



**FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y
URBANISMO
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
MECÁNICA ELÉCTRICA**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA MICROTURBINA
HIDRÁULICA SAVONIUS TIPO VERTICAL PARA
CANAL HIDRÁULICO DE 80X25X15 CM**

**PARA OPTAR EL GRADO DE ACADÉMICO DE
BACHILLER EN INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA**

Autores:

Beltran Sanchez Flavio Joe

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8638-0379>

Lopez Bravo Yuen Keynes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2539-0581>

Asesor:

Mtro. Vives Garnique Juan Carlos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0988-9881>

Línea de Investigación

**Tecnología e innovación en el desarrollo de la construcción
y la industria en un contexto de sostenibilidad.**

Sublínea de Investigación

**Innovación y tecnificación en ciencia de los materiales, diseño en
infraestructura**

Pimentel – Perú

2024



DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Quienes suscribimos la DECLARACIÓN JURADA, somos egresado(s) del Programa de Estudios de **Ingeniería Mecánica Eléctrica**. De la Universidad Señor de Sipán S.A.C, declaramos bajo juramento que somos autores del trabajo titulado:

DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA MICROTURBINA HIDRÁULICA SAVONIUS TIPO VERTICAL PARA EL CANAL HIDRÁULICO DE 80X25X15 CM

El texto de mi trabajo de investigación responde y respeta lo indicado en el Código de Ética del Comité Institucional de Ética en Investigación de la Universidad Señor de Sipán (CIEI USS) conforme a los principios y lineamientos detallados en dicho documento, en relación a las citas y referencias bibliográficas, respetando al derecho de propiedad intelectual, por lo cual informo que la investigación cumple con ser inédito, original y auténtico.

En virtud de lo antes mencionado, firman:

Beltran Sanchez Flavio Joe	DNI: 74302451	
Lopez Bravo Yuen Keynes	DNI: 70548903	

Pimentel, 24 de setiembre de 2024.

Dedicatoria

Esta investigación está dedicada a mi madre que ha sabido formarme con buenos sentimientos, hábitos y valores lo cual me ha ayudado a seguir adelante en los momentos difíciles. A mi padre que desde el cielo me ilumina para seguir adelante con mis proyectos.

Flavio Joe Beltran Sanchez

Esta investigación está dedicada a mis padres que me brindaron todo y me inculcaron lo necesario para ser una persona de bien, especialmente a mi madre quien siempre estuvo ahí brindándome su apoyo incondicional cuando más lo necesitaba en el transcurso de mi vida, a todos mis familiares especialmente a mis hermanas que fueron parte fundamental en mi vida académica, apoyándome de diferentes maneras para poder lograr mis objetivos.

Yuen Keynes Lopez Bravo

Agradecimientos

Principal agradecimiento a Dios quién me ha guiado y me ha dado la fortaleza para seguir adelante. A mi familia por su comprensión y estímulo constante, además su apoyo incondicional a lo largo de mis estudios. Y a todas las personas que de una y otra forma me apoyaron en la realización de este trabajo.

Flavio Joe Beltran Sanchez

Agradezco especialmente a Dios por permitir cumplir uno de mis objetivos, en mi vida.

A mi familia por darme la fortaleza de no rendirme en los momentos difíciles, especialmente a mi madre la que me estuvo apoyándome en todo momento, esto no hubiera sido posible sin su ayuda.

A mi asesor y a mi casa de Estudios USS, especialmente a la escuela de ingeniería mecánica eléctrica, que cada día nos brindaron sus conocimientos y respaldo, para un óptimo crecimiento metodológico y profesional.

Yuen Keynes Lopez Bravo

Índice

Dedicatoria	3
Agradecimientos.....	4
Índice de figuras	6
Índice de tablas	8
Índice de ecuaciones.....	9
Resumen.....	10
Abstract.....	11
I. INTRODUCCIÓN	12
1.1. Realidad problemática.....	12
1.2. Formulación del problema	19
1.3. Hipótesis	19
1.4. Objetivos	20
1.5. Teorías relacionadas al tema	20
II. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	42
III. RESULTADOS	44
IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	98
4.1. Discusión	98
4.2. Conclusiones.....	99
V. REFERENCIAS	101
ANEXOS	104

Índice de figuras

Figura 1: Principio de funcionamiento de una turbina hidrocínética [12].	21
Figura 2: Clasificación de las turbinas hidrocínéticas [12].	22
Figura 3: Esquema de una turbina Savonius de dos destornilladores [13].	22
Figura 4: Perfil de la turbina Savonius [14].	23
Figura 5: Relación de aspecto [14].	24
Figura 6: Área barrida [14].	25
Figura 7: Vista superior de la Turbina Savonius [16].	27
Figura 8: Distribución de fuerzas de la Turbina Savonius [16].	28
Figura 9: Representación de grafica de la Tasa Interna de Retorno (TIR) [23].	39
Figura 10: Diagrama de costo – beneficio [25].	41
Figura 11: Parámetros del sistema.	44
Figura 12: Estructura de funciones.	45
Figura 13: Alternativa 1.	54
Figura 14: Alternativa 2.	55
Figura 15: Alternativa 3.	56
Figura 16: Alternativa 4.	57
Figura 17: Alternativa 5.	58
Figura 18: Alternativa 6.	59
Figura 19: Selección de alternativas.	61
Figura 20: Microturbina hidráulica Savonius.	65
Figura 21: Canal y base de la microturbina.	66
Figura 22: Diámetro de los platos.	66
Figura 23: Rotor.	67
Figura 24: Generador eléctrico DC.	68
Figura 25: Capsula de protección del generador eléctrico.	69
Figura 26: Configuración en Wizard SolidWorks.	71

Figura 27: Presión en el rotor de la microturbina hidráulica Savonius.	72
Figura 28: Presión en el rotor de la microturbina hidráulica Savonius.	73
Figura 29: Velocidad en el rotor de la microturbina hidráulica Savonius.....	74
Figura 30: Presión [Pa] Vs Velocidad [m/s].	78
Figura 31: Comportamiento de la velocidad de arrastre del fluido en el rotor Savonius.....	79
Figura 32: Comportamiento de la velocidad de sustentación del fluido en el rotor Savonius.	79
Figura 33: Fuerza de arrastre Vs Velocidad [m/s].	80
Figura 34: Fuerza de sustentación Vs Velocidad [m/s].....	81
Figura 35: Torque Vs Velocidad [m/s].	82
Figura 36: Esfuerzo.....	83
Figura 37: Torque en el rotor de la microturbina Savonius.	85
Figura 38: Esfuerzo de Flexión.	86
Figura 39: Esfuerzo de torsión.	88
Figura 40: Deformación angular.....	89
Figura 41: Propiedades físicas del material PLA en el rotor Savonius.....	91
Figura 42: Creación y aplicación del material PLA en SolidWorks.....	93
Figura 43: Configuración de fuerza de arrastre en el rotor.	94
Figura 44: Análisis estático tensión nodal.	95
Figura 45: Análisis estático, desplazamiento.....	96
Figura 46: Análisis estático, deformación unitaria.	97

Índice de tablas

Tabla 1: Tabla Exigencias.....	47
Tabla 2: Tabla de Deseos	48
Tabla 3: Matriz morfológica.....	50
Tabla 4: Parámetros de diseño.....	61
Tabla 5: Resultados SolidWorks.....	74
Tabla 6: Torque resultado de SolidWorks.....	84

Índice de ecuaciones

Ecuación (1): Relación de superposición	24
Ecuación (2): Relación de aspecto del rotor	24
Ecuación (3): Área barrida del rotor de la turbina	25
Ecuación (4): Área frontal	26
Ecuación (5): Dimensionamiento de los platos	27
Ecuación (6): Fuerza de arrastre	28
Ecuación (7): Coeficiente de arrastre	28
Ecuación (8): Fuerza de sustentación	29
Ecuación (9): Coeficiente de sustentación	30
Ecuación (10): Potencia	30
Ecuación (11): Coeficiente de potencia	31
Ecuación (12): Coeficiente de potencia máximo	31
Ecuación (13): Eficiencia de la turbina	32
Ecuación (14): Esfuerzo axial	33
Ecuación (15): Esfuerzo cortante	33
Ecuación (16): Momento de inercia	34
Ecuación (17): Esfuerzo de flexión	34
Ecuación (18): Esfuerzo de torsión	35
Ecuación (19): Torque	36
Ecuación (20): Deformación angular	36
Ecuación (21): Pandeo	37
Ecuación (22): Momento de inercia en el rotor	38
Ecuación (23): Valor actual neto	38
Ecuación (24): Tasa interno de retorno	39
Ecuación (25): Flujo de caja	40
Ecuación (26): Valor de costo beneficio	41

Resumen

El objetivo general del presente trabajo de investigación es diseñar una microturbina hidráulica Savonius tipo vertical, validando diversos diseños mediante una matriz de decisión basada en parámetros críticos, asegurando una construcción robusta. Se utilizaron cálculos precisos y modelado 3D en software CAD para diseñar una microturbina con un rotor de 0.06 m de diámetro y 0.115 m de altura, y simulado dentro de un canal de 80x25x15 cm que dirige eficientemente el flujo de agua. Se realizó una simulación CFD con una velocidad del fluido de 1.5 m/s, evaluando la distribución de presión y velocidad alrededor del rotor. Los resultados mostraron un coeficiente de arrastre de 0.70, un coeficiente de sustentación de 0.469 y un coeficiente de potencia teórica de 0.369, resultando en una potencia mecánica de 1.26 W. Los análisis estructurales con PLA revelaron que el diseño soporta las condiciones de carga operativa, con un esfuerzo axial de 4581.15 Pa y un esfuerzo de flexión alto de 4.66×10^{11} Pa. La fuerza de arrastre fue de 11.296 N y el análisis estático mostró una tensión máxima de 2.970×10^7 Pa. En conclusión, el diseño integral de la microturbina Savonius no solo cumple con los requisitos teóricos y preliminares, sino que también representa un avance significativo en la implementación de soluciones de energía renovable a pequeña escala.

Palabras Clave: Microturbina, Hidráulica, Software, Renovable, Simulación.

Abstract

The general objective of this research work is to design a vertical Savonius hydraulic microturbine, validating various designs through a decision matrix based on critical parameters, ensuring a robust construction. Precise calculations and 3D modeling in CAD software were used to design a microturbine with a rotor 0.06 m in diameter and 0.115 m in height, and simulated within an 80x25x15 cm channel that efficiently directs the water flow. A CFD simulation was performed with a fluid velocity of 1.5 m/s, evaluating the pressure and velocity distribution around the rotor. The results showed a drag coefficient of 0.70, a lift coefficient of 0.469 and a theoretical power coefficient of 0.369, resulting in a mechanical power of 1.26 W. Structural analyzes with PLA revealed that the design supports the operational loading conditions, with an axial stress of 4581.15 Pa and a high bending stress of 4.66×10^{11} Pa. The drag force was 11,296 N and the static analysis showed a maximum stress of $2,970 \times 10^7$ Pa. In conclusion, the integral design of the Savonius microturbine not only meets the theoretical and preliminary requirements, but also represents a significant advance in the implementation of small-scale renewable energy solutions.

Keywords: Microturbine, Hydraulics, Software, Renewable, Simulation.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática.

Cuando se busca explorar alternativas en el campo de las energías renovables, surge una nueva perspectiva en la forma de aprovechar la energía cinética que se encuentra disponible en pequeños ríos o canales artificialmente construidos. Este potencial se puede desbloquear mediante la implementación de turbinas hidrocínicas. En este contexto, la turbina Savonius se destaca como una opción idónea, gracias a su diseño de eje vertical y rotor de arrastre, especialmente eficaz en entornos donde la velocidad del flujo de agua es relativamente baja.

Al buscar alternativas en el campo de las energías renovables, la energía cinética está disponible en pequeños ríos o canales construidos artificialmente representa una nueva oportunidad que puede ser aprovechada a través de la utilización de turbinas hidrocínicas. Entre estas, la turbina Savonius, con su diseño de eje vertical y rotor de arrastre, se muestra como una elección adecuada para situaciones en las que la velocidad del flujo de agua es relativamente baja. [1].

[1] Kumar & Saini, en su trabajo de investigación fue mejorar la eficiencia de la turbina hidrocínica Savonius con palas torcidas mediante análisis CFD. Para llevar a cabo su análisis, realizaron simulaciones de la turbina hidrocínica Savonius con dos palas. Consideraron diferentes velocidades del flujo de agua en el rango de 0,5 m/s a 2 m/s y relaciones de velocidad punta (TSR) entre 0,5 y 1,0. Los resultados mostraron con un ángulo de torsión de 12,5° alcanzó un coeficiente de potencia máximo de 0,39 para un TSR de 0,9 a una velocidad de agua de 2 m/s.

La pandemia de Covid-19 provocó una caída en la producción eléctrica mundial. Pese a ello, la generación basada en energías renovables aumentó, en algunos países en

más del 45%. En concreto, la energía hidroeléctrica demostró confiabilidad, resiliencia y flexibilidad a nivel época de crisis mundial. [2].

Según la Internacional Agencia de Energías Renovables (IRENA) 2020, este valor deberá crecer alrededor del 60% para 2050 para ayudar a limitar el aumento de la temperatura global. Además, dicho crecimiento ayudaría a generar alrededor de 600.000 empleos cualificados durante los próximos 10 años. [2].

[2] Gharib, Fernández & Blanco, realizaron un trabajo de diseño y evaluación a una microturbina hidrocínética de eje vertical. La fabricación del modelo se benefició del continuo desarrollo de la tecnología de fabricación aditiva, lo que permitió una precisión en la construcción a un costo significativamente más bajo en comparación con las tecnologías de mecanizado tradicionales. Llevaron a cabo experimentos utilizando tres caudales diferentes y un rango de velocidades de entrada que varió de 0,3 a 0,7 m/s. Además, compararon la teoría del disco actuador ajustada para flujo en canal abierto y se encontró que concordaba con los resultados experimentales. Esta teoría la eficiencia de la turbina superó el 70% a partir de una velocidad de 0,45 m/s y llegó hasta el 81%.

Los cambios rápidos en la cultura humana siempre van seguidos de un aumento en el consumo de energía. Sin embargo, cuando este aumento del consumo no va acompañado de un aumento relativo de los recursos naturales, el peor resultado es la crisis energética. Se han realizado diversos esfuerzos para inventar fuentes de energía renovables, uno de ellos es el aprovechamiento de la energía hidráulica en los canales de residuos de edificios de varias plantas. [3].

[3] Hadi, Khuluqi y Frakhan, propusieron la utilización de una turbina Savonius como generador eléctrico especialmente diseñado para funcionar eficazmente a bajas velocidades de viento y en lugares con restricciones de altura. El enfoque específico de este estudio fue investigar cómo la relación de superposición de las palas, en una turbina

hidráulica de eje horizontal Savonius montada en una tubería de 3 pulgadas de diámetro y a una altura máxima de 2 metros, afecta el coeficiente de potencia y la relación de velocidad de punta. El rendimiento más óptimo se produjo en la descarga de 11,9 l/s con variación de superposición, mientras que el 0,3 tuvo el rendimiento más óptimo con una potencia de salida de 30,58 Watts, TSR de 0,79 y coeficiente de potencia de 0,19.

La energía renovable promete una solución a la dependencia humana de los combustibles fósiles, la energía hidráulica es una de las fuentes de energía limpia y respetuosa con el medio ambiente porque no produce contaminación ni residuos. La turbina Savonius es un tipo de turbina de arrastre de construcción sencilla y fácil en su fabricación, pero de baja eficiencia. Hasta la fecha, este ha sido un problema importante con esta turbina en particular, lo que llevó a varios esfuerzos para mejorar su eficiencia. [4].

[4] Hadi, Sidiq & Hadiani, realizaron su estudio del efecto de los ángulos de torsión en un rotor Savonius de eje horizontal en la generación de energía eléctrica. El rotor constó de dos palas y placas terminales. Se realizaron experimentos con ángulos de torsión de 0°, 12.5°, 30°, 45° y 60°. Los resultados experimentales revelaron que las palas Savonius con torsión superaron en términos de coeficiente de rendimiento (C_p) al rotor sin torsión ($\alpha=0^\circ$) en un rango de descarga de $2,95 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ a $8,16 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$. Sin embargo, a una descarga mayor de $11,9 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, el rendimiento de las palas torcidas fue inferior al del rotor sin torsión. En resumen, los rotores Savonius con torsión demostraron ser más eficientes en términos de C_p cuando la descarga era igual o menor a $8,16 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$. Sin embargo, se observó una disminución en el rendimiento de las palas torcidas en comparación con las palas sin torsión a mayores niveles de descarga.

Las turbinas Savonius son adecuadas para su uso en ríos con velocidades bajas debido a su diseño sencillo y su capacidad de inicio automático. A pesar de estas ventajas,

su adopción práctica es limitada debido a su eficiencia energética relativamente baja. Sin embargo, es importante destacar que la investigación experimental en este campo es limitada, ya que la mayoría de los estudios se centran en evaluar el rendimiento energético y no prestan suficiente atención al impacto de los materiales expuestos al viento o al entorno acuático. [5].

[5] Shamsuddin, Kamaruddin & Mohamed, investigaron la influencia de los materiales en el rendimiento de las turbinas Savonius en condiciones de viento y agua, centrándose particularmente en el efecto de su momento de inercia de masa (I). Se utilizaron aluminio (ALU) y ácido poliláctico (PLA) como materiales para las turbinas, ya que son los materiales comunes en su fabricación. Se llevaron a cabo pruebas experimentales en un túnel de viento y un canal de agua con números de Reynolds que variaron entre 52,000 y 83,600. Los resultados mostraron que el ALU y el PLA, a pesar de tener el mismo momento de inercia de masa, tenían coeficientes de potencia máximos del 11% y el 18% en viento y agua, respectivamente.

Las ventajas de las turbinas verticales son el bajo nivel de ruido y la facilidad de uso mantenimiento y operación debido a su proximidad a la superficie de la tierra. Para el desarrollo de la eficiencia de la turbina Savonius pensó en el efecto de los parámetros geométricos, en el aumento del coeficiente de potencia y coeficiente de par, lo más importante de estos parámetros geométricos es la relación de superposición que tiene el papel distintivo en el rendimiento del rotor. [6].

[6] Salleh, Abdulridha & Salih, estudiaron la mejora de la eficiencia del rendimiento de la turbina Savonius, centrándose en la geometría de la forma de las palas. En primer lugar, se realizaron pruebas numéricas utilizando simulaciones 2D inestables (CFD Fluent) y se probaron diferentes modelos de turbulencia. Luego, se desarrolló un nuevo diseño de pala con una superficie interna ondulada para aumentar su área superficial. Este nuevo

diseño de pala se evaluó experimentalmente en un túnel de viento con velocidades de viento de 6 m/s y 9 m/s. Los resultados mostraron que el coeficiente de potencia máximo alcanzado fue de 0,296 con una relación de velocidad punta de 0,72.

Rumanía posee un gran potencial en energías renovables, incluyendo eólica, solar, hidroeléctrica y biomasa. Sin embargo, a pesar de las inversiones en el sector energético, el desarrollo de la energía hidroeléctrica ha sido más lento en comparación con otras fuentes. Aunque el país tiene un potencial hidroeléctrico significativo, las macrocentrales hidroeléctricas han generado preocupaciones ambientales debido a la construcción de presas y la inundación de grandes áreas de tierras de cultivo. Para abordar este problema, están investigando el desarrollo de pequeñas centrales hidroeléctricas que aprovechan la energía cinética de las corrientes de agua de manera más eficiente. [7].

[7] Este documento presenta el desarrollo, funcionamiento y pruebas de un soporte modular pequeña escala, cuyos principales módulos están fabricados en plástico y están destinados a pruebas en palas y rotores en la estructura de modelos experimentales de turbinas hidráulicas. A través de las formas, la calidad de las superficies interiores y la calidad de los plásticos utilizados, el túnel de agua permite crear en su sección transparente una circulación forzada, permanente y continua de agua, con velocidad ajustable en el rango de 0.05 a 1.1 m/s. Los resultados de las pruebas realizadas en un modelo experimental de turbina hidráulica utilizando este soporte demuestran las ventajas económicas y técnicas de utilizar plásticos en la construcción de este tipo de herramientas de prueba.

La reducción de las fuentes de energía basadas en combustibles fósiles está motivando a las personas a realizar la transición hacia fuentes de energía renovable, ya que la energía desempeña un papel fundamental en la vida cotidiana. En contexto, se está llevando a cabo un esfuerzo significativo para aprovechar los recursos hídricos como una

forma de energía renovable, y esto se refleja en el desarrollo de la turbina hidráulica Savonius. La turbina hidráulica Savonius, en su forma convencional, se caracteriza por su construcción sencilla y su amplia gama de aplicaciones. [8].

[7] Este documento presenta el desarrollo, funcionamiento y pruebas de un soporte modular pequeña escala, cuyos principales módulos están fabricados en plástico y están destinados a pruebas en palas y rotores en la estructura de modelos experimentales de turbinas hidráulicas. A través de las formas, la calidad de las superficies interiores y la calidad de los plásticos utilizados, el túnel de agua permite crear en su sección transparente una circulación forzada, permanente y continua de agua, con velocidad ajustable en el rango de 0.05 a 1.1 m/s. Los resultados de las pruebas realizadas en un modelo experimental de turbina hidráulica utilizando este soporte demuestran las ventajas económicas y técnicas de utilizar plásticos en la construcción de este tipo de herramientas de prueba.

En Japón, se prevé un incremento continuo en la proporción de energía producida a partir de instalaciones hidroeléctricas, como resultado de las modificaciones en las políticas gubernamentales que respaldan la generación de energía renovable. La generación de energía distribuida tiene el potencial de contribuir a la seguridad y estabilidad del suministro eléctrico en situaciones de desastres naturales. [9].

[9] Uchiyama, Honda & Degawa, estudiaron una turbina microhidráulica. La relación del diámetro hueco. D_2 al diámetro exterior del corredor D_1 , D_2/D_1 , se define como la relación de huecos ε η disminuye al aumentar ε en la condición sin fibras. Los experimentos de laboratorio se llevan a cabo introduciendo fibras de poliéster en el flujo de agua como materia extraña. La eficiencia de la turbina es 0,25. Los bordes de ataque de la pala cerca del eje central están redondeados con radio R . Cuando $R/D_1 = 0,1875$, la disminución de η debida a las fibras es extremadamente pequeña. Los bordes de ataque

redondeados evitan con éxito que el corredor atrape las fibras, lo que demuestra que aumentan efectivamente el rendimiento del paso de materias extrañas a través del corredor.

Uno de los principales desafíos al planificar proyectos de electrificación e interconexión en Zonas No Interconectadas (ZNI) es la dificultad financiera debido a la falta de economías de escala. En este contexto, el Plan Energético Nacional de Colombia, conocido como Ideario Energético 2050, plantea una solución: permitir que los usuarios se abastezcan por sí mismos mediante la instalación de equipos de pequeño tamaño, lo que abre la puerta a la generación distribuida. Esto implica la generación y distribución de energía en una escala reducida, cerca de los puntos de consumo final. [10].

En Perú las zonas rurales, que son donde reside la mayoría de la población en los países en desarrollo, la densidad de población es baja y el consumo de energía es relativamente pequeño. Debido a esta baja demanda y la dispersión geográfica de estas áreas, proveer electricidad desde centros de generación distantes no resulta económicamente viable. Como resultado de esta situación desfavorable, muchas personas en las áreas rurales no pueden acceder a los beneficios que la energía eléctrica proporciona en términos de calidad de vida y oportunidades. [11].

[11] Ventura Falla, diseño una turbina hidrocínética sumergible para generar energía eléctrica en el Caserío Pampa Bernilla, Distrito de Salas, región Lambayeque. Para lograr su objetivo, establecieron procedimientos para la selección de los álabes de la turbina, se implementó un sistema de control y supervisión de variables del proceso, y se creó un diagrama de instrumentación. Estos diseños se llevaron a cabo utilizando software como SolidWorks, AutoCAD y RedCAD. Además, se diseñó un sistema de generación eléctrica que es capaz de satisfacer tanto la demanda actual como la proyectada para los próximos 20 años (6.27KW). Se concluyó que la capacidad de generación eléctrica es

factible, con un período de recuperación de la inversión estimado en 7 años.

