



Implementación de un banco de pruebas de  
laboratorio con rotores Savonius que permita la  
caracterización de curvas de rendimiento

**Anderson David Torres Avila**

**Adalberto Ángel Bermúdez Ortiz**

**Universidad Antonio Nariño**

Programa Ingeniería Mecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Puerto Colombia, Colombia

2023



Implementación de un banco de pruebas de laboratorio  
con rotores Savonius que permita la caracterización de  
curvas de rendimiento

**Anderson David Torres Avila**

**Adalberto Ángel Bermúdez Ortiz**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Ingeniero Mecánico**

Director:

MSc. Jonathan Fábregas Villegas

Codirector:

PhD. Rafael Antonio Ramírez Restrepo

Línea de Investigación:

Energías renovables y transición energética.

**Universidad Antonio Nariño**

Programa Ingeniería Mecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Puerto Colombia, Colombia

2023



## NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado

\_\_\_\_\_.

Cumple con los requisitos para optar

Al título de \_\_\_\_\_.

\_\_\_\_\_

Firma del Tutor

\_\_\_\_\_

Firma Jurado

\_\_\_\_\_

Firma Jurado



## Contenido

**Pág.**

<b>Resumen.....</b>	<b>1</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>2</b>
<b>Capítulo 1.....</b>	<b>3</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>3</b>
<b>1.1 Estado del arte .....</b>	<b>5</b>
<b>1.2 Planteamiento del problema.....</b>	<b>12</b>
<b>1.3 Objetivos .....</b>	<b>14</b>
1.3.1 Objetivo general .....	14
1.3.2 Objetivos específicos.....	14
<b>1.4 Justificación .....</b>	<b>14</b>
<b>Capítulo 2.....</b>	<b>15</b>
<b>Marco teórico .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1 Energía eólica.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2 Aerogeneradores.....</b>	<b>15</b>
<b>2.3 Turbinas tipo Darrieus .....</b>	<b>16</b>
<b>2.4 Turbina tipo Savonius.....</b>	<b>16</b>
<b>2.5 Límite de Betz.....</b>	<b>19</b>
<b>2.6 Ley de inducción electromagnética.....</b>	<b>22</b>
<b>2.7 Bancos de laboratorio .....</b>	<b>23</b>
<b>2.8 Metrología.....</b>	<b>23</b>
<b>2.9 Medición.....</b>	<b>23</b>
<b>2.10 Instrumentos de medición .....</b>	<b>23</b>
<b>2.11 Medición de las corrientes de viento.....</b>	<b>24</b>
<b>2.12 Anemómetro .....</b>	<b>24</b>
<b>2.13 Multímetro .....</b>	<b>24</b>
<b>2.14 Tacómetro .....</b>	<b>25</b>
<b>2.15 Dinamómetro .....</b>	<b>25</b>
<b>Capítulo 3.....</b>	<b>26</b>

<b>Metodología .....</b>	<b>26</b>
<b>3.1 Metodología tipo cascada.....</b>	<b>26</b>
<b>3.2 Identificación y caracterización de la geometría de los rotores Savonius.....</b>	<b>27</b>
<b>3.3 Potencia teórica .....</b>	<b>29</b>
<b>3.4 Diseño CAD de rotores y estructura del banco .....</b>	<b>38</b>
<b>3.5 Materiales y manufactura: .....</b>	<b>45</b>
<b>3.6 Simulación fluidodinámica .....</b>	<b>51</b>
<b>3.7 Construcción y ensamble del banco.....</b>	<b>72</b>
<b>Capítulo 4.....</b>	<b>88</b>
<b>Pruebas, Resultados y análisis .....</b>	<b>88</b>
<b>4.1 Condiciones para el uso del banco y la realización de pruebas .....</b>	<b>88</b>
<b>4.2 Instrumentos de medición del banco para toma de datos .....</b>	<b>89</b>
<b>4.3 Pruebas y resultados: .....</b>	<b>92</b>
<b>Capítulo 5.....</b>	<b>103</b>
<b>Conclusiones, recomendaciones y trabajos a futuro.....</b>	<b>103</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>107</b>
<b>Referencias Bibliográficas.....</b>	<b>111</b>

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.1.1</b> Capacidad mundial de energía eólica instalada en 2021. ....	6
<b>Figura 1.1.2</b> Comparación actual y proyecciones de la energía eólica necesaria para la siguiente década. ....	7
<b>Figura 1.1.3:</b> Atlas de viento anual de Colombia. ....	8
<b>Figura 1.1.4:</b> Velocidad promedio del viento según diversas estaciones meteorológicas de Colombia.....	9
<b>Figura 1.1.5:</b> Rosa del vientos según la estación meteorológica del aeropuerto Ernesto Cortissoz. ....	9
<b>Figura 1.1.6:</b> Curvas características de diversos rotores Savonius evaluando el coeficiente de potencia “Cp” en función de la velocidad específica del rotor “TSR”. ....	11
<b>Figura 1.1.7:</b> Curvas características para diversos tipos de rotores evaluando el coeficiente de potencia “Cp” en función de la velocidad específica del viento “λ” .....	11
<b>Figura 1.1.8:</b> Banco de laboratorio de un generador eólico tipo Savonius disponible en el mercado. ....	12
<b>Figura 2.2.1:</b> Aerogeneradores de eje horizontal y vertical.....	15
<b>Figura 2.3.1:</b> Aerogenerador de eje vertical tipo Darrieus. ....	16
<b>Figura 2.4.1</b> Geometría de un rotor Savonius.....	17
<b>Figura 2.4.2:</b> Variantes geométricas de las aspas de un rotor Savonius.....	17
<b>Figura 2.4.3:</b> Simulación fluidodinámica y representación ilustrativa de un rotor Savonius con la variante de separación en sus aspas para reducir la sobrepresión.....	18
<b>Figura 2.5.1:</b> Flujo de aire que circula a través de un área “A” la cual es barrida por el rotor. ..	19
<b>Figura 2.5.2:</b> Limite de Betz para múltiples variantes de turbinas eólicas.....	22
<b>Figura 2.6.1:</b> Experimento de Faraday - inducción electromagnética.....	22
<b>Figura 2.12.1:</b> Anemómetro digital.....	24
<b>Figura 2.13.1:</b> Multímetro digital. ....	24
<b>Figura 2.14.1:</b> Tacómetro laser digital.....	25
<b>Figura 2.15.1:</b> Dinamómetro. ....	25
<b>Figura 3.1.1:</b> Diagrama de la metodología tipo cascada planteada. ....	26
<b>Figura 3.3.1:</b> Identificación de las dimensiones necesarias para hallar la relación que existe entre la separación de las aspas y el diámetro de las mismas. ....	29
<b>Figura 3.3.2:</b> Cp y Cm para un rotor Savonius compuesto por dos aspas semicilíndricas de 15 cm de diámetro y 38 cm de altura, y una relación e/d = 1/6.....	30
<b>Figura 3.3.3:</b> Coeficientes aerodinámicos de resistencia "C" para formas de semiesfera y semicilindro.....	32
<b>Figura 3.3.4:</b> Diagrama de análisis de la acción del viento en un rotor de arrastre diferencial...	32
<b>Figura 3.4.1:</b> Diseño CAD rotor Savonius convencional. ....	40

<b>Figura 3.4.2:</b> Diseño CAD rotor Savonius helicoidal.....	40
<b>Figura 3.4.3:</b> Diseño CAD del soporte para el banco.....	40
<b>Figura 3.4.4:</b> Diseño CAD de chumacera para soporte del eje de los rotores. ....	41
<b>Figura 3.4.5:</b> Eje para rotores Savonius.....	41
<b>Figura 3.4.6:</b> Diseño CAD de soporte para generador eléctrico.....	42
<b>Figura 3.4.7:</b> Diseño CAD del generador eléctrico. ....	42
<b>Figura 3.4.8:</b> Diseño CAD de polea para transmisión de movimiento del eje. ....	43
<b>Figura 3.4.9:</b> Diseño CAD correa de transmisión para poleas. ....	43
<b>Figura 3.4.10:</b> Ensamble del banco en Onshape “vista isométrica”.....	44
<b>Figura 3.4.11:</b> Ensamble del banco en Onshape "vista frontal". ....	44
<b>Figura 3.4.12:</b> Ensamble del banco en Onshape "Vista lateral derecha".....	44
<b>Figura 3.4.13:</b> Ensamble del banco en Onshape "Vista superior".....	45
<b>Figura 3.4.14:</b> Render del ensamble CAD del banco. ....	45
<b>Figura 3.6.1:</b> Modelo estándar del rotor extraído de Onshape. ....	56
<b>Figura 3.6.2:</b> Modelos simplificado del rotor extraído de Onshape para efectuar el análisis 2D.....	56
<b>Figura 3.6.3:</b> Importación de la geometría a ANSYS.....	57
<b>Figura 3.6.4:</b> Creación de las secciones del sistema y configuración del mallado.....	57
<b>Figura 3.6.5:</b> Generación del mallado de la turbina y la zona de generación del viento. ....	58
<b>Figura 3.6.6:</b> Vista detallada del mallado en el área del rotor Savonius. ....	58
<b>Figura 3.6.7:</b> Vista ampliada del mallado en la zona de generación de viento. ....	59
<b>Figura 3.6.8:</b> Vista complementaria del mallado.....	59
<b>Figura 3.6.9:</b> Tabla estadística de la cantidad de elementos y nodos del mallado.....	60
<b>Figura 3.6.10:</b> Grafica generadas para validar calidad de los elementos del mallado.....	60
<b>Figura 3.6.11:</b> Histograma de calidad de elementos de mallado. ....	60
<b>Figura 3.6.12:</b> Espectro métrico de mallado para evaluar su calidad. ....	61
<b>Figura 3.6.13:</b> Grafica de la calidad de oblicuidad de elementos del mallado “Skewness”.....	62
<b>Figura 3.6.14:</b> Grafica de calidad ortogonal de los elementos del mallado “Orthogonal Quality”. .....	62
<b>Figura 3.6.15:</b> Configuración de parámetros para la realización de la simulación fluidodinámica en ANSYS FLUENT .....	63
<b>Figura 3.6.16:</b> Configuración de parametros de ANSYS FLUENT para ejecución de calculos de simulación. ....	64
<b>Figura 3.6.17:</b> Simulación fluidodinámica en ANSYS FLUENT .....	64
<b>Figura 3.6.18:</b> Simulación fluidodinámica en ANSYS FLUENT a 1.5 segundos de transición. ....	65
<b>Figura 3.6.19:</b> Simulación fluidodinamica en ANSYS FLUENT a 2.5 segundos de transicion. ....	65
<b>Figura 3.6.20:</b> Simulación fluidodinámica en ANSYS FLUENT a 3.5 segundos de transición. ....	66
<b>Figura 3.6.21:</b> Simulación fluidodinámica en ANSYS FLUENT a 5 segundos de transición....	66
<b>Figura 3.6.22:</b> Simulación fluidodinámica en ANSYS FLUENT a 7.5 segundos de transición. ....	67
<b>Figura 3.6.23:</b> Simulación fluidodinámica en ANSYS FLUENT a 10 segundos de transición..	67
<b>Figura 3.6.24:</b> Desarrollo del flujo en el centro del rotor. ....	68

<b>Figura 3.6.25:</b> Grafica de residuales de la simulación fluidodinámica en ANSYS FLUENT. ...	69
<b>Figura 3.6.26:</b> Grafica de potencia vs tiempo del rotor Savonius simulado en Fluent.....	70
<b>Figura 3.6.27:</b> Curva de potencia del rotor Savonius. ....	70
<b>Figura 3.7.1:</b> Manufactura de la "base del banco" .....	72
<b>Figura 3.7.2:</b> Manufactura de soporte para generador eléctrico. ....	73
<b>Figura 3.7.3:</b> Estructura diseñada para el desplazamiento vertical del soporte del generador. ...	73
<b>Figura 3.7.4:</b> Acople del soporte principal y auxiliar para el desplazamiento vertical. ....	74
<b>Figura 3.7.5:</b> Soporte auxiliar en rieles para desplazamiento horizontal.....	74
<b>Figura 3.7.6:</b> Ensamblado completo de la estructura para el soporte del generador. ....	74
<b>Figura 3.7.7:</b> Torneado de material para obtención de la pieza.....	75
<b>Figura 3.7.8:</b> Desbaste con buril cónico para torneado de la garganta de la polea.....	75
<b>Figura 3.7.9:</b> Acabado final de la pieza. ....	76
<b>Figura 3.7.10:</b> Eje con polea fabricado.....	76
<b>Figura 3.7.11:</b> Chumacera adquirida. ....	77
<b>Figura 3.7.12:</b> Eje para los rotores.....	77
<b>Figura 3.7.13:</b> Ensamble de eje en chumacera. ....	78
<b>Figura 3.7.14:</b> Poleas adquiridas.....	78
<b>Figura 3.7.15:</b> Desbaste de la ranura para el eje. ....	79
<b>Figura 3.7.16:</b> Medición y rectificación de la ranura para el eje. ....	79
<b>Figura 3.7.17:</b> Torneado con buril para ampliación con precisión. ....	79
<b>Figura 3.7.18:</b> Taladrado para ranura con rosca para el tornillo prisionero. ....	80
<b>Figura 3.7.19:</b> Redimensionamiento de las poleas finalizado. ....	80
<b>Figura 3.7.20:</b> Ajuste de separación entre las aspas. ....	81
<b>Figura 3.7.21:</b> Ensamblado de rotor Savonius de geometría convencional.....	81
<b>Figura 3.7.22:</b> Lijado de aspas.....	82
<b>Figura 3.7.23:</b> Tabla de tornillería y elementos de sujeción usados para el ensamblado del rotor Savonius de geometría helicoidal. ....	82
<b>Figura 3.7.24:</b> Ensamblado del rotor Savonius de geometría helicoidal. ....	83
<b>Figura 3.7.25:</b> Ensamblado del rotor Savonius de geometría helicoidal. ....	83
<b>Figura 3.7.26:</b> Pegamento usado para unión de las aspas.....	83
<b>Figura 3.7.27:</b> Lijado de aspas.....	84
<b>Figura 3.7.28:</b> Pintado de partes con base anticorrosiva gris. ....	84
<b>Figura 3.7.29:</b> Pintado total de la partes. ....	85
<b>Figura 3.7.30:</b> Pintado de aspas de geometría convencional. ....	85
<b>Figura 3.7.31:</b> Ensamblado del banco con rotor de geometria convencional.....	85
<b>Figura 3.7.32:</b> Vista complementaria del ensamble. ....	86
<b>Figura 3.7.33:</b> Vista complementaria del ensamble. ....	86
<b>Figura 3.7.34:</b> Ensamble del banco con rotor de geometría helicoidal. ....	86
<b>Figura 3.7.35:</b> Vista complementaria del ensamble. ....	87
<b>Figura 3.7.36:</b> Vista complementaria del ensamble. ....	87

<b>Figura 4.3.1:</b> Diagramas para la caracterización de las corrientes de viento suministradas con el soplador.....	92
<b>Figura 4.3.2:</b> Medidas y toma de datos para la caracterización del flujo. ....	92
<b>Figura 4.3.3:</b> Vista adicional del proceso de caracterización del flujo.....	93
<b>Figura 4.3.4:</b> Caracterización del flujo de viento - "1.11 m/s".....	93
<b>Figura 4.3.5:</b> Caracterización del flujo de viento - "2.1 m/s".....	94
<b>Figura 4.3.6:</b> Caracterización del flujo de viento - "3.07 m/s".....	94
<b>Figura 4.3.7:</b> Caracterización del flujo de viento - "1.19 m/s".....	95
<b>Figura 4.3.8:</b> Caracterización del flujo de viento - "2.02 m/s".....	95
<b>Figura 4.3.9:</b> Caracterización del flujo de viento - "3.32 m/s".....	96
<b>Figura 4.3.10:</b> Diagrama del montaje para el frenado del rotor Savonius.....	96
<b>Figura 4.3.11:</b> Montaje físico en el banco. ....	97
<b>Figura 4.3.12:</b> Vista auxiliar del montaje en físico.....	97
<b>Figura 4.3.13:</b> Medición de las RPM del eje del rotor y de parámetros eléctricos.....	98
<b>Figura 4.3.14:</b> Curva de rendimiento generadas para el rotor Savonius de geometría convencional. .....	100
<b>Figura 4.3.15:</b> Curva de rendimiento generadas para el rotor Savonius de geometría helicoidal. .....	102

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1:</b> Tabla de análisis comparativo realizado para cuatro geometrías de rotores Savonius..	27
<b>Tabla 2:</b> Tabla de dimensiones generales del rotor Savonius convencional.....	28
<b>Tabla 3:</b> Tabla de dimensiones generales del rotor Savonius helicoidal. ....	29
<b>Tabla 4:</b> Tabla de resultados teóricos de la potencia máxima para los rotores Savonius. ....	37
<b>Tabla 5:</b> Tabla de análisis comparativo de software para diseño CAD. ....	39
<b>Tabla 6:</b> Tabla característica del material designado para la fabricación de las aspas del rotor con geometría convencional. ....	46
<b>Tabla 7:</b> Tabla característica del material designado para la fabricación de las aspas del rotor con geometría helicoidal.....	46
<b>Tabla 8:</b> Tabla característica del elemento y material designado para el eje de rotación del banco. ....	47
<b>Tabla 9:</b> Tabla característica de chumacera adquirida. ....	48
<b>Tabla 10:</b> Tabla característica de la base del banco.....	48
<b>Tabla 11:</b> Tabla característica del soporte para el generador eléctrico.....	49
<b>Tabla 12:</b> Tabla característica de generador eléctrico. ....	50
<b>Tabla 13:</b> Tabla característica poleas de transmisión. ....	50
<b>Tabla 14:</b> Tabla característica de la correa de transmisión.....	51
<b>Tabla 15:</b> Tabla de dimensiones de pieza fabricada. ....	76
<b>Tabla 16:</b> Tabla de tornillería y elementos de sujeción usados para el ensamblado del rotor Savonius de geometría convencional.....	81
<b>Tabla 17:</b> Tabla de característica del soplador de viento.....	88
<b>Tabla 18:</b> Tabla característica del anemómetro. ....	89
<b>Tabla 19:</b> Tabla característica del tacómetro digital laser. ....	90
<b>Tabla 20:</b> Tabla característica del multímetro digital.....	90
<b>Tabla 21:</b> Tabla característica de dinamómetro digital.....	91
<b>Tabla 22:</b> Tabla de datos del rotor convencional con una velocidad de 1.11 m/s. ....	98
<b>Tabla 23:</b> Tabla de datos del rotor convencional con una velocidad de 2.1 m/s. ....	99
<b>Tabla 24:</b> Tabla de datos del rotor convencional con una velocidad de 3.07 m/s. ....	99
<b>Tabla 25:</b> Tabla de datos del rotor helicoidal con una velocidad de 1.19 m/s.....	100
<b>Tabla 26:</b> Tabla de datos del rotor helicoidal con una velocidad de 2,02 m/s.....	101
<b>Tabla 27:</b> Tabla de datos del rotor helicoidal con una velocidad de 3.32 m/s.....	101

## Nomenclatura

<p><math>v</math>    <i>Velocidad</i></p> <p><math>A</math>    <i>Área</i></p> <p><math>F</math>    <i>Fuerza</i></p> <p><math>\dot{m}</math>    <i>Flujo másico / Caudal másico</i></p> <p><math>\rho</math>    <i>Densidad del aire</i></p> <p><math>P</math>    <i>Potencia</i></p> <p><math>P_{max}</math> <i>Potencia máxima</i></p> <p><math>P_d</math>    <i>Potencia disponible</i></p> <p><math>C_p</math>    <i>Coefficiente de potencia</i></p> <p><math>a</math>    <i>factor de incidencia</i></p> <p><math>C_m</math>    <i>Coefficiente de par</i></p> <p><math>D</math>    <i>Diámetro del rotor</i></p> <p><math>d</math>    <i>Diámetro del aspa</i></p> <p><math>e</math>    <i>Separación de las aspas</i></p> <p><math>\lambda</math>    <i>Velocidad específica</i></p> <p><math>\Omega</math>    <i>Velocidad angular</i></p> <p><math>R</math>    <i>Radio del rotor</i></p> <p><math>C</math>    <i>Coefficiente aerodinámico</i></p> <p><math>w</math>    <i>Velocidad relativa</i></p> <p><math>u</math>    <i>Velocidad lineal</i></p> <p><math>k</math>    <i>Energía cinética</i></p> <p><math>e</math>    <i>Disipación de la energía cinética</i></p> <p><math>m</math>    <i>Momento / Torque</i></p>	<p><math>P</math>    <i>Momento lineal</i></p> <p><math>\pi</math>    <i>Momento angular</i></p> <p><math>I</math>    <i>Inercia   Masa en el momento de inercia</i></p> <p><math>G</math>    <i>Generación de energía cinética turbulenta</i></p> <p><math>m_{aero}</math>    <i>Par aerodinámico</i></p> <p><math>k_{rotacional}</math>    <i>Constante elastica rotacional</i></p> <p><math>m_{ext}</math>    <i>Par externo</i></p> <p><math>\varepsilon</math>    <i>Tasa de dicipación de energía turbulenta</i></p> <p><math>\mu^T</math>    <i>Viscocidad turbulenta</i></p>
--	--

## *Dedicatoria*

*En el asombroso mundo del aprendizaje se viven experiencias maravillosas, pero ninguna será más satisfactoria que servir con orgullo y honestidad a la humanidad con los conocimientos adquiridos a lo largo de la travesía del aprendizaje.*

*Anderson David Torres Avila.*

## ***Agradecimientos***

### ***Anderson David Torres Avila***

Agradezco de antemano a Dios y a la virgen de Fátima por darme la licencia, salud e inteligencia para afrontar cada uno de los retos impuestos a lo largo de esta maravillosa travesía. A mis padres y hermano por su amor, apoyo, ejemplo y consejos a lo largo de toda mi vida, han sido mi motivo de inspiración y fuerza para seguir adelante en pro de conseguir la superación cada día. Quiero agradecer también a todos mis compañeros de carrera, a mis amigos, familiares y seres queridos que me brindaron su mano, palabras de aliento y aportaron su granito de arena a lo largo de la carrera en momentos buenos y difíciles. Por último, quiero expresar mi gratitud a toda la planta de docentes de la universidad Antonio Nariño Sede Puerto Colombia, por brindarme su amistad, conocimientos y guiarme a lo largo de mi trayectoria académica; en especial al PhD Rafael Antonio Ramírez Restrepo por su invaluable ayuda y aportes y al MSc. Jonathan Fábregas Villegas por brindarme su amistad, guía, paciencia y conocimientos a lo largo las clases y la ejecución de esta tesis; siempre recordare y elogiare su forma ejemplar de impartir las clases permitiéndonos adquirir conocimientos de forma clara y exacta.

### ***Adalberto Ángel Bermúdez Ortiz***

Agradezco primeramente a Dios por ser mi indudable apoyo a lo largo de mi vida y en especial en mi trayectoria académica, a mi familia, a mi esposa y a mis hijos por ser siempre el motor de mi vida y mi polo a tierra, agradezco por cada esfuerzo y que hicieron para brindarme su fuerza y comprensión en los buenos y malos momentos. Agradezco también a toda la planta de docentes de la universidad por todo su apoyo y conocimientos a lo largo de todos estos años y especialmente a mi compañero Anderson David Torres Avila por siempre brindarme una mano y su amistad a lo largo de toda nuestra trayectoria académica.

## Resumen

En este proyecto se efectuó la propuesta de implementar un banco de pruebas para laboratorio con el uso de rotores Savonius que permita la caracterización y obtención de sus curvas de rendimiento con el objetivo de realizar pruebas y adaptaciones enfocadas en el análisis del potencial de recurso eólico por parte de los estudiantes de la Universidad Antonio Nariño (UAN), sede Puerto Colombia. De este modo, el estudiantado puede fortalecer los conocimientos adquiridos a lo largo de su trayectoria educativa.

La motivación para planificar, ejecutar y completar el proyecto de forma idónea surgió del deseo de generar un aporte significativo a la calidad educativa de la UAN, Sede Puerto Colombia. Esto, por medio de un banco que permite realizar estudios, prácticas y análisis sobre la caracterización de las curvas de rendimiento de rotores Savonius que se pueden ver en la industria, el cual permite a los estudiantes de la carrera de ingeniería mecánica apropiarse los conocimientos que interactúan con este tipo de equipos.

La metodología adoptada para lograr los objetivos de este proyecto fue planteada en 4 fases que inician con una investigación en donde se identificaron los componentes y materiales preliminares para la construcción del banco. La segunda fase abarca el diseño del banco mediante el software CAD para su análisis, y la selección de los materiales con el fin de lograr su construcción e identificación de la instrumentación a implementar. Posteriormente, la tercera fase enmarca la elaboración del banco y la evaluación de su funcionalidad. Finalmente, la cuarta fase se dedicó a la caracterización y obtención de las curvas de rendimientos de los rotores Savonius para, posteriormente, hacer la realización de guías para laboratorio y de operación del banco.

Como resultado, se obtuvo un banco que cuenta con dos tipos de rotores Savonius con sus respectivas instrumentaciones para realizar la medición de factores que permiten la caracterización y obtención de sus curvas de rendimiento.

En conclusión, el banco desarrollado es idóneo en cuanto a aspectos de diseño y funcionamiento, logrando, adicionalmente, que este brinde a los estudiantes la posibilidad de fortalecer sus competencias y conocimientos en las materias afines al desarrollo y estudio de este tipo de rotores.

**Palabras clave: Banco de pruebas, curvas de rendimiento, Energía eólica, Rotor Savonius, Instrumentación de medición.**

## Abstract

This project proposed the implementation of a test bench for laboratory with the use of the Savonius rotors that allow the characterization and collection of their yield curves to do tests and adaptations focused on the potential analysis of Eolic resources by the Universidad Antonio Nariño (UAN)'s students from sede Puerto Colombia. Hence, students can strength their acquired knowledge throughout their educational careers.

The motivation to plan, conduct and complete the project effectively came from the initiative to make a significant contribution to the quality of education of the UAN, Sede Puerto Colombia, with a test bench that allows undertake studies, and analysis about the characterization of Savonius rotors' yield curves in the industry. This allows Engineering mechanics students to appropriate knowledge related to the interaction with this type of equipment.

The methodology adopted to achieve the project's aims is divided into 4 phases. It starts with an investigation focused on identifying the components and draft materials for the construction of the bench. The second phase brace the design of the bench through CAD for the analysis and selection of materials to utilize in the construction and instrumentation. Afterward, the third phase involves the elaboration and evaluation of the bench and its functionality. Finally, the fourth phase is centered in the characterization of the laboratory guides and the operation of the bench.

As a result, a bench with two types of Savonius rotors with its instrumentations to undertake the measurement of the factors that allows the characterization and attainment of their yield curves was developed.

In conclusion, the bench was ideally developed in terms of design aspects and functionality. Additionally, it brings to students the opportunity to reinforce their competences and knowledge in subjects related to the development and study of these types of rotors.

**Key words: Test bench, yield curves, Eolic energy, Savonius rotor, measurement instruments.**

## Capítulo 1

### Introducción

Este trabajo de grado nace basándose en la necesidad de poseer un banco de laboratorio para el área de energías eólicas de la UAN sede puerto Colombia enfocado a la caracterización y obtención de curvas de rendimiento de rotores Savonius convencionales, los cuales permitan a los estudiantes realizar prácticas formativas afines con su carrera.

La implementación de bancos de ensayos/bancos de pruebas de laboratorio en la educación universitaria a lo largo del tiempo ha sido pilar fundamental para el desarrollo y la formación de ingenieros capacitados con mejores competencias académicas; por ejemplo, ver [1].

Como también se expone en:

“El programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana cuenta con un curso de Mecanismos, donde se aplican fundamentos de la mecánica newtoniana para el análisis y diseño de dispositivos que transforman el movimiento, a través del uso de herramientas y procedimientos gráficos, analíticos, experimentales y computacionales. En este ámbito, las herramientas que facilitan la materialización física de los conceptos teóricos son un recurso valioso y de alto impacto para los estudiantes.” [1].

Basado en lo anterior, se puede decir que, así como otras universidades implementan esta técnica en su contenido curricular, descartándose por la compra, uso y desarrollo de proyectos de grado centrados en la implementación de los bancos, dándoles un enfoque como herramienta de ayuda al aprendizaje consiguiendo formar con mucha más calidad a los estudiantes y profesionales que egresan de esta, la Universidad Antonio Nariño no es ajena a este tipo de metodologías y proyectos, ya que mucho de los trabajos que reposan en los repositorios de esta, han sido desarrollados buscando conseguir el enfoque anteriormente mencionado, por ejemplo, ver [2].

A nivel internacional se tiene que diversos estudios sobre las energías renovables han ido encaminados a el desarrollo, análisis y simulación de proyectos con rotores Savonius con vistas a la generación de energía eólica, teniendo en cuenta factores como la eficiencia, la geometría y los modelos no convencionales que han ido surgiendo con el enriquecimiento de investigaciones realizadas a lo largo del tiempo. Ver [3] - [5].

Por lo cual, ha conllevado a que los rotores Savonius presenten diversas variantes con características muy interesantes para casos puntuales y generales al mismo tiempo,

encaminando a que ingenieros que se enfocan en el sector energético se vean encaminados a tener una mejor percepción y apropiación de equipos como estos.

Como lo expone el consejo profesional nacional de ingenierías mecánica, eléctrica y profesiones afines en la resolución 50 del 2 de septiembre del 2018:

“El ingeniero Mecánico con un amplio conocimiento de las ciencias físicas y matemáticas, de la teoría y la práctica, de la administración y la gestión, de los recursos naturales y con gran consideración por el medio ambiente y responsabilidad social y ética, realiza actividades de investigación, diseño, desarrollo, asesoría, operación, mantenimiento, administración, supervisión, gerenciales y de formación de nuevos ingenieros, relacionadas con máquinas y sistemas mecánicos. Las áreas de desempeño más importantes son: procesos de generación y conversión de energía, convencionales y no convencionales, procesos térmicos, mecánicos e hidráulicos”. [6].

Basado en lo anterior, se puede decir que, el perfil de salida del ingeniero mecánico está muy enfocado al sector energético y de la maquinaria que trabaja con esta para la generación de procesos mediante la conversión de diversas formas de energías en sus distintas esencias (eléctrica, mecánica, nuclear, etc.), por lo cual ha llevado a que el ingeniero mecánico en su formación educativa y profesional se vea enriquecido por conocimientos y experiencias que vinculen las áreas de electrotecnia, maquinas eléctricas, generación de energías entre otras.

La energía eólica ha sido motivo de estudio y evaluación a nivel mundial debido a la creciente y predominante tendencia de lograr una transición energética de energías fósiles a energías renovables, ya que estas últimas al ser no contaminantes y en muchos casos más eficientes han significado la piedra angular para la solución de muchos problemas de índole energética en muchos sectores del mundo en donde el suministro de energía era una problemática. Ver [7] - [9].

Si se mira un enfoque particular a nivel de Colombia, la realización de estudios evaluativos de la energía eólica y proyectos liderados por ingenieros mecánicos enfocados al desarrollo y estudio de rotores Savonius y sus distintas variantes, nos muestran que Colombia es un país que cuenta con sectores con un alto potencial eólico, como lo es la zona caribe haciendo énfasis en la guajira y la zona costera como lo es Barranquilla, estas poseen un gran potencial para la implementación de rotores eólicos [9], adicionalmente de contar con proyectos realizados por estudiantes y diversas universidades a nivel nacional, ver [10], en donde se estudia la posibilidad de la implementación de rotores eólicos para suplir necesidades en áreas donde se requiera fluido eléctrico. Por ejemplo, ver [10] – [12].

Basado en los trabajos referenciados anteriormente, podemos observar, diversos trabajos que se realizaron con el uso de rotores Savonius que van desde trabajos enfocados al aspecto investigativo y de proyecciones a nivel global y en Colombia, [10] - [12], hasta trabajos que consisten en la realización de bancos de pruebas/bancos de laboratorio para evaluar a los rotores Savonius como fuentes alternativas de generación de energías limpias, concluyendo en general, que la implementación de rotores Savonius es una buena alternativa para la generación de energía.

Por ende, se puede decir que además de ser una alternativa rentable en lo que respecta a la generación de energía, su uso en la industria con el tiempo se va haciendo más marcado, por ende, el desarrollo de proyectos para aportar en cuanto a material de formación para estudiantes, expositivo, investigativo y técnico es una gran novedad en el sector, ya que se puede generar mucho en cuanto al desarrollo profesional de los estudiantes, a las empresas, a las universidades, al país y a la industria en general.

## **1.1 Estado del arte**

En la actualidad como lo es señalado por Robles y Rodríguez, [7]; a nivel mundial, el suministro total de energía ha ido en aumento con el transcurrir de las últimas décadas, dejando su marca con la disminución del porcentaje de producción del petróleo y un predominante y notable aumento en el aporte de energía nuclear, gas natural y energías renovables. En marcando que en estos últimos años se puede decir que ha transcurrido “la evolución de las energías renovables” siendo está justificada por ofrecer una llamativa reducción de emisiones de los gases de efecto invernadero, en pro de la mitigación del cambio climático y sus efectos en nuestro planeta; Lo cual se traduce en la creación y mejoras de empleos y desarrollo tecnológico a nivel industrial y educativo.

