

Modelado, Simulación y Análisis del Comportamiento Mecánico del Álabes de un
Aerogenerador de Eje Vertical en el Cañón del Chicamocha en Santander.

Nixon Duwan Bayona Amado

Proyecto de grado para optar por el título de ingeniero mecánico

Director

Jorge Luis Chacón Velasco

PhD en Ingeniería Mecánica

Co-director

Juan Diego Rosero Ariza

Ingeniero Mecánico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físico Mecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

Dedico este proyecto de grado a mi familia en especial a mi madre María Lina Rosa Amado Gómez y mi padre Jorge Nixon Bayona Albarracín, por su apoyo a lo largo de mi formación académica, por creer en mí y apoyar mi decisión de estudiar.

Dedicatoria especial a mi hermana Lina Gisell Bayona Amado, quien fue pionera en sembrar las bases de mi educación para saber que estudiar, dando el ejemplo de la responsabilidad en la ingeniería.

Dedicatoria especial a mi hermano Jorge Andrés Bayona Amado, por enseñarme a ser fuerte en momentos de dificultad, por creer en mí y ayudarme a luchar por mis sueños.

Nixon Duwan Bayona Amado

Agradecimiento

Doy gracias a Dios por darme la fortaleza y sabiduría para superar los retos y desafíos que se presentaron a lo largo de este camino y que me ayudaron a ser el profesional que soy.

Agradezco a mi madre María Lina Rosa Amado Gómez por ser el motor de esfuerzo y dedicación para terminar este proyecto de grado, ya que gracias a su apoyo en todos los ámbitos que ofrece una madre fue de vital importancia para culminar esta meta, gracias madre por ser valiente, invencible y siempre luchar por tu hijo.

Al PhD. Jorge Luis Chacón Velasco, por su orientación a lo largo de este proyecto, junto con el laboratorio sistemas de conversión de energía SICE de la Universidad Industrial de Santander ubicada en la sede Guatiguará por su gran cooperación y también por sus servicios brindados.

A mis amigos por su voz de aliento y enseñanza en momentos de dificultad, por el acompañamiento en el camino del aprendizaje y compartir esta experiencia de estudiar, infinitas gracias.

Nixon Duwan Bayona Amado

Tabla de Contenido

Introducción	12
1. Objetivos.	14
1.1 Objetivo General.	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2. Justificación.	15
3. Marco Teórico.....	16
3.1 Antecedentes de investigación o estado del arte.	19
3.1.1 Antecedentes a nivel nacional.....	19
3.1.2 Antecedentes a nivel nacional en materiales.	22
3.1.3 Antecedentes a Nivel Internacional.	26
3.1.3.1 Antecedentes a nivel internacional en ingeniería.....	28
3.1.3.2 Antecedentes a nivel internacional en materiales	32
3.2 Referentes Teóricos.	34
3.2.1 Energía Aprovechada del viento	34
3.2.1.2 Función de una Turbina eólica.....	35
3.2.1.3 La potencia de una masa de aire en movimiento.	35
3.2.2.1 Rotor ideal límite de Betz.	36
3.2.3 Tipos de aerogeneradores.	37
3.3 Densidad de Energía eólica.....	40
4. Diseño Metodológico.....	41
4.1 Población de estudio.	41

5. Despliegue de Función de Calidad (QFD) y Determinación del Material. Para este Proceso se da uso al Despliegue de Función de Calidad (QFD).....	43
6. Diseño (Fase de desarrollo)	45
6.1 Modelado de Perfil Aerodinámico.....	54
7. Simulación del álabes Aerodinámico	59
8. Conclusiones.....	71
Bibliografía	73
Apéndices.....	77

Lista de Figuras

Figura 1, Velocidad Media del Viento, UPME.....	17
Figura 2, Perfil NACA0018 Y Perfil DU06W200.....	20
Figura 3, Comparación vectores de velocidad entre perfiles	21
Figura 4, Refuerzo estructural en forma de "T"	23
Figura 5, Fractura a tracción de probeta palma de lata.	25
Figura 6, Nuevas instalaciones eólicas a nivel mundial 2021.	26
Figura 7, Nuevas instalaciones Onshore y Offshore en los últimos años.....	27
Figura 8, Mecanismo paso variable y ensamble de mecanismo.	29
Figura 9, Perfil de velocidades mecanismo paso variable.	30
Figura 10, Ensayo túnel de viento del álabe.	31
Figura 11, Clasificación de fibras naturales.....	32
Figura 12, Ciclo del viento.....	34
Figura 13, Flujo transversal.	35
Figura 14, Relación de velocidades del viento.	37
Figura 15, Clasificación máquinas eólicas.....	38
Figura 16, Cañón del Chicamocha.....	41
Figura 17, Influencia zonas montañosas al aire.	42
Figura 18, Despliegue matriz de calidad.....	43
Figura 19, Material Isotrópico y ortotrópico.....	45
Figura 20, Área de barrido aerogenerador de eje vertical.....	48
Figura 21, Diagrama de C_p Vs TSR.	50
Figura 22, Diagrama C_p Vs TSR con parámetro BAR.....	52

Figura 23, Diagrama influencia del parámetro BAR con la Cuerda.....	53
Figura 24, Perfil aerodinámico DU06W200.....	55
Figura 25, Modelado CAD perfil aerodinámico DU06W200.	56
Figura 26, Dominio JOUKOWSKI.....	57
Figura 27, Dominio JOUKOWSKI para el perfil DU06W200 en Ansys.....	58
Figura 28, Definición de superficies en el programa Ansys.....	59
Figura 29, Creación de malla.	60
Figura 30, detalle de borde de ataque.	61
Figura 31, Perfil de velocidades con ángulo de ataque 10°.	63
Figura 32, Perfil de presiones ángulo de ataque 10°.....	63
Figura 33, Contorno de Presiones.....	64
Figura 34, Geometría Módulo B.....	65
Figura 35, Simulación workbench Fluid Flow y Static Structural en Ansys.....	65
Figura 36, Análisis estructural Ansys.	66
Figura 37, Malla de estructural.....	67
Figura 38, Deformación estructural del álabe.....	68
Figura 39, Esfuerzo Equivalente de Von Mises.....	69
Figura 40, Esfuerzo cortante.	69
Figura 41, Deformación unitaria [mm/mm].....	70

Lista de Tablas

Tabla 1, Monitoreo de velocidad media anual del viento.....	18
Tabla 2, Valores de deformación unitaria con refuerzo y sin refuerzo.....	24
Tabla 3, Clases de potencial eólico.....	40
Tabla 4, Propiedades Nylon X.....	44
Tabla 5, Eficiencia de aerogeneradores	46
Tabla 6, Elementos y nodos de la matriz.	62

Lista de Apéndices

Apéndice A, Coordenadas del perfil aerodinámico DU06W200.....	77
Apéndice B, Prototipo impreso en 3D del perfil DU06W200	78
Apéndice C, Coeficientes de arrastre y levantamiento	80
Apéndice D, Ficha técnica de material a imprimir	83
Apéndice E, Características de dimensiones del aerogenerador vertical.....	84

Resumen

Título: Modelado, Simulación y Análisis del Comportamiento Mecánico del Álabes de un Aerogenerador de Eje Vertical en el Cañón del Chicamocha en Santander. *

Autor: Nixon Duwan Bayona Amado. **

Palabras Clave: Energía renovable, Energía eólica, aerogenerador Darrieus, modelado, simulación.

Descripción:

En las últimas décadas, el interés por el aprovechamiento energético y el uso correcto de recursos de forma limpia y amigable con el medio ambiente ha aumentado, esto debido al incremento de demanda energética a nivel mundial, lo cual ha implementado la búsqueda del desarrollo de máquinas captadoras de energía con mejores características de diseño, para esto es necesario el estudio de diversos materiales de fácil reciclaje y bajo impacto ambiental que posean las características necesarias para la aplicación en el lugar de estudio. Actualmente los aerogeneradores de eje vertical Darrieus tipo H, utilizan materiales sintéticos o compuestos para la fabricación de sus álabes los cuales generan residuos sólidos de difícil disposición al final de su ciclo de vida. En esta investigación, como solución se plantea el uso de un material compuesto de fácil reciclaje llamado nylon X, el cual es un polímero termoplástico perteneciente a la familia de las poliamidas reforzado con filamentos de fibra de carbono el cual al perder sus propiedades se puede reutilizar para la fabricación de los mismos álabes. Utilizando el método de elementos finitos se realizó un análisis CDF, con el perfil aerodinámico DU06W200, el cual según las referencias consultadas presenta mejor rendimiento en el lugar de estudio seleccionado, para ello, se realizó el modelado de un álabes de estos aerogeneradores, simulando en las condiciones específicas del cañón del Chicamocha. Como resultados se observa que las deformaciones totales con el material propuesto en las condiciones de estudio son pequeñas y que el material Nylon X junto con el diseño, presenta buenas condiciones de resistencia estructural para el uso de generación de energía eólica de baja potencia en el cañón del Chicamocha en Santander.

* Trabajo de grado

**Facultad de Ingeniería Físico mecánicas. Escuela de Ingeniería mecánica. Director: Jorge Chacón, PhD. Codirector: Juan Rosero, Ing Mecánico.

Abstract

Title: Modeling, Simulation and Analysis of the Mechanical Behavior of the Blade of a Vertical Axis Wind Turbine in the Chicamocha Canyon in Santander. *

Author: Nixon Duwan Bayona Amado **

Key Words: Renewable energy, Wind energy, Darrieus wind turbine, Easy recyclable material, modeling, Simulation.

Description:

In recent decades, the interest in energy harnessing and the correct use of resources in a clean and environmentally friendly way has expanded due to the global increase in energy demand. This has led to the search for the development of energy capturing machines with better design characteristics. To achieve this, it is necessary to study several materials that are easy to recycle and have low environmental impact, possessing the necessary characteristics for application in the study area. Currently, H-type Darrieus vertical axis wind turbines use synthetic or composite materials for the manufacture of their blades, which generate solid waste that is difficult to dispose of at the end of their life cycle. In this research, the use of an easily recyclable composite material called Nylon X was proposed as a solution. Nylon X is a thermoplastic polymer belonging to the family of reinforced polyamides with carbon fiber filaments. When it loses its properties, it can be reused for the manufacture of the same blades. Using the finite element method, a CDF analysis was performed with the DU06W200 aerodynamic profile, which according to consulted references, presents better performance in the selected study area. To do this, a blade of these wind turbines was modeled, simulating under the specific conditions of the Chicamocha Canyon. The results showed that the total deformations with the proposed material under the study conditions were minimal and that Nylon X material along with the design presents good conditions of structural resistance for the use of low-power wind energy generation in the Chicamocha Canyon in Santander.

* Degree Work

**Faculty of Physical-mechanical Engineering. Mechanical Engineering School. Director: Jorge Chacón, Phd in mechanical engineering. Codirector: Juan Rosero, Mechanical Engineer.

Introducción

Colombia es un país extraordinariamente rico en recursos energéticos, con un amplio predominio de la hidroelectricidad en su aprovechamiento. “La matriz energética actual ha permitido que la demanda de electricidad del país haya podido atenderse en el pasado reciente, utilizando un 70% de generación basada en hidroelectricidad y el 30% restante distribuido en otras fuentes como el gas natural y el carbón principalmente” (Acolgen,2021). Lo cual hace que la mayor parte de la matriz energética del país sea susceptible a cambios climáticos ya sean provenientes de fenómenos climáticos globales o locales, los cuales se evidencian en efectos directos sobre las zonas ambientalmente sensibles como lo son nevados y glaciales.

Dentro del contexto global hay una constante demanda de energía con la necesidad de ser ampliada, para ello se cuenta con diferentes fuentes energéticas tales como el carbón, petróleo y fuentes hídricas, sin embargo, dado al efecto climático ha surgido la necesidad de nuevos medios energéticos, como la utilización de energía eólica.

La energía eólica está tomando un mayor crecimiento en Colombia debido a la inauguración del parque eólico Guajira 1, “El Parque eólico más grande del país, Guajira 1. El cual espera tener una generación equivalente a 20MW(Megavatios).” (URREGO, 2022) Este permitirá abastecer de energía eléctrica alrededor de 33.295 familias , lo cual muestra la necesidad del desarrollo tecnológico de esta tecnología desde diferentes campos, para esto se va desarrollar una simulación estructural de uno de los álabes de un aerogenerador vertical para tener una mayor claridad sobre los posibles materiales que pueden servir para la construcción de estos.

La implementación de aerogeneradores verticales en territorios donde la conexión a la red eléctrica es de difícil acceso, permite una solución para suplir las demandas energéticas de un territorio. Pero a su vez genera una problemática de contaminación, debido que, al finalizar el ciclo de vida de los álabes de un aerogenerador vertical, estos son desechados convirtiéndose en contaminantes del medio ambiente ya que no son fabricados con materiales de fácil reciclaje o biodegradables. Para el desarrollo de este trabajo se utilizará un software de simulación (ANSYS) para determinar el material que tenga un mejor funcionamiento bajo las condiciones del cañón del Chicamocha. Se realizará la simulación estructural del álabe de un aerogenerador vertical para determinar que material ya sean biodegradable o de fácil reciclaje se desempeña estructuralmente mejor. Una vez seleccionado el material con mejor funcionamiento se realizará un análisis aerodinámico del perfil para la realización de un análisis completo.

1. Objetivos.

1.1 Objetivo General.

Modelar, Simular y Analizar el comportamiento mecánico del álabe de un aerogenerador de eje vertical en el cañón del Chicamocha en Santander.

1.2 Objetivos Específicos

Identificar materiales biodegradables o de fácil reciclaje que ofrezcan mejores propiedades mecánicas, como rigidez y resistencia mediante una revisión bibliográfica para las condiciones del cañón del Chicamocha en Santander.

Analizar estructuralmente el modelado del perfil DU06W200 para los álabes de un aerogenerador de eje vertical darrieus tipo H para la producción de 1KW de energía al día, mediante una simulación utilizando la herramienta computacional ANSYS.

Analizar aerodinámicamente el perfil DU06W200 con el material seleccionado mediante una simulación utilizando la herramienta computacional ANSYS.

2. Justificación.

En la actualidad los materiales que se usan para la fabricación de los álabes de un aerogenerador de eje vertical poseen excelentes propiedades de resistencia y fatiga, los cuales son óptimos para la fabricación de estos, pero al no estar diseñadas con materiales biodegradables o de fácil reciclaje al finalizar su ciclo de vida estos álabes se convierten en contaminantes que perjudican el medio ambiente.

El aumento de demanda energética en los últimos años a nivel mundial ha hecho que las energías renovables entren a ejercer un papel fundamental para la preservación del medio ambiente. La reciente expansión de la energía eólica presenta una solución a esta problemática energética, pero a su vez genera una problemática de contaminación por sus álabes. La cual se puede solucionar encontrando un material biodegradable o de fácil reciclaje que cumpla con las propiedades mecánicas requeridas. Para esto se realizará una simulación estructural de un álabe analizando el comportamiento mecánico que presenta con el fin de seleccionar un material adecuado estructuralmente y que además permita ser re-aprovechado una vez su vida útil culmine.

El aumento de plástico en nuestros océanos, está incrementando drásticamente se calcula “Una media de 8 millones de toneladas de plásticos son vertidas al año al océano. Si no cambiamos de tendencia, en 2025 nuestros océanos tendrán 1 tonelada de plástico por cada 3 de pescado” (ECODES.ORG,2020). Lo cual muestra el problema que tiene el plástico en nuestro medio ambiente y él porque es necesario empezar a reciclarlo o reemplazarlo por otros materiales que no afecten tanto al medio ambiente.

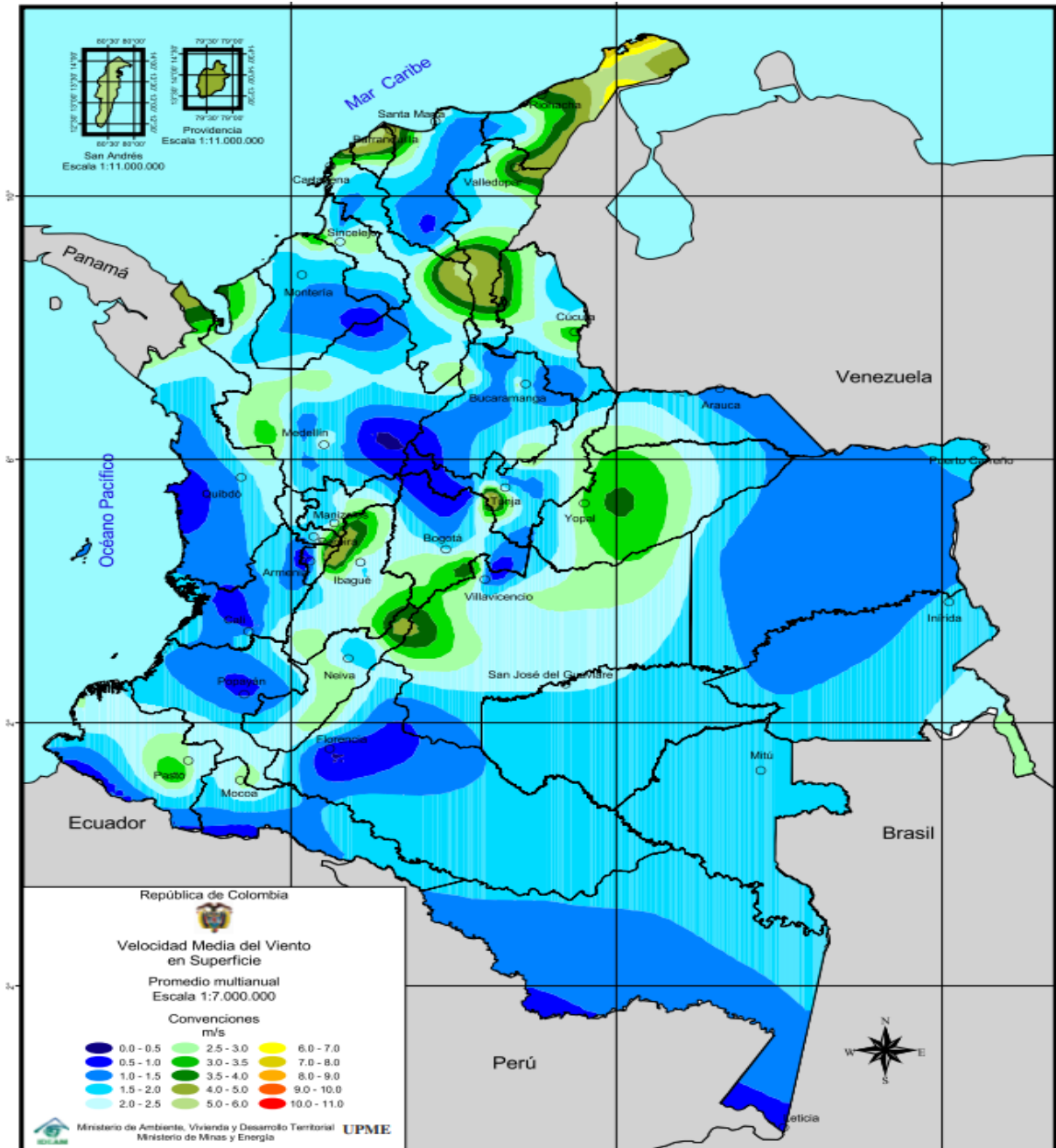
El propósito de estas simulaciones es percibir el comportamiento mecánico del álabe de un aerogenerador con diferentes materiales para seleccionar el material más viable para la construcción de estos álabes, además se desea realizar un análisis aerodinámico con el material seleccionado para determinar la aerodinámica del material a las condiciones del Cañón Del Chicamocha.