El presente proyecto se justifica tecnológicamente por la necesidad de crear soluciones económicas y eficaces para generar energía eléctrica a partir de fuentes de baja velocidad de agua, utilizando microturbinas hidráulicas Savonius tipo vertical. Económicamente, busca reducir costos en la generación de energía, democratizando el acceso a energías renovables y beneficiando a comunidades rurales y áreas remotas. Ambientalmente, contribuye a reducir emisiones de gases de efecto invernadero y minimiza el impacto ambiental, promoviendo una generación de energía sostenible. Esta investigación contribuirá al desarrollo de tecnologías limpias, fomentando la transición hacia fuentes de energía renovables, y apoyará el acceso a energía en áreas donde la red eléctrica es poco confiable o inexistente.

1.2. Formulación del problema

¿Cómo diseñar la microturbina hidráulica Savonius tipo vertical para un canal hidráulico de 80x25x15 cm para generar energía eléctrica de manera eficiente?

1.3. Hipótesis

El diseño de una microturbina hidráulica Savonius tipo vertical para generar energía eléctrica de manera eficiente, superando los desafíos previamente identificados en la formulación del problema. Se espera que este enfoque tecnológico innovador y sostenible va desarrollar un rendimiento óptimo al aprovechar fuentes hidráulicas de baja velocidad, lo que contribuirá a la viabilidad de la generación de energía eléctrica en áreas aisladas, impulsando así la transición hacia una matriz energética más limpia y renovable.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Diseñar una microturbina hidráulica Savonius tipo vertical para canal hidráulico de 80x25x15 cm.

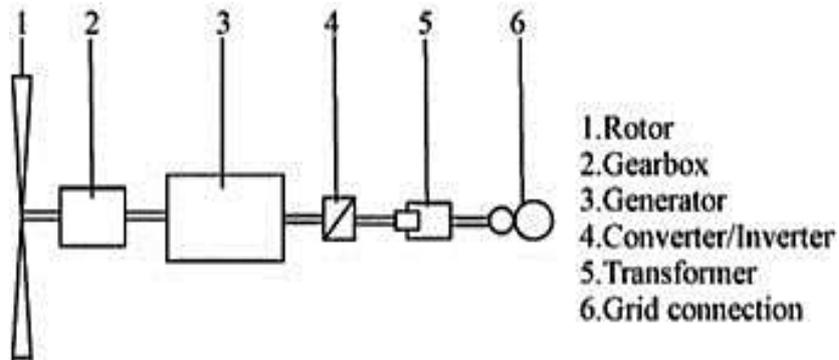
1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar los parámetros de fluidos geométricos de la turbina Savonius.
- Diseño conceptual de la microturbina hidráulica tipo Savonius usando el software CAD.
- Simular el comportamiento estructural de fluido de la turbina hidráulica Savonius.

1.5. Teorías relacionadas al tema

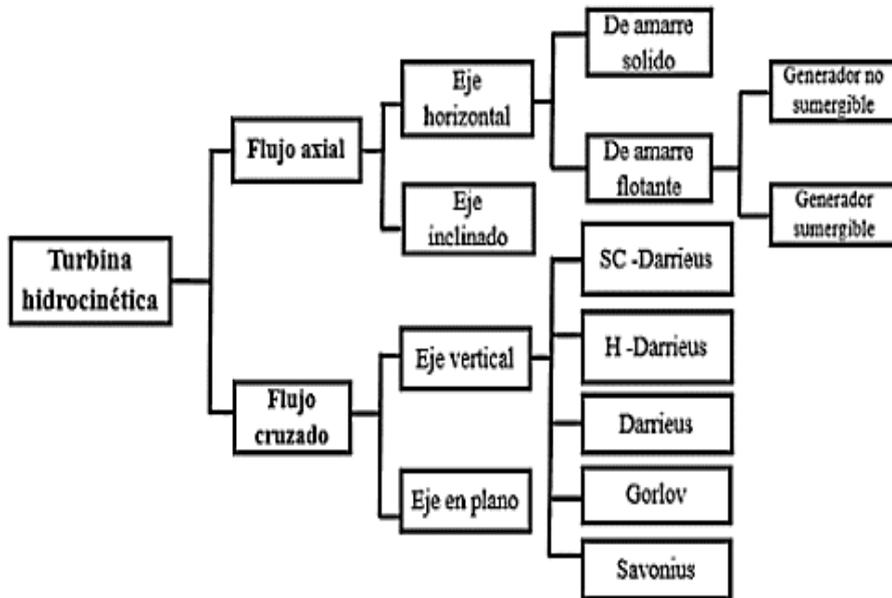
Las turbinas hidrocinéticas representan una alternativa viable para la producción de energía eléctrica en pequeña escala en comparación con las turbinas hidroeléctricas tradicionales. A diferencia de centrales hidroeléctricas, que aprovechan la energía potencial del agua, las turbinas hidrocinéticas obtienen energía de la corriente de agua en movimiento para generar potencia. El funcionamiento básico de una turbina hidrocinética se ilustra en la Figura 1, donde las palas transforman la energía cinética del agua en energía rotativa en el eje del rotor, y luego el generador convierte esta energía rotativa en electricidad. [12].

Figura 1: Principio de funcionamiento de una turbina hidrocínética [12].



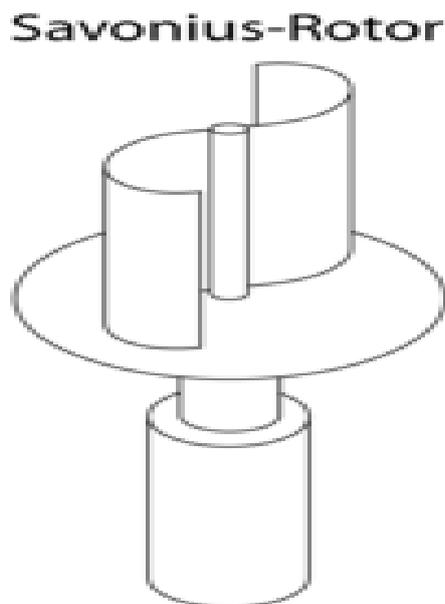
Para alcanzar un rendimiento óptimo en una turbina hidrocínética, la selección de la configuración del rotor de la turbina desempeña un papel fundamental. La literatura existente hace referencia a diversas categorías de turbinas que se rigen por el mismo principio que los aerogeneradores utilizados en la generación eólica. Estas turbinas se dividen principalmente en dos categorías según la orientación del eje del rotor en relación con la dirección del flujo, como se muestra en el diagrama de la Figura 2. Las turbinas de flujo axial, que se caracterizan por su alta eficiencia, se emplean en la captación de energía en entornos oceánicos. Por otro lado, las turbinas de eje vertical se utilizan para extraer energía de ríos y representan una solución óptima para la electrificación en áreas remotas. [12].

Figura 2: Clasificación de las turbinas hidrocinéticas [12].



Los rotores Savonius son un diseño de turbina eólica de eje vertical empleados para transformar la energía cinética del viento en un par motor que impulsa un eje en movimiento rotativo. Estos dispositivos fueron creados por el ingeniero finlandés Sigurd J. Savonius en 1922. [13].

Figura 3: Esquema de una turbina Savonius de dos destornilladores [13].

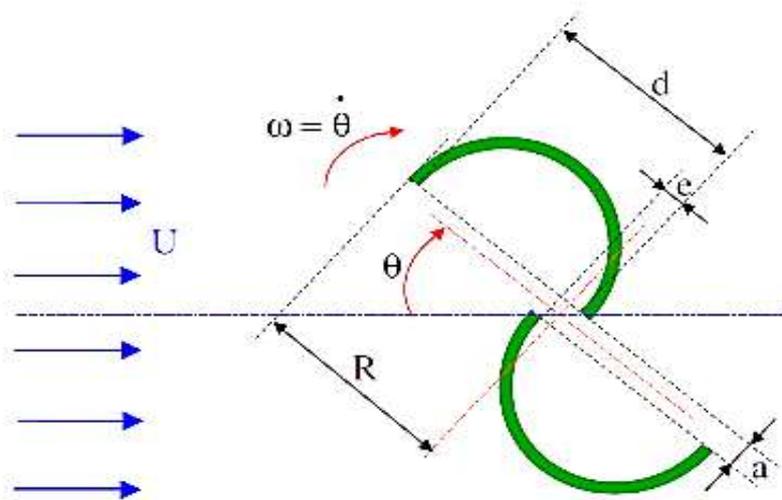


Las turbinas Savonius se cuentan entre las más simples en su diseño. Desde una perspectiva aerodinámica, funcionan como dispositivos de arrastre o resistencia, y generalmente constan de dos o tres palas. Cuando se observa el rotor desde arriba, las palas tienen una forma que se asemeja a la letra "S". Esta configuración curvada permite que las palas experimenten menos resistencia cuando se mueven en contra del viento en comparación con cuando lo hacen a favor del viento. [13].

1.5.1. Relación de aspecto del rotor

El perfil de las aspas se va a diseñar de manera semicircular, siguiendo la forma clásica de las palas de rotor Savonius. La figura 4 ilustra las propiedades distintivas del perfil de la pala. [14].

Figura 4: Perfil de la turbina Savonius [14].



La relación de superposición es un número sin unidades que establece una conexión entre la distancia perpendicular desde la cruz hasta el centro de rotación y la longitud de la cuerda, de la siguiente manera:

Ecuación (1)

$$R_s = \frac{e}{D}$$

Donde:

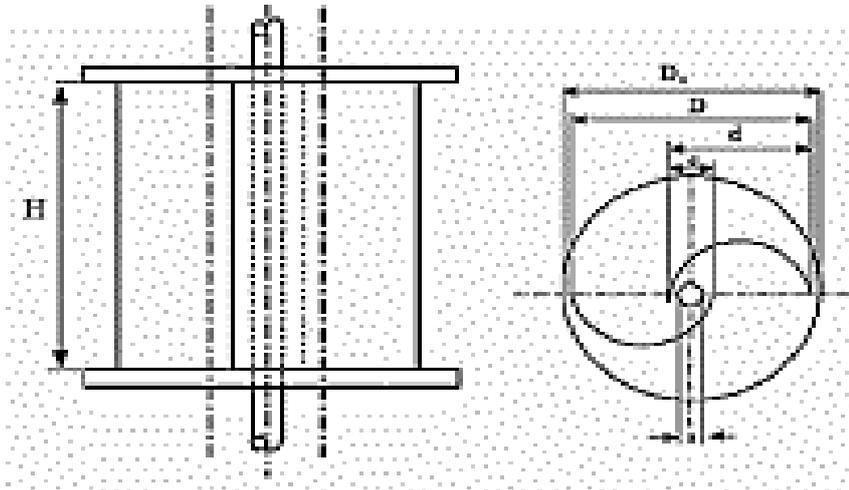
R_s : Relación de superposición, [Adimensional].

e : Distancia entre las puntas internas de las palas que se superponen, [m].

D : Diámetro del rotor de la turbina, [m].

La relación de aspecto está relacionada con la altura del rotor, H , y el diámetro del círculo resultante al girar las puntas de las palas, conocido como el diámetro del rotor, D [14]. En la figura 5 se presentan los parámetros geométricos del rotor que ilustran la relación de aspecto de manera visual.

Figura 5: Relación de aspecto [14].



$$\alpha_{RA} = \frac{H}{D}$$

Ecuación (2)

Donde:

α_{RA} : Relación de aspecto del rotor, [Adimensional].

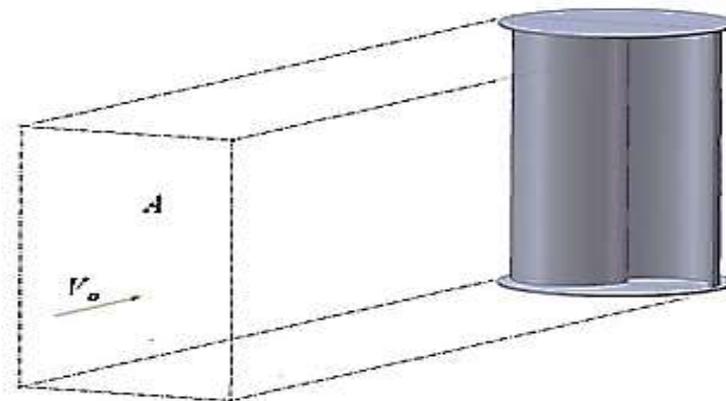
H : Altura de la turbina, [m].

D : Diámetro del rotor de la turbina, [m].

1.5.2. Área barrida

El área de barrido del rotor se refiere a la sección transversal que es perpendicular a la dirección del flujo del agua, en el caso de un rotor Savonius, esta área se calcula de la siguiente manera [15].

Figura 6: Área barrida [14].



$$A = D \times H$$

Ecuación (3)

Donde:

A : Área barrida del rotor de la turbina, [m²].

D : Diámetro del rotor, [m].

H : Altura del rotor, [m].

1.5.3. Área frontal

La dimensión del área frontal es otro elemento clave a considerar en el diseño, ya que a medida que esta área se amplía, la capacidad de recolección de energía de la turbina aumenta. El cálculo del área frontal se realiza de la siguiente manera:

$$A_F = 2R \times H \quad \text{Ecuación (4)}$$

Donde:

A_F : Área barrida del rotor de la turbina, [m²].

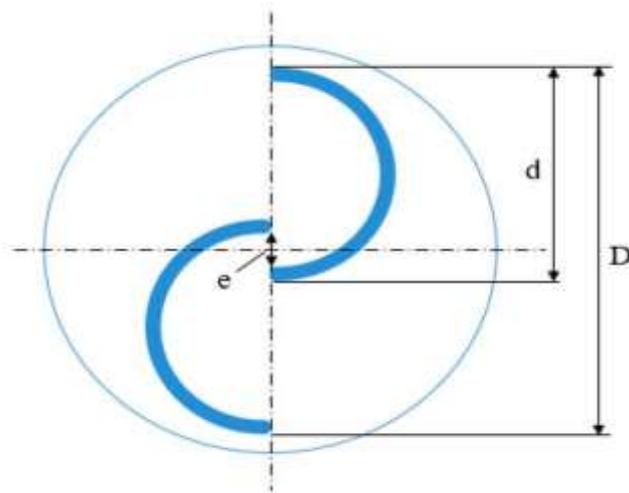
R : Radio del rotor, [m].

H : Altura del rotor, [m].

1.5.4. Dimensionamiento de los platos

El diseño de los platos del rotor se lleva a cabo, siguiendo ciertos criterios, que indican que el espesor de los platos debe ser sustancialmente menor que la altura del rotor. Además, se sugiere utilizar un valor aproximadamente 1.1 veces el diámetro del rotor para calcular el diámetro de dichos platos finales [14]. De esta manera, se obtiene la ecuación para determinar el tamaño de las placas finales, que se expone de la siguiente manera:

Figura 7: Vista superior de la Turbina Savonius [16].



$$D_p = 1.1 \times D$$

Ecuación (5)

Donde:

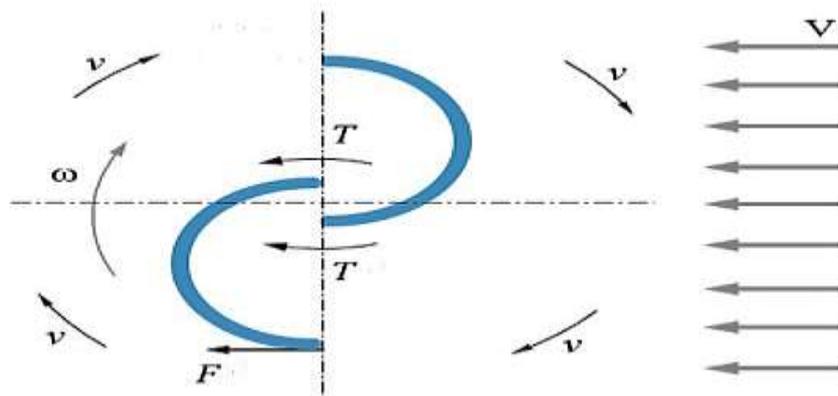
D_p : Diámetro del plato, [m].

D : Diámetro del rotor, [m].

1.5.5. Fuerza de arrastre / coeficiente de arrastre

La Figura 8 ilustra las fuerzas del fluido y los vectores de velocidad en las palas de la Turbina Savonius. Cuando la velocidad del fluido es “ V ” y la velocidad de la pala de la turbina es “ v ”, los parámetros de potencia y eficiencia de la turbina Savonius se derivan de las fuerzas generadas en la pala [16].

Figura 8: Distribución de fuerzas de la Turbina Savonius [16].



$$F = \frac{1}{2} C_d \rho A V^2$$

Ecuación (6)

Donde:

F : Fuerza de arrastre, [N].

C_d : Coeficiente arrastre, [Adimensional].

ρ : Densidad del agua, [kg/m³].

A : Área barrida del rotor de la turbina, [m²].

V : Velocidad del fluido, [m/s].

El coeficiente de arrastre en una turbina Savonius se refiere a la resistencia experimentada por las palas de la turbina al moverse en contra del fluido. Las turbinas Savonius son dispositivos de arrastre, lo que significa que extraen energía del agua principalmente a través de la resistencia que generan las palas al moverse.

$$C_d = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho A V^2}$$

Ecuación (7)

Donde:

C_d : Coeficiente arrastre, [Adimensional].

F : Fuerza de arrastre, [N].

ρ : Densidad del agua, [kg/m³].

A : Área barrida del rotor de la turbina, [m²].

V : Velocidad en la punta del álabe, [m/s].

1.5.6. Fuerza de sustentación y coeficiente de sustentación

Definida como la fuerza que impulsa al álabe a girar a una velocidad tangencial. Esta fuerza es perpendicular al flujo del agua que entra en el sistema (velocidad relativa del agua) [17].

$$F_L = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_L \quad \text{Ecuación (8)}$$

Donde:

F_L : Fuerza de sustentación, [N].

ρ : Densidad del fluido, [Kg/m³].

V : Velocidad del fluido, [m/s].

A : Área de barrido, [m²].

C_L : Coeficiente de sustentación.

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \quad \text{Ecuación (9)}$$

1.5.7. Potencia

La energía transferida por el fluido al rotor depende de la densidad del agua, el área barrida del rotor y la velocidad del agua, puede entenderse como un conjunto de partículas en movimiento, que desarrolla un flujo de energía (flujo de agua a través de la turbina) o energía (potencia disponible en el agua) fluye a través del área A [16], la fórmula básica para el cálculo de la potencia de una turbina Savonius es:

$$P = \frac{1}{2} \rho A C_p V^3 \quad \text{Ecuación (10)}$$

Donde:

P : Potencia, [W].

ρ : Densidad del agua, [kg/m³].

A : Área barrida del rotor de la turbina, [m²].

V : Velocidad del fluido, [m/s].

1.5.8. Coeficiente de potencia

El rendimiento de un rotor Savonius se evalúa mediante el coeficiente de potencia C_p , el cual está influenciado por el número de etapas del rotor. Se ha notado que cuando el rotor Savonius tiene dos etapas, alcanza su C_p máximo, pero a partir de tres etapas, el C_p disminuye debido al aumento de la inercia. [15].

El coeficiente de potencia representa la eficiencia de la turbina en la extracción de energía del fluido. Este coeficiente toma el valor más alto posible entre la velocidad de

arranque y la nominal a partir del cual desciende para velocidades entre la nominal y la de corte. El valor de C_p se encuentra acotado por el máximo teórico establecido por la Teoría de Betz $16/27=0,59$.

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho AV^3} \quad \text{Ecuación (11)}$$

Donde:

C_p : Coeficiente de potencia, [Adimensional].

P : Potencia, [W].

ρ : Densidad del agua, [kg/m³].

A : Área barrida del rotor de la turbina, [m²].

v : Velocidad del fluido, [m/s].

El coeficiente de potencia máximo (C_{pmax}) en una turbina hidrocínética se aplica frecuentemente en el contexto de turbinas hidrocínéticas, tales como las turbinas de corriente de agua o las turbinas mareomotrices [17].

$$C_{pmax} = 0.593 \left[\frac{\lambda N^{0.67}}{1.48 + (N^{0.67} - 0.04)\lambda + 0.0025\lambda^2} - \frac{1.92\lambda^2 N CD}{1 + 2\lambda N CL} \right] \quad \text{Ecuación (12)}$$

Donde:

C_{pmax} : Coeficiente de potencia máximo, que representa la máxima eficiencia alcanzable por la turbina hidrocínética.

λ : Relación de velocidad de punta de las palas de la turbina con respecto a la velocidad del flujo de agua incidente (relación de velocidad), [m/s].

N : Numero de álabes.

CD : Coeficiente de arrastre (drag coefficient).

CL : Coeficiente de sustentación (lift coefficient).

1.5.9. Eficiencia de la turbina

La eficiencia total de la turbina se puede determinar de la siguiente manera:

$$\mu = (1 - K_w) \times (1 - K_{metro}) \times (1 - K_{mi}) \times (1 - K_{mi,t}) \times (1 - K_t) \times C_p \quad \text{Ecuación (13)}$$

Donde:

μ : Eficiencia real de la turbina, [%].

K_w : Pérdidas por estela debidas al área, normalmente entre el 3% y el 10%.

K_{metro} : Pérdidas mecánicas de las palas y de la caja de cambios, normalmente del 0 % al 0,3 %.

K_{mi} : Pérdidas eléctricas de la turbina, normalmente entre el 1 % y el 1,5 %.

$K_{mi,t}$: Pérdidas eléctricas, normalmente entre el 3 % y el 10 %.

K_t : Porcentaje de tiempo fuera de servicio debido a fallas o mantenimiento, típicamente entre 2% y 3%.

C_p : Rendimiento de la turbina (debe ser inferior al límite de Betz (59,3%) y suele estar entre el 30 y el 40%).

1.5.10. Esfuerzo axial

[18] El esfuerzo es un indicador de la intensidad con la que una fuerza actúa sobre un objeto. Es una propiedad de las fuerzas internas de un material. La fórmula que nos permite calcular el esfuerzo promedio que un material puede soportar para resistir una fuerza externa es:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Ecuación (14)}$$

Donde:

σ : Esfuerzo axial, [Pa o N/m²].

F : Fuerza, [N].

A : Área transversal del material, [m²].

1.5.11. Esfuerzo cortante

El esfuerzo cortante es la fuerza paralela a la sección tiende a "rebanar" la barra por esa sección. En el caso del esfuerzo cortante en estructuras, el signo de la fuerza es irrelevante, ya que no cambia el efecto mecánico en la barra, siempre y cuando su sección sea simétrica. Sin embargo, si la sección es asimétrica, el signo del cortante sí altera el comportamiento mecánico de la barra [18].

$$\tau = \frac{F}{A} \quad \text{Ecuación (15)}$$

Donde:

τ : Esfuerzo cortante, [Pa o N/m²].

F : Fuerza, [N].

A : Área transversal del material, [m²].

1.5.12. Momento de inercia

El momento de inercia es una medida de cómo se distribuye la masa de un cuerpo o sistema de partículas en rotación alrededor de un eje. Este parámetro depende únicamente de la geometría del cuerpo y de la ubicación del eje de rotación, pero no se ve afectado por las fuerzas que intervienen en el movimiento [18].

$$I = \frac{\pi \times d^4}{64} \quad \text{Ecuación (16)}$$

Donde:

I : Momento de inercia, [m⁴].

d : Diámetro del eje, [m].

1.5.13. Esfuerzo de flexión

El esfuerzo de flexión es una medida del esfuerzo interno que se produce en un material cuando está sometido a una carga de flexión [19]. Se calcula mediante la fórmula:

$$\sigma_b = \frac{M \times y}{I} \quad \text{Ecuación (17)}$$

Donde:

σ_b : Esfuerzo de flexión, [Pa o N/m²].

M : Momento Flector, [N.m].

y : Distancia del eje, [m].

I : Momento de inercia, [m⁴].

Esta fórmula permite determinar la intensidad del esfuerzo de flexión que actúa en

un elemento estructural, como un eje o una viga, cuando se somete a cargas que producen momentos flectores [19].

1.5.14. Esfuerzo de torsión

El esfuerzo de torsión es la intensidad del esfuerzo interno que se genera en un elemento estructural, como un eje, cuando está sometido a un momento torsor o par [19].

Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\tau_t = \frac{T \times r}{J} \quad \text{Ecuación (18)}$$

Donde:

τ_t : Esfuerzo de torsión, [Pa o N/m²].

T : Torque aplicado, [N.m].

r : Radio del eje, [m].