Se resalta el rápido crecimiento de las energías renovables a nivel mundial, generando en todo el mundo que la industria generadora y distribuidora de servicios eléctricos estén búsqueda de la actualización sus modelos de negocios e infraestructuras de redes; enfocándose en todo lo relacionado con las energías renovables. [7]

Como lo expresa el consejo global de energía eólica “GWEC” en su reciente reporte anual para el año 2021, [13]; en donde enmarca que un hay retos por abordar en lo que corresponde a la transición energética de los combustibles fósiles a las energías renovables y limpias, enfocándose en el marco de la energía eólica.

Dicho lo anterior tenemos que según el GWEC en las conclusiones más importantes de su reporte anual para el año 2021 dice que:

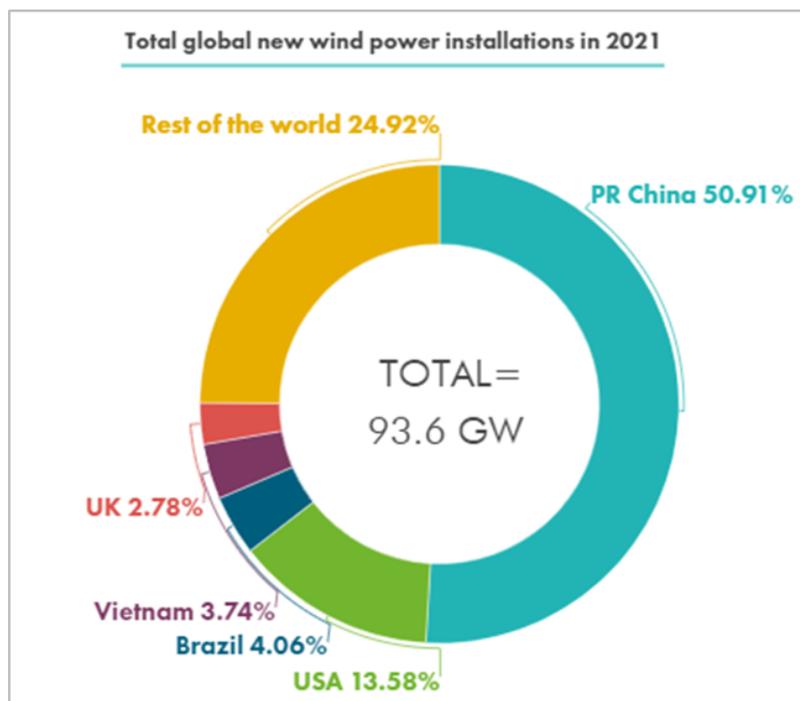
La energía eólica no está creciendo lo suficientemente rápido o ampliamente como para lograr una transición energética global segura y resiliente. Con las tasas de instalación

actuales, GWEC Market Intelligence pronostica que para 2030 tendremos menos de dos tercios de la capacidad de energía eólica requerida para la ruta de 1,5 °C y el cero neto establecido por IRENA – “Agencia internacional de las energías renovables” en su hoja de ruta para 2050, condenándonos efectivamente a perder nuestros objetivos climáticos. [13]

Mirando el campo de la energía eólica a nivel internacional, Latinoamérica y Colombia por parte de Robles y Rodríguez y del GWEC, [7], [13]; se tiene que:

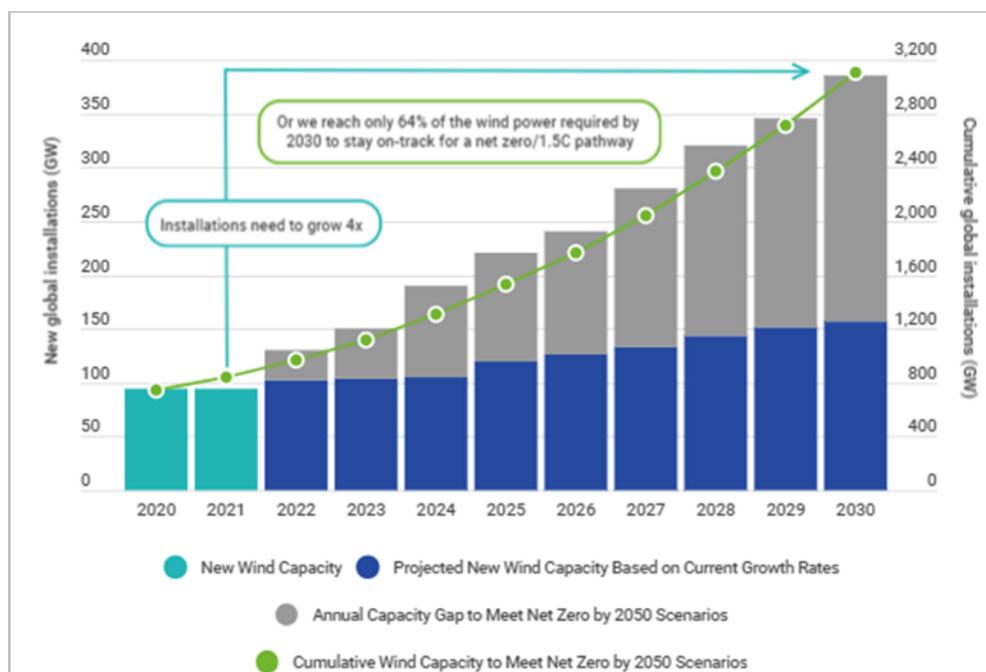
- **Energía eólica a nivel internacional:** El rápido crecimiento que se ha venido manifestando a lo largo de las últimas décadas alrededor de las energías renovables es de resaltar, a nivel mundial ha generado en los continentes la industria, ciencia, educación y sociedad tengan un mayor enfoque en lo que respecta a la transición, implementación y desarrollo de las energías renovables; Pero, aun así, la energía eólica presentó una disminución en la capacidad de energía total instalada a nivel mundial en comparación con las proyecciones que tenía la GWEC para el cierre del informe del año 2021, siendo, de suma importancia la realización de aportes industriales, científicos, tecnológicos, académicos y sociales que permitan acelerar la implementación de esta.

**Figura 1.1.1** Capacidad mundial de energía eólica instalada en 2021.



Fuente: GWEC [13].

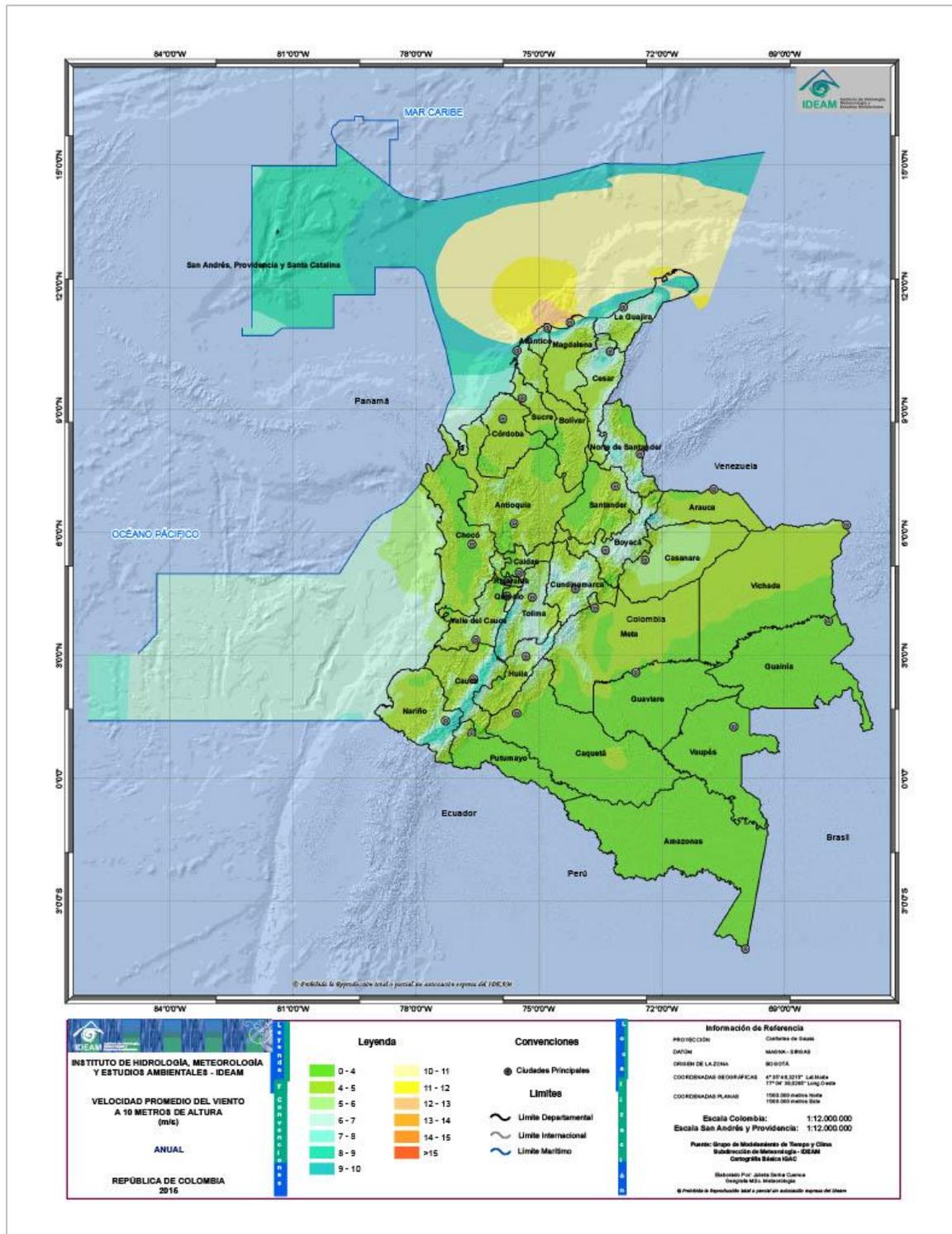
**Figura 1.1.2** Comparación actual y proyecciones de la energía eólica necesaria para la siguiente década.



Fuente: GWEC [13].

- Energía eólica a nivel Latinoamérica:** Siendo Brasil el mayor productor de energía eólica por parte de Latinoamérica, con el aproximado de un 4% de la capacidad global instalada, los demás países perteneciente a Latinoamérica, han de lograr avances significativos para poder lograr una transición exitosa a las energías renovables, siendo de suma importancia como lo es expresado por la GWEC, que países reconozcan su potencial eólico para generar energía y poder aprovecharlo, generando aportes de todos los sectores posibles para que Latinoamérica sea eje fundamental en el aporte energético renovable.
- Energía eólica a nivel Colombia:** Colombia es un país con un buen potencial eólico, ya que cuenta con zonas como la Guajira y aledañas a Barranquilla, que presentan corrientes de vientos con una velocidad promedio anual a un nivel de 10 m sobre el nivel del mar de entre 5 a 9 m/s, teniendo una velocidad promedio de 2.9 m/s según el IDEAM. [14]; cómo se puede observar en la figura 1.1.3.

Figura 1.1.3: Atlas de viento anual de Colombia.



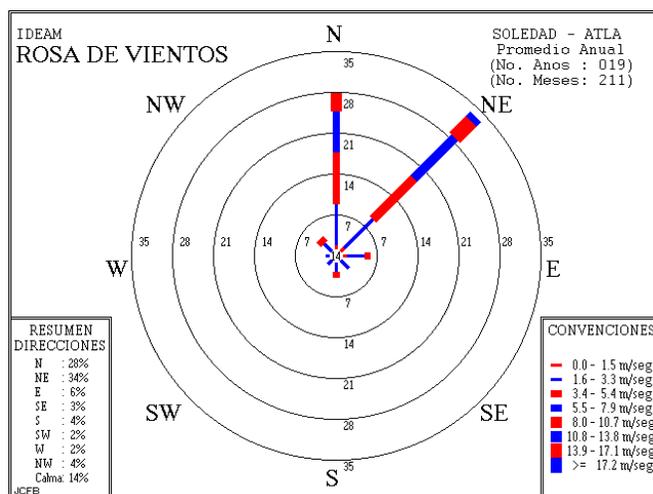
Fuente: IDEAM [15].

**Figura 1.1.4:** Velocidad promedio del viento según diversas estaciones meteorológicas de Colombia.

ID	LONGITUD	LATITUD	ESTACIÓN	DEPARTAMENTO	VELOCIDAD PROMEDIO DEL VIENTO
1	75°16'W	10°47'N	GALERAZAMBA	BOLÍVAR	5.9
2	73°33'W	05°26'N	GACHANECA	BOYACÁ	5.5
3	81°43'W	12°35'N	AEROPUERTO SESQUICENTENARIO	ISLA DE SAN ANDRÉS	5.1
4	74°44'W	03°20'N	LA LEGIOSA	HUILA	4.1
5	81°21'W	13°22'N	AEROPUERTO EL EMBRUJO	ISLA DE PROVIDENCIA	4.0
6	72°56'W	11°32'N	AEROPUERTO ALMIRANTE PADILLA	LA GUAJIRA	4.0
7	73°30'W	05°32'N	VILLA CARMEN	BOYACÁ	3.9
8	77°18' W	01°11'N	OBONUCO	NARIÑO	3.5
9	72°31'W	07°56'N	AEROPUERTO CAMILO DAZA	NORTE DE SANTANDER	3.3
10	76°07'W	06°20'N	URRAO	ANTIOQUIA	3.0
11	74°36'W	10°53'N	AEROPUERTO ERNERTO CORTISOZ	ATLÁNTICO	2.9
12	74°14'W	11°08'N	AEROPUERTO SIMÓN BOLÍVAR	MAGDALENA	2.9
13	73°11'W	07°08'N	AEROPUERTO PALONEGRO	SANTANDER	2.8
14	75°08'W	03°35'N	ANCHIQUE	TOLIMA	2.7
15	73°14'W	08°05'N	ÁBREGO CENTRO ADMINISTRATIVO	NORTE DE SANTANDER	2.5
16	74°08'W	04°43'N	AEROPUERTO EL DORADO PISTAS 1-2	CUNDINAMARCA	2.2

Fuente: UPME - IDEAM [16].

**Figura 1.1.5:** Rosa del viento según la estación meteorológica del aeropuerto Ernesto Cortisoz.



Fuente: UPME - IDEAM [16].

Según [16]; se tiene que para la zona del departamento del Atlántico se registran vientos con velocidades superiores a los 5 m/s, alcanzando valores medios muy próximos a los 8 m/s, en horarios de mediodía hasta la madrugada, enmarcándose sobre todo en los meses que van entre enero y abril; su dirección predominante es la noreste, aunque la dirección norte también presenta una predominancia significativa como se puede ver en la figura 1.1.5.

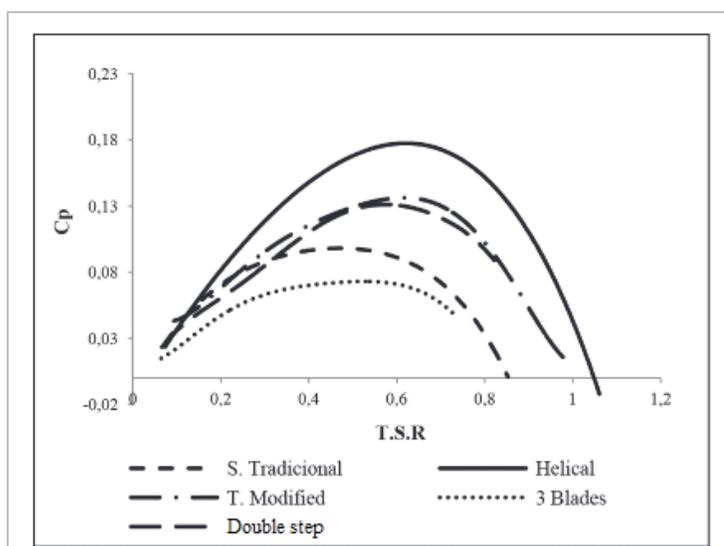
Alrededor del aprovechamiento de las energías renovables se han desarrollado muchos estudios y propuestas para implementar alternativas buscando la conversión y el uso de estas. Enfocándose en el sector de la energía eólica se tiene que una de estas propuestas se encamina al diseño y prueba de desempeño de un rotor tipo Savonius para extracción de energía a partir del flujo vehicular por parte de Pedrozo Tapia [10].

De esta manera, se puede ver como el desarrollo de proyectos que llevan al estudio de factores relacionados a la energía eólica, su implementación en pro del aprovechamiento de la mismas y la determinación de rendimiento resulta ser de gran valor para el desarrollo de esta y para el cumplimiento de la transición energética enfocada a la energía renovable.

Partiendo del planteamiento de Pedrozo Tapia [10], fueron desarrolladas diversas investigaciones de otras formas de proyectos enfocados a el estudio y uso de rotores Savonius con fines de tipo banco de laboratorio. Los bancos de laboratorios con rotores Savonius son alternativas desarrolladas con fines de estudio teórico-práctico para el análisis de los factores que interactúan con los rotores, permitiendo así la caracterización de los mismos, la obtención de sus curvas de rendimiento, factores energéticos, entre otros; como es el caso de Rodríguez Díaz [11].

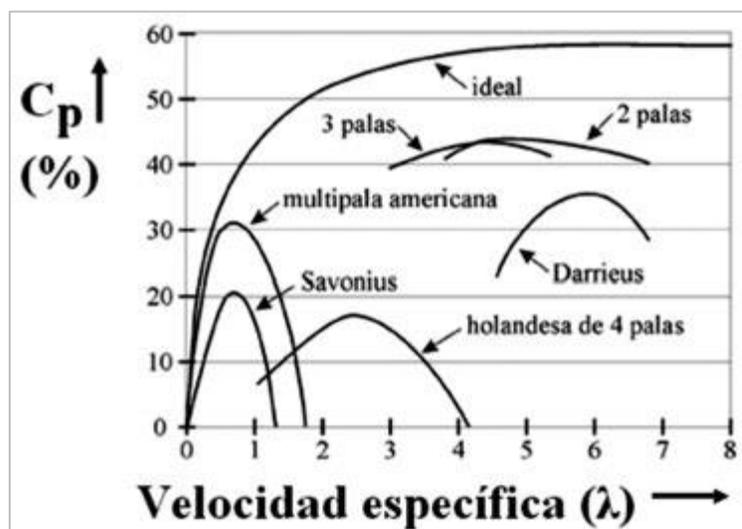
La obtención de la caracterización de las turbinas eólicas y la obtención de sus curvas de rendimiento permiten la implementación de herramientas de medición y la apropiación de las técnicas simulación y validación teórico-experimental que requieren el estudio, desarrollo e implementación de rotores eólicos siendo de suma importancia este aspecto. [10] - [12], [17].

**Figura 1.1.6:** Curvas características de diversos rotores Savonius evaluando el coeficiente de potencia “Cp” en función de la velocidad específica del rotor “TSR”.



Fuente: Diago Vidal [18].

**Figura 1.1.7:** Curvas características para diversos tipos de rotores evaluando el coeficiente de potencia “Cp” en función de la velocidad específica del viento “λ”

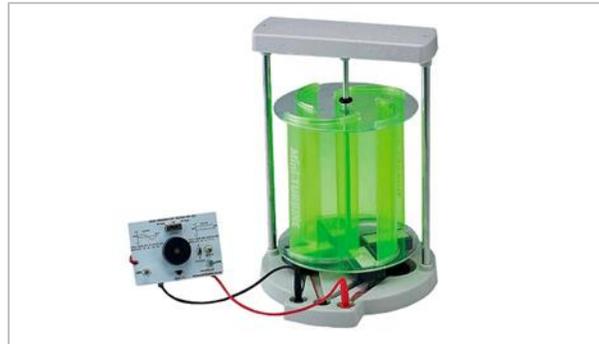


Fuente: López Villarubia [19].

Adicionalmente, Africano y Castañeda [12]; Exponen una aplicación práctica de un generador eólico para la iluminación de un parqueadero de motos, usando los resultados de su simulación y la caracterización del rotor desarrollado por los mismos aplicando el método teórico-práctico.

Siendo resaltado en todos los trabajos anteriormente mencionados el uso de instrumentos de metrología como lo son anemómetros, dinamómetros, multímetros, entre otros; para la toma de medida de diversos parámetros que interactúan y se ven relacionados con el diseño y funcionamiento de los rotores Savonius, enfocados a la comprobación teórico-práctica. Como es el caso de [10] – [12], [17], [18].

**Figura 1.1.8:** Banco de laboratorio de un generador eólico tipo Savonius disponible en el mercado.



Fuente: C-0201 de Cebekit - Fadisel [20].

## 1.2 Planteamiento del problema

La energía eólica ha sido motivación de diversos estudios a lo largo de las últimas décadas, siendo una alternativa notable al momento de brindar una solución a lo largo de la búsqueda de una reducción a las emisiones de CO<sub>2</sub> en el mundo al ser una fuente de energía renovable, planteándose alternativas en los sectores científicos e industriales para encaminarse a un desarrollo sustentables.

La motivación para lograr un desarrollo positivo de los mercados y la industria eólica en todo el mundo, gira entorno a ciertas ventajas que brinda la energía eólica y siendo muy atractiva al momento de compararla con otros tipos de fuentes de electricidad, además de predominar la necesidad de reducir la contaminación, emisiones y el cambio climático con el uso de tecnologías que permitan esto; Basado en GWEC [13].

Mirando un enfoque orientado a los 20 países más poderosos “G20”, el GWEC se vio en la tarea de redactar y enviar una carta el 11 de octubre del año 2022, en donde exponen que, en representación del gremio industrial mundial de la energía eólica, reconocen los esfuerzos que ha desarrollado los países que conforman el G20, en pro de abordar las crisis actuales de seguridad energética y cambio climático que afectan al mundo; Basado en GWEC [13].

En la carta se habla acerca de la necesidad de una fuerte acción colectiva a nivel mundial, buscando garantizar y asegurar el crecimiento económico mundial, la estabilidad y la prosperidad; ya que estas metas se han visto influenciadas a volverlas de índole prioritario debido a las restricciones al suministro de energía, el aumento de la inflación, el creciente incremento del valor de las materias primas, los conflictos geopolíticos, los aberrantes efectos del cambio climático; Basado en GWEC [13].

Enmarcan que los países que conforman al G20 conforman la mayor parte de la población mundial, a nivel del producto interno bruto “PIB” representan el 80% a nivel mundial, al mismo tiempo que a nivel de emisiones globales representan el 80%, le indican que tiene el poder, capacidad, liderazgo y la responsabilidad global de garantizar el trazado de un camino para lograr la salida a las crisis climáticas y lograr una seguridad e integridad energética idónea. Basado en [12], [13].

Proponen e invitan a los países a plantear una resolución a las crisis, evitar otras a futuro y brindar una seguridad a las personas con la protección del planeta; exponen la necesidad de cooperar y cambiar de forma apremiante a sistemas energético limpio, sustentable, seguro y basado en las energías renovables.

Se exponen las ventajas de abordar esta tarea de una forma inmediata y satisfactoria, las cuales van desde reforzar el sistema energético mundial buscando una reducción de la exposición a la volatilidad de los precios y la dependencia de las importaciones vinculada a los combustibles fósiles, hasta el desarrollo de investigaciones que muestran que el cambio a la energía renovable resultará en enormes ahorros netos para la economía global, apoyando una transición energética justa y equitativa y un futuro habitable para todos; Basado en GWEC [13].

Por lo que proyectos que permitan la articulación de elementos para el estudio, desarrollo e implementación de las energías renovables y la transición energética como lo son los rotores Savonius que son de bajo costo de implementación y de relativamente fácil instalación, son de vital importancia para contribuir con la resolución de la demanda energética y por ende aporta a trazar el camino de salida a la crisis climática de forma gradual.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo general

Implementar un banco de pruebas de laboratorio mediante rotores Savonius con el propósito de caracterizarlo y obtención de sus curvas de rendimiento para asignaturas afines en la universidad Antonio Nariño sede Puerto Colombia.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- ✚ Identificar modelos de turbinas tipos Savonius convencionales, modelos matemáticos implementados en la obtención del rendimiento mecánico de estos tipos de turbinas.
- ✚ Seleccionar los componentes idóneos para la construcción de los prototipos de turbinas y la instrumentación requerida para el análisis, puesta en marcha y toma de datos del banco de pruebas de laboratorio.
- ✚ Evaluar el comportamiento fluidodinámico y de rendimiento del banco de turbinas a través de técnicas de simulación y validación teórico-experimental.

## 1.4 Justificación

La realización de este proyecto tiene como fundamento el fortalecer las experiencias teórico prácticas que se ven apoyadas en el uso de equipos que permitan realizar prácticas relacionadas a temas de eficiencia energética, energías renovables, entre otras; siendo esto un pilar fundamental para lograr una formación de alta calidad que sea coherente con el ámbito profesional de un ingeniero con un alto grado de conocimiento y enfoque; y, para un tecnólogo comprometido con el cumplimiento de sus actividades con la más alta calidad y pericia posible.

En el caso del banco propuesto, su importancia recae en que este permite realizar prácticas de laboratorio, incorporando instrumentos de medición como dinamómetros, tacómetros, anemómetros, etc; el estudio de aspectos teóricos y prácticos como lo son el rendimiento y la caracterización de los rotores Savonius; siendo esto un pilar de formación muy usado en el ámbito profesional de los ingenieros mecánicos y tecnólogos.

## Capítulo 2

### Marco teórico

#### 2.1 Energía eólica

Es la energía obtenida por medio de la fuerza de las corrientes de viento. Pertenece al grupo de energías conocidas como renovables/no contaminantes. Su composición literaria se encuentra ligada a la mitología griega, ya que el nombre está basado en el Dios griego del viento Eolo. Para ser utilizada e implementada esta debe ser transformada por aerogeneradores, que mediante aspas convierten la energía cinética de las corrientes de viento en un movimiento mecánico circular, es decir, energía mecánica. [11]

#### 2.2 Aerogeneradores

Es el equipo que convierte la energía cinética que se transporta en las corrientes de viento en energía mecánica giratoria, para luego transmitirse a un eje en donde será convertida en energía eléctrica mediante el principio de inducción de Faraday. Los aerogeneradores analizados desde el punto de vista de la orientación de sus ejes se pueden clasificar de eje vertical y horizontal. Ver figura 2.2.1.

**Figura 2.2.1:** Aerogeneradores de eje horizontal y vertical.

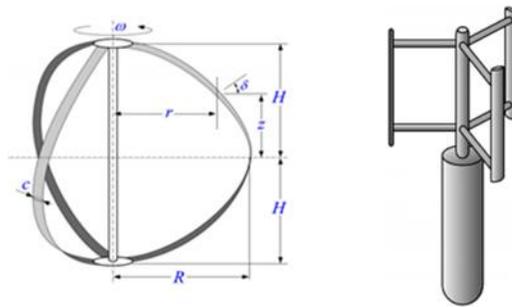


Fuente: Rodríguez Díaz [11].

### 2.3 Turbinas tipo Darrieus

Son un modelo de rotor de eje vertical, fueron patentados por Georges Darrieus en 1926. Este rotor se conforma por dos palas orientadas verticalmente, las cuales rotan alrededor de un eje perpendicular. Estas se diferencian de las Savonius principalmente porque la Darrieus son del tipo de turbina que funciona por sustentación mientras que las Savonius funcionan por arrastre. Los rotores Darrieus utilizan la sustentación producida por el viento que golpea sus perfiles aerodinámicos para girar. Las turbinas del tipo Darrieus trabajan a un bajo torque y por lo general necesitan un impulso inicial para poder empezar a girar.

**Figura 2.3.1:** Aerogenerador de eje vertical tipo Darrieus.



Fuente: Sánchez Riojas [22].

### 2.4 Turbina tipo Savonius

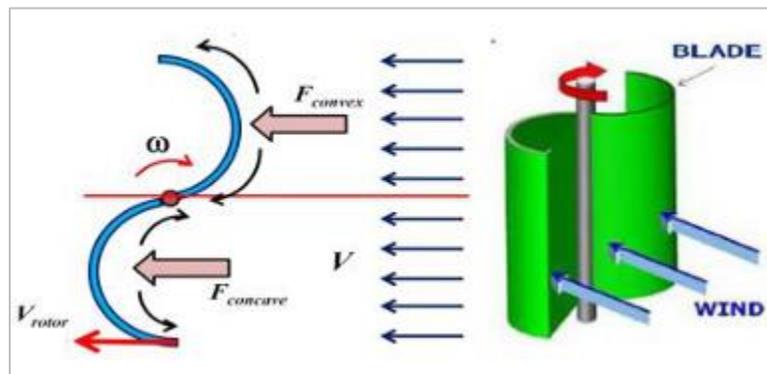
Las turbinas del tipo Savonius son rotores del tipo eje vertical, se caracterizan por su diseño sencillo, estas pueden operar independientemente de la dirección del viento y sus velocidades de giro son relativamente bajas. Debido a la simplicidad de su diseño la construcción de estas es de bajo costo si se compara con las de eje horizontal. La finalidad de estas turbinas es la de convertir la energía cinética de las corrientes de viento en un momento par en el eje de rotación vertical; el arrastre producido por las corrientes de vientos genera un empuje mediante las palas produciendo un torque en el eje al que están conectadas las aspas. Los rotores Savonius tienen sus orígenes en el año 1922, fueron creados, desarrollados y patentados por el ingeniero finlandés Sigurd Savonius. [10] – [23]

Las turbinas tipo Savonius son de arrastre, lo que se traduce en que estas no pueden rotar a una velocidad mayor que la del viento. La velocidad específica de estas puede ser igual a 1 o menor. De acuerdo con Savonius, el mejor de sus rotores tiene una eficiencia máxima de 31%. [10] – [23]

Las turbinas tipo Savonius están constituidas por un eje vertical acoplado a unas aspas curvadas de forma semicilíndrica, ubicadas de forma opuestas entre sí. Cuando las corrientes de viento chocan con las aspas, las cuales tienen una forma del tipo cóncava y

convexa, hace que se produzca un diferencial de la fuerza de arrastre que genera que la turbina gire.

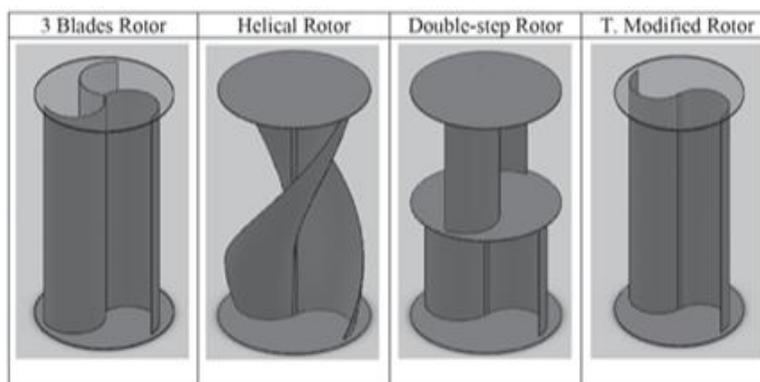
**Figura 2.4.1** Geometría de un rotor Savonius.



Fuente: M. Hadi Ali [24].

Los rotores Savonius pueden estar compuestos por dos o más palas, siendo los diseños más comunes los de dos y tres aspas; el rotor Savonius de dos aspas cuenta con un diseño que tiene la forma de la letra “S” si se mira desde una vista superior, además la forma de sus aspas puede variar, siendo un ejemplo de esto las turbinas Savonius helicoidales, además de contar con elementos que permitan mejorar su rendimiento como lo son los deflectores de viento; Vea figura 2.4.2. [10], [25].

**Figura 2.4.2:** Variantes geométricas de las aspas de un rotor Savonius.



Fuente: Díaz, Pájaro y Salas [25].

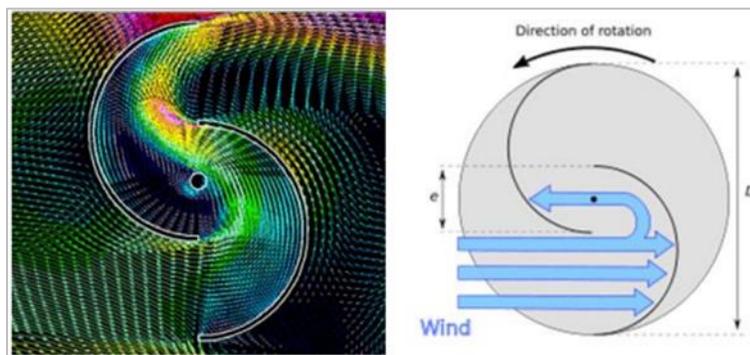
Simplificando, se tiene que la forma del rotor Savonius se basa en las dos mitades de un cilindro hueco las cuales son conocidas como aspas o palas, y que se encuentran desfasadas hacia sus extremos para conseguir la forma característica de una “S”, siendo estas de formas cóncavas debido a su geometría, para así lograr la captación de viento requerida, de forma que la parte cóncava posterior presente una menor resistencia a la captación del viento,

haciendo que se produzca el giro con sentido hacia la parte que menos resistencia oponga. [10], [25].

El sistema convencional de las turbinas Savonius presenta ciertas deficiencias en su diseño como lo han demostrado diversos estudios enfocados a la mejora de la eficiencia de estos mismos variando sus aspectos geométricos y de diseño o añadiendo otros componentes que permitan mejorar la eficiencia; Vea [10] – [26].

Estos manifiestan que en el diseño convencional se presenta una sobrepresión alojada en la parte interior del rotor, específicamente en las zonas cóncavas del rotor, lo cual genera que el aire entre al rotor, pero no encuentre una salida, traduciéndose así en una pérdida de rendimiento; Una solución planteada a esta problemática logrando una mejora en el rendimiento del rotor ha sido la separación de las aspas para que se genere un flujo de aire completo entre estas. [26]

**Figura 2.4.3:** Simulación fluidodinámica y representación ilustrativa de un rotor Savonius con la variante de separación en sus aspas para reducir la sobrepresión.



Fuente: Hernández Echeverri [26].