3. Marco Teórico.

Actualmente Colombia cuenta solo con dos parques eólicos Serafín 1 y Guajira I a lo largo de su territorio (SEMANA, 2022), mientras presenta zonas potenciales para la creación de energía eólica de alta y baja potencia. Departamentos como Atlántico, Guajira, Cesar y Chocó presentan vientos favorables en el mes de enero.

Figura 1

Velocidad Media del Viento, UPME.



Nota: Tomado de Atlas de viento y Energía Eólica de Colombia. UPME.

Como se puede apreciar en el “atlas de viento y Energía Eólica” de Colombia según los datos publicados por el IDEAM, La Guajira cuenta con un gran potencial energético debido a su ubicación geográfica. lo cual la hace que sea uno de los departamentos de Colombia que más pueda hacer uso de la energía eólica.

Departamentos como Santander a pesar de no presentar vientos promedios para la producción de energía eólica a gran escala, cuenta con zonas geográficas que favorecen considerablemente las condiciones del viento para ser aprovechadas por aerogeneradores. “El Parque Nacional Cañón del Chicamocha, conocido como “PANACHI”, monitorea constantemente la velocidad del viento en el cañón para controlar la seguridad del teleférico instalado en el lugar.” (intechopen.com,2021). El monitoreo se encuentra en tres puntos específicos que son: Mesa de los Santos, Estación Río Chicamocha y Panachi.

Tabla 1

Monitoreo de velocidad media anual del viento.

LUGAR	Velocidad Promedio Anual [m/s]	Desviacion Estándar	Densidad de la Potencia eólica Promedio anual
Punta de la mesa de los Santos	5,974	0,736	306,188
Estacion Río Chicamocha	6,974	1,084	485,155
Parque Nacional del Chicamocha	7,974	0,536	86,643

Nota: adaptado de (Luis F, 2014)

La tabla 1 muestra el potencial que puede tener el parque nacional del Chicamocha conocido como “Panachi” en Santander, tanto en la parte del río como en la mesa de los Santos.

estos datos salen a partir de datos históricos desde el año 2009 hasta el 2012, suministrados por el monitoreo de vientos del cañón del Chicamocha.

3.1 Antecedentes de investigación o estado del arte.

3.1.1 Antecedentes a nivel nacional.

Debido a la geografía del territorio colombiano determinadas zonas se pueden ver altamente favorecidas para el aprovechamiento del recurso eólico, como pasa en el Cañón del Chicamocha en Santander. Donde en esta zona “el viento experimenta una aceleración de su velocidad debido a que las montañas que las rodean actúan como difusor al direccionar el viento en un espacio pequeño” (Luis Fernando García-Rodríguez, 2019). Haciendo que este tipo de lugares sirvan para la producción de energía eólica a lo largo del territorio colombiano a pequeña escala.

Estudios realizados por la Universidad Industrial de Santander, dirigida por Luis F García en el 2014, muestran mediante un análisis aerodinámico en 2D, la importancia de la correcta geometría en este tipo de análisis. Para el desarrollo de esto se realiza la comparación de dos perfiles aerodinámicos sometidos a las mismas condiciones del viento del cañón del chicamocha mediante una simulación en 2D. La simulación se realizó gracias a la recopilación de datos del recurso eólico suministrado por el Parque Nacional del Chicamocha. Donde mediante el uso de anemómetros de copas instaladas en tres puntos estratégicos se determina el lugar con mejores

condiciones para el aprovechamiento del recurso eólico. Mostrando que la zona del río del cañón del Chicamocha es la más óptima para la instalación de los aerogeneradores verticales.

Se utilizan los siguientes parámetros del flujo para llevar a cabo la simulación:

- Se toma como condición de entrada la velocidad del viento con el mayor valor promedio anual de los sitios analizados.
- El flujo del viento es estacionario.
- El ángulo de ataque del perfil es de 10° ya que a este valor se percibe la variación de los coeficientes de arrastre y de sustentación entre los perfiles.

Nota: La Ilustración muestra el perfil NACA0018 en la figura A y el perfil DU06W200 en

Nota: adaptado de (Luis F, 2014)

Figura 2

Perfil NACA0018 Y Perfil DU06W200.

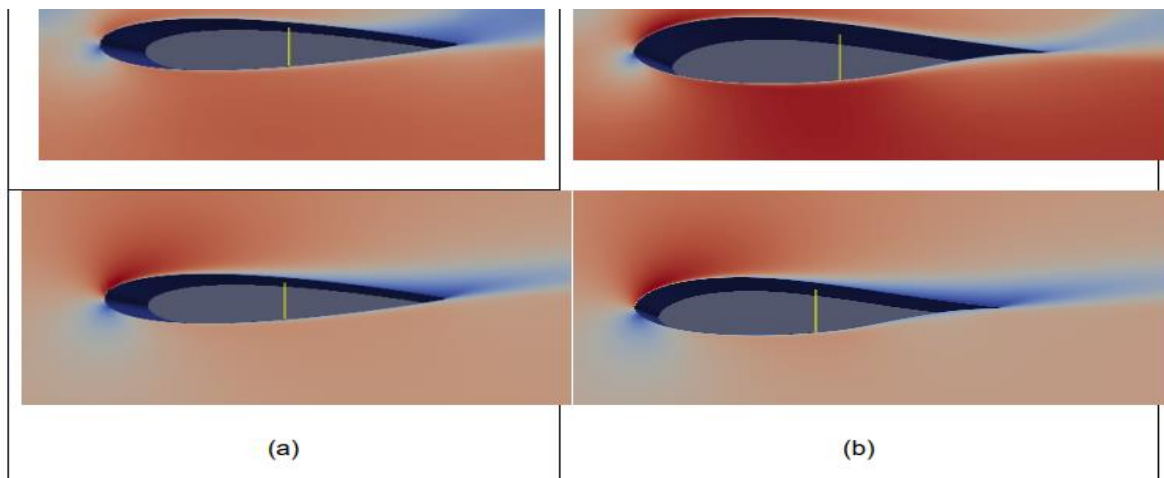
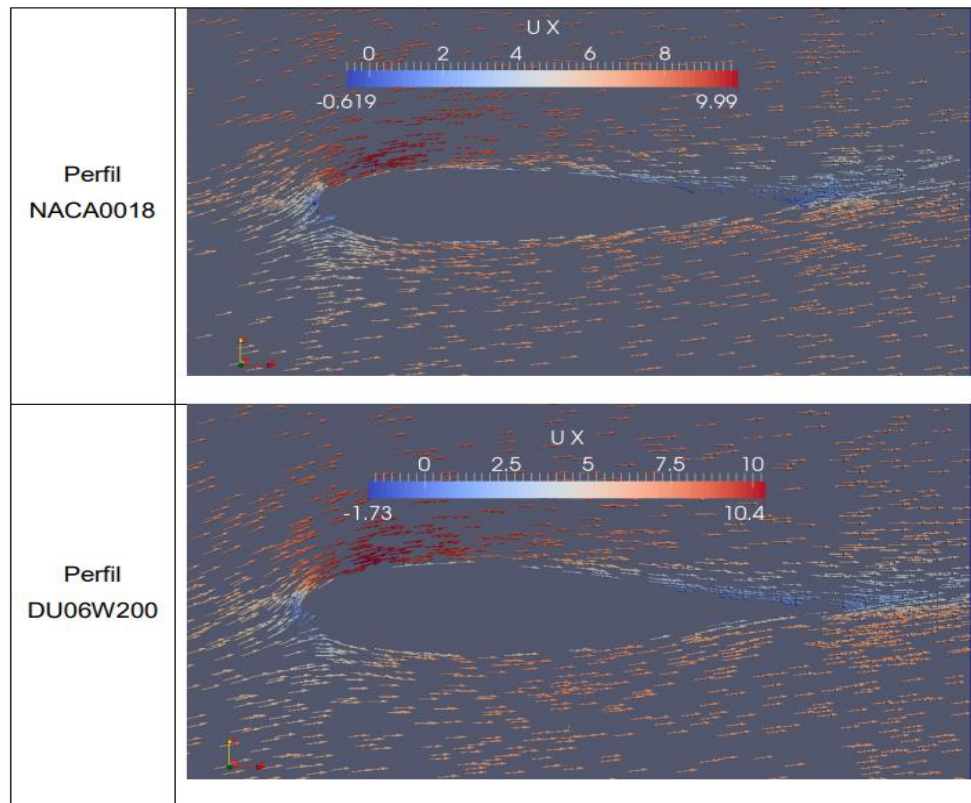


Figura 3

Comparaciones vectores de velocidad entre perfiles.



Nota: La Ilustración muestra una comparación de los vectores de velocidad entre el perfil Naca0018 y el perfil DU06W200, Para condiciones del cañón del Chicamocha , donde mediante una simulación aerodinámica de los perfiles en 2D se determina que “El perfil DU06W200 PRESENTA UNA SUSTENTACIÓN DE 20% mayor a la dada por el perfil NACA0018 Bajo una misa perdida por el arrastre en las condiciones del viento del río Chicamocha ” (Luis Fernando García-Rodríguez, 2019).

Las investigaciones actuales a nivel nacional muestran la geometría que mejor se adapta a las condiciones del cañón del Chicamocha, señalando que el perfil DU06W200 es el más indicado

para esas condiciones, lo cual permite dar paso a un análisis estructural para la selección de dichos materiales que cumplan con las propiedades mecánicas para la fabricación de estos.

Otras investigaciones realizadas por la Universidad industrial de Santander enfocadas al área de diseño y construcción de aerogeneradores verticales tipo darrieus en instalaciones residenciales. Plantean sugerencias sobre cómo “El acabado superficial de elementos como los álabes de la turbina es crucial en el rendimiento de la turbina” (Oscar R, 2020). Lo cual sugiere la importancia del estudio del material para la fabricación de estos álabes y la influencia de su acabado superficial.

Topográficas como la del cañón del Chicamocha no permiten la conexión a una red eléctrica estable por lo que se hace candidato para el uso de implementación de energías renovables como la energía eólica, según revisión de literatura actual sobre el diseño e implementación de aerogeneradores VAWT en el sitio, “Se encuentra que el gran potencial de energía eólica del cañón del chicamocha se encuentra en su río, y que el punto crítico se encuentra en uno de sus límites (mesa de los santos)” (Garcia R, 2021).Lo cual permite tener los principales parámetros de diseño para la construcción de los álabes en las condiciones del cañón del chicamocha.

3.1.2 Antecedentes a nivel nacional en materiales.

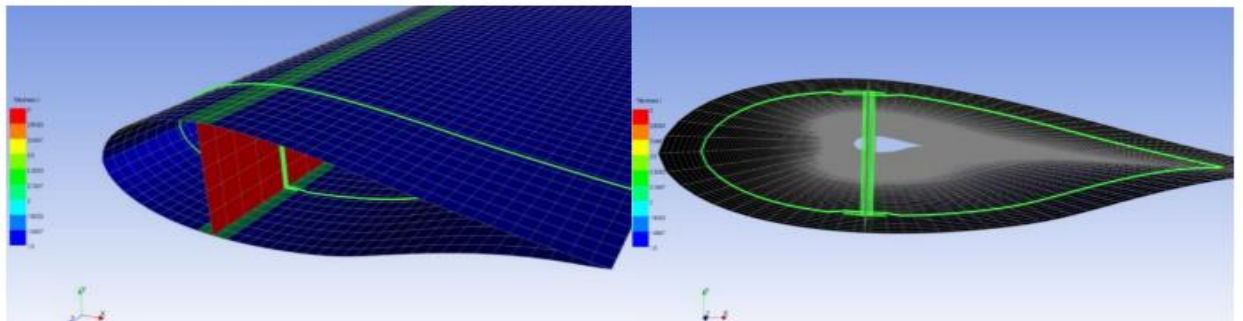
Las geometrías de los álabes verticales deben poseer una aerodinámica basada en las condiciones de operación para conseguir una mayor eficiencia y aprovechamiento de la energía eólica, para esto es importante un análisis estructural para determinar los puntos que presenten mayores esfuerzos en esta geometría, de ser necesario agregar rigidizadores internos que ayuden

a tolerar las cargas producidas por el viento y poder determinar los materiales más eficientes para la construcción de estos álabes.

Un estudio realizado por la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad Industrial De Santander, dirigida por Ivan D Ortega y Juan D, plantea el uso de refuerzo estructural en forma de “T”, el cual se sitúa a 0.4 la longitud de la cuerda. Lo cual hace que disminuya la deformación unitaria en el álabes con respecto a los álabes que no tienen el refuerzo estructural. El análisis se realizó para las condiciones del viento del cañón del Chicamocha con el perfil aerodinámico DU06W200.

Figura 4

Refuerzo estructural en forma de "T".



Nota: La ilustración muestra el refuerzo estructural en forma de “T” que se introduce al perfil aerodinámico DU06W200.

Tabla 2

Valores de deformación unitaria con refuerzo y sin refuerzo.

ÁLABE	Desplacamiento Maximo [mm]	Esfuerzo máximo [MPa]	Defromacion unitaria Máxima [mm/mm]
Sin costilla	0,1072	0,406	1,68E-05
con costilla	0,097	0,482	4,99E-06

Nota: tabla de valores de deformación unitaria de los álabes con refuerzo estructural “Con costilla” y sin el refuerzo estructural “Sin costilla”.

El estudio realizado muestra la gran ventaja de incluir el refuerzo estructural en forma de T en la estructura del perfil aerodinámico DU06W200, ayudando a mejorar la relación esfuerzos y deformación los cuales van ligados a mejorar la eficiencia de un aerogenerador vertical.

Los materiales compuestos como lo son las maderas, presentan una alternativa para sustituir los polímeros o materiales con los que actualmente se fabrican los álabes de estas turbinas, “el material natural de la palma de lata es una opción que ha dado buenos resultados ante las cargas, y con mayor desarrollo podría ser una opción viable para reemplazar los materiales sintéticos no biodegradables en este tipo de aplicaciones” (Dayal Castro, Ruben Güiza, Yessid Rueda, 2018).mostrando la viabilidad del uso de materiales biodegradables como lo es la palma de lata para la fabricación de álabes .

Figura 5

Fractura a tracción de probeta palma de lata.



Nota: Ilustración de fractura de probeta de palma de lata atracción. Tomado de Estudio del comportamiento dinámico de un material compuesto laminado elaborado a partir de la corteza de la palma de lata. Bucaramanga. Chávez, García y Pertuz, (2008).

Como se observa en el trabajo de Dayal “ las turbinas eólicas que poseen álabes flexibles presentan reducciones en su eficiencia, por lo tanto, es necesario el uso de rigidizadores internos, para que contribuyan con el refuerzo estructural reduciendo así las deformaciones en el perfil con las que estos son diseñados” (Dayal Castro, Ruben Güiza, Yessid Rueda, 2018).

Los resultados de la simulación de deformaciones en los álabes simulados (dos de palma y dos de fibra de vidrio), evidenciando el efecto positivo que dan el rizador interno en este tipo de álabes, además plantea que “El material compuesto de palma de lata, proporciona una alternativa viable como reemplazo de los compuestos sintéticos utilizados para la fabricación de álabes actualmente” (Manuel del Jesús Martínez, Juan D Castro, Iván D Ortega, 2018).este estudio

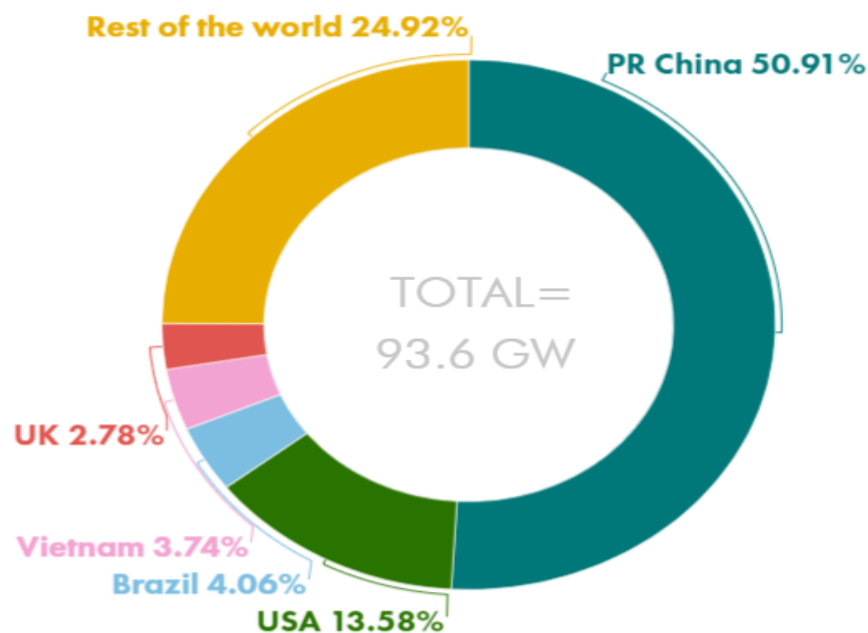
permite avanzar a la realización de un análisis aerodinámico que permita analizar los coeficientes de arrastre y levantamiento teniendo en cuenta las propiedades del material de la palma de lata.

3.1.3 Antecedentes a Nivel Internacional.

La energía eólica ha prestado un incremento de 93,6 GW en año 2021 lo cual permite elevar la capacidad eólica instalada a 837 GW a nivel mundial, mostrando un incremento del 12,4% en comparación al 2020 según cifras presentadas en el reporte de Global Wind Energy del 2021.

Figura 6

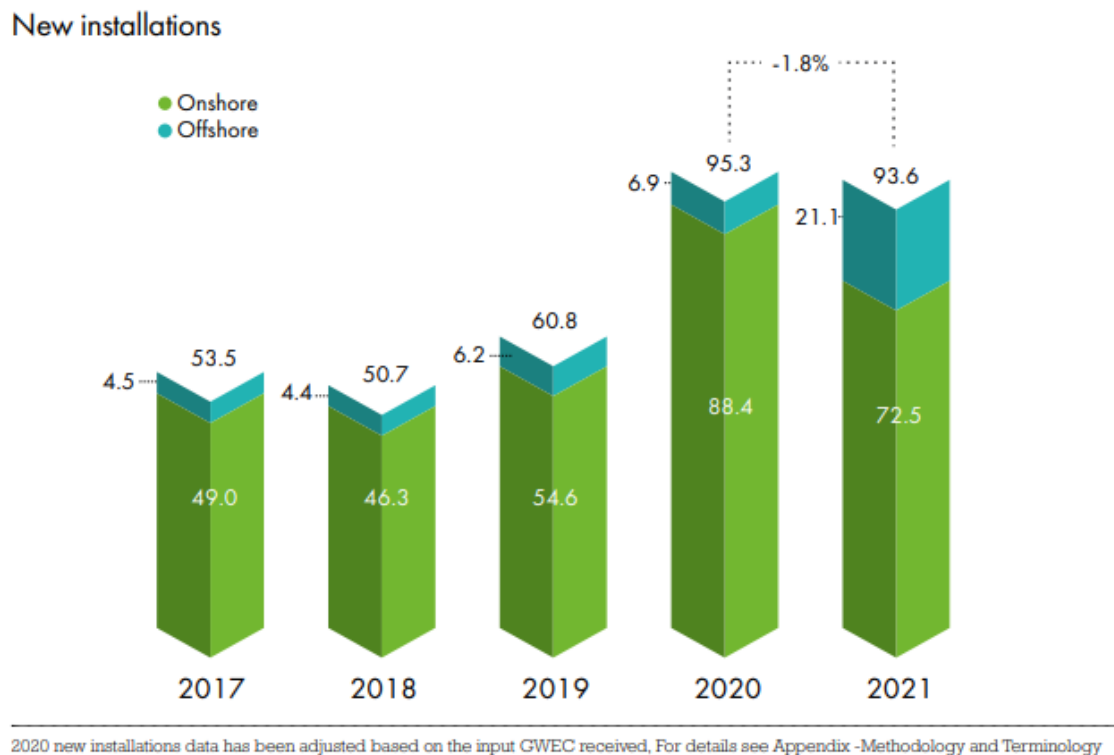
Nuevas instalaciones eólicas a nivel mundial 2021.