J : Momento polar por inercia, [m⁴].

1.5.15. Torque

El torque es una medida de la capacidad de una fuerza para hacer girar o rotar un objeto. Representa la magnitud de la torsión o fuerza rotativa que actúa sobre un cuerpo. El torque depende tanto de la magnitud de la fuerza aplicada como de la distancia entre el punto de aplicación de la fuerza y el eje de rotación. Cuanto mayor sea esta distancia, mayor será el torque generado por una misma fuerza [19].

$$T = \frac{P}{\omega} \quad \text{Ecuación (19)}$$

Donde:

T : Torque, [N].

P : Potencia, [W].

ω : Velocidad Angular, [rad/s].

1.5.16. Deformación angular

La deformación angular se refiere a los cambios en el ángulo formado entre dos líneas o elementos de un objeto cuando este es sometido a cargas o esfuerzos. El módulo de deformación angular, también conocido como anamorfosis angular, es la diferencia entre el ángulo formado por dos líneas en la proyección o representación del objeto, y el ángulo formado por sus homólogas en la superficie real del objeto [20].

$$\theta = \frac{T \times L}{G \times J} \quad \text{Ecuación (20)}$$

Donde:

θ : Deformación angular, [rad].

T : Torque aplicado, [N.m].

L : Longitud del eje, [m].

G : Módulo de rigidez del material, [Pa o N/m²]

J : Momento polar por inercia, [m⁴].

1.5.17. Pandeo

El pandeo es un fenómeno de inestabilidad estructural que puede ocurrir en elementos esbeltos sometidos a cargas de compresión. El esfuerzo crítico de pandeo (σ) representa el valor máximo de esfuerzo de compresión que puede soportar un elemento antes de que comience a pandearse. Esta propiedad es fundamental para evaluar la seguridad y resistencia de diseños estructurales y mecánicos [19]. La fórmula para calcular el esfuerzo crítico de pandeo fue desarrollada por Euler y se expresa de la siguiente manera:

$$\sigma_p = \frac{\pi^2 \times E}{(L \times r)^2} \quad \text{Ecuación (21)}$$

Donde:

σ_p : Esfuerzo crítico de pandeo, [Pa o N/m²].

E : Módulo de elasticidad del material, [Pa o N/m²].

L : Longitud del elemento, [m].

r : Radio de giro de la sección transversal, [m].

1.5.18. Momento de inercia en el rotor

El momento de inercia (I) es una propiedad física que cuantifica la distribución de masa de un cuerpo con respecto a un eje de rotación. En el caso de un rotor, el momento de inercia es una medida de la resistencia que presenta el rotor a cambiar su estado de movimiento rotacional [21]. La fórmula para calcular el momento de inercia es:

$$I_r = \frac{1}{2} \times m_r \times R^2 \quad \text{Ecuación (22)}$$

Donde:

I_r : Momento de inercia del rotor, [kg·m²].

m_r : Masa del rotor, [kg].

R : Radio del rotor, [m].

1.5.19. Evaluación económica

Las evaluaciones económicas pueden variar en términos de técnicas y herramientas utilizadas, dependiendo de las circunstancias particulares. Algunas de las evaluaciones económicas habituales aplicadas a un diseño incluyen:

a) **Valor Actual Neto - VAN**

El Valor Actual Neto (VAN) es una métrica financiera clave para evaluar proyectos. Cuando el VAN es menor que cero, el proyecto implica pérdidas, mientras que un VAN superior a cero indica su rentabilidad. Un VAN igual a cero señala que no hay beneficios ni pérdidas. Esta herramienta compara los flujos de efectivo futuros con los costos iniciales, ajustados por una tasa de descuento, para orientar decisiones de inversión y evaluar si una venta supera las ganancias futuras. [22].

$$VAN = -K_0 + \sum_{i=1}^n \frac{f c_i}{(1 + D)^i} \quad \text{Ecuación (23)}$$

Donde:

VAN : Valor actual neto.

K_0 : Inversión o capital inicial.

fc_i : Flujo de caja en el año i .

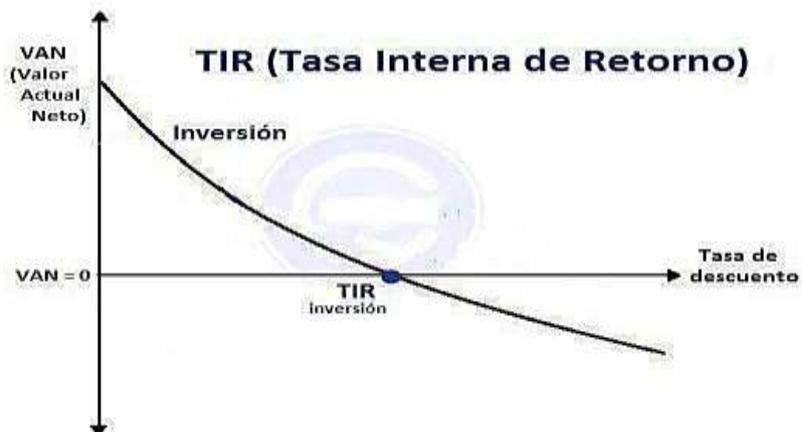
D : Tasa de descuento.

n : Número de periodos.

b) Tasa interna de retorno - TIR

El TIR o Tasa Interna de Retorno es una herramienta financiera fundamental para determinar la rentabilidad de un proyecto o inversión. Se destaca por ser una medida más precisa que la tasa de rendimiento contable o la tasa de interés nominal, dado que tiene en cuenta tanto el valor temporal del dinero como la magnitud de los flujos de efectivo asociados al proyecto. [23].

Figura 9: Representación de grafica de la Tasa Interna de Retorno (TIR) [23].



$$0 = -K_0 + \sum_{i=1}^n \frac{fc_i}{(1 + TIR)^i} \quad \text{Ecuación (24)}$$

Donde:

VAN : Valor actual neto.

K_0 : Inversión o capital inicial.

f_{c_i} : Flujo de caja en el año i .

D : Tasa de descuento.

n : Número de periodos.

c) Flujo de caja

El flujo de caja evalúa la liquidez y capacidad de generación de efectivo de una empresa en un período, reflejando ingresos y egresos financieros. El flujo de caja es una herramienta importante para evaluar la potencial financiera para invertir en nuevos proyectos y oportunidades [24]. Se calcula mediante la ecuación:

$$\begin{aligned} \text{Flujo de caja} = & \text{Beneficio neto} + \text{Amortizaciones} + \text{Provisiones} + \text{Cuentas} \\ & \text{por pagar} - \text{Cuentas por cobrar} \end{aligned} \quad \text{Ecuación (25)}$$

d) Análisis de costo – beneficio

Es una técnica que mide los costos y los beneficios de un diseño en términos monetarios, compara los costos de implementar un diseño con los beneficios que se obtendrán a lo largo del tiempo. Si los beneficios son mayores que los costos, el diseño se considera rentable. [25].

Figura 10: Diagrama de costo – beneficio [25].



$$C/B = \frac{\text{Beneficio neto}}{\text{Costos de inversión}} \quad \text{Ecuación (26)}$$

Donde:

C/B : Valor de costo beneficio, [S/].

II. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

El método de la investigación del presente trabajo es un enfoque cuantitativo aplicado debido a la necesidad de un análisis detallado y preciso de los parámetros geométricos y fluidodinámicos de la microturbina hidráulica Savonius. Este método es ideal porque nos permite obtener resultados específicos, esenciales para el diseño conceptual y las simulaciones necesarias para este proyecto.

2.1. Descripción de la Metodología

a) Relación de las preguntas de investigación con los objetivos

El objetivo general es diseñar una microturbina hidráulica Savonius para un canal hidráulico de 80x30x20 cm. Para lograr esto, se plantean objetivos específicos como determinar los parámetros geométricos y de fluidos, crear un diseño conceptual con software CAD y simular el comportamiento estructural del fluido. Cada uno de estos objetivos está cuidadosamente alineado con el propósito de asegurar que cada etapa del proyecto contribuya directamente al diseño y optimización de la turbina.

b) Estrategia de búsqueda de información

Para reunir información relevante, se realizaron búsquedas utilizando palabras clave como “microturbina hidráulica Savonius”, “diseño CAD de turbinas”, “simulación de fluidos”, “turbinas verticales” y “parámetros geométricos de turbinas”. Se utilizaron operadores booleanos en bases de datos académicas como IEEE Xplore, ScienceDirect y Google Scholar para asegurar que se seleccionaran los estudios más pertinentes y recientes.

2.2. Criterios de Selección

a) Criterios de inclusión

- Investigaciones que analicen el diseño geométrico de turbinas hidráulicas tipo

Savonius.

- Estudios que utilicen software CAD para el diseño de turbinas.
- Artículos que presenten simulaciones del comportamiento estructural de fluidos en turbinas.
- Publicaciones de los últimos diez años para asegurar la actualidad de la información.
- Estudios con resultados cuantitativos y detallados.

b) Criterios de Exclusión

- Artículos que no se centren en turbinas hidráulicas tipo Savonius.
- Investigaciones sin un enfoque cuantitativo.
- Estudios que no proporcionen datos detallados o replicables.
- Publicaciones anteriores a 2019, salvo que sean fundamentales para el contexto histórico del diseño de turbinas.

III. RESULTADOS

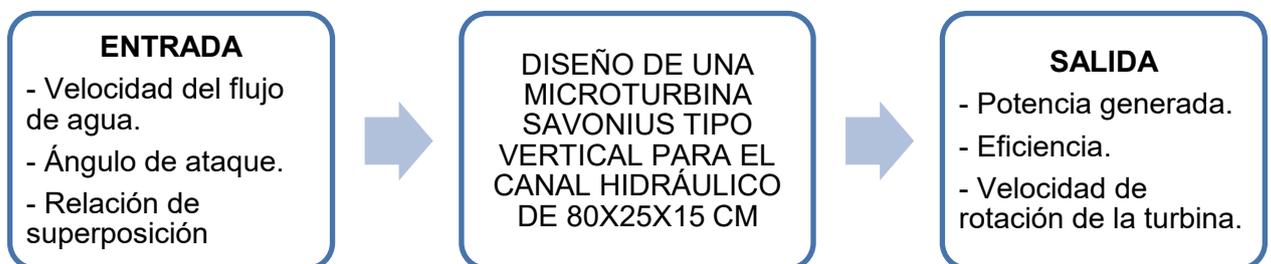
3.1. Determinar los parámetros de fluidos geométricos de la turbina Savonius.

La determinación de los parámetros de fluidos geométricos de la turbina Savonius es esencial para la captura de energía hidráulica en la microturbina Savonius. Este proceso incluye el diámetro, altura del rotor, el ángulo de las palas, etc. Al ajustar estos parámetros, se busca mejorar la fuerza de arrastre en el rotor y la generación de energía de la turbina. Mediante simulaciones, se identificarán las configuraciones óptimas para mejorar su desempeño y su aplicación en la generación de energía sostenible.

3.1.1. Parámetro del sistema

La investigación se centra en el diseño de una microturbina hidráulica Savonius tipo vertical para generar energía eléctrica a partir del flujo de agua. Este proyecto se enmarca en la búsqueda de soluciones sostenibles y renovables para la generación de energía.

Figura 11: Parámetros del sistema.



Fuente: Elaboración propia.

a. Entradas:

- Velocidad del flujo de agua: La velocidad a la que el agua fluye hacia la microturbina.
- Ángulo de rotación de la turbina: El ángulo en el que se colocara la turbina con respecto al flujo de agua.
- Relación de superposición: La relación de superposición en el diseño de la microturbina Savonius se refiere a la distancia en que las palas se superponen parcialmente, afectando la eficiencia aerodinámica y la captura de energía.

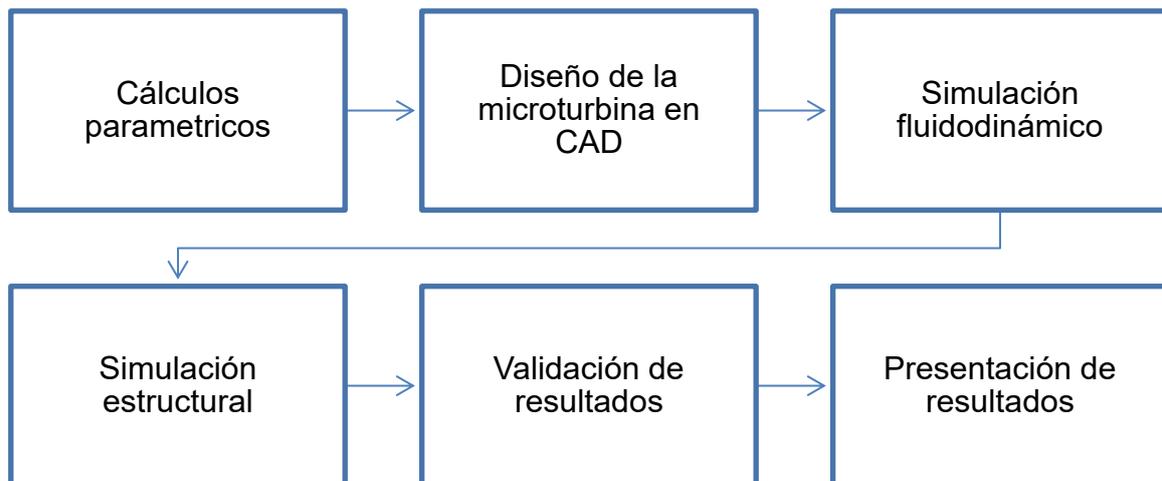
b. Salidas:

- Potencia generada: La cantidad de energía eléctrica producida por la turbina.
- Eficiencia de conversión: La eficacia con la que la energía cinética del agua se convierte en energía eléctrica.
- Velocidad de rotación de la turbina: La velocidad a la que la turbina gira bajo la acción del flujo de agua.

3.1.2. Estructura de funciones

La micro turbina hidráulica Savonius se destaca por su diseño simple y efectivo, siendo ideal para aplicaciones de baja potencia en entornos con flujo de agua constante pero variable en velocidad. A través de este estudio, se busca no solo impulsar el conocimiento científico en el campo de la energía hidráulica, sino también contribuir al desarrollo de soluciones energéticas innovadoras, promoviendo así un futuro más limpio.

Figura 12: Estructura de funciones.



Fuente: Elaboración propia.

3.1.3. Requerimientos mecánicos

Los requerimientos mecánicos aseguran que el diseño de la micro turbina hidráulica Savonius sea adecuado para su función específica de generación, con la posibilidad de conversión de corriente continua a corriente alterna mediante un inversor.

- **Eficiencia:** El diseño de la micro turbina Savonius debe maximizar la eficiencia en la conversión de la energía cinética del agua en voltajes pequeños en corriente continua.
- **Durabilidad y resistencia:** Los utilizados en el diseño, deben ser diseñados para resistir las condiciones del entorno hidráulico y asegurar su durabilidad y resistencia durante la operación.
- **Dimensiones compactas:** Dado el carácter de micro turbina, se requiere que el tamaño sea lo más compacto posible, facilitando su instalación en espacios reducidos y aplicaciones específicas.
- **Compatibilidad eléctrica:** El sistema eléctrico de la micro turbina debe ser de

corriente continua y asegurando una salida de voltaje.

- **Seguridad operativa:** Se deben implementar medidas de seguridad adecuadas para proteger a la microturbina en la instalación, mantenimiento y operación, teniendo en cuenta los voltajes generados y los riesgos asociados con la manipulación de equipos eléctricos.
- **Versatilidad en el montaje:** El diseño del prototipo debe permitir diferentes opciones de montaje y configuración para adaptarse a una variedad de entornos y condiciones de flujo de agua, garantizando una instalación sencilla.
- **Facilidad de mantenimiento:** Se requiere un diseño que facilite el acceso a los componentes clave de la micro turbina para realizar tareas de mantenimiento y reparación de manera rápida y efectiva, minimizando el tiempo de inactividad y los costos asociados.

3.1.4. Determinación de alternativas de diseño

a. Lista de exigencias y deseos

Para el presente trabajo de investigación “Diseño de una micro turbina hidráulica Savonius tipo vertical”, se detallarán las características, exigencias (E) y deseos (D) según la prioridad asignada. En las tablas 1 y 2, se presentan en detalle dichas funciones:

Tabla 1: Tabla Exigencias.

Categoría	Prioridad	Descripción
Función Principal	E	Diseñar una micro turbina hidráulica Savonius tipo vertical para la generación de energía eléctrica.
	E	Producir energía eléctrica al menos para alimentar un celular.

Geometría y Mantenimiento	E	La microturbina debe minimizar los requerimientos de mantenimiento y reducir el costo de reemplazo de componentes.
	E	Las piezas deben ser económicas y el diseño debe ser eficiente para las condiciones hidráulicas específicas del lugar de instalación.
Material, Fabricación y Ensamblaje	E	Los materiales utilizados deben ser apropiados para el entorno de operación, fáciles de adquirir y deben permitir un diseño y ensamblaje sencillo y eficiente.

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 2: Tabla de Deseos

Categoría	Prioridad	Descripción
Seguridad	D	Asegurar que todos los componentes del sistema sean seguros y confiables, para maximizar la rentabilidad y la seguridad operativa.
Costos	D	Mantener el presupuesto lo más bajo posible, asegurando que los costos del prototipo y repuestos sean accesibles y económicos, manteniendo una alta calidad en el funcionamiento.
Eficiencia	D	Optimizar los parámetros de diseño para garantizar una alta eficiencia, buscando constantemente mejoras para reducir costos y aumentar la eficiencia energética.

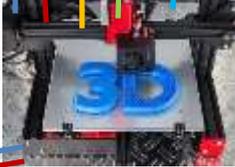
Ergonomía	D	Diseñar los componentes de manera que sean accesibles y fáciles de manejar, permitiendo un ensamblaje y operación adecuados y eficientes.
------------------	----------	---

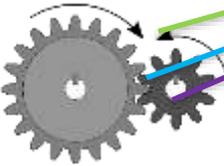
Fuente: Elaboración Propia.

b. Matriz morfológica

La presente matriz morfológica busca dar alternativas favorables para el diseño de la micro turbina Savonius, tiene la finalidad de dar alternativas para obtener la mejor solución para el diseño y en base a ello empezar a realizar el diseño en los diferentes parámetros.

Tabla 3: Matriz morfológica.

FUNCIONES	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	Alternativa 6
Estética del mecanismo	Con 2 palas	Con 3 palas	Con 4 palas	Con ángulo en las palas	Fusionado	Con palas cortas y ángulo
Material del rotor	 <p>Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)</p>	 <p>Polietileno tereftalato (PETG)</p>	 <p>Ácido poliláctico (PLA)</p>	 <p>Poliuretano termoplástico (TPU)</p>	 <p>Poliestireno de alto impacto (HIPS)</p>	 <p>Metal</p>
Proceso de manufactura						

	Torno	Soldadura	Impresión 3D			
Rodamientos	 <p>Engranajes</p>	 <p>Poleas</p>	 <p>Cadena</p>	 <p>Rodamiento en bolas</p>		
Soportes y bases	 <p>Manufactura aditiva</p>	 <p>Metal</p>	 <p>Madera</p>	 <p>Cemento</p>		
Ensamble						

	Manual en taller	Automatizado en fábrica	Por técnicos especializados			
Uniones	 <p>Pernos</p>	 <p>Pasadores</p>	 <p>Impresión PLA</p>	 <p>Clavos</p>	 <p>Precintos</p>	
Generador	 <p>Generador DC</p>	 <p>Generador AC</p>	 <p>Alternador</p>			

Fuente: Elaboración propio.

c. Conceptos de solución

Para los conceptos de solución se tomará las alternativas que se obtiene a través de la Matriz morfológica tabla 3:

- **Alternativa 1**

Esta alternativa presenta un diseño cilíndrico con dos palas semicilíndricas, dispuestas de manera que forman una "S" desde la vista superior. Este diseño clásico de la turbina Savonius es conocido por su capacidad de capturar el flujo de fluido de manera eficiente desde múltiples direcciones. La forma en "S" maximiza la superficie de contacto con el fluido, lo que mejora la conversión de energía cinética en energía mecánica.

Ventajas:

- Es fácil de modelar y requiere menos tiempo de diseño.
- El diseño cilíndrico permite capturar el fluido eficazmente.
- La forma simple y continua proporciona resistencia mecánica.
- El diseño simple es más fácil de imprimir en 3D sin necesidad de estructuras de soporte complicadas.

Desventajas:

- Comparada con diseños más avanzados, puede no ser tan eficiente en convertir energía hidráulica en energía mecánica.
- El diseño sólido puede resultar en una estructura más pesada, lo que puede afectar la durabilidad del material PLA.
- No es tan eficiente en bajas velocidades.
-

Figura 13: Alternativa 1.



Fuente: Elaboración propia.

- **Alternativa 2**

La alternativa 2 es similar al diseño tradicional, pero incorpora tres palas para mejorar la captación del fluido. Este enfoque es comúnmente utilizado en sistemas eólicos, donde la adición de una pala adicional aumenta la eficiencia aerodinámica y optimiza la conversión de energía.

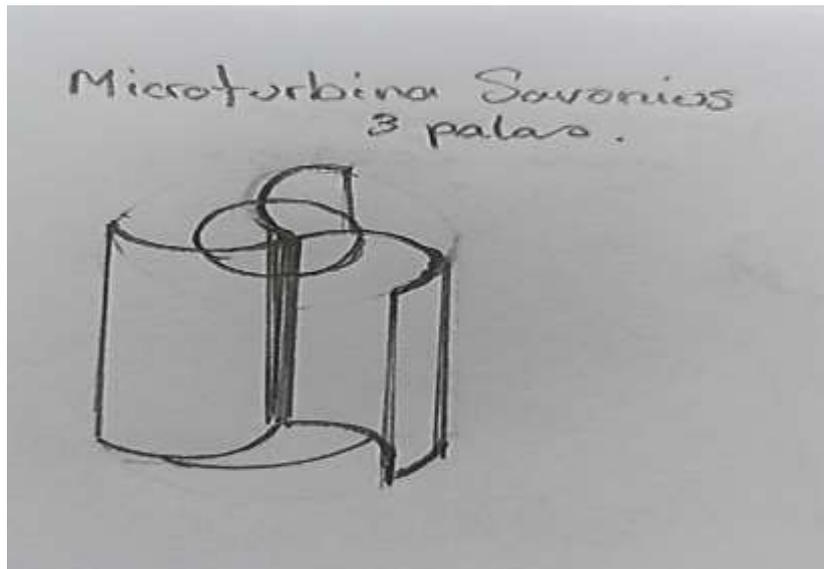
Ventajas:

- La asimetría puede ayudar a captar más flujo y generar más torque.
- Puede funcionar mejor en un rango más amplio de velocidades de viento.
- La asimetría puede reducir el torque necesario para iniciar el movimiento.

Desventajas:

- El diseño asimétrico puede requerir más tiempo y recursos para modelar y fabricar.
- La asimetría puede causar problemas de balance que requieran calibración cuidadosa.
- Las palas de diferente longitud pueden desgastarse a ritmos diferentes, afectando la durabilidad.

Figura 14: Alternativa 2.



Fuente: Elaboración propia.

- **Alternativa 3**

Este diseño alternativo 3 mantiene la estructura tradicional de la turbina Savonius, pero incorpora cuatro palas en lugar de las dos habituales. La adición de las dos palas extra mejora significativamente la captación del fluido, permitiendo una mayor superficie de contacto y, por ende, una mejor conversión de la energía cinética del fluido en energía mecánica.

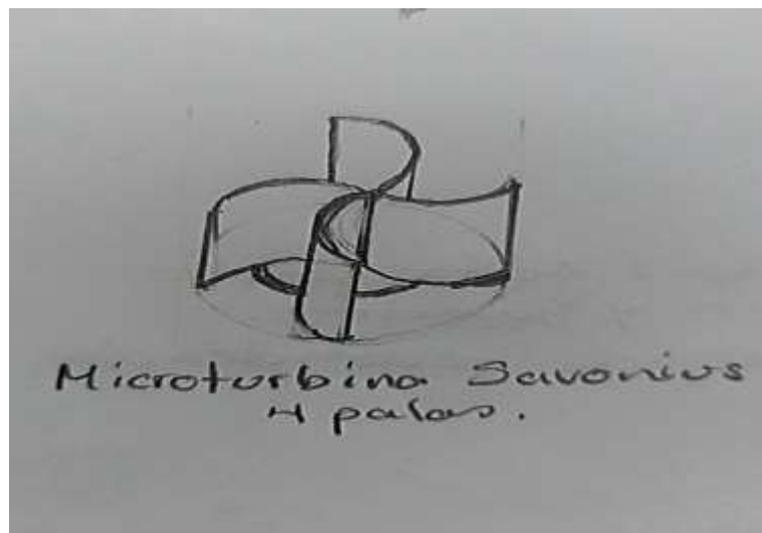
Ventajas:

- Los módulos se pueden transportar y ensamblar fácilmente, ideal para instalaciones en áreas de difícil acceso.
- Solo las partes dañadas necesitan ser reemplazadas, no la turbina completa.
- Los módulos permiten ajustar el tamaño y la capacidad de la turbina según las necesidades específicas.