La geometría y características de este tipo de rotores llevan a que su velocidad y utilidad se vea idealizada para bajas velocidades debido a la gran resistencia que estos tienen al aire. Su uso en la generación de energía eléctrica se ve complementado con la implementación de multiplicadores lo que genera una reducción en el rendimiento, lo que hace que este tipo de generadores eólicos sean idóneos para funciones como el bombeo de agua y generación de luz con dispositivos leds acoplados. [26]

La eficiencia de los rotores Savonius según diversos estudios realizados demuestran que esta puede superar al valor establecido por el límite de Betz; vea [10] - [26]. Betz afirmaba que la máxima eficiencia que podría alcanzar un generador eólico de eje vertical era de 20 %.

La capacidad de generación energética en los generadores del tipo eje vertical se encuentra influenciada por muchos factores importantes, como lo son:

- ✚ La velocidad del viento.
- ✚ El área de choque con el viento.
- ✚ Materiales de diseño y construcción.

Por lo cual se tiene que para los rotores Savonius, debido a su geometría y diseño, no son muy eficientes, pero se tiene que, dada su simplicidad, bajo costo de producción y el poco requerimiento de recursos tecnológicos, estos rotores se convierten en alternativas viables para poblaciones rurales, con bajos ingresos económicos y para aplicaciones puntuales como lo es la producción de luz en ciertas áreas.

## 2.5 Límite de Betz

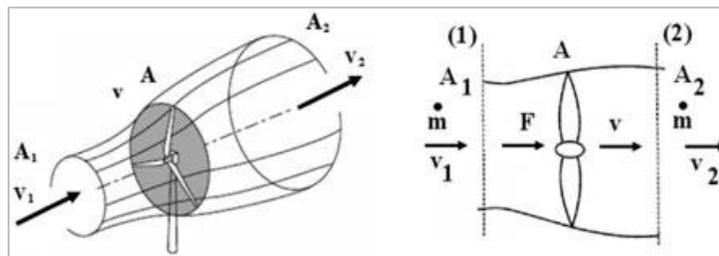
Por principios físicos, se sabe que no se puede extraer toda la energía disponible en el viento utilizando un aerogenerador; Ya que el viento al pasar por este presenta rozamiento en las aspas y en los componentes de este, además se han de considerar las pérdidas por fricción en otras, ocasionando que el viento al entrar en contacto con el rotor se frene y al salir lo haga con una velocidad mucho menor que la velocidad con la que impacto al rotor “velocidad de entrada”.

La diferencia entre las dos velocidades “entrada y salida” es conocida como la energía absorbida y transmitida por el aerogenerador.

Se conoce que en la práctica es aprovechado entre el 40% y 50% de la potencia eólica disponible del aire captado; Siendo que la máxima potencia eólica que se puede aprovechar esta definida por el límite de Betz, basándose en este, se tiene que una turbina eólica puede convertir en energía mecánica un máximo “teóricamente” de 59% de energía eólica captada de las corrientes de aire que inciden en esta. Vea Figura 2.5.1

Teniendo un flujo de aire que circula por un área “A” definida, la cual es barrida por un rotor, vea figura 2.5.1.

**Figura 2.5.1:** Flujo de aire que circula a través de un área “A” la cual es barrida por el rotor.



Fuente: López Villarubia [19].

Usando la hipótesis simplificadora de que el aire es considerado como un fluido incompresible, es decir que mantiene su densidad constante cuando se tiene que las variaciones de presión y temperatura son mínimas, tenemos que según la ecuación de continuidad:

$$v_1 A_1 = v A = v_2 A_2 \quad (1)$$

El caudal másico está definido por:

$$\dot{m} = \rho A v \quad (2)$$

siendo:

$\dot{m} \rightarrow$  Caudal masico

$\rho \rightarrow$  densidad del aire.

$A \rightarrow$  Area barrida por el rotor.

$v \rightarrow$  velocidad a través de la sección A del rotor.

La fuerza “F”, que realiza el flujo del aire sobre el rotor, se determina a partir de la variación de la cantidad de movimiento del fluido, la cual está definida como:

$$F = \dot{m}(v_1 - v_2) = \rho A v (v_1 - v_2) \quad (3)$$

Basándose en el teorema de Bernoulli enmarcado en las secciones 1 y 2, y aplicando la suposición de que se cumple  $A_1 \approx A_2 \approx A$ , tenemos que:

$$F = (p_2 - p_1)A = \frac{1}{2} A \rho (v_1^2 - v_2^2) \quad (4)$$

Basándose en las expresiones expuestas anteriormente se tiene que la velocidad del viento ( $v$ ), analizándola en el plano del rotor está dada por:

$$v = 0.5(v_1 + v_2) \quad (5)$$

La potencia (P), es entendida como aquella transferencia de energía que cede el flujo de aire al rotor eólico, se define como:

$$P = F v \quad (6)$$

Siendo:

$P \rightarrow$  Potencia.

$F \rightarrow$  Fuerza.

$v \rightarrow$  Velocidad.

Usando los planteamientos de las ecuaciones 3 y 4, las combinamos y se obtiene:

$$P = \frac{1}{4} \rho A (v_1 + v_2) (v_1^2 - v_2^2) \quad (7)$$

Usando la condición de máxima potencia tenemos:

$$\frac{dP}{dv_1} = 0 \rightarrow v_2 = \frac{v_1}{3} \quad (8)$$

Si sustituimos el planteamiento anterior en la ecuación, podremos obtener la potencia máxima, ya que teóricamente esta se puede extraer analizando el flujo de viento  $v_1$ , por lo que se tiene:

$$P_{max} = \frac{16}{54} \rho A v_1^3 = \frac{16}{27} \left( \frac{1}{2} \rho A v_1^3 \right) = \frac{16}{27} P_d = 0.593 P_d \quad (9)$$

El anterior planteamiento enmarca al teorema de Betz, en donde este modela y simplifica que teóricamente la energía máxima que puede ser extraída del viento corresponde al 59.3% de la energía disponible, siendo esta última la energía cinética de las corrientes de viento.

*Por lo que el valor máximo de  $C_p = 0.593$*

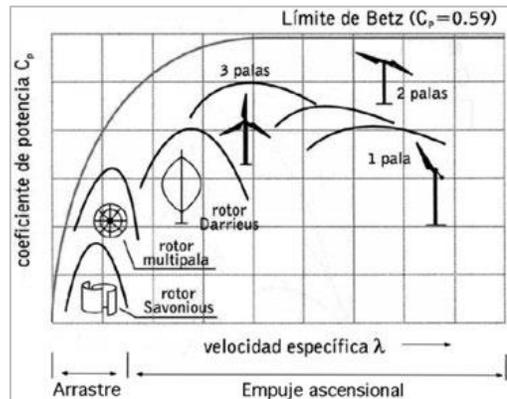
El coeficiente de potencia “ $C_p$ ” se puede expresar así:

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (10)$$

Siendo  $a$  el factor de interferencia ( $a$ ), que también puede ser llamado como coeficiente de velocidad inducida axial, esto se define como:

$$a = 1 - \left( \frac{v}{v_1} \right) = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{v_2}{v_1} \right) \quad (11)$$

**Figura 2.5.2:** Limite de Betz para múltiples variantes de turbinas eólicas



Adaptado: López Villarubia [19].

## 2.6 Ley de inducción electromagnética

Fue establecida por el químico y físico británico Michael Faraday, esta nos habla de la “tensión”, también llamada *fuerza electromotriz* la cual es inducida a través de una espiral es directamente proporcional a la relación de cambio en el tiempo del flujo magnético a través de la espira. [28]

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Donde  $\Phi_B = \oint \vec{B} * d\vec{A}$  se conoce como el flujo magnético a través de la espira.

**Figura 2.6.1:** Experimento de Faraday - inducción electromagnética



Fuente: Sánchez [29].

Esta se relaciona con los generadores eólicos ya que estos implementan la ley de Faraday para su funcionamiento, debido a que la finalidad de una turbina eólica es generar energía

induciendo una variación en la tensión de un generador mediante la captación del flujo eólico que hay en las corrientes de vientos siendo transmitida al generador mediante un eje que conecta a las aspas con este, permitiendo así su interacción generando por ende energía eléctrica.

## **2.7 Bancos de laboratorio**

Un banco de laboratorio es un equipo con el cual se pueden realizar pruebas y estudios, su implementación se cimienta ampliamente en la industria especialmente en el desarrollo de nuevas tecnologías que pueden ser usadas a cualquier nivel que se requiera, estos se caracterizan por ofrecer estudios y resultados de alta fidelidad en función del comportamiento de los elementos que lo conforman. [11]

En las áreas investigación son bastante usados, se pueden encontrar en ramas de la ingeniería como:

- ✓ Hidráulica
- ✓ Mecatrónica
- ✓ Electricidad
- ✓ Neumática
- ✓ Mecánica

La implementación de los bancos no solo está limitada al sector industrial, estos también tienen su nicho en el sector educativo, con fines de enseñanza, a la vez que, en el sector de la investigación, siendo muy comunes en las universidades. [11]

## **2.8 Metrología**

Ciencia de las mediciones y sus aplicaciones teórico-experimentales en cualquier nivel de incertidumbre y en cualquier área relacionada a la investigación científica y tecnológica. Basado en [30].

## **2.9 Medición**

Se le conoce como medición al proceso mediante el cual se busca conseguir, mostrar y analizar magnitudes físicas de cuerpos y condiciones de la realidad. Basado en [30].

## **2.10 Instrumentos de medición**

Es una herramienta la cual tiene como función obtener una magnitud física enfocándose en cierto parámetro, proceso el cual se conoce como medición. Basado en [30].

## 2.11 Medición de las corrientes de viento

Las corrientes de viento están conformadas por dos propiedades, que son velocidad y dirección. Por ende, para obtener una magnitud de la velocidad del viento es necesario implementar un principio físico, ya sea el par, la presión, su temperatura, entre otros; el instrumento por excelencia utilizado en metrología y en estudios meteorológicos es el anemómetro. [16]

## 2.12 Anemómetro

Es un dispositivo que se utiliza para medir la velocidad de los fluidos gaseosos, como el flujo de aire en un conducto o el viento en la atmósfera. Su función es determinar la rapidez con la que se mueven los gases y, por lo tanto, es una herramienta importante en el estudio de los patrones de circulación de los mismos. Basado en [31].

**Figura 2.12.1:** Anemómetro digital.



Fuente: UNI-T [31]

## 2.13 Multímetro

Popularmente también conocido como “tester”; es un instrumento de medición eléctrico portátil que entre sus funciones está el medir magnitudes eléctricas “activas y pasivas” tales como pueden ser la corriente y la potencia para el caso de las activas y la resistencia, capacidades, etc; para el caso de las pasivas. Basado en [32].

**Figura 2.13.1:** Multímetro digital.



Fuente: UNI-T [32]

## 2.14 Tacómetro

Es un instrumento que se utiliza para medir la velocidad de rotación de un mecanismo de una máquina. Su función es determinar la rapidez con la que gira el componente en cuestión y, por lo tanto, es una herramienta útil para el monitoreo de la velocidad y el desempeño de la maquinaria industrial. Basado en [33].

**Figura 2.14.1:** Tacómetro laser digital.



Fuente: UNI-T [33]

## 2.15 Dinamómetro

Instrumento diseñado e implementado para medir fuerzas, mediante la capacidad de deformación de los cuerpos elásticos, siendo estos últimos generalmente resortes. Basado en [34].

**Figura 2.15.1:** Dinamómetro.



Fuente: Kern & Sohn [35].

## Capítulo 3

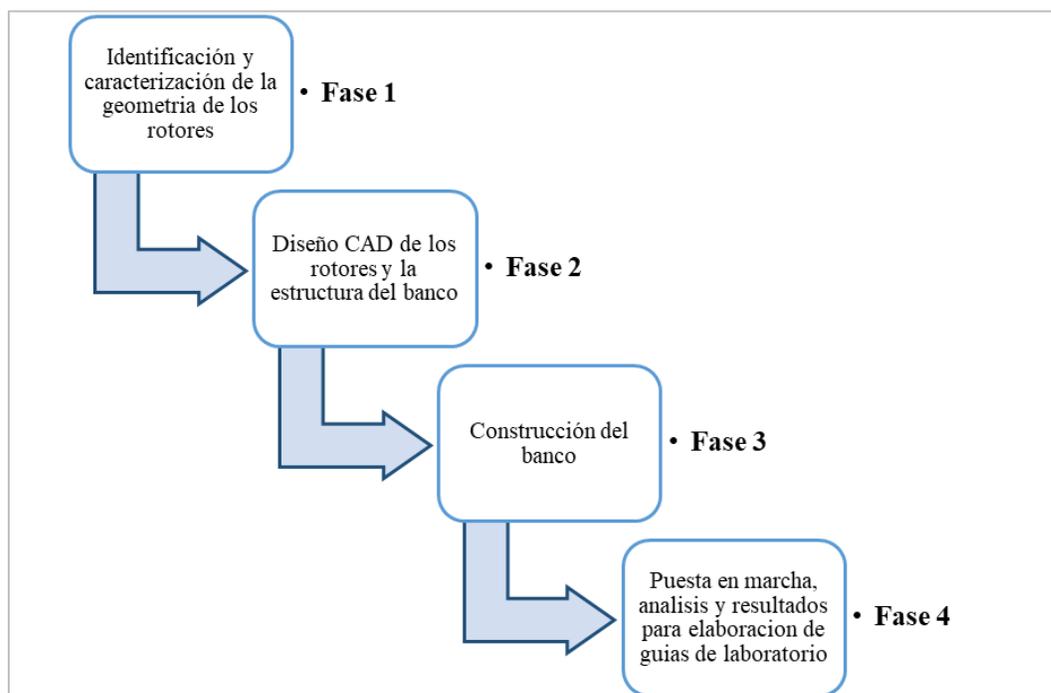
### Metodología

#### 3.1 Metodología tipo cascada

La metodología implementada para el presente trabajo es del tipo cascada, debido a que el desarrollo de dicho proyecto sigue un comportamiento lineal en cuanto al avance de las etapas y metas para el cumplimiento del mismo, es decir, que cada una de las fases empleadas para llevar a cabo el proyecto se han de realizar de manera escalonada siguiendo un orden secuencial.

A continuación, veremos el esquema tipo cascada propuesto, acompañado de los ítems que conforman la metodología para este proyecto; posteriormente se procederá a detallar cada ítem, exponiendo la importancia, la conformación de los mismo y las repercusiones que estos tienen para conseguir lo resultados deseados:

**Figura 3.1.1:** Diagrama de la metodología tipo cascada planteada.



Fuente: Propia.

### 3.2 Identificación y caracterización de la geometría de los rotores Savonius

Para dar un rumbo al presente proyecto, fue necesario realizar una revisión de la literatura investigativa y científica disponible sobre temáticas que relacionaran los temas de geometría y caracterización para rotores Savonius, posteriormente, haciendo una recopilación de la literatura investigativa y científica disponible con respecto al tema, vea [2] – [18], se tiene que para los rotores Savonius se presentan múltiples variaciones en cuanto a sus geometrías, vea figura 2.4.2.

Por lo que para determinar cuál de las opciones que se disponen para este proyecto es más rentable y conveniente se realiza un análisis comparativo de beneficios, basándonos en una escala de puntajes:

**Tabla 1:** Tabla de análisis comparativo realizado para cuatro geometrías de rotores Savonius.

Escala de puntajes	
1	No cumple
2	Cumple de forma Insuficiente
3	Cumple parcialmente
4	Cumple de buena forma
5	Cumple en su totalidad

Criterios	Forma de rotores savonius			
	Convencional	Helicoidal	Doble paso	3 aspas
Simplicidad de diseño.	5	2	3	4
Disponibilidad de materiales en el mercado.	5	4	4	5
Factibilidad de construcción.	5	4	3	4
Se puede construir con material reciclado.	5	5	4	5
Costo.	5	4	2	4
Es de geometría convencional.	5	2	3	4
Es de geometría no convencional.	1	5	3	1
Cuenta con material investigativo.	5	4	2	2
Factibilidad de puesta en marcha con condiciones ambientales regulares.	3	4	3	3
No requiere de sistemas de orientación para mejorar la captación del viento.	2	4	3	3
Complejidad de diseño CAD.	5	2	3	4
Complejidad de calculos.	5	3	4	3
Espacio requerido para su almacenamiento.	5	4	3	4
Transportabilidad.	5	4	3	4
<b>Puntaje</b>	<b>61</b>	<b>51</b>	<b>43</b>	<b>50</b>

Fuente: Propia.

Por lo que, viendo los resultados obtenidos en el análisis efectuado, vea la tabla 1, según dadas las condiciones y parámetros para obtener los resultados del análisis comparativo, se tiene que las geometrías que presentaron los dos mejores resultados fueron la geometría convencional que se caracteriza por su particular forma de “S” y la geometría no convencional del tipo helicoidal.

Por lo que podremos destacar que el banco cuenta con un rotor eólico de tipo convencional y un rotor no convencional, los cuales permiten compararlos, establecer las características y comportamientos fluidodinámicos para cada uno.

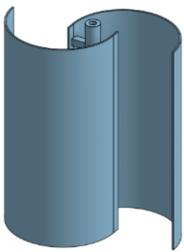
### Dimensiones de los rotores Savonius:

Se tiene que la formas y dimensiones de los rotores se ven limitadas debido al espacio que se dispone para el almacenamiento, transporte, materiales disponibles en el mercado para su manufactura, entre otros.

Teniendo en cuenta los modelos planteados en literaturas investigativas y científicas consultadas, enmarcadas con temáticas similares, este tipo de rotores tienen tamaños característicos de estudio entre los 20 cm y 60 cm para su altura y entre 10 cm y 45 cm para su diámetro; vea [2-18], [36]; considerando esto, y contemplando la limitante del tamaño disponible para el almacenamiento del banco, se concluye en optar por la construcción de los rotores rigiéndose por las dimensiones contempladas en las investigaciones realizada, viendo que estas cumplen de manera satisfactoria con las condiciones expuestas.

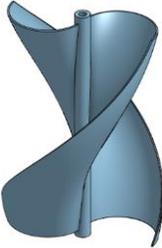
Adicionalmente, otro aspecto relevante que limita las dimensiones de los rotores son los materiales disponibles para su manufactura, entre los cuales están tanques de plásticos, tubería sanitaria liviana, todos con forma cilíndrica, los cuales tendrán la función de formar las aspas del rotor Savonius para captar la energía que poseen las corrientes de viento.

**Tabla 2:** Tabla de dimensiones generales del rotor Savonius convencional.

Rotor savonius convencional	Dimensiones		
	Propiedades	Unidades	Valores
	Alto	cm	35
	Diámetro de las aspas	cm	20,32
	Diámetro del Rotor	cm	36,64
	Espesor de las aspas	cm	0,2
	Separación de aspas	cm	3,5
	Área de sección transversal	cm <sup>2</sup>	1282,4
	Coefficiente aerodinámico		2,3 - 1,2
	Relación entre la separación y el diámetro del aspa		1/6

Fuente: Propia.

**Tabla 3:** Tabla de dimensiones generales del rotor Savonius helicoidal.

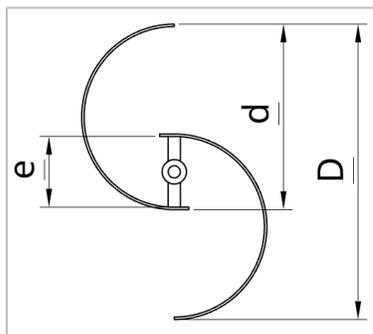
Rotor savonius helicoidal	Dimensiones		
	Propiedades	Unidades	Valores
	Alto	cm	35
	Diametro de las aspas	cm	22
	Diametro del Rotor	cm	37
	Espesor de las aspas	cm	0,1
	Separación de aspas	cm	2
	Area de seccion transversal	cm <sup>2</sup>	1295
	Coficiente aerodinamico		2,3 - 1,2
	Relación entre la separación y el diametro		N/A

Fuente: Propia.

### 3.3 Potencia teórica

Se tiene que para los rotores Savonius el coeficiente de potencia “Cp” y el coeficiente de par “Cm”, están ligados a la relación que existe entre la separación de las aspas “e” y el diámetro de estas “d”, basado en [19]; Vea figura 3.3.1

**Figura 3.3.1:** Identificación de las dimensiones necesarias para hallar la relación que existe entre la separación de las aspas y el diámetro de las mismas.



Fuente: Propia.

Siendo segun la figura anterior:

$D \rightarrow$  Diametro del rotor.

$d \rightarrow$  Diametro del aspa.

$e \rightarrow$  Separación de las aspas.

Por lo que la relación seria  $\rightarrow \frac{e}{d}$

En nuestro caso el valor de la relación entre el diámetro de las aspas y la separación de estas tiene un valor de  $1/6$  para el rotor con geometría convencional. Vea tabla 2.

Para el caso del rotor con geometría helicoidal debido a que estas no presentan separación, esta relación no aplica.

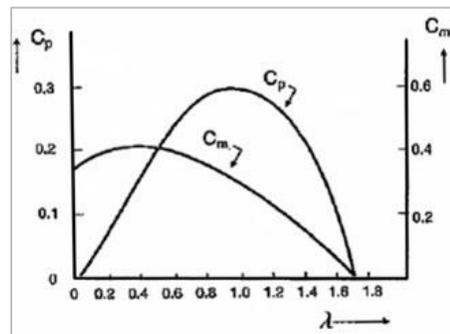
Se tiene que según López [19], los máximos valores del  $C_p$  se obtienen cuando la relación anterior toma el valor de  $1/6$ .

$$\frac{e}{d} = \frac{1}{6} = 0.1666 \dots \quad (12)$$

para esta relación se encuentran los valores mas elevados de  $C_p$

Los cuales se hacen máximos en función de una velocidad específica “ $\lambda$ ” entre 0.9 y 1. Vea figura 3.3.2.

**Figura 3.3.2:**  $C_p$  y  $C_m$  para un rotor Savonius compuesto por dos aspas semicilíndricas de 15 cm de diámetro y 38 cm de altura, y una relación  $e/d = 1/6$ .



Fuente: López Villarubia [19].

La velocidad específica “ $\lambda$ ” está dada por la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{\Omega R}{v} \quad (13)$$

$\Omega \rightarrow$  Velocidad angular.

$R \rightarrow$  Radio del rotor.

$v \rightarrow$  velocidad de flujo no perturbado.

$$R = d - 0.5e \quad (14)$$

$d \rightarrow$  Diámetro del aspa.

$e \rightarrow$  Separación de las aspas.

El área de barrido del rotor “A” está dada por la siguiente ecuación:

$$A = h(2d - e) = hD \quad (15)$$

siendo:

$h \rightarrow$  Altura del aspa.

$d \rightarrow$  Diametro del aspa.

$e \rightarrow$  separación de las aspas.

$D \rightarrow$  Diametro del rotor.

En nuestro caso, para el rotor de geometría convencional, el área de barrido según las dimensiones dadas toma un valor de 1282,4 cm<sup>2</sup> o 0,12824 m<sup>2</sup>.

Para el rotor con geometría helicoidal, el área de barrido según las dimensiones dadas toma un valor de 1295 cm<sup>2</sup> o 0,1295 m<sup>2</sup>.

El funcionamiento del rotor consiste en la generación de una diferencia de fuerzas aerodinámicas debido a la geometría de las aspas del rotor, la fuerza aerodinámica es producida por las corrientes de aire al entrar en contacto con las aspas, las cuales por su posicionamiento presentan geometrías distintas y coeficientes aerodinámicos distintos, lo que en conjunto genera que el rotor funcione bajo su principio de arrastre diferencial.

La fuerza aerodinámica está dada por la siguiente ecuación:

$$F = C \left( \frac{1}{2} \rho A w^2 \right) \quad (16)$$

Siendo:

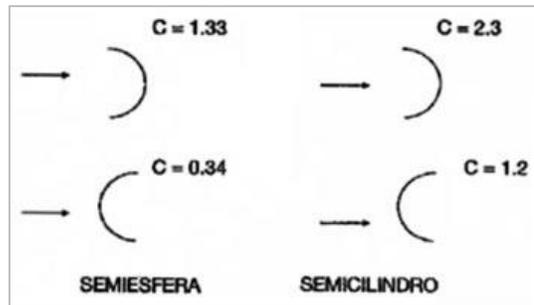
$C \rightarrow$  Coeficiente aerodinamico.

$\rho \rightarrow$  Densidad del aire.

$A \rightarrow$  Area de la seccion transversal que presenta el cuerpo a las corrientes de aire.

$w \rightarrow$  Velocidad relativa del aire respecto al objeto.

**Figura 3.3.3:** Coeficientes aerodinámicos de resistencia "C" para formas de semiesfera y semicilindro.

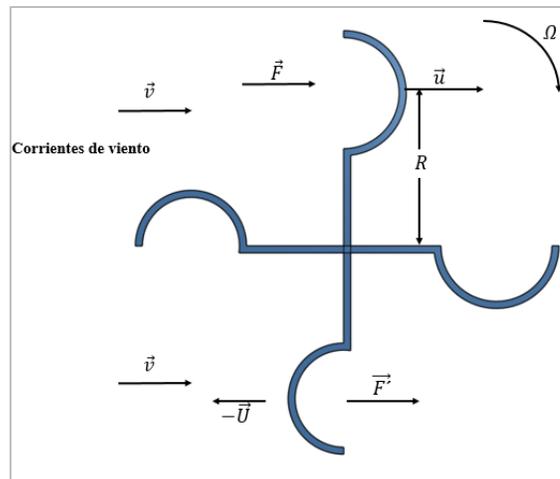


Fuente: López Villarubia [19].

Analizando la influencia del viento en rotores de arrastre diferencial se puede hacer comparativa y analogía de que estos presentan un comportamiento muy similar a los de los anemómetros de aspas.

Por lo que el análisis quedaría de la siguiente manera:

**Figura 3.3.4:** Diagrama de análisis de la acción del viento en un rotor de arrastre diferencial.



Fuente: Basado en López Villarubia [19].

$$\text{Velocidad lineal} \rightarrow u = \Omega R \quad (17)$$

siendo:

$\Omega \rightarrow$  Velocidad de rotación del rotor.

$R \rightarrow$  Distancia que existe entre el centro de la aspa y el centro de giro.

Teniendo que la velocidad del viento “v” es absoluta, la velocidad relativa del rotor analizando el aspa superior puede ser considerada como:

$$v - u \quad (18)$$

*Siendo negativo porque el aspa se estaria alejando del viento.*

Analizando el aspa inferior, siendo opuesta se tiene:

$$v + u \quad (19)$$

*Siendo positivo porque el aspa se estaria acercando al viento.*

Teniendo en cuenta los anteriores análisis, podemos entender las dos fuerzas que actúan en el sistema:

$$F \text{ y } F'$$

*Con direcciones y sentidos iguales pero diferente modulo.*

Al actuar con respecto al aspa inferior simétricamente, se tiene la producción de un par compuesto de fuerzas que generan el giro del rotor.

Para calcular F y F' seria de la siguiente manera:

$$F = C \frac{1}{2} \rho A (v - u)^2 \quad (20)$$

$$F' = C' \frac{1}{2} \rho A (v + u)^2 \quad (21)$$

La potencia “P” que ejerce el viento con respecto al rotor está definida por la siguiente ecuación, la cual relación el producto de la fuerza neta comprendida como la diferencia de ambas fuerzas, por la velocidad lineal de las aspas:

$$P = (F - F')u = \frac{1}{2} \rho A u [C(v - u)^2 - C'(v + u)^2] \quad (22)$$

Para hallar la potencia máxima tenemos que derivar e igualar a cero la anterior expresión para hallar  $u_m$ , la cual relaciona la velocidad lineal para una potencia máxima:

$$u_m = v \frac{2a - \sqrt{4a^2 - 3b^2}}{3b} \quad (23)$$

*siendo:*

$$a = C + C' \quad b = C - C'$$

Por lo que para aspas de una forma semicilíndrica seria:

$$C = 2.3 ; C' = 1.2$$

$$a = 2.3 + 1.2 = 3.5$$

$$b = 2.3 - 1.2 = 1.1$$

$$u_m = v \frac{2(3.5) - \sqrt{4(3.5)^2 - 3(1.1)^2}}{3(1.1)} = 0.08v$$

Por lo que la potencia máxima seria:

$$P_{Max} = 0.074 \left[ \frac{1}{2} \rho A v^3 \right] \quad (24)$$

Para el rotor con geometría convencional, con una densidad del aire en condiciones ambiente y una velocidad de viento de 3 m/s:

$$P_{Max} = 0.074 \left[ \frac{1}{2} \left( 1.29 \frac{Kg}{m^3} \right) (0.12824 m^2) \left( 3 \frac{m}{s} \right)^3 \right]$$

$$P_{Max} = 0.1652 \frac{Kg * m^2}{s^3} = 0.1652 W$$

Para el rotor con geometría helicoidal, con una densidad del aire en condiciones ambiente y una velocidad de viento de 3 m/s:

$$P_{Max} = 0.074 \left[ \frac{1}{2} \left( 1.29 \frac{Kg}{m^3} \right) (0.1295 m^2) \left( 3 \frac{m}{s} \right)^3 \right]$$

$$P_{Max} = 0.1669 \frac{Kg * m^2}{s^3} = 0.1669 W$$

Si se miran los resultados teóricos de la potencias máximas que alcanzarían los rotores Savonius con las características anteriormente dadas, se puede ver que el modelo matemático es bastante conservador debido a que considera un coeficiente de potencia bajo debido a parámetros aerodinámicos expuestos en el planteamiento de este modelo; este es considerablemente más bajo que el de otros modelos matemáticos que se han planteado para este tipo de rotores.

De este modelo matemático se puede resaltar las consideraciones aerodinámicas, las geometrías de las formas posibles para un rotor Savonius, la fundamentación y explicación de las diferencias de fuerzas entre las aspas para la generación del giro del rotor y el planteamiento matemático en general.

Analizando otros modelos matemáticos como los expuestos en [26] y [43], se tiene que el planteamiento matemático para este tipo de rotores se puede plantear considerando condiciones ideales y también considerando pérdidas aerodinámicas y mecánicas, de la siguiente forma:

De forma general, se tiene que la máxima potencia que puede ser alcanzada por un rotor está limitada por la ley de Betz, por lo que el modelo matemático bajo condiciones ideales está dado de la siguiente forma:

$$P_{Max} = \frac{1}{2} * C_p * \rho * A * v^3 \quad (25)$$

*siendo:*

$C_p \rightarrow$  Coeficiente de potencia

$\rho \rightarrow$  densidad del aire

$A \rightarrow$  Area del rotor

$v \rightarrow$  velocidad del viento

Debido a que la ecuación está planteada bajo condiciones ideales se tiene que  $\rho = 1.2 \frac{kg}{m^3}$  y  $C_p = 0.593$  debido a que este es el coeficiente de Betz, vea figura 2.5.2.

Por lo que usando este modelo matemático con las características de los rotores dispuestos se tendría:

Para el rotor Savonius convencional:

$$P_{Max} = \frac{1}{2} * C_p * \rho * A * v^3$$

$$P_{Max} = \frac{1}{2} * 0.593 * 1.2 \frac{kg}{m^3} * 0.12824 m^2 * \left(3 \frac{m}{s}\right)^3$$

$$P_{Max} = 0.36 \frac{kg}{m^3} * 0.12824 m^2 * \left(3 \frac{m}{s}\right)^3$$

$$P_{Max} = 1.2465 kg * \frac{m^2}{s} = 1.2465 W$$

Para el rotor Savonius de geometría helicoidal:

$$P_{Max} = \frac{1}{2} * C_p * \rho * A * v^3$$

$$P_{Max} = \frac{1}{2} * 0.593 * 1.2 \frac{kg}{m^3} * 0.1295 m^2 * \left(3 \frac{m}{s}\right)^3$$

$$P_{Max} = 0.36 \frac{kg}{m^3} * 0.1295 m^2 * \left(3 \frac{m}{s}\right)^3$$

$$P_{Max} = 1.259 kg * \frac{m^2}{s} = 1.259 W$$

De este modelo matemático podemos resaltar que las potencias máximas son muy parecidas, pero siendo la del rotor Savonius con geometría helicoidal ligeramente superior que la del rotor Savonius convencional; también resalta que el coeficiente de potencia es muy superior en comparación con el coeficiente de potencia usado en el primer modelo matemático usado, esto se debe a que este modelo matemático desarrollado no contempla pérdidas aerodinámicas o mecánicas.

Si se consideraran pérdidas aerodinámicas y mecánicas el modelo matemático tendría que plantearse de la siguiente forma:

Según [26] y [43], considerando las pérdidas aerodinámicas y mecánicas estas trascienden cerca de un 50% con respecto a la potencia obtenida anteriormente, por lo que replanteando el modelo matemático para tener en cuenta estas pérdidas este quedaría así:

$$P_{Max} = 0.18 \frac{kg}{m^3} * A * v^3 \quad (26)$$

Siendo:

$A \rightarrow$  Area del rotor

$v \rightarrow$  velocidad del viento

Para el rotor Savonius convencional:

$$P_{Max} = 0.18 \frac{kg}{m^3} * 0.1295 m^2 * \left(3 \frac{m}{s}\right)^3$$

$$P_{Max} = 0.623 W$$

Para el rotor Savonius de geometría helicoidal:

$$P_{Max} = 0.18 \frac{kg}{m^3} * 0.1295 m^2 * \left(3 \frac{m}{s}\right)^3$$

$$P_{Max} = 0.63 W$$

De este último modelo matemático vemos que el coeficiente de potencia es muy superior al igual que la potencia máxima considerando pérdidas aerodinámicas y mecánicas en comparación con el resultado del primer modelo matemático analizado.