Nota: Los cinco principales mercados en la instalación de energía eólica son China, Reino Unido, Dinamarca, Vietnam y los Países Bajos. los cuales representan el 99.5% de las nuevas instalaciones en el 2021. Tomado de Global Wind Energy del 2021.

Figura 7

Nuevas instalaciones Onshore y Offshore en los últimos años.



Nota:El año 2021 fue el segundo año en el presentaron nuevas instalaciones de uso de energía eólica teniendo una caída de 1.8% con respecto al año 2020.pero presentó un año récord en la implementación de mercado eólico marino con más de 21GW. Tomado de Global Wind Energy del 2021.

Gracias al crecimiento de las instalaciones en China y Vietnam, Asia continúa liderando el desarrollo mundial de la energía eólica con una cuota de mercado en 2021 casi igual a la de 2020 Impulsada por un año récord de instalaciones eólicas en Europa 19 % recuperó el título del segundo mercado regional más grande para nuevas instalaciones de América del Norte. El año pasado,

América Latina y África y Medio Oriente también tuvieron un mejor año en nuevas instalaciones en 2021 con una participación de mercado global.

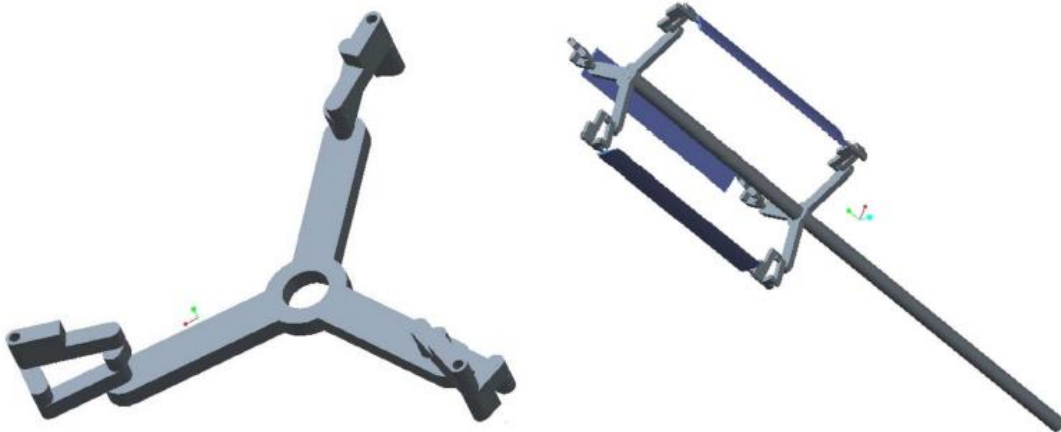
3.1.3.1 Antecedentes a nivel internacional en ingeniería.

La Asociación Internacional de Ingeniería Mecánica (ASME), mediante su revista de mecánica aplicada, presenta el trabajo investigativo “Performance Evaluation of a 1 kW Variable Pitch-Straight Blade Vertical Axis Wind Turbine” (Muhammad A. Jamal, 2020) dirigido por el departamento de ingeniería mecánica del Instituto de tecnología espacial, a cargo de Muhammad Azfar Jamal y Owaisur Rahman Shah. Donde mediante un estudio de diseño, análisis y simulación plantea la evaluación de rendimiento de un aerogenerador de paso variable para la producción de 1KW de energía comparándolo con un estudio experimental realizado en el túnel de viento.

Esta investigación se realiza para el análisis de un aerogenerador tipo (VAWT) de palas rectas de paso variable de 1 kW utilizando compuesto reforzado con fibra natural para la construcción de sus álabes. Donde se implementa el paso variable mediante la introducción de un mecanismo de paso asociado con las palas de la turbina que ayuda a la pala a maximizar la generación de par y potencia.

Figura 8

Mecanismo paso variable y ensamble de mecanismo.



Mecanismo paso variable (A)

Ensamble Mecanismo paso variable (B)

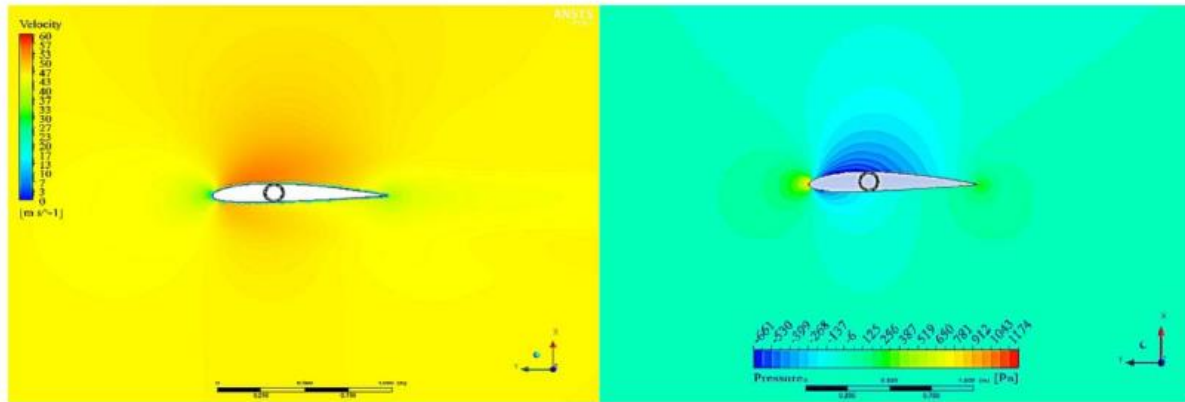
Nota: Adaptado de (Muhammad A. Jamal, 2020).

El mecanismo de paso variable se eligió para el diseño de rotor H de pala recta donde los cálculos analíticos se realizaron para el paso variable y el álabe de paso fijo, seguidos del modelado de diseño asistido por computadora del rotor que exhibe el mecanismo de paso variable.

Se realizó un análisis de dinámica de fluidos computacional del álabe en la posición de azimut de 0-360 grados. y los resultados de CFD se importaron al módulo estructural estático de ANSYS para el análisis de elementos finitos del álabe.

Figura 9

Perfil de velocidades mecanismo paso variable.



Nota: la imagen muestra el perfil de velocidades y presiones a las que se encuentra sometidas el álabes estudiada en 2D. Adaptado de (Muhammad A. Jamal, 2020).

La hoja se imprimió en 3D a escala reducida y se probó en un túnel de viento para determinar sus propiedades aerodinámicas, incluidas las fuerzas de sustentación y arrastre. Se realizó una comparación entre los valores analíticos, de software y experimentales. Además, se utilizó fibra de basalto, que es una fibra natural, como material para el álabes de la turbina y se realizó un análisis para obtener una alta relación resistencia/peso del material compuesto.

Figura 10

Ensayo túnel de viento del álabes.



Nota: las imágenes muestran el ensayo en túnel de viento para la determinación de las propiedades experimentales aerodinámicas del perfil estudiado. Adaptado de (Muhammad A. Jamal, 2020).

Los resultados experimentales mostraron una buena concordancia con los valores analíticos y numéricos. “La introducción del mecanismo de paso variable dio como resultado un aumento del en el par acumulado en comparación con el mecanismo de paso fijo que a su vez mejoró la potencia resultante en un 43.17%” (Muhammad A. Jamal, 2020). los materiales compuestos como la fibra de basalto muestran excelentes resultados para la fabricación de estos álabes debido a que presentan menos deformaciones y tensiones en su estructura. Haciéndolo un material candidato para reemplazar los polímeros con los que actualmente se fabrican este tipo de álabes.

3.1.3.2 Antecedentes a nivel internacional en materiales

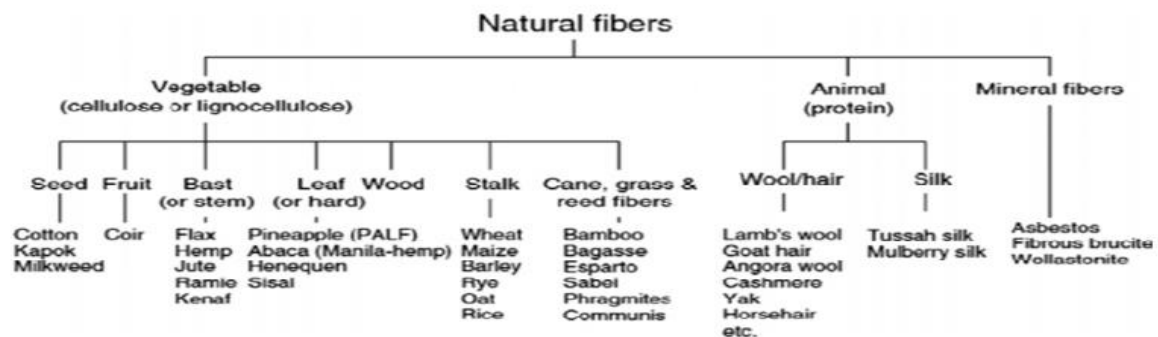
A nivel internacional la búsqueda de selección del correcto material para la fabricación de los álabes de los aerogeneradores verticales ha tomado gran incremento debido al avance en materiales nuevos y novedoso que presentan grandes propiedades mecánicas y que pueden suplir diferentes necesidades.

En la actualidad se llevan diversos estudios a nivel internacional para aumentar la eficiencia de la turbina eólica, lo cual lleva el desafío del desarrollo estructural de los álabes de las turbinas eólicas verticales, La estructura del álabes con la correcta selección de material conduce a un rendimiento aerodinámico óptimo, reduce las fuerzas de gravedad y reduce la degradación del material durante su etapa operativa, lo que lleva a un mejor ciclo de vida. “Para satisfacer esta necesidad, se desean palas eólicas avanzadas que posean una rigidez, resistencia y resistencia a la fatiga adecuadas” (Lijin Thomas, 2016).

Materiales compuestos como la fibra natural se han convertido en una gran alternativa para reforzar o reemplazar la utilización de materiales termoplásticos FRP, Existen diferentes tipos de materiales compuestos de fibra natural.

Figura 11

Clasificación de fibras naturales.



Nota: adaptado de (Lijin Thomas, 2016).

Materiales compuestos de fibra natural como el Bambú poseen un alto potencial debido a su refuerzo en fibra polimérica reforzada, “posee un 60% de celulosa con alto contenido de lignina esta propiedad característica hace de las fibras de bambú un refuerzo en diversas matrices poliméricas” (J.W. Holmes,2018). El realiza una comparación de laminado de láminas de madera y bambú con las propiedades mecánicas del laminado de láminas de vidrio y abedul, el laminado de láminas de madera y bambú exhibe una mejor resistencia, vida útil a la fatiga y resistencia a la fractura, las características estaban a la par con las del laminado de polímero reforzado con vidrio.

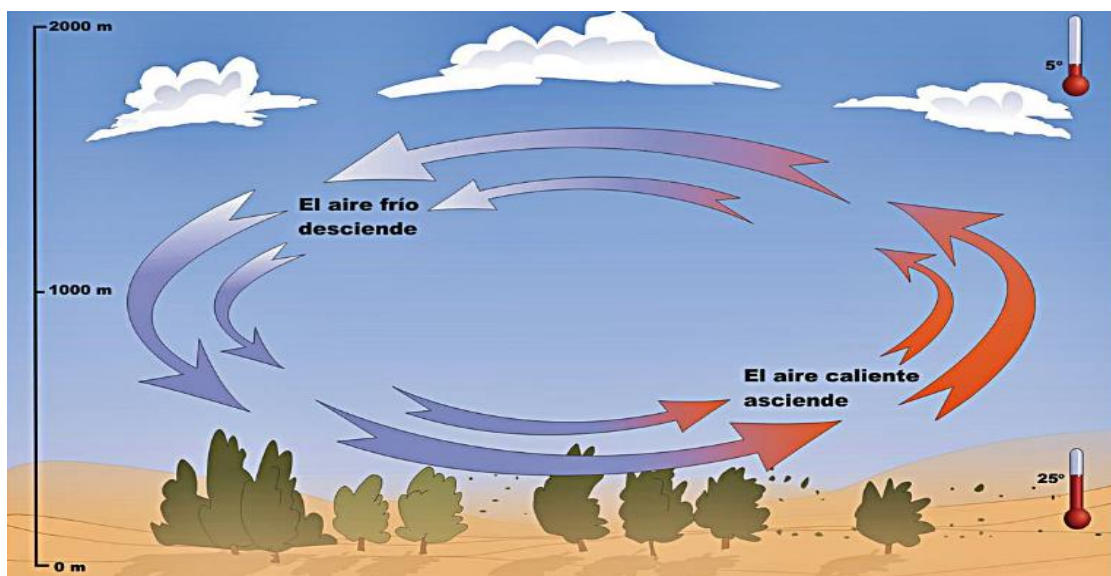
3.2 Referentes Teóricos.

3.2.1 Energía Aprovechada del viento

El viento es el movimiento del aire producto de variaciones de temperatura de aportes del sol y el calor que le trasmite la tierra al aire a través de su corteza terrestre.

Figura 12

Ciclo del viento.



Nota: la imagen ilustra el ciclo del viento, tomado de (BURGOS, 2021)

Entre el 1% y el 2% de la radiación solar que absorbe el planeta termina convertida en viento(ENDESA,2019).Debido al calor geotérmico de la tierra que se entrega por medio de su corteza gran parte de calor es entregado al aire lo cual hace que aumenta su temperatura y por ende lo haga menos denso y empieza a elevarse, a medida que se eleva el aire va perdiendo su temperatura permitiendo aumentar su densidad y aumente su peso haciendo que empiece a descender y volver a empezar el ciclo del aire.

3.2.1.2 Función de una Turbina eólica.

Las turbinas eólicas son sistemas que aprovechan la energía cinética del viento a través de álabes convirtiéndola en energía mecánica, La cual puede ser utilizada para molienda de harina, bombeo de agua o como fuente para generación de energía eléctrica.

3.2.1.3 La potencia de una masa de aire en movimiento.

La potencia producida por una masa de aire de densidad ρ [Kg/m³], que se mueve a determinada velocidad [m/s], Contiene el siguiente potencial por unidad de superficie

$$P_0 = \frac{1}{2} * \rho * v^3 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (1)$$

En una superficie específica

$$P_0 = \frac{1}{2} * \rho * F * v^3 \text{ [W]}$$

Donde F es el área transversal al flujo de aire en [m²]

Figura 13

Flujo transversal.



Nota: Adaptado de Introducción a la teoría de las turbinas eólicas, Manuel Franquesa, España, 2009.

Nota: físicamente es imposible dejar sin energía el aire ya que implicaría dejarlo sin movimiento, pero da inicio al análisis de cuánta energía podremos aprovechar para producción de energía o de diferentes usos.

3.2.2.1 Rotor ideal límite de Betz.

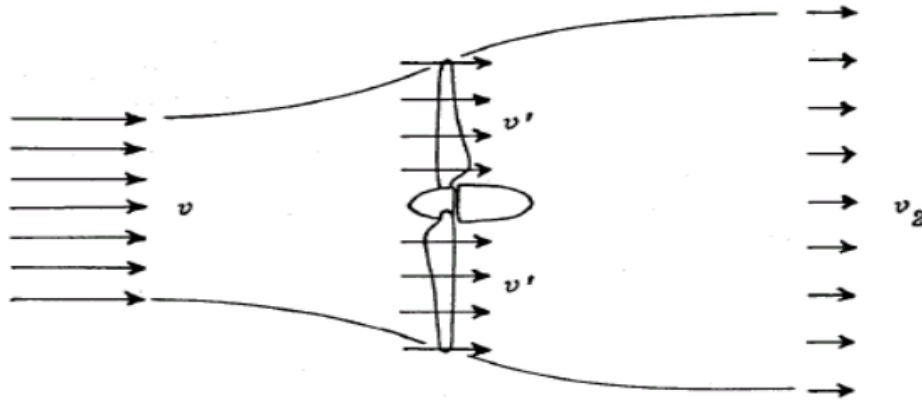
En 1926, Albert Betz publicó su obra “El rotor eólico ideal” donde plantea su teoría sobre los rotores eólicos y presenta las bases teóricas de la energía eólica. La ley de Betz indica la potencia máxima que puede ser aprovechada o extraída del viento, independientemente del diseño del aerogenerador en flujo abierto.

La razón por la que no es posible una eficiencia del 100%, se debe a la naturaleza de la energía eólica, la cual depende del flujo continuo del viento. Si se extrajera la energía completa del viento esto implicaría que el flujo de a este se detuviera y no quedaría ninguna velocidad disponible para mantener el flujo a través del mecanismo de extracción. La máxima eficiencia de extracción se logra en el equilibrio de la mayor desaceleración del viento que todavía mantiene un flujo suficientemente rápido que pasa por el aerogenerador.

La teoría de límite de Betz establece que el máximo coeficiente de potencia posible extraído por un aerogenerador es de $C_p = 16/59 = 0.59 = 59\%$.

Figura 14

Relación de velocidades del viento.



Nota: La figura muestra esquemáticamente la relación de las velocidades del viento delante, durante su paso por el rotor y detrás del mismo. Adaptado de Introducción a la teoría de las turbinas eólicas, Manuel Franquesa, España, 2009.

3.2.3 Tipos de aerogeneradores.

Existen dos tipos de aerogeneradores los cuales van divididos de acuerdo a su velocidad. Estos pueden ser “de velocidad fija (FSWT), por sus siglas en inglés (Fixed-speed Wind Turbine) y de velocidades variable (VSWT) (Variable-speed Wind Turbine).” (Smart grind: Fundamentos técnicos). estos a su vez se pueden clasificar de acuerdo a la alineación de su eje ya sea vertical o horizontal. los de eje horizontal la dirección del viento va en paralelo a la dirección del viento mientras que los de eje vertical van en dirección perpendicular al viento.

Aerogeneradores eje Horizontal

- Sotavento (*paralelo al viento*)
- Barlovento (*paralelo al viento*)

Aerogeneradores eje Vertical (perpendicular al viento)

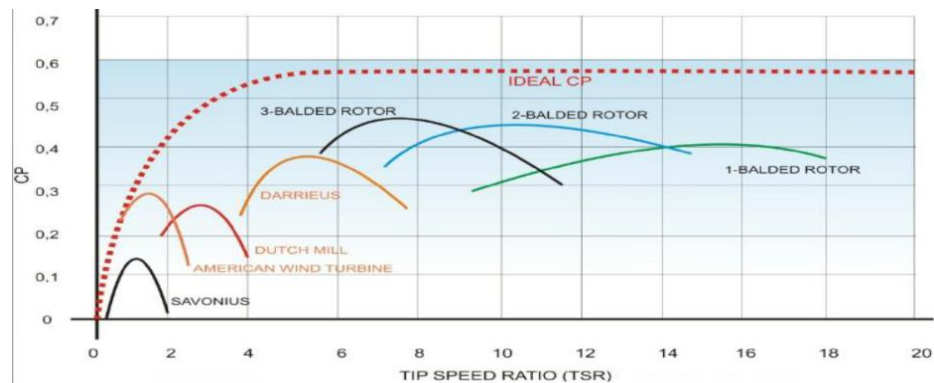
- Savonius, Resistencia (eje vertical)
- Darrieus (Sustentación).

Clasificación por aerodinámica

La clasificación por aerodinámica muestra el rendimiento aerodinámico de los distintos tipos de máquinas eólicas. Los valores están representados en función del coeficiente de potencia del aerogenerador C_p y la velocidad específica λ_0 .

Figura 15

Clasificación de máquinas eólicas.



Nota: La gráfica relaciona el coeficiente de potencia C_p con la relación de velocidades tangenciales TSR.

La Velocidad específica:

La Velocidad específica λ_0 establece la relación de velocidades entre la velocidad tangencial del rotor y la velocidad del viento. también se conoce como parámetro TSR y se usa para comparar el funcionamiento de diferentes aerogeneradores.