Desventajas:

- Las uniones entre módulos pueden ser menos resistentes y más propensas a fallar.
- Requiere un diseño cuidadoso para asegurar que los módulos se ensamblen correctamente y funcionen bien juntos.
- La fabricación y el ensamblaje de módulos pueden ser más costosos que una estructura monolítica.

Figura 15: Alternativa 3.



Fuente: Elaboración propia.

- **Alternativa 4**

Esta alternativa 4, sus palas están dispuestas en una configuración espiral para maximizar la captación del fluido. Esta forma permite un contacto continuo y suave con el flujo, reduciendo turbulencias y aumentando la transferencia de energía.

Ventajas:

- La forma espiral guía al fluido de manera más efectiva, aumentando la eficiencia de conversión de energía.
- Puede capturar y convertir eficientemente energía de fluidos cambiantes.

- El diseño en espiral puede ser visualmente más agradable.

Desventajas:

- La forma compleja puede requerir soportes adicionales y una impresión más cuidadosa.
- El diseño más complejo puede aumentar el tiempo necesario para imprimir cada componente.
- La forma en espiral puede necesitar refuerzos adicionales para mantener la integridad estructural.

Figura 16: Alternativa 4.



Fuente: Elaboración propia.

- **Alternativa 5**

Esta alternativa es una turbina tipo fusionado la mitad superior esta de forma recta las palas y la otra mitad inferior esta curvada sus palas, sirve para operar en espacios pequeños y urbanos.

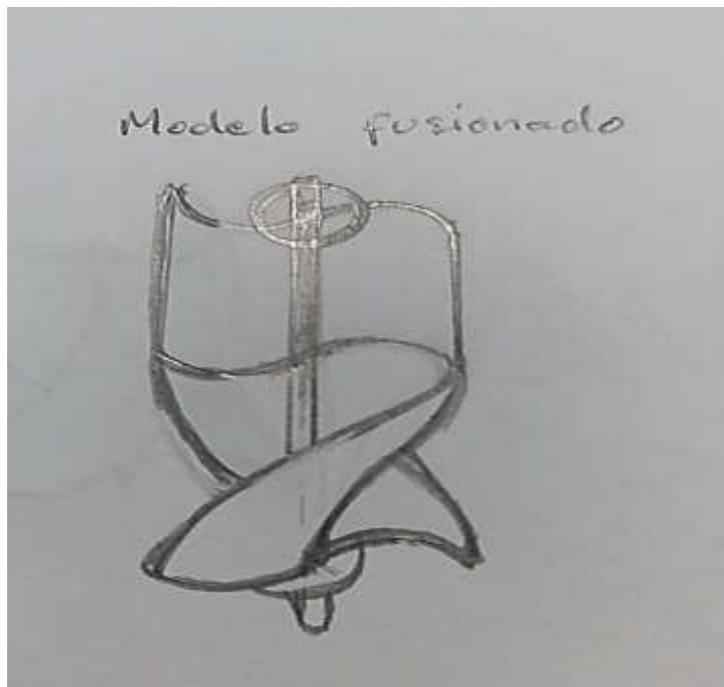
Ventajas:

- Su tamaño compacto la hace ideal para techos y pequeñas instalaciones.
- El tamaño reducido requiere menos material, reduciendo costos de impresión.
- Su tamaño pequeño puede ser más aceptable visualmente en entornos residenciales.

Desventajas:

- El tamaño reducido limita la cantidad de energía que puede generar.
- La reducción en tamaño puede comprometer la durabilidad y resistencia a condiciones extremas.
- Requiere un diseño muy eficiente para compensar la menor superficie de captación de viento.

Figura 17: Alternativa 5.



Fuente: Elaboración propia.

- **Alternativa 6**

Esta alternativa 6 sus álabes de la turbina están diseñados para ajustar su ángulo, permitiendo una captación buena del fluido lento en diversas condiciones.

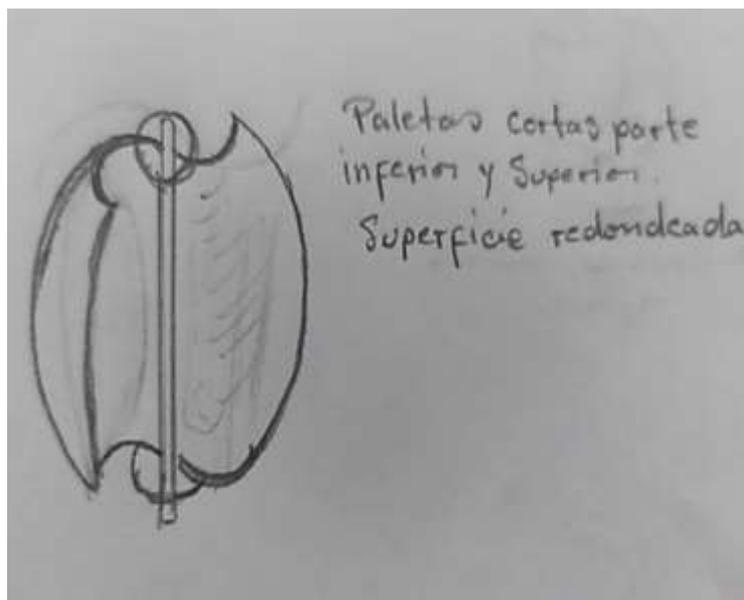
Ventajas:

- Permite ajustar las palas para capturar el viento de manera óptima en diferentes velocidades y direcciones.
- Los álabes ajustables pueden mejorar el rendimiento general de la turbina.
- Los componentes ajustables pueden facilitar el mantenimiento y las reparaciones.

Desventajas:

- Requiere mecanismos precisos y más complejos para permitir el ajuste de los álabes.
- Las partes móviles adicionales pueden aumentar el riesgo de fallos y el desgaste.
- La complejidad adicional puede aumentar los costos y el tiempo necesario para producir la turbina.

Figura 18: Alternativa 6.



Fuente: Elaboración propia.

d. Matriz de decisión

La presente matriz de decisión tiene como objetivo seleccionar la configuración óptima del diseño de la microturbina Savonius, esta herramienta es fundamental para identificar y ponderar las diversas alternativas de diseño en función de parámetros críticos previamente definidos. Cada parámetro de diseño ha sido evaluado en una escala de 0 a 10, donde 0 representa un nivel bajo y 10 un nivel muy alto. Este enfoque sistemático permite asegurar que el diseño final no solo cumple con las expectativas de rendimiento y eficiencia, sino que también sea viable desde el punto de vista de la fabricación y el material utilizado.

Los parámetros a evaluar en la matriz de decisión son:

P1. Costo de construcción.

P2. Tiempo de construcción.

P3. Espacio ocupado.

P4. Complejidad de la construcción y montaje.

P5. Potencia requerida.

P6. Usabilidad y seguridad.

P7. Durabilidad.

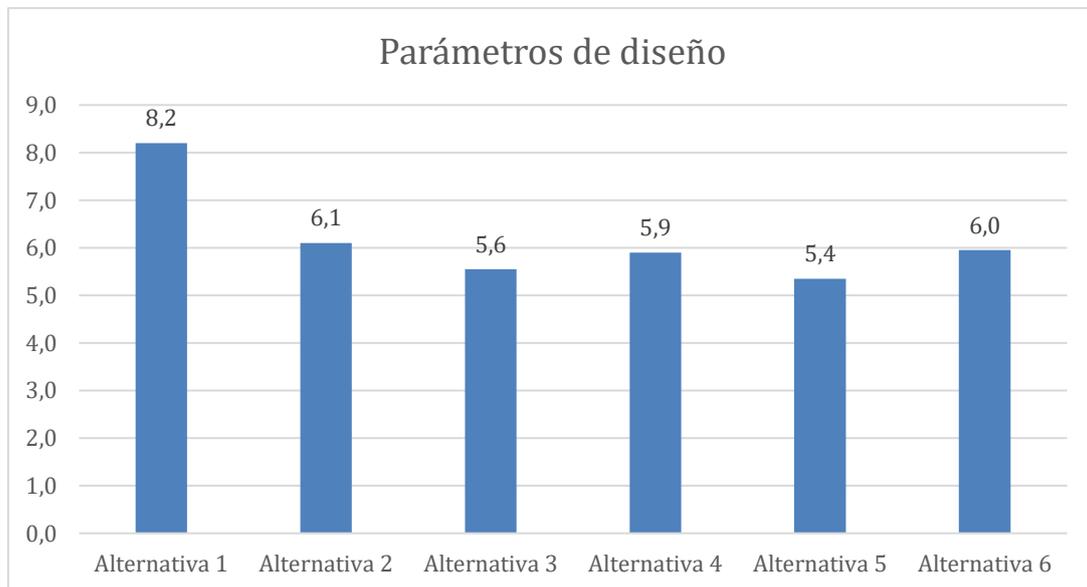
P8. Ergonomía y estética.

Tabla 4: Parámetros de diseño.

Parámetros de diseño									
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	Total
	0.2	0.05	0.1	0.2	0.05	0.2	0.15	0.05	100%
Alternativa 1	9	9	8	8	7	7	9	9	8.2
Alternativa 2	9	5	6	7	5	4	5	5	6.1
Alternativa 3	9	4	6	6	4	3	5	4	5.6
Alternativa 4	9	6	5	5	6	4	6	6	5.9
Alternativa 5	9	5	5	6	4	3	4	4	5.4
Alternativa 6	9	7	7	6	5	5	3	4	6.0

Fuente: Elaboración propia.

Figura 19: Selección de alternativas.



Fuente: Elaboración propia.

La figura 19 muestra el puntaje más alto en la alternativa 1, obtenido en la matriz de decisión, lo que permite seleccionar la configuración óptima para el diseño del presente

proyecto de investigación. Este estudio, titulado “Prototipo de una microturbina hidráulica tipo Savonius fabricada mediante manufactura aditiva con PLA para generar energía eléctrica”, se enfoca en desarrollar un prototipo utilizando tecnología de impresión 3D. El análisis detallado de las alternativas de diseño ha permitido identificar la opción que mejor cumple con los parámetros establecidos, asegurando tanto la eficiencia energética como la facilidad de fabricación y montaje con PLA.

3.1.5. Cálculos paramétricos

En este capítulo realizaremos los cálculos necesarios previos al diseño de la microturbina hidráulica Savonius, la cual ha sido seleccionada como la alternativa 1 como óptima mediante el uso de una matriz de selección.

Se empezará realizando el cálculo de la relación de superposición de la microturbina hidráulica Savonius para ello se utilizará la ecuación 1, mencionado en el marco teórico:

$$R_s = \frac{e}{D}$$

Donde:

R_s : Relación de superposición, [Adimensional].

e : Distancia entre las puntas internas de las palas que se superponen, [0.01m].

D : Diámetro del rotor de la turbina, [6cm = 0.06 m].

$$R_s = \frac{0.01}{0.06} = 0.167$$

El cálculo de la relación de aspecto, de acuerdo con la ecuación 2 del marco teórico. Este cálculo es fundamental para establecer las proporciones adecuadas de la microturbina hidráulica Savonius y asegurar su eficiencia óptima en el diseño final.

$$\alpha_{RA} = \frac{H}{D}$$

Donde:

α_{RA} : Relación de aspecto del rotor, [Adimensional].

H : Altura de la turbina, [11.5 cm = 0.115 m].

D : Diámetro del rotor de la turbina, [6cm = 0.06 m].

$$\alpha_{RA} = \frac{0.115}{0.06} = 1.91$$

Por medio de la ecuación 3 del marco teórico se calculará el área barrida del rotor de la turbina, de la siguiente forma:

$$A = D \times H$$

Donde:

A : Área barrida del rotor de la turbina, [m²].

D : Diámetro del rotor, [6cm = 0.06 m].

H : Altura del rotor, [11.5 cm = 0.115 m].

$$A = 0.06 \times 0.115 = 0.0069 \text{ m}^2$$

El cálculo del área frontal de la microturbina Savonius se lleva a cabo utilizando la ecuación 4 del marco teórico. Este paso es crucial para determinar la superficie efectiva que interactuará con el flujo de agua, lo que a su vez influirá en el rendimiento y eficiencia de la turbina:

$$A_F = 2R \times H$$

Donde:

A_F : Área barrida del rotor de la turbina, [m^2].

R : Radio del rotor, [3 cm = 0.03m].

H : Altura del rotor, [11.5 cm = 0.115 m].

$$A_F = 2(0.03) \times 0.115 = 0.0069 \text{ m}^2$$

Para el cálculo de los dimensionamientos de los platos de la microturbina, utilizaremos la ecuación 5 mencionada en el marco teórico. Este cálculo es esencial para determinar las dimensiones precisas de los componentes:

$$D_p = 1.1 \times D$$

Donde:

D_p : Diámetro del plato, [m].

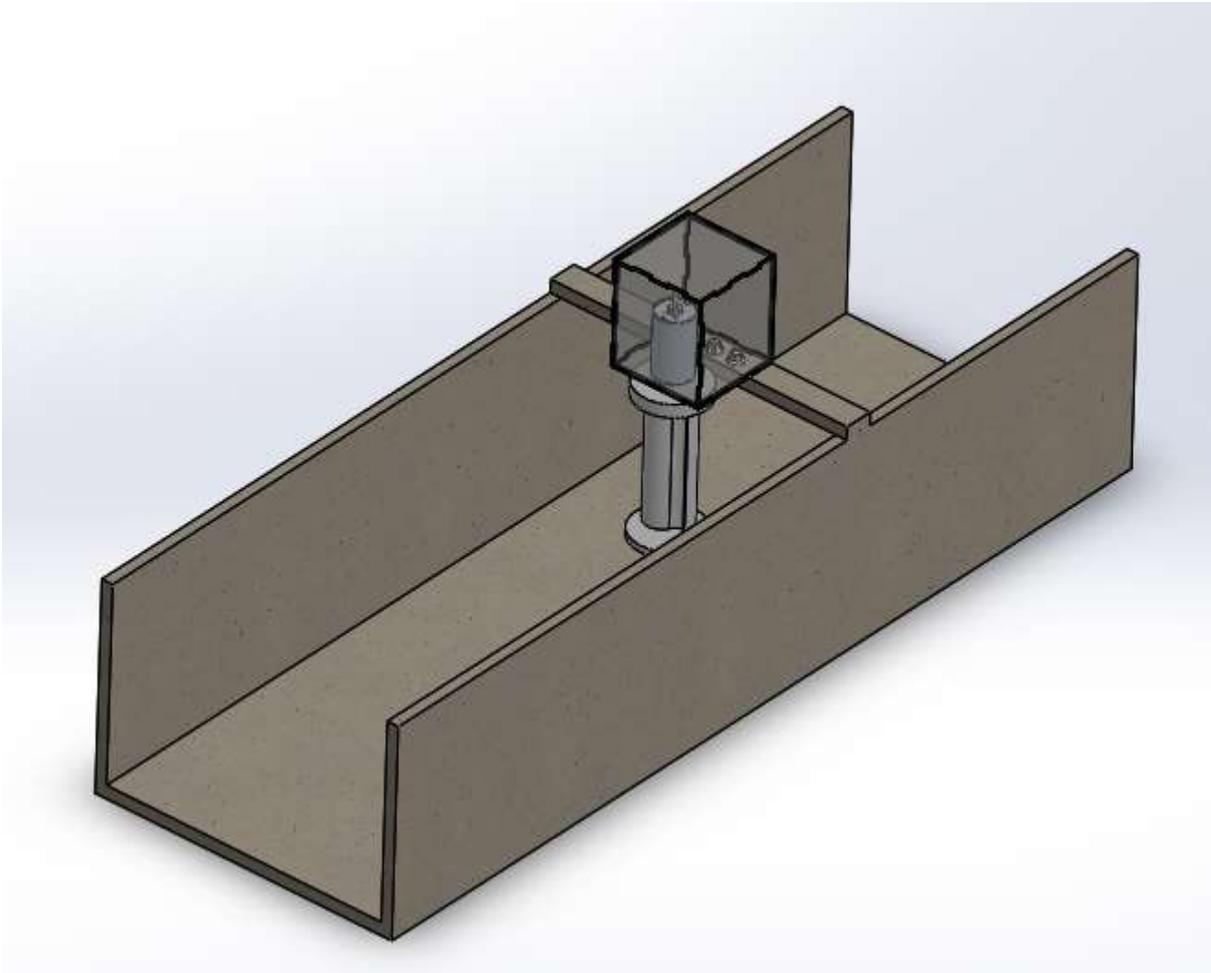
D : Diámetro del rotor, [0.6 cm = 0.06m].

$$D_p = 1.1 \times 0.06 = 0.066 \text{ m}$$

3.2. Diseño conceptual de la microturbina hidráulica tipo Savonius usando el software CAD.

El diseño de la microturbina hidráulica Savonius se ha modelado en una vista 3D, como se muestra en la figura 20. A continuación, se detallará cada componente del diseño y su integración en el sistema completo, asegurando que se cumplan los parámetros de funcionalidad definidos en los cálculos preliminares.

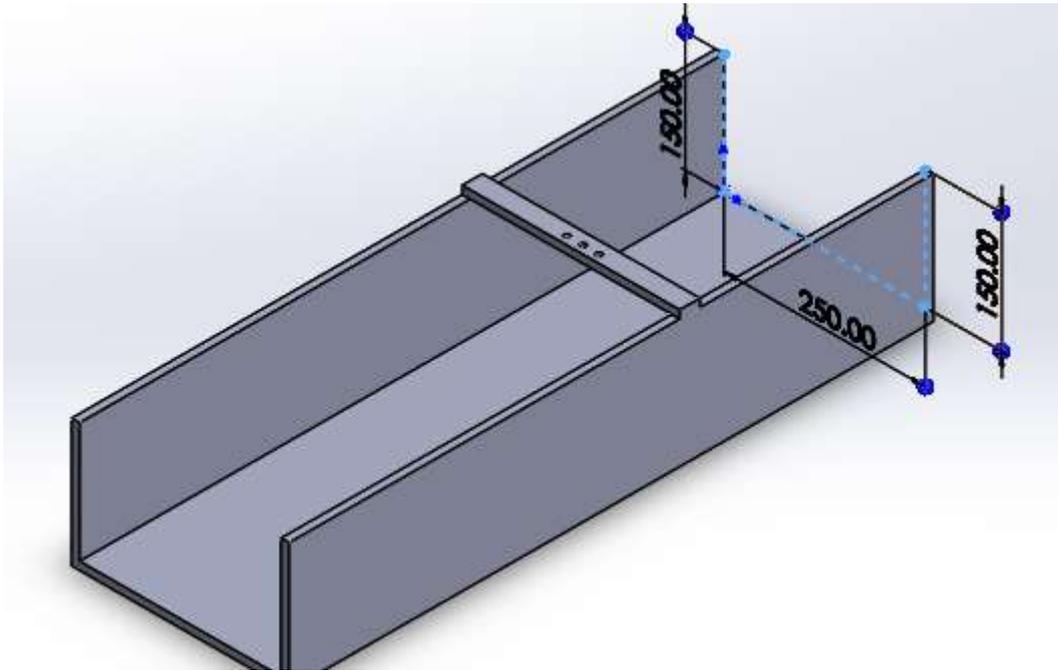
Figura 20: Microturbina hidráulica Savonius.



Fuente: Elaboración propia.

Canal y base: Es la estructura rectangular de 80x25x15 cm que dirige el flujo de agua hacia el rotor. Está compuesta por dos paredes laterales y una base que guían el agua de manera eficiente hacia la microturbina. La base donde se coloca la microturbina, es la estructura inferior sobre la cual se monta toda la microturbina. Esta base asegura la estabilidad y el correcto posicionamiento del sistema en el entorno donde se utilizará.

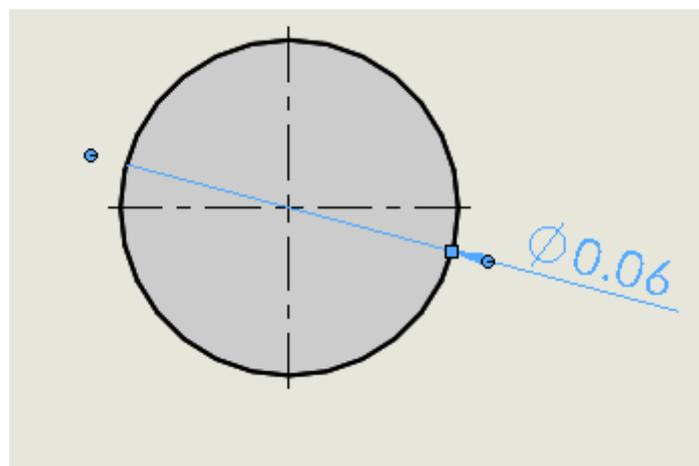
Figura 21: Canal y base de la microturbina.



Fuente: Elaboración propia.

- **Platos Superior e Inferior:** Estas estructuras circulares sostienen el rotor y garantizan la estabilidad de la turbina. Los platos tienen un diámetro calculado de 0.06 m, siguiendo la ecuación 5 del marco teórico, como se muestra la figura 21.

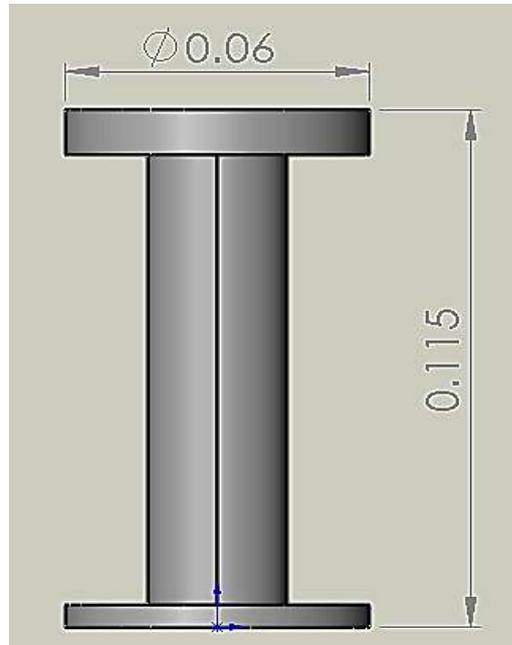
Figura 22: Diámetro de los platos.



Fuente: Elaboración propia.

- **Rotor:** El rotor tiene un diámetro de 0.06 m y una altura de 0.115 m, es el componente principal que interactúa con el flujo de agua para generar movimiento. Se muestra en la figura 22.

Figura 23: Rotor.



Fuente: Elaboración propia.

- **Generador eléctrico DC:** Es el dispositivo que convertirá la energía mecánica del rotor Savonius en energía eléctrica de corriente continua (DC). Está conectado al eje del rotor.