Por lo que para validar la veracidad de estos resultados se dispone de la simulación fluidodinámica, siendo que los resultados de esta se pueden usar para analizar, comparar y determinar cuál de los resultados obtenidos por los modelos matemáticos se adapta de mejor forma al planteamiento realizado y sus condiciones.

**Tabla 4:** Tabla de resultados teóricos de la potencia máxima para los rotores Savonius.

<b><i>Resultados de los modelos matematicos implementados para determinar la potencia maxima de los rotores Savonius</i></b>			
<b><i>Tipo de rotor</i></b>	<b><i>Modelo matematico #1</i></b>	<b><i>Modelo matematico #2 (Condiciones ideales)</i></b>	<b><i>Modelo matematico #3 (perdidas aerodinamicas y mecanicas)</i></b>
<b><i>Convencional</i></b>	0,1652 W	1,2465 W	0,623 W
<b><i>Helicoidal</i></b>	0,1669 W	1,2559 W	0,63 W

Fuente: Propia.

### 3.4 Diseño CAD de rotores y estructura del banco

Para efectuar el diseño CAD del rotor se tuvieron en cuenta factores como:

- ✚ Productividad.
- ✚ Versatilidad del software para diseñar.
- ✚ Disponibilidad del software.
- ✚ Costo.
- ✚ Compatibilidad y exportabilidad.

Por lo que el catálogo de opciones que se consideraron para efectuar el desarrollo de los diseños quedó de la siguiente manera:

- ✚ Solidworks.
- ✚ ANSYS.
- ✚ Onshape.
- ✚ AutoCAD.
- ✚ AutoCAD Mechanical.
- ✚ Inventor.

Siendo esos softwares los más populares y con mejores expectativas, se tiene que, efectuando un análisis comparativo de sus prestaciones bajo los criterios anteriormente mencionados, vea tabla 5, el software que arroja mejores resultados fue Onshape.

De este software se puede destacar que este software cuenta con un entorno intuitivos, bastante fáciles de trabajar, con un excelente desempeño y buenas funcionalidades a la hora de efectuar los diseños necesarios.

El aspecto más relevante e innovador para la implementación de este en el presente proyecto es que este software basa su uso a través de internet, utilizando el modelo de software como servicio en línea, liberando así al usuario de la necesidad de tener que disponer de la instalación del software en algún equipo para poder usarlo.

Contando también con versiones para dispositivos móviles o tablets las cuales permiten continuar con el trabajo de diseño prácticamente en cualquier parte en la que disponga de internet, siendo un aspecto que eleva la productividad considerablemente, además de destacar mucho más si se juntan con todas las virtudes mencionadas anteriormente.

Adicionalmente, cuenta con licencias de uso educativo para que los estudiantes de instituciones educativas oficiales puedan acceder a este sin necesidad de pagar por ello.

**Tabla 5:** Tabla de análisis comparativo de software para diseño CAD.

Criterios	Análisis comparativo de software de diseño.					
	 SOLIDWORKS	 Ansys	 onshape	 AUTOCAD	 AUTOCAD MECHANICAL	 INVENTOR
<b>Productividad</b>	4	4	5	3	4	5
<b>Versatilidad del software para diseñar</b>	3	4	5	2	4	4
<b>Disponibilidad del software</b>	3	4	5	4	4	4
<b>Costo</b>	3	3	4	4	4	4
<b>Compatibilidad y exportabilidad</b>	5	5	5	4	5	5
<b>Resultado</b>	18	20	24	17	21	22

Escala de puntajes	
1	Malo
2	Regular
3	Aceptable
4	Bueno
5	Excelente

Fuente: Propia

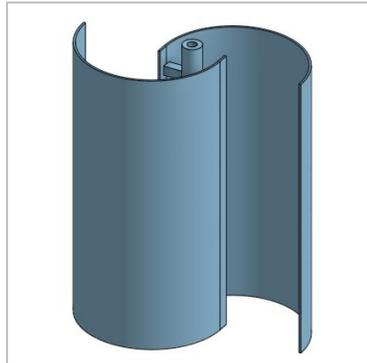
Para la selección de elementos y construcción del banco se emplea materiales disponibles en el mercado; con el fin de comprender y planificar de una forma detallada el desarrollo del banco se el modelado CAD de las partes elementales del mismo.

Es importante resaltar que elementos como el eje, rodamiento, elementos de sujeción, rieles, etc; son elementos que ya fueron previamente calculados, estudiados y analizados en trabajos similares por lo que con esto se da cumplimiento a los criterios de selección y diseño CAD para los elementos del banco.

En el diseño se tuvieron en cuenta factores como el peso del banco, su portabilidad, la factibilidad de fabricación con elementos reciclables, etc.

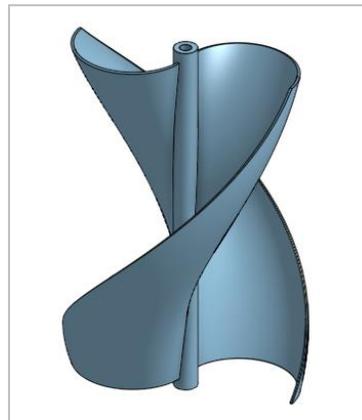
A continuación, veremos los resultados del modelado CAD de los principales componentes del banco:

**Figura 3.4.1:** Diseño CAD rotor Savonius convencional.



Fuente: Propia.

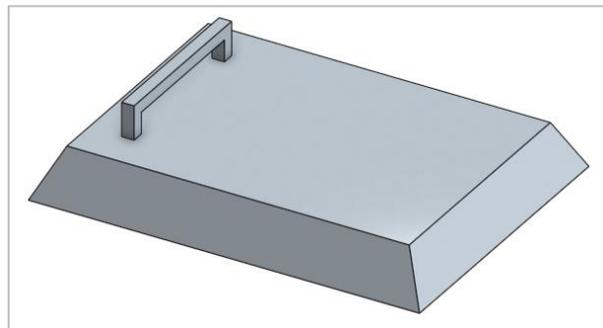
**Figura 3.4.2:** Diseño CAD rotor Savonius helicoidal.



Fuente: Propia.

Las figuras 3.4.1 y 3.4.2 nos permite contemplar de una mejor manera cada uno de los modelos de rotores y su forma geométrica.

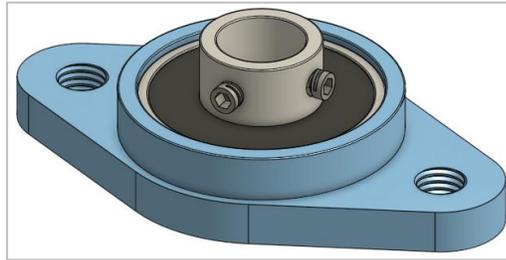
**Figura 3.4.3:** Diseño CAD del soporte para el banco.



Fuente: Propia.

La figura 3.4.3 nos permite apreciar el diseño escogido para la estructura (base) que soportara cada uno de los elementos del banco, como es el caso de ejes, chumacera, rotores, etc; Esta cuenta con una forma de “pirámide truncada”, la cual se caracteriza por ofrecer una estabilidad considerable, ya que debido a las corrientes de viento que van a estar interactuando con los rotores del banco, este necesita una base que le brinde anclaje para evitar alabeos y balanceos de la estructura.

**Figura 3.4.4:** Diseño CAD de chumacera para soporte del eje de los rotores.



Fuente: Propia.

La figura 3.4.4 permite identificar el elemento de sujeción y rodamiento principal, el cual consiste en una chumacera, esta tendrá como función brindar soporte al eje de rotación de los rotores, buscando conseguir la mejor practicidad y eficiencia mecánica, además de considerar su facilidad de ensamblado y fijación.

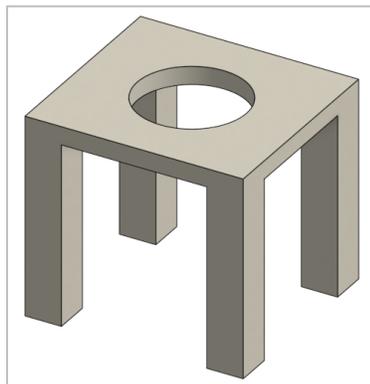
**Figura 3.4.5:** Eje para rotores Savonius.



Fuente: Propia.

Viendo la figura 3.4.5 se puede contemplar el modelado del eje que soportará los rotores y será el encargado de transmitir el movimiento generado por la interacción entre las corrientes de viento y los rotores.

**Figura 3.4.6:** Diseño CAD de soporte para generador eléctrico.



Fuente: Propia.

En la figura 3.4.6 se expone el modelado CAD de la base que soporta el generador eléctrico, como se puede apreciar esta debe contar con el espacio disponible para permitir el posicionamiento de la correa de transmisión que se conecta a las poleas, además de contar con espacio por el posicionamiento del generador.

**Figura 3.4.7:** Diseño CAD del generador eléctrico.



Fuente: Propia.

Apreciando la figura 3.4.7 nos permite observar el modelado CAD del generador, contemplando cada una de sus partes como lo son el cuerpo del generador, eje de transmisión y polea de transmisión.

**Figura 3.4.8:** Diseño CAD de polea para transmisión de movimiento del eje.



Fuente: Propia.

**Figura 3.4.9:** Diseño CAD correa de transmisión para poleas.



Fuente: Propia.

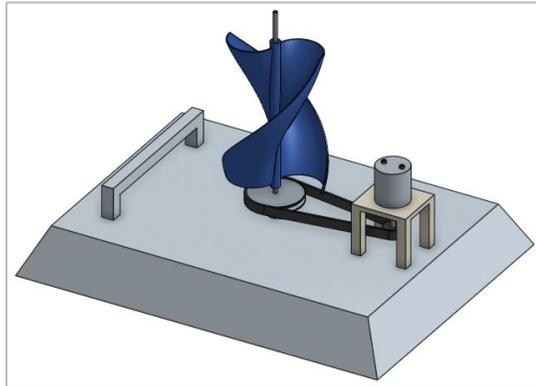
Las imágenes 3.4.8 y 3.4.9 enmarcan el conjunto de transmisión eje-polea, los cuales que conectan al eje de los rotores y a la polea del generador para permitir la transmisión de movimiento generado por lo rotores y en consecuencia la generación de energía eléctrica por medio de la alternativa eólica.

Posterior al diseño de los elementos principales del banco y su estructura, se procede a generar el ensamblado y los sistemas de referencia para las piezas diseñadas puedan tomar la posición que les corresponde para que el banco funcione.

En las figuras 3.4.10 – 3.4.13 se puede apreciar el ensamble del banco y sus distintos planos de vista, con el fin de brindar todas las perspectivas relevantes posibles buscando siempre el contar con los mejores detalles de diseño y ensamble.

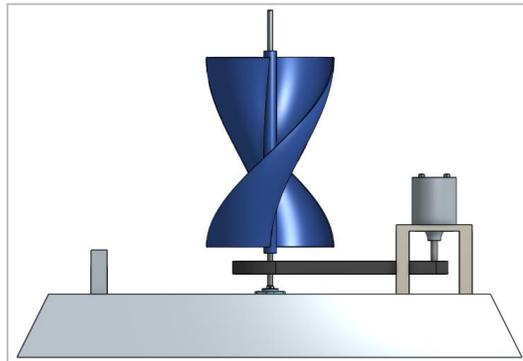
Contando con el ensamble en diseño CAD del banco, se genera una renderización fotográfica del mismo, la cual nos brinda un mejor aspecto visual y de acabados del banco; vea la figura 3.4.14, esta renderización se efectúa usando el complemento PhotoView 360 de SolidWorks, esta migración de datos es posible debido a la compatibilidad de importación de datos que nos brinda Onshape al tener una amplia gama de formatos para exportar los diseños y ensambles efectuados en este; logrando así que los diseños se puedan trabajar también en otros programas que presentan complementos que se puedan necesitar para estudios puntuales.

**Figura 3.4.10:** Ensamble del banco en Onshape “vista isométrica”.



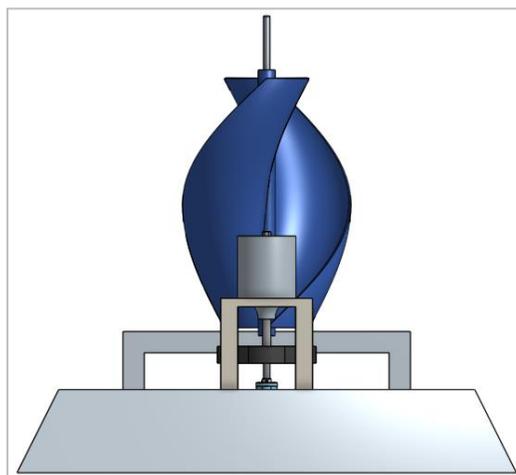
Fuente: Propia.

**Figura 3.4.11:** Ensamble del banco en Onshape "vista frontal".



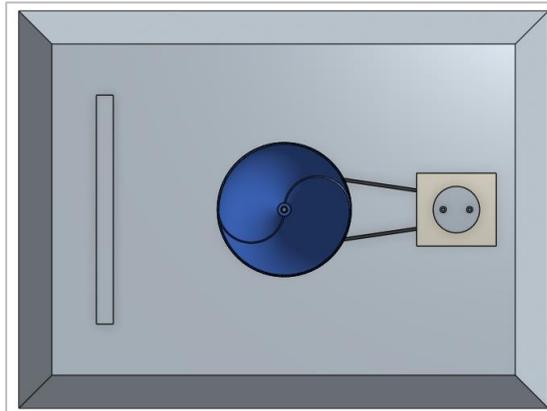
Fuente: Propia.

**Figura 3.4.12:** Ensamble del banco en Onshape "Vista lateral derecha".



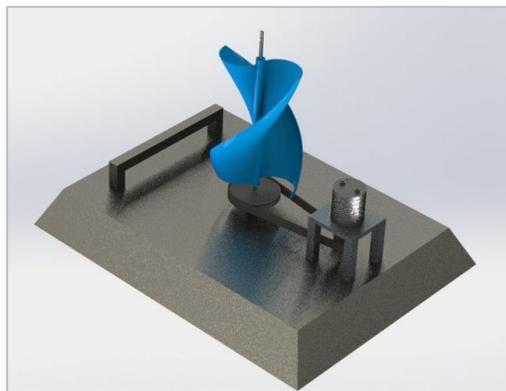
Fuente: Propia.

**Figura 3.4.13:** Ensamble del banco en Onshape "Vista superior".



Fuente: Propia.

**Figura 3.4.14:** Render del ensamble CAD del banco.



Fuente: Propia.

### **3.5 Materiales y manufactura:**

Considerando la estructura del banco, los elementos diseñados, su geometría y dimensiones, se plantea como factor diferencial el uso de material reciclado para la manufactura del banco, buscando así evitar la compra de materiales nuevos que puedan elevar el costo del banco, siempre teniendo en cuenta que el rendimiento y las prestaciones del mismo no se vean afectadas en gran medida; adicionalmente se tiene que el factor de fabricación del banco con elementos reciclados brinda la posibilidad de aportar de forma positiva con la reducción del impacto ambiental, en pro de un planteamiento ecológico como lo es el funcionamiento del elemento diseñado para este proyecto.

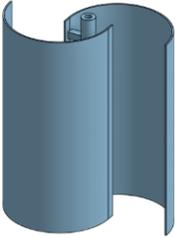
A continuación, se presentarán los materiales designados para la manufactura de los componentes del banco:

- **Aspas de los rotores**

Considerando que el rotor Savonius es del tipo de “rotor de arrastre”, se tiene que estos deben presentar prestaciones de poco peso para lograr su giro, además de contar con una solidez considerable en la forma de sus aspas; adicionalmente se considera la disponibilidad del material en el mercado para su fabricación.

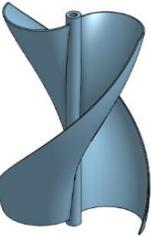
Teniendo en cuenta esas consideraciones, el material escogido para la fabricación del rotor Savonius con geometría convencional fue PVC, en diferentes presentaciones, para el rotor con geometría convencional se reciclo un tubo de PVC, mientras que para el rotor con geometría helicoidal se usó una lámina de PVC.

**Tabla 6:** Tabla característica del material designado para la fabricación de las aspas del rotor con geometría convencional.

Rotor savonius convencional	Manufactura		
	Material usado	Datos	
		Nombre	Tubo sanitario Novafort
		Material	PVC
		Diámetro nominal	200 mm / 8 pulg
		Diámetro interior	182 mm / 7.16 pulg
		Espesor	2 mm / 0.0787 pulg
		Peso	909 g
		Longitud de fabrica	6 m
		Longitud usada	35 cm
		Color	Amarillo
		Reciclado	si

Fuente: Propia.

**Tabla 7:** Tabla característica del material designado para la fabricación de las aspas del rotor con geometría helicoidal.

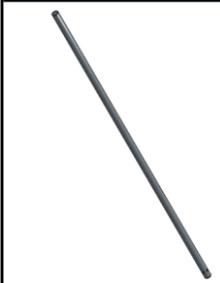
Rotor savonius convencional	Manufactura		
	Material usado	Datos	
		Nombre	Lamina HI
		Material	PVC
		Espesor	1 mm
		Largo	1 m
		Ancho	1 m
		Largo de fabrica	2 m
		Ancho de fabrica	1 m
		Longitud usada	1 m <sup>2</sup>
		Color	Blanco
		Reciclado	No

Fuente: Propia.

- **Eje de rotación para los rotores**

Debido a que se sabe que mecánicamente el eje va a estar sometido a cargas torsionales por el tipo de aplicación que va a desempeñar, y sabiendo que son importantes la reducción de peso y ahorro de material, además de la disponibilidad del material y la cantidad de procesos de manufactura que se necesitan para lograr su acabado final para su uso, se tiene que la mejor opción como eje de rotación para el banco es un tubo circular de acero inoxidable de  $\frac{3}{4}$  pulgada, ya que los tubos circulares resisten de forma más eficiente las cargas de torsión que las barras de material sólido, además presentan excelentes prestaciones en cuanto a el peso y el ahorro de material. [37]

**Tabla 8:** Tabla característica del elemento y material designado para el eje de rotación del banco.

Eje de rotación	Manufactura		
	Material usado	Datos	
		Nombre	Tubo redondo
		Material	Acero inoxidable
		Diametro	$\frac{3}{4}$ pulg / 3.8 cm
		Calibre	18
		Espesor	1.2 mm
		Acabado	Pulido
		Longitud de fabrica	6 m
		Longitud usada	1 m 2 secciones de 50 cm
		Reciclado	No

Fuente: Propia.

- **Chumacera**

Debido a la forma y ubicación del eje, es necesario tener un elemento de sujeción y rodamiento óptimo y con una buena calidad, por lo cual el eje al estar diseñado para tener una posición vertical, la chumacera debe ser de este tipo.

Para el caso del banco, se contaba con una chumacera cuadrada de  $\frac{3}{4}$  pulgada debido al tamaño del eje y de 4 puntos de sujeción, que garantizaran la fijación de la misma al banco; por el uso e importancia que esta tiene para el funcionamiento del banco, se recomienda que sea nueva y de una buena calidad para garantizar su correcto estado y prestaciones.

**Tabla 9:** Tabla característica de chumacera adquirida.

Chumacera	Manufactura		
	Material usado	Datos	
		Nombre	Chumacera cuadrada
		Referencia	UCF 204-12
		Marca	Bearings RBR
		Diametro	3/4 pulg
		Numero de rodamientos	UC 204-12
		Numero de soporte	F204
		Material rodamiento (rodamiento de bolas)	Acero cromado AISI 52100
		Material soporte	Hierro fundido
		Reciclado	No

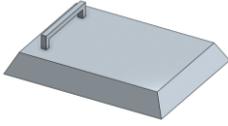
Fuente: Propia.

- **Estructura “base” del banco**

Considerando la complejidad de la geometría y el diseño de la estructura mostrada en la figura 3.4.3, la estructura debe ser construida desde cero, por lo que su construcción se plantea en tubos de acero cuadrados de  $\frac{3}{4}$  pulgadas, recubiertos con láminas de hierro las cuales pueden ser dobladas y fijadas, para conseguir la forma de “pirámide truncada” que se desea.

Para la unión de los tubos y las láminas, se recomienda el uso de soldadura como elemento de unión, debido a su versatilidad, disponibilidad y bajo costo.

**Tabla 10:** Tabla característica de la base del banco.

Estructura "base" del banco	Manufactura		
	Material usado	Datos	
		Nombre	Soporte del banco
		Material #1	Tubo cuadrado de 3/4"
		Material #2	Lamina de hierro calibre 18
		Uniones	Soldadas
		Base anticorrosiva	Si
		Pintura de acabado	Plata
		Largo rectangulo inferior	90 cm
		Ancho rectangulo inferior	50 cm
		Largo rectangulo superior	80 cm
		Ancho rectangulo superior	40 cm
		Altura entre rectangulos	10 cm
		Angulo de inclinación	45 °

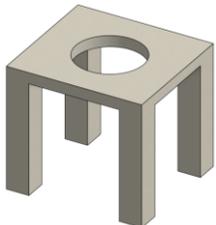
Fuente: Propia.

La base del banco fue diseñada contemplando una barra que servirá para el posicionamiento y fijación de instrumentos de medición como lo son dinamómetros, esta barra de anclaje formada por tubos cuadrados, tiene dimensiones de 30 cm de largo y 8 cm de alto, ubicada con una separación de 3 cm de uno de los bordes del rectángulo superior.

- **Soporte para generador eléctrico**

Esta parte se contempla como un anexo a la estructura principal de soporte “base del banco”, debido a esto y a su función la cual es brindar la ubicación para anclar el generador eléctrico, se decide como material a usar su fabricación ángulos de  $\frac{3}{4}$  pulgada, recubierta para formar el cuerpo del soporte con una lámina de hierro calibre 18; adicionalmente para brindarle soporte se le unen mediante soldadura platinas de metal en las patas.

**Tabla 11:** Tabla característica del soporte para el generador eléctrico.

Soporte generador electrico	Manufactura		
	Material usado	Datos	
 		Nombre	Soporte generador
		Material #1	Angulo de metal de 3/4"
		Material #2	Lamina de hierro calibre 18
		Material #3	Platinas de hierro
		Uniones	Soldadas
		Base anticorrosiva	Si
		Pintura de acabado	Plata
		Largo	10.5 cm
		Ancho	10.5 cm
		Alto	10 cm
		Diámetro perforacion central	1.5 cm
		Reciclado	Si

Fuente: Propia.

Para esta estructura los materiales usados fueron reciclados y adaptados para su correcto desempeño así se pudo reutilizar material que se pensaba desechar.

- **Generador eléctrico**

El generador eléctrico se decide adquirir acorde a la disponibilidad del mercado, designado para el tipo de función a la que está enfocado este proyecto.

**Tabla 12:** Tabla característica de generador eléctrico.

Generador electrico	Manufactura		
	Material usado	Datos	
		Nombre	Motor DC
		Marca	DUMOCA
		Voltaje	12 V
		Corriente	1.5 A
		RPM	21840
		Referencia	MOT-63731
		Bornas de conexión	2
		Largo motor	7.7 cm
		Diametro motor	3.7 cm
		Longitud del eje	18 mm
		Requiere de acople y polea	Si
		Reusado	No

Fuente: Propia

- **Poleas de transmisión**

Al igual que el generador, se decide adquirir estas piezas comercialmente, debido a que diseñar y construirlas desde cero sería contraproducente.

**Tabla 13:** Tabla característica poleas de transmisión.

Poleas de transmisión	Manufactura		
	Material usado	Datos	
		Nombre	Polea de 2 cavidades
		Material	Aluminio
		Diametro #1	1"
		Diametro #2	2"
		Diametro ranura del eje	3/4"
		Tornillos prisioneros	3/8"
		Nombre	Polea sencilla
		Material	Aluminio
		Diametro #1	2"
		Diametro ranura del eje	3/4"
		Tornillo prisionero	3/8"

Fuente: Propia.

- **Correa de transmisión**

Para esta parte, fue aprovechada la correa dentada de una máquina de costura, la cual fue reciclada y adaptada, viendo que su material y flexibilidad la hace idónea debido a la función que va a desempeñar.

**Tabla 14:** Tabla característica de la correa de transmisión.

Correa de transmisión	Manufactura		
	Material usado	Datos	
		Nombre	Correa
		Material	Caucho
		Marca	GUL-TZ®
		Longitud	30 cm
		Espesor	5 mm
		Tipo	Dentada
		Referencia	B200XXL 5
		Longitud usada	35 cm
		Color	Negra
		Reciclado	si

Fuente: Propia.

### 3.6 Simulación fluidodinámica

Los sistemas fluidodinámicos se pueden analizar usando la perspectiva del modelado de ecuaciones que enmarcan su comportamiento y soluciones, la comprensión de estas ecuaciones se puede dar usando el modelo de viscosidad k-epsilon “k-e” dispuesto en el software de simulación computacional ANSYS. En donde analizando la interacción de la turbulencia, la cual es originada por la energía cinética “k”, podemos ver que la turbulencia está caracterizada por la siguiente ecuación [38]:

$$\frac{\partial(\sigma_l k)}{\partial t} + \nabla(\sigma_l k V_i) = \nabla \left\{ \left\{ \mu + \frac{\mu^T}{\sigma^k} \right\} \nabla k \right\} + G - \sigma_l \varepsilon \quad (27)$$

siendo:

$$\frac{\partial(\sigma_l k)}{\partial t} \rightarrow \text{la tasa de cambio de la energía cinética}$$

turbulenta en el tiempo y espacio.

$$\nabla(\sigma_l k V_i) \rightarrow \text{el transporte convectivo de la energía cinética}$$

turbulenta debido al movimiento del flujo.

$$\nabla \left\{ \left\{ \mu + \frac{\mu^T}{\sigma^k} \right\} \nabla k \right\} \rightarrow \text{la difusión molecular de la energía cinética turbulenta.}$$

$$G \rightarrow \text{la generación de energía cinética turbulenta debido a la}$$

interacción de la turbulencia con el flujo.

$\sigma_l \varepsilon \rightarrow$  la disipación de energía cinética turbulenta debido  
a la viscosidad cinemática del fluido

$\sigma_l$  y  $\sigma^k \rightarrow$  son los coeficientes de Prandtl para la energía cinética turbulenta  
y la difusividad turbulenta.

$\mu + \mu^T \rightarrow$  son la viscosidad cinemática y la viscosidad turbulenta.

$V_l \rightarrow$  convección de la energía cinética turbulenta debido al flujo del fluido.

El término “e”, representa la disipación de energía cinética y está dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial(\sigma_l \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\sigma_l e V_l) = \left\{ \left\{ \mu + \frac{\mu^T}{\sigma^F} \right\} \nabla \varepsilon \right\} + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 G - C_2 \sigma_l \varepsilon) \quad (28)$$

Siendo:

$\frac{\partial(\sigma_l \varepsilon)}{\partial t} \rightarrow$  la tasa de cambio de la disipación de energía cinética  
turbulenta en el tiempo y espacio.

$\nabla(\sigma_l e V_l) \rightarrow$  el transporte convectivo de la disipación de energía cinética  
turbulenta debido al movimiento del flujo.

$\left\{ \left\{ \mu + \frac{\mu^T}{\sigma^F} \right\} \nabla \varepsilon \right\} \rightarrow$  la difusión molecular de la generación y disipación de  
energía cinética turbulenta.

$\frac{\varepsilon}{k} (C_1 G - C_2 \sigma_l \varepsilon) \rightarrow$  representa la generación y disipación de energía cinética  
turbulenta debido a la interacción de l turbulencia con el flujo.

$G \rightarrow$  tasa de generación de energía cinética turbulenta.

$V_l \rightarrow$  la velocidad media del fluido en dirección longitudinal

$C_1$  y  $C_2 \rightarrow$  coeficientes empíricos.

$\sigma_l$  y  $\sigma^f \rightarrow$  coeficientes de Prandtl para la disipación de energía cinética  
turbulenta y viscosidad cinemática.

La viscosidad turbulenta “ $\mu^T$ ” está comprendida bajo la siguiente ecuación:

$$\mu^T = \frac{C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (29)$$

Siendo:

$C_\mu \rightarrow$  Constante empírica

$k \rightarrow$  energía cinética turbulenta

$\varepsilon \rightarrow$  tasa de disipación de la energía turbulenta

Comprendido los cimientos y pilares del comportamiento fluidodinámico que enmarca el sistema, se procede a describir y definir el modelo que enmarca a el movimiento de cuerpo rígido, la siguiente ecuación modela a este movimiento [38]:

$$\frac{dP}{dt} = F \quad (30)$$

$$\frac{d\pi}{dt} = m \quad (31)$$

Siendo F “fuerza y m “torque”, estas son equivalentes a P “momento lineal” y  $\pi$  “momento angular”. Las ecuaciones que las relacionan representan el estado de cambio en la traslación y rotación del cuerpo rígido; [38].

Para dar un mejor enfoque a la explicación del movimiento rotacional en cuerpos rígidos la ecuación puede reescribirse en términos de sistemas de coordenadas:

$$\dot{\theta} x I \dot{\theta} x I \ddot{\theta} = m \quad (32)$$

Estableciendo a I como la “masa en el momento de inercia”, esta puede ser definida en forma de matriz así:

$$I = \begin{bmatrix} \int ((y - y_G)^2 + (z - z_G)^2) dm & - \int (x - x_G)(y - y_G) dm & - \int (x - x_G)(z - z_G) dm \\ - \int (x - x_G)(y - y_G) dm & \int ((x - x_G)^2 + (z - z_G)^2) dm & - \int (y - y_G)(z - z_G) dm \\ - \int (x - x_G)(z - z_G) dm & - \int (y - y_G)(z - z_G) dm & \int ((x - x_G)^2 + (y - y_G)^2) dm \end{bmatrix} \quad (33)$$

El centro de masa está dado por  $(x_G, y_G, z_G)$ , con respecto a la masa en el momento de inercia en la ecuación 29, y “ $dm$ ” es el diferencial de masa.

El planteamiento matemático que forma para el espacio de coordenadas en la ecuación clásica de Euler para el cuerpo rígido en coordenadas corregidas por el cuerpo se encuentra contemplado en la ecuación 33.

Se tiene que la siguiente ecuación relaciona, unifica y representa todas las contribuciones separadas en el momento total “ $m$ ”, incluyendo el resorte u otro momento alternativo:

$$m = m_{Aero} - K_{Rotacional}(\theta - \theta_{so}) + m_{ext} \quad (34)$$

Siendo  $m_{Aero}$  el par aerodinámico,  $K_{Rotacional}$  es la constante elástica rotacional y  $m_{ext}$  enmarca a todos los pares externos adicionales que actúan sobre el cuerpo.

Profundizando en los modelos de turbulencia, se puede decir que son herramientas muy utilizadas en lo que respecta a la simulación numérica de fluidos, las cuales buscan predecir el comportamiento del flujo turbulento en situaciones en las que la posibilidad de efectuar mediciones experimentales precisas para validar y entender el comportamiento del flujo del fluido a estudiar. La turbulencia se caracteriza por la presencia de fluctuaciones aleatorias en la velocidad y la presión del fluido, lo que hace que sea difícil de predecir de manera precisa.

A continuación, se darán a conocer los modelos de turbulencias más populares en lo que respecta a el uso de estos en simulaciones computacionales mediante softwares especializados, es importante resaltar también que cada uno de estos modelos de viscosidad turbulenta cuenta con sus propias limitaciones y sus aspectos a destacar brindando así una amplia gama de opciones al momento de estudiar de forma computacional los casos deseados.

**Modelo k-épsilon:** Este modelo de viscosidad turbulenta es uno de los más conocidos y utilizados en la industria de la simulación computacional de fluidos; este se basa en la resolución de dos ecuaciones de transporte, una para la energía cinética de la turbulencia ( $k$ ), vea ecuación 27, y otra para la tasa de disipación de energía turbulenta ( $\epsilon$ ), vea ecuación 29.

**Modelo k-omega:** Este modelo es similar al modelo k-epsilon, difiere del modelo k-epsilon ya que este en lugar de la tasa de disipación de energía turbulenta, resuelve una ecuación de transporte para la frecuencia de rotación turbulenta ( $\omega$ ).

**Modelo RANS:** Este modelo es un modelo de media de Reynolds y se basa en la resolución de las ecuaciones promediadas de Navier-Stokes. Se puede decir que este modelo es más

general que el modelo k- $\epsilon$  y es adecuado para situaciones en las que la turbulencia es moderada.

**Modelo LES:** Este modelo es un modelo de simulación de Large Eddy y se basa en la resolución directa de las ecuaciones de Navier-Stokes para las escalas de tiempo grandes, mientras que las escalas de tiempo pequeñas se modelan utilizando una submalla.

**Modelo DNS:** Este modelo es un modelo de simulación directa de las ecuaciones de Navier-Stokes sin ninguna simplificación o modelo de submalla. Es el modelo más preciso, pero también es el más costoso computacionalmente y solo se utiliza en situaciones en las que es absolutamente necesario.

En el caso del modelo k- $\epsilon$ , este es muy popular para la simulación de rotores Savonius, vea [38] - [40], debido a que este modelo es adecuado para describir la turbulencia en flujos de baja y mediana complejidad, además de ser muy eficiente y práctico si se mira el aspecto de los recursos computacionales a comparación de otros modelos.

Aunque la geometría de los rotores Savonius es relativamente simple, basándose en modelos ya realizados, vea [38] – [40], podemos ver que la presencia de turbulencias en el flujo alrededor de los rotores es un factor importante que puede afectar su rendimiento.