Velocidad específica (TSR o λ_0) :

$$\text{TSR} = \lambda_0 = \frac{\Omega * R}{V} \quad (2)$$

Donde:

- Ω es velocidad de giro.
- R es el radio de la pala
- V es la velocidad del viento incidente sobre el rotor

Coefficiente de potencia:

El coeficiente de potencia establece la relación entre la potencia teórica y la potencia disponible en el viento cuando pasa por a través de un área definida proyectada por el rotor

$$C_p = \frac{P_{Teorica}}{P_{viento}} = \frac{P_{Teorica}}{\frac{1}{2} * \rho * A_b * U^3} \quad (3)$$

Donde:

$$A_b = 2 * R * H = D * H \quad (4)$$

- A_b es el área de barido [m^{**2}]
- ρ es densidad promedio del aire. [Kg/m^{**3}]
- U es la velocidad del viento incidente sobre el rotor en [m/s]

3.3 Densidad de Energía eólica.

La densidad de energía eólica es un índice integral que sirve para evaluar el recurso eólico en un determinado sitio. Es la potencia eólica disponible en el flujo de aire a través de un área por donde pasa el flujo de forma perpendicular. Estas clases de densidades vienen definidas a dos alturas estandarizadas de 10 y 50 metros.

Tabla 3

Clases de potencial eólico.

Clase de energía eólica	Altura 10 [m]	
	Wind Power Density [W/m**2]	Mean wind speed [m/s]
1	<100	<4,4
2	100-150	4,4-5,1
3	150-200	5,1-5,6
4	200-250	5,6-6,0
5	250-300	6,0-6,4
6	300-350	6,4-7,0
7	>400	>7,0

Nota: Adaptado de Wind power generation and wind turbine design, Wei Tong, Kollmorgen, USA.

4. Diseño Metodológico

4.1 Población de estudio.

Este documento se centra en el área del Cañón del Chicamocha en Santander. El cual está sobre la cordillera oriental ubicado en el límite convergente de las placas suramericana y la del Pacífico, lo cual hace que esta región se caracterice por tener “una alta actividad de metamorfismo regional en la litología existente, por esta razón la litología predominante corresponde básicamente a esquistos de formación Silgara.” (Angel L, 2015)

Figura 16

Cañón del Chicamocha.

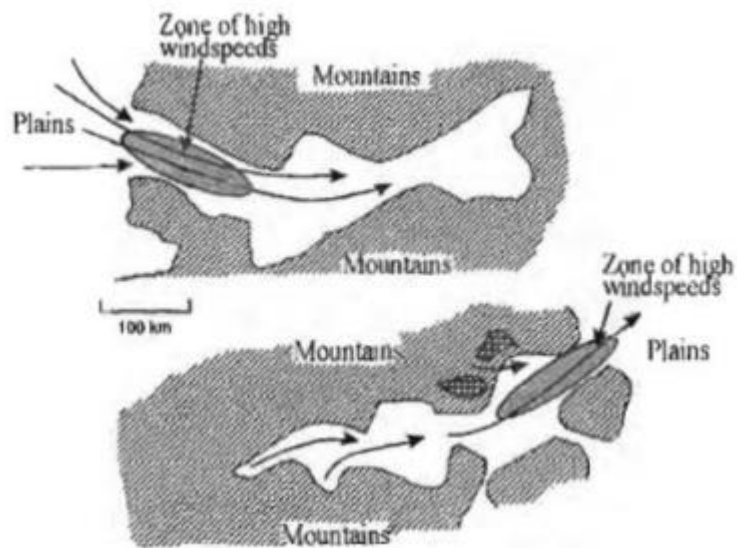


Nota: Tomado de Noticias Colombia, 2022.

El cañón del Chicamocha al estar rodeado por sus montañas hace que el sitio actúe como difusor al direccionar del viento en un espacio pequeño, lo cual hace que aumente su velocidad considerablemente haciendo que el sector estudiado posea un alto potencial para el aprovechamiento de la energía eólica.

Figura 17

Influencia zonas montañosas al aire.



Nota: La ilustración muestra cómo influye la zona geográfica en el comportamiento del aire por influencias de zonas montañosas.

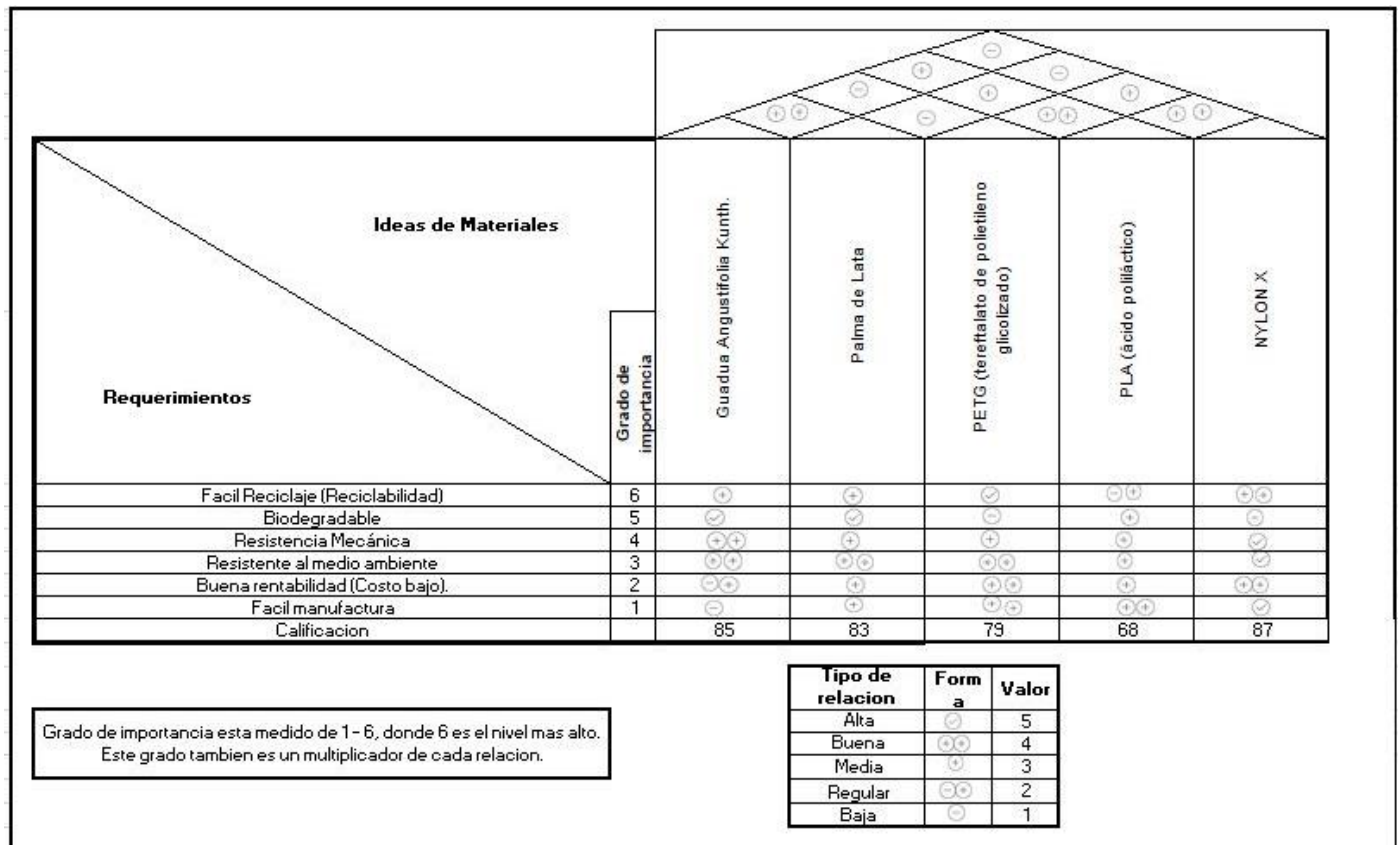
Como estrategia para el desarrollo de esta investigación se va a realizar una simulación estructural y aerodinámica mediante la herramienta Computacional ANSYS, Esto con el fin de analizar el comportamiento mecánico del álabe de un aerogenerador para las condiciones del cañón del Chicamocha en Santander.

5. Despliegue de Función de Calidad (QFD) y Determinación del Material. Para este Proceso se da uso al Despliegue de Función de Calidad (QFD)

Con la idea de hacer un procesamiento objetivo para la correcta selección de material con respecto a los requerimientos y parámetros de diseño. Se evalúa la relación entre diferentes materiales ya sean fácil reciclaje o biodegradable, dando grados de importancia a las restricciones y conectándolas con los requerimientos. Se da como resultado el siguiente cuadro.

Figura 18

Despliegue matriz de calidad.



Nota: elaboración Propia.

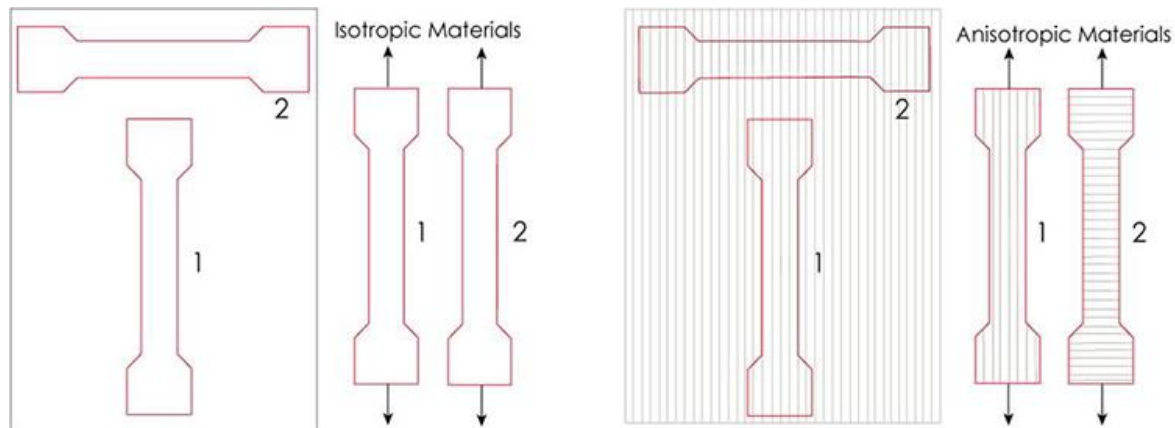
Se estableció el material Nylon X, el cual es un polímero termoplástico perteneciente a la familia de las poliamidas reforzado con filamentos de fibras de carbono. En la matriz del plástico los filamentos de fibras de carbono se orientan aleatoriamente y de manera uniforme, lo cual hace mantener la isotropía del material.

Tabla 4*Propiedades Nylon X*

Propiedad	Valor
Densidad [$\frac{g}{cm^3}$]	1
Módulo de Tensión E [MPa]	6000
Esfuerzo a tensión [MPa]	100
Coefficiente de expansión térmica [$\frac{1}{k}$]	1×10^{-5}
Módulo de poisson γ	0,3

Nota: se adapta valores de ficha técnica de nylonX, www.matterhaker.com

Para fin de estudio se asumirá como material Isotrópico,

Figura 19*Material Isotrópico y ortotrópico.***Nota:** Adaptado de (Instron, 2019).

Nota: “Un material es isotrópico si sus propiedades mecánicas y térmicas son las mismas en todas las direcciones” (Dassault Systemes, 2022) . lo cual hace uniforme su distribución de esfuerzos, La anisotropía en un material reforzado puede ser una decisión de ingeniería, donde dependiendo la orientación de las mallas de refuerzo, se pueden mejorar propiedades en una dirección determinada.

6. Diseño (Fase de desarrollo)

Para la realización del modelado del álabe de un aerogenerador vertical darrieus tipo H con el perfil aerodinámico DU06W200, que produzca una 1 KW de energía al día para las condiciones del cañón del Chicamocha, se es esencial tener en cuenta las variables que afectan el aerogenerador como lo son: La zona, su ubicación, estudio de vientos y materiales para la fabricación. Como continuación del proyecto de grado de Luis Fernando García-Rodríguez, J. E. (2019). Se determina

que la ubicación idónea para instalar un aerogenerador vertical, esta en la estación del río Chicamocha con una velocidad de viento de 6.98 m/seg, con un perfil aerodinámico DU06W200 ya que mejora en un 23% el rendimiento aerodinámico de los álabes del perfil aerodinámico VAWT. Se decide continuar seleccionando el mismo perfil y el lugar de la ubicación de estudio.

Como principales parámetros de entrada se toman los datos de la tabla 1 monitoreo del viento anual en el cañón del chicamocha. Donde se toman los datos de la estación del río chicamocha. Para el cálculo de diseño se toma la velocidad media que hay en la estación del río chicamocha que es de 5.73 [m/seg] y la densidad del aire en el sitio que es de 1.225[Kg/m³].

Como primer cálculo se busca la potencia de diseño, para esto se debe calcular la eficiencia total del aerogenerador la cual es igual a la multiplicación de su eficiencia mecánica, eficiencia eléctrica en generación de energía y la eficiencia del aerogenerador.

Tabla 5

Eficiencia de aerogeneradores.

Sistema de Viento	Eficiencia%	
	Construcción Sencilla	Óptima Diseño
Bomba de agua multipala para granja	10	30
Bomba de agua de vela	10	25
Bomba de agua Darrieus	15	30
Bomba de agua Savonius	10	20
Aerogenerador Darrieus	15	35
Aerogenerador de hélice pequeño (2KW).	20	30
Aerogenerador de hélice mediano (2KW).	20	30
Aerogenerador de hélice Darrieus (10KW).	20	30-45

Nota: Chang L,(2005), Advanced Topics in Environmental Engineering, Wind Power.

Para este diseño se asume una eficiencia mecánica de 95% ya que el aerogenerador va a estar acoplado directamente al rotor, por tanto, se estiman que las pérdidas mecánicas en el sistema sean bajas. Se toma “un rendimiento eléctrico del 85 % ya en etapa de generación.” (Oscar Orduz, 2011) El rendimiento de este tipo de aerogeneradores darrieus es del 35% según tabla de diseño. Se calcula la eficiencia total del aerogenerador.

$$\eta_T = \eta_m * \eta_E * \eta_{aerogenerador} \quad (5)$$

$$\eta_T = 0.95 * 0.85 * 0.35$$

$$\eta_T = 0.2826 = 28,26\%$$

Para la potencia de diseño se toma la potencia útil de 100W y se procede a calcular la potencia de diseño del sistema con eficiencia total del sistema.

$$P_{diseño} * \eta_T = P_{útil} \quad (6)$$

$$P_{diseño} * 0.2826 = 100 [W]$$

$$P_{diseño} = 353.825 [W]$$

Con esta potencia de diseño se procede a calcular el área de barrido del aerogenerador vertical para establecer los parámetros iniciales con que se va diseñar el álabe. Para esto se hace uso de la ecuación 1 multiplicada por el área de barrido.

$$P_{diseño} = \frac{1}{2} * \rho * v^3 * A_b \quad [W] \quad (7)$$

$$353.825 = \frac{1}{2} * 1.225 * 5.73^3 * A_b$$

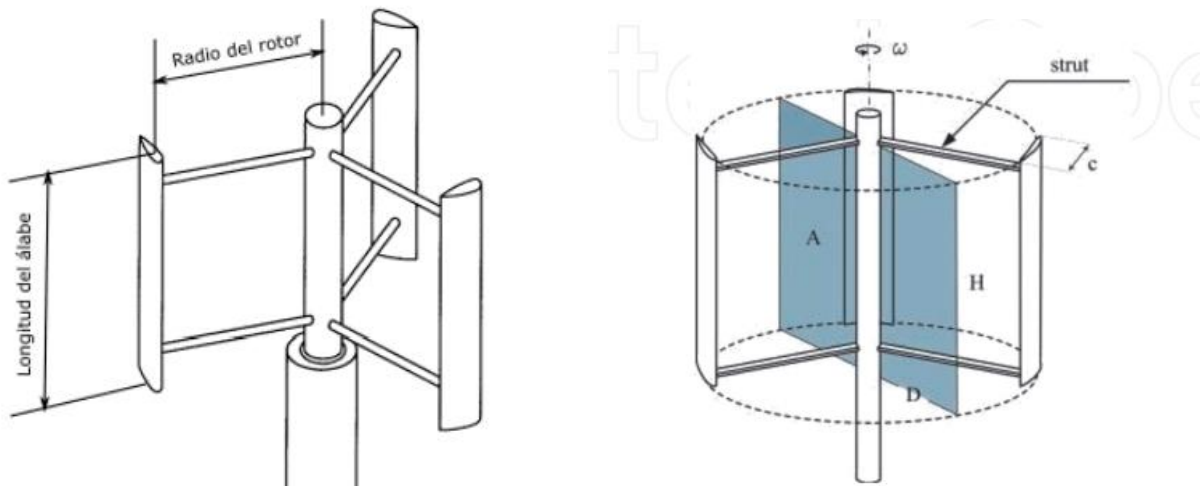
$$A_b = 3.119 [m^2]$$

Con el área de barrido definida, tenemos una ecuación que nos relaciona la altura del álabe con el diámetro del aerogenerador.

$$A_b = 2 * R * H = D * H \quad (4)$$

Figura 20

Área de barrido aerogenerador de eje vertical.



Nota: Adaptado de (García rodriguez,2021)

Nota: Alessandro Bianchini, Giovanni Ferrara, Lorenzo Ferrari, Design guidelines for H-Darrieus wind turbines: Optimization of the annual energy yield, Energy Conversion and Management,2015.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.10.038>.

Para poder definir la geometría del álabe a partir del área de barrido es necesario definir parámetros geométricos como lo es la solidez del rotor “ σ ” la cual se define como la superficie desarrollada de todas las palas dividida por el área de barrido.

$$\sigma = \frac{N_b * c * H}{D * H} = \frac{N_b * c}{D} \quad (8)$$

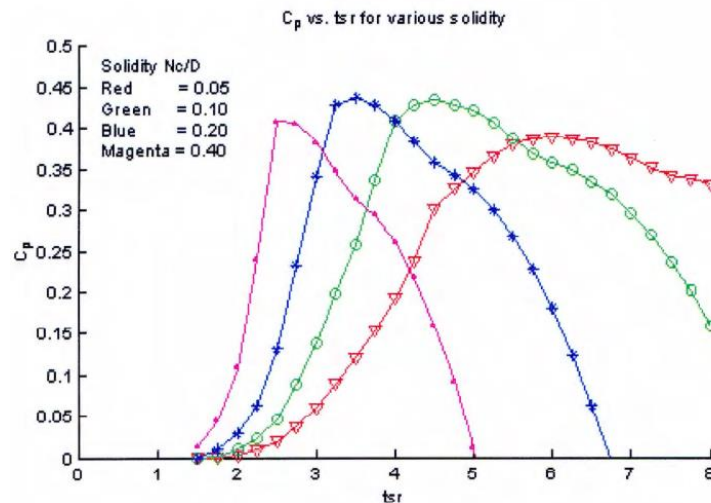
Donde:

N_b : Número de álabes

C: cuerda del álabe

D: diámetro del rotor del área de barrido.

La siguiente gráfica muestra la influencia del parámetro de solidez y el TSR en aerogeneradores verticales Tipo H en el Coeficiente de potencia y la velocidad específica TSR. Los aerogeneradores tipo H operan en una tasa de velocidad específica TSR entre 1 y 5.

Figura 21*Diagrama de C_p Vs TSR.*

Nota: diagrama de C_p vs TSR a diferentes parámetros de solidez. Adaptado de trabajo de grado del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Johannes ,México,2008.