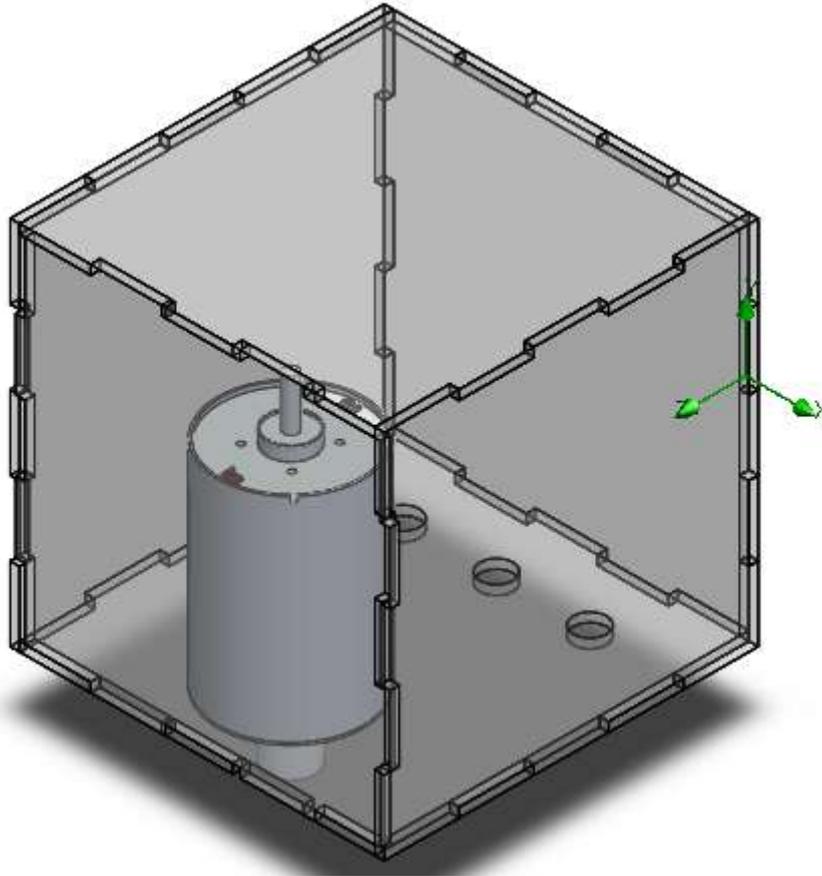
Figura 24: Generador eléctrico DC.



Fuente: Elaboración propia.

- **Cápsula del generador eléctrico:** Es la carcasa que protege al generador eléctrico de la exposición al agua y otros elementos. Asegura que el generador funcione adecuadamente sin riesgo de daño por humedad.

Figura 25: Capsula de protección del generador eléctrico.



Fuente: Elaboración propia.

La microturbina Savonius no solo cumple con los requisitos teóricos y los cálculos preliminares, sino que también está lista para ser simulada en condiciones reales. Este diseño marca un paso significativo hacia el diseño de soluciones de energía renovable a pequeña escala, utilizando tecnologías simples pero efectivas como la turbina Savonius.

3.3. Simular el comportamiento estructural de fluido de la turbina hidráulica

Savonius.

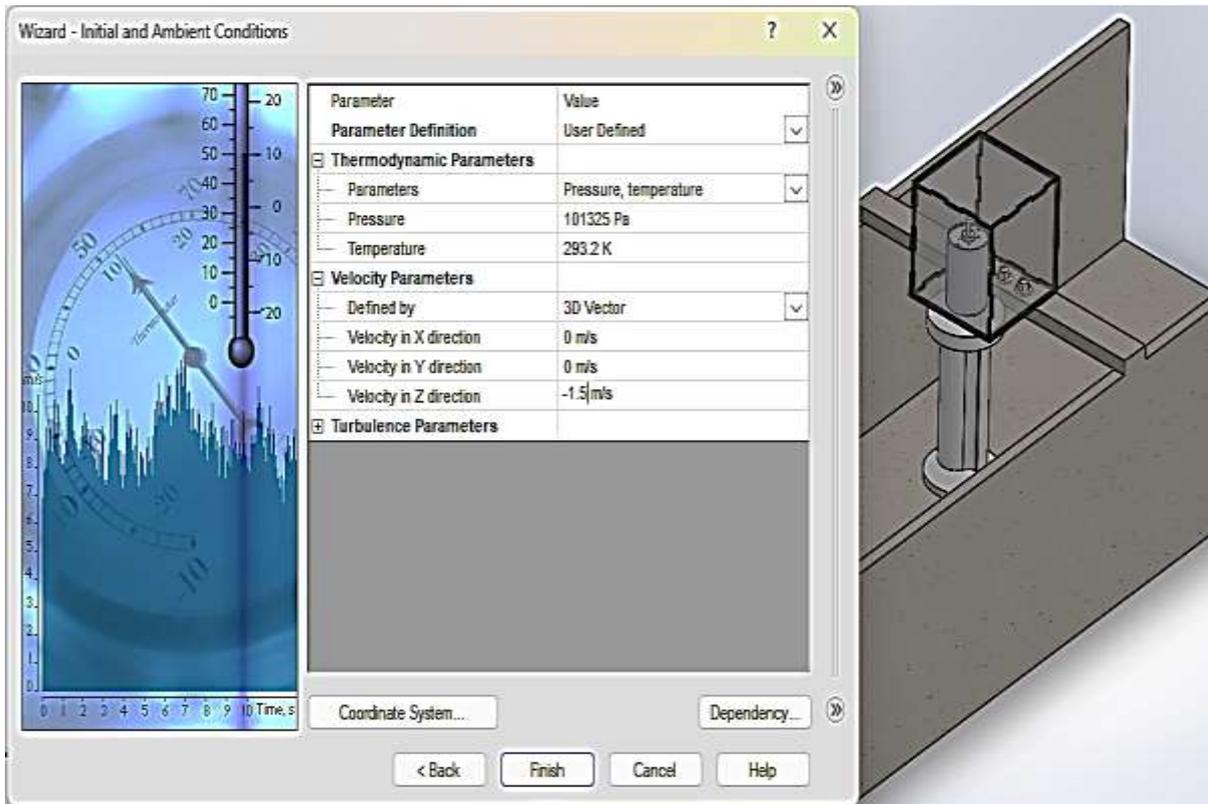
Antes de comenzar con la simulación del comportamiento estructural de la microturbina hidráulica Savonius se tiene que tener en cuenta la velocidad del agua el cual va ser simulado para ello se tomó 1.5 m/s:

3.3.1. simulación CFD

Las pruebas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) permitirán simular el comportamiento del fluido alrededor del rotor de la microturbina. Estas simulaciones ayudarán a identificar la interacción entre el fluido y el rotor para mejorar la generación de energía.

La figura 26 muestra la configuración inicial del rotor de la microturbina hidráulica Savonius en el software SolidWorks. La configuración incluye parámetros esenciales para realizar simulaciones CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) que evaluarán el comportamiento del fluido alrededor del rotor. En la configuración, se define la velocidad del fluido a 1.5 m/s, lo cual es crucial para las simulaciones posteriores de presión y velocidad.

Figura 26: Configuración en Wizard SolidWorks.



Fuente: Elaboración propia.

Las figuras 27 y 28 presenta la distribución de presión en el rotor de la microturbina hidráulica Savonius desde dos perspectivas: frontal, trasera, vista lateral derecha e izquierda

Vista frontal: Se observa la presión ejercida por el fluido en la parte frontal del rotor. Aquí se observa cómo el fluido impacta directamente las palas del rotor, generando una presión alta de 103030.25 Pa en estas áreas.

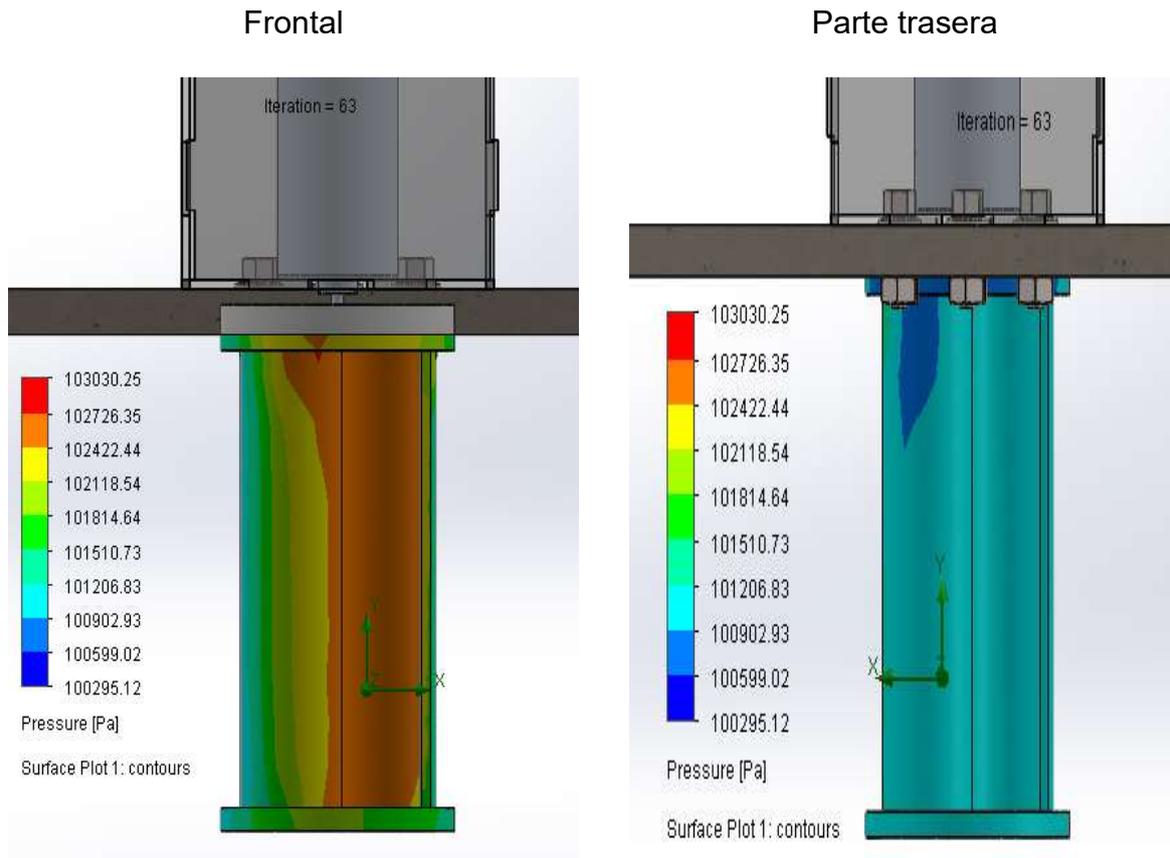
Vista trasera: Se observa la presión en la parte posterior del rotor. En esta vista, se pueden notar las áreas de baja presión 101206.83 Pa que se forman debido al flujo del fluido alrededor de las palas del rotor.

Lateral derecho: Muestra cómo la presión se distribuye en el lado derecho del rotor. Generalmente, se observa una variación de presión a lo largo de las palas, indicando zonas

de alta 102118.54 Pa y baja presión 101206.83 Pa.

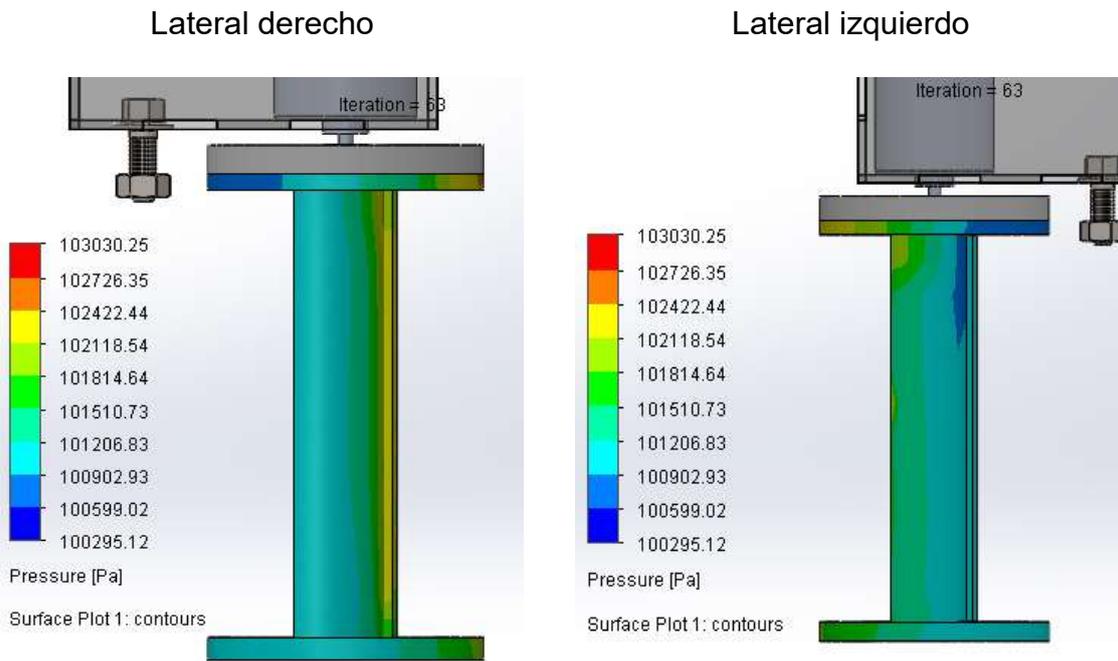
Lateral izquierdo: Similar al lado derecho, pero se puede notar la diferencia en la distribución de presión debido a la forma asimétrica del rotor y la dirección del flujo del fluido.

Figura 27: Presión en el rotor de la microturbina hidráulica Savonius.



Fuente: Elaboración propia.

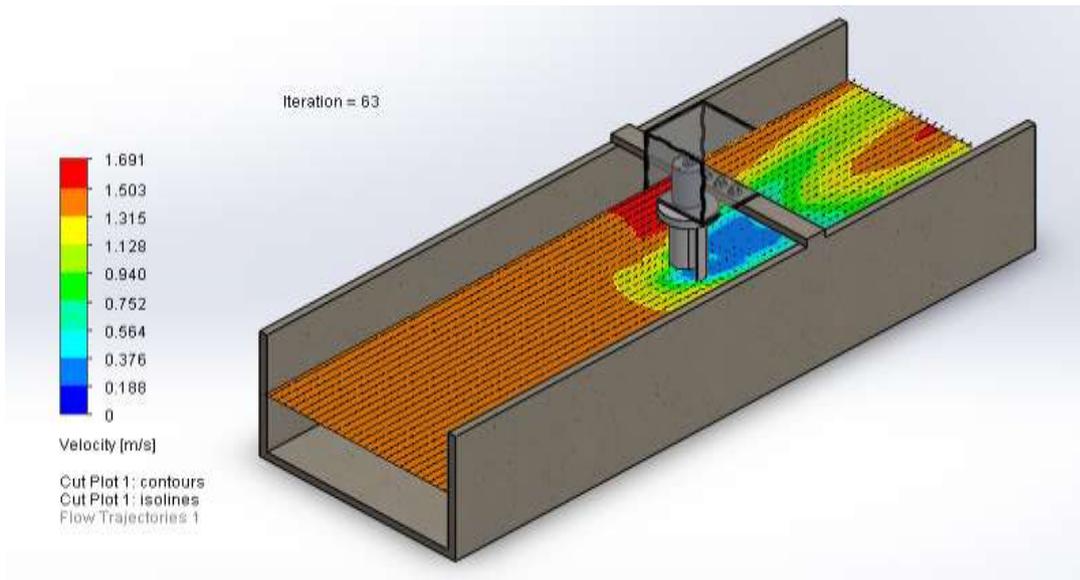
Figura 28: Presión en el rotor de la microturbina hidráulica Savonius.



Fuente: Elaboración propia.

La figura 29 muestra las diferentes velocidades en las proximidades del rotor, indicando cómo el fluido acelera o desacelera mientras pasa alrededor de las palas. Las zonas de alta velocidad generalmente se encuentran en los bordes de las palas debido a la forma en que el fluido se desplaza.

Figura 29: Velocidad en el rotor de la microturbina hidráulica Savonius.



Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 5 indica los resultados obtenidos de las simulaciones en SolidWorks. Incluye valores numéricos clave que describen el comportamiento del rotor bajo las condiciones simuladas, tales como: presiones, velocidades, fuerzas y torque.

Tabla 5: Resultados SolidWorks.

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
Static Pressure	[Pa]	101351.52	101351.13	101349.03	101351.65	100	Yes	2.62	4.26
Total Pressure	[Pa]	102352.02	102351.58	102349.91	102352.05	100	Yes	2.14	11.73
Velocity	[m/s]	1.398	1.398	1.398	1.398	100	Yes	3.553e-04	0.013
Velocity (X)	[m/s]	-0.031	-0.031	-0.031	-0.030	100	Yes	0.001	0.004
Velocity (Y)	[m/s]	-0.013	-0.013	-0.013	-0.011	100	Yes	0.001	0.002
Velocity (Z)	[m/s]	-1.381	-1.381	-1.381	-1.380	100	Yes	8.272e-04	0.015
Force	[N]	11.296	11.205	10.752	11.330	100	Yes	0.578	0.636
Force (X)	[N]	4.028	3.980	3.750	4.041	100	Yes	0.291	0.318
Force (Y)	[N]	-7.508	-7.383	-7.547	-6.784	100	Yes	0.762	1.168
Force (Z)	[N]	-7.416	-7.428	-7.451	-7.416	100	Yes	0.035	0.814
Torque (X)	[N*m]	5.342	5.266	4.908	5.366	100	Yes	0.458	0.812
Torque (Y)	[N*m]	3.079	3.050	2.905	3.088	100	Yes	0.184	0.203
Torque (Z)	[N*m]	-0.016	-0.019	-0.021	-0.016	100	Yes	0.005	0.007

Fuente: Elaboración propia.

Con el resultado de la tabla se procede a calcular el coeficiente de arrastre según la ecuación 7, mencionado en el marco teórico:

$$C_d = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho A V^2}$$

Donde:

C_d : Coeficiente arrastre, [Adimensional].

F : Fuerza de arrastre, [11.296 N].

ρ : Densidad del agua, [997 kg/m³].

A : Área barrida del rotor de la turbina, [0.0069 m²].

V : Velocidad en la punta del álabe, [1.5 m/s].

$$C_d = \frac{11.296}{\frac{1}{2} \times 997 \times 0.0069 \times 1.5^2} = 0.70$$

Para el cálculo del coeficiente de sustentación se realizará mediante la ecuación 9, mencionado en el marco teórico:

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$$

Donde:

C_L : Coeficiente de sustentación.

F_L : Fuerza de sustentación, [7.508 N, tabla 11].

ρ : Densidad del fluido, [997 Kg/m³].

V : Velocidad del fluido, [1.5 m/s].

A : Área de barrido, [0.0069 m²].

$$C_L = \frac{0.150}{\frac{1}{2} \times 997 \times 0.0069 \times 1.5^2} = 0.469$$

Para calcular la eficiencia o coeficiente de potencia teórica de la microturbina hidráulica Savonius se calculará mediante la ecuación 12, de la siguiente forma:

$$C_{pmax} = 0.593 \left[\frac{\lambda N^{0.67}}{1.48 + (N^{0.67} - 0.04)\lambda + 0.0025\lambda^2} - \frac{1.92\lambda^2 N CD}{1 + 2\lambda N CL} \right]$$

Donde:

C_{pmax} : Coeficiente de potencia máximo, que representa la máxima eficiencia alcanzable por la turbina hidrocínética.

λ : Relación de velocidad de punta de las palas de la turbina con respecto a la velocidad del flujo de agua incidente (relación de velocidad), [1m/s "figura 29"].

N : Numero de álabes, [2].

CD : Coeficiente de arrastre, [0.70].

CL : Coeficiente de sustentación, [0.469].

$$C_{pmax} = 0.593 \left[\frac{(1)(2)^{0.67}}{1.48 + (2^{0.67} - 0.04)1 + 0.0025(1)^2} - \frac{1.92(1)^2(2) 0.70}{1 + 2(1)(2) 0.469} \right] = 0.369$$

Con la ayuda del resultado del coeficiente de potencia se procede a calcular la potencia mecánica que tendrá la microturbina hidráulica Savonius tipo vertical, mediante la

ecuación 10 mencionado en el marco teórico:

$$P = \frac{1}{2} \rho A C_p V^3$$

Donde:

P : Potencia, [W].

ρ : Densidad del agua, [997 kg/m³].

A : Área barrida del rotor de la turbina, [0.0069 m²].

V : Velocidad del fluido, [1 m/s].

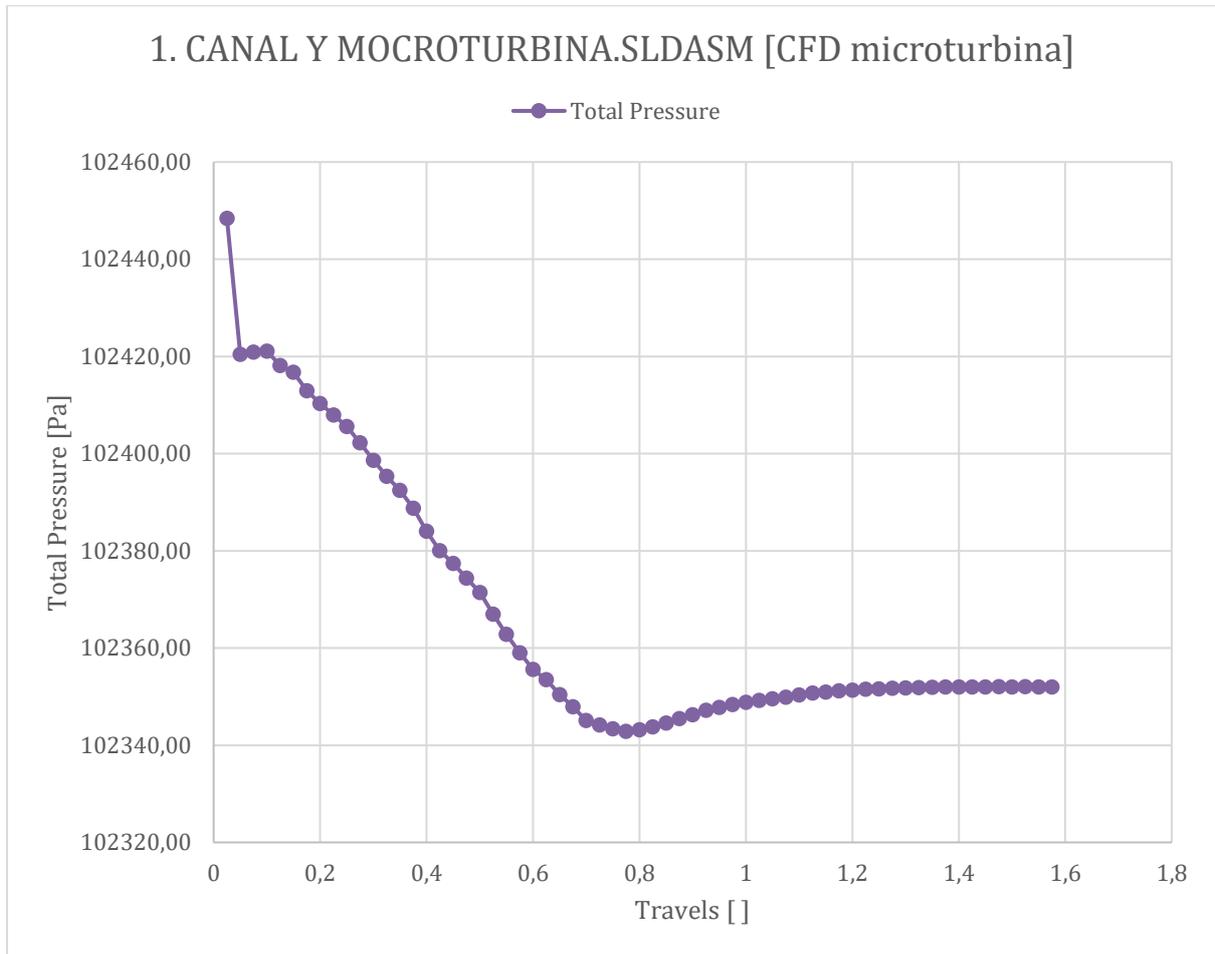
$$P = \frac{1}{2} \times 997 \times 0.0069 \times 0.369 \times 1^3 = 1.26 \text{ W}$$

El resultado de 0.369 obtenido para la eficiencia de la turbina Savonius en cuestión se encuentra dentro del rango esperado según la teoría, que establece que estos dispositivos no suelen superar un coeficiente de potencia del 40%. Este valor refleja las limitaciones inherentes al diseño de las turbinas Savonius en cuanto a su capacidad de conversión de energía mecánica se tiene 1.26 W.

En el anexo 1 se menciona resultados de las simulaciones fluidodinámicas, lo cual se cuenta con, presiones, velocidades, fuerzas y torque.

En la figura 30 se observa cómo varía la presión total del fluido en relación con la velocidad del agua, que se mantuvo alrededor de 1.5 m/s. La presión total, medida en pascales, presenta una ligera disminución a medida que se incrementa la velocidad. Para validar estos resultados se compara con el resultado de la tabla 5 teniendo un resultado de 102352.02 Pa cuando la presión es casi constante.