Resaltando el hecho de que el modelo k- $\epsilon$  es capaz de modelar flujos de baja y mediana complejidad, tenemos que este es adecuado para simular el flujo alrededor de los rotores Savonius además de ser uno de los modelos más utilizados en simulación numérica de flujos turbulentos y de contar con el respaldo de simulaciones ya realizadas en ANSYS para rotores Savonius usando este modelo. Vea [40]

### **Consideraciones de la simulación:**

Teniendo en cuenta que el fin de esta simulación es la verificación y validación de la rotación y la potencia alcanzada por una de las turbinas a determinada velocidad con respecto a su comportamiento fluidodinámico.

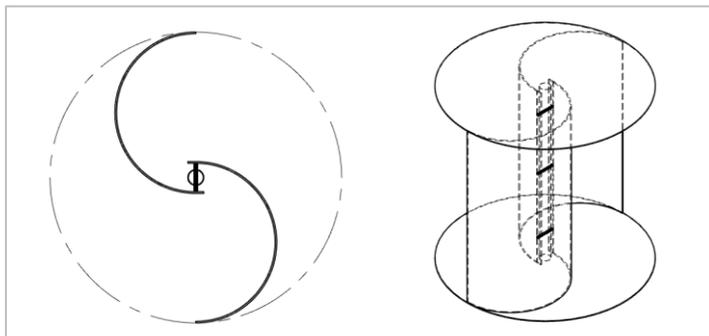
Se tiene que al elegir que el tipo de animación se hará en 2D, solo es necesario efectuar una sola simulación, ya que los rotores al tener las mismas dimensiones, si se mira con respecto al plano Z, se tiene que la geometría en dos dimensiones son las mismas.

### **Condiciones de contorno:**

La selección de los diseños modelados en Onshape, se efectúa a partir de las partes y ensamblajes efectuados en la fase 2 de la metodología; mire las figuras 3.4.1 y 3.4.2.

Se ha de tener en cuenta que, en la fase de definir las condiciones de contorno, se idealiza el diseño del rotor en cuanto a su forma, dimensiones y material siendo este último PVC para las aspas y acero inoxidable para el eje; vea tabla 2, tabla 3, tabla 6 y tabla 7.

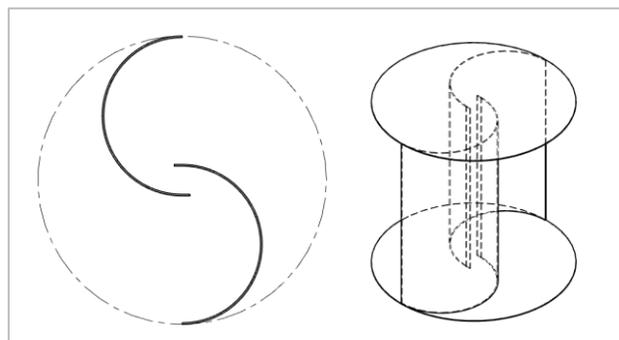
**Figura 3.6.1:** Modelo estándar del rotor extraído de Onshape.



Fuente: Propia.

En la figura 3.6.1 se puede apreciar la geometría que enmarca al diseño CAD del rotor Savonius con una geometría convencional, siendo esta la que será sometida al proceso de simplificación para posteriormente ser importada a ANSYS para la definición de las secciones que comprenden el sistema para la simulación.

**Figura 3.6.2:** Modelos simplificado del rotor extraído de Onshape para efectuar el análisis 2D.



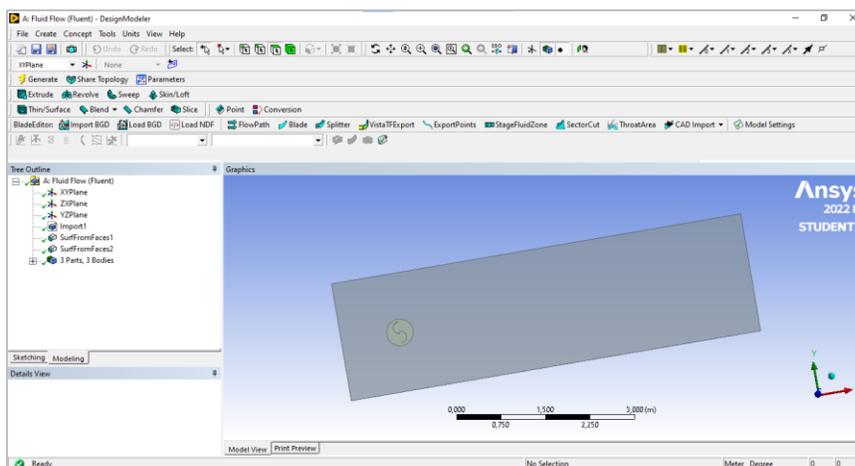
Fuente: Propia.

En la figura 3.6.2 se comprende el modelo geométrico simplificado del rotor Savonius convencional a importar en ANSYS, para posteriormente proceder a simular el comportamiento fluidodinámico.

Para ejecutar el análisis en dos dimensiones, se usa el software ANSYS, aprovechando el uso de su librería “**Fluent**”, siendo esta una variante muy popular en lo que respecta al sector de simulación dinámica computacional de fluidos junto con “**CFX**”. Basado en [38] – [40].

Para efectuar el análisis y configuración de parámetros, se realiza una indagación previa, en donde se pueda tener una guía que contemple un caso muy similar al deseado, siendo este la obtención de una simulación estándar a una velocidad de 2 m/s; debido a que esta velocidad es la óptima para el funcionamiento de los rotores Savonius. Basado en [39], [40].

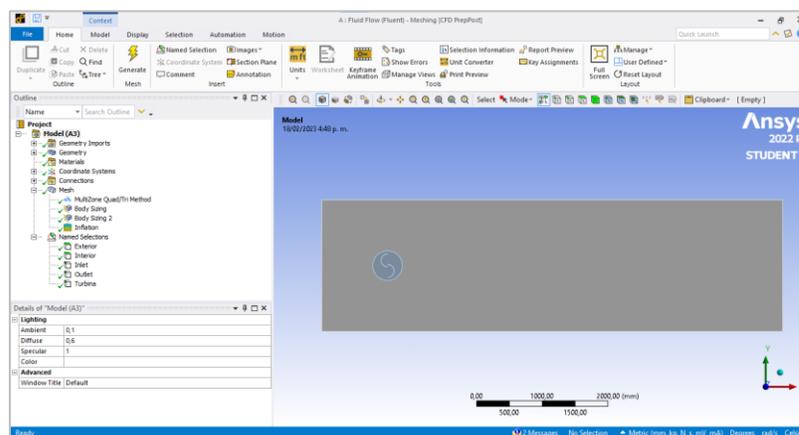
**Figura 3.6.3:** Importación de la geometría a ANSYS.



Fuente: Propia.

Posteriormente, se procede a la creación de las secciones que componen al sistema, en donde se contempla la entrada del fluido, las paredes del sistema, la geometría de la turbina, la salida del sistema, etc.

**Figura 3.6.4:** Creación de las secciones del sistema y configuración del mallado.

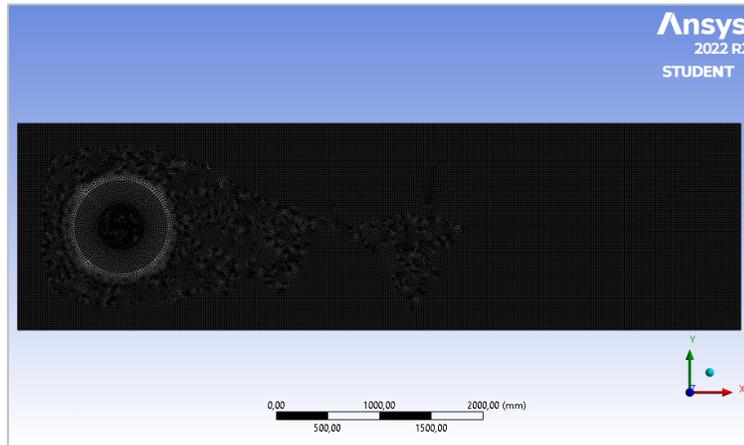


Fuente: Propia.

Además, se configura los parámetros necesarios para la generación del mallado, siendo de mucha importancia, la elección del método que enmarca al mallado para su generación; en este caso se elige usar el método de mallado *“multizone quad/tri – (quad/cuadriláteros y*

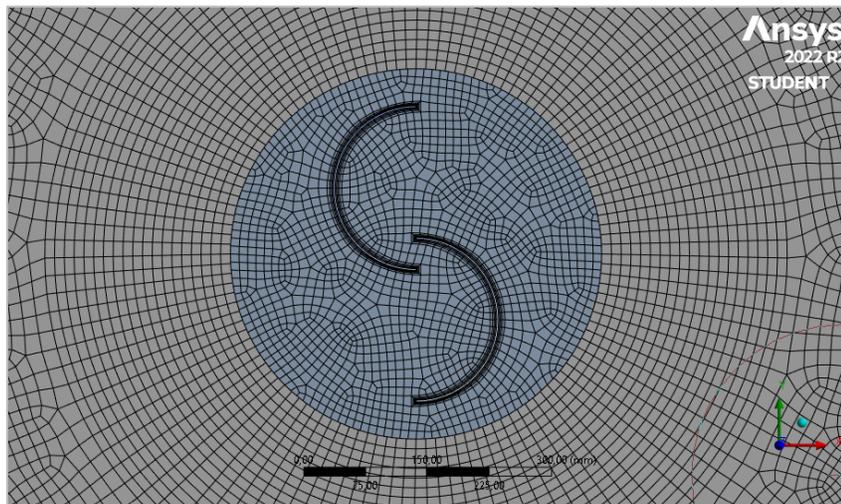
*tri/triángulos)*” ya que este se caracteriza por la generación de mallados en geometrías de manera eficiente y precisa, gracias a la capacidad de aplicar diferentes tipos de elementos de mallado a cada zona y adaptarse a las necesidades del modelo. Esto permite obtener una alta resolución en las zonas críticas y una menor resolución en las zonas menos relevantes, lo que se traduce en una simulación más eficiente y acelerada.

**Figura 3.6.5:** Generación del mallado de la turbina y la zona de generación del viento.



Fuente: Propia.

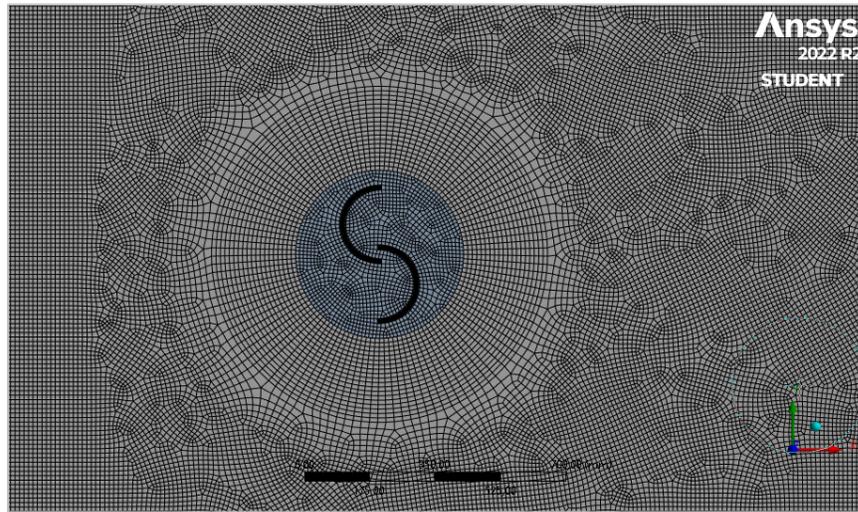
**Figura 3.6.6:** Vista detallada del mallado en el área del rotor Savonius.



Fuente: Propia.

Haciendo énfasis en la figura 3.6.6, se puede evidenciar como el mallado se adapta de forma idónea a la geometría del rotor, además de comportarse de una forma buena en lo que respecta a la sección circular de la turbina y posteriormente fuera de esta.

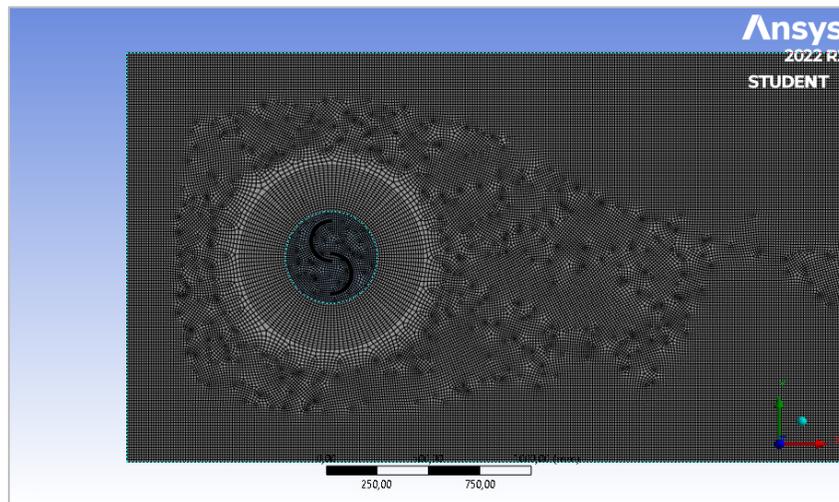
**Figura 3.6.7:** Vista ampliada del mallado en la zona de generación de viento.



Fuente: Propia.

La figura 3.6.7 nos permite enmarcar como fue el proceso de generación de mallado a una distancia más prolongada de la turbina; en esta vista se puede apreciar como el mallado varia su forma para irse adaptando a la sección rectangular del sistema, en pro de optimizar el mallado para las secciones menos críticas.

**Figura 3.6.8:** Vista complementaria del mallado.



Fuente: Propia.

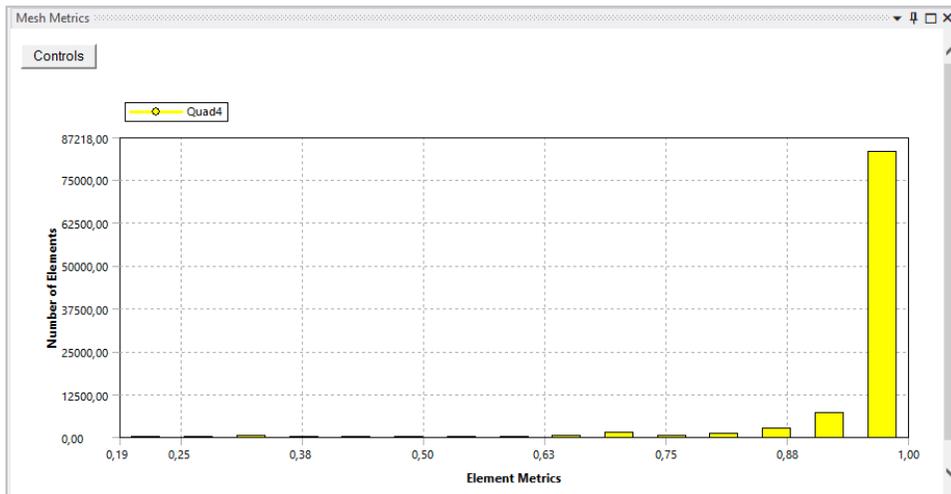
En la figura 3.6.8, podemos observar como el mallado alcanza los límites del sistema, alternando el tamaño y forma de los cuadriláteros para adaptarlos a la forma del área.

**Figura 3.6.9:** Tabla estadística de la cantidad de elementos y nodos del mallado.

Statistics	
Nodes	97006
Elements	96052

Fuente: Propia.

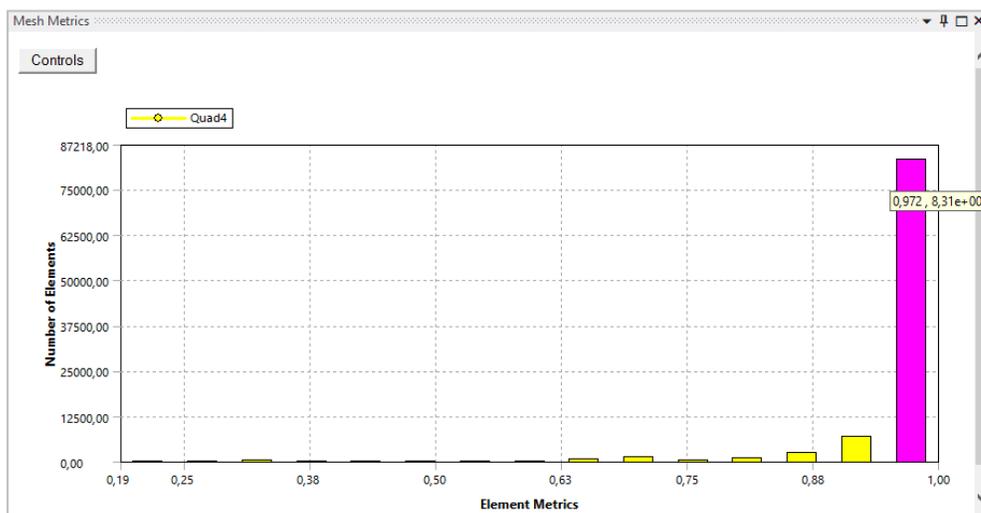
**Figura 3.6.10:** Grafica generadas para validar calidad de los elementos del mallado.



Fuente: Propia.

Usando el verificador de calidad de mallado que dispone *ANSYS FLUENT* y “Mesh Metric” para graficar los números de elementos y sus métricas. Vea figura 3.6.10 y 3.6.11.

**Figura 3.6.11:** Histograma de calidad de elementos de mallado.



Fuente: Propia.

Usando la sección de “*Element Quality*”, la cual nos brinda la siguiente descripción de su función:

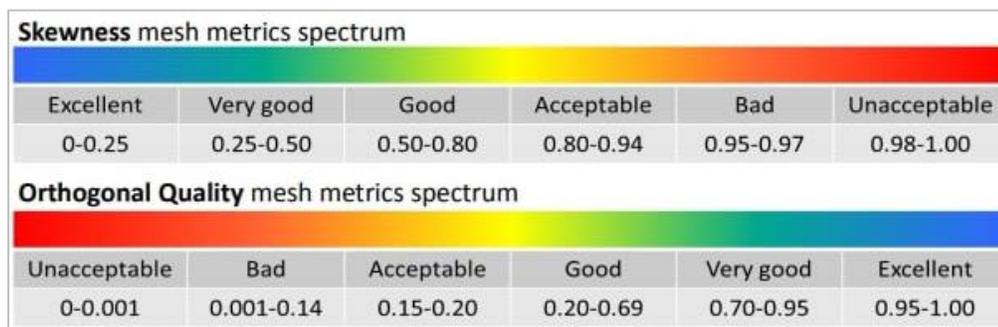
*“Proporciona una métrica de calidad compuesta que oscila entre 0 y 1. Esta métrica se basa en la relación entre el volumen y la suma del cuadrado de las longitudes de los bordes para elementos 2D quad/tri, o la raíz cuadrada del cubo de la suma del cuadrado de las longitudes de los bordes para elementos 3D. Un valor de 1 indica un cubo o cuadrado perfecto, mientras que un valor de 0 indica que el elemento tiene un volumen cero o negativo.”*

Viendo la figura 3.6.11, vemos que los elementos que conforman el mallado, en su mayoría, poseen valores que oscilan entre 0,75 y 1, siendo conformando de forma dominante por elementos **“83100 elementos aproximadamente”** con un valor de 0,972.

Por lo que vemos que la calidad de los elementos del mallado es muy idónea.

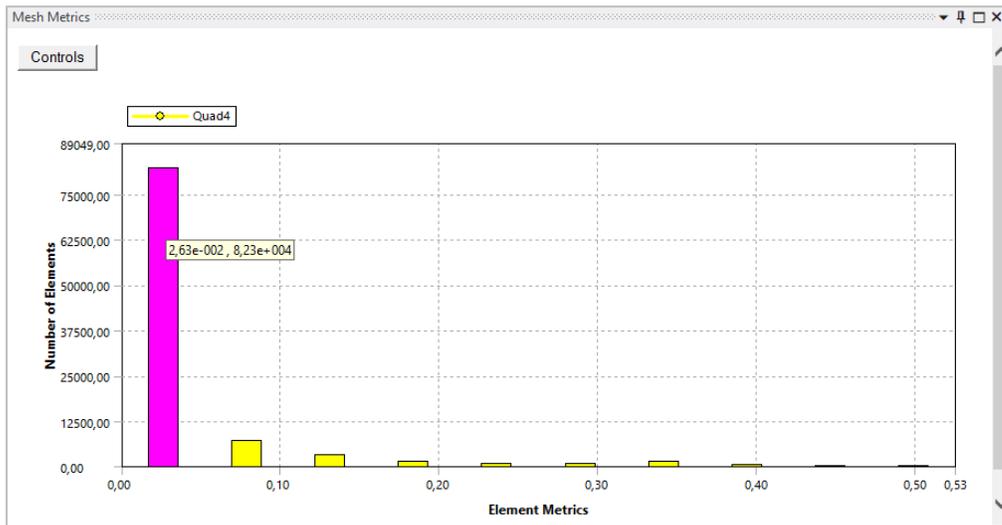
Verificando también la **oblicuidad “Skewness”** y la **calidad ortogonal “orthogonal Quality”** de los elementos, se dispone de un espectro métrico de mallado, vea la figura 3.6.12, el cual permite evaluar la calidad de los elementos en los factores anteriormente mencionados.

**Figura 3.6.12:** Espectro métrico de mallado para evaluar su calidad.



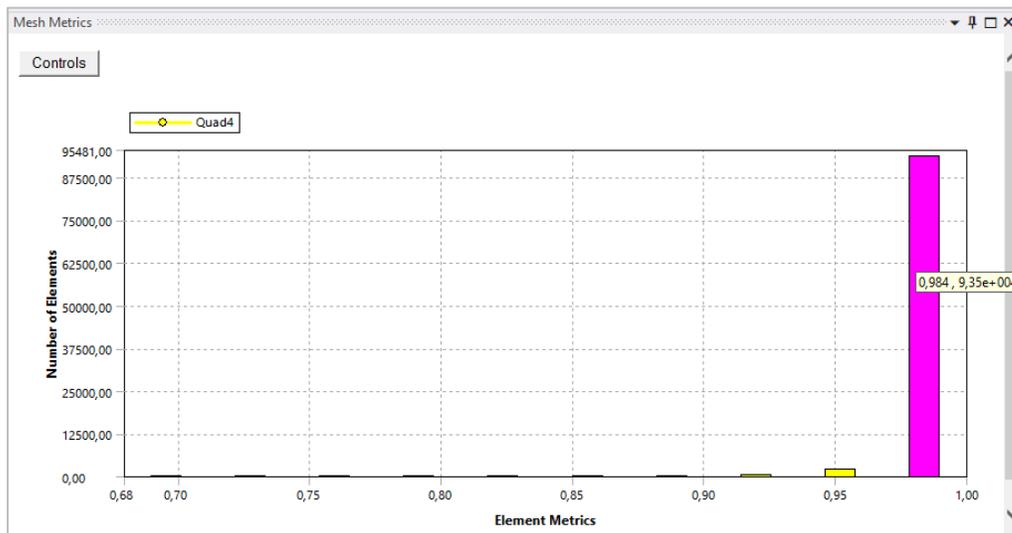
Fuente: ANSYS Forum [41].

**Figura 3.6.13:** Grafica de la calidad de oblicuidad de elementos del mallado “Skewness”.



Fuente: Propia.

**Figura 3.6.14:** Grafica de calidad ortogonal de los elementos del mallado “Orthogonal Quality”.



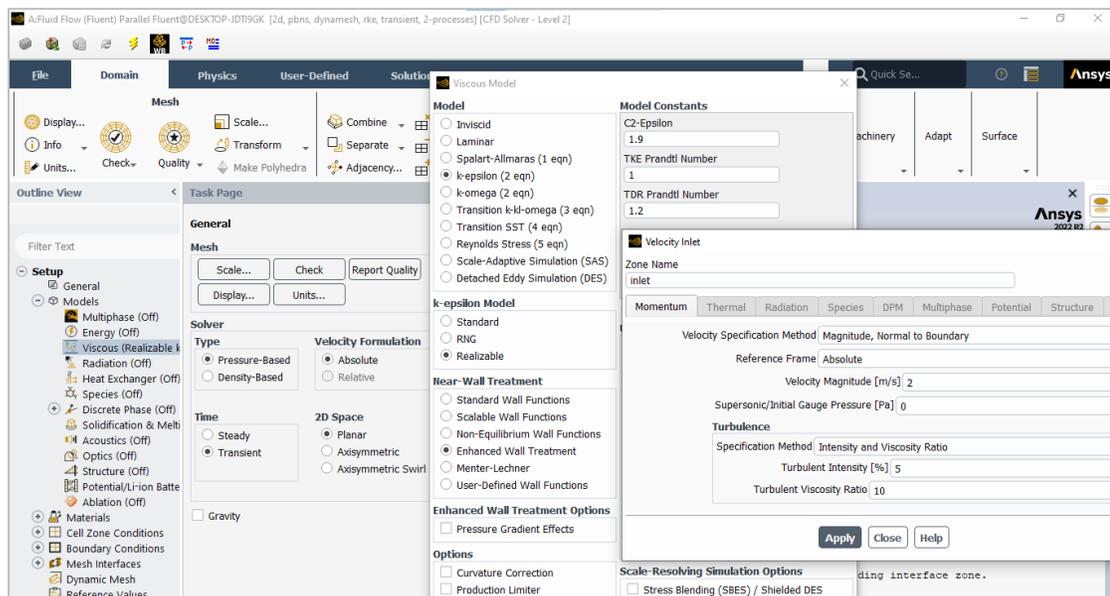
Fuente: Propia.

Viendo la figura 3.6.12 y 3.6.13, se puede ver que el mallado siendo analizado bajo el parámetro de “oblicuidad - Skewness” presenta una calidad que esta entre bueno y excelente; es importante resaltar que la mayor cantidad de elementos que conforman el mallado presentan una calidad “Excelente” ya que estos tienen un valor de 0.0263.

Viendo la figura 3.6.12 y 3.6.14, se puede analizar el mallado siguiendo el parámetro de “**calidad ortogonal - Orthogonal Quality**”, los elementos que conforman el mallado presentan una calidad que esta entre muy buena y excelente, también es importante resaltar que la mayor cantidad de elementos que conforman el mallado tienen una calidad “Excelente” ya que presentan un valor de 0.984.

Posteriormente realizado el mallado, se procede a configurar y definir las condiciones de simulación en **FLUENT**, como lo son el tiempo “*transitorio*”, el modelo de viscosidad “*k-epsilon*”, la magnitud de la velocidad de entrada “*2 m/s*”, la masa de la turbina “*1.5 kg*”, entre otros. Basado en [40].

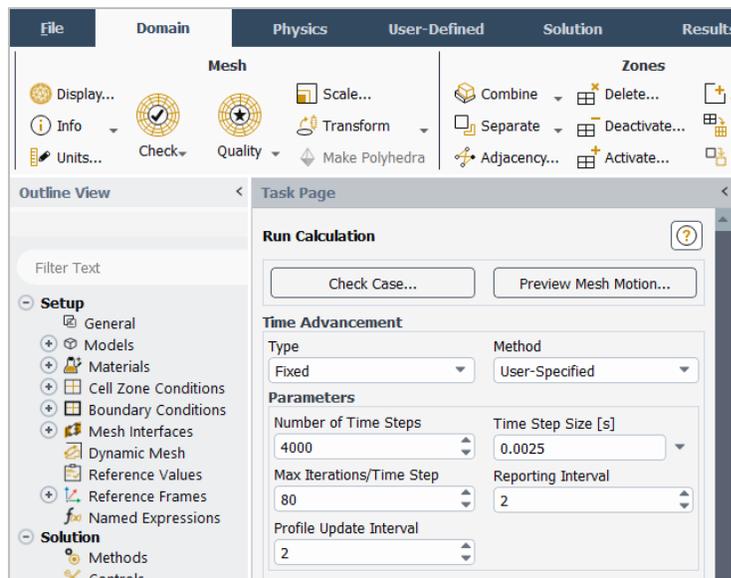
**Figura 3.6.15:** Configuración de parámetros para la realización de la simulación fluidodinámica en ANSYS FLUENT



Fuente: Propia.

Adicionalmente, se configura el número de pasos de tiempo “*4000 time steps*” que equivalen a aproximadamente a 10 segundos de simulación, además de designar el tamaño de cada uno de los pasos del tiempo como “*0.0025 time step size (s)*”, el número máximo de iteraciones para calcular los pasos del tiempo y generar la animación de la simulación “*80 iteraciones*”, el reporte de intervalos y el intervalo de actualización del perfil se fijan en “*2*” para garantizar la continuidad del monitoreo de los reportes de la simulación.

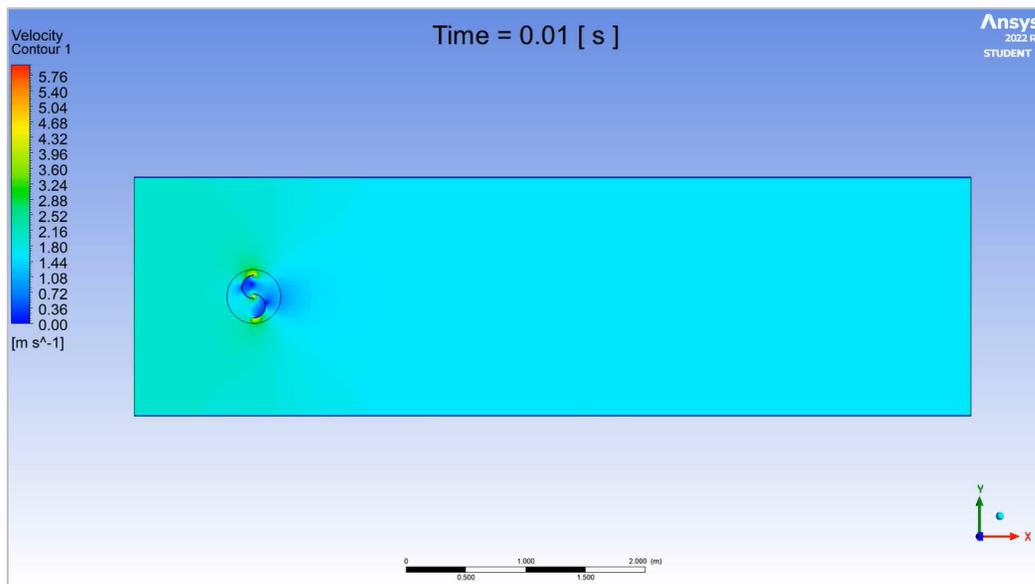
**Figura 3.6.16:** Configuración de parámetros de ANSYS FLUENT para ejecución de calculos de simulación.



Fuente: Propia.

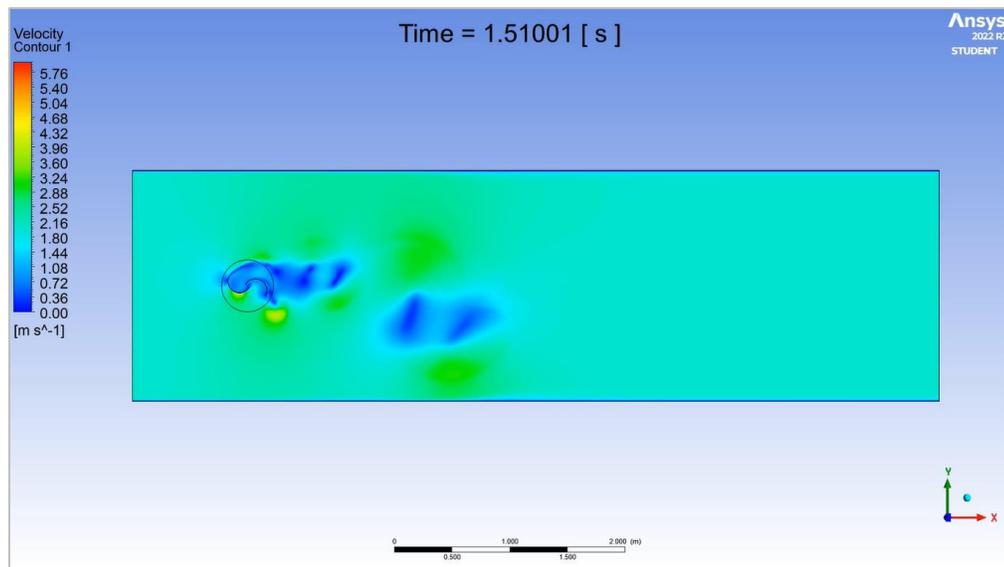
A continuación, se exponen los resultados de la animación obtenida junto con su comportamiento; además se muestra la gráfica de iteraciones y convergencia de los resultados:

**Figura 3.6.17:** Simulación fluidodinámica en ANSYS FLUENT



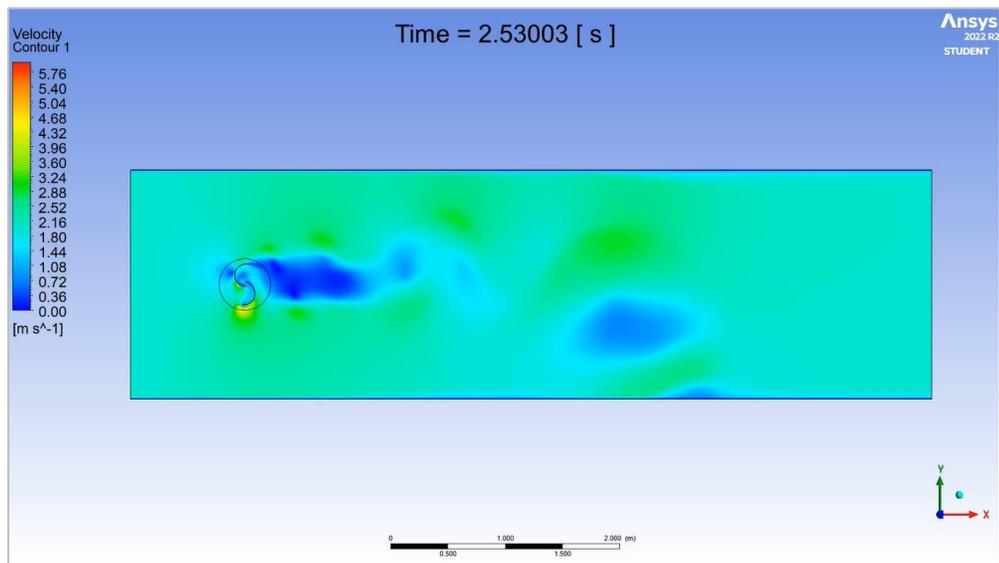
Fuente: Propia.