Se observa que para aerogeneradores tipo H se presenta un mejor rendimiento en la línea rosada que tiene un valor de solidez de 0.4. “una baja solidez da como resultado una menor área de la hoja, por tanto, la hoja es más liviana ,esto beneficia la turbina ya que se pueden alcanzar velocidades de rotación más altas ” (Manwell J, 2009). Valores bajos de solidez aumenta más el descontrol dificultando el arranque y aumentando los valores de TSR. Es por esto que es recomendable el aumento de solidez ocasionando que los valores de máxima eficiencia ocurran a TSR bajos brindando un mejor torque a velocidades bajas facilitando el arranque.

Las revisiones en la literatura actual muestran que considerar un diseño de 3 palas rectas en el diseño VAWT complementa el diseño (Luis F. Garcia, Juan D. Roser, Jorge L. Chacon, 2021). Por tanto, se decide trabajar con 3 palas para el modelado de este trabajo.

Calculamos el TSR máximo que podemos obtener para tener una referencia de que valores de TSR se pueden tomar para el cálculo de este modelado.

$$\text{TSR}_{\max} = \frac{4 * Pi}{N_b} \quad (9)$$

$$\text{TSR}_{\max} = \frac{4 * Pi}{3} = 4.1887$$

El siguiente parámetro de diseño es la relación de aspecto de álabe (BAR), este define la relación entre la longitud del álabe (H) y la longitud de la cuerda (c).

$$\text{BAR} = \frac{H}{c} \quad (10)$$

Donde:

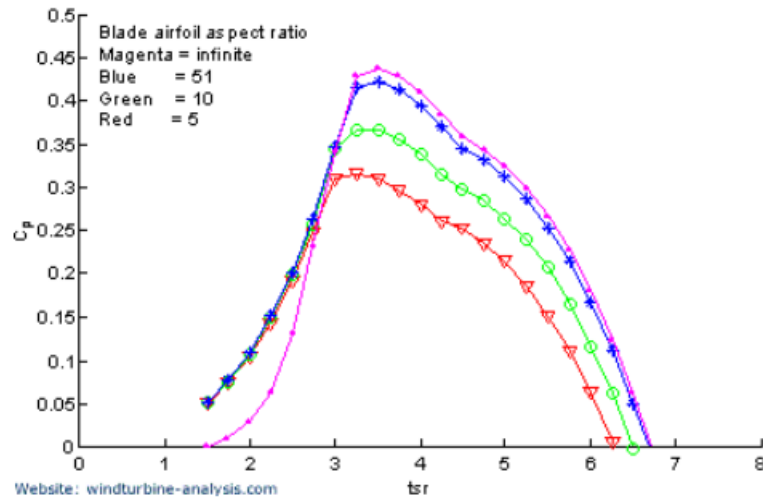
H: altura del álabe

c: cuerda del álabe

la siguiente gráfica muestra la relación de la influencia del álabe a diferentes valores de relación de aspecto de álabe (BAR) y el rendimiento teórico del rotor.

Figura 22

Diagrama C_p Vs TSR con parámetro BAR.



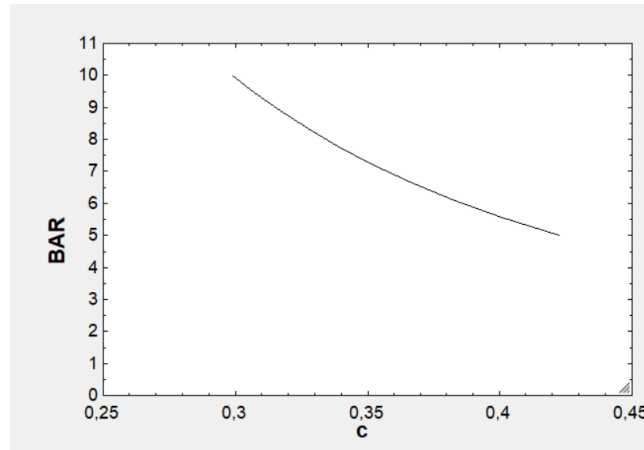
Nota: gráfica de C_p contra TSR para varios valores de relación de aspecto de álabes (BAR).

Adaptado de (Johannes, 2008), trabajo de grado del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México.

El valor de relación de aspecto de álabes no tiene una influencia determinante sobre el rendimiento para los valores entre 5 a 10, por tanto, se decide ver la influencia en ese rango de valores para buscar el mayor rendimiento, por medio de la siguiente gráfica se muestra la influencia que tiene el parámetro BAR con respecto a la longitud de cuerda (c) para un valor de solidez (σ) constante de 0.4.

Figura 23

Diagrama influencia del parámetro BAR con la Cuerda.



Nota: elaboración propia.

“La relación de aspecto de álabe (BAR), es otro parámetro importante, a valores más altos de esta relación, los efectos de flujo tridimensional sobre cada sección del perfil aerodinámico tienden a despreciarse” (Oscar Orduz, 2011). Pero disminuyen la longitud de cuerda considerablemente.

Por tanto, se decide asumir un valor de 0.4 para solidez, Bar:6 , TSR:3 y un número definido de 3 álabes, para determinar la longitud de cuerda del álabe.

Reemplazando y despejando (4) y (10) en (8).

$$6 = \frac{N_b * c * H}{D * H} = \frac{N_b * c^{[2]} * BAR}{A_b}$$

$$0.4 = \frac{3 * c^{[2]} * 6}{3.17}$$

$$c = 0.265 [m]$$

Con la longitud de cuerda definida se puede obtener el valor del diámetro del rotor (D) y la altura del álabe (h) por medio de la ecuación (8) y (4). Reemplazamos y nos queda

$$0.4 = \frac{3 * 0.265}{D}$$

$$D = 1.95 [m]$$

$$A_b = D * H$$

$$3.17 = 1.95 * H$$

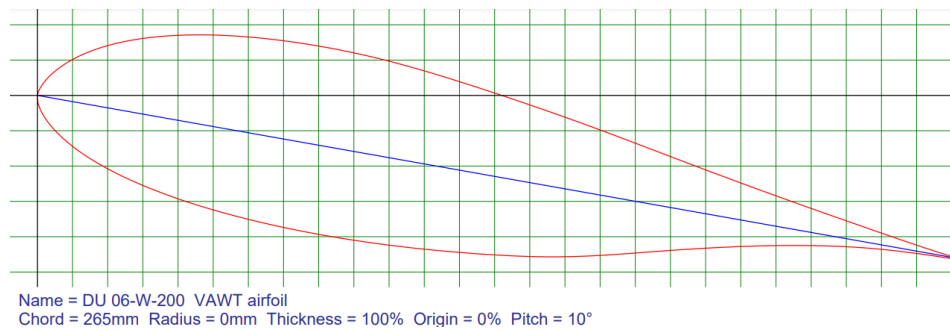
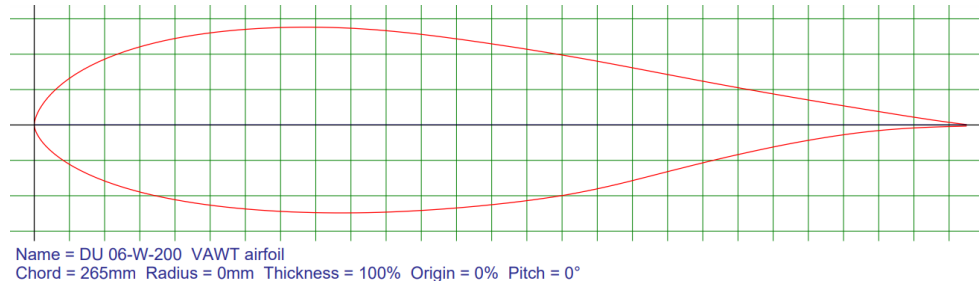
$$H = \frac{3.17}{1.95} \approx 1.62[m]$$

6.1 Modelado de Perfil Aerodinámico

Con estos datos se procede realizar el modelado del perfil DU06W200 importando las coordenadas (x,z) de la base de datos de airfoil Tools con una ángulo de ataque del 10 grados , también se decide agregar el rigidizador (costilla) dentro del álabe ya que según investigaciones ya realizadas demuestra que “los esfuerzos disminuyen junto con las deformaciones, las cuales experimentan un pico en 0.4 de longitud de cuerda” (Dayal Castro, Ruben Güiza, Yessid Rueda, 2018).

Figura 24

Perfil aerodinámico DU06W200.

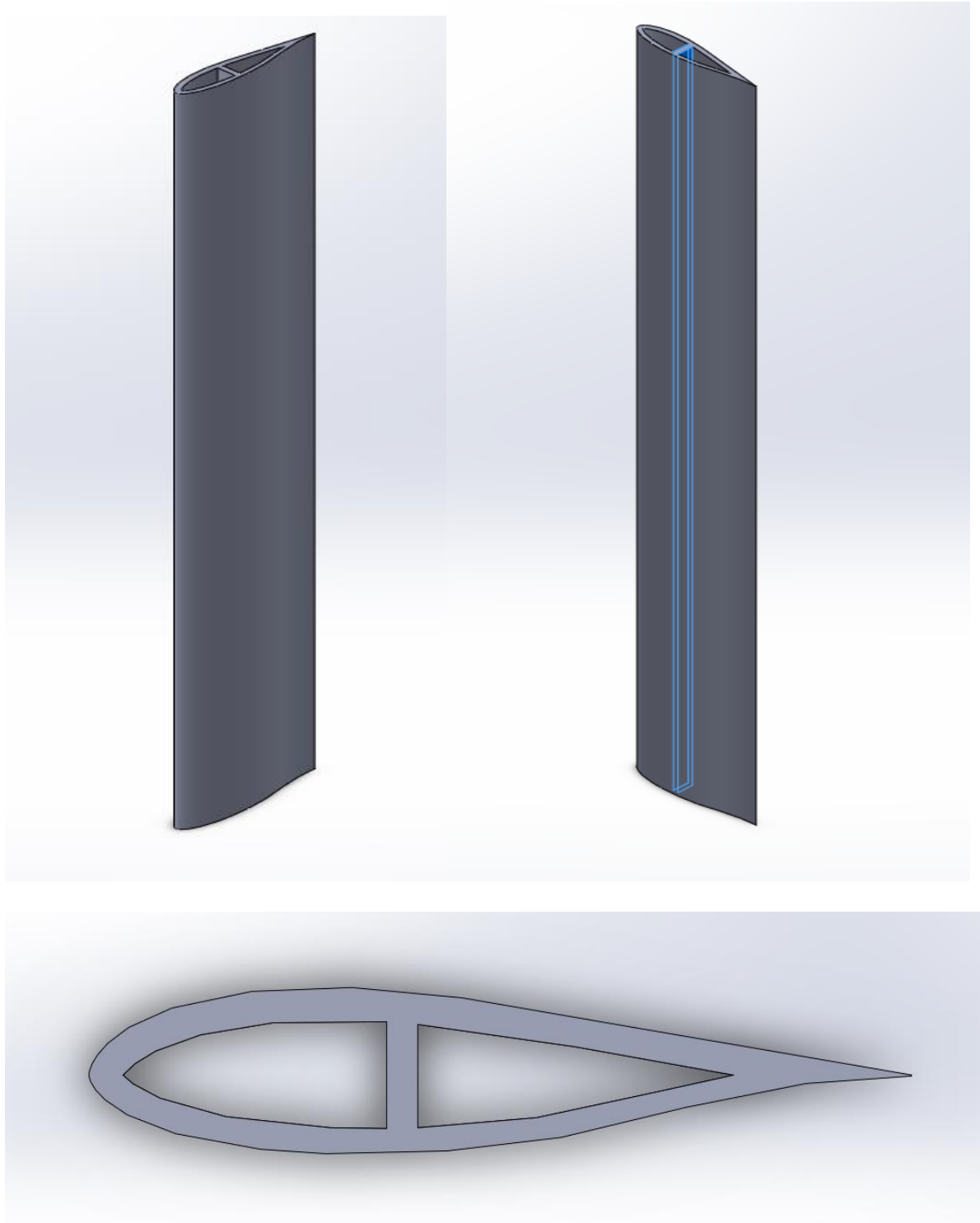


Nota: Perfil aerodinámico DU06W200 con ángulo de ataque de 0° y de 10°. adaptado de

<http://airfoiltools.com>

Figura 25

Modelado CAD perfil aerodinámico DU06W200.



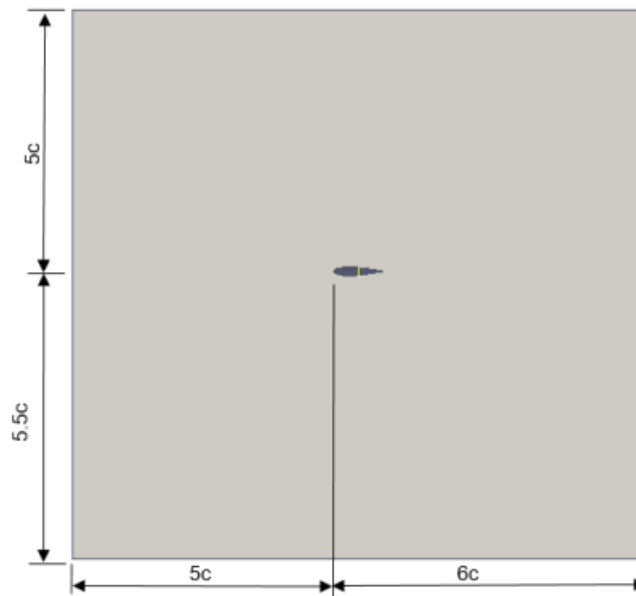
Nota: Modelado del perfil aerodinámico con cresta a 0.4 de la longitud de cuerda y con ángulo de ataque de 10° . adaptado de autor.

6.2 Definición del Dominio Aerodinámico

En este tipo de análisis es importante la definición del dominio, ya que debe tener dimensiones adecuadas para permitir el correcto desarrollo del flujo en el perfil aerodinámico ya seleccionado, como continuación del proyecto de grado de (Luis Fernando García-Rodríguez, 2014).se decide utilizar el dominio JOUKOWSKI, ya que permite un desarrollo adecuado de la estela del perfil DU06W200.

Figura 26

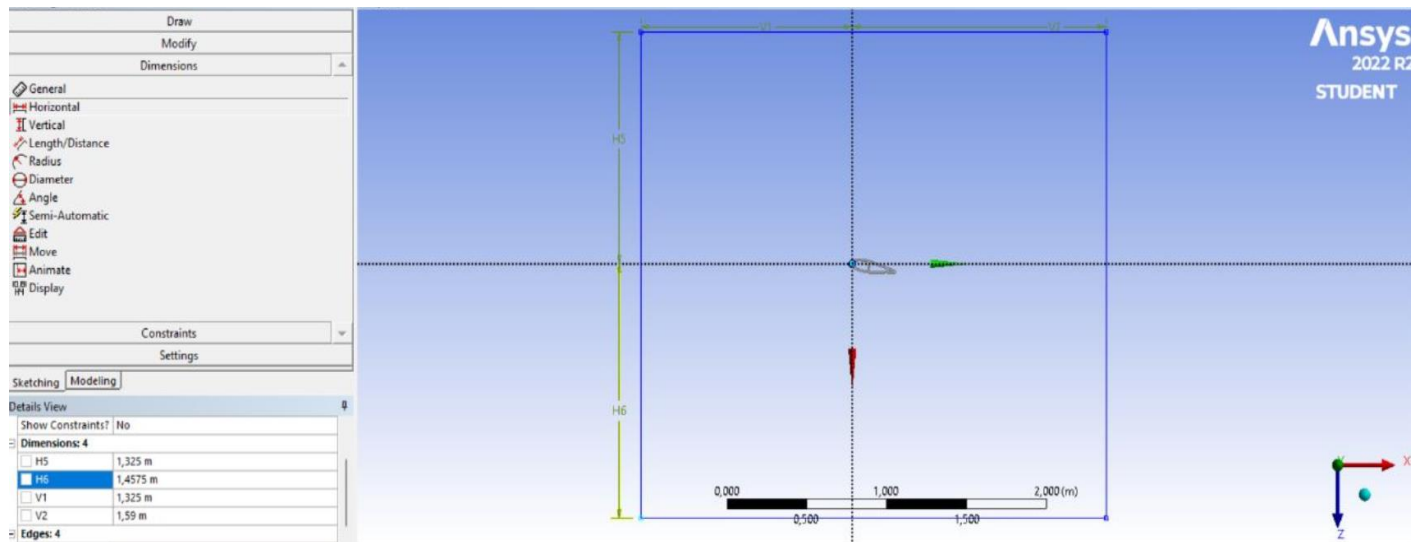
Dominio JOUKOWSKI.



Nota: Dominio JOUKOWSKI, adaptado de Análisis aerodinámico del perfil de los álabes de una turbina eólica de eje vertical mediante simulación en 2D usando CFD, Luis F. García, 2014.

Figura 27

Dominio JOUKOWSKI para el perfil DU06W200 en Ansys.

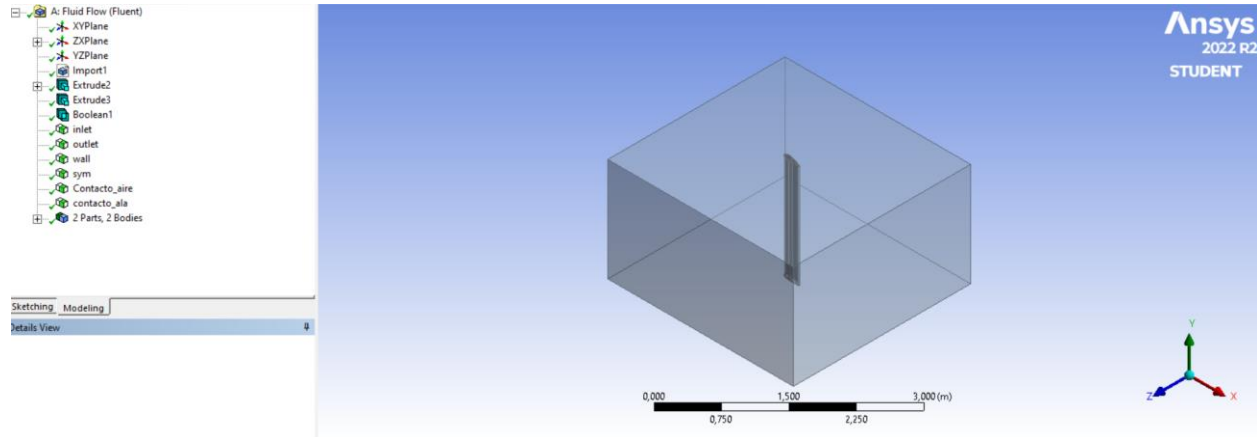


Nota: Dominio JOUKOWSKI para el perfil DU06W200. elaboración propia.

Como parte del modelado es importante definir las superficies del dominio para dar una indicación al programa sobre cuál es la entrada (Inlet), salida(Outlet), paredes(Wall) y cuerpo del álabo(Contacto_ala).

Figura 28

Definición de superficies en el programa Ansys.



Nota: Definición de superficies en el programa Ansys.

7. Simulación del álabes Aerodinámico

El proceso de simulación se realizó mediante la herramienta computacional Ansys, importando la geometría y los cálculos anteriormente mencionados en el capítulo 6 (Fase de desarrollo). Y agregando el material Nylon X, Se realizará un análisis multi-físico ya que los resultados de análisis aerodinámico se importan al análisis estructural. La simulación se realizará en el laboratorio de Sistemas de Conversión de Energía (SICE), El cual se encuentra en la Universidad Industrial de Santander sede Guatiguará.