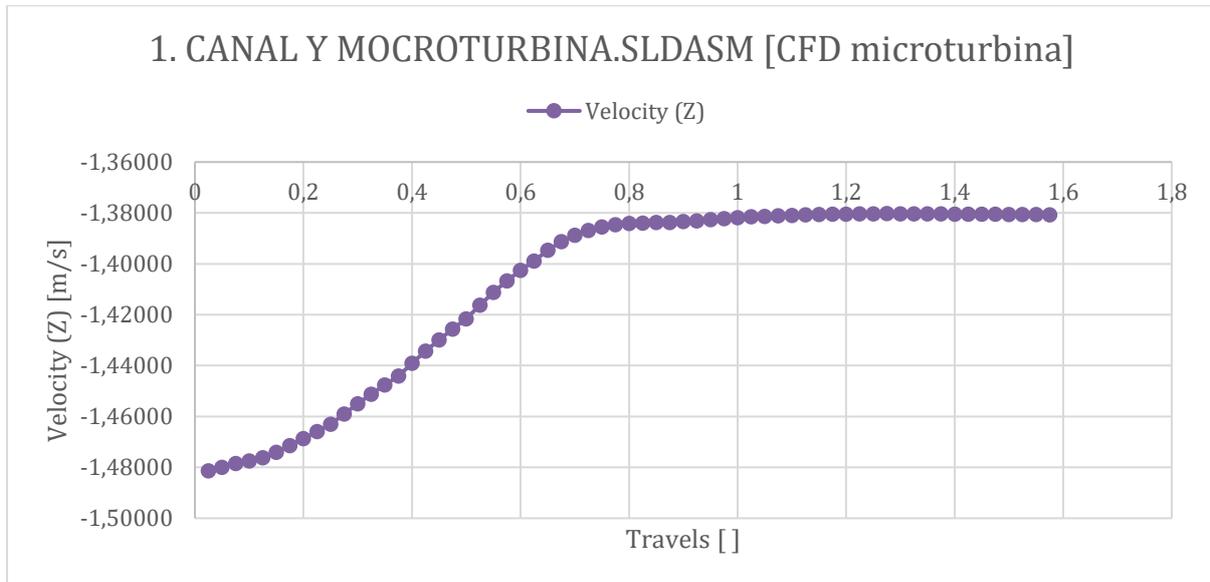
Figura 30: Presión [Pa] Vs Velocidad [m/s].



Fuente: Elaboración propia.

La figura 31 muestra la variación de la velocidad de arrastre del fluido en la dirección Z a lo largo del rotor Savonius. Los datos muestran componentes negativas de la velocidad en Z, indicando un flujo en dirección opuesta a la dirección Z definida, esto sucede porque la configuración paramétrica de la simulación se colocó una velocidad de -1.5 m/s al sentido contrario para el recorrido del agua. Esto podría sugerir que hay una recirculación o un flujo de retorno alrededor del rotor, lo cual es típico en configuraciones de flujo alrededor de geometrías complejas como el rotor Savonius. Para validar este resultado se comparará con la tabla 5, lo cual es -1.381 m/s, como se observa en la figura 31 la velocidad ya se mantiene casi constante.

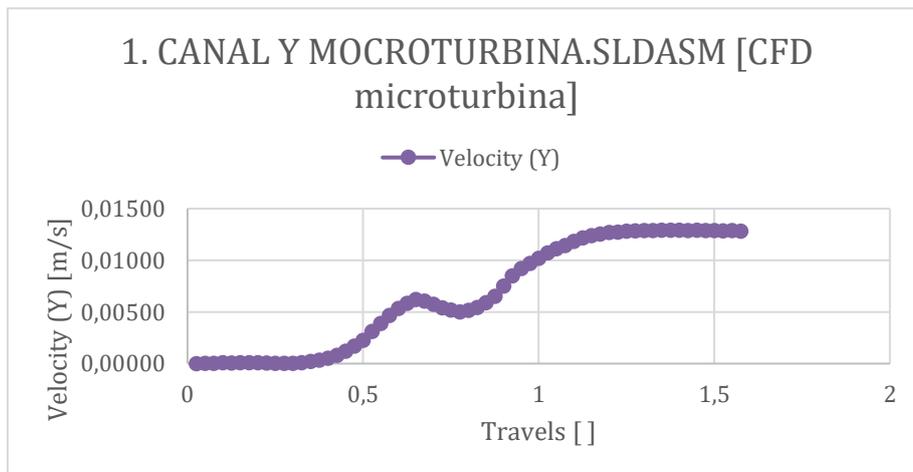
Figura 31: Comportamiento de la velocidad de arrastre del fluido en el rotor Savonius.



Fuente: Elaboración propia.

La figura 32 presenta el comportamiento de la velocidad de sustentación del fluido en el rotor Savonius, específicamente en la dirección Y. La figura muestra cómo estas componentes de velocidad varían en diferentes puntos del rotor, destacando las áreas donde la sustentación puede ser mayor o menor, pero hay un punto de velocidad constante en 0.013 m/s, tal y cual muestra la tabla 5.

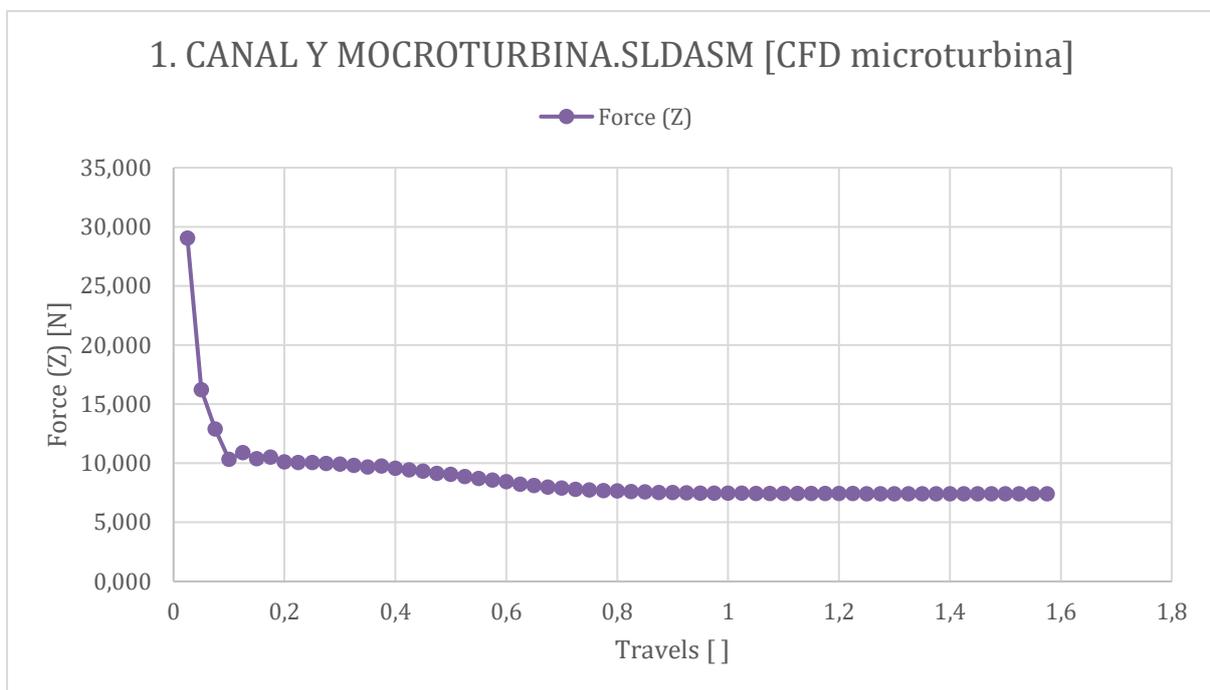
Figura 32: Comportamiento de la velocidad de sustentación del fluido en el rotor Savonius.



Fuente: Elaboración propia.

La figura 33 muestra la fuerza de arrastre, medida en newtons, aplicada sobre el rotor en diferentes posiciones. Los datos indican que la fuerza varía significativamente a lo largo de la simulación, lo cual puede ser resultado de las fluctuaciones en la velocidad del agua y la presión alrededor del rotor, pero se mantiene constante en 7.416 N como se muestra en la tabla 5 y figura 33. Esta información es crucial indicando que puede soportar las fuerzas dinámicas a las que está sometido sin comprometer su integridad estructural.

Figura 33: Fuerza de arrastre Vs Velocidad [m/s].

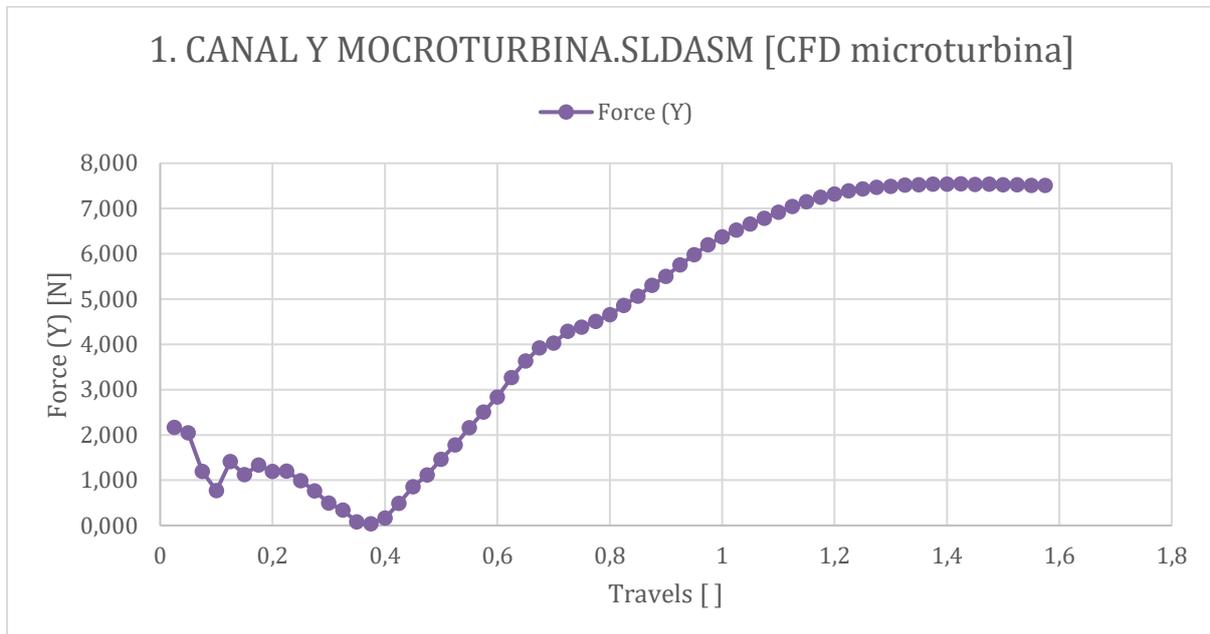


Fuente: Elaboración propia.

La figura 34 se detallan la distribución de la fuerza de sustentación en “Y”. La fuerza muestra variaciones significativas, con valores de 2 N a 7.5 N, indicando fluctuaciones en esas direcciones. La fuerza en Z también presenta variaciones, aunque su comportamiento es más estable. Pero teniendo una velocidad de 1.4 m/s adelante se mantiene constante, mediante la tabla 5 se puede validar la fuerza constante de 7.508 N. Esta fuerza es fundamental para entender cómo las diferentes orientaciones del rotor afectan la distribución de las fuerzas, permitiendo ajustes precisos en el diseño para mejorar la estabilidad y el

rendimiento del sistema.

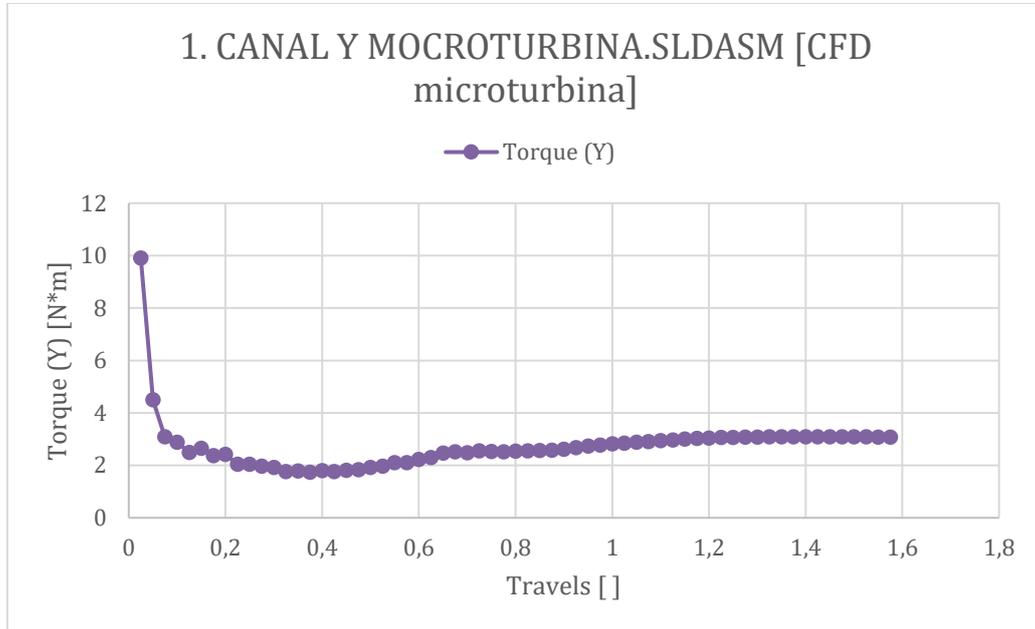
Figura 34: Fuerza de sustentación Vs Velocidad [m/s].



Fuente: Elaboración propia.

La figura 35 representa el momento de torsión en la dirección “Y”, medido en newton-metro. El torque se mantiene casi constante a la velocidad de 1.2 m/s teniendo un torque de 3.09 N*m, esto lo demuestra la figura 35 y la tabla 5. El análisis del torque es esencial para evaluar la eficiencia de la transmisión de potencia del rotor y su impacto en la estructura mecánica del sistema.

Figura 35: Torque Vs Velocidad [m/s].



Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo de esfuerzo axial se utilizará la ecuación 14 mencionado en el marco teórico:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Donde:

σ : Esfuerzo axial, [Pa o N/m²].

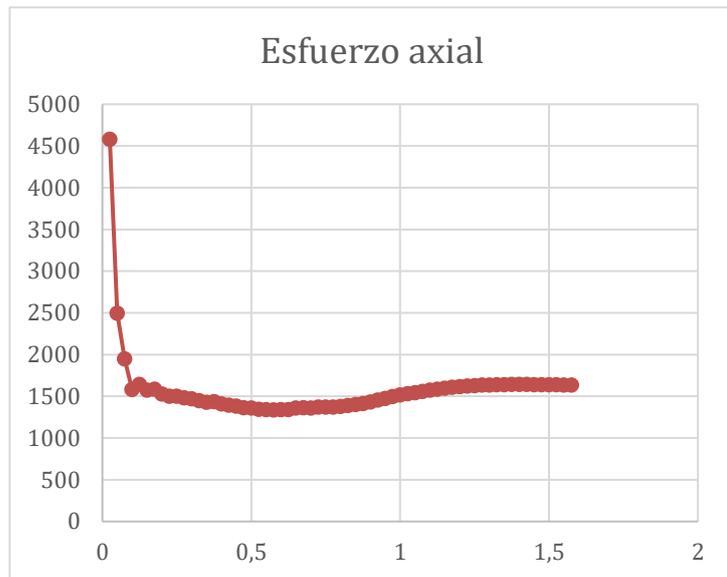
F : Fuerza, [N].

A : Área trasversal del material, [0.0069 m²].

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{31.61}{0.0069} = 4581.15$$

Figura 36: Esfuerzo.

Velocidad del agua	Force [N]	Esfuerzo [Pa]
0.025	31.61	4581.25201
0.05	17.23	2497.47768
0.075	13.46	1950.77058
0.1	10.91	1580.58315
0.2	10.54	1527.06561
0.3	10.14	1469.48177
0.4	9.74	1411.14628
0.5	9.37	1358.40431
0.6	9.26	1341.80893
0.7	9.38	1359.148
0.8	9.52	1379.71761
0.9	9.88	1432.59082
1	10.46	1515.88779
1.1	10.85	1572.49455
1.2	11.16	1617.16409
1.3	11.29	1636.01846
1.4	11.33	1641.48497
1.5	11.31	1639.03273
1.525	11.31	1638.94562
1.55	11.29	1636.81103
1.575	11.30	1637.09111



Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo de momento de inercia en el eje del rotor de la microturbina se utilizará la ecuación 16, ya mencionada en el marco teórico:

$$I = \frac{\pi \times d^4}{64}$$

Donde:

I : Momento de inercia, [m⁴].

d : Diámetro del eje, [2mm=0.002m].

$$I = \frac{\pi \times d^4}{64} = \frac{\pi \times 0.02^4}{64} = 7.85 \times 10^{-13} \text{ m}^4$$

Para representar el torque en el rotor de la microturbina hidráulica Savonius se tomará los resultados de la simulación realizada en SolidWorks:

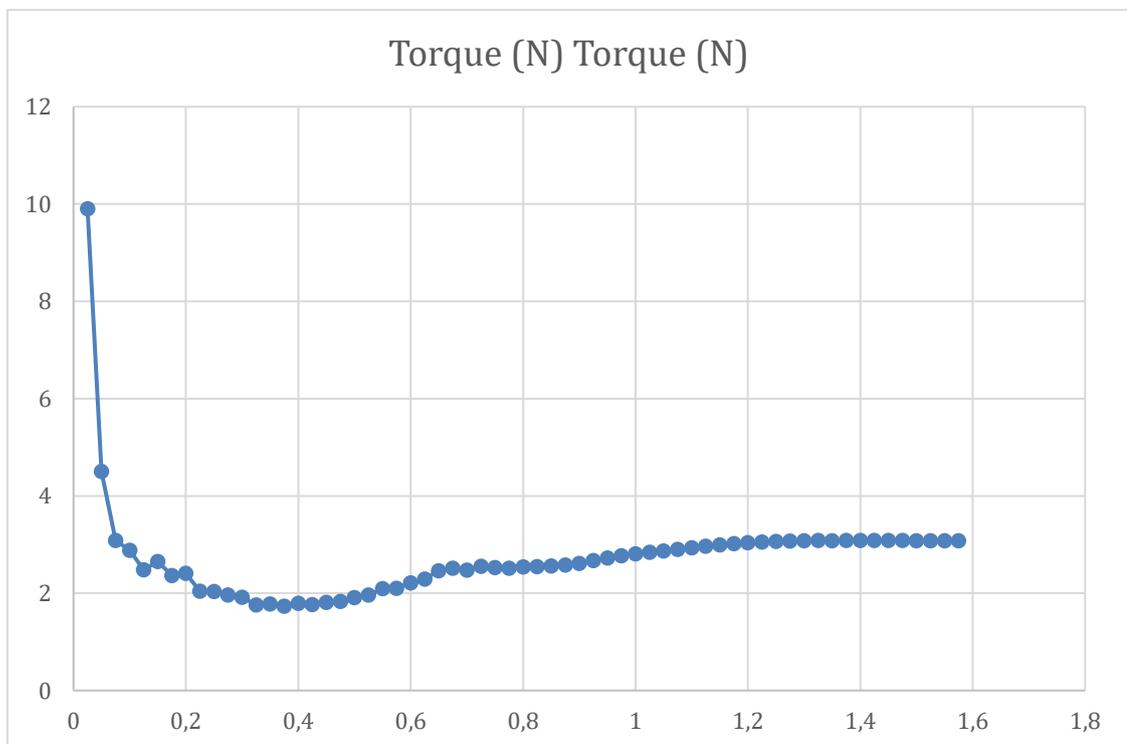
Tabla 6: Torque resultado de SolidWorks.

Velocidad del agua (m/s)	Torque (N)
0.025	9.9029959
0.05	4.50016102
0.075	3.08562209
0.1	2.88283765
0.2	2.41174784
0.3	1.92078661
0.4	1.79207056
0.5	1.91199349
0.6	2.21581665
0.7	2.47465094
0.8	2.53907025
0.9	2.61613856

1	2.81335671
1.1	2.93425683
1.2	3.03786152
1.3	3.07634235
1.4	3.08681982
1.425	3.08820457
1.45	3.0835827
1.475	3.08586518
1.5	3.08229924
1.525	3.08259773
1.55	3.07709464
1.575	3.07920133

Fuente: Elaboración propia.

Figura 37: Torque en el rotor de la microturbina Savonius.



Fuente: Elaboración propia.

El esfuerzo de flexión se calcula con la ecuación 17:

$$\sigma_b = \frac{M \times y}{I}$$

Donde:

σ_b : Esfuerzo de flexion, [Pa o N/m²].

M : Momento Flector, [N.m].

y : Distancia del eje, [18 cm=0.18m].

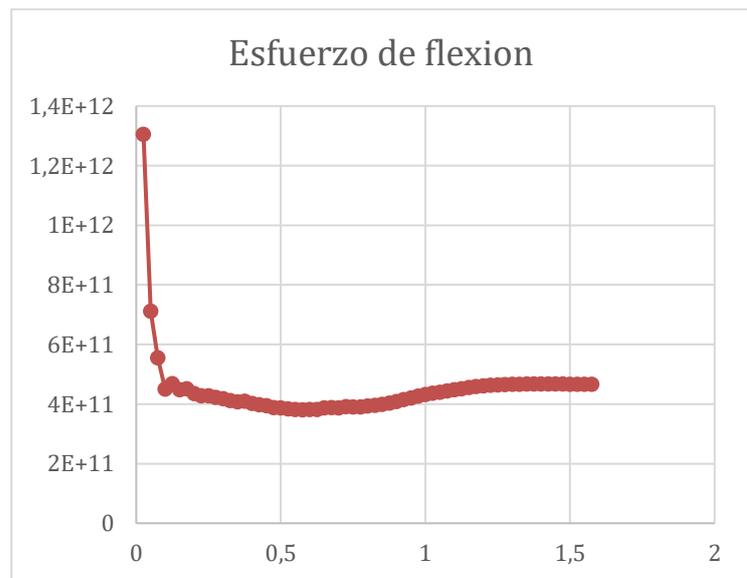
I : Momento de inercia, [7.85x10⁻¹³m⁴].

Para el calculo del momento flector se aplicará $M=Fx_d$, $M=11.296 \times 0.18=2.03328$ N·m

$$\sigma_b = \frac{M \times y}{I} = \frac{2.03328 \times 0.18}{7.85 \times 10^{-13}} = 4.66 \times 10^{11} Pa$$

Figura 38: Esfuerzo de Flexión.

Velocidad del agua	Force [N]	Esfuerzo de flexión [Pa]
0.025	31.61	1.30469E+12
0.05	17.23	7.11256E+11
0.075	13.46	5.5556E+11
0.1	10.91	4.50134E+11
0.2	10.54	4.34893E+11
0.3	10.14	4.18493E+11
0.4	9.74	4.0188E+11
0.5	9.37	3.8686E+11



0.6	9.26	3.82134E+11
0.7	9.38	3.87071E+11
0.8	9.52	3.9293E+11
0.9	9.88	4.07987E+11
1	10.46	4.31709E+11
1.2	11.16	4.60552E+11
1.3	11.29	4.65921E+11
1.4	11.33	4.67478E+11
1.5	11.31	4.6678E+11
1.525	11.31	4.66755E+11
1.55	11.29	4.66147E+11
1.575	11.30	4.66227E+11

Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo de esfuerzo de torsión se realizará mediante la ecuación 18, mencionado en el marco teórico:

$$\tau_t = \frac{T \times r}{J}$$

Donde:

τ_t : Esfuerzo de torsión, [Pa o N/m²].

T : Torque aplicado, [N.m].