**Figura 3.6.18:** Simulación fluidodinámica en ANSYS FLUENT a 1.5 segundos de transición.



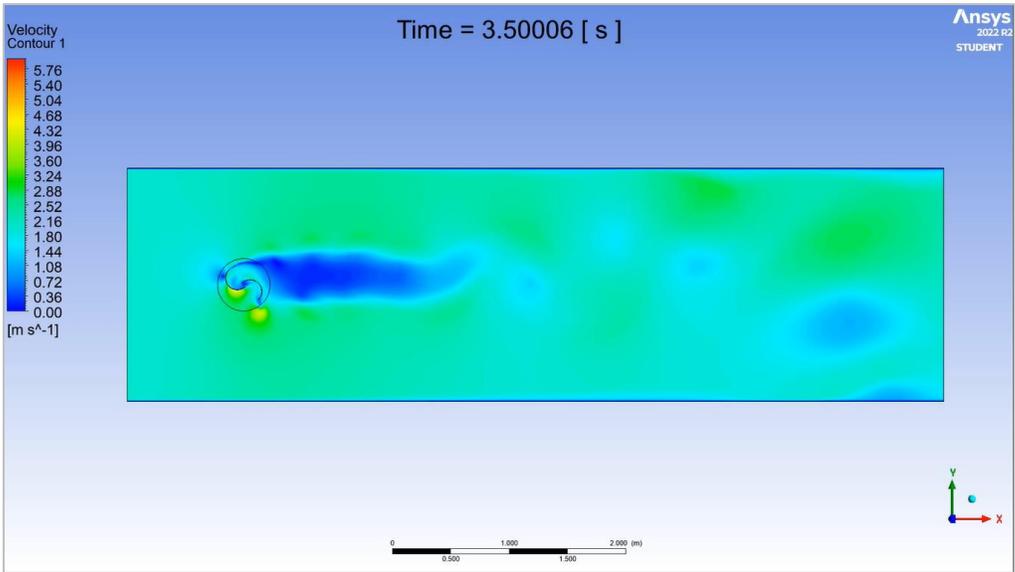
Fuente: Propia.

**Figura 3.6.19:** Simulación fluidodinámica en ANSYS FLUENT a 2.5 segundos de transición.



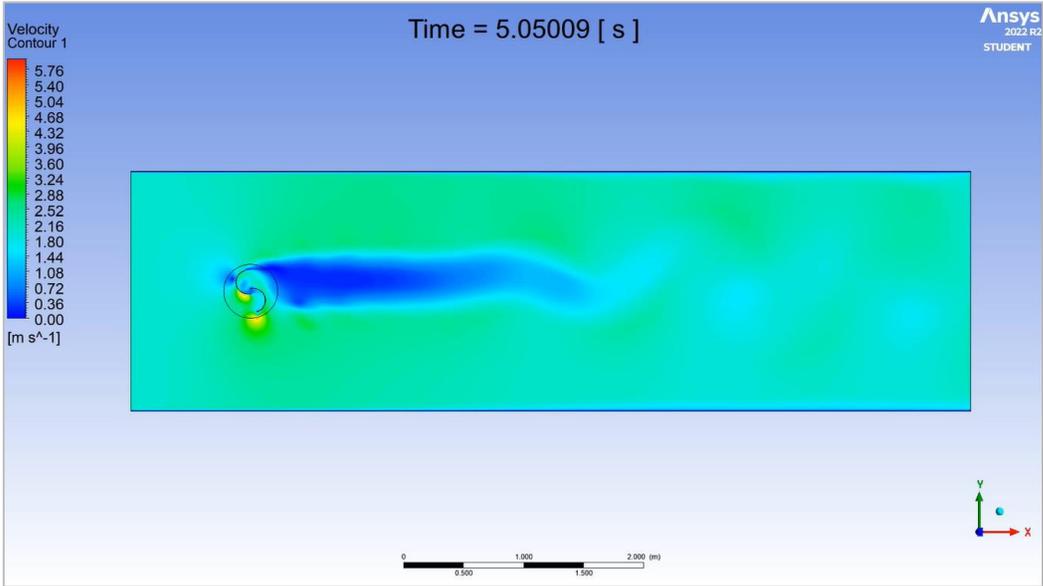
Fuente: Propia.

**Figura 3.6.20:** Simulación fluidodinámica en ANSYS FLUENT a 3.5 segundos de transición



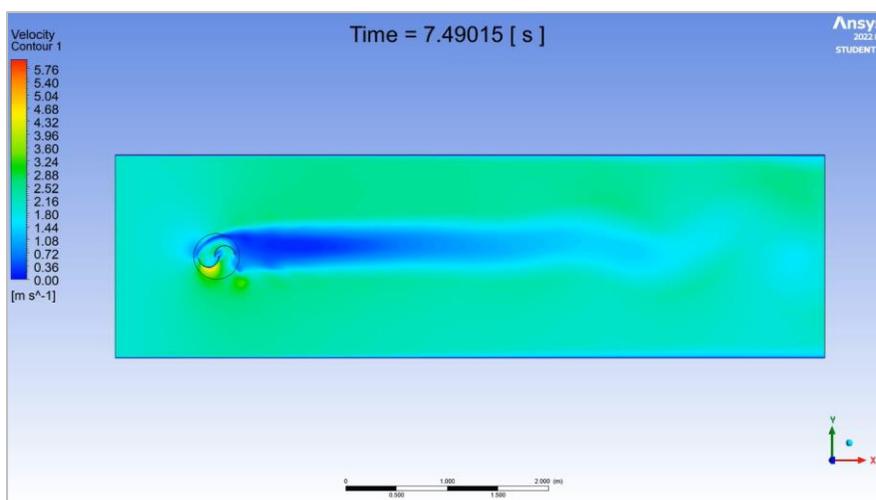
Fuente: Propia.

**Figura 3.6.21:** Simulación fluidodinámica en ANSYS FLUENT a 5 segundos de transición.



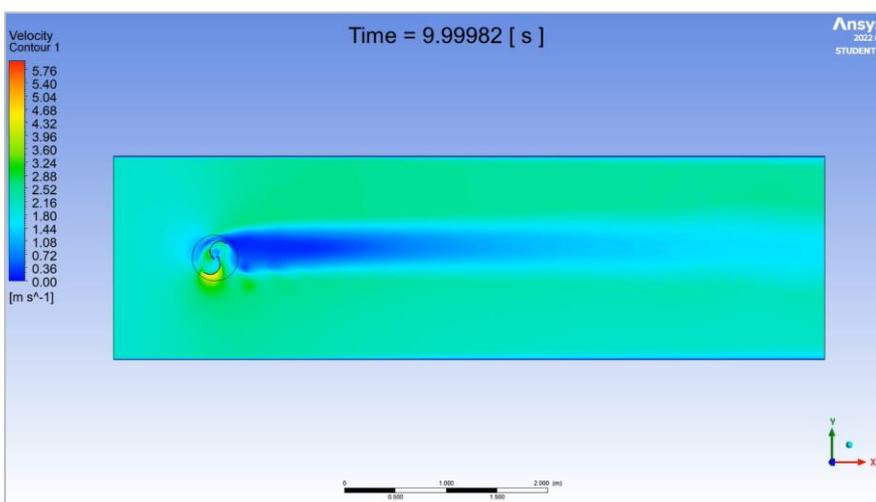
Fuente: Propia.

**Figura 3.6.22:** Simulación fluidodinámica en ANSYS FLUENT a 7.5 segundos de transición.



Fuente: Propia.

**Figura 3.6.23:** Simulación fluidodinámica en ANSYS FLUENT a 10 segundos de transición.



Fuente: Propia

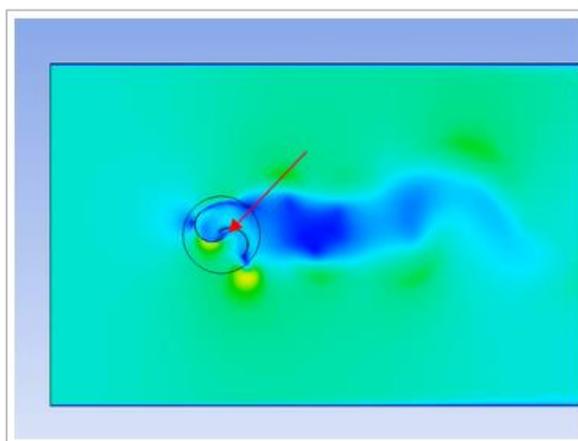
En las figuras 3.6.17, 3.6.18, 3.6.19, 3.6.20, 3.6.21, 3.6.22, 3.6.23 y 3.6.24 se puede apreciar el desarrollo de la simulación y del comportamiento del flujo sobre el diseño del rotor importado, en la simulación se puede ver que el aire logra empujar las aspas del rotor generando el movimiento rotatorio del mismo, permitiendo ver como el flujo se desarrolla al mismo tiempo. Viendo a la izquierda de cada avance de la simulación, se puede apreciar el espectro métrico de la velocidad, el cual permite comprender la magnitud de la velocidad del aire en función del color que se representa en el plano.

Si se mira la figura 3.6.17 y 3.6.18 se puede apreciar como el rotor pasa a estar en un estado estático a empezar a girar y presentar su comportamiento fluidodinámico; el aire de entrada posee una magnitud de 2 m/s según el espectro métrico coincidiendo con los parámetros designados en las condiciones para la ejecución de la simulación.

Se puede apreciar también en las figuras 3.6.18, 3.6.19, 3.6.20, 3.6.21, 3.6.22, 3.6.23 y 3.6.24 como el aire al pasar por el área del rotor presenta una reducción de su velocidad de salida, validando la captación de energía cinética que posee el viento mediante las aspas del rotor.

Si detallamos el centro del rotor en las figuras 3.6.20, 3.6.22 y 3.6.24 se puede apreciar como el flujo del aire atraviesa la separación dispuesta entre las aspas del rotor, generando un flujo continuo en este sector, evidenciando la disipación de la sobrepresión que se genera en rotores Savonius sin separación entre sus aspas, reduciendo así su rendimiento, vea figura 2.4.2, este aspecto está contemplado y expuesto en el apartado “**2.4 Rotores Savonius**” del marco teórico.

**Figura 3.6.24:** Desarrollo del flujo en el centro del rotor.



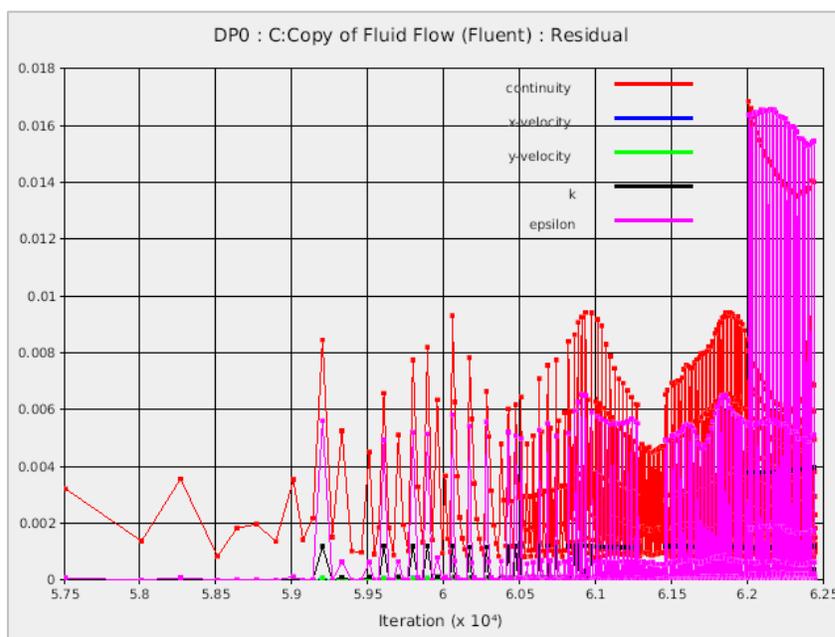
Fuente: Propia.

Por lo que se puede apreciar que el diseño del rotor al simularlo modela una velocidad muy buena, debido a la geometría que presentan sus aspas, captando una cantidad considerable de la energía cinética de las corrientes de viento lo que genera el movimiento rotacional y por ende un par rotacional; Vea [36].

Detallando las figuras 3.6.21, 3.6.22 y 3.6.23 se puede apreciar como el flujo se desarrolla completamente a lo largo del área de simulación, generando una estela azul que difiere del resto del área, esta estela corresponde a flujo de aire captado por el rotor Savonius, que al momento de salir de la zona de contacto evidencia una reducción de su magnitud inicial de

2 m/s a valores que oscilan entre 0.00 m/s y 1.8 m/s siendo las zonas más próximas a los extremos de las aspas del rotor las que tienden a conservar la energía inicial del flujo.

**Figura 3.6.25:** Grafica de residuales de la simulación fluidodinámica en ANSYS FLUENT.



Fuente: Propia.

En la figura 3.6.25 se puede ver la gráfica de residuales “Continuidad, velocidad en X, velocidad en Y, energía cinética turbulenta (k) y la tasa de disipación de la energía turbulenta (epsilon)”.

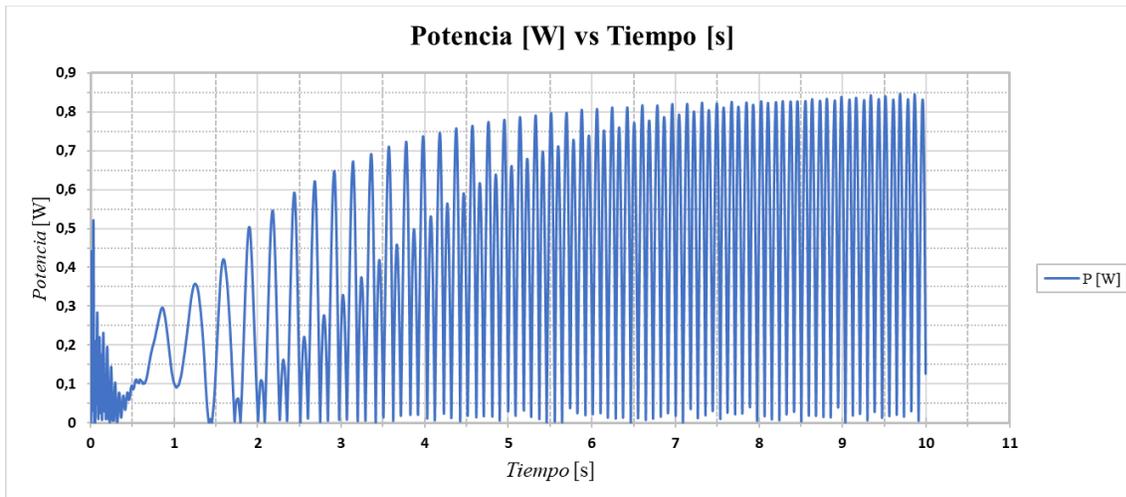
Se tiene que en esta grafica de residuales muestra la convergencia de del cálculo numérico de la simulación, permitiendo verificar la confiabilidad de los resultados, siendo que valores altos de los residuales indican que la convergencia de los resultados no ha sido buena; esto se puede dar por diversos factores, pero los más comunes pueden ser la mala calidad de la malla de simulación, un modelo físico de simulación inadecuado o condiciones de contorno incorrectas.

En el caso de los resultados mostrados, los residuales oscilan con valores entre 0 y 0.018, siendo que la mayoría de los datos no excede el valor de 0,01 y los valores máximos son menores a 0,018, podemos ver que la convergencia tiende a valores muy próximos a 0, por lo que es un buen resultado de convergencia.

Además, se tiene que se realizaron aproximadamente  $6.25 \times 10^4$  iteraciones, indicando cuantas veces se ha resuelto el sistema de ecuaciones hasta alcanzar los valores de convergencia óptimos según los parámetros designados.

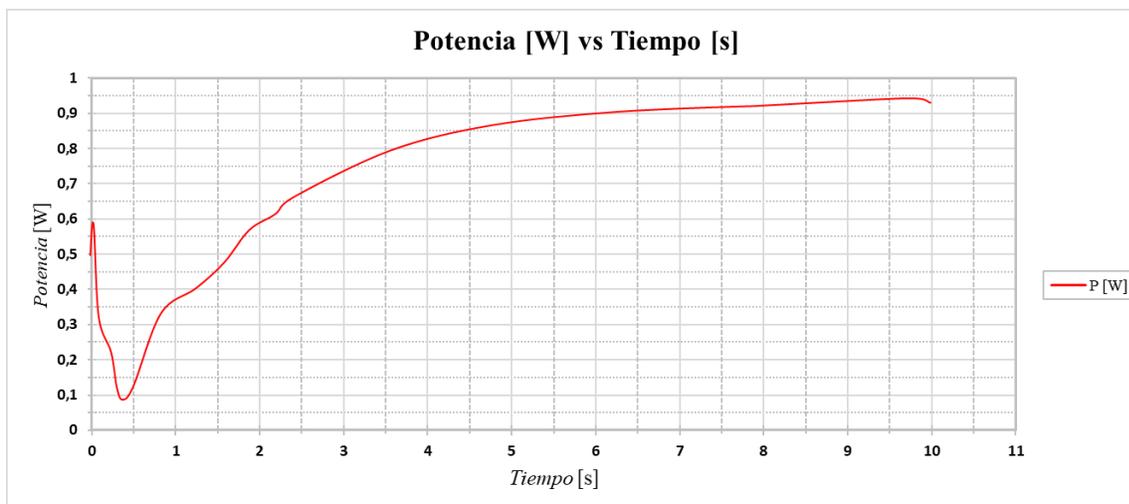
Adicionalmente, se tiene que, una vez finalizada la simulación, se generan los reportes necesarios de las componentes de tiempo, velocidad angular y momento en z, necesarios para calcular la potencia de la turbina y generar su respectiva grafica; Vea [42].

**Figura 3.6.26:** Grafica de potencia vs tiempo del rotor Savonius simulado en Fluent.



Fuente: Propia.

**Figura 3.6.27:** Curva de potencia del rotor Savonius.



Fuete: Propia.

Viendo las figuras 3.6.26 y 3.6.27 podemos apreciar el comportamiento de la potencia generada por el rotor Savonius, en la figuras 3.6.26 se expone el comportamiento en oscilaciones, las cuales son rectificadas para obtener la curva obtenida en figura 3.6.27; si se analiza esta curva al igual que las oscilaciones, vemos que presentan un comportamiento de aumento de la potencia generada que va ente 0.05 W y 0.8 W al comienzo de la

aceleración de la rotación del rotor comprendido entre los 0 y 4 segundos de la simulación, posteriormente la curva tiende a estabilizarse presentando un aumento menos pronunciado de la potencia generada por el rotor, los valores de potencia que contempla esta etapa van entre los 0.8 W y 0.95 W entre una instancia de tiempo de 4 y 10 segundos transcurridos en la simulación.

Por lo que se puede ver que la potencia máxima alcanzada por el rotor Savonius simulado es de 0,95 W aproximadamente; esto bajo las condiciones de turbulencia, velocidad del viento, configuración de parámetros de solución del programa, entre otras, descritas y explicadas al comienzo de este apartado.

Adicionalmente, los resultados obtenidos presentan una mejor adaptación con respecto al modelo matemático de condiciones ideales “modelo matemático #2” usado para calcular de forma teórica la potencia máxima que puede llegar a alcanzar un rotor Savonius, vea ecuación 25 y tabla 4.

Es importante resaltar que la diferencia entre el resultado teórico y simulado se debe a las condiciones de la simulación, enmarcando el hecho de que esta se realiza bajo condiciones ideales y sin considerar pérdidas mecánicas; sin embargo, los resultados son aceptables bajo los criterios dados al comienzo de este apartado.

Se resalta el hecho de que para efectos prácticos el modelo matemático que considera pérdidas mecánicas y aerodinámicas “modelo matemático #3”, resulta muy interesante y conveniente al momento de apegarse a la realidad del desarrollo de un rotor Savonius, siendo que los resultados de los cálculos efectuados están enmarcados bajo los resultados de la simulación fluidodinámica.

### 3.7 Construcción y ensamble del banco

En esta sección se abordará paso a paso la construcción del banco propuesto, enmarcando aspectos como dimensiones, fabricación de elementos, adquisiciones de materiales y elementos, procesos de manufactura utilizados, correcciones y adaptaciones realizadas debido a novedades que fueron encontradas sobre la marcha del desarrollo de ensamble del banco.

Cabe resaltar que los elementos que se usaron para la construcción del banco han sido implementados en proyectos con finalidades similares realizando sus criterios, cálculos y analizando sus comportamientos, permitiendo que el cumplir con el objetivo de selección de los elementos para el ensamble sea más optimizado; vea [10]-[12], [17]-[20], [22]-[28].

Como punto de partida, se fijó la fabricación del soporte principal del banco "la base", vea figura 3.4.3 y tabla 10.

Se tiene que la forma planteada, al ser una geometría con dimensiones y finalidades específicas, es requerida su manufactura desde cero, para que se pueda adaptar a las características requeridas; por lo que se asiste a un taller de trabajo para metales y soldadura, en el cual se procede a fabricar la base.

Se planteó el uso de tubos de  $\frac{3}{4}$  de pulgada, los cuales forman el esqueleto de la base, para posteriormente unirlos mediante soldadura con láminas calibre 18 de hierro, debido a su facilidad para ser dobladas y adquirir la forma deseada; se recubre la estructura del banco conformada por los tubos con las láminas; las láminas a su vez deben ir soldadas a los tubos para asegurar la integridad de la estructura, vea figura 3.7.1.

**Figura 3.7.1:** Manufactura de la "base del banco".



Fuente: Propia

Posterior al ensamble de la estructura, se le anexa la fabricación de la base para soporte del generador eléctrico, vea tabla 11; esto se realizó con el fin de tener todos los elementos que

conforman la estructura principal del banco y poder diseñar, adquirir y adaptar los demás elementos.

Para el elemento anteriormente referenciado, se propuso su creación en ángulos metálicos de  $\frac{3}{4}$  de pulgada, unidos mediante soldadura a una lámina de hierro para completar la forma similar a una mesa, en la cual se pueda incorporar y anclar el generador eléctrico como se plantea en las figuras 3.4.10 – 3.4.14.

**Figura 3.7.2:** Manufactura de soporte para generador eléctrico.



Fuente: Propia

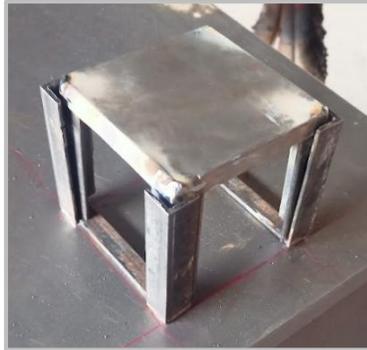
Considerando que no es conveniente dejar fija la posición del generador por motivos de adaptación y variaciones para analizar comportamientos en el banco, se analiza la forma de poder desplazar horizontal y verticalmente la estructura que soporta el generador eléctrico; Por lo cual se diseña un sistema de rieles que permita desplazar horizontalmente y ajustarla al requerimiento que se dispongan para la puesta en marcha, complementando este diseño, se anexa una estructura armada en ángulos de  $\frac{3}{4}$  de pulgada, que mediante perforaciones en los ángulos permite el desplazamiento y fijado del soporte del generador verticalmente, vea figura 3.7.3 y 3.7.6.

**Figura 3.7.3:** Estructura diseñada para el desplazamiento vertical del soporte del generador.



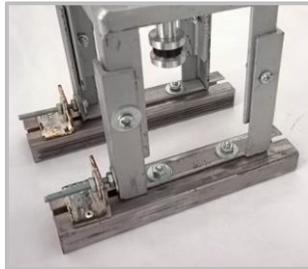
Fuente: Propia.

**Figura 3.7.4:** Acople del soporte principal y auxiliar para el desplazamiento vertical.



Fuente: Propia.

**Figura 3.7.5:** Soporte auxiliar en rieles para desplazamiento horizontal.



Fuente: Propia

Es importante resaltar que los rieles son convenientes como base debido a que permiten cumplir con los criterios dispuestos para los materiales al comienzo de esta sección, siendo los más fundamentales la disponibilidad del material, la factibilidad de que este sea reciclado y que sus dimensiones y prestaciones sean idóneas para el ensamblado de la estructura.

**Figura 3.7.6:** Ensamblado completo de la estructura para el soporte del generador.



Fuente: Propia

Como se aprecia en la figura 3.7.6, el ensamble de la estructura permite el posicionamiento y fijamiento del generador eléctrico y el paso de su eje con polea para la transmisión del movimiento de generado por el rotor eólico.

Con respecto al eje con polea mencionado anteriormente, debido al tamaño que presenta eje del generador eléctrico, y la longitud que se debe prolongar el eje para estar a nivel con respecto a la polea del rotor eólico.

Por lo que, se procedió a fabricar la pieza acorde a los requerimientos que se disponen.

Para ello, se usó un torno mecánico para el moldeado de la pieza mediante el proceso de desbaste y arranque de viruta, vea figura 3.7.7 – 3.7.10.

**Figura 3.7.7:** Torneado de material para obtención de la pieza.



Fuente: Propia

**Figura 3.7.8:** Desbaste con buril cónico para torneado de la garganta de la polea.



Fuente: Propia

**Figura 3.7.9:** Acabado final de la pieza.

Fuente: Propia.

**Figura 3.7.10:** Eje con polea fabricado.

Fuente: Propia.

La pieza que se obtiene cumple con los requerimientos de dimensiones y acabados que se requieren, los cuales están en la tabla 15.

**Tabla 15:** Tabla de dimensiones de pieza fabricada.

Manufactura de pieza		
<i>Pieza</i>	<i>Datos</i>	
	<b>Nombre</b>	Eje con polea
	<b>Material</b>	Aluminio
	<b>Tipo de ranura de la polea</b>	Trapezoidal
	<b>Diametro de ranura para eje del generador electrico</b>	3.7 mm
	<b>Diametro exterior del eje</b>	14 mm
	<b>Alto total de la pieza</b>	78.7 mm
	<b>Diametro de la llanta de la polea</b>	25.4 mm / 1 pulg
	<b>Diametro de la garganta de la polea</b>	16.4 mm
	<b>Espesor de la garganta</b>	6,.35 mm

Fuente: Propia

Posterior a la manufactura de la anterior pieza, se procede a adquirir las chumaceras y ejes para encaminar el ensamblado de los rotores.

**Figura 3.7.11:** Chumacera adquirida.



Fuente: Propia

Este rodamiento se encargará de soportar las cargas producidas por la acción que ocurre entre el viento y la captación de energía que ejerce el rotor, por ello se adquiere una chumacera con cuatro puntos de sujeción con el fin de mejorar el nivel de anclaje con la base del banco, la cual debido a la forma de “pirámide truncada” permite una mejor repartición del movimiento, cargas y esfuerzos producidos por el funcionamiento del banco.

Como eje de rotación se adquiere un tubo circular en acero inoxidable de  $\frac{3}{4}$  de pulgada, con las dimensiones de corte y características mostradas en la tabla 8.

**Figura 3.7.12:** Eje para los rotores.



Fuente: Propia

**Figura 3.7.13:** Ensamble de eje en chumacera.



Fuente: Propia

Adicionalmente, se contempla la adquisición de la polea para el rotor, la cual transmitirá el movimiento rotacional a la correa de transmisión, conduciendo así el movimiento al eje con polea del generador eléctrico, posibilitando la generación de energía.

**Figura 3.7.14:** Poleas adquiridas.



Fuente: Propia.

Estas poleas presentan una ranura para el eje de  $\frac{1}{2}$  de pulgada, por lo que para que estas encajen en el eje de los rotores y se fijen, se plantea ampliar el tamaño de la ranura del eje a  $\frac{3}{4}$  de pulgada, con una tolerancia de  $\pm 0.07$  Pulg, adicionalmente de disponer de una ranura con rosca para el tornillo prisionero. Vea figura 3.7.15 – 3.7.19.

**Figura 3.7.15:** Desbaste de la ranura para el eje.



Fuente: Propia.

**Figura 3.7.16:** Medición y rectificación de la ranura para el eje.



Fuente: Propia.

**Figura 3.7.17:** Torneado con buril para ampliación con precisión.



Fuente: Propia.

**Figura 3.7.18:** Taladrado para ranura con rosca para el tornillo prisionero.



Fuente: Propia.

**Figura 3.7.19:** Redimensionamiento de las poleas finalizado.



Fuente: Propia.

Obtenido el resultado deseado con respecto a las poleas, se procede a fabricar las aspas con geometría convencional, para posteriormente, proceder con el ensamblado del rotor en su totalidad.

Para el fabricado de las aspas con geometría convencional, se usa un tubo de 8 pulgadas, reciclado con las dimensiones expuestas en la tabla 6.

Se le efectúa un corte al tubo de forma que las dos mitades quedan separadas para posteriormente, mediante tornillos unirlos al eje y conseguir la forma típica de “S” del rotor Savonius convencional. Vea figura 3.7.21.

Usando los tornillos con arandelas y tuercas se permite ajustar el valor de separación entre las aspas, dejando la posibilidad de que se pueda estudiar la relación que existe entre la separación de las aspas y su diámetro, y como afecta al rendimiento del rotor. Vea la figura 3.7.20, 3.7.21 y tabla 16.

**Tabla 16:** Tabla de tornillería y elementos de sujeción usados para el ensamblado del rotor Savonius de geometría convencional.

<b>Tornillería y elementos de sujeción</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Dimensiones</i>	<i>Cantidad</i>
Tornillo	3/16 * 3 pulg	3
arandela	3/16 pulg	18
tuerca	3/16 pulg	15

Fuente: Propia.

**Figura 3.7.20:** Ajuste de separación entre las aspas.



Fuente: Propia.

**Figura 3.7.21:** Ensamblado de rotor Savonius de geometría convencional.



Fuente: Propia.

Posterior al ensamblado de las aspas, para darles un mejor acabado en la superficie y uniformidad, se le somete a un proceso de lijado manual. Vea figura 3.7.22.

**Figura 3.7.22:** Lijado de aspas.



Fuente: Propia.

Para el rotor con geometría helicoidal, es un proceso muy parecido, pero cambian los elementos de sujeción, al igual que el material usado, como se puede ver en la figura tabla 7.

Para trabajar la lámina de PVC, se secciona en tiras para poder malearlas y conseguir la forma deseada, generando así la curvatura característica del rotor con geometría helicoidal.

Los elementos de fijación y graduación para conseguir la curvatura del tipo helicoidal se basan en el uso de una varilla roscada y arandelas con tuercas para fijar las láminas; estas varillas roscadas se sitúan con perforaciones de forma vertical al eje, con variaciones en su posición con respecto a la circunferencia del tubo, estas variaciones son con intervalos de 45°. Vea las figuras 3.7.23, 3.7.24 y 3.7.25.

**Figura 3.7.23:** Tabla de tornillería y elementos de sujeción usados para el ensamblado del rotor Savonius de geometría helicoidal.

<b>Tornillería y elementos de sujeción</b>		
<i>Nombre</i>	<i>Dimensiones</i>	<i>Cantidad</i>
Varilla roscada	3/16 * 1 m	5
Arandela	3/16 pulg	30
Tuerca	3/16 pulg	30

Fuente: Propia.

**Figura 3.7.24:** Ensamblado del rotor Savonius de geometría helicoidal.



Fuente: Propia.

**Figura 3.7.25:** Ensamblado del rotor Savonius de geometría helicoidal.



Fuente: Propia.

Posteriormente al armado de rotor con geometría helicoidal, se busca brindarles solidez e integridad a las láminas seccionadas para conseguir su forma, por lo cual se usa pegamento tipo industrial Loctite, conseguir la unión deseada entre las piezas.

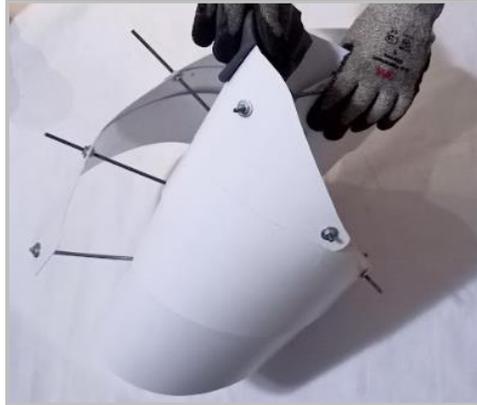
**Figura 3.7.26:** Pegamento usado para unión de las aspas.



Fuente: Propia

Sucesivamente, se les da un acabado mediante lijado manual a las aspas de geometría helicoidal buscando suavizar los bordes que fueron sometidos a cortes para lograr la geometría deseada. Vea figura 3.7.27.