Parámetros de simulación:

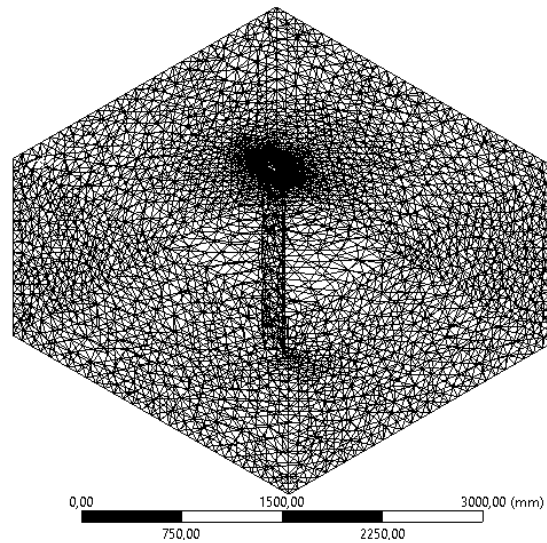
- Velocidad de entrada del viento: 5.73 m /s.
- Densidad atmosférica: 101325 Pa.
- Densidad del aire 1.225 kg/m³.

Hipótesis para simulación:

- Flujo en estado estacionario.
- Material isotrópico.
- El aire se considera como flujo incompresible ya que la velocidad del viento es baja.

Figura 29

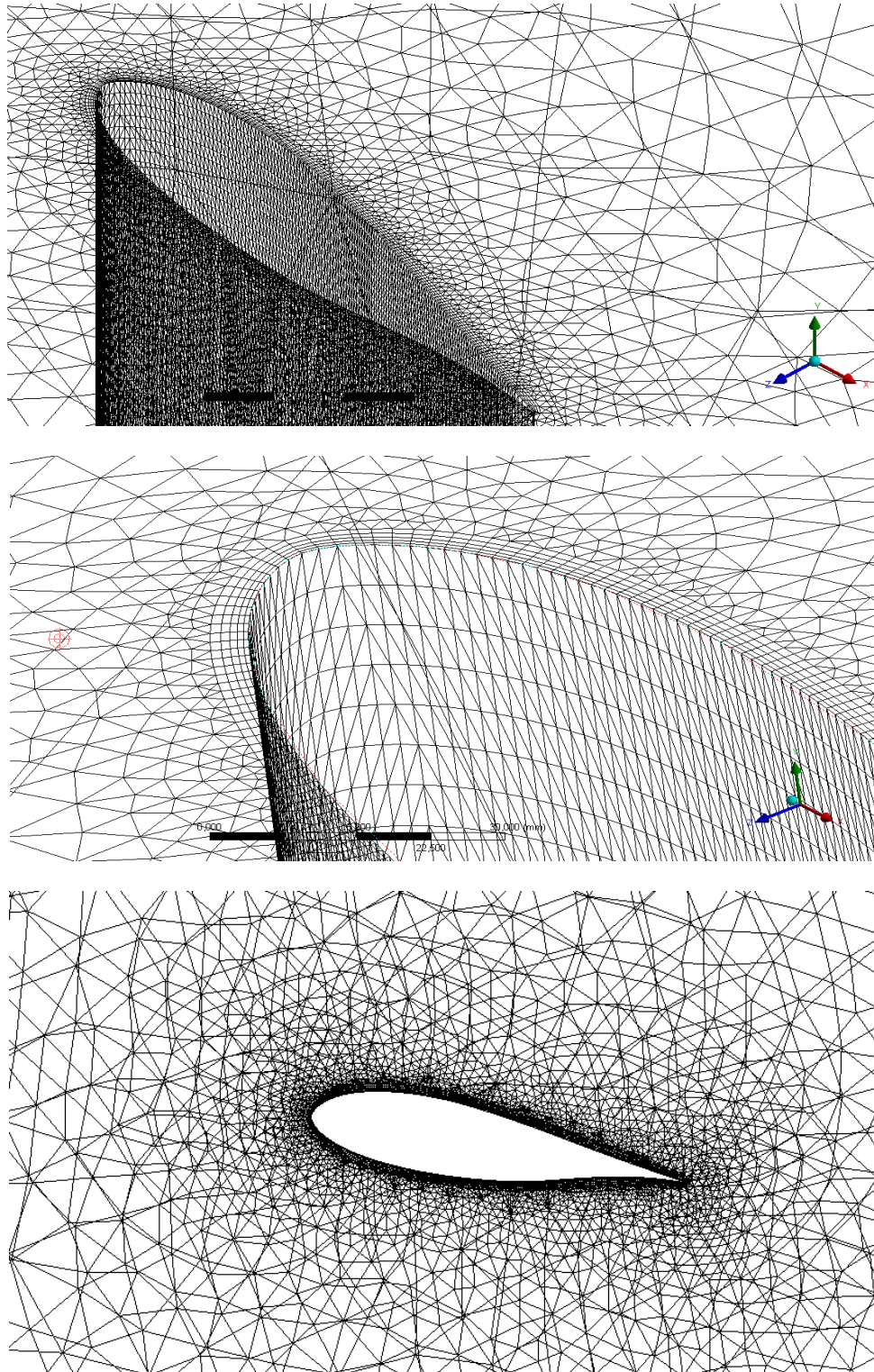
Creación de malla.



Nota: elaboración propia.

Figura 30

Detalle de malla borde de ataque.



Nota: Se aprecia buena cantidad de elementos en el borde de ataque del perfil.

Tabla 6

Elementos y nodos de la matriz.

Nodos	556633
Elementos	1657097

7.1 Modelo Spalart-Allmaras de ANSYS:

Se procede a elegir el modelo Spalart-Allmaras, el cual es un modelo de una sola ecuación diseñada especialmente para aplicaciones aeroespaciales que involucran parámetros relacionados con el espacio o cuerpos aerodinámicos como el perfil aerodinámico. “En su forma original, el modelo Spalart-Allmaras es efectivamente un modelo de bajo número de Reynolds, que requiere que la región afectada por la viscosidad de la capa límite se resuelva adecuadamente” (ANSYS, Inc, 2013). La velocidad promedio del flujo es una velocidad baja lo cual va a producir un bajo número de Reynolds por lo que hace este modelo ideal para realizar la simulación.

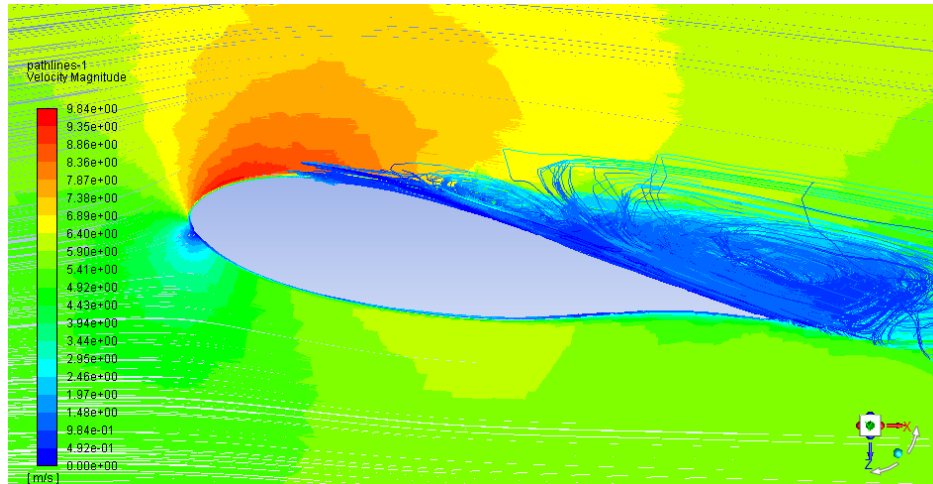
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \tilde{\nu}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \tilde{\nu} u_i) = G_\nu + \frac{1}{\sigma_{\tilde{\nu}}} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \rho \tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right\} + C_{b2} \rho \left(\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right)^2 \right] - Y_\nu + S_{\tilde{\nu}}$$

Nota: ecuación modelo Spalart-Allmaras. (ANSYS, Inc, 2013).

Resultados de aerodinámica:

Figura 31

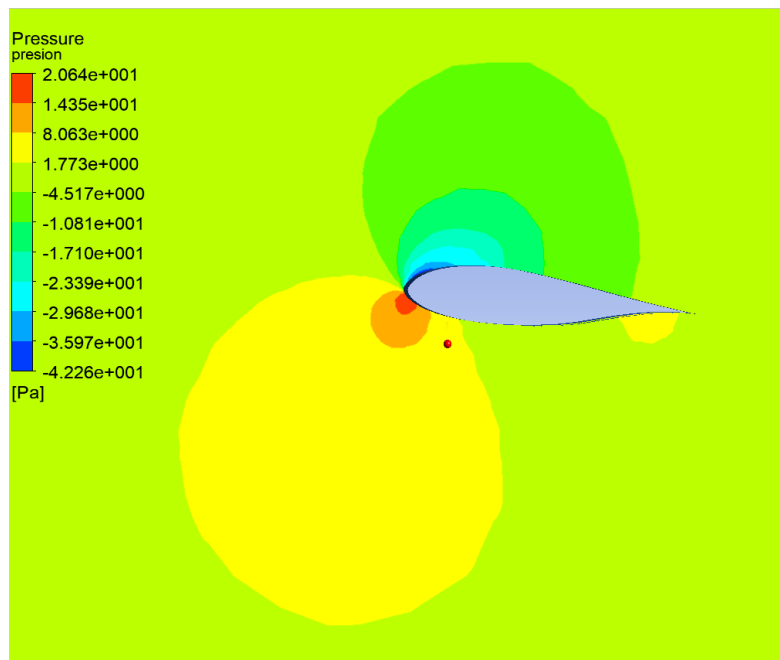
Perfil de velocidades con ángulo de ataque 10°.



Nota: elaboración propia.

Figura 32

Perfil de presiones ángulo de ataque 10°.

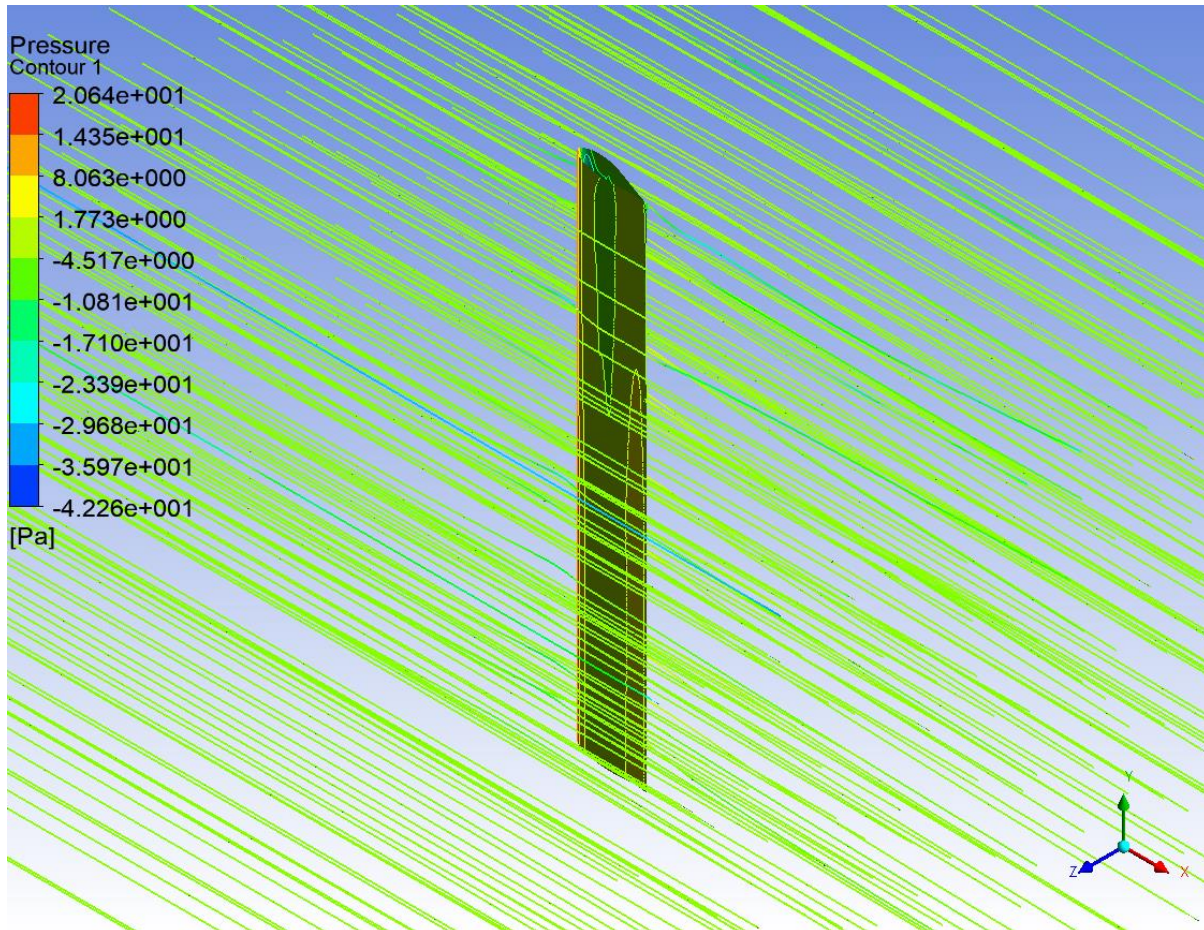


Nota: vista superior del perfil de presiones con ángulo de ataque de 10°

Nota: elaboración propia

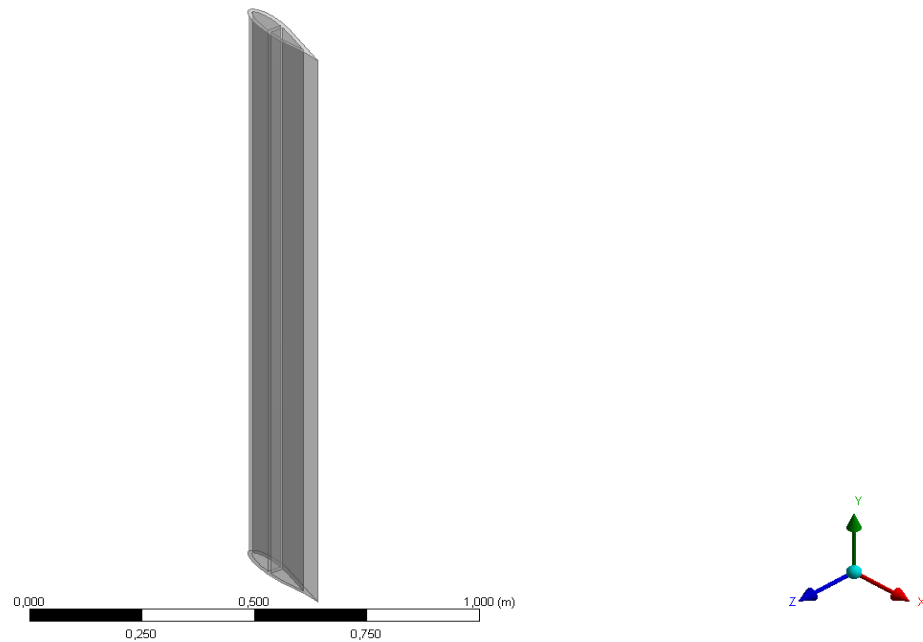
Figura 33

Contorno de Presiones.

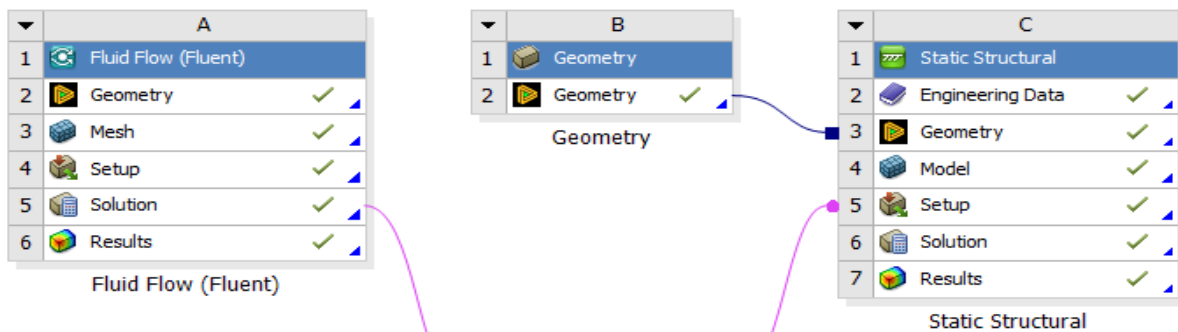


Nota: perfil de presiones del perfil con ángulo de ataque de 10°

Con los datos de perfil de presiones de la simulación aerodinámica se procede a realizar el análisis estructural para esto. Se importa un módulo B de geometría y un módulo C para el análisis Estructural.

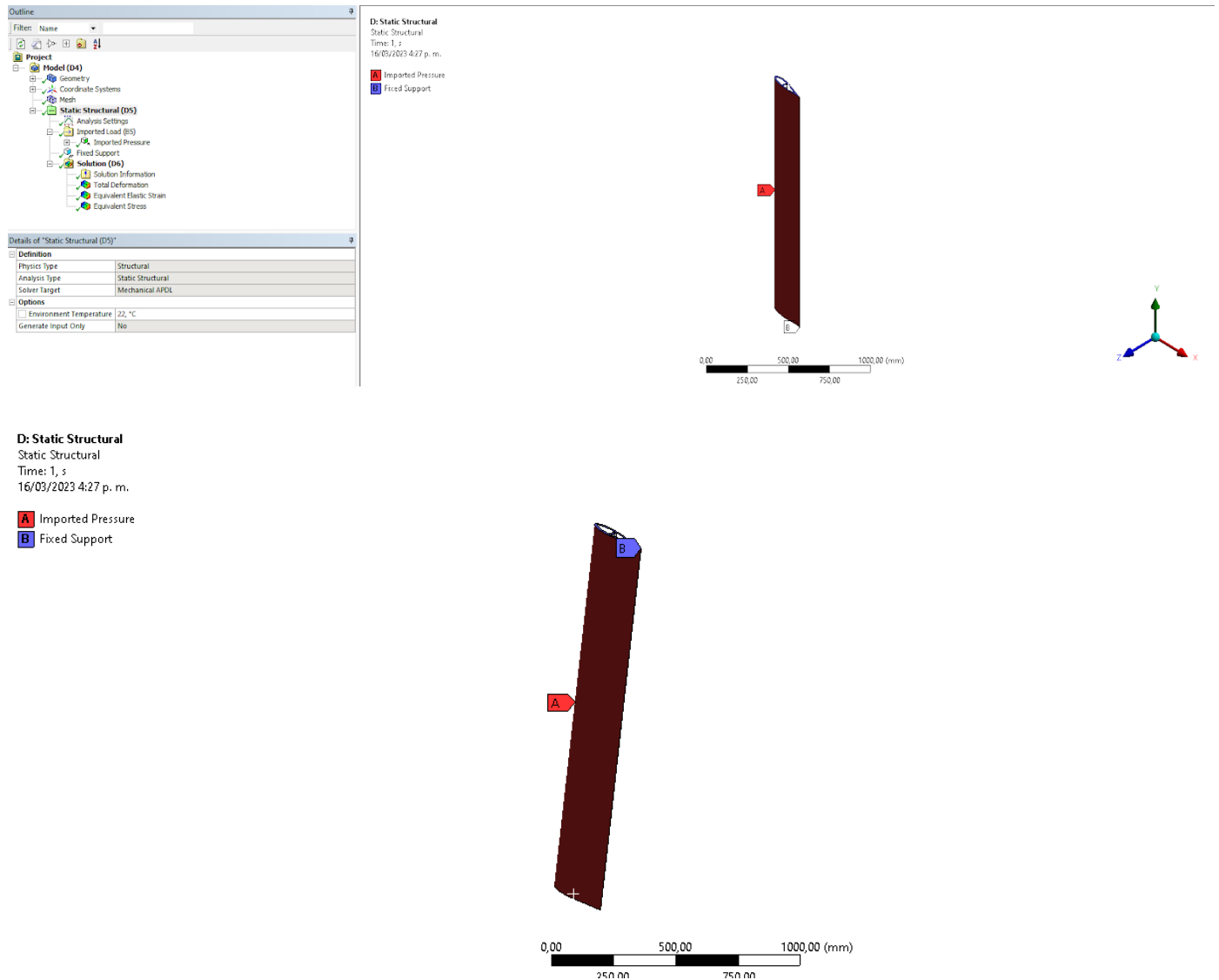
Figura 34*Geometría Módulo B.*

Nota: geometría incorporada en el módulo B.