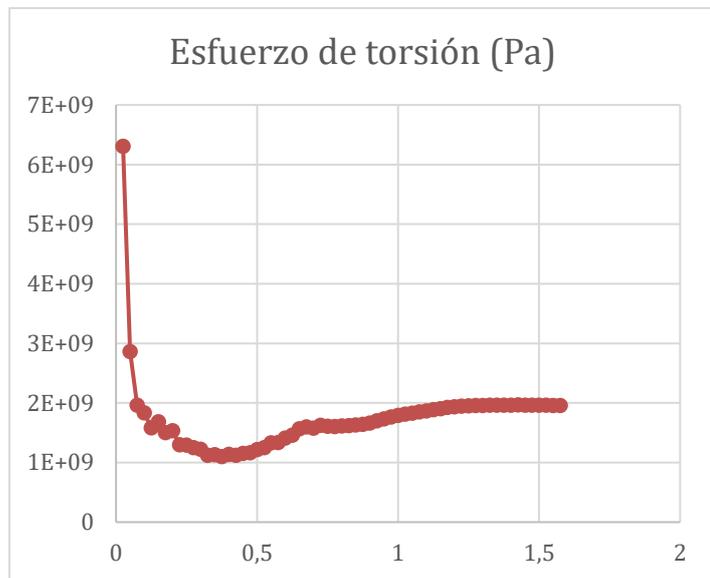
r : Radio del eje, [0.01m].

J : Momento polar por inercia, [m⁴].

$$\tau_t = \frac{T \times 0.001}{\frac{\pi \times d^4}{32}} = \frac{T \times 0.001}{\frac{\pi \times 0.002^4}{32}} = \frac{9.9029 \times 0.001}{1.57 \times 10^{-12}} = 6307640703 \text{ Pa}$$

Figura 39: Esfuerzo de torsión.

Velocidad del agua (m/s)	Torque (N)	Esfuerzo de torsión (Pa)
0.025	9.902995904	6307640703
0.05	4.50016102	2866344599
0.075	3.085622094	1965364391
0.1	2.882837654	1836202327
0.2	2.411747843	1536145123
0.3	1.920786608	1223430961
0.4	1.792070563	1141446218
0.5	1.911993488	1217830247
0.6	2.215816649	1411348184
0.7	2.474650942	1576210791
0.8	2.53907025	1617242198
0.9	2.616138557	1666330291
1	2.813356708	1791946948
1.1	2.934256835	1868953398
1.2	3.037861521	1934943644
1.3	3.076342353	1959453728
1.4	3.086819817	1966127272
1.5	3.08229924	1963247924
1.525	3.082597733	1963438047
1.55	3.077094643	1959932894
1.575	3.079201325	1961274730



Fuente: Elaboración propia.

La deformación angular se procederá a calcular mediante la ecuación 20 mencionado en el marco teórico.

$$\theta = \frac{T \times L}{G \times J}$$

Donde:

θ : Deformación angular, [rad].

T : Torque aplicado, [9.90 N.m].

L : Longitud del eje, [18 cm=0.18m].

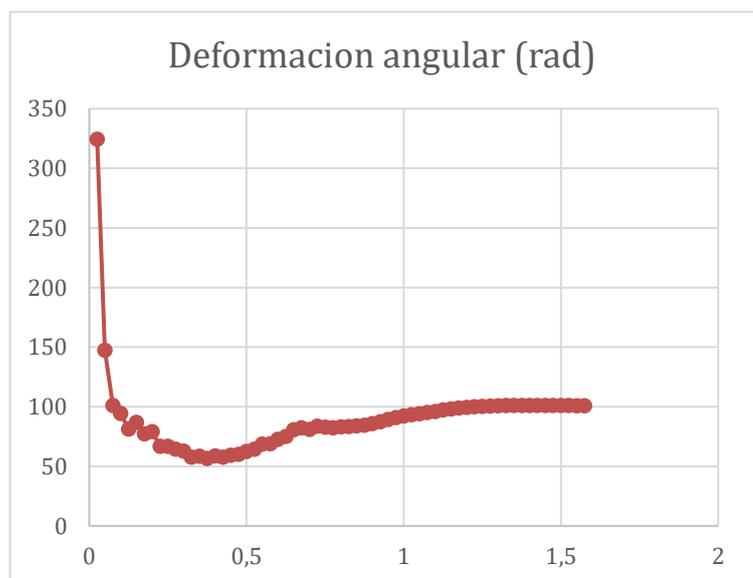
G : Módulo de rigidez del material, [3500 000 000 Pa o N/m²]

J : Momento polar por inercia, [1.57x10⁻¹² m⁴].

$$\theta = \frac{T \times L}{G \times J} = \frac{9.90 \times 0.18}{3500\,000\,000 \times 1.57 \times 10^{-12}} = 324.39 \text{ rad}$$

Figura 40: Deformación angular.

Velocidad del agua (m/s)	Torque (N)	Deformación angular (rad)
0.025	9.9029959	324.39295
0.05	4.50016102	147.412008
0.075	3.08562209	101.075883
0.1	2.88283765	94.4332625
0.2	2.41174784	79.0017492
0.3	1.92078661	62.9193065
0.5	1.91199349	62.6312698
0.6	2.21581665	72.5836209
0.7	2.47465094	81.0622693



0.8	2.53907025	83.1724559
0.9	2.61613856	85.6969864
1	2.81335671	92.1572716
1.1	2.93425683	96.1176033
1.2	3.03786152	99.5113874
1.3	3.07634235	100.771906
1.4	3.08681982	101.115117
1.5	3.08229924	100.967036
1.525	3.08259773	100.976814
1.55	3.07709464	100.796549
1.575	3.07920133	100.865558

Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo del pandeo del rotor de la microturbina hidráulica Savonius, teniendo en cuenta que el material es ácido poliláctico (PLA), se realiza con la ecuación 21:

$$\sigma_p = \frac{\pi^2 \times E}{(L \times r)^2}$$

Donde:

σ_p : Esfuerzo crítico de pandeo, [Pa o N/m²].

E : Módulo de elasticidad del material, [3500 000 000 Pa o N/m²].

L : Longitud del elemento, [0.18 m].

r : Radio de giro de la sección transversal, [0.03 m].

$$\sigma_p = \frac{\pi^2 \times E}{(L \times r)^2} = \frac{\pi^2 \times 3500\ 000\ 000}{(0.18 \times 0.03)^2} = 1.184 \times 10^{12} \text{ Pa.}$$

Para el cálculo del momento de inercia en el rotor para un cilindro sólido, el momento de inercia. La ecuación 22 es ampliamente utilizada en el diseño y análisis de sistemas rotacionales, como motores y turbinas.

$$I_r = \frac{1}{2} \times m_r \times R^2$$

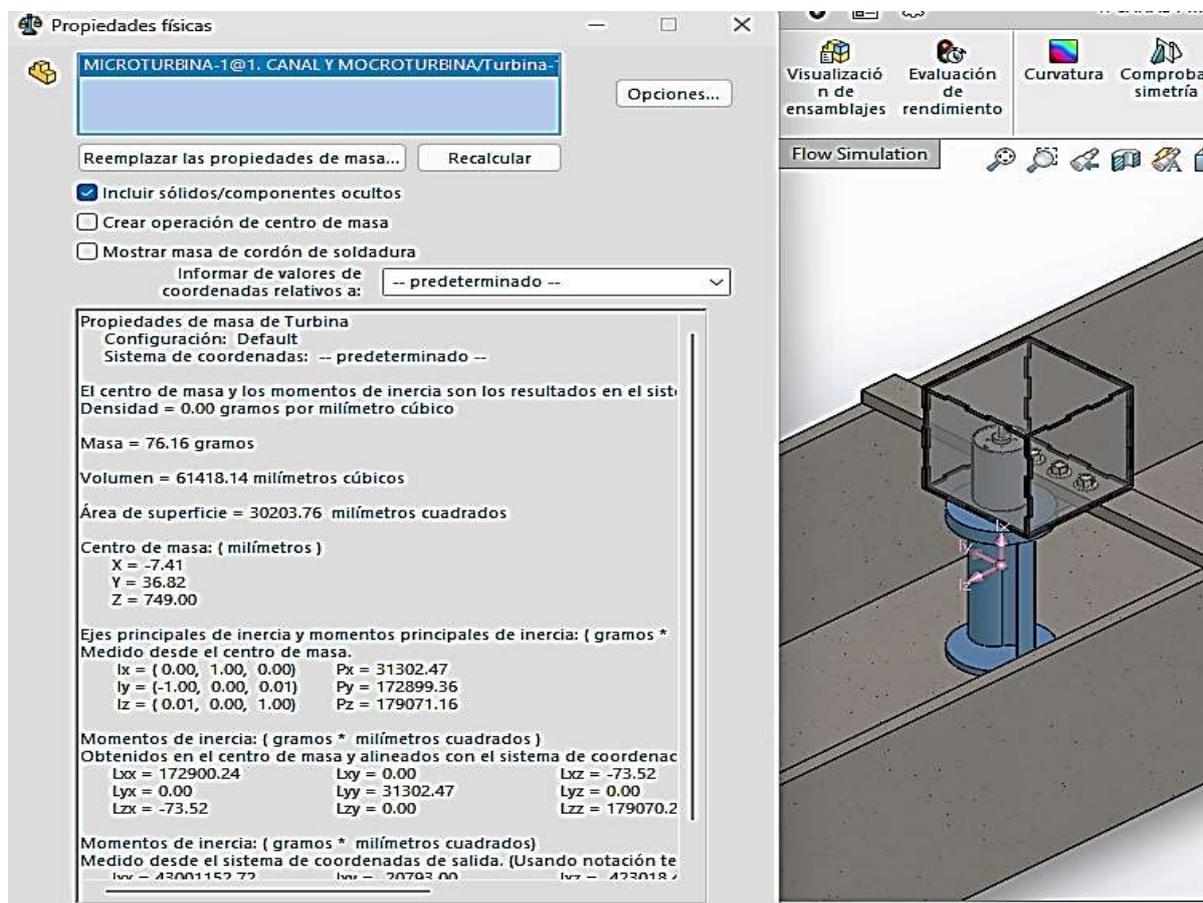
Donde:

I_r : Momento de inercia del rotor, [kg·m²].

m_r : Masa del rotor, [76.16 g = 0.07616kg].

R : Radio del rotor, [0.03 m].

Figura 41:Propiedades físicas del material PLA en el rotor Savonius.



Fuente: Elaboración propia.

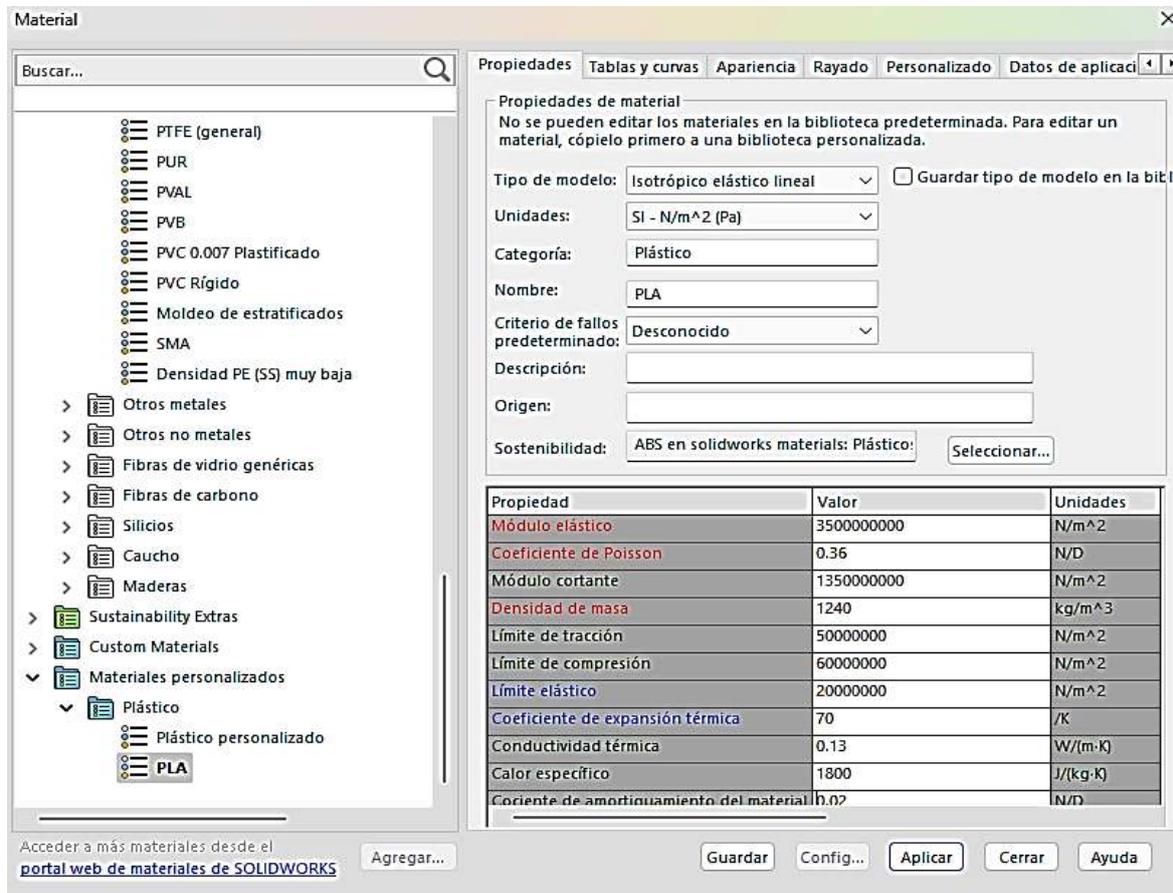
$$I_r = \frac{1}{2} \times m_r \times R^2 = \frac{1}{2} \times 0.07616 \times 0.03^2 = 0.000034272 \text{ m}^4$$

3.3.2. Pruebas de análisis estructural

El análisis estructural se centrará en evaluar la integridad y resistencia del rotor de la microturbina hidráulica Savonius bajo condiciones de carga, para eso se tomará el material PLA dado que el diseño es una microturbina hidráulica. Se analizarán las tensiones y deformaciones en los componentes clave del sistema, asegurando que el diseño puede soportar las fuerzas a las que estará sometido durante su operación.

En la figura 42 se presenta el proceso de creación y aplicación del material PLA en el software SolidWorks. Dado que el material PLA no está incluido en la biblioteca de materiales de SolidWorks, se creó un nuevo material utilizando datos obtenidos de diversas fuentes. Este procedimiento permitió modelar con precisión las propiedades del PLA y simular su comportamiento en el entorno de SolidWorks. Los datos específicos utilizados para esta creación incluyen propiedades mecánicas como el módulo de elasticidad, la resistencia a la tracción y el coeficiente de Poisson, asegurando que las simulaciones realizadas sean representativas del comportamiento real del material.

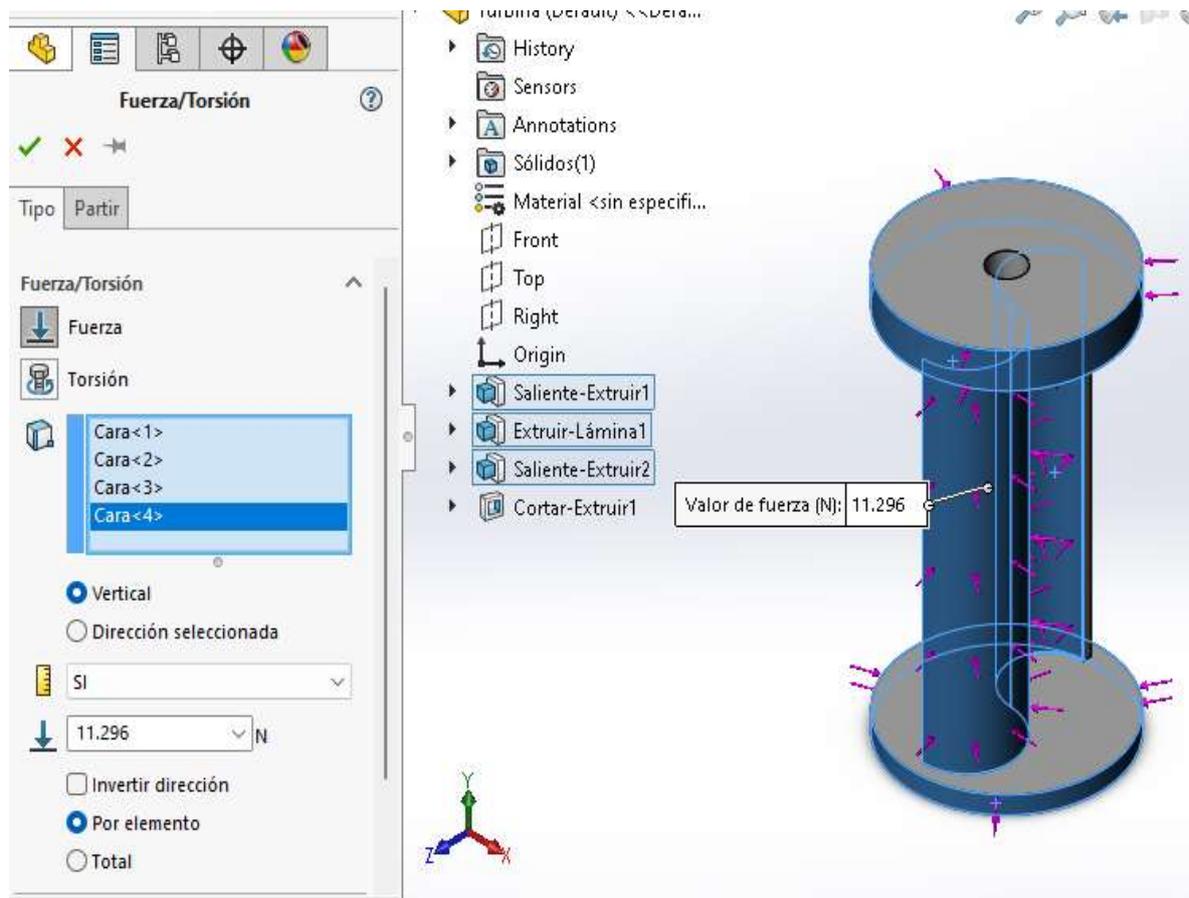
Figura 42: Creación y aplicación del material PLA en SolidWorks.



Fuente: Elaboración propia.

La figura 43 muestra la configuración de la fuerza de arrastre en el rotor, donde se tuvo como resultado de dicha fuerza de 11.296 N “tabla 5”. Esta fuerza fue calculada y obtenida mediante SolidWorks, asegurando una configuración precisa para la simulación del rotor bajo condiciones operativas específicas. Este valor de fuerza es crucial para determinar cómo se comportará el rotor bajo carga, influenciando factores como la resistencia al movimiento y el desgaste potencial.

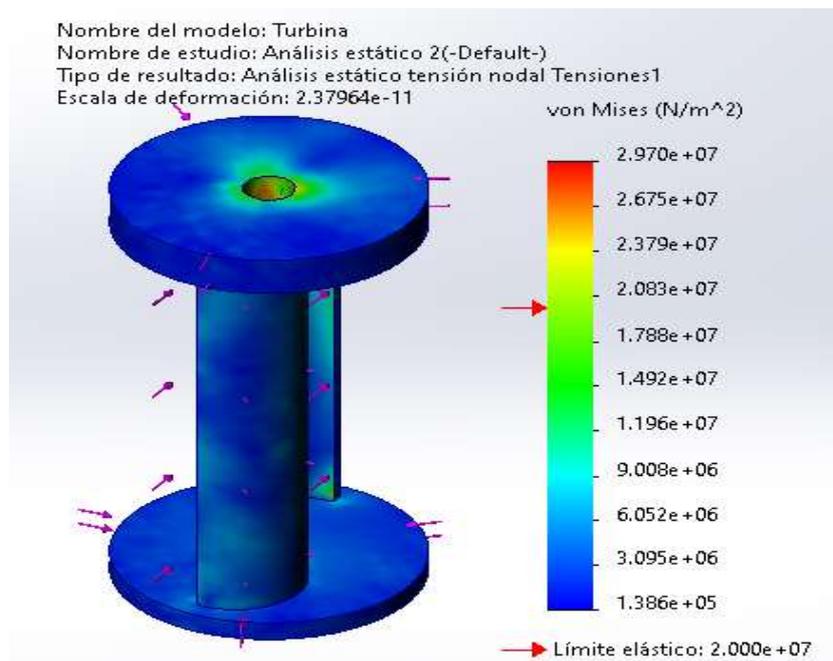
Figura 43: Configuración de fuerza de arrastre en el rotor.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 44 se muestra el análisis estático de la tensión nodal utilizando el criterio de Von Mises. Los resultados obtenidos indican que la tensión máxima es de 2.970×10^7 Pa, la tensión intermedia es de 1.492×10^7 Pa y la tensión mínima es de 1.386×10^5 Pa. Estos valores reflejan cómo se distribuyen las tensiones en los nodos del modelo, permitiendo identificar áreas críticas que podrían estar sujetas a fallas o deformaciones excesivas.

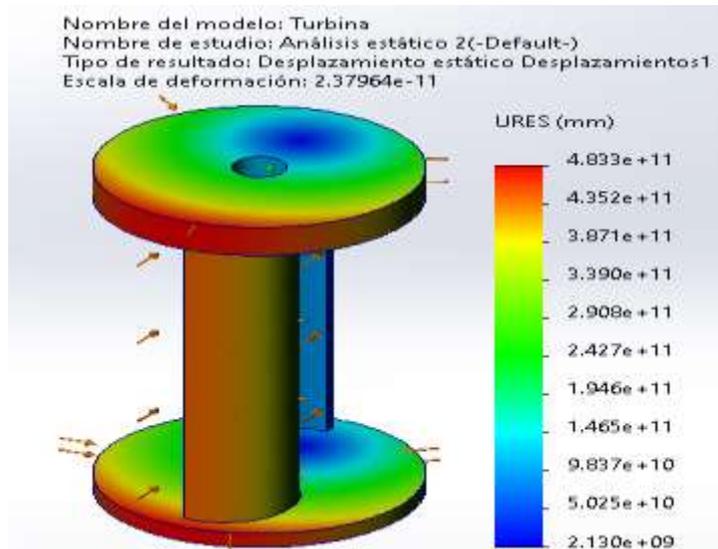
Figura 44: Análisis estático tensión nodal.



Fuente: Elaboración propia.

La figura 45 presenta el análisis estático de desplazamiento, mostrando que el desplazamiento máximo (Ures) es de 4.833×10^{11} mm, el desplazamiento intermedio es de 2.427×10^{11} mm y el desplazamiento mínimo es de 2.130×10^9 mm. Este análisis es fundamental para entender cómo se desplaza el material o estructura bajo carga, proporcionando una visión clara de cómo la estructura se deforma y asegurando que los desplazamientos estén dentro de los límites aceptables para la aplicación específica.

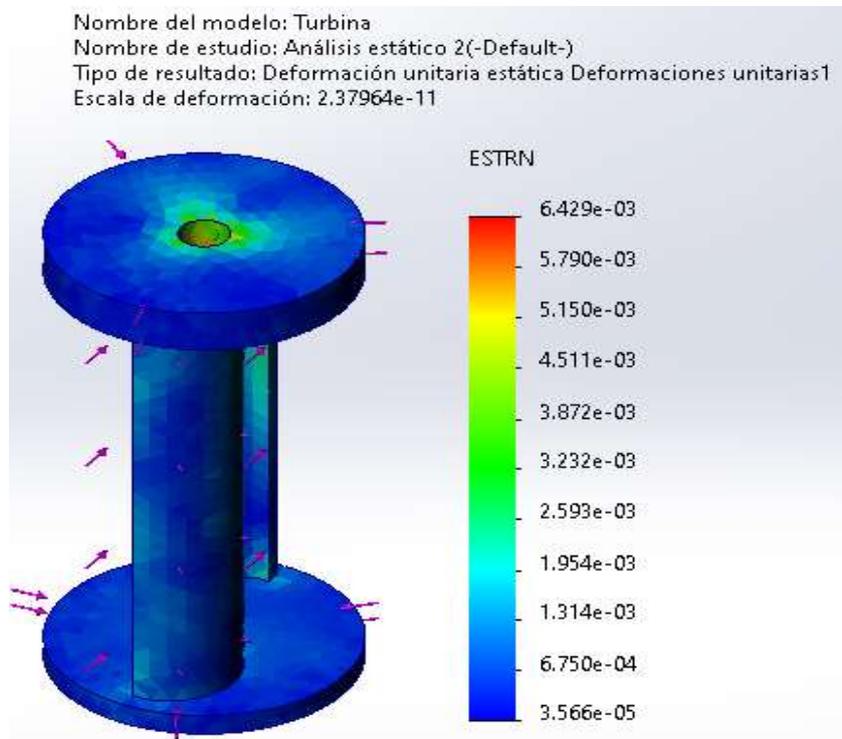
Figura 45: Análisis estático, desplazamiento.



