DU06W200_Lc=200mm_V=8,62m/s_Cl vs Ang

% Datos de entrada

Omega = 64.65;

R = 0.4;

H = 1;

B = 3;

C = 0.2;

Rho = 1.192;

a = 0.2;

U = 8.62;

% Definición de la variable simbólica x

syms x;

% Cálculo de Alfa

Alfa = atan((U*(1-a)*cos(x))/(Omega*R+U*(1-a)*sin(x)));

% Cálculo de Ur

Ur = (Omega*R + (1-a)*U*sin(x))^2 + ((1-a)*U*cos(x))^2;

% Cálculo de Cl y Cd

Cl = -0.00005*(Alfa)^2 + 0.0026*(Alfa) + 0.0078;

Cd = 0.0001*(Alfa)^2 + 0.0032*(Alfa) + 0.0073;

% Cálculo de la integral

```
P = Omega*R*H*(B*C/(2*pi))*0.5*Rho*double(int(Ur*(Cl*sin(Alfa)-Cd*cos(Alfa)), x, 0, 2*pi));
```

```
% Cálculo del coeficiente de potencia
```

```
Cp = P/(0.5*Rho*2*R*H*U^3)
```

```
% Mostrar el resultado
```

```
disp(['La potencia calculada es: ' num2str(P)]);
```

1. Perfiles de modelos $L_c=100$ mm y $L_c= 200$ mm

100	.003	mm0	.033	mm0mm
99	.5071	mm0	.0991	mm0mm
98	.8745	mm0	.179	mm0mm
98	.0844	mm0	.2821	mm0mm
97	.1354	mm0	.4134	mm0mm
96	.0703	mm0	.5676	mm0mm
94	.9361	mm0	.738	mm0mm
93	.7673	mm0	.9188	mm0mm
92	.5781	mm1	.1064	mm0mm
91	.3799	mm1	.2967	mm0mm
90	.1782	mm1	.4892	mm0mm
88	.9754	mm1	.6828	mm0mm
87	.7727	mm1	.8779	mm0mm
86	.5704	mm2	.0741	mm0mm
85	.3697	mm2	.2719	mm0mm
84	.1679	mm2	.4714	mm0mm
82	.9686	mm2	.6717	mm0mm
81	.774	mm2	.8741	mm0mm
80	.5771	mm3	.0796	mm0mm
79	.3799	mm3	.2857	mm0mm
78	.1854	mm3	.4939	mm0mm
76	.9889	mm3	.7053	mm0mm
75	.7924	mm3	.918	mm0mm
74	.6007	mm4	.1327	mm0mm
73	.4077	mm4	.3511	mm0mm
72	.2128	mm4	.5716	mm0mm
71	.0225	mm4	.7936	mm0mm
69	.8325	mm5	.0176	mm0mm
68	.6453	mm5	.2417	mm0mm
67	.4589	mm5	.4685	mm0mm
66	.2687	mm5	.6949	mm0mm
65	.0773	mm5	.9221	mm0mm
63	.8859	mm6	.148	mm0mm
62	.6934	mm6	.3716	mm0mm
61	.5006	mm6	.5934	mm0mm
60	.3147	mm6	.8109	mm0mm
59	.1292	mm7	.0229	mm0mm
57	.943	mm7	.2307	mm0mm
56	.7547	mm7	.4343	mm0mm
55	.5676	mm7	.6339	mm0mm

200.006	0.066	0
199.0142	0.1982	0
197.749	0.358	0
196.1688	0.5642	0
194.2708	0.8268	0
192.1406	1.1352	0
189.8722	1.476	0
187.5346	1.8376	0
185.1562	2.2128	0
182.7598	2.5934	0
180.3564	2.9784	0
177.9508	3.3656	0
175.5454	3.7558	0
173.1408	4.1482	0
170.7394	4.5438	0
168.3358	4.9428	0
165.9372	5.3434	0
163.548	5.7482	0
161.1542	6.1592	0
158.7598	6.5714	0
156.3708	6.9878	0
153.9778	7.4106	0
151.5848	7.836	0
149.2014	8.2654	0
146.8154	8.7022	0
144.4256	9.1432	0
142.045	9.5872	0
139.665	10.0352	0
137.2906	10.4834	0
134.9178	10.937	0
132.5374	11.3898	0
130.1546	11.8442	0
127.7718	12.296	0
125.3868	12.7432	0
123.0012	13.1868	0
120.6294	13.6218	0
118.2584	14.0458	0
115.886	14.4614	0
113.5094	14.8686	0
111.1352	15.2678	0