Figura 35*Simulación workbench Fluid Flow y Static Structural en Ansys.*

Nota: elaboración propia.

Figura 36

Análisis estructural Ansys.

Nota: elaboración propia.

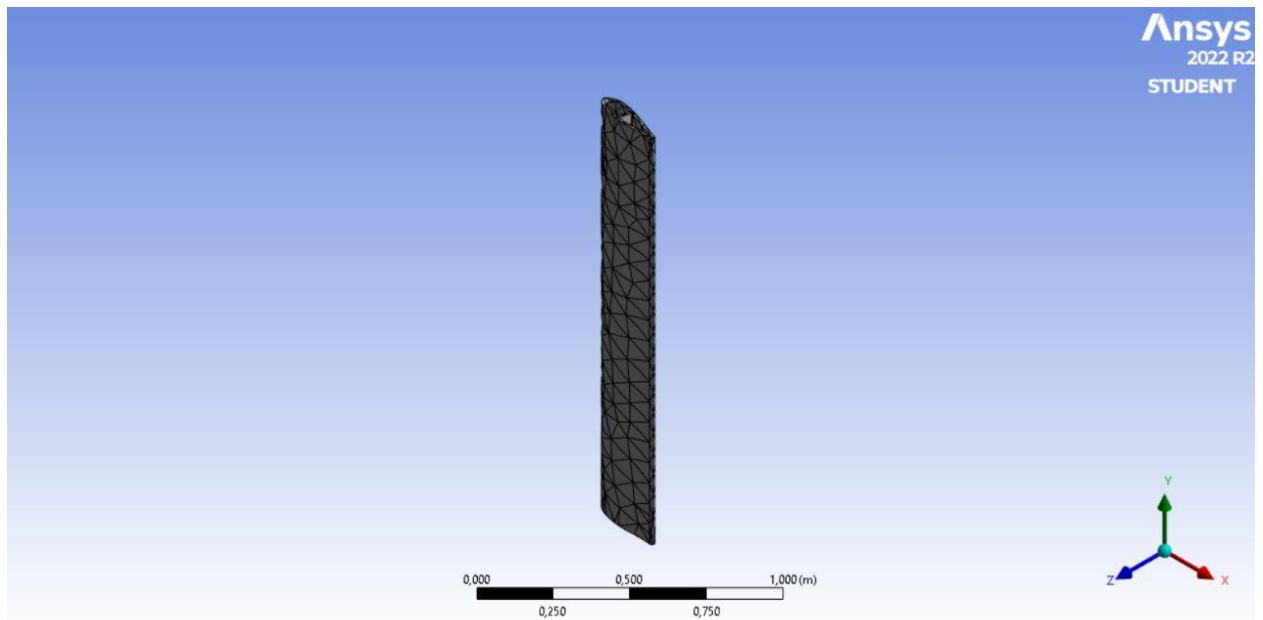
Nota: Se crean unas condiciones de contorno A y B. Donde el parámetro A es el perfil de presiones importado del análisis aerodinámico y el parámetro B es un soporte fijo que va en la cara superior e inferior del álabe como parte del diseño de estudio seleccionado.

Malla estructural:

En el mallado estructural se elige un mallado de tetraedros dominantes, ya que representa de mejor forma los elementos del perfil a analizar.

Figura 37

Malla de estructural.



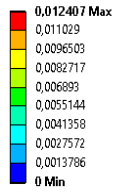
Nota: malla de tetraedros dominantes.

Resultados

Figura 38

Deformación estructural del álabo.

D: Static Structural
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: mm
 Time: 1
 17/03/2023 4:46 p. m.



D: Static Structural
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: mm
 Time: 1
 17/03/2023 4:52 p. m.

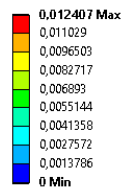


Figura 39

Esfuerzo Equivalente de Von Mises

D: Static Structural
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 1
 22/03/2023 6:25 p. m.

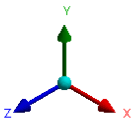
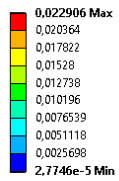


Figura 40

Esfuerzo cortante.

D: Static Structural
 Shear Stress
 Type: Shear Stress(OZ Plane)
 Unit: MPa
 Global Coordinate System
 Time: 1
 23/03/2023 3:56 a. m.

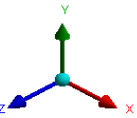
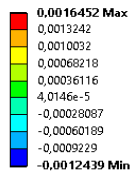
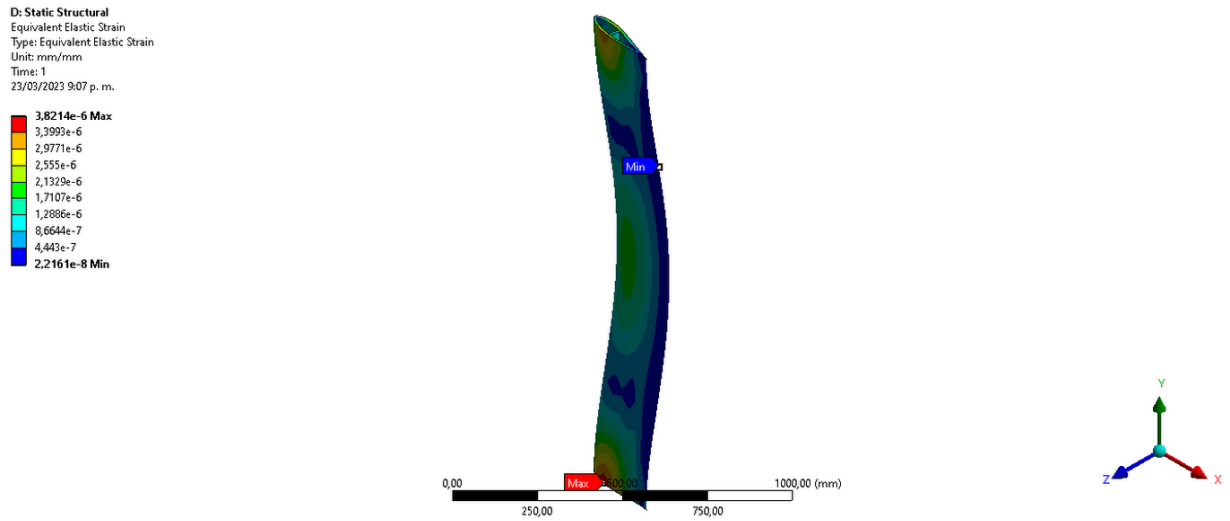


Figura 41

Deformación unitaria [mm/mm].



Desplazamiento	Esfuerzo Equivalente	Deformación
Máximo[mm]	Von Mises [MPa]	Unitaria Máxima [mm/mm]
0,01286	0,022	3,8214E-06

8. Conclusiones

A partir del modelado, simulación y análisis del comportamiento mecánico del álabe de un aerogenerador de eje vertical, se puede inferir que el material compuesto, nylon reforzado con filamentos de fibra de carbono (Nylon X). Presenta buenos resultados mecánicos, con una deformación máxima de 0.01286 [mm]. para las condiciones de estudio en el cañón del Chicamocha.

El estudio bibliográfico realizado, para la correcta selección del material mediante una matriz QFD, señala que el material que mejor presenta características de resistencia y fácil reciclaje es el material compuesto Nylon X (nylon reforzado con filamentos de fibra de carbono), para las condiciones del cañón del Chicamocha.

El Análisis aerodinámico realizado mediante del software Ansys Fluent, se encontró que el perfil de presiones va desde 20.64Pa y baja hasta -42.26Pa, importando el perfil de presiones al análisis estructural. Se encuentra que el estado de cargas está por debajo del límite del material, Los coeficientes de arrastre (Drag) y sustentación (Lift) presentaron errores del 17% y 5.5% comparados a las referencias consultadas presentadas por García, por tanto, la deformación del álabe es muy pequeña y presenta buenas condiciones de trabajo en el lugar de estudio.

Debido a que la influencia que tiene la relación de aspecto álabe (BAR) con respecto a su eficiencia, no presenta mayores cambios en el rango de 5-10 sobre el rendimiento, pero sí presenta grandes cambios en la disminución en la longitud de la cuerda se decide trabajar con un parámetro de diseño de BAR:6, para evitar una reducción estructural en el álabe.

RECOMENDACIONES:

Con el fin de continuar este proyecto de grado se propone realizar un análisis experimental estructural y aerodinámico con el material propuesto. Considerando la isotropía del material, para considerar esto, su fabricación debe conservar la uniformidad aleatoria de los filamentos de fibra de carbono para así mantener la isotropía del material.

Realizar pruebas en el túnel de viento, con prototipos a escala del perfil DU06W200 con el material propuesto, con el fin de analizar coeficientes de arrastre y levantamiento. Para la realización de estas pruebas es necesario la correcta calibración del túnel de viento de la escuela de ingeniería mecánica.

Bibliografía

Angel L y Ramirez M.(2015).Cartografía Geológica y Cálculo del Balance Hídrico para la construcción del túnel de carga en la central hidroeléctrica Chicamocha. Aratoca,Santander, UPTC.

ANSYS, Inc. (noviembre de 2013). *ANSYS Fluent Theory Guide, 15.0*.

BURGOS, F. (9 de Julio de 2021). *OKdiario*. Obtenido de <https://okdiario.com/curiosidades/como-produce-viento-546373>.

Dassault Systemes. (2022). *Materiales isotrópicos y ortotrópicos*. Obtenido de https://help.solidworks.com/2011/spanish/SolidWorks/cworks/LegacyHelp/Simulation/Materials/Isotropic_and_Orthotropic_Materials.htm.

Dayal Castro, Ruben Güisa, Yesid Rueda . (2018). Reducción de los esfuerzos y las deformaciones de un álabe de turbina eólica de eje vertical por medio de refuerzos estructurales internos. Research Group on Energy and Environment GIEMA, Universidad Industrial de Santander.

D. G. Chávez-Pachón, F. A. García-Peña, and A. D. Pertuz-Comas, Estudio del comportamiento dinámico de un material compuesto laminado elaborado a partir de la corteza de la palma de lata. Bucaramanga, 2008.

ECODES - *Tiempo de actuar* (4 de agosto de 2020). Contaminación por plásticos. Uno de los mayores desafíos ambientales del siglo XXI. <https://ecodes.org/hacemos/cultura-para-la-sostenibilidad/salud-y-medioambiente/observatorio-de-salud-y-medio->

ambiente/contaminacion-por-plasticos-uno-de-los-mayores-desafios-ambientales-del-siglo-xxi.

ENELgreenpower. (30 de MAYO de 2020). *enelgreenpower*. Obtenido de <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables/energia-eolica>.

García-Rodríguez, L, Ariza, J. D. R. , Velazco, J. L. C. , & Ibarra, J. E. J. (2021). Vertical Axis Wind Turbine Design and Installation at Chicamocha Canyon. In L. Wang, W. Cao, & S. Hu (Eds.), *Entropy and Exergy in Renewable Energy*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.99374>

García-Rodríguez, L. F, J. E. Jaramillo, and J. L. Chacón, *Análisis Aerodinámico del perfil de los álabes de una turbina eólica de eje vertical mediante simulación en 2d usando CFD*. Bucaramanga, 2014.

García Rodríguez LF, Jaramillo JE, Chacón Velasco JL.(2019). Potencial de energía eólica del cañón del Chicamocha y selección de superficies aerodinámicas VAWT mediante modelado CFD. *Rev Fac Ing Universidad de Antioquia*.

IBERDROLA. (4 de JUNIO de 2018). *IBERDROLA*. Obtenido de <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/energia#:~:text=La%20energ%C3%ADa%20e%C3%B3lica%20es%20aquella,de%20aire%20en%20energ%C3%ADa%20el%C3%A9ctrica>.

Instron. (2019). *FABRICACIÓN ADITIVA*. E.E.U.U.

- Lijin Thomas, R. M. (2016). Advanced materials for wind turbine blade- A Review . *Science Direct*.
- Martínez Manuel del Jesús, Juan D Castro, Iván D Ortega. (2018). Diseño de álabes de turbina eólica de eje vertical usando material laminado de palma de lata mediante el método de elementos finitos. *Journal of Engineering Sciences*, 8.
- Manwell J, McGowan J, Rogers A. WIND ENERGY EXPLAINED Theory, Design and Application Second Edition. Second. John Wiley & Sons Ltd.; 2009. 689 p.
- Molina, A., Ponce, P., Soriano, L., Molina, A., Ponce, P., & Soriano, L. Diferentes tipos de aerogeneradores.
- Muhammad A. Jamal, O. R. (2020). Performance Evaluation of a 1 kW Variable Pitch-Straight Blade Vertical Axis Wind Turbine. *J. Appl. Mech. (ASTM)*.
- Noticias Colombia. (20 de marzo de 2022). *Noticias Colombia*. Obtenido de <https://noticiacolombia.com/el-canon-del-chicamocha-te-lleva-a-un-mundo-maravilloso/>.
- Oscar O, Julian Suarez, Ricardo Jaimes (2011). Diseño y construcción de un prototipo de turbina eólica de eje vertical para generación a baja potencia, Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander.
- P. Brøndsted, J.W. Holmes, B.F. Sørensen, “Bamboo Based Composites For Wind Turbine Blades”, Materials Research Division, Risø DTU, The Technical University of Denmark.

SEMANA. (15 de Marzo de 2022). Cerca de Barranquilla se construirá el primer parque eólico de Colombia sobre el mar. Barranquilla, Colombia.

Smart grind: Fundamentos técnicos, Energía eólica una red inteligente.
https://repositorio.tec.mx/bitstream/handle/11285/632714/13_t2s3_c14_html_contex_2.pdf?cv=1

Apéndices

Apéndice A

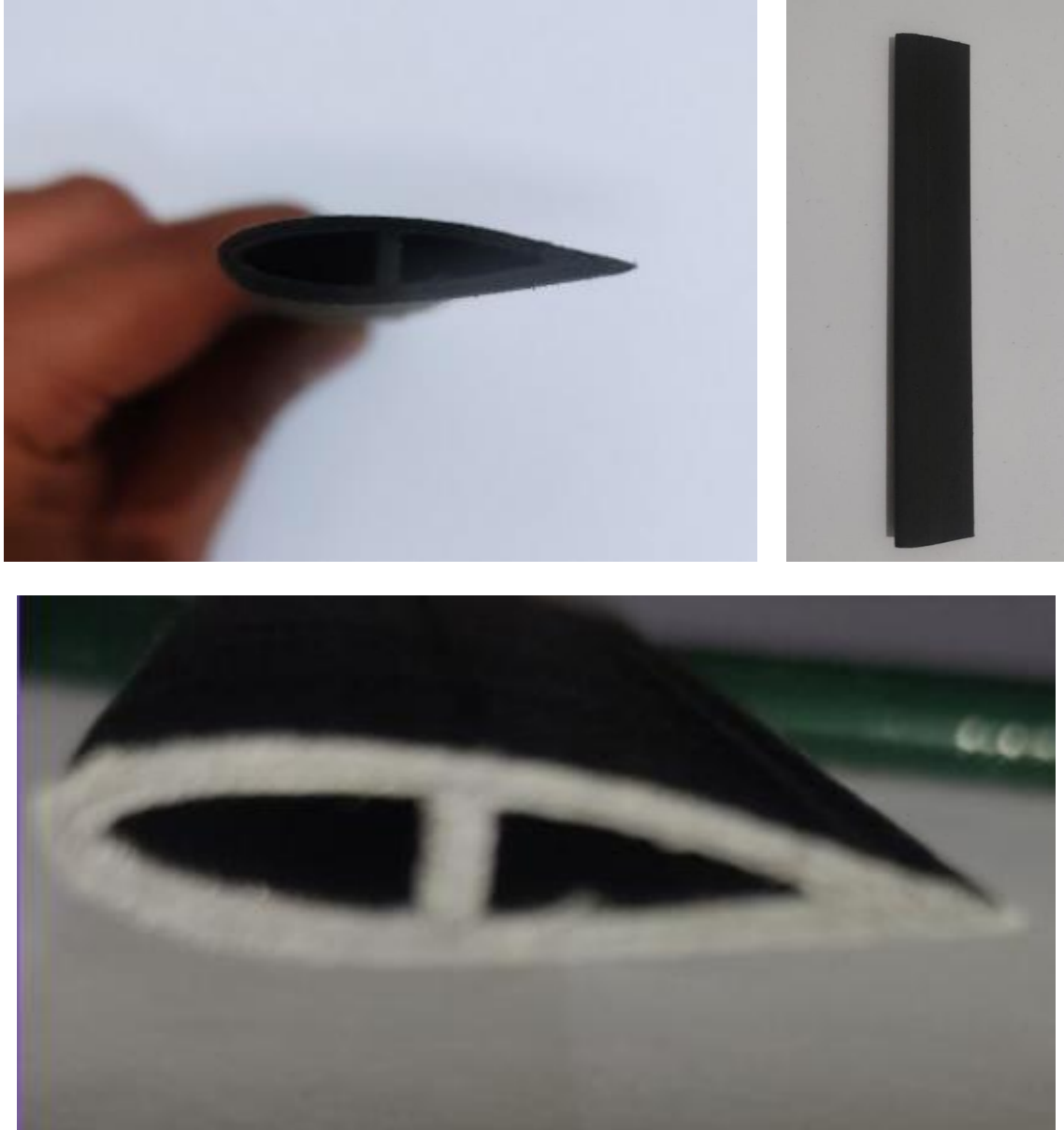
En este apéndice se dan las coordenadas del perfil aerodinámico DU06W200, Estas son las coordenadas se utilizaron en el modelo CAD para la realización de la simulación aerodinámica y estructural.