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, la figura 46 muestra el análisis estático de deformación unitaria (ESTRN), donde se observa que la deformación unitaria máxima es de 6.429×10^{-3} , la deformación unitaria intermedia es de 3.232×10^{-3} y la deformación unitaria mínima es de 3.566×10^{-5} . Este análisis revela cómo se deforma el material en términos de elongación o contracción bajo carga, ayudando a determinar la capacidad del material para resistir deformaciones sin fallar.

Figura 46: Análisis estático, deformación unitaria.



Fuente: Elaboración propia.

IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1. Discusión

- El diseño de la microturbina hidráulica Savonius tipo vertical no solo cumple con los requisitos teóricos, sino que también representa un avance significativo en la implementación de soluciones de energía renovable a pequeña escala.
- La configuración inicial de la simulación CFD con una velocidad del fluido de 1.5 m/s mostró que la distribución de presión en el rotor varía significativamente, con presiones altas de 103030.25 Pa en las áreas de impacto directo del fluido y presiones bajas de 101206.83 Pa en las zonas de flujo alrededor de las palas. Esta variación de presión es esencial para entender las fuerzas actuantes en el rotor y su eficiencia de conversión de energía.
- El análisis estructural utilizando el material PLA demostró que el diseño puede soportar las condiciones de carga durante su operación. La fuerza de arrastre en el rotor, calculada en 11.296 N, fue crucial para determinar la resistencia al movimiento y el desgaste potencial. El análisis estático de tensión nodal, basado en el criterio de Von Mises, identificando áreas críticas susceptibles a fallas o deformaciones excesivas.
- El análisis estático de desplazamiento mostró que los desplazamientos estén dentro de límites aceptables para la operación segura del rotor. Además, el análisis de deformación unitaria reveló una deformación unitaria máxima de 6.429×10^{-3} , confirmando la capacidad del material para resistir deformaciones sin fallar.
- Estos resultados integrales proporcionan una visión clara y detallada de la viabilidad y eficiencia del diseño de la microturbina hidráulica Savonius. La combinación de un diseño geométrico optimizado, evaluaciones precisas de simulación CFD y un análisis estructural exhaustivo asegura que el rotor puede operar de manera eficiente y

segura, ofreciendo una base sólida para su implementación en aplicaciones prácticas de energía renovable.

4.2. Conclusiones

- En el objetivo uno determinar los parámetros geométricos de la microturbina hidráulica Savonius, para la elección del diseño óptimo, validada a través de una matriz de decisión basada en parámetros críticos, aseguró una construcción robusta. Los cálculos precisos de relación de superposición $R_s:0.167$, relación de aspecto $\alpha_{RA}: 1.91$ y áreas de barrido 0.0069 m^2 respaldaron la capacidad del prototipo para maximizar la conversión de energía cinética del agua en energía mecánica.
- La microturbina hidráulica tipo Savonius ha sido meticulosamente diseñada y modelado en 3D usando software CAD, considerando cada componente esencial para su funcionamiento óptimo. El canal y la base, de $80 \times 25 \times 15 \text{ cm}$, dirigen eficientemente el flujo de agua hacia el rotor, garantizando la estabilidad del sistema, sosteniendo el rotor, que mide 0.06 m de diámetro y 0.115 m de altura, permitiendo la conversión eficiente de la energía cinética del agua en energía mecánica. El generador eléctrico DC, protegido por una cápsula, convierte esta energía mecánica en electricidad de corriente continua, asegurando un funcionamiento seguro y efectivo en condiciones reales. Este diseño integral y bien fundamentado no solo cumple con los cálculos preliminares y los requisitos teóricos, sino que también representa un avance significativo en la implementación de soluciones de energía renovable a pequeña escala, utilizando tecnologías simples y eficientes como la turbina Savonius.
- La simulación del comportamiento estructural y fluido de la turbina hidráulica Savonius utilizando SolidWorks y análisis de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) se ha encontrado varios aspectos cruciales para su diseño y operación eficiente. La configuración inicial de la simulación CFD con una velocidad del fluido de 1.5 m/s permitió evaluar de manera precisa el comportamiento del fluido alrededor del

rotor.

Se observó que la distribución de presión en el rotor varía significativamente, con presiones altas de 103030.25 Pa en las áreas de impacto directo del fluido y presiones bajas de 101206.83 Pa en las zonas de flujo alrededor de las palas. La distribución de velocidad mostró que las zonas de alta velocidad se localizan en los bordes de las palas.

Los resultados de los cálculos indicaron un coeficiente de arrastre (C_d) de 0.70 y un coeficiente de sustentación (C_l) de 0.469. Además, el coeficiente de potencia teórica (C_{pmax}) se calculó en 0.369, resultando en una potencia mecánica de 1.26 W. Los análisis de esfuerzos revelaron un esfuerzo axial de 4581.15 Pa, un esfuerzo de flexión extremadamente alto de 4.66×10^{11} Pa, y un esfuerzo de torsión dependiente del torque aplicado. La deformación angular fue considerable con 324.39 rad, mientras que el esfuerzo crítico de pandeo alcanzó 1.184×10^{12} Pa. El momento de inercia del rotor fue determinado en 0.000034272 m^4 .

El análisis estructural del rotor de la microturbina hidráulica Savonius, utilizando el material PLA, demostró la capacidad del diseño para soportar las condiciones de carga durante su operación. La fuerza de arrastre en el rotor, calculada en 11.296 N, fue crucial para determinar la resistencia al movimiento y el desgaste. El análisis estático de tensión nodal, utilizando el criterio de Von Mises, mostró una tensión máxima de 2.970×10^7 Pa, una tensión intermedia de 1.492×10^7 Pa y una tensión mínima de 1.386×10^5 Pa, identificando áreas críticas susceptibles a fallas o deformaciones excesivas. El análisis estático de desplazamiento reveló un desplazamiento máximo de 4.833×10^{11} mm, un desplazamiento intermedio de 2.427×10^{11} mm y un desplazamiento mínimo de 2.130×10^9 mm, asegurando que los desplazamientos estén dentro de límites aceptables. Además, el análisis de deformación unitaria mostró una deformación unitaria máxima de 6.429×10^{-3} , una intermedia de 3.232×10^{-3} y una mínima de 3.566×10^{-5} , confirmando la capacidad del material para resistir deformaciones sin fallar.

V. REFERENCIAS

- [1] A. Kumar and R. P. Saini, "Performance analysis of a Savonius hydrokinetic turbine having twisted blades," *Renew Energy*, vol. 108, pp. 502–522, 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.03.006.
- [2] A. Gharib Yosry, A. Fernández-Jiménez, E. Álvarez-Álvarez, and E. Blanco Marigorta, "Design and characterization of a vertical-axis micro tidal turbine for low velocity scenarios," *Energy Convers Manag*, vol. 237, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114144.
- [3] S. Hadi *et al.*, "Performance of Savonius Horizontal Axis Water Turbine in Free Flow Vertical Pipe as Effect of Blade Overlap," *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences Journal homepage*, vol. 58, pp. 219–223, 2019, [Online]. Available: www.akademiabaru.com/arfmts.html
- [4] S. Hadi *et al.*, "Experimental Study of The Effects of Blade Twist on the Performance of Savonius Water Turbine in Water Pipe," *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences Journal homepage*, vol. 57, pp. 202–207, 2019, [Online]. Available: www.akademiabaru.com/arfmts.html
- [5] M. S. M. Shamsuddin, N. M. Kamaruddin, and Z. Mohamed-Kassim, "The influence of material on the power performance of Savonius turbines in wind and water applications," *Ocean Engineering*, vol. 266, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.112638.
- [6] U. Tun Hussein Onn Malaysia *et al.*, "Experimental Study of the Performance of the Elliptical Savonius Turbine and New Design for Blade Shape Using A 3D Printing Technology," 2019. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/336242916>
- [7] T. C. Popescu, C. Dumitrescu, and I. Bordeasu, "Aspects Concerning the Use of Plastics in Developing Test Stands for Experimental Models of Hydraulic Turbine Blades and Rotors," 2016. [Online]. Available: <http://www.revmaterialeplastice.ro>
- [8] A. I. Rahimi, D. C. Anindito, D. Danardono, and S. Hadi, "The Straight Blade Application to Increasing the Performance of the Savonius Water Turbine (Simulation Study)," *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, pp. 243–256, 2020, doi: 10.1007/978-981-15-4481-1_24/COVER.
- [9] T. Uchiyama, S. Honda, and T. Degawa, "Development of a propeller-type hollow micro-hydraulic turbine with excellent performance in passing foreign matter," *Renew*

- Energy*, vol. 126, pp. 545–551, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.renene.2018.03.083.
- [10] J. D. Betancur Gómez, “Evaluación de prototipos de rotores de turbinas hidrocineéticas de eje horizontal con diferentes perfiles hidrodinámicos con posible aplicación en picogeneración,” Institución Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia, 2020.
- [11] D. K. Ventura Falla, “Diseño de una turbina hidrocineética sumergible para la generación de Energía Eléctrica en el caserío Pampa Bernilla, Distrito de Salas, Provincia Lambayeque,” Universidad Señor de Sipán, Pimentel, Lambayeque, 2018.
- [12] K. L. Chacón Gil, “Metodología para la predicción del coeficiente de potencia de una turbina hidrocineética tipo Savonius utilizando dinámica de fluidos computacional,” Universidad Santo Tomas. Accessed: Mar. 10, 2024. [Online]. Available: <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/15655>
- [13] “Rotor Savonius - Wikipedia, la enciclopedia libre.” Accessed: Mar. 10, 2024. [Online]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Rotor_Savonius
- [14] E. A. Salazar-Marín and A. F. Rodríguez-Valencia, “Design, assembly and experimental tests of a Savonius type wind turbine,” *Redalyc*, vol. 24, Sep. 2019, Accessed: Mar. 10, 2024. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/journal/849/84961239007/html/>
- [15] D. Andrea, V. Beleño, B. Daniel, and P. Guerrero, “Simulación de rotores tipo savonius adaptando en sus alabes un perfil NACA,” Universidad Antonio Nariño, Barranquilla, Colombia, 2020.
- [16] B. Deda Altan and G. S. Gultekin, “Investigation of Performance Enhancements of Savonius Wind Turbines through Additional Designs,” *Processes*, vol. 11, no. 5. MDPI, May 01, 2023. doi: 10.3390/pr11051473.
- [17] N. B. Abarca Isuiza, “Optimización de los álabes de una turbina hidrocineética tipo horizontal,” Ingeniería Mecánica Eléctrica, Universidad Señor de Sipán, Pimentel, 2023. [Online]. Available: <https://orcid.org/0000-0002-5263-3219>
- [18] P. Beer Ferfinand, J. DeWolf T., D. Mazurek F., and R. E. Johnston Jr., *Mecánica de materiales*, Séptima edición., vol. 7.
- [19] R. G. Budynas, J. Keith. Nisbett, and J. Edward. Shigley, *Shigley’s mechanical engineering design*, Novena edición. New York: McGraw-Hill, 2011.
- [20] R. Clayton, “Deformación angular Ing. De minas Resistencia de materiales.”
- [21] R. Mott L., *Diseño de Elementos de Máquinas*, Cuarta edición. México: Pearson, 2004. [Online]. Available: <http://libreria-universitaria.blogspot.comwww.FreeLibros.com>
- [22] E. Santa Cruz, “Fundamentos financieros: el valor actual neto (VAN) | Conexión ESAN,” ESAN. Accessed: Mar. 10, 2024. [Online]. Available: <https://www.esan.edu.pe/conexion-esan/fundamentos-financieros-el-valor-actual->

neto-van

- [23] A. Sevilla Arias, "Tasa interna de retorno (TIR): ¿Qué es? Fórmula y ejemplos," economipedia. Accessed: Mar. 10, 2024. [Online]. Available: <https://economipedia.com/definiciones/tasa-interna-de-retorno-tir.html>
- [24] R. Dobaño, "Flujo de caja: qué es y cómo se calcula (2024)," Quipu blog. Accessed: Mar. 10, 2024. [Online]. Available: <https://getquipu.com/blog/flujo-de-caja-que-calcular-plantilla/>
- [25] P. Acosta, N. Gómez, and G. Márquez, "Evaluación de proyectos por medio del análisis costo beneficio," monografias. Accessed: Mar. 10, 2024. [Online]. Available: <https://www.monografias.com/trabajos99/evaluacion-proyectos-medio-del-analisis-costo-beneficio/evaluacion-proyectos-medio-del-analisis-costo-beneficio>

ANEXOS

Anexo 1: Resultado de las simulaciones

Velocidad del agua	Total Pressure [Pa]	Velocity [m/s]	Velocity (X) [m/s]	Velocity (Y) [m/s]	Velocity (Z) [m/s]	Force [N]	Force (X) [N]	Force (Y) [N]	Force (Z) [N]	Torque (X) [N*m]	Torque (Y) [N*m]	Torque (Z) [N*m]
0.025	102448.45	1.484	-0.00262	0.00000	-1.48136	31.61	12.287	2.162	29.044	2.220	9.902996	-0.2227
0.05	102420.44	1.483	-0.00307	0.00002	-1.47992	17.23	5.453	2.048	16.218	-1.252	4.500161	-0.0842
0.075	102420.87	1.482	-0.00342	0.00003	-1.47852	13.46	3.683	1.191	12.892	-0.661	3.085622	-0.0625
0.1	102421.08	1.481	-0.00384	0.00008	-1.47744	10.91	3.390	0.767	10.337	-0.296	2.882838	-0.0436
0.125	102418.12	1.480	-0.00423	0.00004	-1.47619	11.34	2.856	1.411	10.888	-0.750	2.483868	-0.0330
0.15	102416.73	1.478	-0.00503	0.00008	-1.47410	10.87	3.032	1.125	10.375	-0.515	2.650008	-0.0399
0.175	102412.96	1.476	-0.00592	0.00006	-1.47142	10.94	2.664	1.337	10.531	-0.685	2.362096	-0.0234
0.2	102410.30	1.473	-0.00693	0.00008	-1.46870	10.54	2.724	1.192	10.108	-0.563	2.411748	-0.0328
0.225	102407.94	1.471	-0.00786	0.00004	-1.46588	10.37	2.193	1.198	10.065	-0.524	2.039987	-0.0152
0.25	102405.60	1.468	-0.00884	0.00002	-1.46310	10.36	2.199	0.987	10.071	-0.372	2.036700	-0.0218
0.275	102402.21	1.464	-0.01025	0.00001	-1.45903	10.23	2.096	0.761	9.984	-0.185	1.962363	-0.0192
0.3	102398.66	1.461	-0.01162	0.00002	-1.45507	10.14	2.040	0.495	9.920	0.024	1.920787	-0.0255
0.325	102395.34	1.458	-0.01291	0.00008	-1.45127	9.98	1.824	0.338	9.809	0.151	1.760111	-0.0271
0.35	102392.48	1.454	-0.01419	0.00019	-1.44762	9.87	1.840	0.081	9.692	0.364	1.783224	-0.0303
0.375	102388.77	1.451	-0.01534	0.00031	-1.44405	9.91	1.762	0.039	9.757	0.408	1.732468	-0.0332
0.4	102384.06	1.447	-0.01699	0.00050	-1.43908	9.74	1.833	0.161	9.562	0.580	1.792071	-0.0354
0.425	102380.02	1.443	-0.01846	0.00078	-1.43437	9.63	1.776	0.487	9.453	0.848	1.763841	-0.0313
0.45	102377.39	1.439	-0.01979	0.00118	-1.42991	9.55	1.823	0.853	9.340	1.142	1.810121	-0.0311
0.475	102374.38	1.436	-0.02096	0.00169	-1.42571	9.40	1.852	1.115	9.147	1.362	1.833270	-0.0356
0.5	102371.43	1.432	-0.02195	0.00223	-1.42168	9.37	1.962	1.457	9.049	1.631	1.911993	-0.0388
0.525	102366.99	1.427	-0.02309	0.00311	-1.41623	9.29	2.055	1.777	8.881	1.869	1.965273	-0.0387
0.55	102362.85	1.423	-0.02413	0.00388	-1.41129	9.25	2.271	2.159	8.703	2.137	2.095292	-0.0416
0.575	102359.00	1.419	-0.02485	0.00464	-1.40674	9.22	2.318	2.504	8.569	2.367	2.101027	-0.0376

0.6	102355.63	1.415	-0.02558	0.00534	-1.40258	9.26	2.534	2.839	8.440	2.582	2.215817	-0.0375
0.625	102353.47	1.411	-0.02623	0.00581	-1.39898	9.25	2.672	3.267	8.226	2.868	2.292171	-0.0325
0.65	102350.42	1.407	-0.02721	0.00620	-1.39472	9.38	2.982	3.633	8.118	3.084	2.462932	-0.0357
0.675	102347.90	1.404	-0.02791	0.00604	-1.39129	9.41	3.090	3.923	7.976	3.253	2.513241	-0.0311
0.7	102345.11	1.402	-0.02821	0.00572	-1.38873	9.38	3.080	4.024	7.891	3.281	2.474651	-0.0268
0.725	102344.17	1.400	-0.02841	0.00540	-1.38684	9.47	3.234	4.287	7.806	3.429	2.553488	-0.0295
0.75	102343.36	1.399	-0.02841	0.00519	-1.38555	9.46	3.213	4.382	7.738	3.471	2.529962	-0.0259
0.775	102342.88	1.398	-0.02809	0.00499	-1.38463	9.47	3.200	4.510	7.682	3.542	2.517149	-0.0241
0.8	102343.19	1.398	-0.02790	0.00515	-1.38418	9.52	3.239	4.654	7.647	3.621	2.539070	-0.0244
0.825	102343.76	1.398	-0.02769	0.00541	-1.38398	9.59	3.248	4.859	7.600	3.744	2.549767	-0.0235
0.85	102344.54	1.398	-0.02763	0.00590	-1.38381	9.67	3.249	5.063	7.576	3.867	2.559405	-0.0224
0.875	102345.48	1.398	-0.02764	0.00651	-1.38374	9.77	3.263	5.306	7.523	4.017	2.578823	-0.0208
0.9	102346.27	1.399	-0.02797	0.00750	-1.38343	9.88	3.313	5.500	7.516	4.134	2.616139	-0.0209
0.925	102347.20	1.399	-0.02840	0.00848	-1.38308	10.04	3.395	5.757	7.494	4.294	2.672286	-0.0207
0.95	102347.80	1.398	-0.02889	0.00919	-1.38263	10.19	3.480	5.979	7.477	4.426	2.726514	-0.0220
0.975	102348.39	1.398	-0.02920	0.00970	-1.38225	10.33	3.549	6.196	7.463	4.558	2.773917	-0.0218
1	102348.82	1.398	-0.02951	0.01017	-1.38186	10.46	3.608	6.378	7.464	4.667	2.813357	-0.0224
1.025	102349.22	1.398	-0.02979	0.01072	-1.38154	10.56	3.658	6.524	7.460	4.754	2.845335	-0.0217
1.05	102349.54	1.398	-0.03000	0.01111	-1.38133	10.65	3.700	6.654	7.454	4.830	2.872594	-0.0218
1.075	102349.91	1.398	-0.03019	0.01143	-1.38113	10.75	3.750	6.784	7.451	4.908	2.904645	-0.0211
1.1	102350.35	1.398	-0.03042	0.01183	-1.38099	10.85	3.797	6.915	7.449	4.985	2.934257	-0.0214
1.125	102350.73	1.398	-0.03059	0.01215	-1.38077	10.95	3.850	7.042	7.444	5.062	2.967559	-0.0208
1.15	102350.97	1.398	-0.03079	0.01238	-1.38065	11.03	3.892	7.151	7.439	5.126	2.994113	-0.0208
1.175	102351.23	1.398	-0.03091	0.01252	-1.38051	11.10	3.935	7.250	7.434	5.186	3.021616	-0.0201
1.2	102351.36	1.398	-0.03103	0.01268	-1.38045	11.16	3.961	7.321	7.432	5.227	3.037862	-0.0203
1.225	102351.55	1.398	-0.03109	0.01272	-1.38036	11.21	3.988	7.392	7.429	5.271	3.055389	-0.0196
1.25	102351.63	1.398	-0.03115	0.01281	-1.38036	11.24	4.000	7.432	7.427	5.294	3.063028	-0.0197

1.275	102351.76	1.398	-0.03117	0.01283	-1.38030	11.27	4.016	7.470	7.426	5.318	3.073301	-0.0191
1.3	102351.81	1.398	-0.03121	0.01287	-1.38039	11.29	4.021	7.491	7.426	5.330	3.076342	-0.0194
1.325	102351.89	1.398	-0.03121	0.01287	-1.38037	11.31	4.032	7.516	7.426	5.346	3.082773	-0.0188
1.35	102351.90	1.398	-0.03124	0.01290	-1.38041	11.31	4.031	7.524	7.426	5.350	3.081899	-0.0189
1.375	102351.99	1.398	-0.03123	0.01289	-1.38042	11.33	4.040	7.540	7.426	5.360	3.087614	-0.0184
1.4	102351.97	1.398	-0.03126	0.01290	-1.38048	11.33	4.039	7.540	7.424	5.360	3.086820	-0.0186
1.425	102352.01	1.398	-0.03123	0.01287	-1.38046	11.33	4.041	7.547	7.422	5.366	3.088205	-0.0180
1.45	102351.97	1.398	-0.03124	0.01290	-1.38053	11.32	4.035	7.534	7.421	5.357	3.083583	-0.0182
1.475	102352.05	1.398	-0.03121	0.01286	-1.38055	11.32	4.038	7.537	7.419	5.359	3.085865	-0.0175
1.5	102352.00	1.398	-0.03123	0.01287	-1.38062	11.31	4.033	7.524	7.418	5.351	3.082299	-0.0178
1.525	102352.03	1.398	-0.03119	0.01284	-1.38063	11.31	4.033	7.524	7.417	5.352	3.082598	-0.0170
1.55	102351.97	1.398	-0.03120	0.01287	-1.38068	11.29	4.025	7.506	7.416	5.340	3.077095	-0.0172
1.575	102352.02	1.398	-0.03116	0.01281	-1.38069	11.30	4.028	7.508	7.416	5.342	3.079201	-0.0165

NOMBRE DEL TRABAJO

**DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA MICROT
URBINA HIDRÁULICA SAVONIUS TIPO V
ERTICAL PARA CANAL HIDRÁULICO DE
80X**

AUTOR

**FLAVIO JOE y YUEN KEYNES BELTRAN S
ANCHEZ y LOPEZ BRAVO**

RECUENTO DE PALABRAS

12126 Words

RECUENTO DE CARACTERES

66042 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

74 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

11.8MB

FECHA DE ENTREGA

Sep 24, 2024 4:33 AM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Sep 24, 2024 4:35 AM GMT-5

● **15% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 12% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 8% Base de datos de trabajos entregados
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Coincidencia baja (menos de 8 palabras)
- Material citado



**ACTA DE CONTROL DE REVISIÓN DE
SIMILITUD DE LA INVESTIGACIÓN**

Código:	F3.PP2-PR.02
Versión:	02
Fecha:	18/04/2024
Hoja:	1 de 1

Yo, **Silvia Yvone Gastiaturú Morales**, Coordinadora de Investigación del Programa de Estudios de Ingeniería Mecánica Eléctrica, he realizado el control de originalidad de la investigación, el mismo que está dentro de los porcentajes establecidos para el nivel de Pregrado, según la Directiva de similitud vigente en USS; además certifico que la versión que hace entrega es la versión final de la Trabajo de Investigación titulado: **DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA MICROTURBINA HIDRÁULICA SAVONIUS TIPO VERTICAL PARA CANAL HIDRÁULICO DE 80X25X15 CM** elaborado por el (los) Bachiller(es):

BELTRAN SANCHEZ FLAVIO JOE

LOPEZ BRAVO YUEN KEYNES

Se deja constancia que la investigación antes indicada tiene un índice de similitud del **15%**, verificable en el reporte final del análisis de originalidad mediante el software de similitud TURNITIN.

Por lo que se concluye que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio y cumple con lo establecido en la Directiva sobre índice de similitud de los productos académicos y de investigación vigente.

Pimentel, 24 de setiembre de 2024

Dra. Gastiaturú Morales Silvia Yvone

Coordinador de Investigación

DNI N° 16481433