**Figura 3.7.27:** Lijado de aspas.



Fuente: Propia.

Luego cada una de las partes del banco, son sometidas a la etapa de preparación para pintarlas, la cual incorpora la limpieza de la superficie a pintar, para luego proceder con el recubrimiento en pintura base para protección de la corrosión, para posteriormente pintarlas con su acabado final.

**Figura 3.7.28:** Pintado de partes con base anticorrosiva gris.



Fuente: Propia.

**Figura 3.7.29:** Pintado total de la partes.



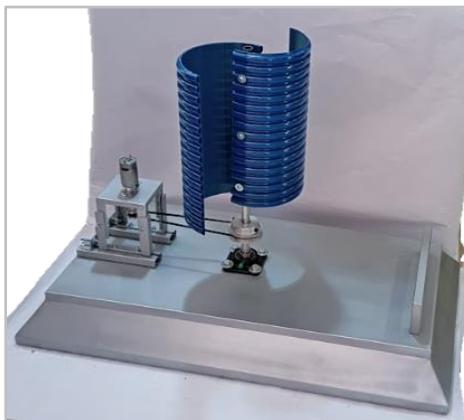
Fuente: Propia.

**Figura 3.7.30:** Pintado de aspas de geometría convencional.



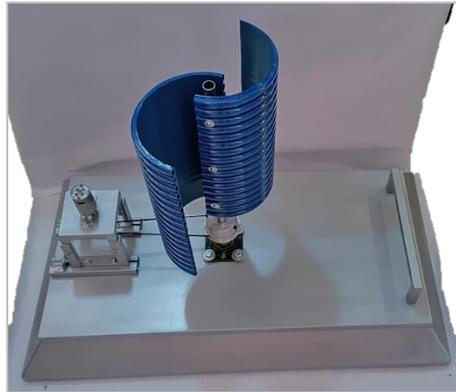
Fuente: Propia.

**Figura 3.7.31:** Ensamblado del banco con rotor de geometría convencional



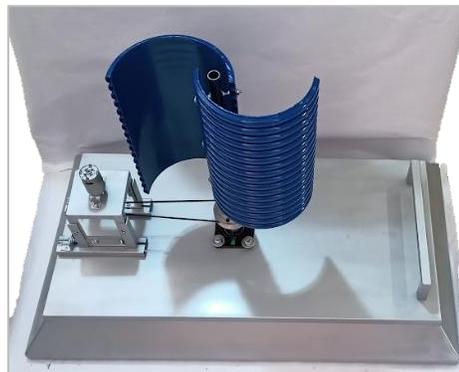
Fuente: Propia.

**Figura 3.7.32:** Vista complementaria del ensamble.



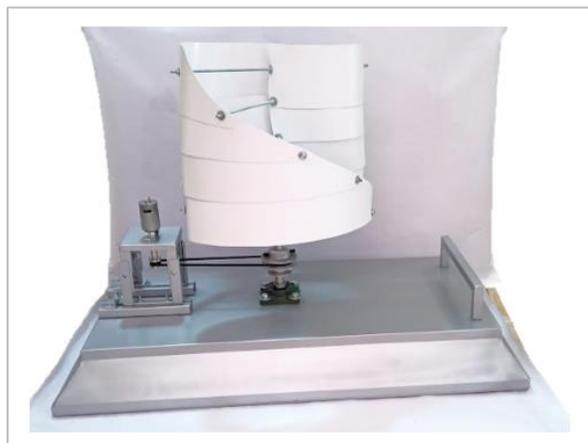
Fuente: Propia.

**Figura 3.7.33:** Vista complementaria del ensamble.



Fuente: Propia.

**Figura 3.7.34:** Ensamble del banco con rotor de geometría helicoidal.



Fuente: Propia.

**Figura 3.7.35:** Vista complementaria del ensamble.



Fuente: Propia:

**Figura 3.7.36:** Vista complementaria del ensamble.



Fuente: Propia.

Completado el diseño, construcción y ensamble del banco con sus componentes, se puede proceder a la etapa de la realización de pruebas, análisis, procesado de resultados y elaboración de guías de laboratorio para el uso del banco.

## Capítulo 4

### Pruebas, Resultados y análisis

#### 4.1 Condiciones para el uso del banco y la realización de pruebas

Para el uso del banco de rotores Savonius, se dispone como ubicación el laboratorio de máquinas eléctricas, ya que esta es la ubicación con la que se planifico inicialmente para la definición de los parámetros de tamaño, características y almacenamiento del banco.

Inicialmente se tiene que, para efectuar el estudio del banco, el viento que moviera las aspas tuviera un origen natural, pero debido a baja frecuencia que se presenta en la zona e incertidumbre con respecto al estado del clima y condiciones meteorológicas, se opta por la opción de generar un flujo de viento de forma artificial utilizando un soplador de viento adquirido para el uso del banco, pudiendo así tener condiciones controlables en lo que respecta a las propiedades del flujo de viento.

A continuación, en la tabla 17 se puede ver las características que posee el soplador de aire dispuesto para el banco:

**Tabla 17:** Tabla de característica del soplador de viento.

Tabla característica de soplador		
	Datos	
	Voltaje	110 V AC
	Frecuencia	60 HZ
	Potencia	1200 W
	Flujo Max de aire	4.5 m <sup>3</sup> /min
	Velocidad ajustable	Si
	Revoluciones Max	17000 RPM
	Presion del aire	5.5 Kpa
	Volumen de aire Max.	3.8 m <sup>3</sup> /min
	Marca	UP - Universal Power
	Modelo	0027B
	Funcion de aspirado	Si

Fuente: Propia.

Este soplador posee un graduador que permite variar la velocidad del aire que entrega, traduciéndose así, en una garantía para tener parámetros de condiciones de pruebas y estudios estables, además de ser muy cómodo y fácil de usar.

## 4.2 Instrumentos de medición del banco para toma de datos

Para efectuar las pruebas y realizar un estudio mediante toma de datos, se han de disponer y usar varios equipos de mediciones, los cuales fueron adquiridos para dotar al banco de estos, los cuales son:

1. Anemómetro digital.
2. Tacómetro digital laser.
3. Multímetro digital.
4. Dinamómetros

Es importante enmarcar que los elementos de medición dispuestos para el banco son similares a los usados en proyectos de estudios de rotores Savonius con finalidades similares, vea [10]-[12], [17]-[20], [22]-[28].

**El anemómetro** es el encargado de medir la velocidad de entrada del viento, la cual es proporcionada por el soplador.

A continuación, en la tabla 18 se puede ver las características que dispone el instrumento:

**Tabla 18:** Tabla característica del anemómetro.

Tabla característica del anemómetro		
	Datos	
	Rango velocidad del aire	(0 - 30 m/s); (0-65 Mph); etc
	Precisión de medida	± 5%
	Rango temperatura aire	-10°C - +45°C (14F - 113F)
	Precisión de medida	± 2°C (3.6F)
	Tipo de fuente de poder	CR2032 - 3V
	Peso	52 g
	Pantalla	LCD digital retroiluminada
	Termometro	Termometro NTC
	Consumo	3 mA aprox.
	Tipo de medición	Manual
Referencia	Anemómetro portátil GM816	

Fuente: Propia.

**El tacómetro digital laser** es el encargado de medir las revoluciones por minuto “RPM” a las que gira el eje de los rotores Savonius.

A continuación, en la tabla 19 se puede ver las características que dispone el instrumento:

**Tabla 19:** Tabla característica del tacómetro digital laser.

Tabla característica del tacometro		
	Datos	
	Rango de prueba	(0 - 30 m/s); (0-65 Mph); etc
	Precisión de medida	2,5 a 99999 RPM (r/min)
	Resolución	0,1 RPM (2,5 a 999,9 RPM) 1 RPM (más de 1,000 RPM)
	Precisión	(0.05% + 1 dígito)
	Tiempo de muestreo	0,8 segundos (más de 60 RPM)
	Pantalla	LCD digital de 5 dígitos
	Memoria	Si, (Último valor, valor máximo, Min. Valor)
	Distancia de detección	50 a 500mm
	Referencia	Tacometro digital DT-2234C+

Fuente: Propia.

**El multímetro digital** es el encargado de medir los parámetros eléctricos como voltaje y amperaje generados por el generador eléctrico dispuesto para el banco.

A continuación, en la tabla 20 se puede ver las características que dispone el instrumento:

**Tabla 20:** Tabla característica del multímetro digital.

Tabla característica del multimetro digital		
	Datos	
	Voltaje DC	200/2000 m - 20/200/1000V ±0.5%
	Voltaje AC	200/750 V ±1,0 %
	Corriente continua	200u-2000u-20m-200m-10A ±1,8 %
	Resistencia	200-2000-20K-200K-2000K ohm ±1.0%
	Pantalla	LCD digital 46x16 mm
	Valor maximo de visualización LCD	1999
	Proteccion sobrecarga	Si
	Referencia	Multimetro digital DT-830D

Fuente: Propia.

**Los dinamómetros** son los encargados de medir la diferencia de tensión necesaria para frenar los rotores.

A continuación, en la figura tabla 21se puede ver las características que dispone el instrumento:

**Tabla 21:** Tabla característica de dinamómetro digital.

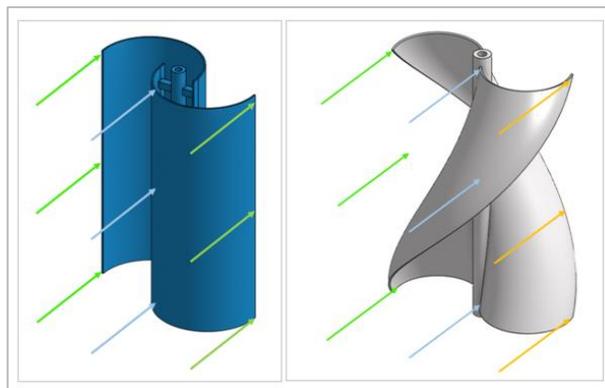
Tabla característica de dinamómetro digital		
	<b>Datos</b>	
	Unidades	Kg, Jin, lb, oz
	Funcion de bloqueo	Si, medida estable
	Rango maximo de medida	50 kg
	Precisión	10 g
	Tipo de fuente de poder	2 Baterias AAA
	Calibración	Automatica
	Pantalla	LCD digital retroiluminada
	Apagado automatico	Si, 120 segundos

Fuente: Propia.

### 4.3 Pruebas y resultados:

Para iniciar las pruebas se requiere efectuar la caracterización del flujo de viento entregado por el soplador, debido a que la distribución de velocidades del flujo al impactar en el rotor no presenta magnitudes uniformes; por lo que para efectuar la caracterización del flujo se realiza una toma de datos realizando nueve mediciones en distintos puntos distribuidos de forma simétrica en el cuerpo de los rotores; para así estipular una velocidad promedio vea figura 4.3.1, Basado en [26].

**Figura 4.3.1:** Diagramas para la caracterización de las corrientes de viento suministradas con el soplador.



Fuente: Propia.

**Figura 4.3.2:** Medidas y toma de datos para la caracterización del flujo.



Fuente: Propia.

En la figura 4.3.2 y 4.3.3 se puede ver como se realizan las tomas de datos para la caracterización del flujo de viento colocando el soplador a una distancia de 1 metro aproximadamente.

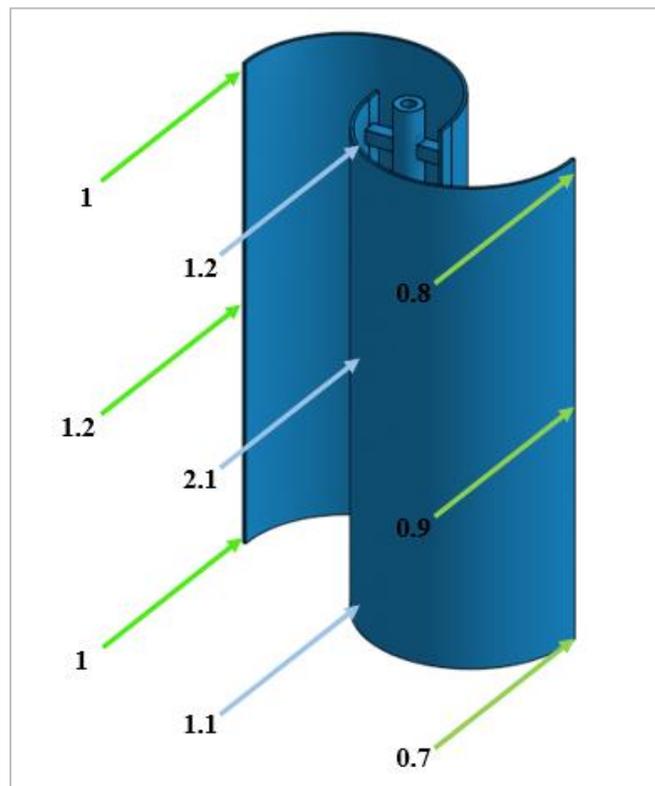
**Figura 4.3.3:** Vista adicional del proceso de caracterización del flujo.



Fuente: Propia.

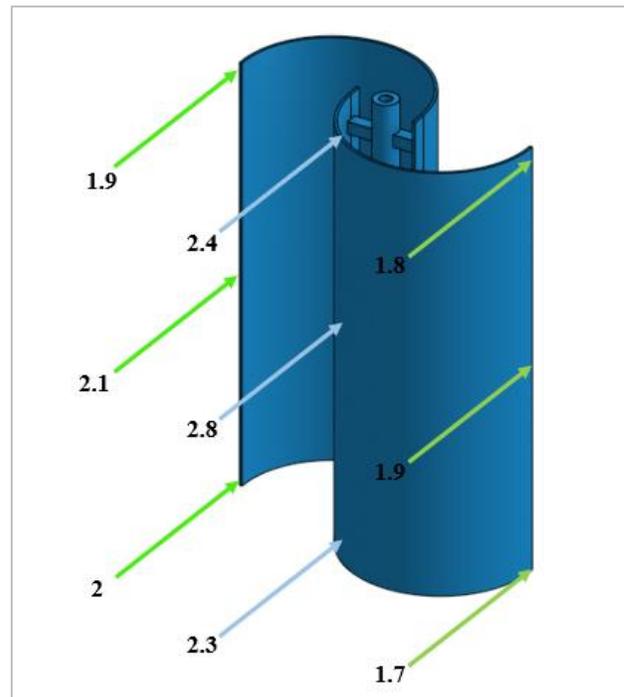
Para el rotor Savonius de geometría convencional:

**Figura 4.3.4:** Caracterización del flujo de viento - "1.11 m/s".



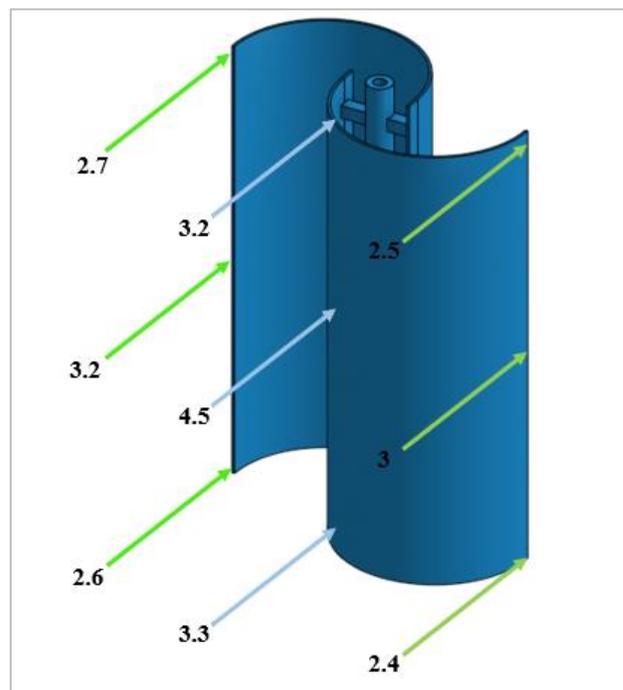
Fuente: Propia.

**Figura 4.3.5:** Caracterización del flujo de viento - "2.1 m/s".



Fuente: Propia.

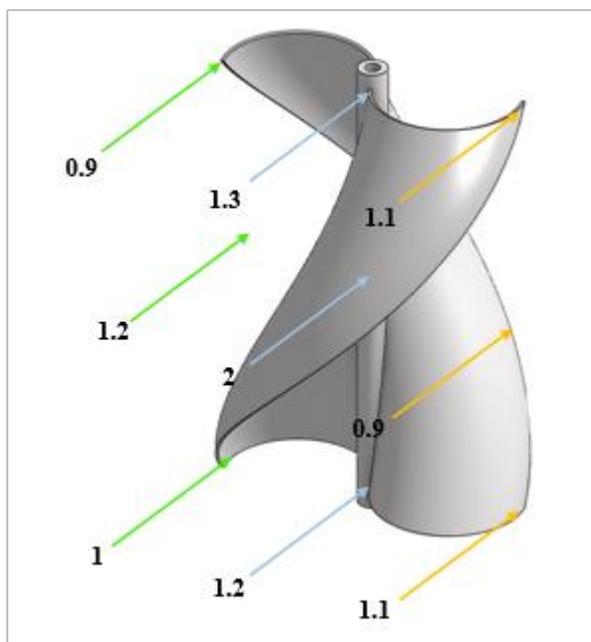
**Figura 4.3.6:** Caracterización del flujo de viento - "3.07 m/s".



Fuente: Propia.

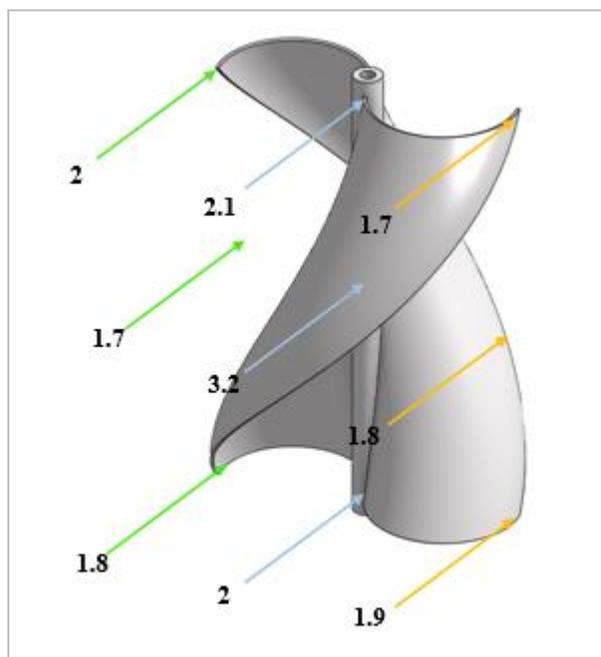
Para el rotor Savonius de geometría helicoidal:

**Figura 4.3.7:** Caracterización del flujo de viento - "1.19 m/s".



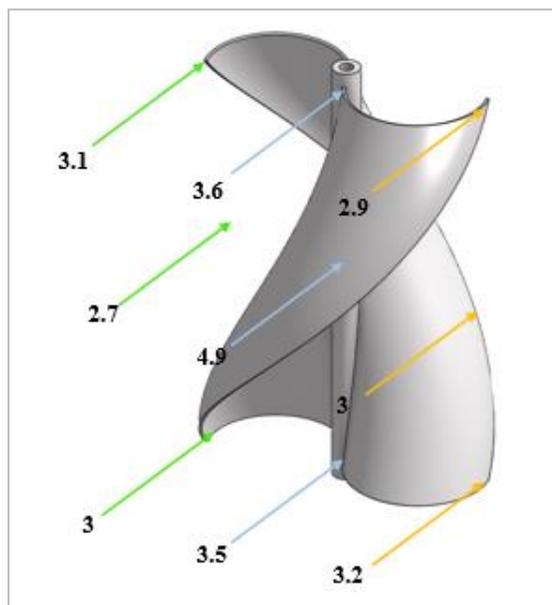
Fuente: Propia.

**Figura 4.3.8:** Caracterización del flujo de viento - "2.02 m/s".



Fuente: Propia.

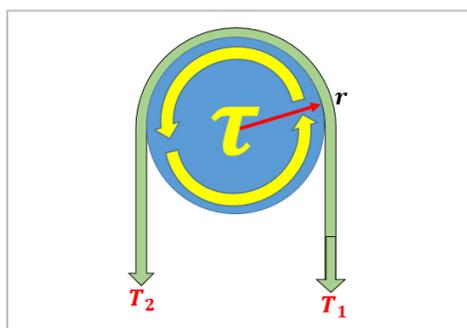
**Figura 4.3.9:** Caracterización del flujo de viento - "3.32 m/s".



Fuente: Propia.

Para efectuar las mediciones de la diferencia de tensión necesaria para frenar al rotor Savonius se usan los dinamómetros en conjunto con una correa de tela que, al momento de inducir la tensión con los dinamómetros, se encarga de frenar el eje del rotor y arrojar en los dinamómetros las tensiones necesarias para frenar al rotor, para posteriormente realizar el cálculo del torque que genera el rotor el montaje se realiza siguiendo el siguiente diagrama; vea figura 4.3.10.

**Figura 4.3.10:** Diagrama del montaje para el frenado del rotor Savonius.



Fuente: Propia.

Siendo:

$\tau \rightarrow$  Torque

$r \rightarrow$  Radio del eje del rotor

$T_1 \rightarrow$  Tensión del dinamometro #1

$T_2 \rightarrow$  Tensión del dinamometro #2

$$\tau = r * (T_1 - T_2)$$

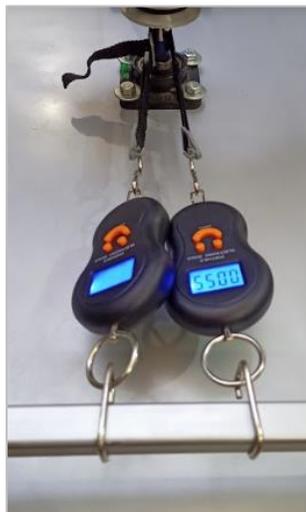
A Continuación, en la figura 4.3.11 y 4.3.12, se muestra cómo se realiza el montaje en físico del esquema mostrado en la figura 4.3.4.

**Figura 4.3.11:** Montaje físico en el banco.



Fuente: Propia.

**Figura 4.3.12:** Vista auxiliar del montaje en físico.



Fuente: Propia

Adicionalmente se toman las medidas de los parámetros eléctricos como el voltaje y la corriente eléctrica, además también efectuar la medición de las RPM del eje del rotor, vea la figura 4.3.13.

**Figura 4.3.13:** Medición de las RPM del eje del rotor y de parámetros eléctricos.



Fuente: Propia.

Posteriormente se recopilan los datos en tablas para posteriormente generar las respectivas curvas de rendimiento a continuación:

Es importante resaltar que estos análisis se efectúan bajo un modelo matemático para obtener la potencia máxima disponible considerando pérdidas aerodinámicas y mecánicas, por lo que la eficiencia que resulta de las pruebas y los datos están contemplados bajo los límites establecidos para los rotores Savonius que se contempla en el límite de Betz y en otros estudios efectuados, garantizando así la veracidad de los datos obtenidos.

**Tabla 22:** Tabla de datos del rotor convencional con una velocidad de 1.11 m/s.

<i>Tabla de recopilación de datos para pruebas con el banco de rotores savonius.</i>								
<i>Velocidad Prom. (m/s)</i>	<i>T<sub>1</sub> (N)</i>	<i>T<sub>2</sub> (N)</i>	<i>RPM</i>	<i>Ω (rad/s)</i>	<i>Torque (Nm)</i>	<i>Potencia (W)</i>	<i>Potencia Maxima (W)</i>	<i>Eficiencia</i>
1,11	0	0	31,3	3,278	0,000	0,000	0,032	0%
	0,341	0,093	20,8	2,178	0,012	0,026		81%
	0,411	0,127	16,1	1,686	0,014	0,023		72%
	0,498	0,186	10,3	1,079	0,015	0,016		51%
	0,583	0,23	8,5	0,890	0,017	0,015		47%
	0,634	0,262	3,7	0,387	0,018	0,007		22%
	0,727	0	0	0,000	0,035	0,000		0%

Fuente: Propia.

En la anterior tabla se contemplan los datos recopilados en las pruebas efectuadas, se contempla la potencia máxima disponible teóricamente con respecto al modelo matemático designado para este tipo de pruebas “modelo matemático #3”, siendo que, comparando este resultado con los datos experimentales extraídos, se puede ver que se obtuvo una eficiencia máxima del 81%, siendo un valor muy aproximado al esperado para un coeficiente de potencia de potencia de 0,18.

**Tabla 23:** Tabla de datos del rotor convencional con una velocidad de 2.1 m/s.

<i>Tabla de recopilación de datos para pruebas con el banco de rotores savonius.</i>								
<i>Velocidad Prom. (m/s)</i>	<i>T<sub>1</sub> (N)</i>	<i>T<sub>2</sub> (N)</i>	<i>RPM</i>	<i>Ω (rad/s)</i>	<i>Torque (Nm)</i>	<i>Potencia (W)</i>	<i>Potencia Maxima (W)</i>	<i>Eficiencia</i>
2,1	0	0	63,8	6,681	0,000	0	0,214	0%
	1,135	0,515	53,3	5,582	0,030	0,165		77%
	1,525	0,645	43,1	4,513	0,042	0,189		88%
	1,708	0,722	32,4	3,393	0,047	0,159		75%
	1,78	0,878	21,7	2,272	0,043	0,098		46%
	2,03	0,911	14,8	1,550	0,053	0,083		39%
	2,575	0	0	0,000	0,123	0		0%

Fuente: Propia.

De la tabla 23 se resalta la velocidad de operación a la que se hizo la prueba de 2,1 m/s, ya que es muy cercana a las velocidades óptimas de operación de un rotor Savonius; esto se ve reflejado en un crecimiento de la eficiencia con respecto a la potencia máxima que se pudo obtener, siendo la eficiencia obtenida un 88% presentando un incremento del 7% con respecto a la anterior prueba.

**Tabla 24:** Tabla de datos del rotor convencional con una velocidad de 3.07 m/s.

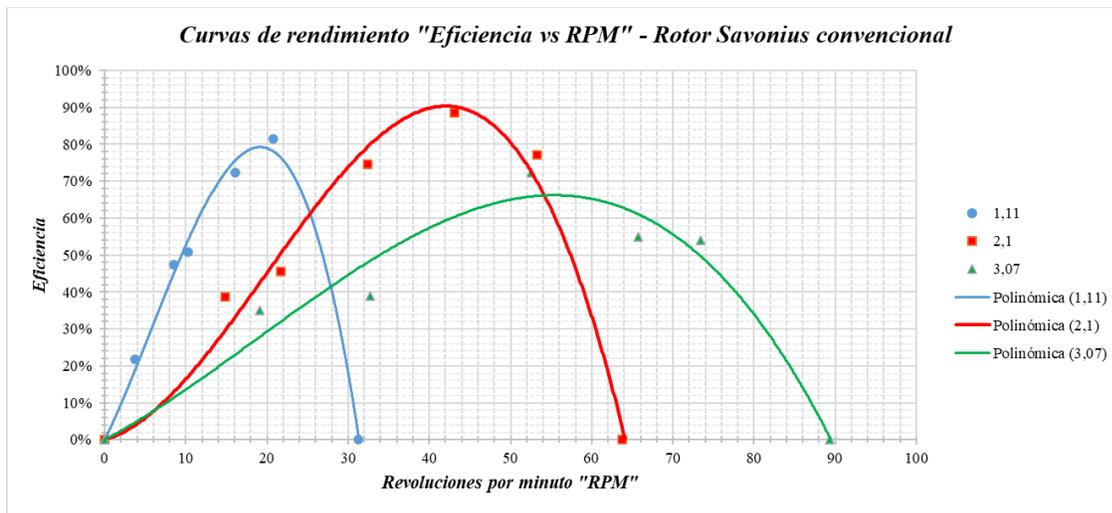
<i>Tabla de recopilación de datos para pruebas con el banco de rotores savonius.</i>								
<i>Velocidad Prom. (m/s)</i>	<i>T<sub>1</sub> (N)</i>	<i>T<sub>2</sub> (N)</i>	<i>RPM</i>	<i>Ω (rad/s)</i>	<i>Torque (Nm)</i>	<i>Potencia (W)</i>	<i>Potencia Maxima (W)</i>	<i>Eficiencia</i>
3,07	0	0	89,3	9,351	0,000	0,000	0,623	0%
	2,672	1,753	73,4	7,686	0,044	0,336		54%
	3,018	1,974	65,7	6,880	0,050	0,342		55%
	3,941	2,219	52,5	5,498	0,082	0,451		72%
	4,226	2,74	32,7	3,424	0,071	0,242		39%
	4,81	2,512	19,09	1,999	0,109	0,219		35%
	5,12	0	0	0,000	0,244	0,000		0%

Fuente: Propia.

De esta última tabla, se resalta el incremento en la potencia obtenida tanto de forma teórica como experimental, pero sin embargo al compararlas, vemos que la máxima eficiencia obtenida en la prueba es de 72%, representando una disminución porcentual del 16% con respecto a la prueba anterior con una velocidad de 2,1 m/s.

Con los datos obtenidos en estas pruebas se compilan en una gráfica para genera sus respectivas curvas de rendimiento como se puede apreciar en la figura 4.3.14 para el rotor Savonius convencional y 4.3.15 para el rotor Savonius de geometría helicoidal.

**Figura 4.3.14:** Curva de rendimiento generadas para el rotor Savonius de geometría convencional.



Fuente: Propia.

De la anterior grafica se resalta que la curva que presenta un mejor desempeño es la curva de realizada bajo una velocidad promedio de operación de 2,1 m/s, teniendo un valor muy cercano al 90% de eficiencia.

En el mismo orden se puede apreciar que la curva obtenida bajo una velocidad promedio de operación de 1,11 m/s tiende a presentar un desempeño muy cercano al 80% de eficiencia, además de ser muy pronunciada con respecto a las RPM, por último, la curva realizada bajo una velocidad promedio de 3,07 m/s presenta una eficiencia muy cercana al 68% siendo inferior a las otras curvas; sin embargo, el comportamiento de esta presenta una proyección menos pronunciada con respecto a las RPM.

A continuación, se exponen los resultados para el rotor de geometría helicoidal:

**Tabla 25:** Tabla de datos del rotor helicoidal con una velocidad de 1.19 m/s.

<i>Tabla de recopilación de datos para pruebas con el banco de rotores savonius.</i>								
<i>Velocidad Prom. (m/s)</i>	<i>T<sub>1</sub> (N)</i>	<i>T<sub>2</sub> (N)</i>	<i>RPM</i>	<i>Ω (rad/s)</i>	<i>Torque (Nm)</i>	<i>Potencia (W)</i>	<i>Potencia Maxima (W)</i>	<i>Eficiencia</i>
1,19	0	0	32,6	3,414	0,000	0,000	0,039	0%
	0,352	0,103	23,7	2,482	0,012	0,029		75%
	0,453	0,132	20,2	2,115	0,015	0,032		82%
	0,558	0,207	15,1	1,581	0,017	0,026		67%
	0,594	0,233	6,9	0,723	0,017	0,012		32%
	0,65	0,279	4,9	0,513	0,018	0,009		23%
	0,78	0	0	0,000	0,037	0,000		0%

Fuente: Propia

De la anterior tabla se resalta la potencia máxima experimental obtenida con respecto a la potencia máxima teórica, siendo que bajo una velocidad promedio de operación de 1,19 m/s la eficiencia máxima alcanza por el rotor helicoidal es de 82%, si se compara con el resultado equivalente del rotor Savonius convencional se tiene que el rotor helicoidal presenta una diferencia superior muy mínima del 1%; pero si se analizan las RPM vemos que el rotor helicoidal presenta un mejor desempeño en la captación del viento, generando así una mayor velocidad de rotación debido a su forma que permite una mejor captación del viento.

**Tabla 26:** Tabla de datos del rotor helicoidal con una velocidad de 2,02 m/s.

<i>Tabla de recopilación de datos para pruebas con el banco de rotores savonius.</i>								
<i>Velocidad Prom. (m/s)</i>	<i>T<sub>1</sub> (N)</i>	<i>T<sub>2</sub> (N)</i>	<i>RPM</i>	<i>Ω (rad/s)</i>	<i>Torque (Nm)</i>	<i>Potencia (W)</i>	<i>Potencia Maxima (W)</i>	<i>Eficiencia</i>
2,02	0	0	69,2	7,247	0,000	0	0,192	0%
	1,162	0,575	57,4	6,011	0,028	0,168		87%
	1,771	0,937	42,3	4,430	0,040	0,176		92%
	1,955	1,22	36,4	3,812	0,035	0,133		69%
	2,28	1,476	20,9	2,189	0,038	0,084		44%
	2,34	1,43	11,8	1,236	0,043	0,054		28%
	2,575	0	0	0,000	0,123	0		0%

Fuente: Propia.

En la tabla 26 se resalta la máxima eficiencia obtenida bajo una velocidad promedio de operación del 2,02 m/s, siendo que la eficiencia máxima alcanzada fue de un 92% significando un aumento del 10% con respecto a la anterior prueba y de un 4% con respecto a la pruebas efectuada con el rotor Savonius de geometría convencional bajo una velocidad promedio de operación de 2,1 m/s, sin embargo la potencia máxima del rotor Savonius convencional es superior a la del rotor Savonius helicoidal; esto puede deberse a la diferencia que hay entre las velocidades del flujo de viento de las pruebas.