x/c	Z/c	x/c	Z/c	x/c	Z/c	x/c	Z/c
1.00003	0.00033	0.424787	0.095466	0.99997	-0.001169	0.440534	-0.089484
0.995071	0.000991	0.413003	0.096877	0.994978	-0.001364	0.428714	-0.090318
0.988745	0.00179	0.40129	0.098182	0.988627	-0.001544	0.416892	-0.091073
0.980844	0.002821	0.389595	0.099392	0.980723	-0.001708	0.405087	-0.091739
0.971354	0.004134	0.377963	0.100483	0.971321	-0.001989	0.393277	-0.092315
0.960703	0.005676	0.366361	0.101453	0.960662	-0.002393	0.381483	-0.092805
0.949361	0.00738	0.354814	0.102282	0.949424	-0.002872	0.369702	-0.093194
0.937673	0.009188	0.343266	0.102969	0.93803	-0.00347	0.357917	-0.093494
0.925781	0.011064	0.331726	0.103514	0.926586	-0.004214	0.346164	-0.093688
0.913799	0.012967	0.320178	0.103912	0.91515	-0.005108	0.334386	-0.093785
0.901782	0.014892	0.308593	0.10418	0.903719	-0.00616	0.322646	-0.093783
0.889754	0.016828	0.297054	0.104309	0.892291	-0.007367	0.310901	-0.093673
0.877727	0.018779	0.285489	0.10429	0.88086	-0.008731	0.299179	-0.093459
0.865704	0.020741	0.273928	0.104142	0.869394	-0.010249	0.287455	-0.093136
0.853697	0.022719	0.262419	0.103851	0.857897	-0.011903	0.275771	-0.092709
0.841679	0.024714	0.25092	0.103406	0.846387	-0.013685	0.264104	-0.09216
0.829686	0.026717	0.239441	0.102815	0.83486	-0.015593	0.252445	-0.091498
0.81774	0.028741	0.228016	0.102074	0.823301	-0.017617	0.240824	-0.090722
0.805771	0.030796	0.216637	0.101172	0.811752	-0.019742	0.229267	-0.089822
0.793799	0.032857	0.205318	0.100103	0.800182	-0.021981	0.217718	-0.088783
0.781854	0.034939	0.194052	0.098861	0.788585	-0.024315	0.206246	-0.087627
0.769889	0.037053	0.182866	0.097447	0.77696	-0.02674	0.194835	-0.08631
0.757924	0.03918	0.171792	0.095845	0.765344	-0.029234	0.183459	-0.084857
0.746007	0.041327	0.160792	0.094042	0.753726	-0.031815	0.172199	-0.083251
0.734077	0.043511	0.149938	0.092038	0.742078	-0.034463	0.161017	-0.081472
0.722128	0.045716	0.13917	0.089806	0.730458	-0.03718	0.149918	-0.07952
0.710225	0.047936	0.128563	0.087366	0.718795	-0.039964	0.138941	-0.077391
0.698325	0.050176	0.118128	0.084689	0.707153	-0.042807	0.128085	-0.075067
0.686453	0.052417	0.107876	0.081772	0.69543	-0.045719	0.117402	-0.072555
0.674589	0.054685	0.097863	0.07861	0.683701	-0.048657	0.106888	-0.069816
0.662687	0.056949	0.088085	0.075175	0.671981	-0.051627	0.096591	-0.066865
0.650773	0.059221	0.078586	0.071484	0.660268	-0.05461	0.08651	-0.063669
0.638859	0.06148	0.069402	0.067515	0.648597	-0.057558	0.076717	-0.060244
0.626934	0.063716	0.060586	0.063284	0.63703	-0.060434	0.067244	-0.056572
0.615006	0.065934	0.052175	0.058794	0.625585	-0.063191	0.058159	-0.052655
0.603147	0.068109	0.044254	0.054063	0.614212	-0.065812	0.049507	-0.048508
0.591292	0.070229	0.036871	0.049124	0.60288	-0.068293	0.041417	-0.044177
0.57943	0.072307	0.030107	0.044037	0.591592	-0.07062	0.03397	-0.039704
0.567547	0.074343	0.024057	0.038898	0.58032	-0.072781	0.027288	-0.035182
0.555676	0.076339	0.018781	0.033816	0.569025	-0.074781	0.021456	-0.03074
0.543792	0.078282	0.014332	0.02893	0.557686	-0.07662	0.016534	-0.026484
0.531879	0.080195	0.010681	0.024359	0.546245	-0.078317	0.012477	-0.022518
0.519984	0.08206	0.007756	0.020195	0.534692	-0.079904	0.009224	-0.018871
0.508056	0.083885	0.00546	0.016479	0.523068	-0.081386	0.006653	-0.015533
0.496115	0.085679	0.00372	0.013151	0.511354	-0.08278	0.00463	-0.012507
0.484187	0.087431	0.002419	0.010168	0.499605	-0.084091	0.003065	-0.009755
0.472242	0.089147	0.001446	0.007489	0.487811	-0.085322	0.001862	-0.007256
0.460354	0.090814	0.000702	0.005102	0.475993	-0.08648	0.00098	-0.004968
0.448446	0.092426	0.000259	0.002932	0.464176	-0.087561	0.000385	-0.002855
0.436599	0.09399	0.000038	0.000944	0.452348	-0.088562	0.000046	-0.000911

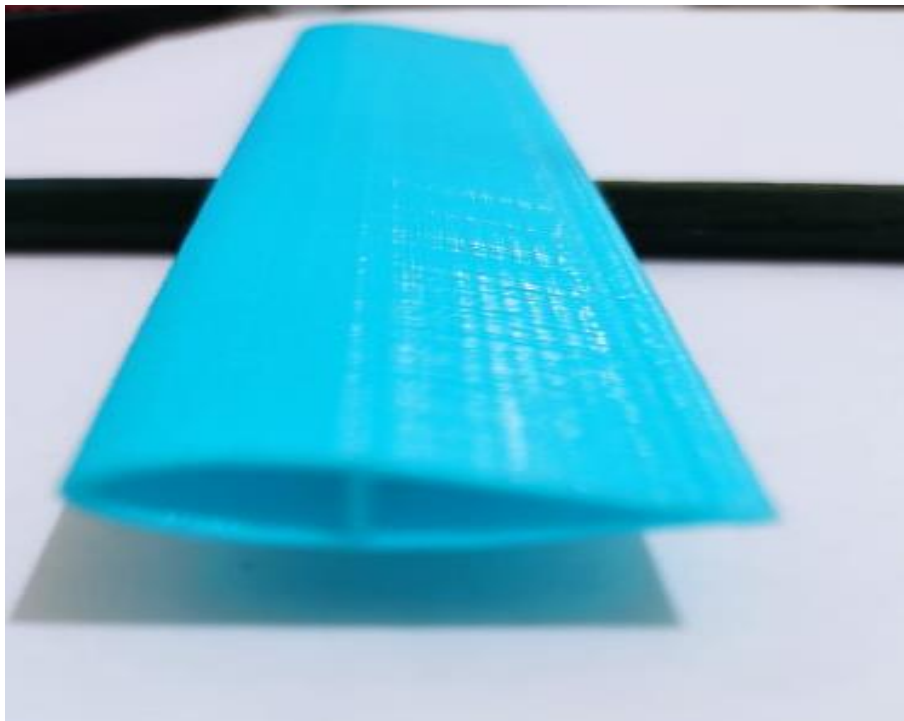
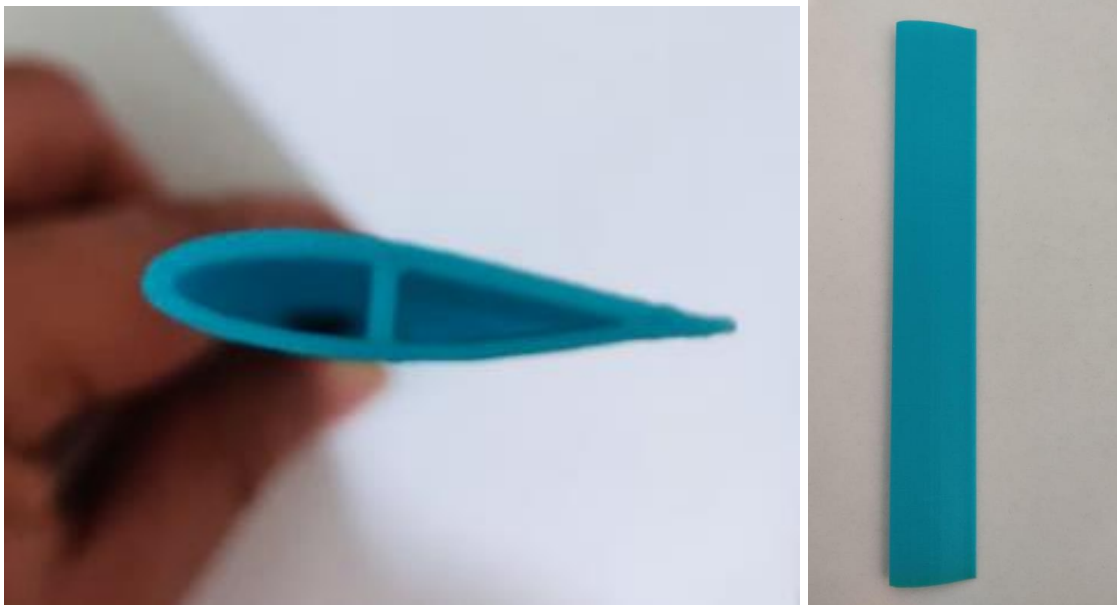
Nota: adaptado de AIRFOILTOOLS.

Apéndice B

En este apéndice se muestra el prototipo impreso en 3D del perfil DU06W200 a escala 1:10.



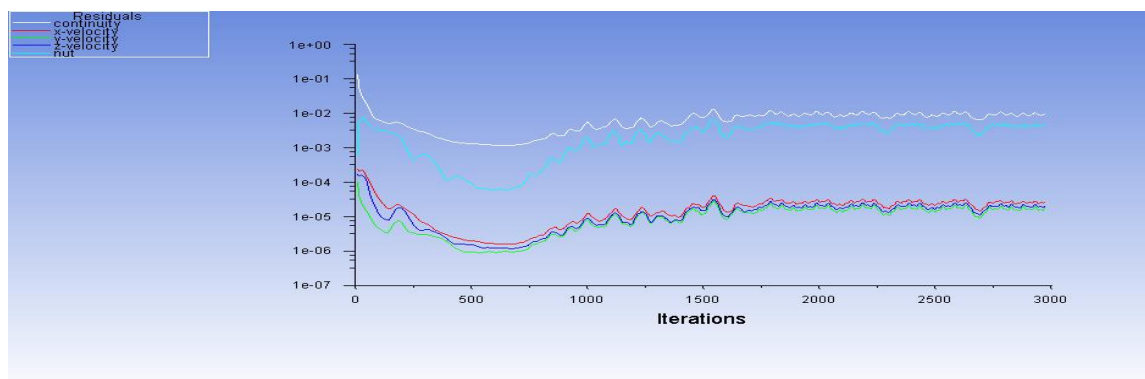
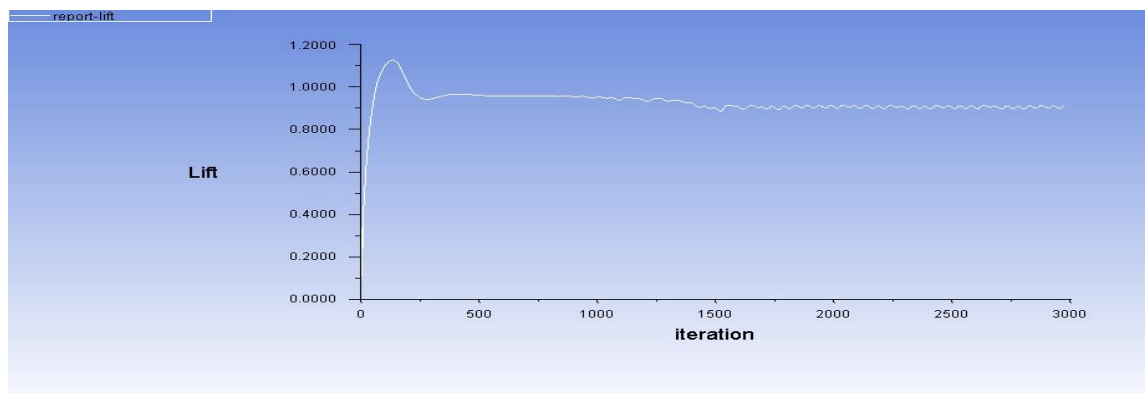
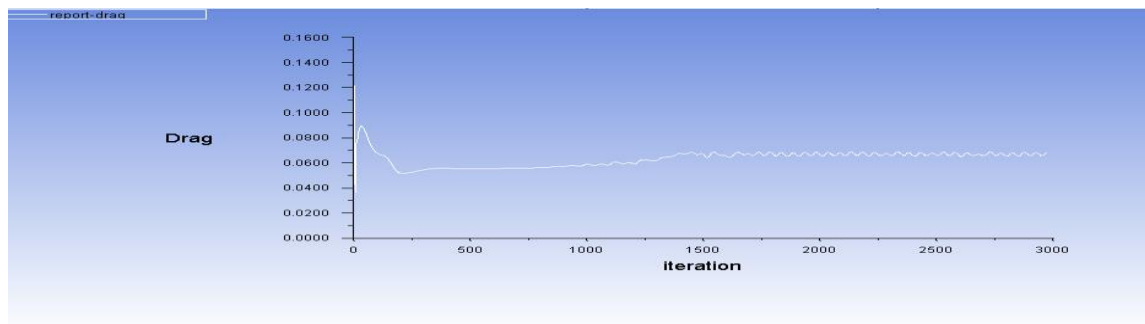
Nota: Prototipo Nylon X Adaptado del Autor.

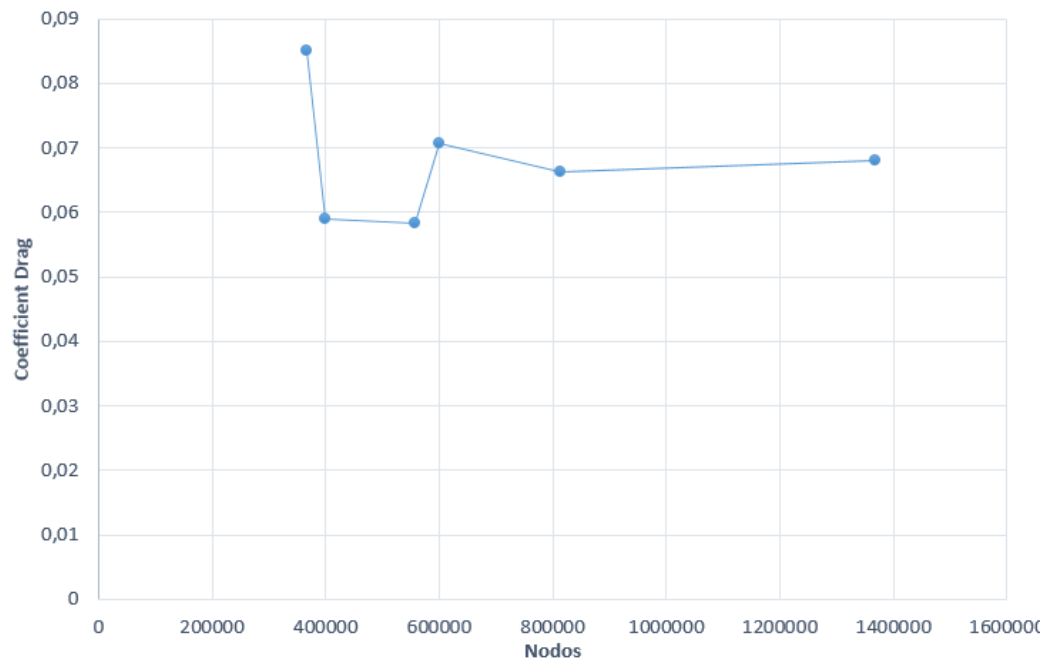
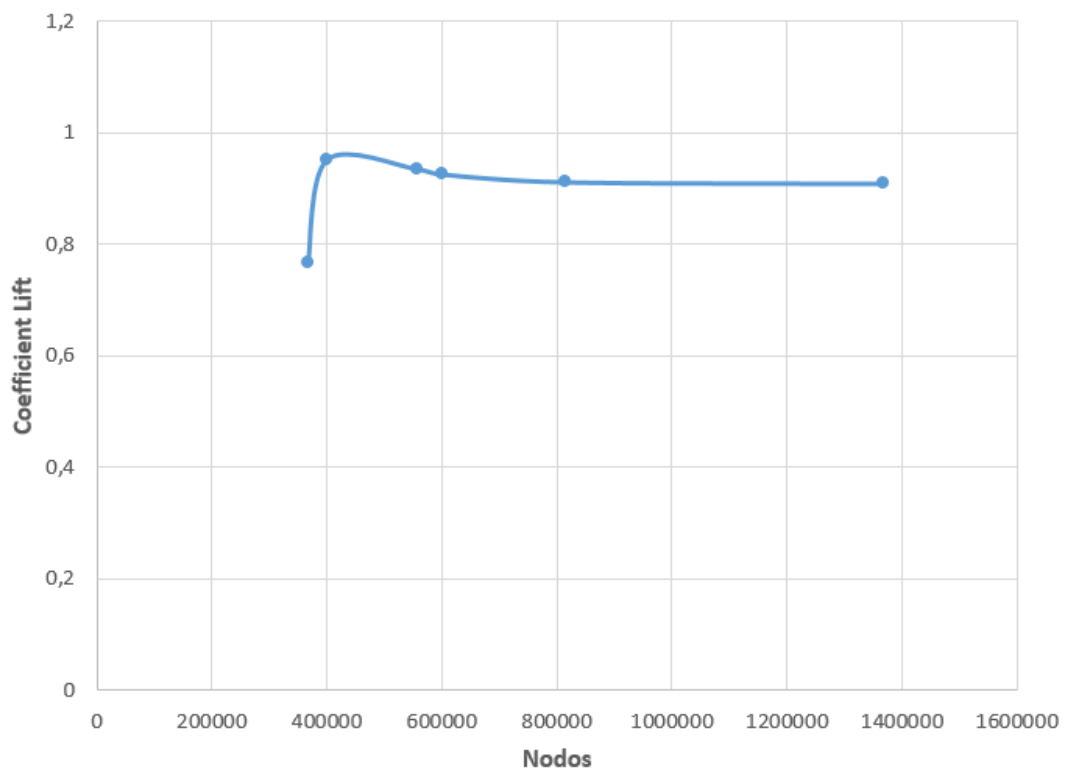


Nota: Prototipo PLA, adaptado del Autor.

Apéndice C

En este apéndice se muestran los resultados de los coeficientes de arrastre y levantamiento de la simulación del perfil aerodinámico DU06W200, con una velocidad de entrada de 5.73m/s a un ángulo de ataque de 10°. La velocidad promedio del flujo es una velocidad baja lo cual va a producir un bajo número de Reynolds por lo que hace este modelo Sparlart-Allmaracas sea ideal para realizar la simulación.



C_D**C_L**

Las consecuencias de esta caracterización de los perfiles se encuentran reflejadas en los coeficientes de sustentación y arrastre, los cuales tomaron los valores siguientes:

PERFIL	Cl	Cd
NACA0018	0.707	0.0801
DU06W200	0.876	0.0853

Nota: Adaptado de García 2014.

Porcentaje de error.

PERFIL	Cl	Cd	$\%Cl_{error}$	$\%Cd_{error}$
DU06W200	0,9265874	0,0707457	5.77%	17.06%

Nota: Se hace una comparación entre los coeficientes obtenidos con García y los del presente documento, se obtiene un porcentaje de error de 5.77% para el coeficiente lift y un error del 17.06% para el coeficiente Drag.

Apéndice D

En este apéndice se muestra la Ficha técnica de material a imprimir.

TECHNICAL DATA SHEET - Nylon X

Commercial name: MatterHackers Nylon X Carbon Fiber Filament
 Raw material: Carbon fiber reinforced polyamide
 Designation: 3D printing applications
 Manufacturer: MatterHackers, Inc.

Material Specifications		
PROPERTY	VALUE	TEST METHOD - ISO
Density	1.00g/cm ³	1183
Melting point	180°C	11357
Tensile Modulus	6000 MPa	527
Tensile Strength	100 MPa	527
Impact strength	60 kJ / m ²	179 / 2-1eU
Shore hardness	110 MPa	2039-1
Heat deflection temp. HDT/A	155°C	75
Thermal expansion coefficient	0.5 10 ⁻⁴ / K	11359
Max usage Temp. long term	90-120°C	2578
Max usage Temp. short term	150°C	2578D
Dielectric strength	-	IEC 60243
Specific volume resistivity	10 ³¹ Ωm	IEC 60243
Flammability	HB	1210
Linear mould shrinkage	0.3	294

Nota: Adaptado del print 3D.

Apéndice E

En el presente anexo se muestran las principales características de dimensiones del aerogenerador vertical.

Parámetros	Valores
Diámetro [D]	1,95[m]
Altura [H]	1,62[m]
Longitud de cuerda [c]	0,265[m]
Área de Barrido [Ab]	3,17[m ²]
Tip Speed ratio [TSR]	3
Coefficiente de potencia [Cp]	0,35
Solidez [σ]	0,4
N° álabes	3

Nota: Adaptado del autor.