**Tabla 27:** Tabla de datos del rotor helicoidal con una velocidad de 3.32 m/s.

<i>Tabla de recopilación de datos para pruebas con el banco de rotores savonius.</i>								
<i>Velocidad Prom. (m/s)</i>	<i>T<sub>1</sub> (N)</i>	<i>T<sub>2</sub> (N)</i>	<i>RPM</i>	<i>Ω (rad/s)</i>	<i>Torque (Nm)</i>	<i>Potencia (W)</i>	<i>Potencia Maxima (W)</i>	<i>Eficiencia</i>
3,32	0	0	94,8	9,927	0,000	0,000	0,853	0%
	2,81	1,821	81,2	8,503	0,047	0,401		47%
	3,352	1,98	72,7	7,613	0,065	0,497		58%
	4,17	2,1	65,5	6,859	0,099	0,676		79%
	4,226	2,74	43,1	4,513	0,071	0,319		37%
	4,987	2,871	23,3	2,440	0,101	0,246		29%
	5,37	0	0	0,000	0,256	0,000		0%

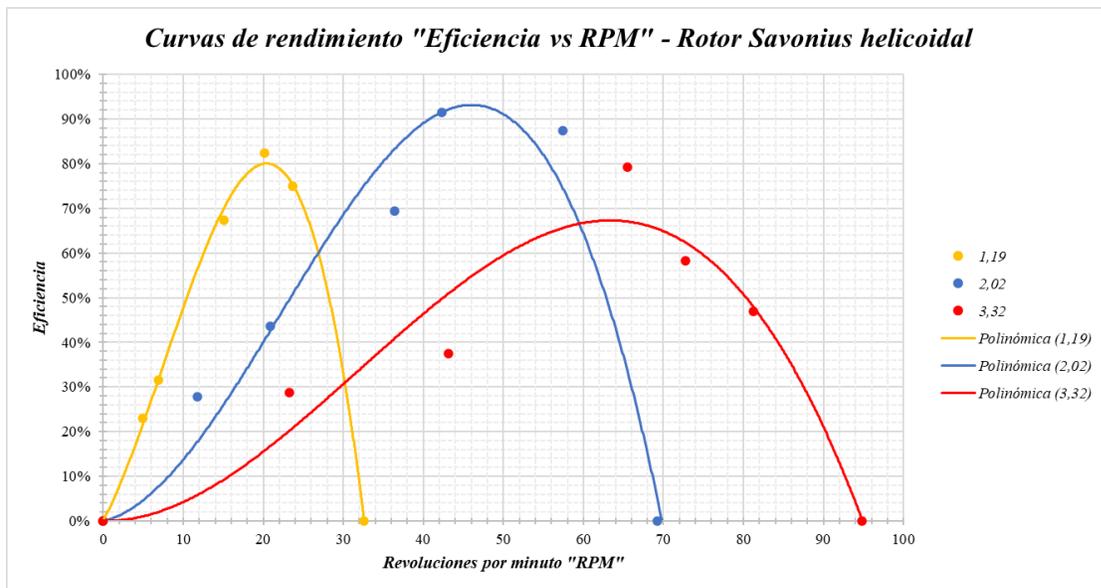
Fuente: Propia.

En esta última prueba se resalta las altas revoluciones que presenta el rotor de geometría helicoidal, siendo ligeramente superiores a las obtenidas en la última prueba realizada al rotor Savonius de geometría convencional.

Adicionalmente, se puede apreciar que la máxima eficiencia obtenida en esta prueba es de un 79% siendo superior por un 7% a su equivalente en el rotor Savonius convencional.

Con los datos obtenidos en estas pruebas se procede a generar las curvas de rendimiento para este rotor:

**Figura 4.3.15:** Curva de rendimiento generadas para el rotor Savonius de geometría helicoidal.



Fuente: Propia.

De la anterior grafica se puede resaltar que nuevamente la curva que presenta un mejor desempeño es la curva obtenida bajo una velocidad de operación de 2,02 m/s con una valor máximo muy cercano al 94%, seguida por la de 1,19 m/s con un valor máximo de 80% y por último la de 3,32 m/s con un valor muy próximo a 68%.

Adicionalmente se destaca que todas las curvas mostradas en la figura 4.3.15 las cuales relacionan el comportamiento del rotor Savonius de geometría helicoidal presentan un comportamiento menos pronunciado con respecto a las RPM, siendo más homogéneas con respecto a estas, a diferencias de las curvas generadas en la figura 4.3.17 que presentan un comportamiento más cerrado con respecto a las RPM.

## Capítulo 5

### Conclusiones, recomendaciones y trabajos a futuro

#### Conclusiones:

1. Se implementó un banco de pruebas de laboratorio basado en el uso de rotores Savonius como elementos de estudio, para la caracterización y obtención de curvas de rendimientos de los mismos; pudiendo establecer una comparativa entre dos tipos de rotores Savonius.
2. Se construyeron dos tipos de modelos de turbina Savonius, con geometrías distintas; el primero un rotor Savonius con geometría convencional “tipo S” y el segundo un rotor Savonius con geometría helicoidal; estas posteriormente fueron evaluadas generando así la caracterización de cada una de estas con respecto a su comportamiento, potencia mecánica, eficiencia, etc; para la obtención de sus curvas de rendimiento dando como resultados que las eficiencias en cada turbina analizadas bajo los criterios de los modelos matemáticos presentan resultados de eficiencias que oscilan entre el 60% y 95%, siendo la turbina de geometría helicoidal la que presenta una mejor conservación de la energía cinética del viento traducida en RPM mayores en comparación con la turbina Savonius de geometría convencional; sin embargo, ambas turbinas presentan comportamientos muy parecidos a velocidades de operación similares, por lo que si se analiza el punto de vista de la facilidad de construcción de las turbinas versus la eficiencia que otorgan estas, la turbina de geometría convencional resulta más atractiva por su sencillas de construcción y prestaciones. Vea tabla 22, tabla 23, tabla 24, tabla 25, tabla 26, tabla 27, figura 4.3.14 y figura 4.3.15
3. Se evaluó y analizó el comportamiento fluidodinámico usando el software ANSYS junto con su complemento Fluent, generando la simulación y observaciones de la misma acerca del comportamiento del rotor enfocado al efecto de sobrepresión, además también de generar su curva de potencia obteniendo el resultado de una potencia máxima generada de 0.95 W, adicionalmente de analizarla con respecto a

los modelos matemáticos elegidos generando las comparaciones y observaciones pertinentes. Vea pagina 70, 71 y tabla 4, 22, 23, 24, 25, 26 y 27.

4. Enfocándose en los resultados de potencia teóricos y experimentales, se puede decir que los rotores eólicos del tipo Savonius son una buena opción para la generación de energía mediante el aprovechamiento de las corrientes de viento; ya que estos cuentan con una manufactura relativamente sencilla de pocos elementos y de bajo costo en comparación con rotores eólicos de otro tipo disponibles en el mercado, haciendo énfasis en que para obtener una generación de energía considerable y a mayor escala se necesitaría una cantidad considerable de estos generadores, apoyando las afirmaciones expuestas en trabajos similares de que los rotores Savonius son idóneos para aplicaciones puntuales de generación de energía en la industria como puede ser el bombeo de agua, irrigación o iluminación LED.
5. Haciendo énfasis en los recursos meteorológicos disponibles en las entidades de gobierno correspondientes, indagados y usados para la realización del proyecto se puede decir que en lo que respecta a los recursos eólicos, se encuentran muy desactualizados, el atlas eólico de Colombia con la recopilación anual de las velocidades de viento más actualizado que se dispone es del año 2015, siendo esto algo muy poco conveniente, ya que limita la realización de estudios con una veracidad buena que se quieran desarrollar en la actualidad o a futuro con respecto al tema de energías renovables enfocadas al sector eólico.
6. El desarrollo de esta tesis permitió abordar, entender y asimilar la problemática global expuesta por el Consejo Global de la Energía Eólica “GWEC”, en el marco del déficit mundial en la capacidad de la energía eólica instalada en el mundo; y su preocupación e interés por el desarrollo de proyectos investigativos, industriales y económicos enfocados a mejorar el panorama actual.
7. Se desarrollo un manual de usuario y guías de laboratorio para que se pueda usar el banco de laboratorio de forma idónea en pro de que los estudiante y docentes puedan realizar prácticas ligadas al uso de la energía eólica. Vea la sección de anexos.

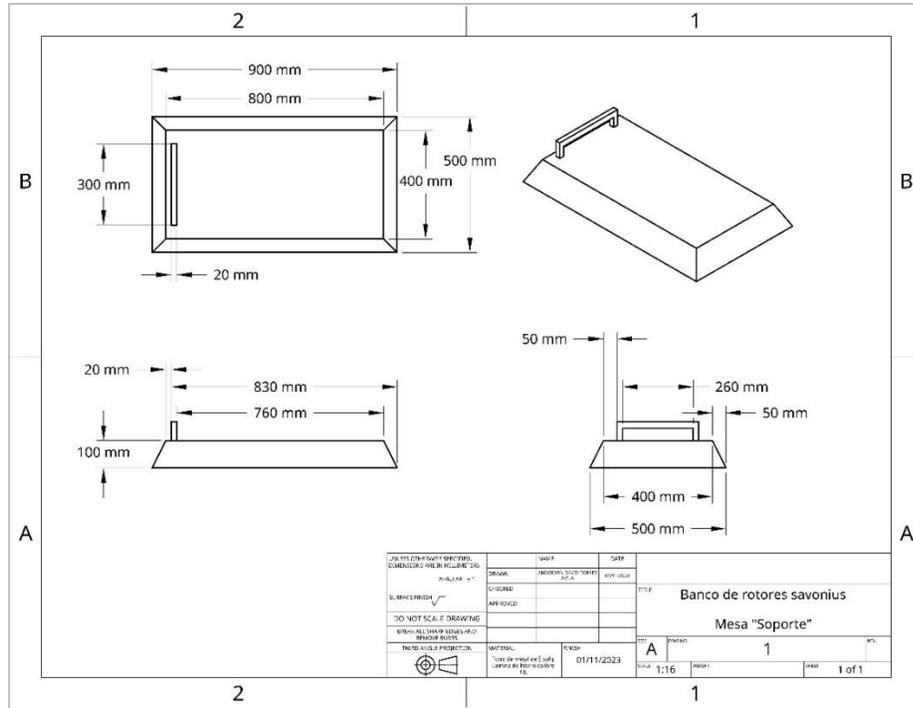
**Recomendaciones y trabajos a futuro:**

1. Para trabajos futuros se puede optar por la automatización de la toma de datos para que mejore el proceso de la captación de mediciones; mediante la implantación de sensores, dispositivos electrónicos de recopilación de datos, etc.
2. Se puede optar por la creación de un prototipo de túnel de viento que permite complementar al banco y abrir horizonte para futuras investigaciones.
3. Se recomienda plantear la alternativa de adaptar nuevos sistemas de transmisión para estudiar las pérdidas de eficiencia en pro de ver el comportamiento y sistema más idóneo para el banco y lograr una mejor generación de energía.
4. A futuro se puede adaptar nuevos modelos de rotores que amplíen el abanico de geometrías disponibles para estudiar.
5. Se recomienda el desarrollo de un plan de mantenimiento y mejora para los elementos del banco e instrumentos de medición, incluyendo aspectos como la calibración de equipos y análisis de incertidumbre de los mismos.
6. Para futuros trabajos que contemplen la realización de simulaciones fluidodinámicas bajo condiciones similares o variando los modelos de viscosidad turbulenta se recomienda el uso de computadoras con una capacidad más robusta para correr programas especializados y enfocados a este tipo de simulaciones, como lo es ANSYS, debido a que el ejecutar este tipo de simulaciones en computadores de una gama económica genera un alto estrés a los componentes del equipo traduciéndose así en posibles daños.

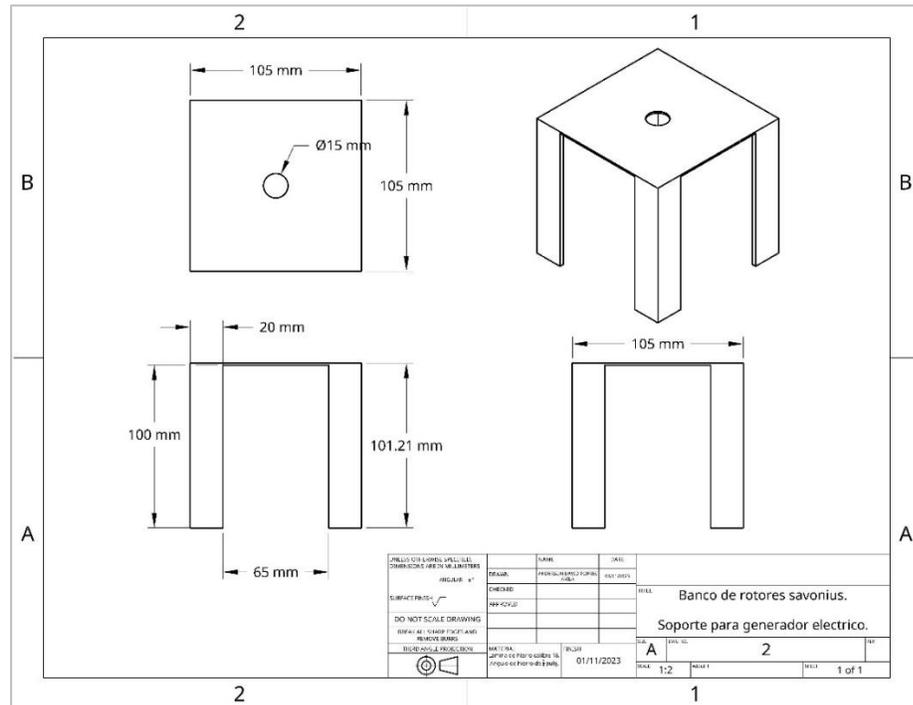


### Anexos

1. PLANO DE SOPORTE PRINCIPAL “MESA” DEL BANCO.

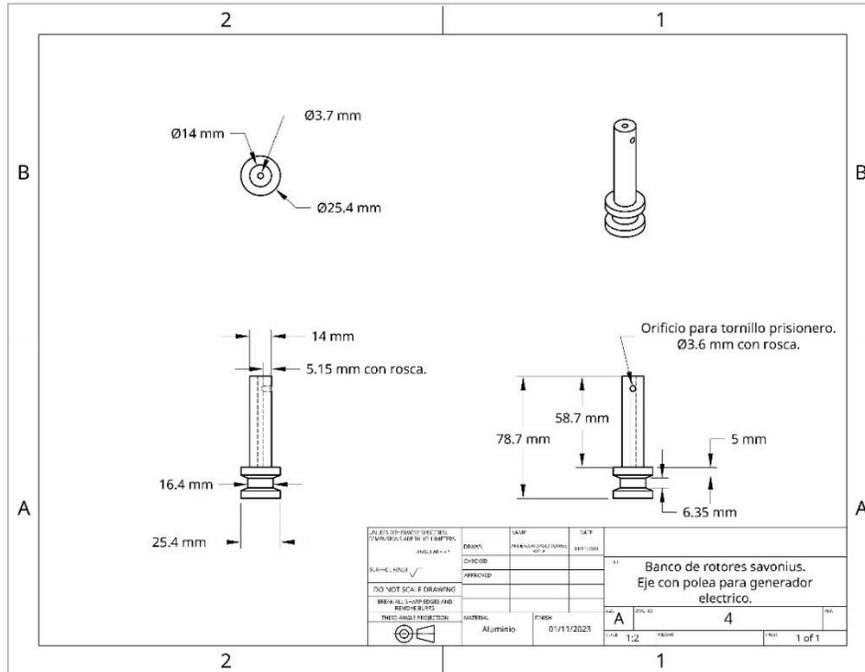


2. PLANOS SOPORTE PARA GENERADOR CON EJE Y POLEA.

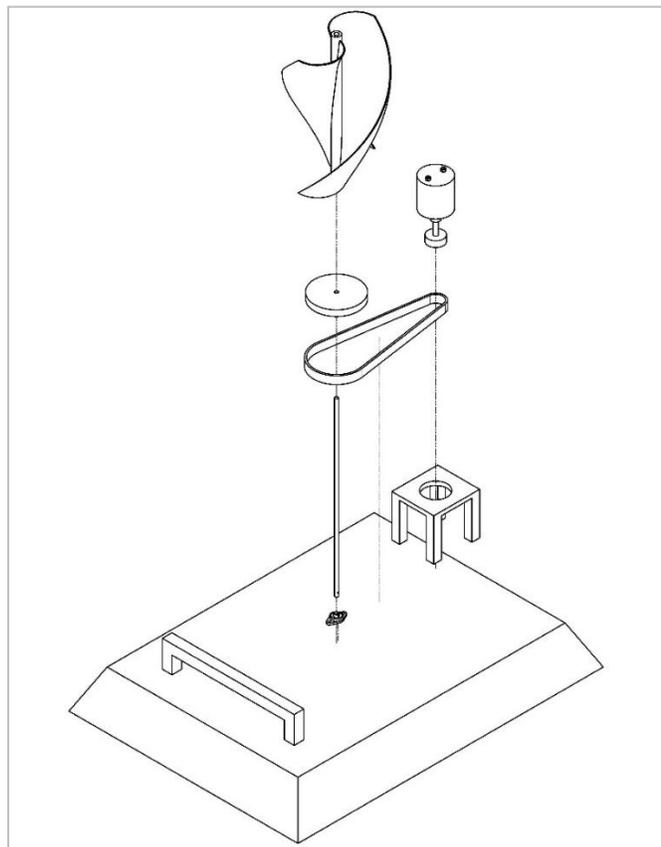




5. PLANO DE EJE CON POLEA PARA GENERADOR ELÉCTRICO.



6. PLANO CON VISTA GENERAL EXPLOSIONADA DE LOS ELEMENTOS DEL BANCO.



7. ANEXO MANUAL DE OPERACIÓN DEL BANCO.

Enlace para descargar el manual del banco:

[https://drive.google.com/drive/folders/1htN2rhhaMq0dwL0jFVOiYPEc\\_9q-LIUE?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/1htN2rhhaMq0dwL0jFVOiYPEc_9q-LIUE?usp=sharing)

8. ANEXO GUÍAS DE LABORATORIO TEÓRICAS Y PRACTICA DEL BANCO.

Enlace para descargar las guías de laboratorio del banco del banco:

[https://drive.google.com/drive/folders/1htN2rhhaMq0dwL0jFVOiYPEc\\_9q-LIUE?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/1htN2rhhaMq0dwL0jFVOiYPEc_9q-LIUE?usp=sharing)

## Referencias Bibliográficas

- [1] ARISTIZÁBAL, L. M., CORREA, J., MACÍAS, J. A. R., & FLÓREZ, D. A. "IMPLEMENTACIÓN DE AYUDAS DIDÁCTICAS PARA EL ESTUDIO Y LA ENSEÑANZA DE MECANISMOS", EN 2º CONGRESO LATINOAMERICANO DE INGENIERIA - RETOS EN LA FORMACION DE INGENIEROS EN LA ERA DIGITAL - ENCUENTRO INTERNACIONAL DE EDUCACIÓN EN INGENIERÍA, CARTAGENA DE INDIAS, (2019), pp. 1-9.
- [2] FRANCO RAMIREZ, J. S., & GAMBOA BAQUERO, K. J. "DISEÑO DE UN BANCO DIDÁCTICO PARA ENSAYOS DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA", TESIS DE TECNOLOGOS MECANICOS, UNIV. DIST. FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS, BOGOTA, COLOMBIA, (2020).
- [3] DANDUN MAHESA PRABOWOPUTRA, ADITYA RIO PRABOWO, "EFFECT OF THE PHASE-SHIFT ANGLE ON THE VERTICAL AXIS SAVONIUS WIND TURBINE PERFORMANCE AS A RENEWABLE-ENERGY HARVESTING INSTRUMENT", ENERGY REPORTS, VOLUME 8, SUPPLEMENT 9, (2022).
- [4] XIRAN LIU, DAN ZHAO, NAY LIN OO, "NUMERICAL PREDICTION OF THE POWER COEFFICIENT IMPROVEMENTS OF THREE LATERALLY ALIGNED SAVONIUS WIND TURBINES ABOVE A FORWARD FACING STEP", JOURNAL OF WIND ENGINEERING AND INDUSTRIAL AERODYNAMICS, VOLUME 228, (2022).
- [5] KHALED R. ABDELAZIZ, MOHAMED A.A. NAWAR, AHAMED RAMADAN, YOUSSEF A. ATTAI, MOHAMED H. MOHAMED, "PERFORMANCE INVESTIGATION OF A SAVONIUS ROTOR BY VARYING THE BLADE ARC ANGLES", OCEAN ENGINEERING, VOLUME 260, (2022).
- [6] "AMPLIACIÓN DEL ALCANCE DE LAS ACTIVIDADES CONTENIDAS EN LA CLASIFICACIÓN NACIONAL DE OCUPACIONES EN LO REFERENTE A LAS INGENIERÍAS ELÉCTRICA, MECÁNICA Y PROFESIONES AFINES", CONSEJO PROFESIONAL NACIONAL DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, MECÁNICA Y PROFESIONES AFINES, RESOLUCIÓN 50 DEL 2008.
- [7] ALGARIN, C. ROBLES, OMAR RODRÍGUEZ ÁLVAREZ, "UN PANORAMA DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES EN EL MUNDO, LATINOAMERICANA Y COLOMBIA.", ESPACIOS, VOL. 39, N° 10, (2018).
- [8] CASTRO SÁNCHEZ, WILLIAM ALBERTO, "VENTAJAS DEL APROVECHAMIENTO DEL VIENTO EN LA REALIZACIÓN DE PROYECTOS EÓLICOS EN COLOMBIA", TESIS DE INGENIERIA INDUSTRIAL, UNIV. MILITAR NUEVA GRANADA, BOGOTA, COLOMBIA, (2019).
- [9] SOSAPANTA SALAS, JOSEPH CAMILO, "ENERGÍA EÓLICA EN COLOMBIA: PANORAMA Y PERSPECTIVAS BAJO LA TRIPLE CUENTA DE RESULTADOS.", TESIS DE M.S, UNIV. NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA, (2020).
- [10] PEDROZO TAPIA, STEPHANIE LORENA. "DISEÑO Y PRUEBA DE DESEMPEÑO DE UN ROTOR TIPO SAVONIUS PARA EXTRACCIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DEL FLUJO VEHICULAR.", TESIS DE INGENIERIA MECANICA, UNIV. DE LOS ANDES, BOGOTA, COLOMBIA, (2021).
- [11] RODRÍGUEZ DÍAZ, JUAN CAMILO, "DESARROLLO DE UN BANCO DIDÁCTICO PARA MODELO DE TURBINA EÓLICA DE EJE VERTICAL.", TESIS DE INGENIERIA MECANICA, UNIV. SANTO TOMAS, TUNJA, COLOMBIA, (2021).
- [12] CASTAÑEDA AGUDELO, CRISTIAN CAMILO, GUSTAVO ADOLFO AFRICANO ZÁRATE, "DISEÑO DE UN SISTEMA DE ILUMINACIÓN EXTERIOR EMPLEANDO UN ROTOR EÓLICO TIPO SAVONIUS PARA ASISTIR EN LA ILUMINACIÓN DEL PARQUEADERO DE MOTOS.", TESIS DE TECNOLOGIA MECANICA, UNIV. DISTRITAL FRANCISCO JOSE DE CALDAS, BOGOTA, COLOMBIA, (2016).
- [13] GLOBAL WIND ENERGY COUNCE, INFORME EOLICO MUNDIAL (2021 ED.) [ONLINE]. DISPONIBLE: [HTTPS://GWEC.NET/GLOBAL-WIND-REPORT-2021/](https://gwec.net/global-wind-report-2021/) [ACCESO: 8/10/2022]
- [14] INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, RECURSOS METEOROLOGICOS Y ESTUDIOS AMBIENTALES [ONLINE]. DISPONIBLE: [HTTP://DOCUMENTACION.IDEAM.GOV.CO/](http://documentacion.ideam.gov.co/). [ACCESOS: 8/10/2022]
- [15] IDEAM, ATLAS DE VIENTO DE COLOMBIA (2015 ED.) [ONLINE]. DISPONIBLE: [HTTP://ATLAS.IDEAM.GOV.CO/VISORATLASVIENTOS.HTML](http://atlas.ideam.gov.co/visoratlasvientos.html)
- [16] UPME – IDEAM, ATLAS DE VIENTO Y ENERGÍA EÓLICA DE COLOMBIA, IMPRENTA NACIONAL DE COLOMBIA, [ONLINE]. DISPONIBLE: [HTTPS://BDIGITAL.UPME.GOV.CO/HANDLE/001/22](https://bdigital.upme.gov.co/handle/001/22). [ACCESO: 8/10/2022].
- [17] CRUZ PEÑA, NICOLÁS, "DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE UNA TURBINA EÓLICA DARRIEUS DE PEQUEÑA ESCALA.", TESIS DE INGENIERIA MECANICA, UNIV. DE LOS ANDES, BOGOTA, COLOMBIA, (2015).
- [18] DIAGO VIDAL, CARLOS, "DISEÑO DE UN AEROGENERADOR SAVONIUS PARA USO DOMÉSTICO.", TESIS DE MASTER UNIVERSITARIO EN INGENIERIA MECATRONICA, UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA, VALENCIA, ESPAÑA, (2019).
- [19] LÓPEZ, MIGUEL VILLARUBIA, INGENIERÍA DE LA ENERGÍA EÓLICA, MARCOMBO, VOL. 5, 2012.
- [20] "C-0201 DE CEBEKIT, AEROGENERADOR EÓLICO SAVONIUS PARA EXPERIMENTAR SOBRE ENERGÍA ELÉCTRICA EN CLASE", [EN LINEA]. DISPONIBLE EN: [HTTPS://WWW.INTEREMPRESAS.NET/TECNOLOGIA-AULAS/ARTICULOS/160266-CEBEKIT-PRESENTA-AEROGENERADORES-EOLICOS-SAVONIUS-PARA-EXPERIMENTAR-SOBRE-ENERGIA-CLASE.HTML](https://www.interempresas.net/tecnologia-aulas/articulos/160266-CEBEKIT-PRESENTA-AEROGENERADORES-EOLICOS-SAVONIUS-PARA-EXPERIMENTAR-SOBRE-ENERGIA-CLASE.HTML). [ACCESO: 8/10/2022].
- [21] GIRALDO BUITRAGO, C. A. "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DIDÁCTICO DE ENGRANAJES PARA TRANSMISIÓN DE POTENCIA EN LA UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO SEDE NEIVA", TESIS DE INGENIERIA MECANICA, UNIV. ANTONIO NARIÑO, NEIVA, COLOMBIA, (2021).
- [22] SÁNCHEZ RIOJAS, CRISTIAN JUNIOR. "ANÁLISIS FLUIDODINÁMICO EN UNA TURBINA DARRIEUS A PARTIR DE ENERGÍA MAREOMOTRIZ PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL DISTRITO DE PIMENTEL.", TESIS DE INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA, UNIV. SEÑOR DE SIPÁN, PERÚ, (2021).
- [23] M. ZEMAMOU, M. AGGOUR Y A. TOUMI, "REVIEW OF SAVONIUS WIND TURBINE DESIGN AND PERFORMANCE", SCIENCE DIRECT, VOL. 141, PP. 383-388, (2017).
- [24] M. HADI ALI, "EXPERIMENTAL COMPARISON STUDY FOR SAVONIUS WIND TURBINE OF TWO & THREE BLADES AT LOW WIND SPEED", INTERNATIONAL JOURNAL OF MODERN ENGINEERING RESEARCH, VOL. 3, N° 5, PP. 2978-2986, (2013).
- [25] DÍAZ, ARGEMIRO PALENCIA; PAJARO, GIOVANNI JIMÉNEZ; SALAS, KHRISCIA UTRIA, "COMPUTATIONAL MODEL OF SAVONIUS TURBINE.", INGENIARE, REVISTA CHILENA DE INGENIERÍA, VOL. 23, N° 3, P. 406-412, (2015).

- [26] HERNÁNDEZ ECHEVERRI, SERGIO, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO DE ROTOR EÓLICO DE EJE VERTICAL TIPO SAVONIUS PARA LA OBTENCIÓN DE ENERGÍA MECÁNICA”, BS THESIS, UNIV. EAFIT, MEDELLIN, COLOMBIA, 2012.
- [27] J. M. RODRÍGUEZ DEVIS, “COEFICIENTES DE POTENCIA EN MOLINOS SAVONIUS”, *ING. INV.*, NO. 13, PP. 62–67, SEP. 1985.
- [28] CASTILLO MOLINA, DEISY JULIANA, AND DAYNED GÓMEZ CUERVO, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN AEROGENERADOR BASADO EN LA LEY DE LA INDUCCIÓN DE MICHAEL FARADAY.”, DISS. CORPORACIÓN UNIVERSITARIA MINUTO DE DIOS, COLOMBIA, (2017).
- [29] SÁNCHEZ, DANIEL NÉSTOR., “LA LEY DE INDUCCIÓN DE FARADAY. UNA PROPUESTA PARA LA ENSEÑANZA MEDIA TÉCNICA.”, (2001).
- [30] IMNC, NORMA MEXICANA, “VOCABULARIO INTERNACIONAL DE METROLOGÍA - CONCEPTOS FUNDAMENTALES Y GENERALES, TÉRMINOS ASOCIADOS (VIM).”, (2012).
- [31] “MINIANEMÓMETROS UT363/UT363BT”, [EN LINEA]. DISPONIBLE EN: [HTTPS://METERS.UNI-TREND.COM/PRODUCT/UT363-UT363BT/](https://meters.uni-trend.com/product/ut363-ut363bt/). [ACCEDIDO: 22/10/2022].
- [32] “MULTÍMETROS DE MANO DE LA SERIE UT33+”, [EN LINEA]. DISPONIBLE EN: [HTTPS://METERS.UNI-TREND.COM/PRODUCT/UT33PLUS-SERIES/](https://meters.uni-trend.com/product/ut33plus-series/). [ACCEDIDO: 22/10/2022].
- [33] “MINI TACÓMETRO UT373”, [EN LINEA]. DISPONIBLE EN: [HTTPS://METERS.UNI-TREND.COM/PRODUCT/UT33PLUS-SERIES/](https://meters.uni-trend.com/product/ut33plus-series/). [ACCEDIDO: 22/10/2022].
- [34] REMÍREZ, LUIS PABLO, “DISEÑO DE UN DINAMÓMETRO MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.”, TESIS DE INGENIERIA ELECTROMECANICA, UNIV. NACIONAL DE LA PALMA, LA PAMPA, ARGENTINA, (2011).
- [35] “DINAMOMETRO DE MUELLE MECANICO”, [EN LINEA]. DISPONIBLE EN: [HTTPS://WWW.DIRECTINDUSTRY.ES/PROD/KERN-SOHN/PRODUCT-16909-1372953.HTML](https://www.directindustry.es/prod/kern-sohn/product-16909-1372953.html). [ACCEDIDO: 25/11/2022].
- [36] VEGA, D., PEREIRA, B., VELILLA, W., PALENCIA, A., CARPINTERO, J., VILLA, J., ... & FABREGAS, J, “SIMULATION OF THE FLUIDDYNAMIC BEHAVIOR OF A SAVONIUS ROTOR USING AN AERODYNAMIC BLADE PROFILE”, *TECHNOL. REPORTS KANSAI UNIV*, 62,05, 2413-2420,(2020).
- [37] LIMÓN LEYVA, PABLO ALBERTO, ET AL. “ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE ESFUERZOS USANDO TELEMETRÍA.”, XIX CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM, TOLUCA, MÉXICO, 2013.
- [38] D. VEGA, B. PEREIRA, W. VELILLA, A. PALENCIA, J. CARPINTERO, AND J. VILLA, “SIMULATION OF THE FLUID-DYNAMIC BEHAVIOR OF A SAVONIUS ROTOR USING AN AERODYNAMIC BLADE PROFILE,” VOL. 62, NO. 05, 2020.
- [39] CHACÓN GIL, KAREN LORENA, "METODOLOGÍA PARA LA PREDICCIÓN DEL COEFICIENTE DE POTENCIA DE UNA TURBINA HIDROCINÉTICA TIPO SAVONIUS UTILIZANDO DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONALES", UNIVERSIDAD SANTO TOMAS, BOGOTA, COLOMBIA, 2019.
- [40] “ANSYS FLUENT: SAVONIUS TURBINE USING DYNAMIC MESH – CHANNEL: FLUENT SETUP” [EN LINEA]. DISPONIBLE EN: [HTTPS://WWW.YOUTUBE.COM/WATCH?V=Vca9CFUXSW4](https://www.youtube.com/watch?v=Vca9CFUXSW4). [ACCEDIDO: 21/02/2023].
- [41] “ANSYS INNOVAITION SPACE – LEARNING FORUM, CHECKS ON THE MESH” [EN LINEA]. DISPONIBLE EN: [HTTPS://FORUM.ANSYS.COM/FORUMS/TOPIC/CHECKS-ON-THE-MESH/](https://forum.ansys.com/forums/topic/checks-on-the-mesh/). [ACCEDIDO: 21/02/2023].
- [42] “ANSYS FLUENT: ANSYS FLUENT: POWER AND TORQUE CALCULATIONS ON A SIMPLE TURBINE – CHANNEL: FLUENT SETUP” [EN LINEA]. DISPONIBLE EN: [HTTPS://WWW.YOUTUBE.COM/WATCH?V=PTz4LJ2FUOE&t=1401s](https://www.youtube.com/watch?v=PTz4LJ2FUOE&t=1401s). [ACCEDIDO: 10/03/2023].
- [43] TORRES ESPINOSA, SEBASTIAN, “OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO DE LA TURBINA EÓLICA SAVONIUS.”, DISS. MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA, ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO, BOGOTA, COLOMBIA, 2021.